



ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA

INFORME CIENTÍFICO-TÉCNICO No. 17 CDU 621.372.2 RC-MOS:612.813

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
TÉCNICA FUNDAMENTAL

OCTUBRE DE 1977

ROBERT W. NEWCOMB

LINEAS MOS DE TIPO NEURISTOR

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA

INFORME CIENTIFICO-TECNICO

No. 17

LINEAS MOS DE TIPO NEURISTOR

ROBERT W. NEWCOMB

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Programa de Matemática Aplicada
Universidad de Maryland, EE.UU.A.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
TÉCNICA FUNDAMENTAL DE LA ACC

DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES DE LA ACC

La Habana, octubre de 1977

Líneas MOS de tipo neuristor

ROBERT W. NEWCOMB

RESUMEN. Se considera una línea RC-MOS que tiene todas las características de los neuristores, tales como los define Crane. Para ello, se deducen y discuten las ecuaciones de difusión no lineales que describen las estructuras distribuidas. Se presentan tanto la evidencia experimental correspondiente como algunas extensiones.

ABSTRACT. An MOS-RC ^{line} is considered which has all the properties of neuristors, as defined by Crane. For this the nonlinear diffusion equations describing distributed structures are derived and discussed. Experimental evidence is presented as well as extensions.

*Voy a nombrar las cosas, los sonoros
Altos que ven el festejar del viento [1]*

1. INTRODUCCIÓN

En su disertación de Ph.D. [2] [3] Crane introdujo el concepto de neuristor, que define [2, p. iii] "como un dispositivo que tiene la forma de un canal unidimensional por el cual pueden fluir señales, que toman la forma de descargas que se propagan teniendo las siguientes propiedades: 1. Umbral de estimulabilidad, 2. Velocidad uniforme de propagación, 3. Propagación sin atenuación, 4. Período refractario inmediatamente posterior al paso de la descarga, tras el cual el neuristor puede permitir el paso de una descarga." En aquella época, aunque se sugirieron varias posibilidades, no existían realizaciones en forma electrónica, y, por consiguiente, se acuñó el nombre de "neuristor" [4].

Sin embargo, a medida que se difundía el conocimiento del concepto, aparecieron varias realizaciones electrónicas [5]-[26] así como caracterizaciones y esquemas electrónicos relacionados [27]-[56]. Y, como el neuristor, por la definición dada más arriba, posee muchas de las propiedades de los axones y células nerviosos, resulta que los distintos modelos de estos últimos [57]-[81] son dispositivos semejantes a neuristores. Debe hacerse énfasis, sin embargo, en el hecho de que el neuristor no se concibió como un modelo del axón nervioso sino como un dispositivo para la construcción de computadoras, pues se ha demostrado que es capaz de llevar a cabo todas las funciones lógicas digitales [2]-[82]-[84]. En consecuencia, para que sea útil en el contexto de la construcción de computadoras, deberá poderse disponer de neuristores compatibles con la tecnología de los circuitos integrados en gran escala;

NOTA: El Prof. R. W. Newcomb pertenece al Departamento de Ingeniería Eléctrica y al Programa de Matemática Aplicada de la Universidad de Maryland, College Park, Maryland 20742, EE.U.U.A. La presente memoria ha sido confeccionada expresamente y recoge resultados de sus investigaciones, que han tenido, en parte, el apoyo económico de los subsidios Nos. ENG-03327 y GF-42178 y se han producido en el marco del Programa Conjunto Polaco-Norteamericano sobre "Sistemas Microelectrónicos Activos". Cualesquiera opiniones, hallazgos, conclusiones o recomendaciones son del autor y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la NSF. La presente traducción se debe a Amadeo Cid, del Instituto de Investigación Técnica Fundamental de la ACC.

esta es la mayor limitación asociada a todos los dispositivos y modelos mencionados en las referencias anteriores.

Con esto en mente, dentro del Programa Conjunto Polaco-Norteamericano de "Sistemas Microelectrónicos Activos", el Dr. Wilamowski y sus colegas desarrollaron una línea RC con transistores bipolares de tipo neuristor [85] [86] plenamente compatible con la tecnología normal de los circuitos integrados. Se desarrolló un circuito ligeramente diferente utilizando tecnología CMOS (*Complementary Metal Oxide Silicon*) del lado norteamericano del Programa [87], donde se observó la posibilidad de codificación de frecuencia de impulsos repetitivos de tipo neuristor [88] [89] y se comprobó en el circuito polaco [90]. Vale la pena, por lo tanto, continuar la investigación de estos y otros circuitos similares, lo cual hacemos aquí discutiendo una variante más exacta del circuito polaco que emplea dispositivos CMOS y aportando evidencia, fundamentalmente experimental, que pone de relieve sus características de operación.

*Con la mirada inmóvil del verano
Mi cariño sabrá de las veredas [1]*

2. CIRCUITOS

En la presente sección introducimos el circuito de neuristor básico que deseamos discutir, dando una justificación física de su operación y una verificación experimental de sus importantes propiedades. De aquí se extraen algunas extensiones valiosas.

2.1 Circuito básico

El circuito básico que vamos a introducir se muestra en la Fig. 1, que representa una cascada de secciones idénticas, después de la fuente. Cada sección de la Fig. 1 ha de considerarse como una red de dos accesos equivalente a una sección de línea pasiva R_i-C_i con una carga dipolo conectada a su segundo acceso, que es activa, no lineal y (lo más importante) dinámica. Para que puedan establecerse comparaciones, se muestra en la Fig. 2 una sección del circuito de Wilamowski *et al.* [85] de donde ha surgido nuestro circuito; como puede verse, la principal diferencia es la sustitución de los transistores bipolares por transistores MOS. En la Fig. 1 los números de los nodos coinciden con los de los terminales del transistor CMOS MC14007CP, cápsula utilizada para todas las verificaciones experimentales dadas en este trabajo. La Fig. 3 muestra los impulsos típicos obtenidos experimentalmente, tal como se expone después. Aquí, el trazo superior es el voltaje periódico de entrada, con impulsos negativos, mientras que el trazo inferior es la respuesta del voltaje de la línea en el terminal No. 3 de la quinta sección de una línea de ocho secciones de la forma indicada en la Fig. 1.

El principio de operación es bastante similar al correspondiente a la Fig. 2 y lo vamos a examinar enseguida. Para hacerlo, será útil hacer referencia a la Fig. 4, que muestra la entrada a la línea (arriba) y los

voltajes v_1 , v_2 , y v_3 en los terminales Nos. 1, 2, y 3 de la quinta etapa y en el terminal No. 3 de la cuarta etapa. En el estado de reposo, cuando $v_{en} = 0$, el capacitor C_2 se descarga con cero voltaje a su través mientras que el capacitor C_L se carga totalmente al voltaje de polarización V_B ; no circula corriente y, por consiguiente, los voltajes v_1 y v_{10} de los terminales Nos. 1 y 10 quedan a potencial de tierra mientras que los terminales Nos. 2, 3, y 12 quedan al potencial de polarización V_B . De estas observaciones vemos que con una entrada nula el voltaje de compuerta (*gate*) a fuente del transistor MOS M_1 de canal n está dado por $v_{c11} = v_{10} - v_9 = 0$ y similarmente para el transistor M_2 de canal p , $v_{c12} = v_3 - v_2 = 0$. En otras palabras, para una entrada nula tanto M_1 como M_2 están *cortados* (esto es, circula una corriente nula por el terminal de drenaje) ya que es requisito necesario para su conducción respectiva que $v_{c11} > V_p$ y que $v_{c12} < -V_p$, donde $V_p > 0$ es el voltaje necesario para el estrechamiento, a todo su largo, del canal n del par complementario MOS (este voltaje es de unos 2 volts para nuestros dispositivos MC14007CP).

Con la aplicación de un impulso negativo suficientemente grande a la entrada, disminuye v_3 mientras que v_2 puede disminuir sólo lentamente, ya que lo mantiene el capacitor C_2 ; de manera que con una selección apropiada de los parámetros, esto *activa* M_2 . Una corriente suficiente, tal como la corriente activada de fuente-drenaje de M_2 , circulando por R_3 eleva el potencial v_1 , lo cual activa M_1 ; en esto se produce un retardo debido al retardo intrínseco al transferirse la señal a través de M_2 , y, de manera más controlable, por la necesidad de cargar C_L (a través de R_L y R_f efectivamente en paralelo) al objeto de disminuir v_3 para activar M_2 . La corriente añadida a través de R_1 , debido a la activación de M_1 , disminuye más aún v_3 , siendo esta la causa real de una caída muy brusca en el voltaje v_3 (véase la Fig. 4, donde se observa este fenómeno a alrededor de $1 \mu s$ en la salida de la quinta etapa [la entrada a esta quinta sección se produce como la salida de la cuarta etapa a unos $0,9 \mu s$]). En consecuencia con esta caída súbita en v_3 , C_2 sigue cargándose, proceso que continúa de acuerdo con la característica no lineal (cuadrática) de la corriente de drenaje MOS hasta que $v_3 - v_2$ coincide casi con $-V_p$ (véase la Fig. 4, alrededor de los $2,9 \mu s$); durante este lapso puede ocurrir un cambio rápido a través de la región de operación lineal de M_2 al cortarse éste. Después de una caída suficientemente grande en v_1 tiene lugar un cambio semejante en el transistor M_1 , que también se corta (lo cual ocurre a unos $3,4 \mu s$ en la salida de la quinta etapa, en la Fig. 4). Aquí el estado refractario está fijado por el estado de descarga de C_2 , mientras que existe la posibilidad de oscilaciones con una entrada sostenida si la situación es tal que M_2 se activa de nuevo con una descarga suficiente de C_2 (como ocurre en la parte inferior de la Fig. 8).

Se realizaron experimentos para ilustrar los distintos puntos señalados mediante los trazos osciloscópicos que se muestran en las Figs. 3-9 (tomados de un Tektronik 5403 con una unidad enchufable 5A48 de doble trazo, otra 5B42 de base de tiempo retardada y una punta de prue-

ba 013-0090-00 $\times 1$). El trazo superior es el impulso de voltaje periódico con intervalos negativos aplicado (extraído de un generador de impulsos HP 8002), mientras que el trazo inferior es generalmente el voltaje de línea (terminal No. 3) en la quinta sección de una línea de ocho secciones (con un resistor R_L a tierra, a la derecha). Los valores de los elementos de circuito eran $R_L = R_1 = R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 2,7 \text{ k}\Omega$, $C_L = 0$ (excepto 50 pF y 100 pF en las dos últimas partes de la Fig. 9), $C_2 = 270 \text{ pF}$, y $V_B = 13 \text{ V}$ (de una fuente de potencia HP 721A). En todos estos trazos, la línea más alta y la más baja del retículo corresponden a potencial de tierra.

Comentemos específicamente estos trazos. La Fig. 5 muestra que se excita un impulso cuando la amplitud a la entrada está por encima de 1,85 volts. La Fig. 6 muestra que cuando el ancho del impulso de entrada es mayor de 0,17 μs (a una amplitud de 4 volts) se dispara una salida; también muestra que esta salida es independiente del ancho del impulso de entrada cuando es mayor que su ancho umbral. La Fig. 7 ilustra la existencia de un período refractario de 5,5 μs , ya que cuando los impulsos de entrada ocurren más frecuentemente, algunos no pueden disparar salida alguna. En la Fig. 8 se ilustra el interesante control de la razón de repetición de los impulsos por la amplitud de entrada; en la figura se ve que dicho control tiene lugar en el intervalo $-5,2 \text{ V} > v_{en} > -7,3 \text{ V}$. Finalmente, la Fig. 9 muestra cómo cambia el retardo debido a los cambios en C_L y R_L ; aquí, las dos primeras curvas a la izquierda utilizan solamente la capacitancia de entrada intrínseca del circuito del transistor (aparentemente, esta capacitancia intrínseca es de unos 10 pF y es de valor muy cercano a la combinación en paralelo de las dos capacitancias, la de compuerta y la de fuente, cada una de las cuales es de alrededor de 5 pF). Por vía experimental se pudo comprobar que el retardo por etapa es casi idéntico para las cinco etapas centrales, de la línea de ocho etapas, siendo aquél también como se ilustra entre las etapas cuarta y quinta en la Fig. 4 (esto es, alrededor de 0,1 μs /etapa).

