

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 747 424**

51 Int. Cl.:

**G06N 3/04** (2006.01)

**G06N 3/063** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.05.2013 PCT/GB2013/051178**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.11.2013 WO13175171**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2013 E 13730624 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.07.2019 EP 2856393**

54 Título: **Sistema de red neuronal artificial de tipo asincrónico**

30 Prioridad:

**25.05.2012 GB 201209174**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**10.03.2020**

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY OF BATH (100.0%)  
Bath Ventures Innovation Centre, Ground&First  
Floor, Carpenter House  
Bath, Bath and North East Somerset BA1 1UD, GB**

72 Inventor/es:

**NOGARET, ALAIN**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 747 424 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Sistema de red neuronal artificial de tipo asincrónico

## 5 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Las redes neuronales se forman a partir de múltiples neuronas que se comunican entre sí mediante sinapsis con el fin de proporcionar o procesar, información por medio de señalización química y eléctrica. Para una sinapsis química, una secuencia compleja de eventos hace que la neurona se active. Sin embargo, independientemente de los diversos mecanismos físicos de la comunicación en la sinapsis química, el efecto de la entrada sináptica puede clasificarse como excitador (elevación del potencial de membrana) o inhibidor (reducción potencial de membrana). Las neuronas se comunican, además, mediante de un segundo tipo de sinapsis denominada uniones de hendidura o sinapsis eléctrica, que cumple una función similar a la sinapsis química. Las uniones de hendiduras, a diferencia de la sinapsis química, no introducen ningún retardo temporal en la señalización eléctrica desde la neurona pre-sináptica a la neurona post-sináptica.

Los generadores de patrones central (CPG) son redes neuronales que son responsables de coordinar la actividad motora en animales y humanos, y la generación, de forma endógena, de los ritmos que sustentan la vida. Los generadores de patrones central suelen prestar múltiples funciones que varían desde funciones que son centrales para el movimiento, respiración, natación, deglución, generación de ritmo y otras funciones oscilatorias, transitorias o permanentes. Los generadores de patrones central se encuentran en todos los animales, desde invertebrados, tal como sanguijuelas o gasterópodos, hasta el tallo cerebral de los mamíferos. La publicación de AMEMIYA Y ET AL: "Un generador de patrones central analógico CMOS para la coordinación entre extremidades en locomoción cuadrúpeda", TRANSACCIONES DE IEEE EN REDES REURONALES, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, Estados Unidos, Vol. 14, nº 5, 1 de septiembre de 2003, da a conocer un sistema de red neuronal artificial asíncrono que comprende una pluralidad de neuronas, cada una de las cuales es utilizable para: la recepción de una respectiva señal de entrada que representa un estímulo de entrada para la red, y la generación de una señal de salida en respuesta a la recepción de dicho estímulo de entrada, utilizándose el sistema de red para proporcionar una señal de salida que representa una secuencia espacio-temporal de pulsos eléctricos rítmicos a un sistema externo en respuesta a la recepción de dicho estímulo de entrada, en donde respectivos pares de las múltiples neuronas están interconectados utilizando enlaces mutuamente inhibidores.

## SUMARIO DE LA INVENCION

De conformidad con un ejemplo, se proporciona una red neuronal para generar secuencias espacio-temporales de pulsos eléctricos, con el fin de permitir la coordinación de procesos distribuidos. En un ejemplo, neuronas electrónicas están interconectadas, por medio de enlaces mutuamente inhibidores y participan en la activación por turno. La actividad eléctrica rebota de una neurona a la siguiente siguiendo rutas estables en la red cuya trayectoria depende de un estímulo aplicado. En un ejemplo, los enlaces inhibidores pueden conmutarse a enlaces excitadores, si así se desea.

De conformidad con un ejemplo, se proporciona un sistema de red neuronal asíncrono, no biológico, que comprende múltiples neuronas para la recepción de respectivas señales de entrada que representan un estímulo de entrada para la red, suministran una señal de salida que representa una secuencia espacio-temporal de pulsos eléctricos rítmicos para un sistema externo, en donde algunas respectivas de entre las múltiples neuronas están conectadas utilizando múltiples enlaces mutuamente inhibidores. Se puede conectar una proporción de algunas de las respectivas neuronas utilizando enlaces mutuamente excitadores seleccionados sobre la base de las funciones deseadas de un generador de patrones central. A modo de ejemplo, una proporción de sinapsis excitadora puede variar entre 0 y 100 %. El número de sinapsis excitadoras puede variar dependiendo de un tipo de generador de patrones central biológico (CPG) que ha de modelarse, tal como un CPG para el corazón, o para respirar, o nadar, etc. En un ejemplo, se calcula una matriz de conductancias y se utiliza para un patrón rítmico dado. En condiciones normales, algunas de las conductancias serán positivas (excitadoras) y otras negativas (inhibidoras). Un enlace inhibidor puede ser un enlace sináptico entre un par de neuronas para formar una sinapsis, y que se forma utilizando un amplificador de corriente diferencial. Una membrana neuronal puede incluir múltiples componentes de conductancia para simular una respuesta de neuronas biológicas. La conductancia de los canales de membrana neuronal puede controlar la tensión de membrana de una neurona. El amplificador de corriente diferencial puede recibir, como entradas, respectivas medidas de tensión de membrana de salida respectivas a partir de un par de neuronas. El amplificador de corriente diferencial puede recibir una señal de control como entrada para controlar la conductancia de la sinapsis.

De conformidad con un ejemplo, se proporciona un sistema de red neuronal asíncrono no biológico, en donde las neuronas están constituidas de múltiples pares de transistores CMOS diferenciales. Las señales de entrada seleccionadas se pueden utilizar para generar ciclos de límite específicos para la red.

Según un ejemplo, se proporciona un generador de patrones central que comprende múltiples neuronas conectadas entre sí, en una configuración predeterminada, utilizando múltiples enlaces mutuamente inhibidores, representando

las neuronas para recibir señales de entrada un estímulo de entrada para el generador, proporcionando una señal de salida que representa una secuencia de pulsos eléctricos periódicos para uso en un sistema externo. Las neuronas pueden formarse a partir de múltiples pares diferenciales de transistores CMOS que representan componentes de conductancia de canal para las neuronas. Los componentes de conductancia de canal pueden utilizar las señales de entrada para proporcionar un valor de tensión de membrana para una neurona. En un ejemplo, un amplificador de corriente diferencial puede recibir, como entrada, respectivos valores de tensión de membrana a partir de un par de neuronas, con el fin de proporcionar un enlace sináptico inhibitor entre ellas. El amplificador de corriente diferencial puede ser un amplificador de corriente diferencial basado en CMOS que incluye un transistor de control para controlar un valor de conductancia del enlace sináptico. El transistor de control puede proporcionar un valor de conductancia que representa un grado de acoplamiento entre neuronas cuyas tensiones de membrana se introducen en el amplificador de corriente diferencial. En un ejemplo, el generador de patrones central puede proporcionar una acción excitadora o inhibitora, redirigiendo una corriente de salida hacia la neurona pre, o post-sináptica.

De conformidad con un ejemplo, se proporciona un circuito integrado que comprende múltiples pares diferenciales de transistores CMOS dispuestos para formar un sistema de red.

De conformidad con otro ejemplo, se proporciona un circuito integrado que comprende múltiples pares diferenciales de transistores CMOS dispuestos para formar un generador de patrones central.

Según otro ejemplo, se proporciona un método para generar una secuencia espacio-temporal coordinada de pulsos eléctricos utilizando una red neuronal artificial, que comprende la interconexión de múltiples componentes neuronales basados en CMOS usando enlaces sinápticos mutuamente inhibitoros, por medio de la selección de un valor de conductancia para enlaces sinápticos artificiales que corresponden a una sinapsis inhibitora, que proporcionan un estímulo de entrada para que la red cause la generación de múltiples de las neuronas a activar a lo largo de una ruta estable en la red, generando una secuencia de salida de pulsos eléctricos. Para un par de neuronas en la red, el valor de conductancia se puede seleccionar de modo que una corriente inyectada en la neurona post-sináptica sea proporcional a la diferencia de tensión entre la tensión de membrana de la neurona pre-sináptica y la tensión de membrana de la neurona post-sináptica. Una sinapsis inhibitora puede incluir un amplificador de corriente diferencial, utilizando el valor de conductancia controlado la tensión de rejilla de una fuente de corriente para el amplificador. En un ejemplo, la red neuronal puede ser asíncrona.

De conformidad con un ejemplo, se da a conocer un marcapasos para uso con un corazón para coordinar la contracción de las cavidades cardíacas estimulándolas con una secuencia coordinada de pulsos eléctricos, que comprende un CPG o un circuito integrado para proporcionar la secuencia coordinada de pulsos sensibles a un estímulo de entrada. Los latidos de las cavidades cardíacas se pueden coordinar mediante la secuencia de pulsos. El CPG es utilizable para sincronizar la secuencia coordinada de pulsos en respuesta a cambios en el estímulo de entrada con el fin de modular los latidos de las cavidades. El CPG modula los latidos de las cavidades cardíacas para sincronizar con otros ritmos corporales. El CPG es utilizable para ajustar el estímulo de entrada en respuesta a cambios en una condición externa.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Figura 1(a) representa una red neuronal de 5 neuronas que compiten mediante sinapsis mutuamente inhibitoras, de conformidad con un ejemplo;

Las Figuras 1(b) y 1(c) ilustran dos ejemplos de patrones de pulso coordinados obtenidos cuando las 5 neuronas de la Figura 1(a) se excitan por dos estímulos de corriente diferentes: (0,0.4, 0, 0, 0.4) y (0.4, 0, 0.4, 0.4, 0).

La Figura 2 es una representación esquemática de una membrana de neurona electrónica de conformidad con un ejemplo;

La Figura 3 es una representación esquemática de un circuito para controlar la conductancia del canal de potasio de la membrana de la Figura 1, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 4 es una representación esquemática de un circuito para controlar la conductancia del canal de sodio de la membrana de la Figura 1, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 5 ilustra la respuesta típica del circuito neuronal (Figuras 2 a 4) para aumentar la excitación de corriente  $I_{inj}$ ;

La Figura 6(a) es una representación esquemática de un circuito para la puesta en práctica de una sinapsis de unión de hendidura, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 6(b) muestra una serie de gráficos de una tensión de salida de sinapsis de unión de hendiduras, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 6(c) es un diagrama de bloques esquemático de un CPG, de conformidad con un ejemplo;

5 La Figura 7 es una representación esquemática que muestra cómo se pone en práctica un par de sinapsis en el lado de componente de una placa de circuito impreso, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 8 es una representación esquemática del cuadrante superior izquierdo del lado de componentes de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

10 La Figura 9 es una representación esquemática del cuadrante superior izquierdo del lado de soldadura de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central de conformidad con un ejemplo;

La Figura 10 es una representación esquemática del cuadrante superior derecho del lado de componentes de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

15 La Figura 11 es una representación esquemática del cuadrante superior derecho del lado de soldadura de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

20 La Figura 12 es una representación esquemática del cuadrante inferior izquierdo del lado de componentes de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 13 es una representación esquemática del cuadrante inferior izquierdo del lado de soldadura de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

25 La Figura 14 es una representación esquemática del cuadrante inferior derecho del lado de componentes de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 15 es una representación esquemática del cuadrante inferior derecho del lado de soldadura de una placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo;

30 La Figura 16 es una representación esquemática que muestra algunos detalles de componentes montados en la placa de circuito impreso de la Figura 12, a modo de un ejemplo de una realización práctica;

35 La Figura 17 es una representación esquemática que muestra los detalles de componentes montados en la placa de circuito impreso de la Figura 14 como un ejemplo de una realización práctica;

La Figura 18 muestra un generador de patrones central de prueba en funcionamiento, de conformidad con un ejemplo;

40 La Figura 19 es un conjunto de gráficos para mostrar la sincronización en fase de dos neuronas a medida que interactúan mediante sinapsis mutuamente excitadoras, de conformidad con un ejemplo;

45 La Figura 20 es un conjunto de gráficos para mostrar la sincronización anti-fase de dos neuronas acopladas mediante sinapsis mutuamente inhibitoria, de conformidad con un ejemplo;

La Figura 21 es un conjunto de gráficos para mostrar las oscilaciones de 4 neuronas que compiten mediante sinapsis mutuamente inhibitoria, que proporciona patrones de coordinación complejos, de conformidad con un ejemplo; y

50 La Figura 22 muestra la sincronización de un par mutuamente inhibitorio, de conformidad con un ejemplo.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA

55 Ha de entenderse que, aunque los términos primero, segundo, etc., se pueden utilizar aquí para describir varios elementos, estos elementos no deberían estar limitados por estos términos. Estos términos se utilizan solamente para distinguir un elemento de otro. La terminología utilizada en este documento tiene la finalidad de describir ejemplos particulares solamente, y no pretende ser limitadora. Tal como aquí se utilizan, las formas singulares "un", "una" y "la" están previstas para incluir también las formas plurales, a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Ha de entenderse, además, que el término "y/o", según se utiliza este documento, se refiere a, y abarca, todas y cada una de las combinaciones posibles de uno o más de los elementos enumerados asociados. Se entenderá, además, que los términos "comprende" y/o "que comprende", cuando se utilizan en esta invención, especifican la presencia de características, números enteros, etapas, operaciones, elementos y/o componentes establecidos, pero no excluyen la presencia, o adición, de una o más otras características, números enteros, etapas, operaciones, elementos, componentes y/o sus grupos.

65

De conformidad con un ejemplo, una red neuronal es una red no biológica compuesta de neuronas artificiales, en la que pares de neuronas están conectados mediante pares de sinapsis unidireccional con diferentes conductancias. Las sinapsis en un par pueden ser ambas inhibitoras, ambas excitadoras o una inhibidora con la otra siendo excitadora, a modo de ejemplo. En condiciones normales, se puede acceder a todas estas configuraciones utilizando la tecnología actual, sin embargo, la configuración mutuamente inhibidora es la más importante para aplicaciones, ya que mantiene los patrones de coordinación. La Figura 1 es una representación esquemática de una red neuronal de conformidad con un ejemplo en donde cinco neuronas están interconectadas con sinapsis mutuamente inhibitoras. Conviene señalar que más o menos neuronas estarán presentes en una red, de conformidad con un ejemplo. En condiciones normales, habrá más neuronas presentes.

Haciendo referencia a la Figura 1, si la neurona A se activa, bloquea la activación de la neurona B y, al contrario, cuando la neurona B se activa, bloquea la neurona A. La activación alternativa de las neuronas A y B produce oscilaciones estables que apuntalan las oscilaciones de generadores de patrones centrales en el mundo natural, por ejemplo, el latido del corazón de una sanguijuela. En consecuencia, cuando N neuronas están conectadas entre sí mediante sinapsis mutuamente inhibitoras, las neuronas compiten, de forma similar, para su activación, por turno. La actividad neuronal rebota de una neurona a la siguiente en la red, con la secuencia de activación que describe una trayectoria dentro de la red, cuya ruta está especificada por el estímulo de entrada, es decir, las corrientes de entrada que estimulan la red.

En el ejemplo de la Figura 1, cinco neuronas están interconectadas mediante sinapsis mutuamente inhibitoras. La actividad eléctrica rebota de una neurona a la siguiente produciendo secuencias espacio-temporales de pulsos de tensión. Dos de estas secuencias se ilustran en la Figura 1(b) y 1(c), que corresponden a dos estímulos de corriente diferentes y que representan dos ejemplos de patrones de pulso coordinado, que se obtienen cuando las 5 neuronas de la Figura 1(a) son excitadas por dos diferentes estímulos de corriente: (0,0.4, 0, 0, 0.4) y (0.4, 0, 0.4,0.4, 0).