2.2 Modificaciones y otros circuitos

La Fig. 1 se modifica fácilmente para transmitir impulsos positivos, como se muestra en la Fig. 10, lo cual se logra aprovechando las simetrías de los dispositivos CMOS. Si se quisiera una línea capaz de transmitir impulsos tanto positivos como negativos, naturalmente se pensaría en combinar las líneas de las Figs. 1 y 10 en una estructura común, pero esto no es inicialmente realizable debido a la existencia de dos niveles de reposo para C_L , que deberían ser iguales. Sin embargo, basta intercambiar los puntos de tierra y de polarización a la vez que invertir el signo de los voltajes de polarización en estos dos tipos de "cargas dipolo" para llevar a cero el nivel de reposo en C_L . Haciendo esto y compartiendo R_1 , se obtiene una línea, una de cuyas secciones se muestra en la Fig. 11, que es capaz de transmitir impulsos tanto positivos como negativos. Como comentario, mencionaremos que la línea obtenida re-

sulta muy susceptible en su operación, pues requiere una coordinación muy ajustada entre los voltajes de polarización y de entrada, probablemente debido a los acoplamientos entre los sustratos. Como comentario adicional, hagamos notar que la Fig. 11 es una combinación adecuada para lograr la integración completa ya que todos los capacitores tienen un terminal común a tierra. Con el fin de obtener características idénticas para los impulsos positivos y negativos, es conveniente que los transistores complementarios de ambas partes (canal p del circuito superior con canal n para el circuito inferior, por ejemplo) estén pareados, lo cual, sin embargo, es todavía bastante difícil de lograr en la tecnología de los circuitos integrados.

Los circuitos que hemos discutido hasta aquí tienen todos la naturaleza de líneas con carga y, por lo tanto, es conveniente realizarlos mediante configuraciones distribuidas. En la Fig. 12 se muestra una configuración distinta correspondiente a un circuito previamente desarrollado, pero no publicado, que satisface todas las condiciones de la definición del neuristor. En este caso, el transistor de entrada M_1 del canal n actúa simplemente como inversor, lo cual da también transmisión y aislamiento unilaterales, mientras que el transistor M_2 de canal p proporciona la estructura no lineal y activa con retroalimentación que se requiere para la conformación de los impulsos. Esta sección transmite entonces impulsos positivos, unilateralmente, de izquierda a derecha. Probablemente, el circuito de la Fig. 12 es el neuristor más sencillo de que se dispone actualmente, aunque la ausencia de ganancia real en la vía de retroalimentación le impide poseer la propiedad de control por voltaje de la razón de repetición, o al menos parece ser así. Pero esto se remedia insertando un transistor de retroalimentación M_3 en la misma relación a M_2 que teníamos en la Fig. 1, como en nuestro circuito previamente publicado [87], ahora estudiado ampliamente por C. Kohli [88]. Por otra parte, puede hacerse que el circuito transmita impulsos negativos y positivos por medio de una conjunción semejante a la utilizada para obtener la Fig. 11, lo cual es probable que tenga más éxito aún gracias al aislamiento de las etapas (se encuentran resultados positivos en [88, p. 30]).

*Y la pobreza del lugar, y el polvo
Sitios de piedra decidida y limpia [1]*

3. ANÁLISIS MATEMÁTICO

En esta sección mostraremos, por medio del análisis de circuitos usual, que pueden obtenerse resultados razonables, tales como los que se refieren al retardo por etapa o a las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Sin embargo, veremos también que la situación actual de la matemática no es tal que puedan obtenerse caracterizaciones analíticas a partir de las ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen los neuristores MOS distribuidos.

Es relativamente fácil realizar el análisis, con ayuda de computadoras y utilizando modelos bien establecidos, de los transistores MOS, para todos los circuitos de parámetros concentrados que se presentan aquí. Estos han sido llevados a efecto [88] con buena concordancia sobre el derivado [87] de la Fig. 12, a partir del cual ha introducido Kohli [88, p. 36] un modelo muy exacto del transistor MOS; éste será utilizado en las ecuaciones (2) y (4) que siguen. Sin embargo, debido a la disponibilidad en los EE.UU. de paquetes CMOS a muy bajo costo (alrededor de tres pares de transistores por 0,30 dólar) en realidad ha sido más fácil realizar los experimentos discutidos anteriormente. Sin embargo, a la hora de diseñar, es importante tener ecuaciones de diseño para los parámetros de interés. Como para los usos que se prevén el retardo por etapa es probablemente el parámetro más importante a controlar, desarrollaremos este punto antes de continuar hacia otros más abstractos.

Aplicando la teoría de circuitos a una etapa cualquiera, salvo la primera, de la Fig. 1 podemos calcular aproximadamente el retardo en tiempo a su través como sigue. La etapa se activa activando M_2 , lo cual se logra descargando C_L en una cantidad V_P . Aproximadamente, este capacitor ve una resistencia efectiva R_e igual a R_1 en paralelo con R_L (ya que la etapa previa se supone activada, lo cual tiene el efecto de poner a tierra el acoplamiento R_L , y porque los transistores MOS inactivados aparecen como circuitos abiertos). La ley de descarga del circuito, que tiene una sola constante de tiempo, será entonces $v_3(t) = V_B - V_B \exp(t/R_e C_L)$; en el instante de activación, t_1 , de M_2 , tenemos $v_3(t_1) \approx V_B - V_P$, de manera que, resolviendo, obtenemos

$$t_1 \approx R_e C_L \ln(V_B/V_P) \quad \text{con} \quad R_e \approx R_1 R_L / (R_1 + R_L) \quad (1a)$$

Para obtener el retardo real t_d es necesario añadir a t_1 el retardo intrínseco de cada transistor (el intervalo de tiempo al cabo del cual comienza a circular la corriente de drenaje luego que el voltaje de compuerta a fuente alcanza su nivel de activación). Por lo tanto:

$$t_d = t_1 + 2t_i \quad (1b)$$

Podemos comprobar numéricamente contra la Fig. 4 utilizando $t_i \approx 10$ ns, $C_L \approx 10$ pF, $R_1 = R_L = 5,6$ k Ω , $V_B = 13$ V y $V_P = 2$ V. En estas condiciones las ecuaciones (1) dan $t_d = 0,07$ μ s, mientras la Fig. 4 muestra 0,1 μ s de demora por etapa. Aunque la ecuación (1a) es sólo groseramente aproximada, exhibe los parámetros importantes de diseño (véase también la Fig. 9). Pueden obtenerse otras fórmulas del mismo género para las otras características del neuristor [85], pero tampoco ellas dan determinaciones exactas sino que sirven más bien para orientar al diseñador en su trabajo.

Un reto mayor es el análisis de los circuitos verdaderamente distribuidos, para los cuales estableceremos a continuación las ecuaciones en derivadas parciales correspondientes a líneas RC-MOS. Para éstas, como

se verá, es mucho más adecuado el análisis con ayuda de computadoras en ausencia de técnicas analíticas por las cuales podamos guiarnos.

Consideraremos primero la caracterización de los dispositivos MOS, para lo cual introduciremos una función $F(\cdot, \cdot, \cdot)$ de tres variables

$$F(x, y, z) = \beta(x-z)^2 \left(1 - \exp \frac{-Ky}{x-z}\right) u(x-z) u(y) \quad (2)$$

donde β y K son constantes positivas y $u(\cdot)$ es la función escalón unitario

$$u(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Entonces, tal como lo demuestra Kohli [88, p. 36] mediante ajuste de curvas, los transistores CMOS parcados de canal n y canal p resultan descritos con exactitud, respectivamente, por las ecuaciones

$$i_{df} = F(v_{cf}, v_{df}, V_p) ; V_p > 0 \quad (\text{canal } n) \quad (4a)$$

$$i_{df} = -F(-v_{cf}, -v_{df}, -V_{pp}) ; V_{pp} = -V_p \quad (\text{canal } p) , \quad (4b)$$

donde i_{df} es la corriente de drenaje a fuente, etc. (para el paquete MC 14007CP, $K \approx 5$, $V_p \approx 2$ V, $\beta \approx 0,64 \cdot 10^{-3}$ A/V²). Utilizando estas relaciones podemos pasar a analizar una sección de la Fig. 1.

Tenemos, sumando corrientes en el nodo 12,

$$j = R_1^{-1}(v - V_B) + i_{df1} , \quad (5a)$$

y de la ecuación (4a):

$$\begin{aligned} i_{df1} &= F(v_{c11}, v_{df1}, V_p) = F(v_1, v, V_p) \\ &= F(-R_3 i_{df2}, v, V_p) . \end{aligned} \quad (5b)$$

De la ecuación (4b), utilizando el voltaje v_c del capacitor C_2 definido en la Fig. 1,

$$\begin{aligned} i_{df2} &= -F(-v_{c12}, -v_{df2}, V_p) \\ &= -F(-[v - (v_c + V_B)], [v_c + V_B + R_3 i_{df2}], V_p) . \end{aligned} \quad (5c)$$

Para continuar, la ecuación (5c) ha de resolverse para la i_{df2} que aparece en ambos miembros y sustituirse el resultado en (5b). Puede comprobarse que siempre existe solución representando gráficamente los miembros izquierdo y derecho [mediante el uso de (2)] de la ecuación (5c) y observando que para valores fijos de v , v_c , R_3 , V_B , V_p , K y β hay una y sólo una intersección. De manera que podemos obtener funcionalmente

$$i_{df2} = G(v, v_c) . \quad (6a)$$

Es difícil dar analíticamente una fórmula más explícita para $G(\cdot, \cdot)$, pero obsérvese que en nuestro circuito el segundo argumento

$y = [v_c + V_B + R_3 i_{df2}]$ en (5c) nunca se hace negativo, de suerte que $u(y) = 1$. Si, por otra parte, $K \rightarrow \infty$, obtenemos

$$i_{d2} = G(v, v_c) = -\beta (v_c + V_B - V_P - v)^2 u(v_c + V_B - V_P - v) \quad (6b)$$

que es una útil aproximación cuadrática a la corriente real.

Continuando, una simple sustitución de la ecuación (6a) en (5b) y entonces en (5a) produce

$$j = R_1^{-1} (v - V_B) + F(-R_3 G(v, v_c), v, V_P) \quad (7)$$

que da la relación de la corriente j en los terminales del dipolo en función del voltaje entre los terminales del dipolo y el voltaje interno del capacitor v_c , donde observamos que en el estado de reposo, $v = V_B$, $v_c = 0$, $j = 0$.

Seguidamente se halla la ecuación dinámica para v_c sumando las corrientes en el nodo No. 2:

$$i_{d2} = R_2^{-1} v_c + C_2 \dot{v}_c \quad (\text{donde } \dot{x} \equiv dx/dt) \quad (8a)$$

o bien, de la ecuación (6a):

$$C_2 \dot{v}_c = -R_2^{-1} v_c + G(v, v_c) \quad (8b)$$

Considérese ahora que la Fig. 1 es un circuito distribuido con una sección característica de longitud ∂x . En este caso podemos establecer como sigue las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento eléctrico de la línea.

A través de $R_L = r_L \partial x$ tenemos $(v - \partial v) - v = R_L (i - \partial i)$ y a través de $C_L = c_L \partial x$ tenemos $-\partial i = (c_L \partial x) (\partial v / \partial t) + j$, donde a partir de la ecuación (7) podemos expresar la corriente j como $j = f(v, v_c) \partial x$ con $f(V_B, 0) = 0$. Similarmente, a partir de (8b) podemos escribir, utilizando $C_2 = c_2 \partial x$, $(c_2 \partial x) (\partial v_c / \partial t) = g(v, v_c) \partial x$ donde $g(V_B, 0) = 0$.

Las ecuaciones de interés para una realización distribuida serán entonces (luego de tomar límites para $\partial x \rightarrow 0$):

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = r_L c_L \frac{\partial v}{\partial t} + r_L f(v, v_c) \quad (9a)$$

$$\frac{\partial v_c}{\partial t} = c_2^{-1} g(v, v_c) \quad (9b)$$

con la condición de que $v(x, t)$ sea tal que $v(0, t) = v_{en}(t)$.

Las ecuaciones de esta forma se conocen en matemática como ecuaciones de difusión no lineales [91]. Estimulado por los problemas surgidos en la modelación neural, ha habido recientemente un considerable interés de los matemáticos en tales ecuaciones; ellos se han ocupado bien de ciertos casos especiales —a menudo de funciones f y g muy sencillas— [92]-[112], o de situaciones muy generales [113]-[121].

Los principales intereses en las ecuaciones (9) se refieren a soluciones que representan ondas viajeras, esto es, soluciones que son sola-

mente función de $z = x - vt$, donde v es la velocidad de propagación. Observamos que entonces

$$\frac{\partial}{\partial x} = -v^{-1} \frac{\partial}{\partial t} = \frac{d}{dz} = \dots$$

lo cual conduce a las ecuaciones en variables de estado llamadas de "estado estacionario dinámico" [54, p. 175]:

$$v' = w \tag{11a}$$

$$w' = -v^{-1} r_L c_L w + r_L f(v, v_c) \tag{11b}$$

$$v_c' = -c_2^{-1} v g(v, v_c) . \tag{11c}$$

Para estas ecuaciones conocemos que $v = V_p$, $v_c = w = 0$ definen un punto de equilibrio, correspondiente al estado de reposo de nuestra línea. Por otra parte, se sabe que si f y g fueran lineales el sistema (parabólico) de ecuaciones en derivadas parciales (9) no tiene una solución para el estado de reposo que sea una onda viajera [110, p. 882]; por consiguiente la cuestión de la existencia de soluciones de las ecuaciones (11) no puede eliminarse fácilmente. El problema real —que todavía no ha sido resuelto analíticamente de forma general [108, p. 886]— consiste en determinar la velocidad v de propagación de las ondas, bajo condiciones de frontera apropiadas, ya que las que han sido tratadas hasta ahora (para f y g muy especiales) representan bien sea un solo impulso viajero o un tren periódico de impulsos viajeros [112] [122]). Sin embargo, está claro que podemos hacer un estimado de la velocidad v para nuestros circuitos MOS mediante la expresión para el retardo en tiempo dada en (1).

Aunque, en realidad, todavía no se puede decir mucho más analíticamente sobre la forma de las soluciones, pudiera intentarse linealizar las ecuaciones (11). La linealización se logra de la manera más fácil cuando se está en la región activa, ya que sólo se requiere en este caso utilizar la ley de comportamiento cuadrático de los transistores MOS [como en (6b)]. Sin embargo, debido a la presencia de discontinuidades en escalón, esto se hace abordable solamente cuando la linealización se produce en las proximidades del estado excitado, que es del máximo interés práctico para las consideraciones de estabilidad del impulso transmitido, pero este estado excitado debe suponerse primero analíticamente. No obstante, en sentido matemático abstracto, probablemente la mayor parte del progreso se ha realizado en esta dirección [114]-[119].

*Los portales profundos, las mamparas
Cerradas a la sombra y al silencio. [1]*

4. DISCUSIÓN

Puesto que el transistor MOS es de construcción sencilla y tiene las características de una fuente de corriente no lineal controlada por voltaje, dicho transistor parece ser un bloque funcional fundamental para los

circuitos electrónicos. Aquí hemos ilustrado su versatilidad en la realización de líneas de tipo neuristor de diversas configuraciones. En realidad, la realización básica tanto de la Fig. 1 como de la Fig. 2 puede lograrse de la manera más natural mediante dispositivos MOS, una vez comprendido su principio de operación, que utiliza corrientes controladas por voltajes.

Pero lo que hemos presentado aquí parece no ser sino un punto de partida en esta área. Ciertamente, somos capaces de construir líneas con comportamiento de neuristor, como se ve en la Fig. 11, que transmiten impulsos negativos y positivos. Sin embargo la carencia práctica de una simetría completa al construir pares CMOS hace la operación real más difícil que para las líneas de impulsos de signo único. Esta falta de simetría no fue tomada en cuenta, en gracia de la sencillez, cuando establecimos el análisis matemático de la línea básica, ya que en la ecuación (4) supusimos que los parámetros β , K , V_p describían tanto los dispositivos de canal n como los de canal p , cosa que no es totalmente cierta; sin embargo, no es difícil efectuar sobre la línea básica las correcciones que requiere esta asimetría. Y, aunque hemos visto que establecer las ecuaciones descriptivas, como (9), no presenta mayor dificultad, no es fácil realizar un análisis formal de estas ecuaciones, y en este caso la mayor parte del diseño ha sido realizada empíricamente, bien sea manual o numéricamente en una computadora, o experimentalmente en el laboratorio. En dos palabras: no tenemos una teoría matemática completa de las líneas de tipo neuristor.

Aparte de no ser sino un punto de partida en sentido matemático, lo que presentamos es también un punto de partida en sentido físico, por cuanto los modelos físicos desarrollados hasta la fecha se refieren todos a secciones con parámetros concentrados, mientras que pueden muy bien ser posibles líneas con características de neuristor totalmente distribuidas e integradas, especialmente en relación con la Fig. 11. Más aún, como no es difícil realizar resistores y capacitores con transistores MOS, otra dirección de investigación prometedora, aun en el caso de secciones con parámetros concentrados, es obtener líneas con características de neuristor construidas exclusivamente con dispositivos MOS. Por otra parte, el material arriba presentado ha cubierto sólo las líneas de tipo neuristor propiamente; y si bien es verdad que éstas bastan para realizar todos los componentes necesarios para fabricar computadoras, existe otra clase de circuitos, denominados *empalmes neurales* [123]-[126], que pueden utilizarse para combinar neuristores en configuraciones posiblemente nuevas e interesantes. Como los neuristores son generadores de impulsos detectores de nivel, pueden considerarse con miras a ser usados en cualquier parte que se requieran, como por ejemplo en los moduladores delta, que actualmente estamos investigando.

En la sección de Referencias damos una lista de las referencias más pertinentes, sin aspirar a mucha selectividad. Por consiguiente, para aquéllos que descan una arrancada más firme en este campo, recomendamos, aparte del trabajo básico, aunque algo general, de Crane [3].

el trabajo que le sigue inmediatamente en la misma revista [9], por Ngumo *et al.*, que todavía nos parece el trabajo específico de mayor interés. Para los que se interesan sobre todo en la matemática, el trabajo didáctico de Hastings [110] es bastante inteligible y cubre los principales puntos de interés. Con el tiempo, creemos que resultará cada vez más aplicable la "teoría de las catástrofes" [127]. Y para aquéllos que deseen materiales adicionales, añadimos las referencias [128]-[209], que aunque todavía no hemos podido localizar, es posible contengan datos interesantes. En el futuro próximo tenemos la esperanza de que podamos ofrecer una colección anotada de referencias.

Finalmente, creemos que en lo anteriormente expuesto hemos demostrado de nuevo la posibilidad de hacer neuristores que pueden construirse en forma de circuito integrado. Como se ha mencionado, aún se requieren perfeccionamientos pero, en vista de lo ilustrado por los distintos oscilogramas, no cabe duda de que se obtienen las propiedades del neuristor, de manera que ¡el apodo de "neuristor" puede quedar ahora como un juego de palabras sobre el nombre de pila abreviado de su creador!

*Y después del fuerte agnaje
viene la apacible calma;
En el desierto la palma
Doblando va su follaje [206]*

RECONOCIMIENTO

En este lugar el autor desea dejar constancia del interés, la asistencia, y la cooperación de sus colegas en el Programa Polaco-Norteamericano que ha hecho posible este trabajo, así como a sus colegas cubanos, especialmente el Dr. J. Altshuler, sin quien aquél no se hubiera emprendido, y E. Diego, cuyo punto de vista le dio espíritu. Para A. E. Lavandero.

*Y nombraré las cosas, tan despacio
Que cuando pierda el paraíso de mi calle
Pueda llamarlas de pronto con el alba [1].*

REFERENCIAS

- [1] E. DIEGO, "Voy a Nombrar las Cosas", en "Nombrar las Cosas", Bolsilibros Unión, La Habana, Cuba, 1973, pp. 32-33.
- [2] H. D. CRANE, "Neuristor Studies", Stanford Electronics Laboratories, Technical Report No. 1506-2, 11 de julio de 1960.
- [3] H. D. CRANE, "Neuristor — A Novel Device and System Concept", *Proceedings of the IRE*, Vol. 50, No. 10, octubre de 1962, pp. 2048-2060.
- [4] H. D. CRANE, "The Neuristor", *IRE Transactions on Electronic Computers*, Vol. EC-9, No. 3, septiembre de 1960, pp. 370-371.
- [5] H. D. CRANE y A. ROSENGREEN, "Results from Experimental Relay Neuristor Lines", Interim Report No. 1, SRI Project 3286, enero de 1961.
- [6] H. D. CRANE, "The Neuristor", International Solid-State Circuits Conference, febrero de 1961.
- [7] A. J. COTE, Jr., "A Neuristor Prototype", *Proceedings of the IRE*, Vol. 49, No. 9, septiembre de 1961, pp. 1430-1431.

- [8] A. J. COTE, Jr., "Simulating Nerve Networks with Four Layer Diodes", *Electronics*, Vol. 34, No. 41, octubre 13 de 1951, pp. 51-53. Reimpreso in "Tunnel-Diode and Semiconductor Circuits", J. M. Carroll, Editor, McGraw-Hill Book Co., New York, 1963, pp. 294-296.
- [9] J. NAGUMO, S. ARIMOTO, y S. YOSHIZAWA, "An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon", *Proceeding of the IRE*, Vol. 50, No. 10, octubre de 1962, pp. 2061-2070.
- [10] A. C. SCOTT, "Neuristor Propagation on a Tunnel Diode Loaded Transmission Line", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 51, No. 1, enero de 1963, p. 240.
- [11] A. ROSENGREEN, "Experimental Neuristor Gives Nerve - Like Propagation", *Electronics*, Vol. 36, No. 9, 1^o de marzo de 1963, pp. 25-27.
- [12] S. NOGUCHI, Y. KUMAGAI, y J. OIZUMI, "General Considerations on the Neuristor Circuits", *The Reports of the Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University*, Vol. 14, No. 34, 1963, pp. 155-184.
- [13] A. AMBROZIAK, "Semidistributed Neuristor Line Using Unijunction Transistors", *Solid-State Electronics*, Vol. 7, No. 3, marzo de 1964, pp. 259-265.
- [14] S. YOSHIZAWA y J. NAGUMO, "A Bistable Distributed Line", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 52, No. 3, marzo de 1964, p. 308.
- [15] R. H. MATTSON, "A Neuristor Realization", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 52, No. 5, mayo de 1964, pp. 618-619.
- [16] A. J. COTE, Jr., "Neuristor Propagation in Long-Tunnel Diodes", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 53, No. 2, febrero de 1965, pp. 164-165.
- [17] H. KUNOV, "Controllable Piecewise Linear Lumped Neuristor Realization", *Electronics Letters*, Vol. 1, No. 5, julio de 1965, p. 134.
- [18] J. NAGUMO, S. YOSHIZAWA, y S. ARIMOTO, "Bistable Transmission Lines", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol. CT-12, No. 3, septiembre de 1965, pp. 400-412.
- [19] A. HAYASAKA y J. NISHIZAWA, "Pulse Characteristics of the Distributed Esaki Diode", *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 49, No. 8, agosto de 1966, pp. 123-133.
- [20] R. D. PARMENIER, "Recoverable Neuristor Propagation on Superconductive Tunnel Junction Strip Lines", *Solid-State Electronics*, Vol. 12, No. 4, abril de 1969, pp. 287-297.
- [21] J. I. NISHIZAWA y A. HAYASAKA, "Two-Line Neuristor with Active Element in Series and in Parallel", *International Journal of Electronics*, Vol. 26, No. 5, mayo de 1969, pp. 437-469.
- [22] B. M. WILAMOWSKI, H. YOKOGAWA, y J. I. NISHIZAWA, "Neuristor Propagation in Low Impedance Line", *International Journal of Electronics*, Vol. 29, No. 2, febrero de 1970, pp. 101-137.
- [23] M. B. WALDRON, "Synneuristor: A Device and Concept", Stanford Electronics Laboratory, Technical Report No. 6560-22, enero de 1971.
- [24] B. S. BORISOV, F. F. ZOLOTAREV, y B. B. SHAMSHEV, "An Investigation of the Excitation Propagation Velocity in a Semidistributed p-n-p-n Structure Neuristor Line", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 16, No. 3, marzo de 1971, pp. 526-529.
- [25] G. F. BELOVA e Y. A. PARMENOV, "Investigation of the Coupling between Neuristor inc Elements Having p-n-p-n Structures", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 17, No. 11, noviembre de 1972, pp. 1923-1926.
- [26] B. M. WILAMOWSKI, "Analysis of the Neuristor Line", *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences*, Vol. 20, No. 2, 1972, pp. 38[127]-44[134].
- [27] M. C. PEASE, "Analytic Proof of Operability of a Second - Order Neuristor Line", Interim Report No. 3, Stanford Research Institute Project 3286, febrero de 1961.
- [28] A. C. SCOTT, "Analysis of Nonlinear Distributed Systems", *IRE Transactions on Circuit Theory*, Vol. CT-9, No. 2, junio de 1962, pp. 192-195.
- [29] J. NISHIZAWA, "Studies on Progressing - Wave Type of Esaki Diode", *Electronic Science (Denshi-kagaku)*, Vol. 12, 1962, pp. 4-??