En un ejemplo, una red como la descrita con referencia a la Figura 1, se puede poner en práctica en hardware utilizando varios modelos de neuronas. En condiciones normales, la elección del modelo de neurona tendrá en cuenta si existe compatibilidad en la tecnología utilizada para la realización de una neurona, y la del sistema deseado, como un conjunto, con el fin de permitir una fácil integración de redes en un circuito integrado y la reducción a escala de grandes redes, por ejemplo. Asimismo, suele ser conveniente que los parámetros para controlar las tensiones de valor umbral, las conductancias de canal iónico, y los retardos temporales, por ejemplo, en una neurona, tengan cantidades equivalentes en neuronas reales (biológicas). Lo que antecede permite el modelado cuantitativo de generadores de patrones centrales biológicos (CPG) con hardware de CPG. La simulación precisa de CPGs biológicos es importante para que los dispositivos protésicos sean capaces de coordinar la actividad motora, tal como los marcapasos, y para desarrollar terapias médicas basadas en la estimulación neuro-eléctrica como un sustituto de los tratamientos farmacológicos. Conviene señalar, además, que una neurona es extensible mediante la incorporación de canales iónicos adicionales, tal como el calcio o potasio rectificador interno que puede permitir el modelado preciso de las neuronas más complejas, tales como las de los mamíferos y las aves.

La Figura 2 es una representación esquemática de una membrana de neurona, de conformidad con un ejemplo. Los transistores etiquetados 202 y 201 son MOSFETs tipo n y tipo p, respectivamente, cuyas conductancias de drenaje a fuente modelan las conductancias de un canal de potasio ( $g_K$ ) y un canal de ion de sodio ( $g_{Na}$ ). Los MOSFETs 201 y 202 son parte de los sub-circuitos representados en las Figuras 3 y 4, que realizan el control de la apertura y cierre de estos canales iónicos, y que se examinarán, con más detalle, a continuación.

En un ejemplo, la conductancia del canal de potasio es  $g_K = \bar{g}_K n^4$ , en donde n es una variable de activación que abre el canal de potasio a medida que la tensión de membrana V se hace mayor que un valor umbral de tensión  $V_n$ .  $\bar{g}_K$  es la conductancia máxima del canal completamente abierto. La conductancia del canal de sodio es  $g_{Na} = \bar{g}_{Na} m^3 h$ , en donde m es otra variable de activación que abre los canales de sodio cuando  $V > V_m$ , mientras que h es una variable de inactivación que cierra el canal cuando  $V > V_h$ . La evolución temporal de la tensión de membrana suele obtenerse mediante la ecuación de Hodgkin-Huxley que se deriva del análisis del circuito de membrana de neurona en la Figura 2, y que se puede expresar como:

$$C \frac{dV}{dt} = g_{Na} m^3 h (E_{Na} - V) + g_K n^4 (E_K - V) + g_L (E_L - V) + I_{inj}(t)$$

Las variables de activación e inactivación:

$$(a_i) = (m, h, n) \quad i = 1, 2, 3$$

siguen las ecuaciones dinámicas de primer orden del tipo:

$$\frac{da_i}{dt} = \frac{a_{i0} - a_i(t)}{\tau_i}$$

en donde

$$a_{i0}(V) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{V - V_i}{dV_i} \right) \right]$$

La apertura y cierre de canales se describe mediante la función de respuesta de sigmoide  $a_{i0}(V)$  modelada en los circuitos representados en las Figuras 3 y 4 por pares MOSFET de n canales 300, 400 y 401. Las constantes de tiempo  $\tau_n$ ,  $\tau_n$  se obtienen utilizando filtros de paso bajo. La constante de tiempo  $\tau_m$  es muy pequeña en las neuronas reales y se puede suponer que es cero. Esto implica que los canales de Na se abren tan pronto como la membrana se despolariza. En un ejemplo, tanto la base de nivel del circuito de neurona como  $E_K$  se establecen a 1,5 V por encima del nivel de base de la sinapsis.  $E_{Na} = 6,5$  V (también relativo al nivel de base de la sinapsis).

La Figura 3 es la representación esquemática del circuito que controla la conductancia del canal de potasio. El MOSFET etiquetado 202 en esta Figura es el mismo que el que tiene esa etiqueta en la Figura 2. KDKNEE es la tensión umbral al que se abre el canal de potasio, es decir  $V_n$ . La apertura de canal es retrasada por el filtro de paso bajo del integrador seguidor que se ilustra a la izquierda de la figura, que proporciona un retardo temporal  $\tau_n$ .  $\tau_n$  se sintoniza cambiando las tasas de carga del condensador  $C_m$  con la fuente de corriente KDTAUN. KDMAX establece, de forma indirecta, el valor de saturación de la conductancia de potasio  $\bar{g}_K$ . Esto se debe a que la corriente sigmoide a lo largo de 301 es reflejada especularmente por el espejo de corriente tipo p 303 para controlar la conductancia de drenaje-fuente  $g_K$  de MOSFET 202. La corriente de drenaje-fuente resultante a través del transistor 202 es, por lo tanto,  $I_K = g_K n^4 (V - E_K)$ . En un ejemplo, la base de nivel de este circuito es 1,5 V y  $V_{dd} = 6,5$  V.

Haciendo referencia a la Figura 4, el circuito modela la conductancia de la corriente de sodio. El MOSFET etiquetado 201, en esta figura, es el mismo que el que tiene esa etiqueta en la Figura 2. La despolarización inicial de la membrana de neurona se acompaña de una entrada rápida de iones de sodio Na. Lo que antecede es debido a que se supone que la apertura del canal de iones de Na es instantánea, por lo tanto,  $\tau_m = 0$ . NAONKNEE es el umbral de tensión, en el que se abre la rejilla, es decir  $V_n$ , y NAONMAX determina el valor máximo de  $\bar{g}_{Na}$ . Después de algún retardo temporal,  $\tau_n$ , la puerta de inactivación del canal de Na comienza a cerrarse. Este retardo está modelado por el filtro de paso bajo cuyo tiempo de integración es controlado por NATAUH. El canal comienza a cerrarse cuando la tensión de la membrana supera el umbral de tensión NAOFFKNEE, es decir,  $V_h$ . Tanto NAONMAX como NAOFFMAX controlan el valor de saturación de  $\bar{g}_{Na}$ .

La corriente de inactivación sigmoide a lo largo de 403 se refleja especularmente por un par p-MOSFET que la invierte, de forma eficaz, para obtener la inactivación. La corriente a lo largo de 405 es la diferencia entre la corriente de activación extraída por el par 400 menos la corriente de activación extraída por el par 401. La diferencia de corriente logra la acción antagonista de las variables m y h, respectivamente. La corriente controla la conductancia del canal de sodio aquí representado y en la Figura 2 por MOSFET 201. La corriente de drenaje-fuente mediante MOSFET 201, en consecuencia, modela:  $I_{Na} = g_K m^3 h (V - E_{Na})$ . En un ejemplo, la base de nivel de este circuito es 1,5 V y  $V_{dd} = 6,5$  V en relación con el nivel base de la sinapsis.

La Figura 5 muestra la respuesta excitadora de la neurona, de conformidad con un ejemplo. Una neurona comienza su activación en un valor umbral de corriente y se activa a una tasa más rápida cuando aumenta la corriente. Esta propiedad permite que un marcapasos CPG adapte su ritmo al estímulo, a modo de ejemplo, ejercicio físico.

La Figura 6(a) es una representación esquemática de un circuito para una sinapsis de unión de hendiduras, de conformidad con un ejemplo. La sinapsis de unión de hendiduras inyecta en la neurona post-sináptica una corriente proporcional a la diferencia de tensión entre las tensiones de membrana de las neuronas pre y post-sinápticas  $V_1$  y  $V_2$ :

$$I_{1 \rightarrow 2} = g(V_1 - V_2)$$

En un ejemplo, la constante de proporcionalidad, g es la conductancia de la sinapsis que representa la intensidad del acoplamiento entre neuronas. Un valor de  $g > 0$  corresponde a una sinapsis excitadora como un aumento en el potencial pre-sináptico  $V_1$  en relación con  $V_2$  que inyecta una corriente positiva en la neurona post-sináptica. Un valor de  $g < 0$  corresponde a una sinapsis inhibitora puesto que al aumentar la tensión pre-sináptica disminuye la corriente inyectada.

De conformidad con un ejemplo, y según se representa en la Figura 6(a), la sinapsis de unión de hendiduras se pone en práctica en hardware usando un amplificador de corriente diferencial. El amplificador de corriente recibe, como entrada, las tensiones de membrana de las neuronas pre y post-sinápticas. El par MOSFET de tipo n produce

## ES 2 747 424 T3

corrientes de drenaje-fuente  $I_1$  e  $I_2$  controladas por  $V_1$  y  $V_2$ , respectivamente. En particular  $I_1 = I_2$  cuando  $V_1 = V_2$ . Ambas corrientes se reflejan en sus respectivos pares MOSFET de tipo p. El par adicional de MOSFETs de tipo n etiquetados como 501 invierte  $I_2$  de modo que la corriente de salida  $I_{out} = I_1 - I_2$ . Naturalmente,  $I_{out} = 0$  cuando  $V_1 = V_2$ .  $V_1$  tiene el efecto de aumentar  $I_1$  mientras que  $V_2$  disminuye  $I_{out}$ . La intensidad absoluta  $I_{out}$  es controlada por la fuente de corriente MOSFET mediante su tensión de rejilla  $V_{max}$ . Por lo tanto, el circuito modela la sinapsis de unión de hendiduras con una conductancia sintonizable:

$$I_{out} = g(V_1 - V_2),$$

La excitación o inhibición se obtiene alimentando la corriente de salida en la neurona pre o post-sináptica, según sea apropiado. De conformidad con un ejemplo, existen 4 combinaciones:

$I_{s1} = g(V_1 - V_2)$	la neurona 2 inhibe la neurona 1
$I_{s2} = g(V_1 - V_2)$	la neurona 1 excita a la neurona 2
$I_{s2} = g(V_2 - V_1)$	la neurona 1 inhibe la neurona 2
$I_{s1} = g(V_2 - V_1)$	la neurona 2 excita a la neurona 1

En un ejemplo, la base de nivel de este circuito es 0 V y  $V_{dd} = 8$  V. Es deseable establecer el nivel base de la sinapsis por debajo del nivel base de la neurona (1,5 V), y la tensión de alimentación de la sinapsis por encima de la tensión de alimentación de la neurona (6,5 V) para permitir el funcionamiento correcto del amplificador diferencial en el margen de variación de la tensión de membrana.

La respuesta típica de la sinapsis de unión de hendiduras se muestra en los gráficos de la Figura 6(b). Cada curva fue medida como una función de  $V_1$  mientras se mantenía constante  $V_2$ . La Figura 6(b) muestra que la corriente de salida cambia de signo en  $V_1 = V_2$ . Este cruce se desplaza a  $V_1$  más alta cuando aumenta  $V_2$ . El efecto de aumentar  $V_{max}$  se conoce a partir de un gráfico en la siguiente Figura 6(b). Para que la corriente invierta su signo, la  $V_{dd}$  de la sinapsis debe mantenerse ligeramente por encima de la  $V_{dd}$  de la neurona, tal como 1-2 V más alto, por ejemplo, y de forma similar, el nivel base de la sinapsis debe estar ligeramente por debajo del nivel base de la neurona. En un ejemplo, la  $V_{dd}$  de la sinapsis es 8 V, su nivel base es de 0 V y la tensión de la membrana oscila entre 1,5 V y 6,5 V. Los cuatro niveles de tensión, representados en la Figura 6(b), se obtienen aplicando 8 V entre: una resistencia de 100 ohmios, en serie con un diodo Zener, con una tensión inversa de 5 V en serie con otra resistencia de 100 ohmios.

De conformidad con un ejemplo, la conductancia  $g$  de la sinapsis está controlada por la tensión de rejilla de fuente de corriente etiquetada  $V_{max}$  en la Figura 6(a). Esto controla la corriente total  $I_1 + I_2$ . En un ejemplo, la conductancia de la sinapsis individual se puede ajustar desde 0 a varios miliSiemens, de forma continua.

La Figura 6(c) es un diagrama de bloques esquemático de un CPG, de conformidad con un ejemplo. CPG 799 incluye un par de neuronas interconectadas 801 que forman una red neuronal, tal como una red neuronal no biológica. Es decir, las neuronas 800 están conectadas utilizando un enlace sináptico inhibitorio 803. Se pueden proporcionar múltiples pares 801 para CPG 799, aunque solamente se ilustra un par para mayor claridad. Cada neurona 800 incluye múltiples componentes de conductancia 805, 807. Los componentes 805 y 807 pueden proporcionar medidas respectivas para la conductancia de canales de membrana de neurona, tales como canales de sodio y potasio, según se describió con anterioridad.

Una entrada 809 al CPG está en la forma de una o más señales de entrada que representan un estímulo de entrada para la red 801. Se pueden utilizar múltiples señales de entrada 810 para proporcionar diferentes estímulos a algunas de las respectivas neuronas 800. En general, el estímulo de entrada 809 representa las una o más señales de entrada que se pueden aplicar a diversos componentes del CPG 799.

La salida 811 del CPG es una señal que es una secuencia espacio-temporal de pulsos eléctricos rítmicos que se puede proporcionar a un sistema externo 813, tal como uno cualquiera de los sistemas descritos con anterioridad. La salida 811 es, por lo tanto, una secuencia de impulsos eléctricos periódicos para uso en un sistema externo 813.

La Figura 7 es una representación esquemática que ilustra cómo se pone en práctica un par de sinapsis en una placa de circuito impreso, de conformidad con un ejemplo. La Figura 7 muestra cómo un par de sinapsis se pueden conectar en un ejemplo, con el fin de permitir la flexibilidad de hacer que cada sinapsis sea inhibitoria, o excitadora, con sólo pulsar un conmutador. En el ejemplo, cada sinapsis se pone en práctica utilizando, de izquierda a derecha, un circuito integrado MOSFET de tipo p QUAD (ALD1107), un circuito integrado MOSFET de tipo n DUAL (ALD1116), un circuito integrado MOSFET de tipo n QUAD (ALD1106). ALD1107 contiene los 2 espejos de corriente tipo p, ALD1116 contiene los MOSFETs tipo n controlados por  $V_1$  y  $V_2$ , y ALD1106 contiene el MOSFET  $V_{max}$  y el par 501 de la Figura 6(a). Las tensiones de membrana  $V_1$  y  $V_2$  se introducen en los terminales 2 y 7 de ALD1107, mientras que la corriente de salida emana desde el terminal 10 de ALD1106. La función del conmutador de palanca

SIL es redirigir la corriente de salida hacia la neurona 1 o 2, con el fin de conseguir la excitación o inhibición, de conformidad con:

- 5 Conmutador izquierdo en la posición derecha,  $I_{\rightarrow 1} = g(V_1 - V_2)$ , la neurona 2 inhibe la neurona 1
- Conmutador izquierdo en posición izquierda,  $I_{\rightarrow 2} = g(V_1 - V_2)$ , la neurona 1 excita la neurona 2
- Conmutador derecho en la posición derecha  $I_{\rightarrow 2} = g(V_2 - V_1)$ , la neurona 1 inhibe la neurona 2
- 10 Conmutador derecho en posición izquierda,  $I_{\rightarrow 1} = g(V_2 - V_1)$ , la neurona 2 excita la neurona 1.

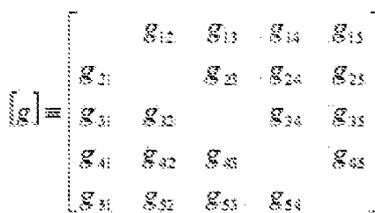
15 Las Figuras 8 a 15 son representaciones esquemáticas que muestran 4 paneles de una placa de circuito impreso de un CPG de 6 neuronas, de conformidad con un ejemplo. Cada panel tiene un lado de componente y un lado de soldadura, tal como se indica en los títulos de las figuras. Cuando se ensamblan los cuatro paneles, los círculos vacíos opuestos entre sí en los bordes de los paneles son objeto de cableado conjunto.