- [30] T. JANUS, "Moving Source Model of Neuristor Triggering", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 51, No. 7, julio de 1963, pp. 1049-1050.
- [31] T. M. IL'INOVA y R. V. KHOKHLOV, "Wave Processes in Lines with Nonlinear Shunt Resistance", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 8, 1963, pp. 1864-1972.
- [32] A. C. SCOTT, "Distributed Device Applications of the Superconducting Tunnel Junction", *Solid-State Electronics*, Vol. 7, No. 2, febrero de 1964, pp. 137-146.
- [33] A. C. SCOTT, "Steady Propagation on Nonlinear Transmission Lines", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol. CT-11, No. 1, marzo de 1964, pp. 146-154.
- [34] Y. I. VORONTSOV, "Certain Properties of Delay Lines Containing Tunnel Diodes", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 9, No. 4, abril de 1964, pp. 478-483.
- [35] M. W. GREEN y H. D. CRANE, "Modes of Neuristor Propagation - A Study in Distributed Active Processes", Stanford Research Institute, Final Report, Contract Nonr - 3212(00), septiembre de 1964.
- [36] Y. I. VORONTSOV, "Velocity of Propagation of Stationary Signals in Lines Having Nonlinear Resistance", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 9, No. 9, septiembre de 1964, pp. 1414-1416.
- [37] T. M. IL'INOVA, "Interaction of Waves in a Distributed Line with Nonlinear Parallel Loss", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 9, No. 12, diciembre de 1964, pp. 1728-1735.
- [38] Y. N. VORONTSOV, "On the Interaction between Oppositely Traveling Signals in Lines Containing a Nonlinear Resistance", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 9, No. 12, diciembre de 1964, pp. 1812-1814.
- [39] T. PAVLIDIS, "A New Model for Simple Neural Nets and Its Application in the Design of a Neural Oscillator", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 27, No. 2, junio de 1965, pp. 215-229.
- [40] I. RICHER, "Pulse Propagation Along Certain Lumped Nonlinear Transmission Lines", *Electronics Letters*, Vol. 1, No. 5, julio de 1965, pp. 135-136.
- [41] S. AONO, Y. KUMAGAI, S. NOGUCHI, y J. OIZUMI, "Fundamental Characteristics of the Electronic Neuristor Line", The Reports of the Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 1965, pp. 21-43.
- [42] V. F. ZOLOTAREV y V. I. STAFEYEV, Soviet Patent No. 258,374, cl. 21a', 32/40, 2 de febrero de 1966.
- [43] L. Y. WEI, "A New Theory of Nerve Conduction", *IEEE Spectrum*, Vol. 3, No. 9, septiembre de 1966, pp. 123-127.
- [44] Y. I. VORONTSOV e I. V. POLYSKOV, "Investigation of Undamped Signals in Lines with a Nonlinear Resistance", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 11, No. 9, septiembre de 1966, pp. 1449-1456.
- [45] L. A. LOGUNOV, I. V. POLYKOV y V. N. SEREBRYAKOV, "Distributed Tunnel Diodes", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 12, No. 1, enero de 1967, pp. 149-152.
- [46] H. KUNOV, "On Recovery in a Certain Class of Neuristors", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, No. 3, marzo de 1967, pp. 428-429.
- [47] Y. I. VORONTSOV, M. I. KOZHEVNIKOVA, e I. V. POLYAKOV, "Wave Processes in Active RC - Lines", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 12, No. 4, abril de 1967, pp. 644-648.
- [48] R. D. PARMENTIER, "Stability Analysis of Neuristor Waveforms", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, No. 8, agosto de 1967, pp. 1498-1499.
- [49] R. J. BURATTI y A. G. LINDGREN, "Neuristor Waveforms and Stability by the Linear Approximation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 56, No. 8, agosto de 1968, pp. 1392-1393.
- [50] R. D. PARMENTIER, "Neuristor Waveform Analysis by Lyapunov's Second Method", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 56, No. 9, septiembre de 1968, pp. 1607-1608.
- [51] I. RICHER, "The Switch - Line: A Simple Lumped Transmission Line that can Support Unattenuated Propagation", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol. CT-13, No. 4, diciembre de 1968, pp. 388-392.

- [52] A. G. LINDGREN y R. BURATTI, "Stability of Waveforms on Active Non-linear Transmission Lines", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol. CT-16, No. 3, agosto de 1969, pp. 274-279.
- [53] R. D. PARMENTIER, "Neuristor Analysis Techniques for Nonlinear Distributed Electronic Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 58, No. 11, noviembre de 1970, pp. 1829-1837.
- [54] A. C. SCOTT, "Active and Nonlinear Wave Propagation in Electronics", Wiley Interscience, New York, 1970.
- [55] A. WEYNS, "Information Transmission in the Nervous System", (in Flemish) Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Departement Elektrotechniek, 1973.
- [56] J. A. KOSLOSICK, K. L. LANDT, H. C. S. HSUAN, y K. E. LONNGREN, "Properties of Solitary Waves as Observed on a Nonlinear Dispersive Transmission Line", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 5, mayo de 1974, pp. 578-581.
- [57] R. S. LILLIE, "Transmission of Activation in Passive Metals as a Model of the Protoplasmic on Nerve Type of Transmission", *Science*, Vol. 48, julio de 1918, pp. 51-60.
- [58] R. S. LILLIE, "The Passive Iron Wire Model of Protoplasmic and Nervous Transmission and Its Physiological Analogues", *Biological Reviews*, Vol. 11, No. 2, abril de 1936, pp. 181-209.
- [59] A. M. WEINBERG, "Nerve Conduction with Distributed Capacitance", *Journal of Applied Physics*, Vol. 10, No. 2, febrero de 1939, pp. 128-134.
- [60] K. YAMAGIWA, "A Model for the Synapse", *Japan Med. J.*, Vol. 2, No. 1, febrero de 1949, pp. 38-46.
- [61] A. L. HODGKIN y A. F. HUXLEY, "A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve", *The Journal of Physiology*, Vol. 117, No. 4, August 28, 1952, pp. 500-544.
- [62] W. H. FREYGANG, Jr., "Some Functions of Nerve Cells in Terms of an Equivalent Network," *Proceedings of the IRE*, Vol. 47, No. 11, Noviembre 1959, pp. 1862-1869.
- [63] J. W. MOORE, "Electronic Control of Some Bioelectric Membranes", *Proceedings of the IRE*, Vol. 47, No. 11, noviembre de 1959, pp. 1869-1880.
- [64] W. R. ASHBY, "Design for a Brain", Second Edition, Chapman & Hall Ltd., London, 1960.
- [65] K. S. COLE, "The Advance of Electrical Models for Cells and Axons", *Biophysical Journal*, Vol. 2, No. 2, Part. 2, marzo de 1962, pp. 101-119.
- [66] C. M. WILEY, "Neural Networks Simulate Body Functions", in "Tunnel-Diode and Semiconductor Circuits", J. M. Carroll, Editor, McGraw-Hill Book Co. New York, 1963, p. 270.
- [67] R. F. REISS, Editor, "Neural Theory and Modeling, Proceedings of the 1962 Ojai Symposium", Stanford University Press, Stanford, California, 1964.
- [68] L. L. ANDERSON, "A Nerve Model for Experimental Purposes", *Med. Electron. Biol. Engng.*, Vol. 3, 1965, pp. 315-316.
- [69] R. FITZHUGH, "A Kinetic Model of the Conductance Changes in Nerve Membrane", *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, Vol. 66, No. 3, Supplement, diciembre de 1965, pp. 111-117.
- [70] R. FITZHUGH, "An Electronic Model of the Nerve Membrane for Demonstration Purposes", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 21, No. 1, enero de 1966, pp. 305-308.
- [71] L. D. HARMON y E. R. LEWIS, "Neural Modeling", *Physiological Reviews*, Vol. 46, No. 3, julio de 1966, pp. 513-591.
- [72] H. KUNOV, "Nonlinear Transmission Lines Simulating Nerve Axon". Thesis, Electronics Lab., Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1966.
- [73] R. SUZUKI, "Mathematical Analysis and Application of Iron - Wire Neuron Model", *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, Vol. BME-14, No. 2, abril de 1967, pp. 114-124.

- [74] R. FITZHUGH, "Motion Picture of Nerve Impulse Propagation Using Computer Animation", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 25, No. 5, noviembre de 1968, pp. 628-630.
- [75] E. W. POTTALA, "An Electronic Model Neuron with Multiple Input Capability", Ph.D. Dissertation, University of Maryland, 1970.
- [76] G. ROY, "A Simple Electronic Analog of the Squid: The NEUROFET", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. BME-19, No. 1, enero de 1972, pp. 60-63.
- [77] K. N. LEIBOVIC, "Nervous System Theory", Academic Press, New York, 1972.
- [78] J. S. ALBUS, "Theoretical and Experimental Aspects of a Cerebellar Model", Ph.D. Dissertation, University of Maryland, 1972.
- [79] M. A. PARKHIDEH, "Nonlinear Network Analysis for Neural Models", Ph.D. Dissertation, Stanford University of Maryland, 1972.
- [80] M. A. B. BRAZIER, D. O. WALTER, y D. SCHNEIDER, Editors, "Neural Modeling", University of California, Los Angeles, Brain Information Service, Research Report No. 1, 1973.
- [81] R. M. GULRAJANI, F. A. ROBERGE, y P. A. MATHIEU, "A Field - Effect Transistor Analog for the Study of Burst - Generating Neurons", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, No. 5, mayo de 1977, pp. 807-809.
- [82] B. M. WILAMOWSKI, "A Novel Concept of Neuristor Logic", *International Journal of Electronics*, Vol. 33, No. 6, junio de 1972, pp. 659-663.
- [83] B. M. WILAMOWSKI, "O możliwości budowy nerystorowych logicznych" (Possibilities of Constructing Neuristor Logic Network), *Rozprawy Elektrotechniczne*, Vol. 19, No. 2, 1973, pp. 273-280.
- [84] Z. CZARNUL y M. BIALKO, "Selected Neuristor Logic Circuits Using Single Neuristor Line Sections", to appear.
- [85] B. M. WILAMOWSKI, Z. CZARNUL, y M. B. BIALKO, "Novel Inductorless Neuristor Line", *Electronic Letters*, Vol. 11, No. 15, 24 de julio de 1975, pp. 355-356.
- [86] Z. CZARNUL, M. BIALKO, y R. W. NEWCOMB, "A Neuristor - Line Pulse Train Selector", *Electronics Letters*, Vol. 12, No. 8, 15 de abril de 1976, pp. 205-206.
- [87] C. KULKARNI-KOHLI y R. W. NEWCOMB, "An Integrable MOS Neuristor Line", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, No. 11, noviembre de 1976, pp. 1630-1632.
- [88] C. KULKARNI-KOHLI, "An Integrable MOS Neuristor Line: Design, Theory and Extensions", Ph.D. Dissertation, University of Maryland, abril de 1977.
- [89] C. KULKARNI-KOHLI y R. W. NEWCOMB, "Voltage Controlled Oscillations in the MOS Neural Line", *Proceedings of the IEEE Midwestern Symposium on Circuits and Systems*, agosto de 1977.
- [90] Z. CZARNUL y M. BIALKO, "Utilisation of a Single Inductorless Neuristor Line Section as a Voltage - to - Frequency Converter", *Electronics Letters*, Vol. 13, No. 9, 28 de abril de 1977, pp. 251-252.
- [91] C. CONLEY y J. SMOLLER, "Remarks on Traveling Wave Solutions of Non-Linear Diffusion Equations", in "Structural Stability, the Theory of Catastrophes and Applications in the Sciences", P. Hilton, editor, No. 525 of Lecture Notes in Mathematics, Springer - Verlag, Berlin, 1976, pp. 77-89.
- [92] A. KOLMOGOROFF, I. PETROVSKY, y N. PISCOUNOFF, "Étude de l'Équation de la Diffusion avec Croissance de la Quantité de Matière et son Application à un Problème Biologique", *Moscow Universitet, Bulletin Mathématique et Mécanique*, Serie Int. Section A.1, No. 6, 1937, pp. 1-25.
- [93] F. OFFNER, A. WEINBERG y G. YOUNG, "Nerve Conduction Theory: Some Mathematical Consequences of Bernstein's Model", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 2, 1940, pp. 89-103.
- [94] A. M. WEINBERG, "On the Formal Theory of Nerve Conduction", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 2, 1940, pp. 127-133.