20 La Figura 8 ilustra el cuadrante superior izquierdo de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo - lado de componentes. La Figura 7 muestra el detalle de la Figura 8; los mismos componentes se repiten por etapas sobre todas las sinapsis S12, S21, S13, ... S36, S63. La Figura 9 muestra el cuadrante superior izquierdo de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central de conformidad con un ejemplo - lado de soldadura. La Figura 10 ilustra el cuadrante superior derecho de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central de conformidad con un ejemplo - lado de componente; los mismos componentes utilizados para S12 y S21 se repiten en etapas aquí para S31, S14, ... S36, S63. La Figura 11 ilustra el cuadrante superior derecho de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central de conformidad con un ejemplo - lado de soldadura. La Figura 12 muestra el cuadrante inferior izquierdo de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central de conformidad con un ejemplo - lado de componentes; los mismos componentes utilizados para S12, S21 se repiten en etapas aquí en S45, S54, S46. Los componentes en las neuronas N1-3 se repiten en etapas desde N5 en la Figura 17. La Figura 13 muestra el cuadrante inferior izquierdo de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo - lado de soldadura. La Figura 14 ilustra el cuadrante inferior derecho de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo - lado de componentes; los mismos componentes utilizados para S12 y S21 se repiten en etapas aquí en S64, S56, S65. Los componentes de las neuronas N4-6 se repiten en etapas desde N5 en la Figura 17. La Figura 15 muestra el cuadrante inferior derecho de la placa de circuito impreso de un generador de patrones central, de conformidad con un ejemplo - lado de soldadura;

35 De conformidad con un ejemplo, la interconexión de N neuronas requiere N(N-1) interconexiones. Puesto que este número puede ser muy grande, el cableado de las neuronas juntas requiere una atención especial. De conformidad con un ejemplo, se da a conocer un método que adapta N(N-1) interconexiones en dos lados de una placa de circuito impreso para una red de cualquier tamaño. En una primera etapa, las sinapsis son cableadas en pares bidireccionales  $S_{ij}$  y  $S_{ji}$  ( $i, j = 1, 2... N$ ), según se ilustra en la Figura 7. En una segunda etapa, las pistas i y j se extraen de estos pares y se conectan a sus respectivas neuronas i y j. El segundo tipo de interconexión corresponde a los cables verticales en el lado izquierdo de la Figura 8, el lado derecho de la Figura 9, el lado izquierdo de la Figura 12 y el lado derecho de la Figura 13. Los círculos vacíos, que se solapan en los lados de componentes y de soldadura de la PCB, están conectados entre sí para permitir la continuidad de las pistas desde el lado del componente hasta el lado de soldadura.

40 Cuando se establece a escala el circuito en un circuito integrado de silicio, las interconexiones se pueden fabricar utilizando una planarización de poliimida en dos etapas, de conformidad con un ejemplo. Se pueden hacer agujeros pasantes a través de una primera capa de poliimida para contactar las sinapsis. Se puede fabricar un primer conjunto de pistas metálicas a partir de un par de sinapsis, tal como se indica por las pistas verticales en las pistas situadas en el lado de soldadura de la PCB. El circuito integrado se puede recubrir, entonces, con una segunda capa de poliimida. Los orificios pasantes pueden contactar con la neurona en un extremo y conectar cualquiera de las terminaciones de pistas, anteriormente citadas, o los pares de neuronas tal como se indica por las pistas verticales en el lado de componentes de la PCB.

55 De conformidad con un ejemplo, una red de 5 neuronas muestra la siguiente matriz de conductancias:



Los valores se programan estableciendo la polarización de rejilla del  $V_{max}$  MOSFET en la Figura 7. De esta forma, se puede obtener cualquier patrón de coordinación espacio-temporal.

5 Según un ejemplo, un sistema de red neuronal asíncrono no biológico compuesto por neuronas interconectadas tal como se describió anteriormente, tiene una multitud de usos. A modo de ejemplo, una red se puede utilizar como un generador de patrones central (CPG) para proporcionar salidas con patrones rítmicos sin realimentación sensorial. En consecuencia, se puede proporcionar una secuencia espacio-temporal de pulsos eléctricos rítmicos para coordinar la actividad motora compleja.

10 A modo de ejemplo, los marcapasos actuales estimulan el nodo sino-atrial del corazón con pulsos de tensión periódicos. Esta disposición inicia una onda de actividad eléctrica que se propaga a través del corazón dando lugar a la contracción de las cavidades cardíacas en la secuencia PQRST conspicua, que se observa en los electrocardiogramas. En varias cardio-miopatías isquémicas y no isquémicas, se altera la actividad cardíaca normal. Esta circunstancia da lugar a una contracción asincrónica y a una reducción de la eficiencia de bombeo, que puede pasar a ser una insuficiencia cardíaca. En tales casos, un marcapasos avanzado que incluya un CPG, de conformidad con un ejemplo, puede revertir el proceso de insuficiencia cardíaca y mejorar la calidad de vida puesto que los impulsos eléctricos temporizados, producidos por las neuronas, en el implante de CPG, continuarían coordinando la contracción de las cavidades cardíacas. Los pares mutuamente inhibidores de neuronas, dentro del CPG pueden producir las oscilaciones periódicas necesarias para controlar el ritmo cardíaco. En este caso, los osciladores neuronales tienen la ventaja de ser capaces de adaptar su ritmo al nivel de actividad del cuerpo, según lo requiera el corazón durante el ejercicio. Esto se debe a que la excitabilidad natural de las neuronas hace que el CPG oscile a un ritmo que aumenta con la intensidad del estímulo. Un marcapasos CPG tiene la capacidad de sincronizarse con la respiración, u otros ritmos, en el cuerpo, con el fin de mejorar la eficiencia del bombeo de sangre y prevenir la insuficiencia cardíaca. Se sabe que dicha sincronización es fuerte en los atletas, mientras que su ausencia se manifiesta típicamente como apnea del sueño, arritmia e insuficiencia cardíaca. En la naturaleza, muchos invertebrados (p.ej., la sanguijuela) utilizan CPGs como marcapasos cardíacos. En consecuencia, las ventajas clave del hardware de CPG, sobre los marcapasos actuales, son:

- 30 • Coordinación de las 4 cavidades cardíacas;
- Capacidad para sincronizarse con otros ritmos corporales, en particular la respiración, que modula los latidos del corazón, con el fin de mejorar la eficacia del bombeo de sangre;
- 35 • Adaptabilidad del ritmo del CPG al estímulo, p.ej., el nivel de ejercicio;
- El consumo de energía es considerablemente menor que el de los circuitos integrados digitales (/1000); y
- La tecnología es eminentemente escalable en CMOS.

40 De manera más general, el hardware de CPG, de conformidad con un ejemplo, es capaz de codificar secuencias de actividad motora en patrones espacio-temporal complejos de pulsos eléctricos. La estimulación neuro-eléctrica es una terapia que se utiliza cada vez más como un sustituto de los tratamientos farmacológicos, por ejemplo, en el tratamiento de la epilepsia, o el tinnitus, mediante de la estimulación del nervio vago y en la reeducación de pacientes con accidente cerebrovascular mediante la estimulación neuromuscular. Los CPGs son igualmente adecuados para coordinar la actividad motora en dispositivos protésicos, tales como la temporización de los latidos de las cavidades cardíacas en marcapasos avanzados, la coordinación del movimiento de las prótesis de extremidades y para concatenar los fonemas de los sintetizadores de voz.

50 La síntesis de voz se basa en la concatenación de fragmentos de voz grabada que se memorizan en una base de datos. Un reto al que se enfrentan los sintetizadores de voz es que muchas ortografías, a modo de ejemplo en inglés, se pronuncian de manera diferente según el contexto. Por este motivo, la concatenación de los tonos de vocales y consonantes individuales es, a menudo, insuficiente para formar oraciones inteligibles. Es por eso que los procesadores de voz actuales requieren la grabación de palabras u oraciones completas, lo que limita su uso comercial a situaciones muy concretas. Una red de CPG, de conformidad con un ejemplo, puede mejorar lo que antecede al proporcionar un programa para coordinar los movimientos de la boca, la lengua, las cuerdas vocales y los pulmones para combinar tonos en palabras, y palabras en oraciones. La salida de la red no necesita ser una pista vocal física, sino que podría ser uno de los modelos de cálculo de la pista vocal humana que se ha desarrollado dentro del así denominado enfoque articulatorio de la síntesis de la voz. Este método proporciona un control completo de todos los parámetros de voz y ha sido el más satisfactorio en la transmisión de entonaciones, tales como preguntas, declaraciones y también como emociones. Por lo tanto, una red de CPG, de conformidad con un ejemplo, puede ser adecuada como el centro vocal alto de sintetizadores de voz que permiten la conversión de texto en oraciones inteligibles.

La Figura 16 es una representación esquemática que muestra el detalle de los componentes montados en la placa de circuito impreso de la Figura 12 como un ejemplo de realización práctica. Algunos componentes son añadidos para el ejemplo. Estos componentes son idénticos de una neurona a la siguiente, y similares para sinapsis similares.

5 La Figura 17 ilustra los detalles de componentes montados en la placa de circuito impreso de la Figura 14 como un ejemplo de realización práctica. Los componentes que permanecen sin etiquetar son repetidos en etapas habida cuenta que las 6 neuronas son idénticas y las 30 sinapsis son también idénticas. Los componentes indicados muestran cómo las neuronas y las sinapsis se alimentan con tensiones reguladas de 0 V, 1,5 V, 6,5 V y 8 V.

10 La Figura 18 muestra el hardware de CPG de prueba en funcionamiento, de conformidad con un ejemplo. La red comprende 6 neuronas en la parte inferior de la placa, y una matriz de sinapsis de 5x6 en la parte superior. Las oscilaciones neuronales, vistas en la pantalla del osciloscopio, desarrollan un patrón espacio-temporal que es típico del que se obtiene cuando 4 neuronas compiten entre sí mediante sinapsis mutuamente inhibitoras. En el ejemplo, el ajuste de las neuronas fue como sigue:

15 NAONMAX = 3,73 V

NATH = 1,40 V

20 NAOFFMAX = 2,98 V

NAOFFKNEE = 2,85 V

KMAX = 3,11 V

25 KNEE = 1,20 V

KTAU = 1,02 V

30 NAONKNEE = 1,253 V

$g_L = 0,01 \text{ mS}$

C = 10nF

35  $C_n = 100 \text{ nF}$

$C_h = 10 \text{ nF}$

40 Los niveles de tensión aquí citados son relativos al nivel base de la neurona (no el de la sinapsis). Con estos parámetros, las oscilaciones neuronales comienzan en un umbral de corriente  $I_{inj} = 80 \mu\text{A}$ . Al aumentar aún más la corriente, la frecuencia de las oscilaciones aumentó de 200 Hz en el umbral a normalmente 1 kHz con una corriente de  $I_{inj} = 500 \mu\text{A}$ . El umbral de corriente se puede reducir disminuyendo  $g_L$ . Éste es un objetivo deseable de alcanzar cuando se escala el CPG en un circuito integrado.

45 La Figura 19 es un conjunto de gráficos para mostrar la sincronización en fase de dos neuronas a medida que interactúan mediante sinapsis mutuamente excitadoras. En condiciones normales,  $V_{max} = 1-2 \text{ V}$  para ambas sinapsis. Si  $V_{max} < 0,8 \text{ V}$ , las neuronas se desacoplan y oscilan a su propia frecuencia natural. La sincronización mediante sinapsis excitadora tiene el efecto de obligar a las neuronas 1 y 2 a oscilar a la misma frecuencia y en fase.

50 La Figura 20 es un conjunto de gráficos para mostrar la sincronización anti-fase de dos neuronas acopladas mediante sinapsis mutuamente inhibitoras, de conformidad con un ejemplo. En condiciones normales  $V_{max} = 1-2 \text{ V}$  para ambas sinapsis. La sincronización mediante sinapsis mutuamente inhibitora tiene el efecto de forzar a las neuronas 1 y 2 a oscilar a la misma frecuencia, pero fuera de fase entre sí.

55 La Figura 21 muestra un patrón típico espacio-temporal generado por 4 neuronas que compiten entre sí mediante sinapsis mutuamente inhibitoras. Las 12 sinapsis se establecieron en valores aleatorios en el margen de  $V_{max} = 1-2 \text{ V}$ . Los patrones de coordinación deseados se pueden obtener programando las sinapsis utilizando técnicas de asimilación de datos, a modo de ejemplo.

60 La Figura 22 ilustra un ejemplo de sincronización de un CPG, de conformidad con un ejemplo, a un ritmo complejo, que puede ser la respiración ENG de ratas vivas, por ejemplo (traza 3). El objetivo era generar patrones de activación en fase y fuera de fase para modular el latido cardíaco mediante electrodos que estimulan el nervio vago.

65 De particular interés son las ráfagas neuronales fuera de fase - traza 2 - que hacen que el corazón bombee más rápido durante la espiración. Por lo tanto, el CPG proporciona naturalmente, en fase, sincronización anti-fase a

ritmos biológicos muy complejos, una hazaña que está fuera del alcance de los marcapasos más sofisticados (marcapasos bi-ventriculares).

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de red neuronal artificial asíncrono que comprende una pluralidad de neuronas, cada una de las cuales se utiliza para recibir señales de entrada que representan los estímulos de entrada respectivos para la red, y para generar respectivas señales de salida en respuesta a la recepción de dichos estímulos de entrada, teniendo el sistema de red una configuración física fija predeterminada y es utilizable para proporcionar señales de salida en la forma de secuencias espacio-temporales de pulsos eléctricos rítmicos a un sistema externo, en respuesta a la recepción de dichos estímulos de entrada, generando cada combinación de dichos estímulos de entrada una señal de salida respectiva, en donde dichas neuronas están constituidas por respectivos pares de transistores CMOS diferenciales que representan componentes de conductancia de canal de las neuronas, y en donde los pares respectivos de las múltiples neuronas están interconectados utilizando enlaces mutuamente inhibidores que tienen conductancias asimétricas, proporcionando cada enlace una sinapsis, y se forma utilizando un amplificador de corriente diferencial, formando las neuronas y enlaces mutuamente inhibidores la configuración física fija predeterminada del sistema de red, cuya configuración es independiente de las señales de entrada recibidas.
2. Un sistema de red neuronal artificial asíncrono según la reivindicación 1, en donde una proporción de las neuronas están interconectadas mediante enlaces mutuamente excitadores de modo que la red proporcione funciones predeterminadas de un generador de patrones central.
3. Un sistema de red neuronal artificial asíncrono según la reivindicación 1, en donde una membrana neuronal incluye múltiples componentes de conductancia que se utilizan para simular una respuesta de neuronas biológicas.
4. Un sistema de red neuronal artificial asíncrono según la reivindicación 3, en donde la conductancia de los canales iónicos de la membrana de neurona, sirve para controlar una tensión de membrana de una neurona.
5. Un generador de patrones central, que comprende un sistema de red neuronal artificial asíncrono, según se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde las múltiples neuronas están conectadas juntas en una configuración predeterminada utilizando dichos enlaces mutuamente inhibidores, de modo que las neuronas se utilicen para recibir señales de entrada que representan un estímulo de entrada para el generador, y para proporcionar una señal de salida que representa una secuencia de pulsos eléctricos periódicos para su uso en un sistema externo.
6. Un generador de patrones central según la reivindicación 5, en donde las neuronas se forman a partir de pares diferenciales respectivos de transistores CMOS, que representan componentes de conductancia de canal de las neuronas.
7. Un método para generar una secuencia espacio-temporal coordinada de pulsos eléctricos utilizando un sistema de red neuronal artificial asíncrono que comprende una pluralidad de neuronas, cada una de las cuales se utiliza para recibir una respectiva señal de entrada que representa un estímulo de entrada para la red, y para generar una señal de salida en respuesta a la recepción de dicho estímulo de entrada, teniendo el sistema de red una configuración física fija predeterminada y estando diseñado para proporcionar señales de salida en la forma de secuencias espacio-temporales de pulsos eléctricos rítmicos a un sistema externo, en respuesta a la recepción de dicho estímulo de entrada, generando cada combinación de dicho estímulo de entrada una respectiva señal de salida, en donde dichas neuronas están constituidas de respectivos pares de transistores CMOS diferenciales que representan componentes de conductancia de canal de las neuronas, en donde los pares respectivos de las múltiples neuronas están interconectados utilizando enlaces mutuamente inhibidores que tienen conductancias asimétricas, proporcionando cada enlace una sinapsis y formándose por medio de un amplificador de corriente diferencial, formando las neuronas y los enlaces mutuamente inhibidores la configuración física fija predeterminada del sistema de red, cuya configuración es independiente de las señales de entrada recibidas, cuyo método comprende:
- la interconexión de múltiples componentes neuronales basados en CMOS compuestos por pares respectivos de transistores CMOS diferenciales, que usan enlaces sinápticos mutuamente inhibidores que tienen conductancias asimétricas, estando cada enlace formado mediante un amplificador de corriente diferencial, seleccionando un valor de conductancia para los enlaces sinápticos artificiales que corresponde a una sinapsis inhibidora, formando los múltiples componentes neuronales basados en CMOS una configuración física fija predeterminada del sistema de red, cuya configuración es independiente de las señales de entrada recibidas;
- el suministro de estímulos de entrada para que el sistema de red haga que algunas de las múltiples neuronas se activen a lo largo de una ruta estable en el sistema de red; y
- la generación de respectivas secuencias de salida de secuencias espacio-temporales de pulsos eléctricos rítmicos en respuesta a la recepción de dichos estímulos de entrada, generando cada combinación de dichos estímulos de entrada una señal de salida respectiva.

8. Un método según la reivindicación 7, en donde, para un par de neuronas en la red, el valor de conductancia se selecciona de modo que una corriente inyectada en la neurona post-sináptica sea proporcional a la diferencia de tensión entre la tensión de membrana de la neurona pre-sináptica y la tensión de membrana de la neurona post-sináptica.
- 5
9. Un método según la reivindicación 7 u 8, en donde cada amplificador de corriente diferencial tiene un valor de conductancia controlada por medio de la tensión de rejilla de una fuente de corriente para el amplificador.
- 10
10. Un marcapasos para uso en un corazón para coordinar la contracción de las cavidades cardíacas estimulándolas con una secuencia coordinada de pulsos eléctricos, comprendiendo el marcapasos:
- un generador de patrones central según la reivindicación 5 o 6, utilizable para proporcionar dicha secuencia coordinada de pulsos que responden a un estímulo de entrada.
- 15
11. Un marcapasos según la reivindicación 10, que se utiliza para coordinar latidos de las cavidades cardíacas utilizando la secuencia de pulsos.
- 20
12. Un marcapasos según la reivindicación 10 u 11, en donde el generador de patrones central se utiliza para sincronizar la secuencia coordinada de pulsos, en respuesta a cambios en el estímulo de entrada, con el fin de modular los latidos de las cavidades cardíacas.
13. Un marcapasos según la reivindicación 12, en donde el generador de patrones central es utilizable para modular los latidos de las cavidades cardíacas para sincronizarse con otros ritmos corporales, o en respuesta a cambios en una condición externa a las cavidades cardíacas.