- [95] R. FITZHUGH, "Mathematical Models of Threshold Phenomena in the Nerve Membrane", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 17, 1955, pp. 257-278.
- [96] K. S. COLE, H. A. ANTOSIEWICZ y P. RABINOWITZ, "Automatic Computation of Nerve Excitation", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 3, No. 3 septiembre de 1955, pp. 153-172.
- [97] K. S. COLE, H. A. ANTOSIEWICZ, y P. RABINOWITZ, "Automatic computation of Nerve Excitation, Correction", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 6, No. 2, junio de 1958, pp. 196-197.
- [98] R. FITZHUGH y H. A. ANTOSIEWICZ, "Automatic Computation of Nerve Excitation - Detailed Corrections and Additions", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 7, No. 4, diciembre de 1959, pp. 447-458.
- [99] R. FITZHUGH, "Thresholds and Plateaus in the Hodgkin - Huxley Nerve Equations", *The Journal of General Physiology*, Vol. 43, No. 5, mayo de 1960, pp. 867-896.
- [100] H. M. LIEBERSTEIN, "On the Hodgkin - Huxley Partial Differential Equation", *Mathematical Biosciences*, Vol. 1, No. 1, marzo de 1967, pp. 45-69.
- [101] H. M. LIEBERSTEIN, "Numerical Studies of the Steady - State Equations for a Hodgkin - Huxley Model", *Mathematical Biosciences*, Vol. 1, No. 2, julio de 1967, pp. 181-211.
- [102] V. M. ELEONSKII, "Stability of Simple Stationary Waves Related to the Nonlinear Diffusion Equation", *Soviet Physics JETP (Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki)* Vol. 26(53) No. 2, febrero de 1968, pp. 382(592)-384(597).
- [103] R. FITZHUGH, "Mathematical Models of Excitation and Propagation in Nerve", Chapter 1, pp. 1-85 of "Biological Engineering," H. P. Schwan, Editor, McGraw-Hill Book Co., New York, 1969.
- [104] H. P. McKEAN, Jr., "Nagumo's Equation", *Advances in Mathematics*, Vol. 4, No. 3, junio de 1970, pp. 209-223.
- [105] N. H. SABAH y R. A. SPANGLER, "Repetitive Response of the Hodgkin - Huxley Model for the Squid Giant Axon", *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 29, No. 2, noviembre de 1970, pp. 155-171.
- [106] H. COHEN, "Nonlinear Diffusion Problems", in "Studies in Applied Mathematics", A. H. Taub, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971, pp. 27-64.
- [107] S. P. HASTINGS, "On a Third Order Differential Equation from Biology", *The Quarterly Journal of Mathematics*, Second Series, Vol. 23, No. 92, diciembre de 1972, pp. 435-448.
- [108] J. RINZEL y J. B. KELLER, "Traveling Wave Solutions of a Nerve Conduction Equation", *Biophysical Journal*, Vol. 13, 1973, pp. 1313-1337.
- [109] S. HASTINGS, "The Existence of Periodic Solutions to Nagumo's Equation", *The Quarterly Journal of Mathematics*, Second Series, Vol. 25, No. 99, septiembre 1974, pp. 369-378.
- [110] S. P. HASTINGS, "Some Mathematical Problems from Neurobiology", *The American Mathematical Monthly*, Vol. 82, No. 9, noviembre de 1975, pp. 881-895.
- [111] S. P. HASTINGS, "On the Existence of Homoclinic and Periodic Orbits for the FitzHugh - Nagumo Equations", *The Quarterly Journal of Mathematics*, Second Series, Vol. 27, 1976, pp. 123-134.
- [112] J. RINZEL, "Nerve Signaling and Spatial Stability of Wave Trains", in "Structural Stability, the Theory of Catastrophes and Application in the Sciences", P. Hilton, Editor, No. 525 of Lecture Notes in Mathematics, Springer - Verlag, Berlin, 1976, pp. 127-142.
- [113] S. D. EIDEL'MAN, "Parabolic Systems", North - Holland Publishing Co., Amsterdam, 1969.
- [114] J. EVANS y N. SHENK, "Solutions to Axon Equations", *Biophysical Journal*, Vol. 10, No. 11, noviembre de 1970, pp. 1090-1101.

- [115] J. W. EVANS, "Nerve Axon Equations: I Linear Approximations", *Indiana University Mathematics Journal*, Vol. 21, No. 9, marzo de 1972, pp. 877-885.
- [116] J. W. EVANS, "Nerve Axon Equations: II Stability at Rest", *Indiana University Mathematics Journal*, Vol. 22, No. 1, julio de 1972, pp. 75-90.
- [117] J. W. EVANS, "Nerve Axon Equations: III Stability of the Nerve Impulse", *Indiana University Mathematics Journal*, Vol. 22, No. 6, diciembre de 1972, pp. 577-593.
- [118] J. W. EVANS, "Errata: Nerve Axon Equations: II & III", *Indiana University Mathematics Journal*, Vol. 25, No. 3, marzo de 1976, p. 301.
- [119] J. W. EVANS "Nerve Axon Equations: IV The Stable and the Unstable Impulse", *Indiana University Mathematics Journal*, Vol. 24, No. 12, noviembre - diciembre de 1975, pp. 1169-1190.
- [120] C. CONLEY, "On Traveling Wave Solutions of Non-Linear Diffusion Equations", in "Lecture Notes in Physics, Dynamical Systems, Theory and Applications", J. Moser, Editor, Springer - Verlag, Berlin, 1975.
- [121] G. A. CARPENTER, "Homoclinic, Heteroclinic, and Periodic Solutions of Autonomous Systems, with Applications to Nerve Impulse Equations", Department of Mathematics, MIT, Report, 1975.
- [122] G. A. CARPENTER, "Nerve Impulse Equations", in "Structural Stability, the Theory of Catastrophes and Applications in the Sciences", P. Hilton, Editor, No. 525 of Lecture Notes in Mathematics, Springer - Verlag, 1976, pp. 58-76.
- [123] S. R. GUTMAN, "Neuronal Network Discriminating Local Stimuli", *Biophysics*, Vol. 19, No. 1, 1974, pp. 136-143.
- [124] M. V. L. BENNETT, Editor, "Synaptic Transmission and Neuronal Interaction", Raven Press Publishers, New York, 1974.
- [125] N. DeCLARIS, "Neural Type Junctions as Network Elements", Proceedings of the IEEE Midwestern Symposium on Circuits and Systems, agosto de 1977.
- [126] N. DeCLARIS, "Neural - Type Junctions: A New Circuit Concept", Proceedings of the IEEE Midwestern Symposium on Circuits and Systems, agosto de 1976, pp. 268-271.
- [127] R. THOM, "Structural Stability and Morphogenesis, and Outline of a General Theory of Models", W. A. Benjamin, Inc., Reading, Massachusetts, 1975.
- [128] E. D. ADRIAN, "The Mechanism of Nervous Action, Electrical Studies of the Neurone", New Edition, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1959.
- [129] D. J. AIDLEY, "The Physiology of Excitable Cells", Cambridge at the University Press, Cambridge, 1971.
- [130] R. L. BEURLE, "Properties of a Mass of Cells Capable of Regenerating Pulses", *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, Vol. 240B, 1956, pp. 55-95.
- [131] M.A.B.BRAZIER, "A History of the Electrical Activity of the Brain, The First Half - Century", Pitman Medical Publishing Co., Ltd., London, 1961.
- [132] H. A. BLAIR, "On the Intensity - Time Relations for Stimulation by Electric Currents", *The Journal of General Physiology*, Vol. 15, No. 6, 20 de julio de 1932, pp. 709-755.
- [133] M. A. BRAZIER, "The Electrical Activity of the Nervous System", Second Edition, The Macmillan Co., New York, 1966.
- [134] D. R. BRILLINGER, "Measuring the Association of Point Processes: A Case History", *The American Mathematical Monthly*, Vol. 83, No. 1, enero de 1976, pp. 16-22.
- [135] T. M. O. BURROWS, K. A. CAMPBELL, E. J. HOWE, y J. Z. YOUNG, "Conduction Velocity and Diameter of Nerve Fibres of Cephalopods", Proceedings of the Physiological Society, in the *Journal of Physiology*, Vol. 179, 1965, pp. 39P-40P.
- [136] G. CARPENTER, "Travelling Wave Solutions of Nerve Impulse Equations", Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin, 1974.

- [137] W. K. CHANDLER, R. FITZHUGH, y K. S. COLE, "Theoretical Stability Properties of a Space - Clamped Axon", *Biophysical Journal*, Vol. 2, No. 2, Part. 1, mayo de 1962, pp. 105-127.
- [138] Y. A. CHIZMADZHEV, V. S. MARKIN, y A. L. MULER, "Conformational Model of Excitable Cell Membranes - II, Basic Equations", *Biophysics*, Vol. 18, No. 1, 1973, pp. 70-76.
- [139] K. S. COLE, "Membranes, Ions and Impulses", University of California Press, Berkeley, 1968.
- [140] C. C. CONLEY, "On the Existence of Bounded Progressive Wave Solutions of the Nagumo Equation", in preparation (1974).?
- [141] H. D. CRANE, "Possibilities for Signal Processing in Axon Systems", Chapter 7, pp. 138-153 of "Neural Theory and Modeling", R. F. Reiss, Editor, Stanford University Press, Stanford, 1964.
- [142] D. L. DIETMEYER, "Bounds on the Period of Oscillatory Activity in Randomly Interconnected Networks of Neuron - Like Elements", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-17, No. 6, junio de 1968, pp. 578-591.
- [143] J. C. ECCLES, "The Physiology of Nerve Cells", John's Hopkins Press, Baltimore, 1957.
- [144] J. C. ECCLES, "The Physiology of Synapse", Springer - Verlag, Berlin, 1964.
- [145] G. P. FINDLAY, "Studies of Action Potentials in the Vacuole and Cytoplasm of Nitella", *Australian Journal of Biological Sciences*, Vol. 12, No. 4, 1959, pp. 412-426.
- [146] U. F. FRANCK, "Models for Biological Excitation Processes", *Progress in Biophysics*, Vol. 6, 1956, Chapter 6, pp. 171-206.
- [147] R. FITZHUGH, "Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane", *Biophysical Journal*, Vol. 1, No. 6, julio de 1961, pp. 445-466.
- [148] R. FITZHUGH, "Theoretical Effect of Temperature on Threshold in the Hodgkin-Huxley Nerve Model", *The Journal of General Physiology*, Vol. 49, No. 5, mayo de 1966, pp. 989-1005.
- [149] R. FITZHUGH, "Computation of Impulse initiation and Saltatory Conduction in a Myelinated Nerve Fiber", *Biophysical Journal*, Vol. 2, No. 1, 1962, pp. 11-21.
- [150] H. FUKUTOME, H. TAMURA, y K. SUGATA, "An Electric Analogue of the Neuron", *Kybernetik*, Vol. 2, No. 1, septiembre 1963, pp. 28-32.
- [151] R. GRANIT, Editor, "Muscular Afferents and Motor Control", (Proceedings of the First Nobel Symposium), Almqvist & Wiesel, Stockholm, 1966.
- [152] L. GOLDMAN y J. S. ALBUS, "Computation of Impulse Conduction in Myelinated Fibers: Theoretical Basis of Velocity - Diameter Relation", *Biophysical Journal*, Vol. 8, No. 5, mayo de 1968, pp. 596-607.
- [153] J. S. GRIFFITH, "A Field Theory of Neural Nets: I: Derivation of Field Equations", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 25, No. 1, marzo de 1963, pp. 111-120.
- [154] J. S. GRIFFITH, "A Field Theory of Neural Nets: II: Properties of the Field Equations", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 27, No. 2, junio de 1965, pp. 187-195.
- [155] R. GRANIT, "Mechanisms Regulating the Discharge of Motoneurons", Charles Thomas, Publisher, Springfield, Illinois, 1972.
- [156] L. D. HARMON, "Studies with Artificial Neurons, I: Properties and Functions of an Artificial Neuron", *Kybernetik*, Vol. 1, No. 3, diciembre de 1961, pp. 89-101.
- [157] L. D. HARMON, "Neural Analogs", *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, San Francisco, Vol. 21, 1962, pp. 153-158.
- [158] J. Z. HEARON, "Application of Results from Linear Kinetics to the Hodgkin-Huxley Equations", *Biophysical Journal*, Vol. 4, No. 1, Part. 1, enero de 1964, pp. 69-75.