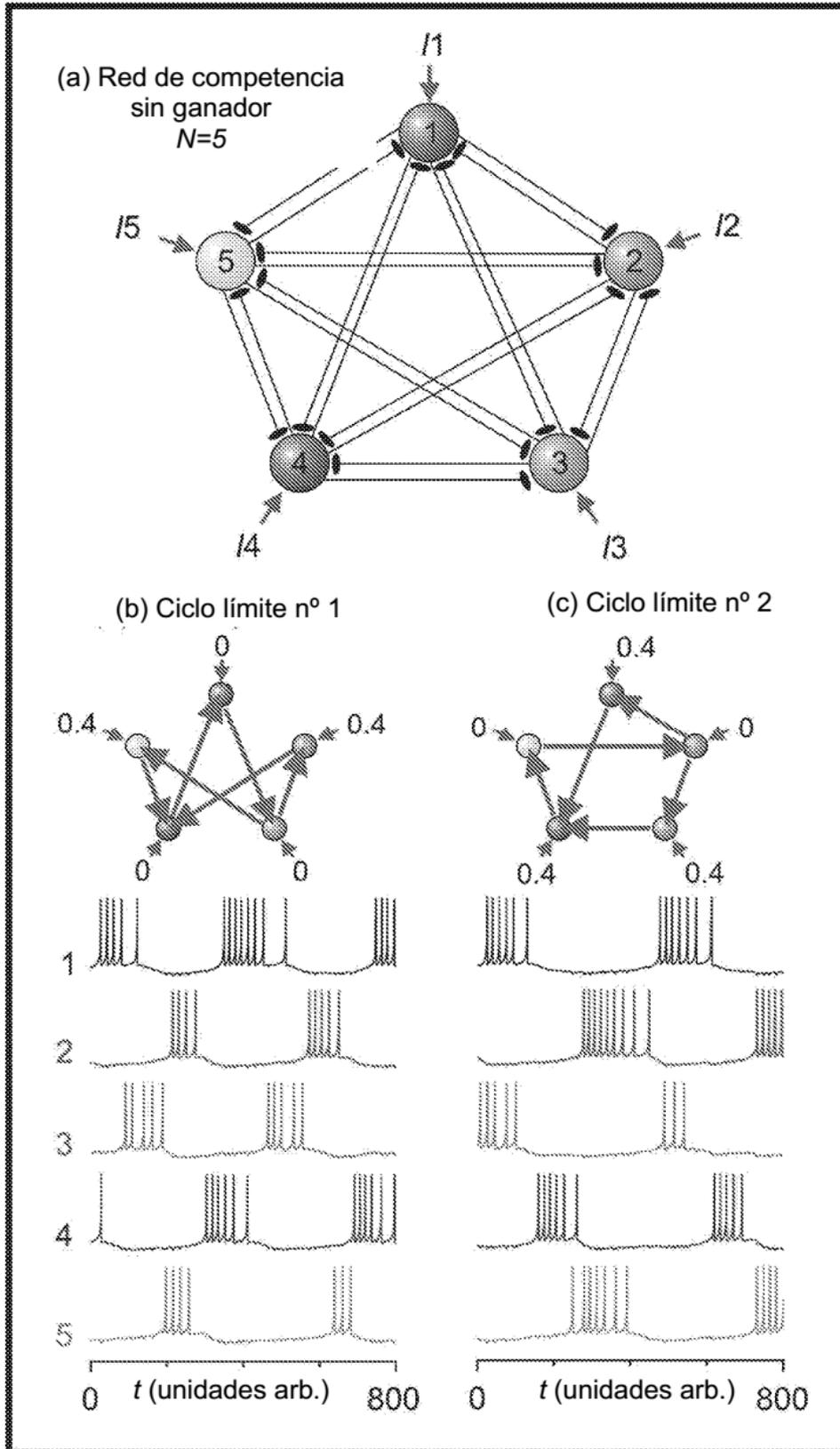


Figura 1

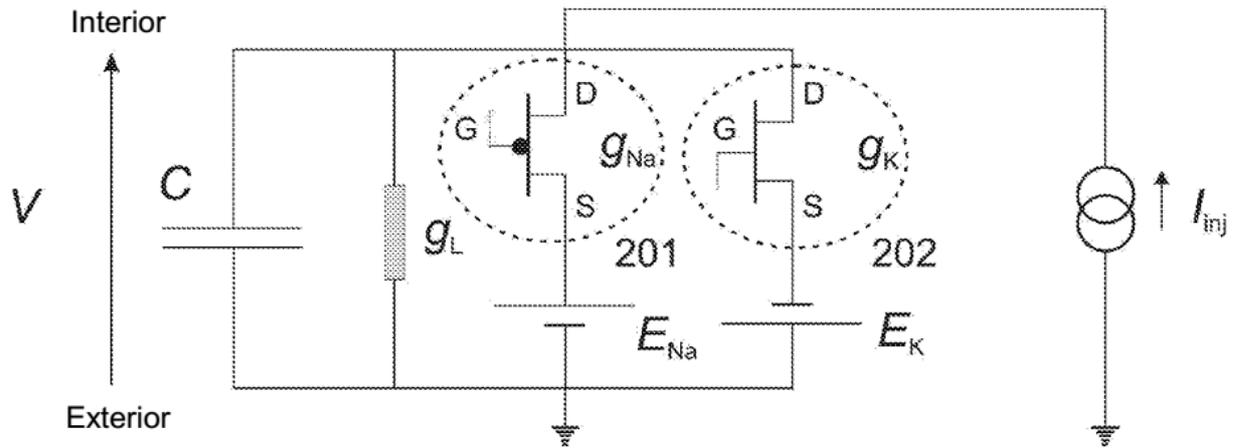


Figura 2

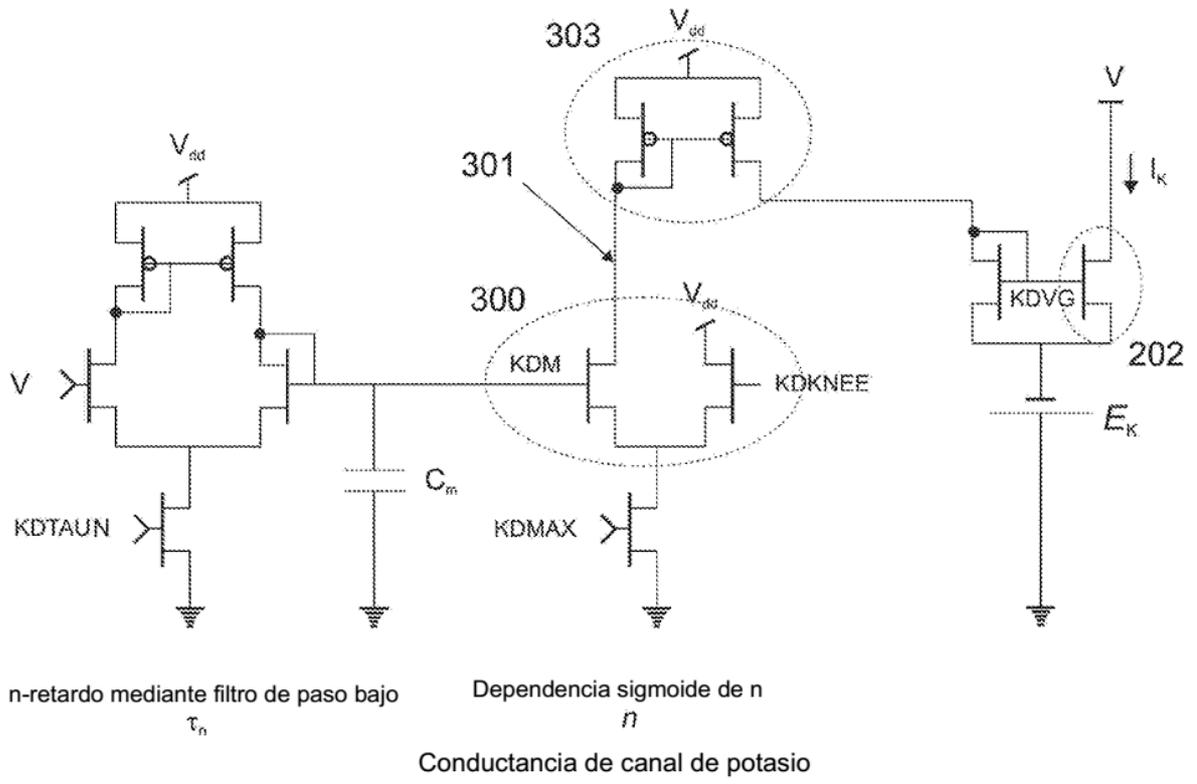


Figura 3

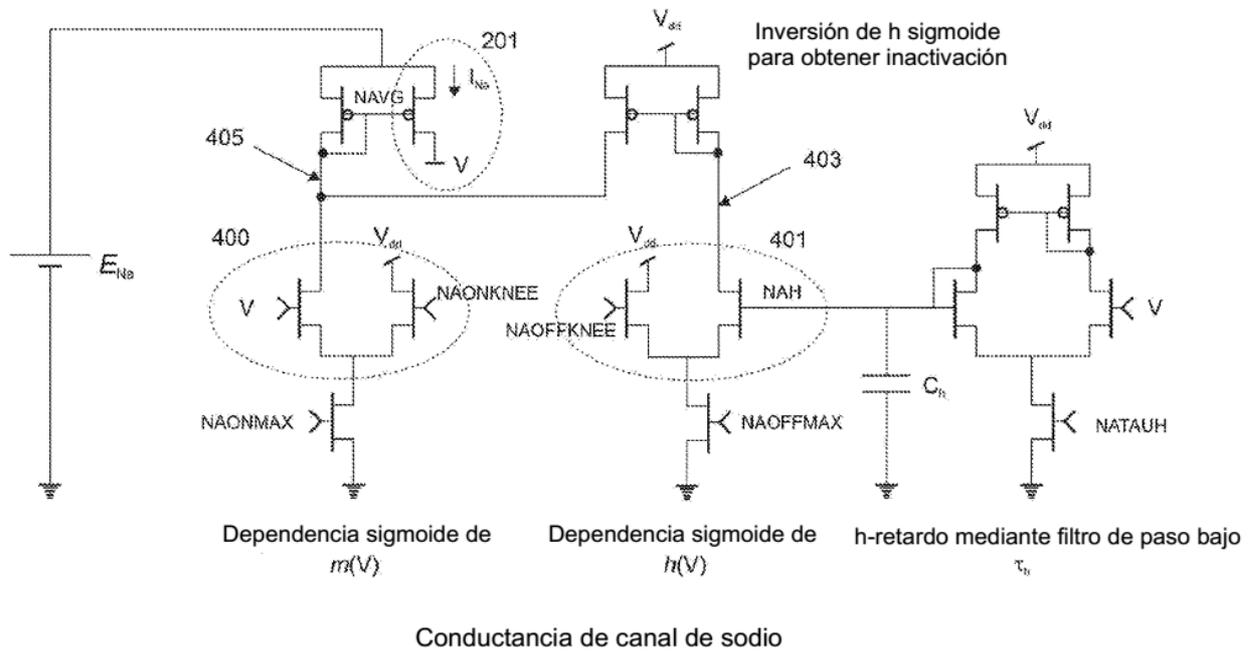


Figura 4

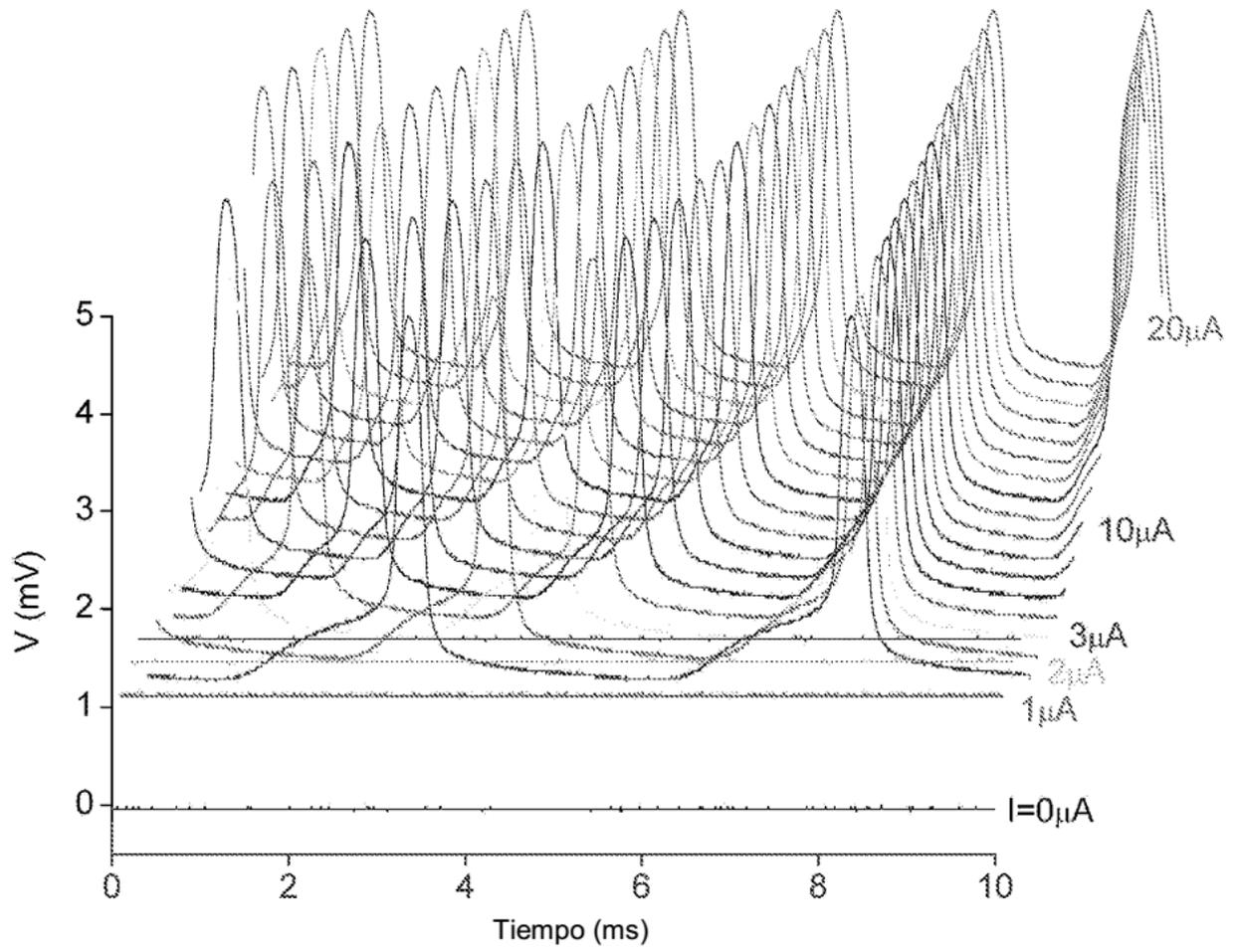
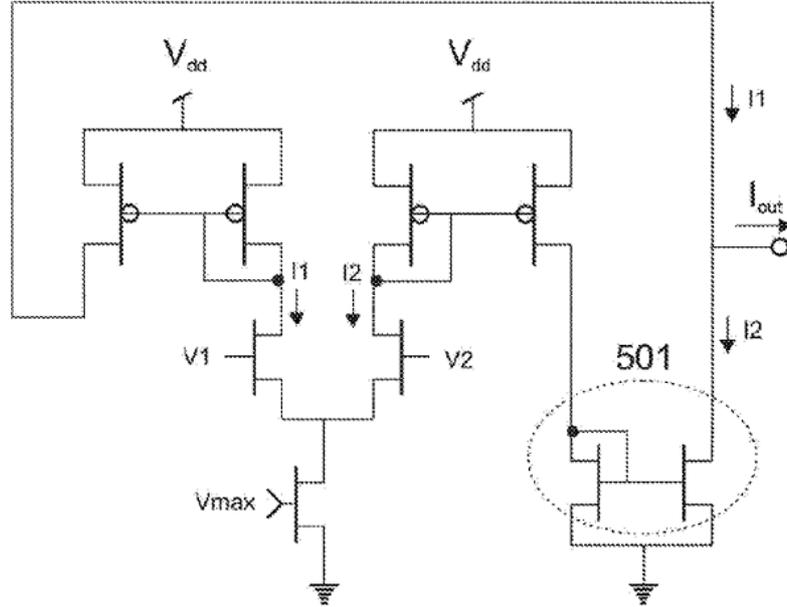


Figura 5

(a)

Sinapsis de unión de hendidura



(b)

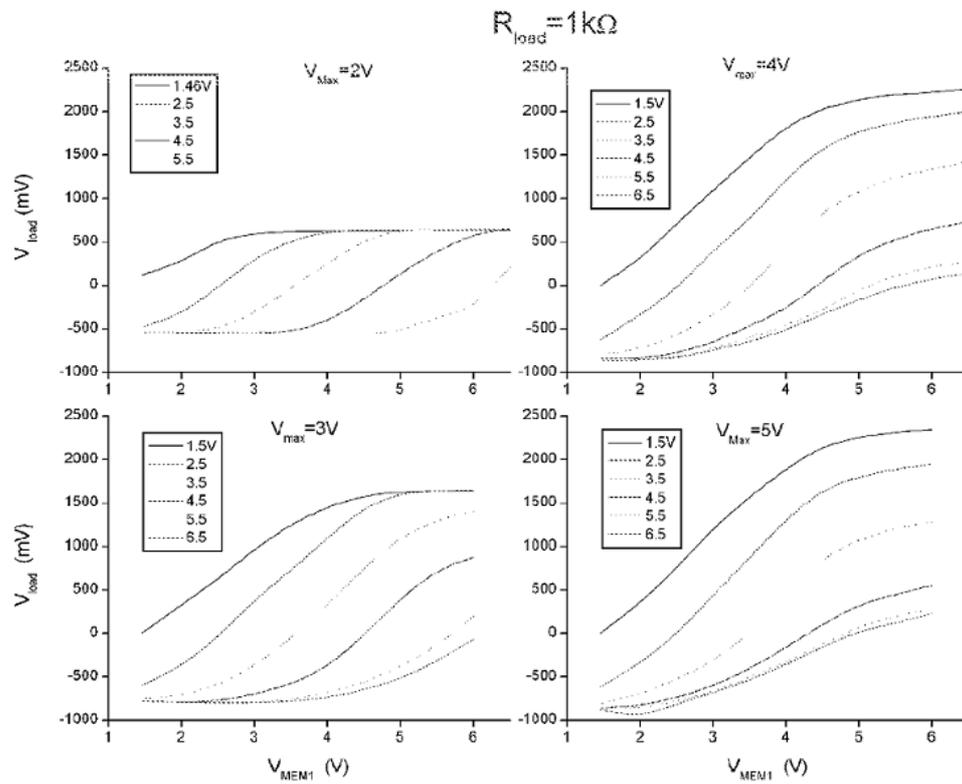


Figura 6

799

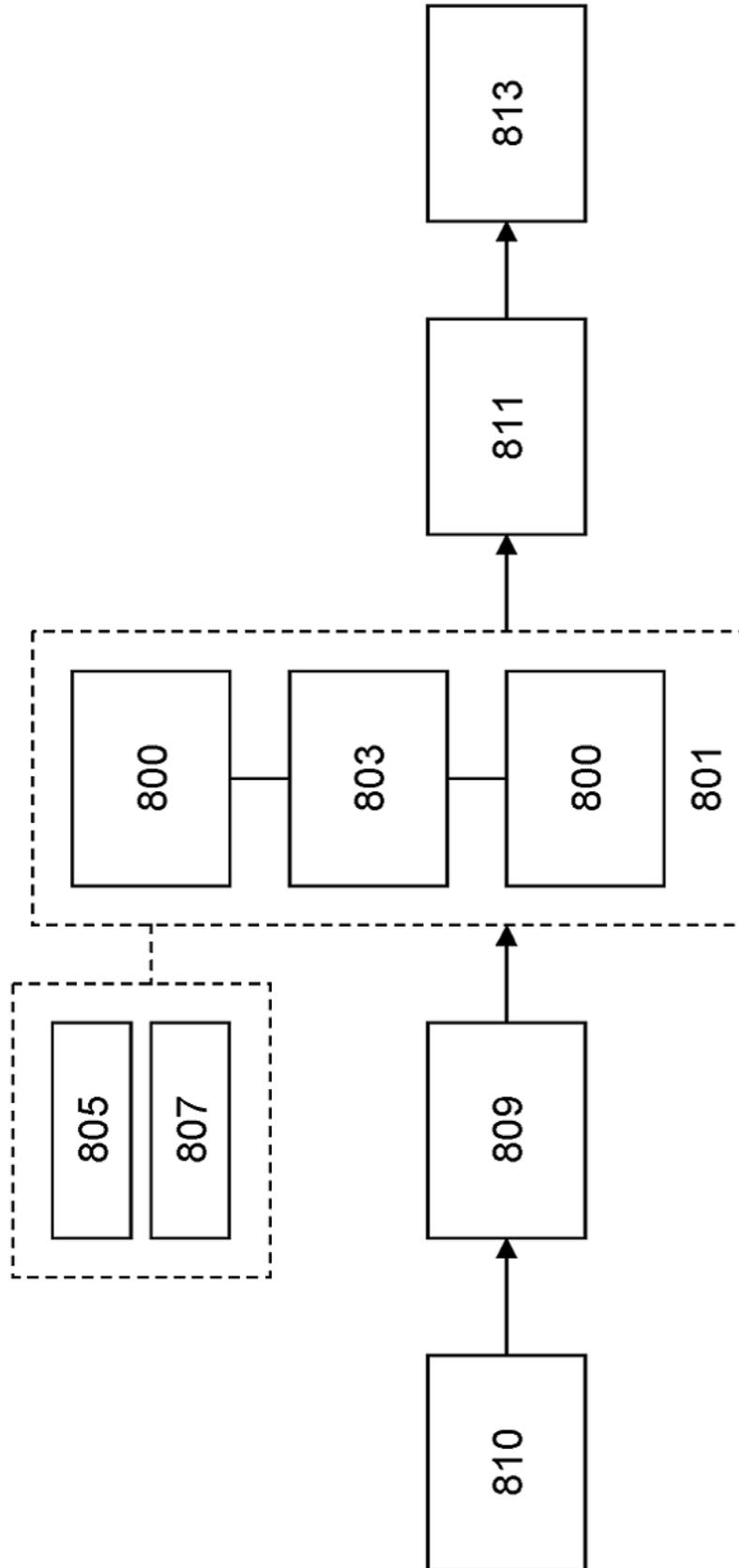


Figura 6(c)

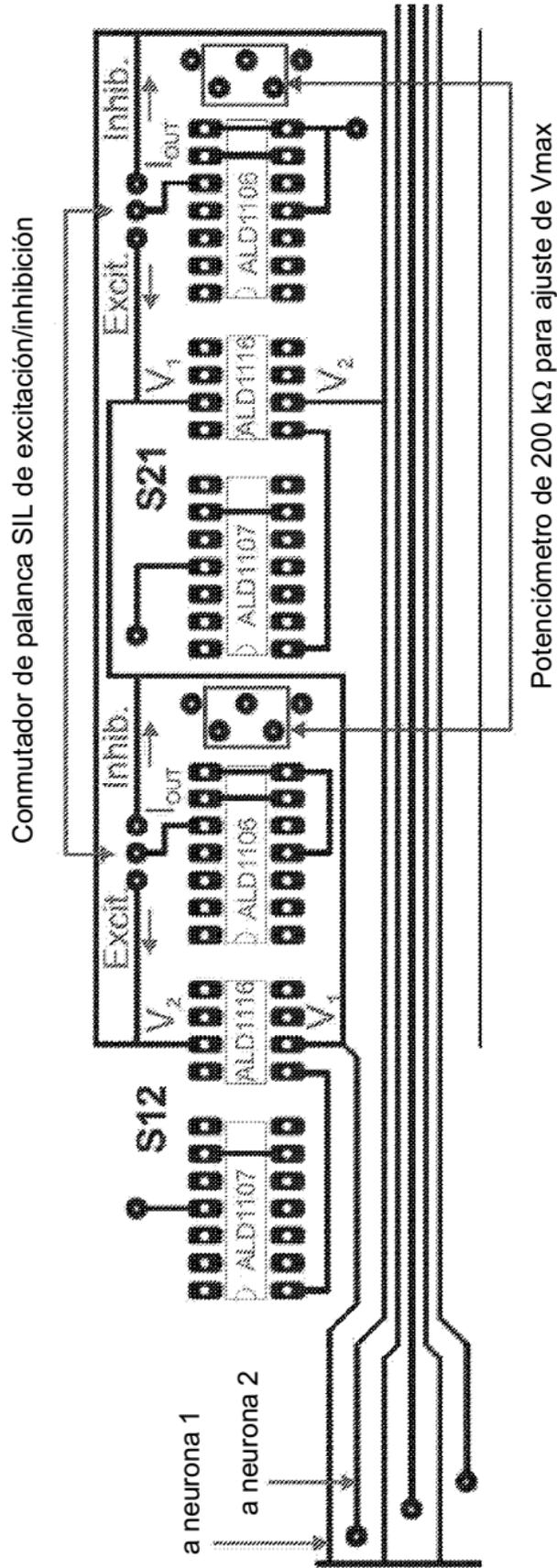


Figura 7

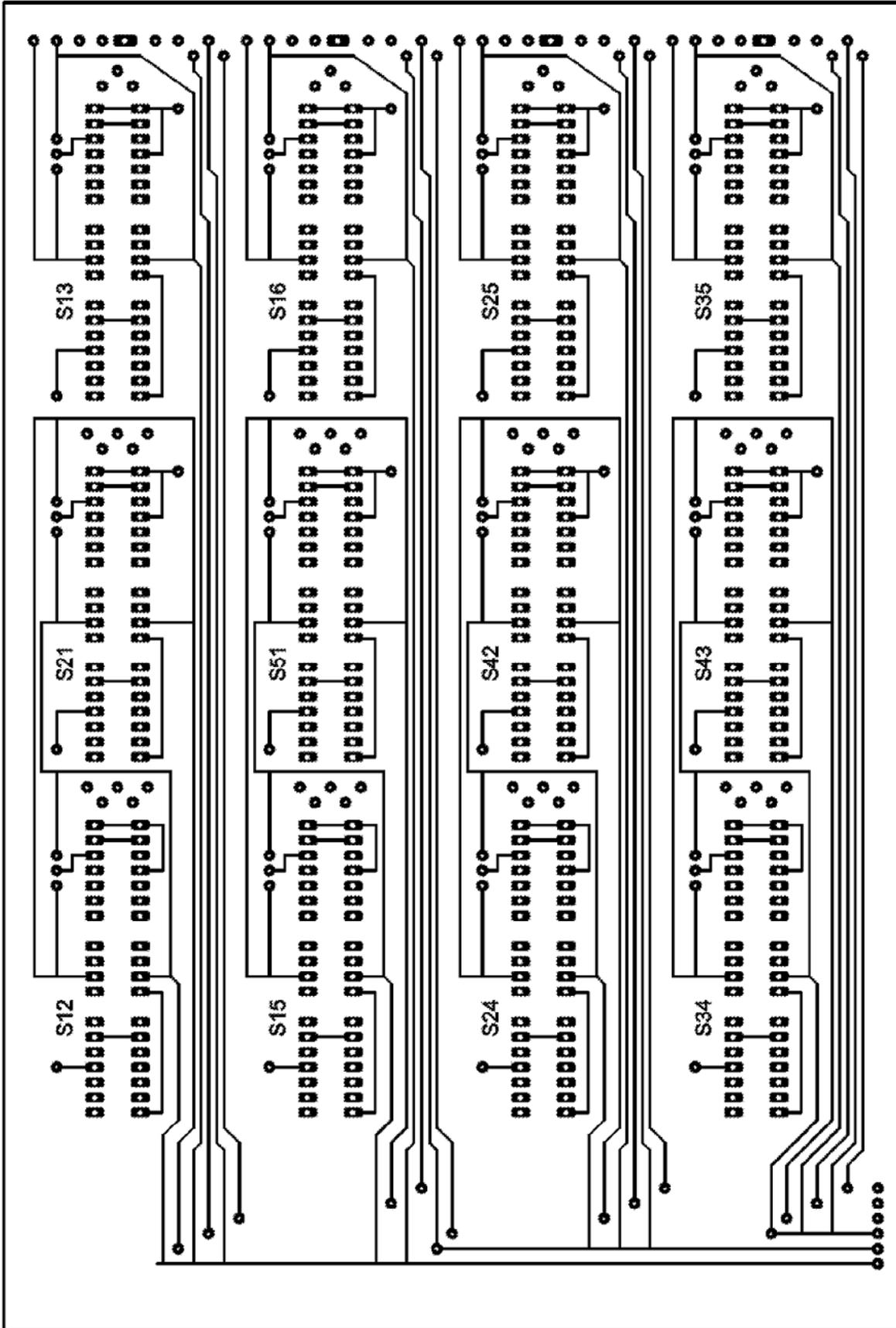


Figura 8

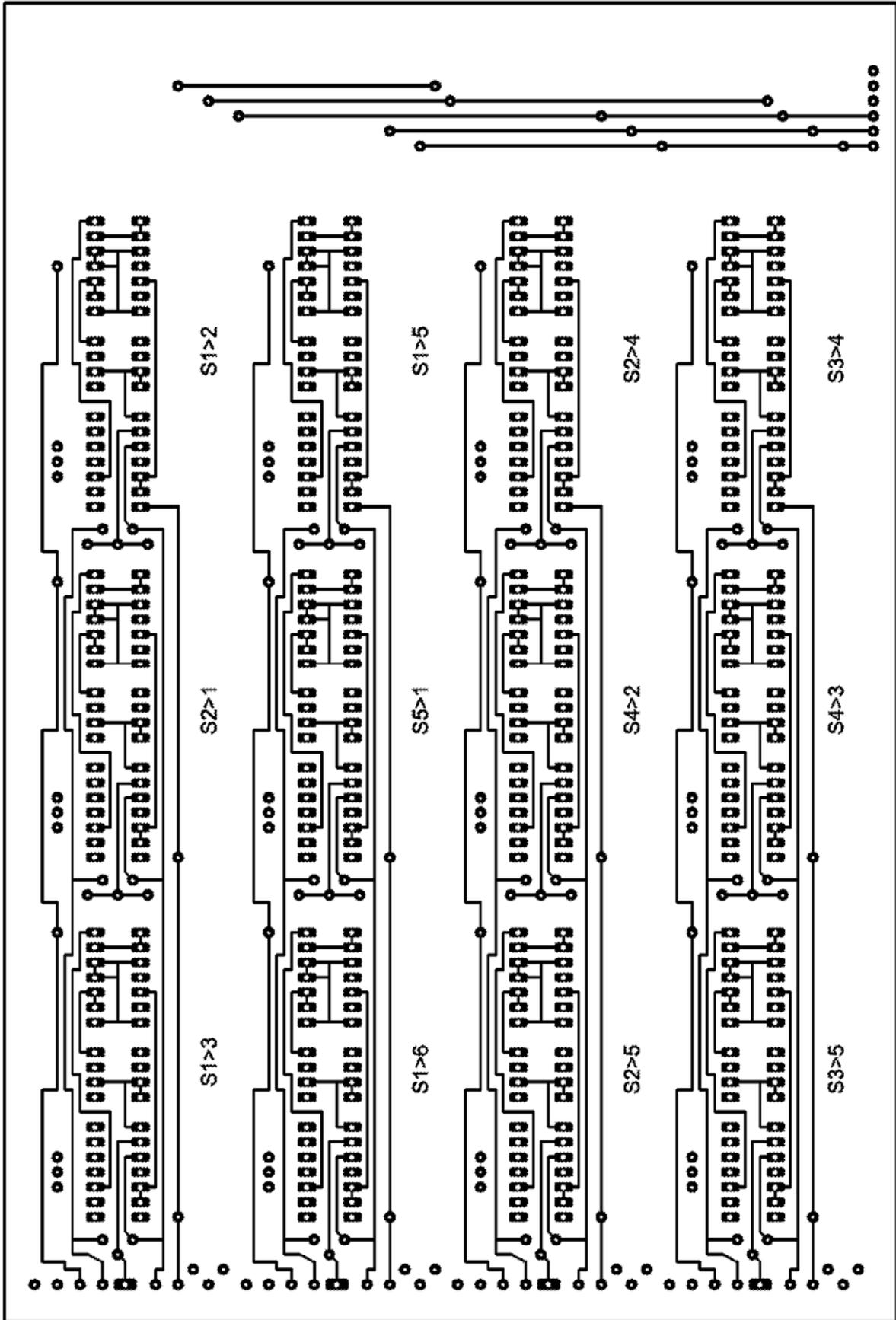


Figura 9

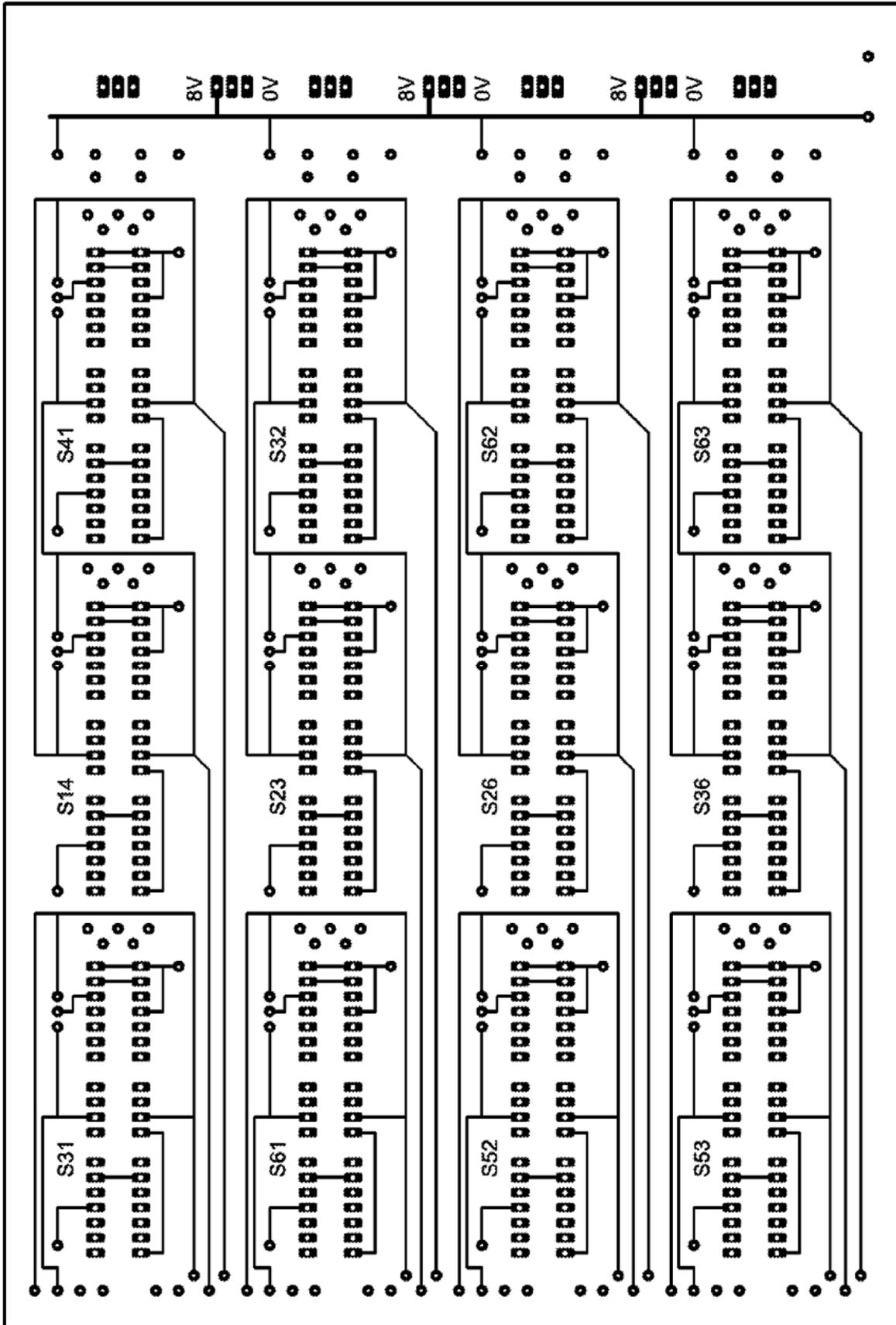


Figura 10

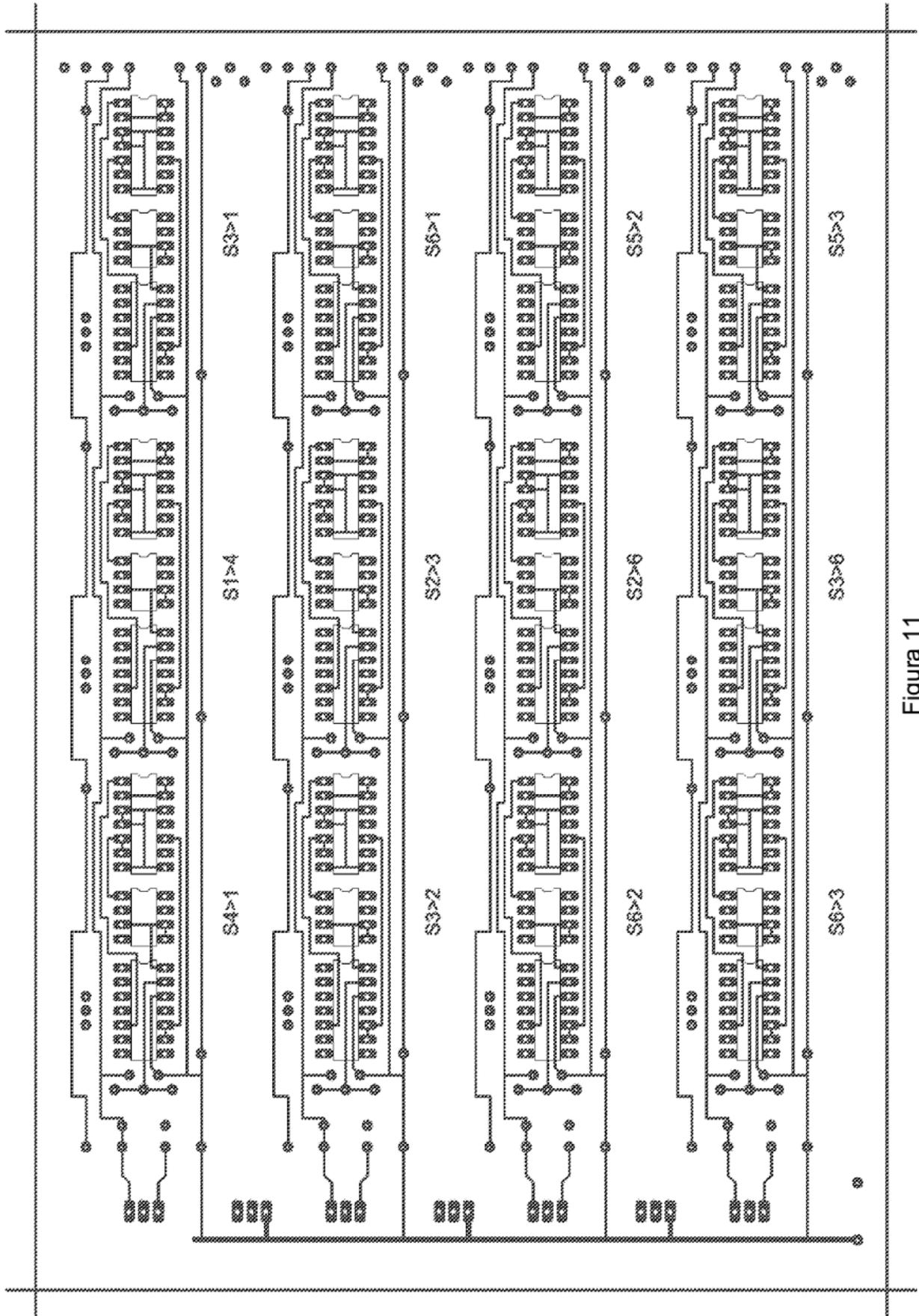


Figura 11

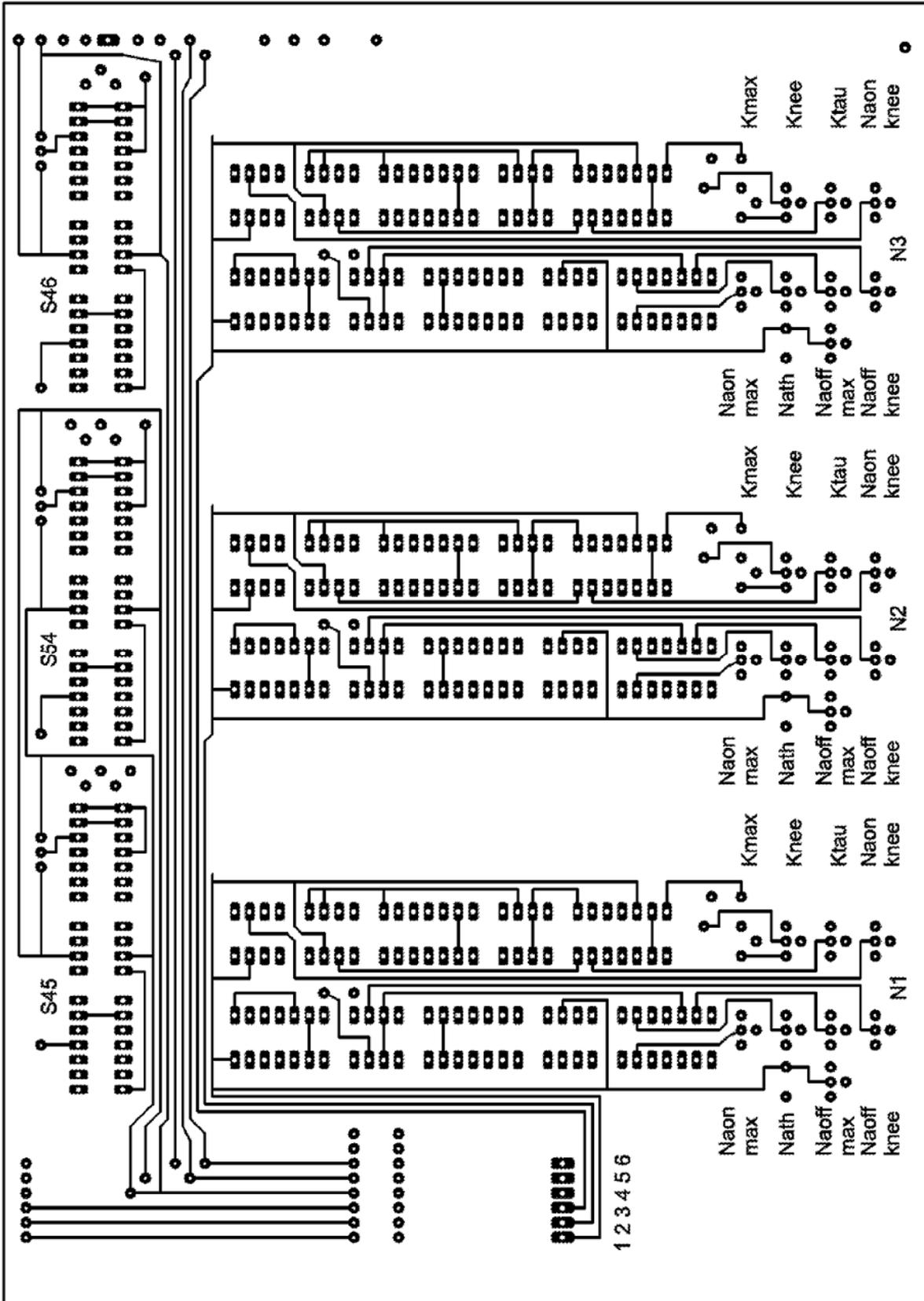