- [159] A. V. HILL, "Excitation and Accommodation in Nerve", *Proceedings of the Royal Society of London, Series B - Biological Sciences*, Vol. 119, No. B814, 1^o de febrero de 1936, pp. 305-355.
- [160] F. F. HILTZ, "Artificial Neuron", *Kybernetik*, Vol. 1, No. 6, mayo de 1963, pp. 231-236.
- [161] A. L. HODGKIN, "The Conduction of the Nervous Impulse", Charles C. Thomas, Publisher, Springfield, Illinois, 1964.
- [162] A. S. HOUSEHOLDER, "A Theory of Steady - State Activity in Nerve - Fiber Networks: I. Definitions and Preliminary Lemmas", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 3, 1941, pp. 63-69.
- [163] A. S. HOUSEHOLDER, "A Theory of Steady - State Activity in Nerve - Fiber Networks II: The Simple Circuit", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 3, 1941, pp. 105-112.
- [164] A. S. HOUSEHOLDER, "A Neural Mechanism for Discrimination: II. Discrimination of Weights", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 2, 1940, pp. 1-13.
- [165] T. M. IL'INOVA y R. V. KHOKHLOV, "Wave Processes in Lines with Nonlinear Shunt Resistance", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 8, 1963, pp. 1864-1972.
- [166] T. M. IL'INOVA, "Interaction of Waves in a Distributed Line with a Nonlinear Parallel Loss", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 9, No. 12, diciembre de 1964, pp. 1728-1735.
- [167] M. H. JACOBS, "Diffusion Processes", Springer - Verlag, Berlin, 1967.
- [168] F. JENIK y H. HOEHNE, "Über die Impulsverarbeitung eines mathematischen Neuronmodelles", *Kybernetik*, Vol. 3, No. 3, septiembre de 1966, pp. 109-128.
- [169] D. JUNGE, "Nerve and Muscle Excitation", Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts, 1976.
- [170] B. KATZ, "Nerve, Muscle, and Synapse", McGraw-Hill Book Co., New York, 1966.
- [171] B. I. KHODOROV, "The Problem of Excitability. Electrical Excitability and Ionic Permeability of the Nerve Membrane", Plenum Press, New York, 1974.
- [172] B. N. KHOLODENKO, "Networks of Excitable Elements - IV. Networks of Elements without Refractoriness in Continuous Time", *Biophysics*, Vol. 19, No. 2, 1974, pp. 325-330.
- [173] H. D. LANDAHL, "A Note on Mathematical Models for the Interaction of Neural Elements", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 23, No. 1, marzo de 1961, pp. 91-97.
- [174] L. LAPICQUE, "L'Excitabilité en Fonction du Temps", Les Presses Universitaires de France, Paris, 1926.
- [175] J. LEVINSON y L. D. HARMON, "Studies with Artificial Neurons, III: Mechanisms of Flicker - Fusion", *Kybernetik*, Vol. 1, No. 3, diciembre de 1961, pp. 107-117.
- [176] E. R. LEWIS, "An Electronic Model of Neuroelectric Point Processes", *Kybernetik*, Vol. 5, No. 1, julio de 1968, pp. 30-46.
- [177] R. J. MCGREGOR y R. M. OLIVER, "A Model for Repetitive Firing in Neurons", *Kybernetik*, Vol. 16, No. 1, 1974, pp. 53-64.
- [178] A. M. MONNIER, "L'Excitation Électrique des Tissus", Hermann, Paris, 1934.
- [179] P. P. NELSON, "Un Modèle du Neurone", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 24, No. 2, junio de 1962, pp. 159-181.
- [180] J. G. NICHOLLS y D. VAN ESSEN, "The Nervous System of the Leech", *Scientific American*, Vol. 230, No. 1, enero de 1974, pp. 38-48.
- [181] F. OFFNER, "Circuit Theory of Nervous Conduction", *The American Journal of Physiology*, Vol. 126, No. 3, 1^o de julio de 1939, p. P594.

- [182] V. F. PASTUSHENKO, V. S. MARKIN e Y. A. CHIZMADZHEV, "Uniform Modes of Work of Neurone Networks - I. Steady Modes", *Biophysics*, Vol. 19, No. 1, 1974, pp. 131-136.
- [183] V. F. PASTUSHENKO, V. S. MARKIN e Y. A. CHIZMADZHEV, "Homogeneous Modes of Work of the Neurone Networks - II. Periodic Solutions and Stability of Steady States", *Biophysics*, Vol. 19, No. 2, 1974, pp. 319-324.
- [184] W. F. PICKARD, "On the Propagation of the Nervous Impulse Down Medullated and Unmedullated Fibers", *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 11, No. 1, mayo de 1966, pp. 30-45.
- [185] G. I. POLIAKOV, "Neuron Structure of the Brain", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.
- [186] M. I. RABINOVICH, "Self Oscillations in a Transmission Line with Tunnel Diodes", *Radio Engineering and Electronic Physics*, Vol. 11, No. 8, agosto de 1966, pp. 1271-1275.
- [187] N. RASHEVSKY, "Note on the Mathematical Biophysics of Temporal Sequences of Stimuli", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 3, 1941, pp. 89-92.
- [188] N. RASHEVSKY, "Mathematical Biophysics", Dover Publications, Inc., New York, Third Revised Edition in Two Volumes, 1960.
- [189] J. RINZEL, "Travelling Wave Solutions of a Nerve Conduction Equation", Ph.D. Dissertation, Courant Institute, 1973.
- [190] W. A. H. RUSHTON, "Initiation of the Propagated Disturbance", *Proc. Roy. Soc., B.*, Vol. 124, 1937, pp. 210-243.
- [191] C. P. SANDBANK, "Integrated Tunnel Diode Circuits", in "Solid Circuits and Microminiaturization", G. W. A. Dummer, Editor, The Macmillan Co., New York, 1964, pp. 221-230.
- [192] A. C. SCOTT, "Electrophysics of a Nerve Fiber", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 47, No. 2, abril de 1975, pp. 487-533.
- [193] B. I. H. SCOTT, "Electricity in Plants", *Scientific American*, Vol. 211, No. 10, octubre de 1962, pp. 107-114.
- [194] D. R. SMITH y C. H. DAVIDSON, "Maintained Activity in Neural Nets", *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 9, 1962, pp. 268-279.
- [195] C. J. SWIGERT, "A Mode Control Model of a Neuron's Axon and Dendrites", *Kybernetik*, Vol. 7, No. 1, abril de 1970, pp. 31-41.
- [196] I. TASAKI, "Conduction of the Nerve Impulse", in "Handbook of Physiology: Neurophysiology, Vol. 1", J. Field, Editor, American Physiological Society, Washington, D.C., 1959.
- [197] W. A. VAN BERGEIJK, "Studies with Artificial Neurons, II: Analog of the External Spiral Innervation of the Cochlea", *Kybernetik*, Vol. 1, No. 3, diciembre de 1961, pp. 102-107.
- [198] L. Y. WEI, "Possible Origin of Action Potential and Birefringence Change in Nerve Axon", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 33, 1971 pp. 521-537.
- [199] L. Y. WEI, "Quantum Theory of Time - Varying Stimulation in Nerve", *The Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 35, 1973, pp. 359-374.
- [200] L. Y. WEI, "Dipole Mechanisms of Electrical, Optical and Thermal Energy Transductions in Nerve Membrane", *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 227, 18 de febrero de 1974, pp. 285-293.
- [201] L. Y. WEI, "Dipole Theory of Heat Production and Absorption in Nerve Axon", *Biophysical Journal*, Vol. 12, 1972, pp. 1159-1170.
- [202] A. M. WEINBERG, "The Equivalence of the Conduction Theories of Rashevsky and Rushton", *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 2, 1940, pp. 61-64.
- [203] J. W. WOODBURY y W. S. CRILL, "On the Problem of Impulse Conduction in the Atrium", Proceedings of the International Symposium, Nervous Inhibitions, Pergamon, New York, 1961.

- [204] N. L. WULFSOHN y A. SANCES, Jr., Editors, "The Nervous System and Electric Currents", Proceedings of the Annual Conference of the Neuro-Electric Society, Vol. 1, 1970; Vol. 2, 1971.
- [205] E. C. ZACHMANOGIOU y D. W. THOE, "Introduction to Partial Differential Equations with Applications", The Williams & Wilkins Co. Baltimore, 1976.
- [206] A. AVILA, "Lluvias Tropicales", en "Los Trovadores del Pueblo", Tomo 1, seleccionado por S. Feijóo, Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Cuba, 1960.
- [207] C. L. CHAO, "Wave Propagation in a Nonlinear Transmission Line and Its Application", IEEE NEREM Record, Vol. 11, noviembre de 1969, pp. 164-165.
- [208] S. A. REIBLE y A. C. SCOTT, "Pulse Propagation on a Superconductive Neuristor", *Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 11, noviembre de 1975, pp. 4935-4945.
- [209] V. A. SKORIK, V. I. STAFEEV, y G. I. FURSIN, "Some Properties of n-p-i Neuristor Structures with a Drift Active Coupling", *Soviet Physics-Semiconductors*, Vol. 9, No. 6, junio de 1975, pp. 803-804.

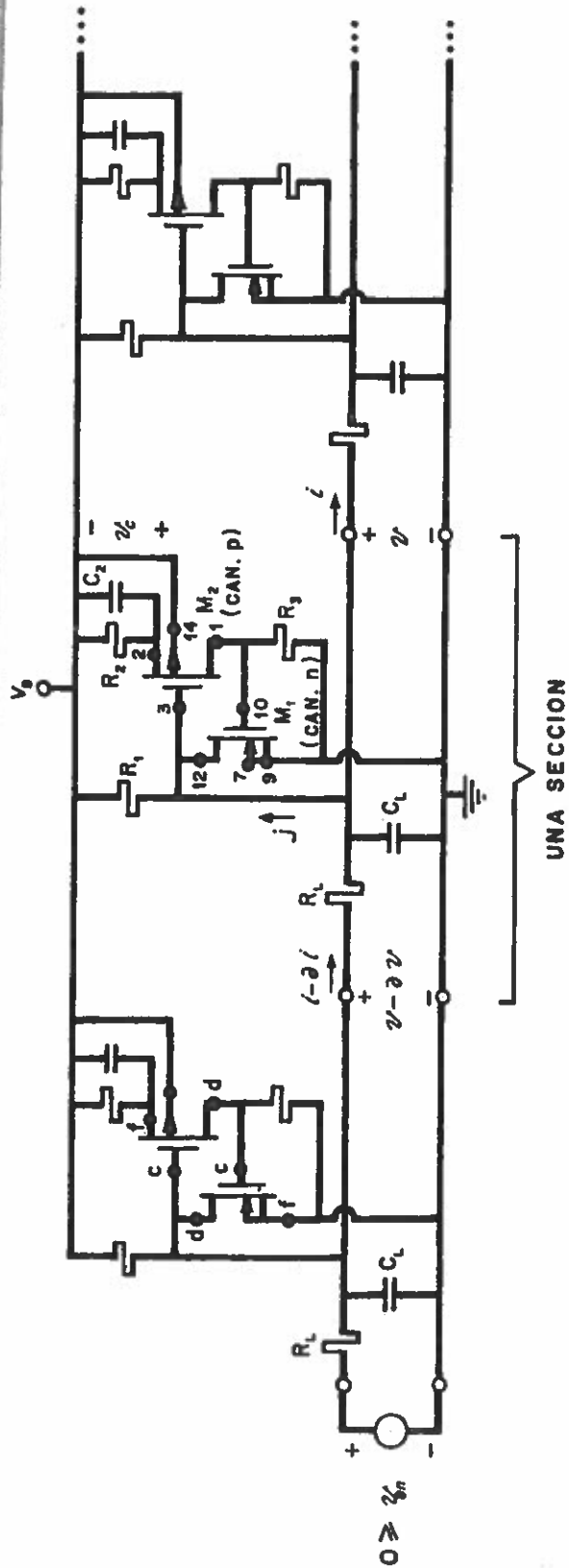


FIG. 1. Circuito básico de un neuristor, constituido por una línea activa para transmisión de impulsos negativos.