Figure 12

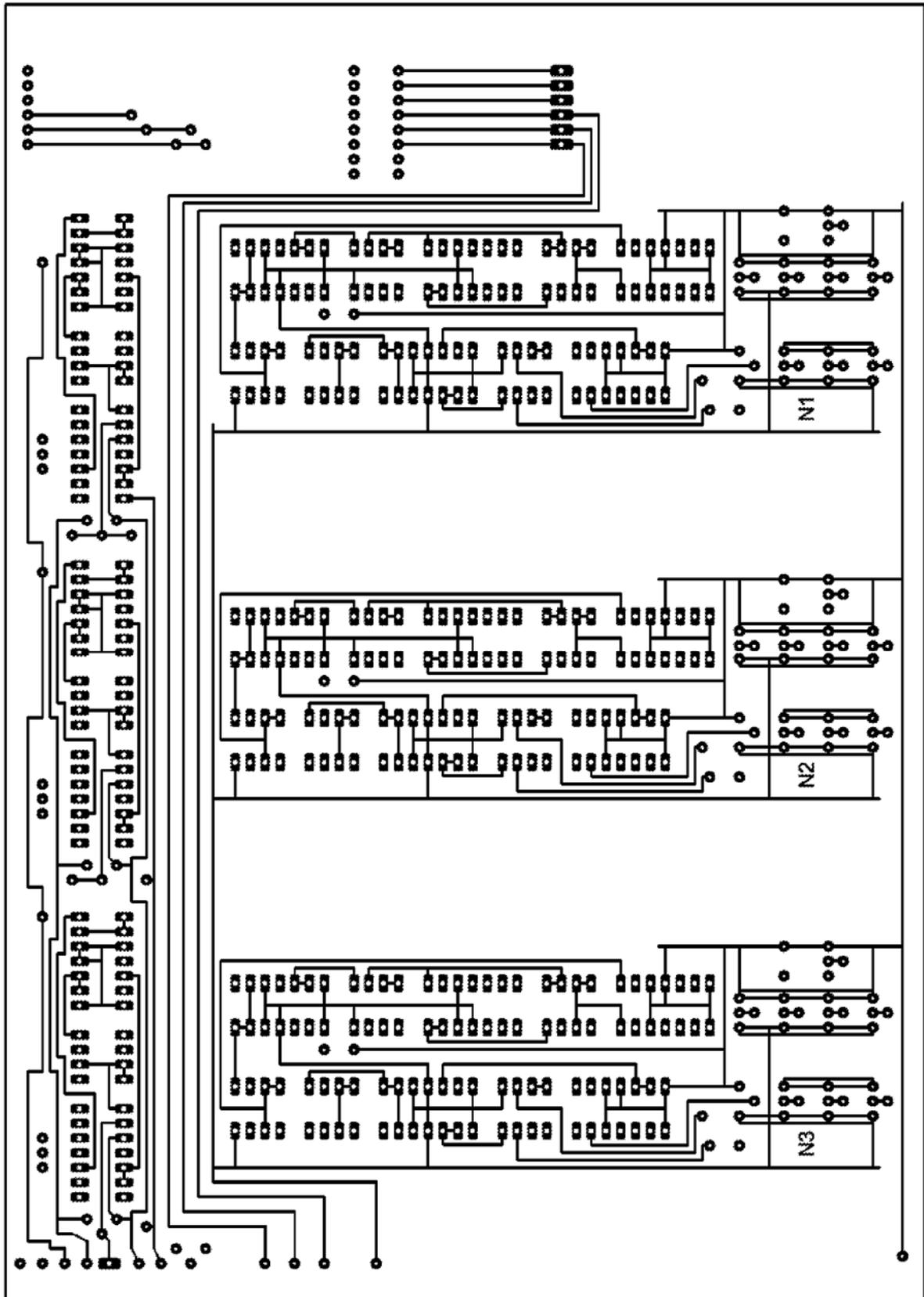


Figura 13

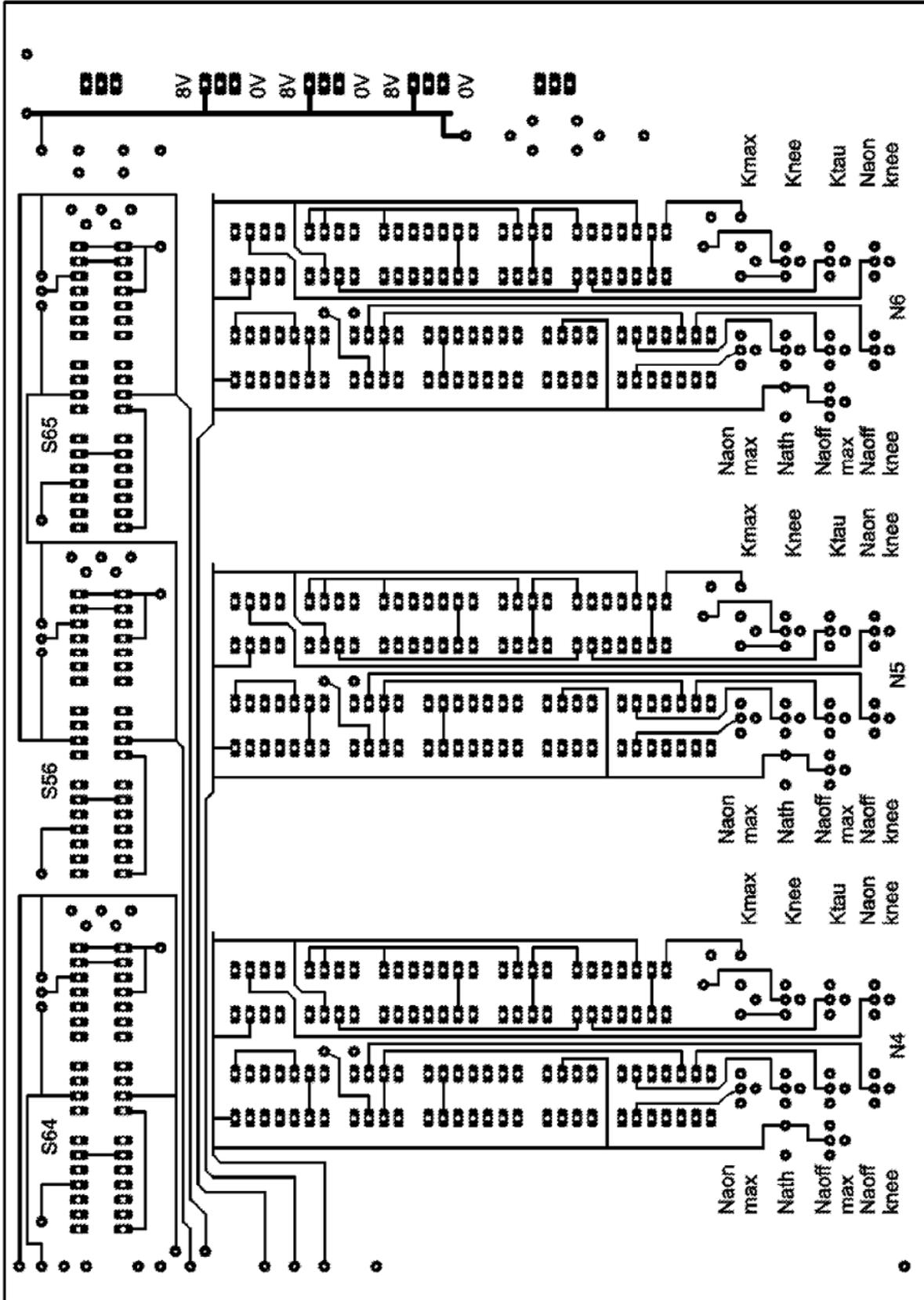


Figura 14

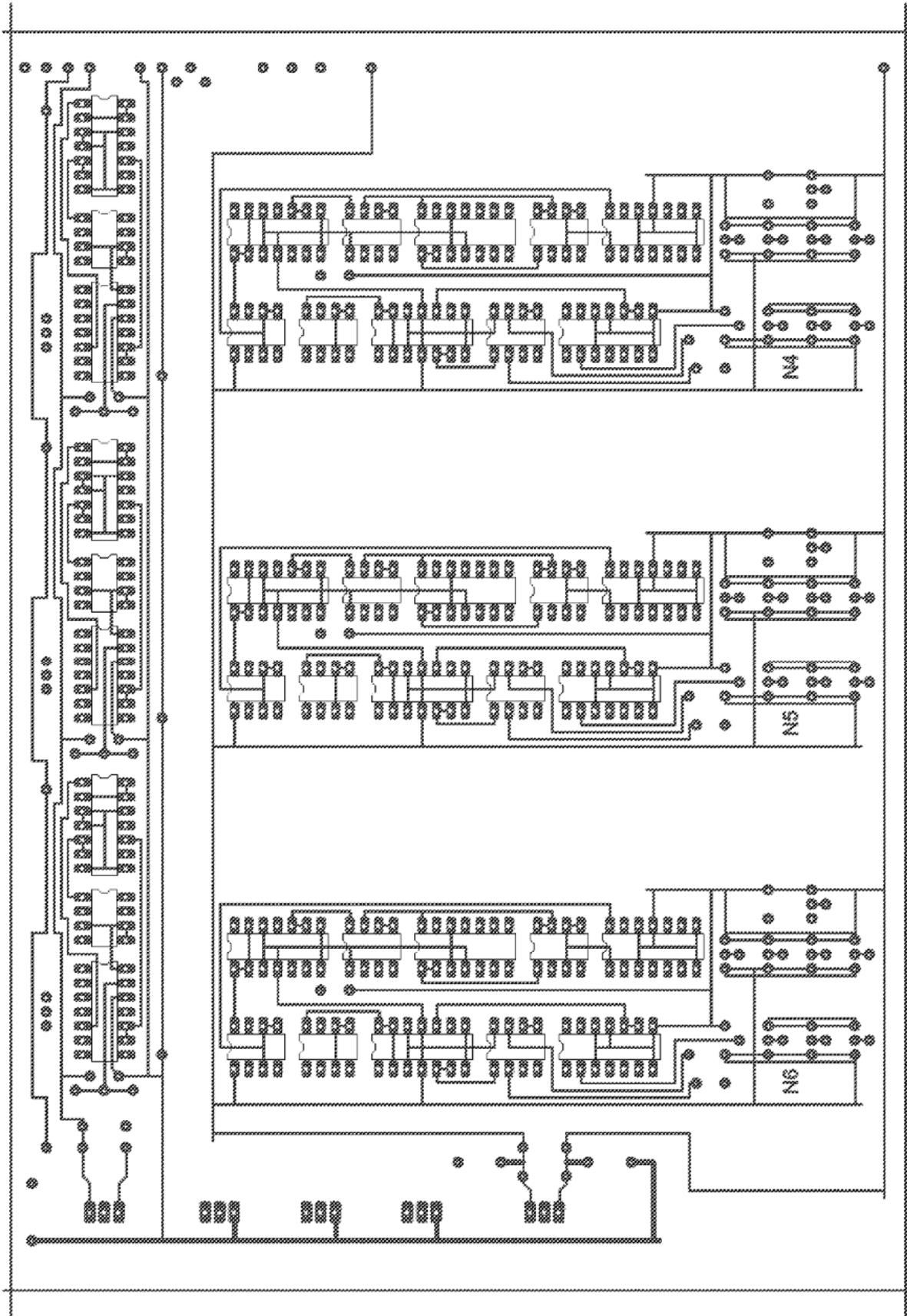


Figura 15

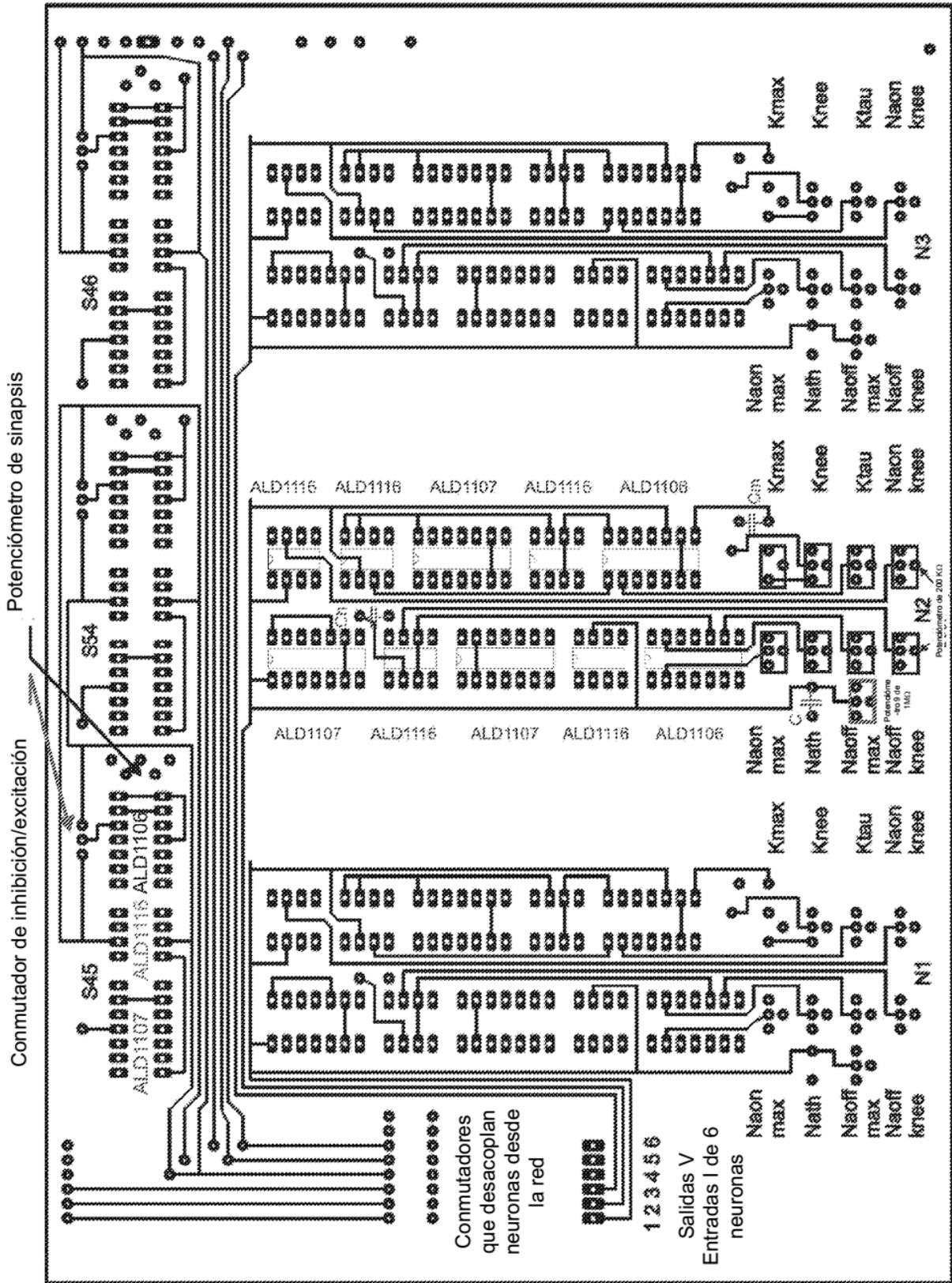


Figura 16



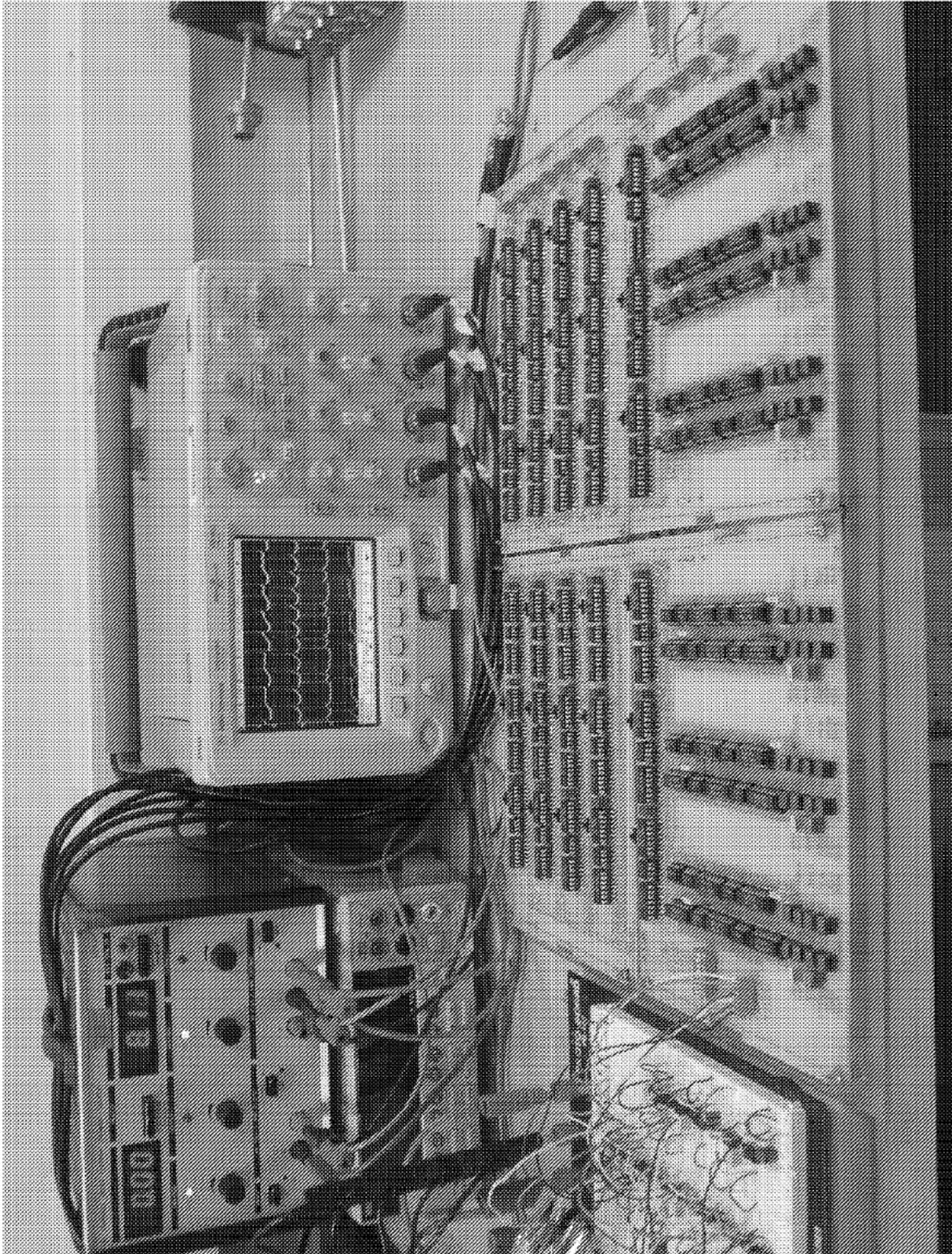


Figura 18

JUEVES 22 DICIEMBRE 00:23:39 2011