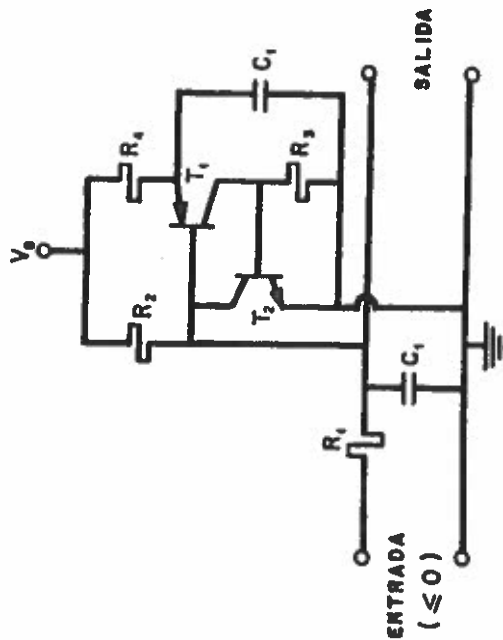


FIG. 2. Una sección del circuito de Wilamowsky et al. [85].

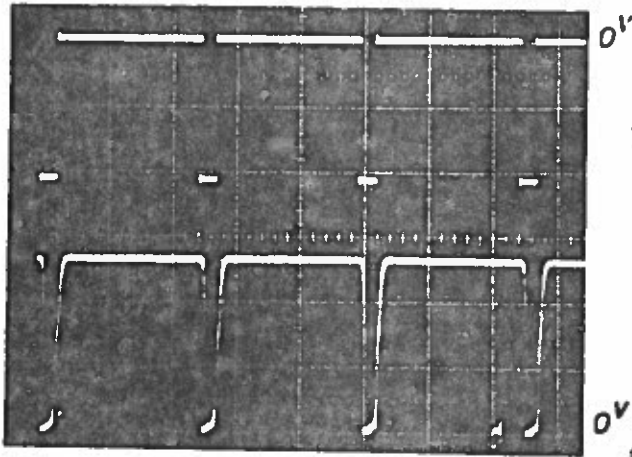


FIG. 3. Impulsos típicos de la Fig. 1 ($10 \mu\text{s}/\text{div}$). Arriba: Voltaje de entrada ($2 \text{ V}/\text{div}$). Abajo: Voltaje en el terminal 3 del quinto paso ($5 \text{ V}/\text{div}$).

FIG. 4. Voltajes internos ampliados ($0,5 \mu\text{s}/\text{div}$). Arriba: Voltaje de entrada ($2 \text{ V}/\text{div}$). Los cuatro trazos de abajo representan voltajes internos ($5 \text{ V}/\text{div}$): el primero de arriba, a la izquierda: V_2 (quinto paso); el 2º desde arriba, a la izquierda: V_4 (quinto paso); el 3º desde arriba, a la izquierda: V_3 (cuarto paso); el último, a la izquierda: V_1 (quinto paso).

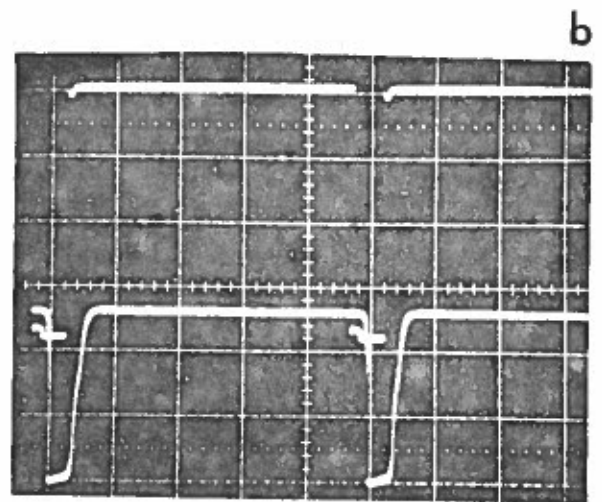
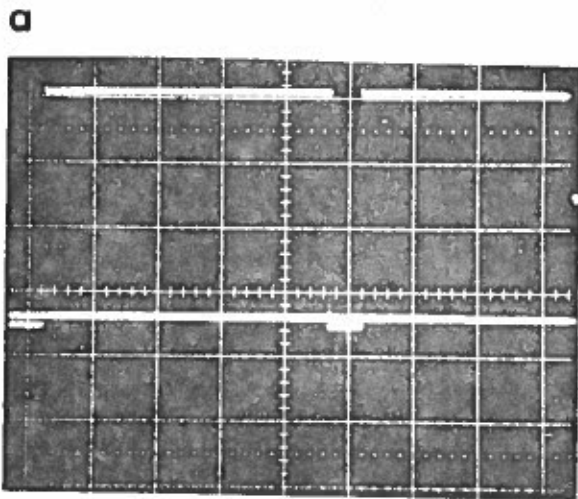
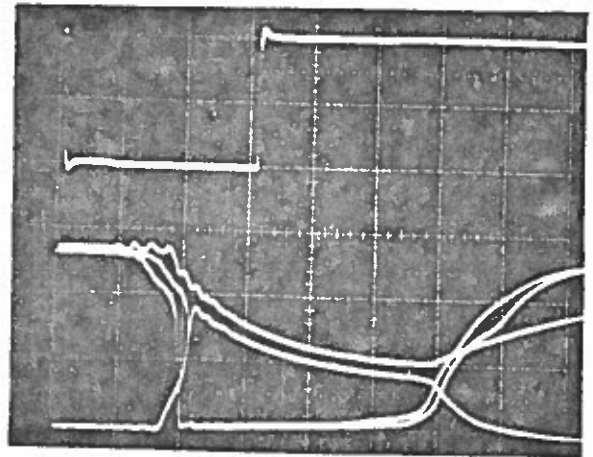
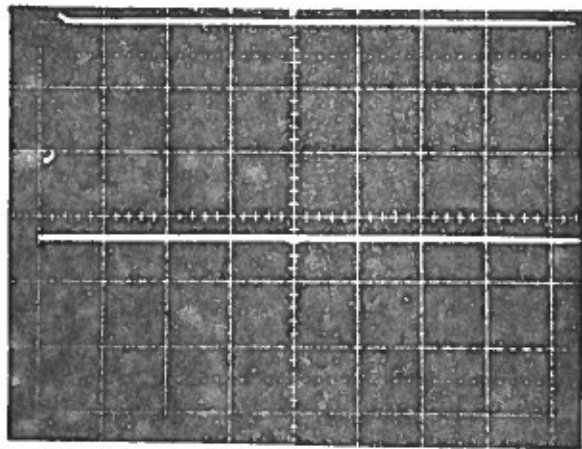
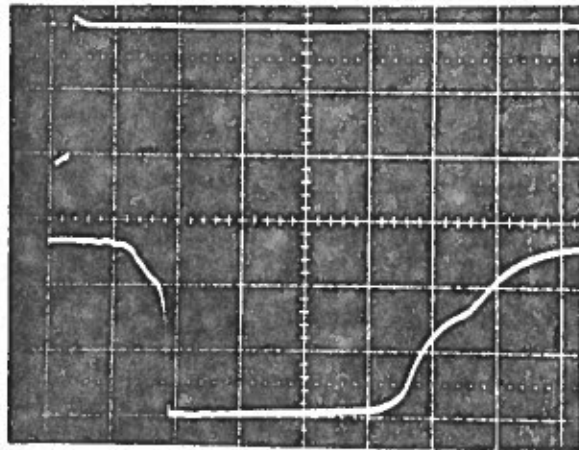


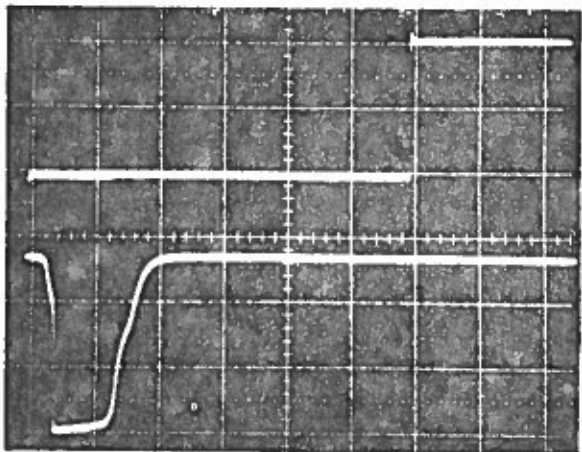
FIG. 5. Umbral de amplitud ($5 \mu\text{s}/\text{div}$). a) Amplitud de entrada ligeramente por debajo del umbral. b) Amplitud de entrada ligeramente por encima del umbral. [Partes de arriba: entrada ($0,5 \text{ V}/\text{div}$). Partes de abajo: voltaje en el quinto paso ($5 \text{ V}/\text{div}$)].



a

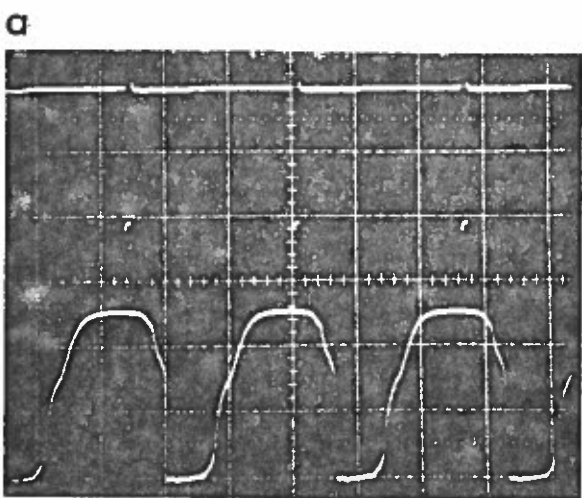


b

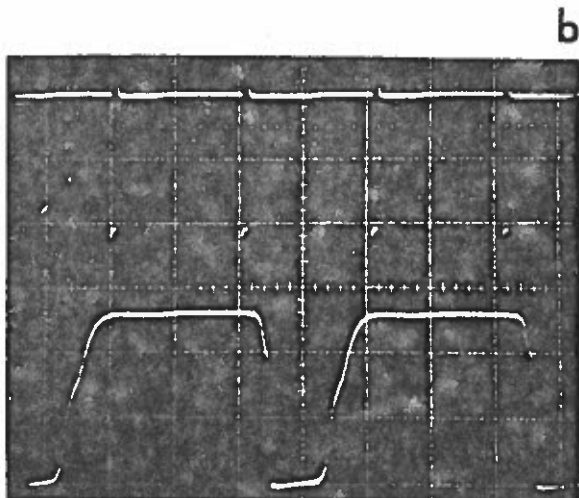


c

FIG. 6 Umbral del ancho del impulso. a) Ancho del impulso de entrada justamente por debajo del umbral ($0,5 \mu\text{s}/\text{div}$). b) Ancho del impulso de entrada justamente por encima del umbral ($0,5 \mu\text{s}/\text{div}$). c) Independencia con respecto al ancho del impulso de entrada por encima del umbral ($2 \mu\text{s}/\text{div}$). Arriba: Entrada ($2\text{V}/\text{div}$). Abajo: Voltaje en la quinta etapa ($5\text{V}/\text{div}$).



a



b

FIG. 7. Periodo refractario ($2 \mu\text{s}/\text{div}$). a) Rapidez de repetición de entrada justo antes de hacerse refractario el circuito. b) Rapidez de repetición de entrada justo después de haber dejado de ser refractario el circuito. [Partes de arriba: entrada ($2\text{V}/\text{div}$). Partes de abajo: voltaje en el quinto paso ($5\text{V}/\text{div}$)].