Agilent Technologies

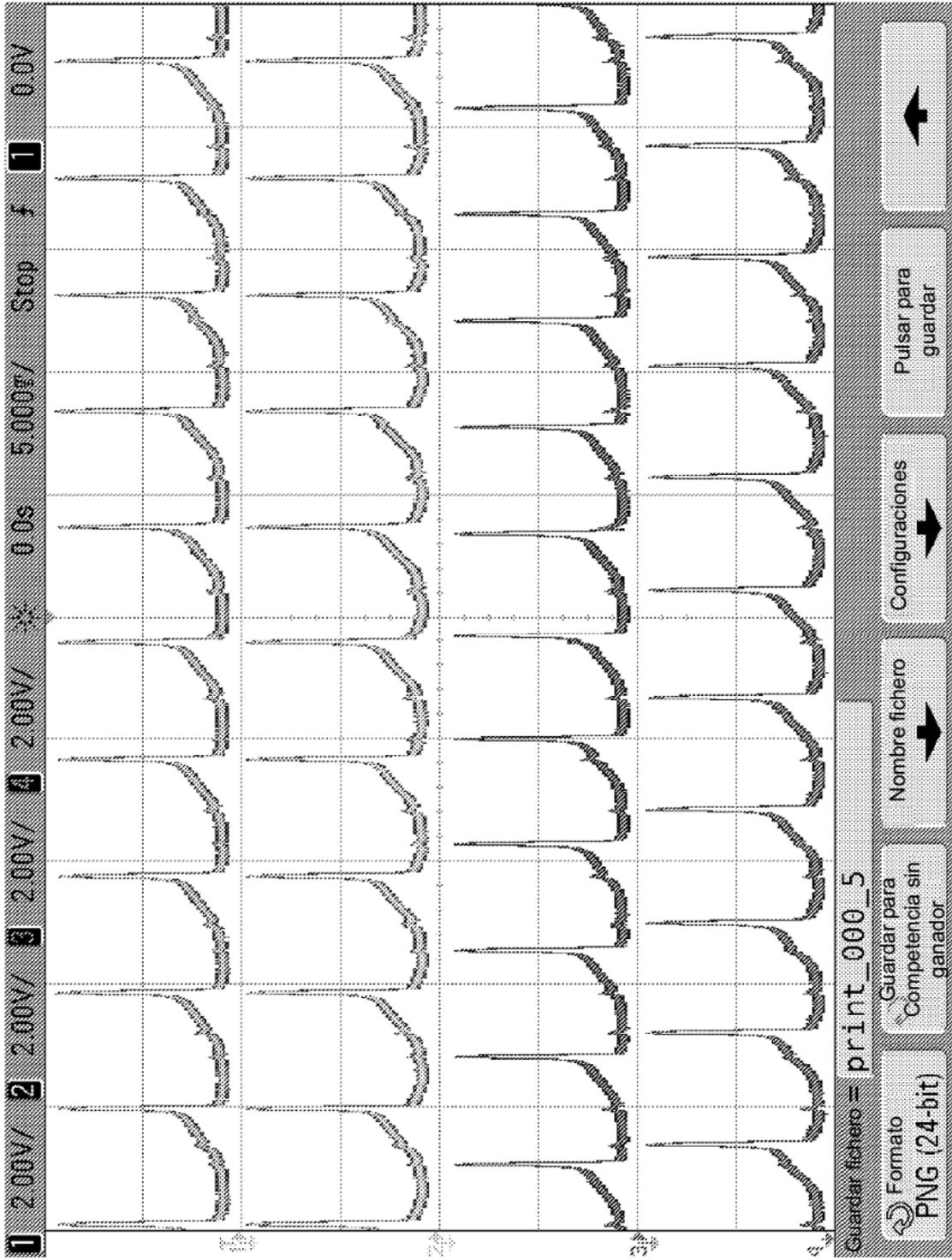


Figura 19

JUEVES 22 DICIEMBRE 00:26:13 2011

Agilent Technologies

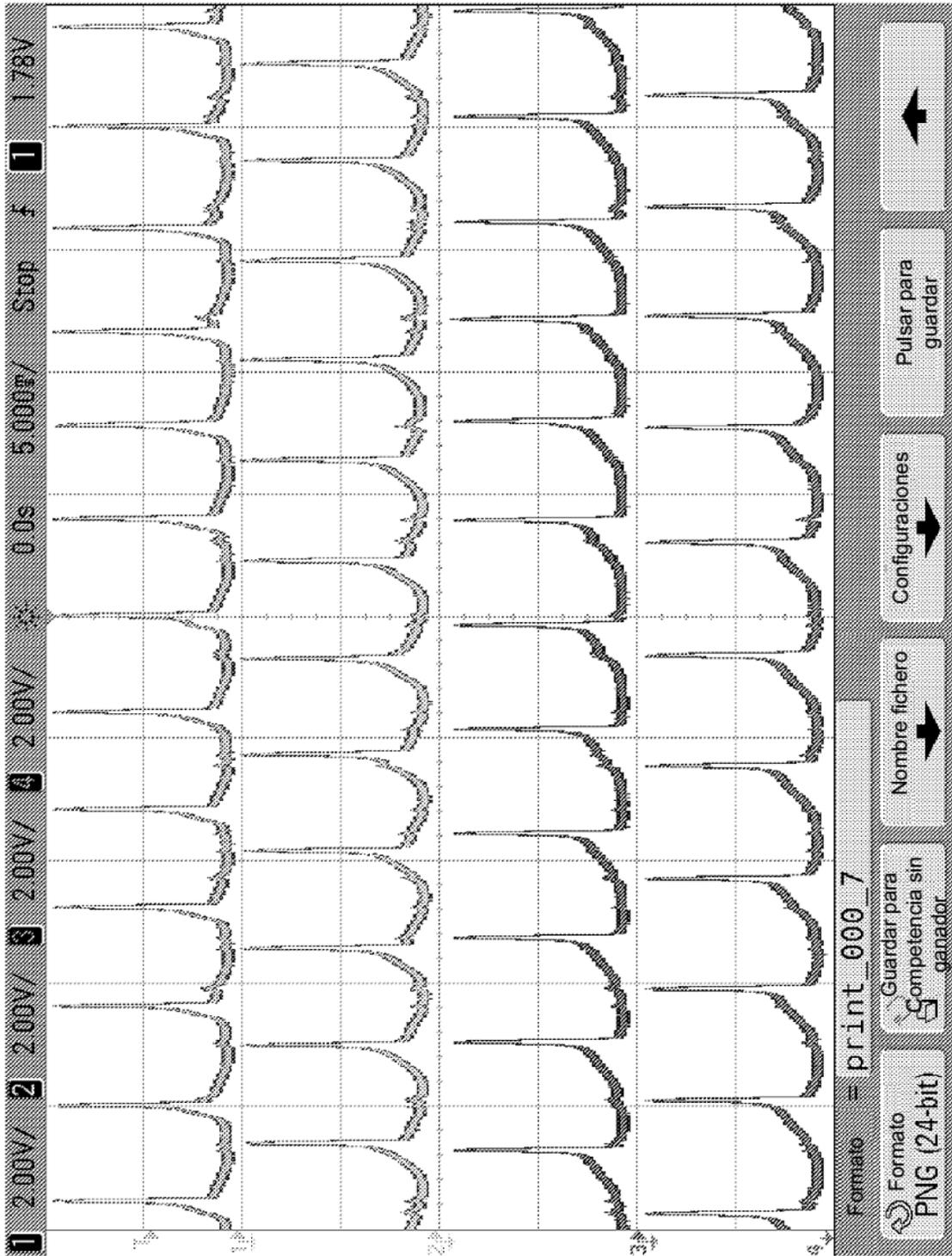


Figura 20

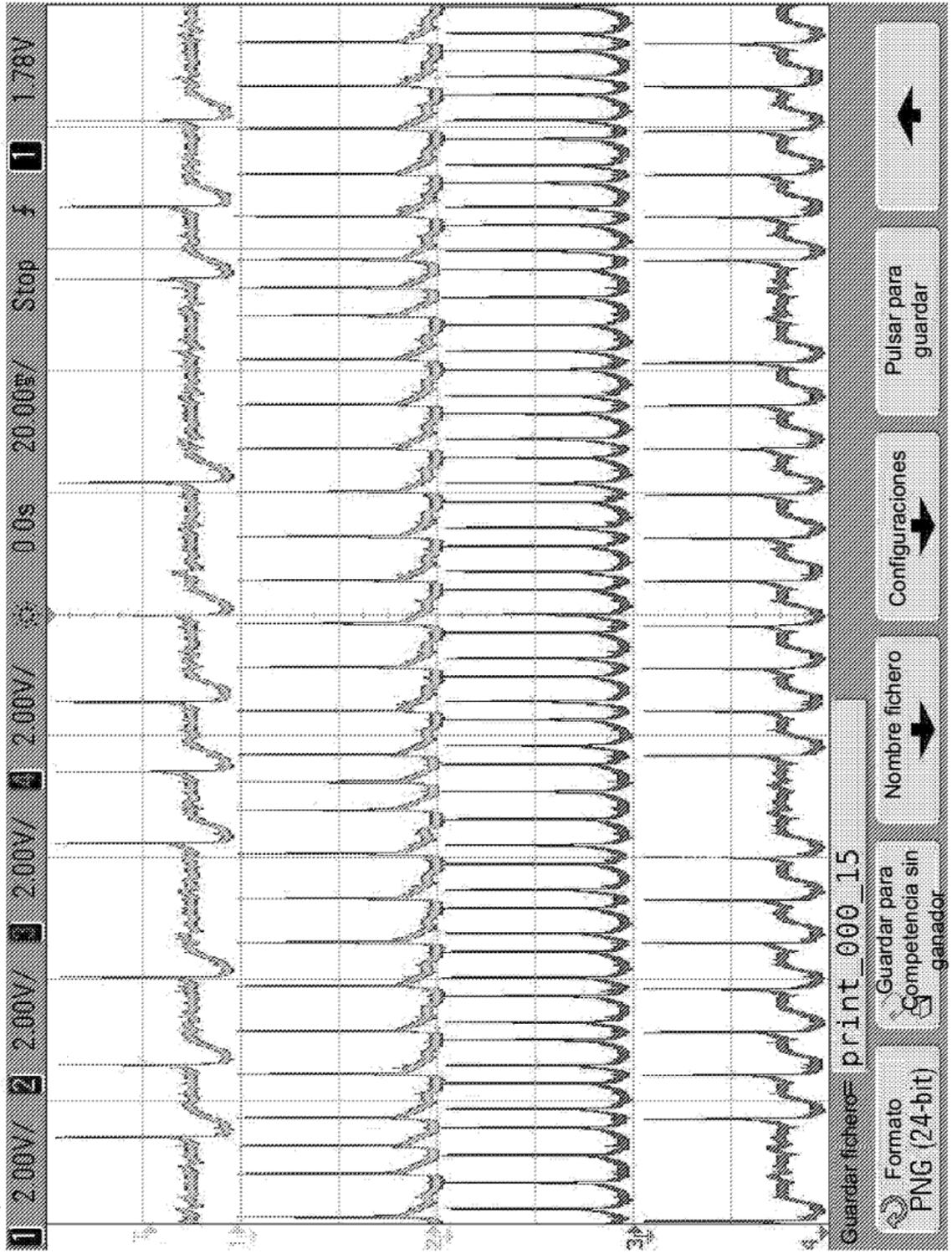


Figura 21

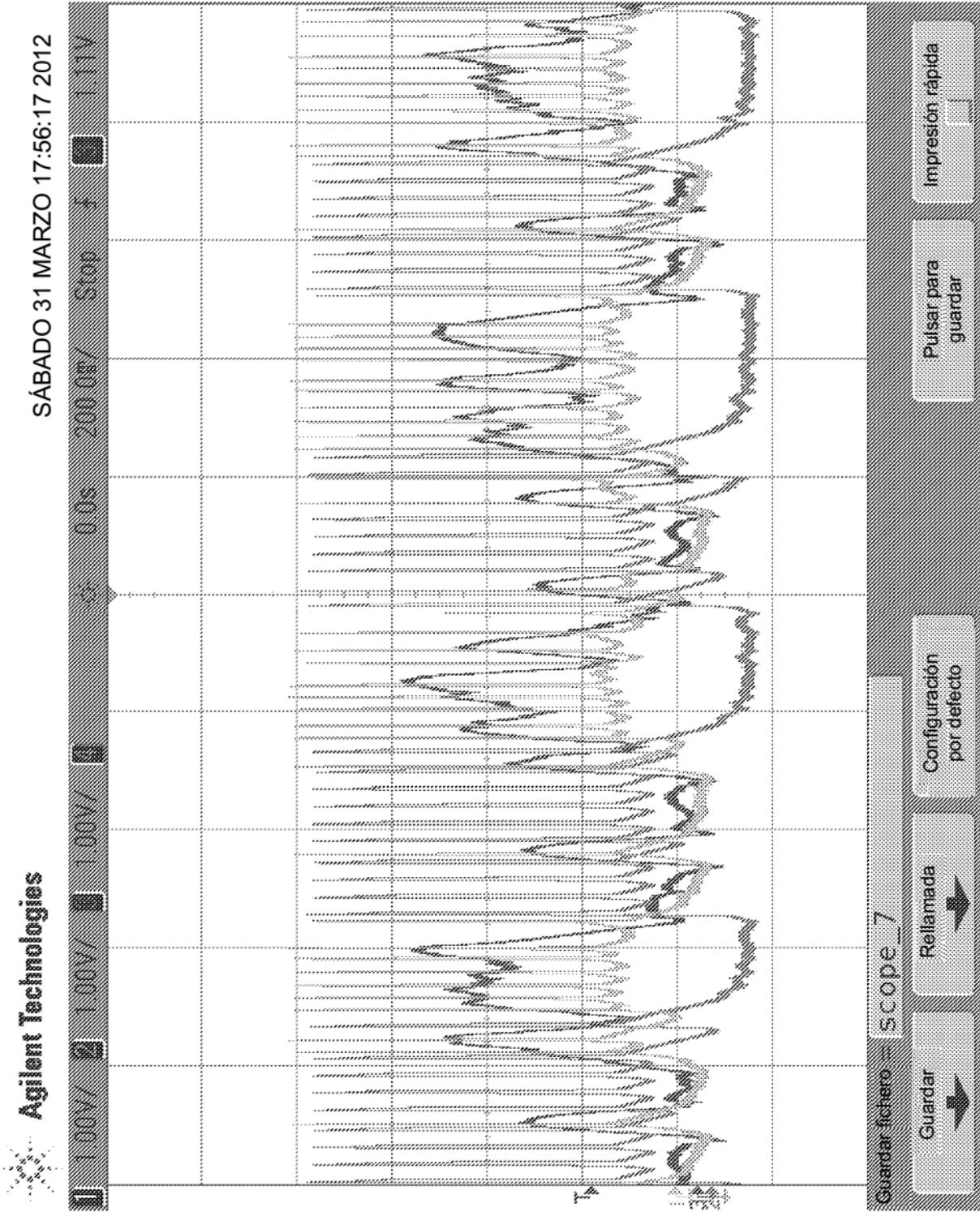


Figura 22