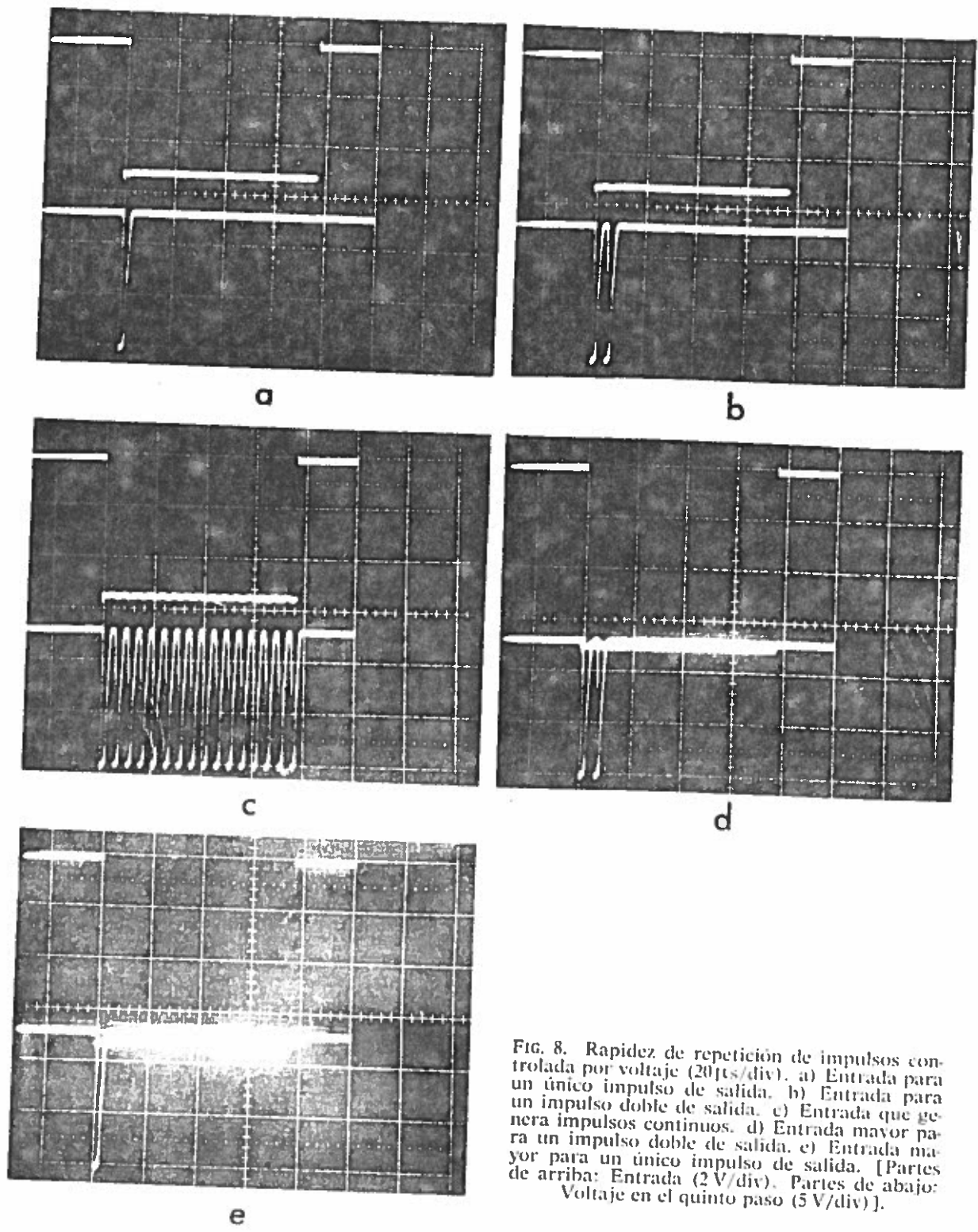


FIG. 8. Rapidez de repetición de impulsos controlada por voltaje (20µs/div). a) Entrada para un único impulso de salida. b) Entrada para un impulso doble de salida. c) Entrada que genera impulsos continuos. d) Entrada mayor para un impulso doble de salida. e) Entrada mayor para un único impulso de salida. [Partes de arriba: Entrada (2 V/div). Partes de abajo: Voltaje en el quinto paso (5 V/div)].

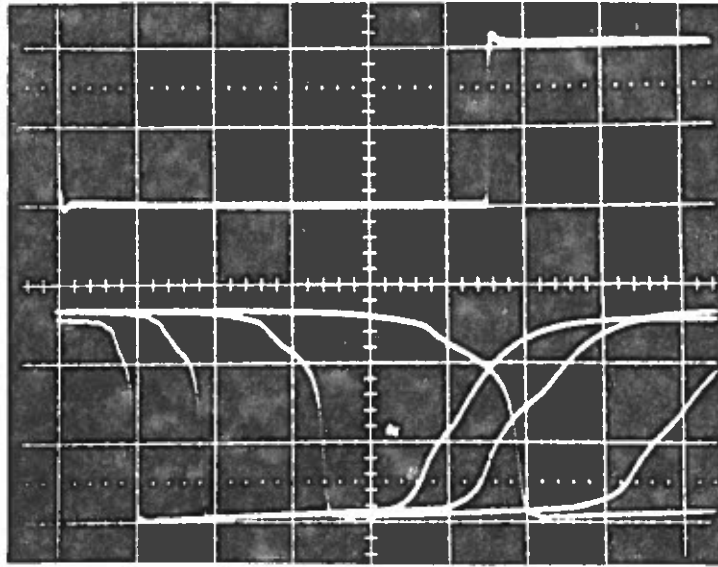


FIG. 9. Control del retardo mediante R_L y C_L ($0,5 \mu s/div$; $V_B = 13 V$). Arriba: Entrada ($2 V/div$). Abajo: ($5 V/div$)
 — el más a la izquierda: $R_L = 2,7 k\Omega$; $C_L = 0 pF$.
 — el 2º: $R_L = 5,6 k\Omega$; $C_L = 0 pF$.
 — el 3º: $R_L = 5,6 k\Omega$; $C_L = 50 pF$.
 — el más a la derecha: $R_L = 5,6 k\Omega$; $C_L = 100 pF$.

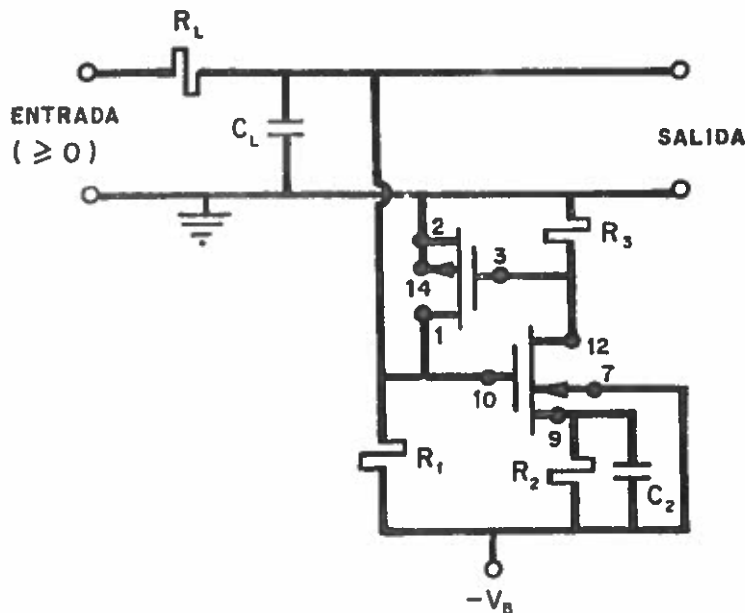


FIG. 10. Una sección de la línea de la Fig. 1, modificada para la transmisión de impulsos positivos.

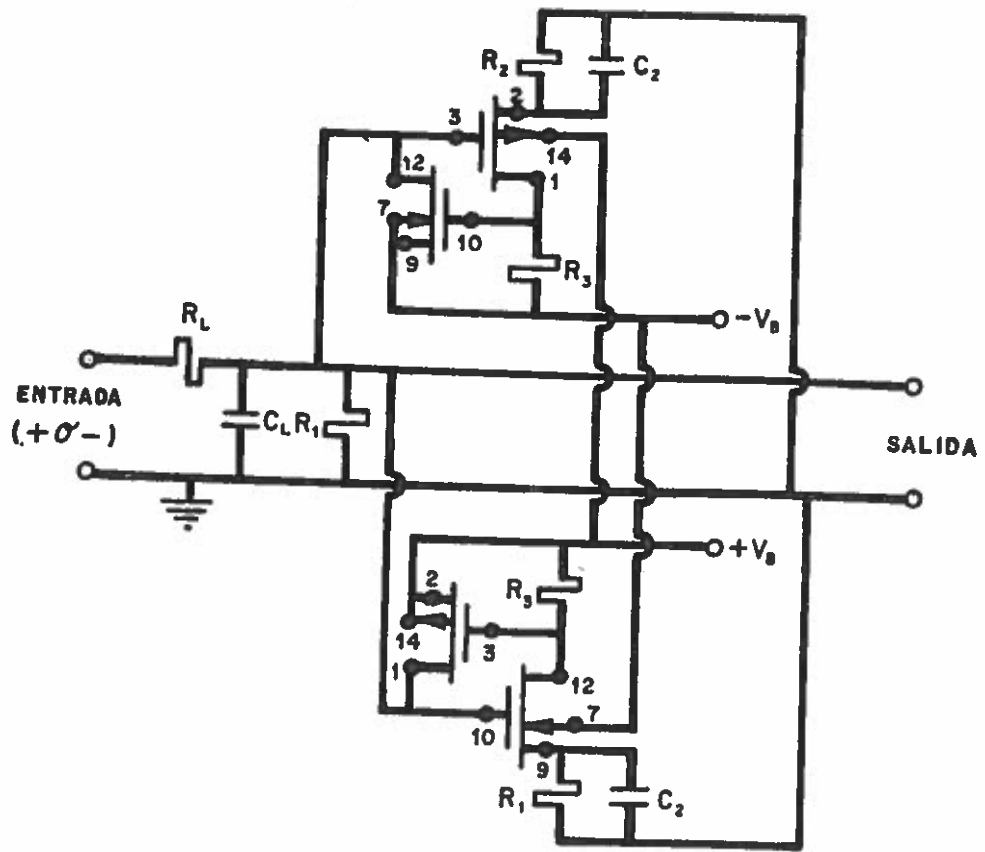


FIG. 11 Sección de línea-neuristor para transmisión de pulsos positivos y negativos.

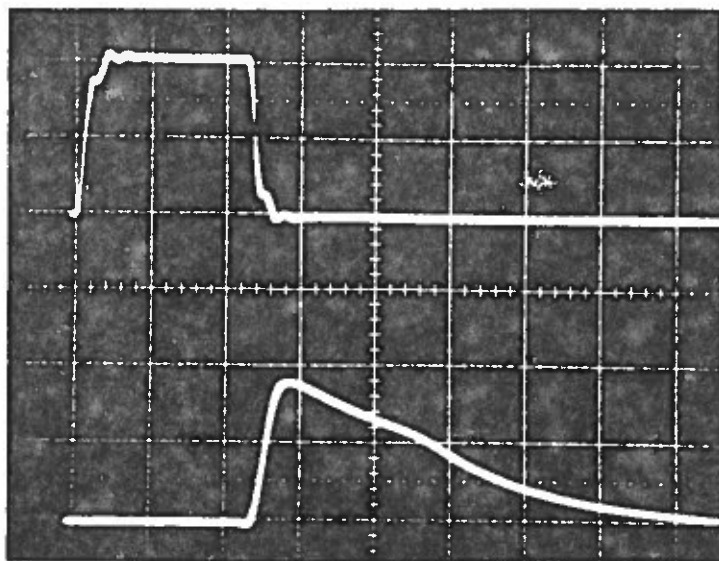
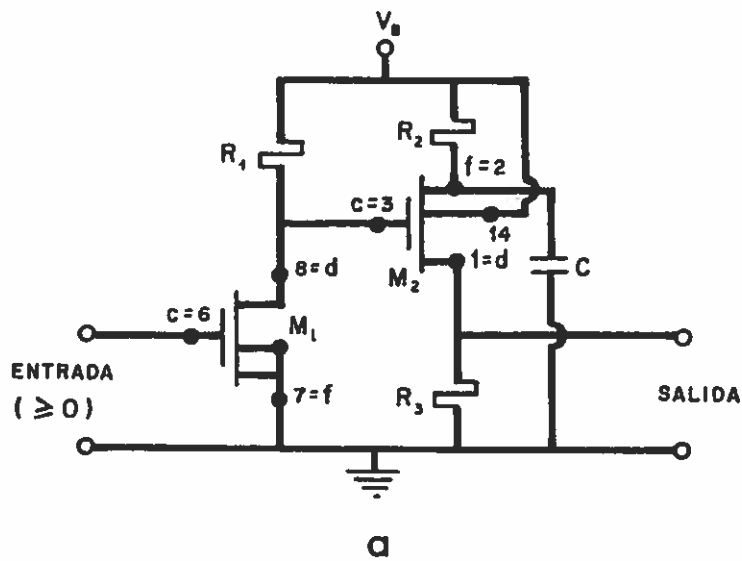


FIG. 12. Sección de línea-neuristor unilateral, y respuesta.
 a) Circuito (Valores típicos: $R_1 = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 2,7 \text{ k}\Omega$; $V_B = 9 \text{ V}$, $C = 100 \text{ pF}$).
 b) Respuesta (2 V/div ; $0,2 \mu\text{s/div}$). Trazo superior: entrada. Trazo inferior: salida en el quinto paso.