

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 748 349**

51 Int. Cl.:

G06N 99/00 (2009.01)

B82Y 10/00 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.01.2014 PCT/EP2014/050350**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.07.2014 WO14108485**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.01.2014 E 14701305 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019 EP 2943916**

54 Título: **Máquina de Turing de funcionamiento químico**

30 Prioridad:

11.01.2013 US 201313739332

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

16.03.2020

73 Titular/es:

**REPSOL, S.A. (50.0%)
C/Méndez Álvaro, 44
28045 Madrid, ES y
PRESIDENT AND FELLOWS OF HARVARD
COLLEGE (50.0%)**

72 Inventor/es:

**PÉREZ-MERCADER, JUAN;
DUEÑAS-DÍEZ, MARTA y
CASE, DANIEL**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 748 349 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

Máquina de Turing de funcionamiento químico

Campo de invención

La presente descripción se refiere a una máquina de Turing de funcionamiento químico.

5 Antecedentes

La máquina universal de Turing fue diseñada en 1936 por Alan Turing. Pretendía imitar las operaciones con lápiz y papel de un matemático. Una máquina de Turing es un modelo de computación, o un modo de representar y realizar una computación dada por medio de algún algoritmo que también se conoce como el “procedimiento” de la máquina. Las máquinas de Turing son matemática y lógicamente equivalentes a muchos otros modelos de computación, tales como autómatas celulares, redes neurales y ordenadores digitales. Debido a que ningún modelo de computación es más potente que una máquina de Turing, se considera que incorpora lo que se entiende cuando un problema se denomina “computable”. Dicho de otro modo, cualquier cosa para la que pueda escribirse un algoritmo puede computarse mediante una máquina de Turing. Las máquinas de Turing han facilitado la prueba de muchas ideas y teoremas importantes con respecto a la naturaleza y los límites de la computación, tales como la indecidibilidad del problema de detención y la existencia de funciones no computables.

Aunque puede construirse una máquina de Turing para implementar cualquier algoritmo específico imaginable, no es práctico construir una máquina física para resolver cada nuevo problema. Afortunadamente, pueden fabricarse máquinas de Turing que toman como entrada una cinta de datos y descripción de otra máquina de Turing, y simulan esa máquina de Turing en su propia cinta. Una máquina de Turing de este tipo se conoce como máquina de Turing universal (UTM, por sus siglas en inglés). Los ordenadores personales son buenas aproximaciones de las máquinas de Turing universales, debido a que los programas que ejecutan son descripciones de algoritmos específicos y, por tanto, máquinas de Turing específicas. Sin embargo, los ordenadores personales no están a la altura de las UTM porque su memoria no puede ampliarse cada vez que es necesario más almacenamiento. Por tanto, existe la necesidad en la técnica de máquinas de Turing que superen las deficiencias de, por ejemplo, los ordenadores personales, y se aproximen aún más a una UTM.

LEBENDER *et al.*, “Logical gates using a nonlinear chemical reaction”, *Journal of Physical Chemistry, USA*, vol. 98, n.º 31, XP002721843, da a conocer un sistema de reactores de tanque agitado de flujo continuo para construir puertas lógicas usando una reacción química no lineal biestable. HJELMFELT A., “Chemical implementation of finite-state machines”, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 89, XP002721844, construye ejemplos de máquinas de estados finitos con reloj.

Sumario

La presente invención proporciona una máquina de Turing de funcionamiento químico y un método para hacer funcionar una máquina de Turing de funcionamiento químico según las reivindicaciones adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una representación esquemática de una máquina de estados finitos (FSM, por sus siglas en inglés) según una realización de ejemplo.

Las figuras 2 y 3 son nomogramas (es decir, gráficos precalibrados frente a los que se comparan los resultados de la computación que está teniendo lugar y el resultado que está interpretándose).

La figura 4 es una representación esquemática de una FSM (máquina de estados finitos) según una realización de ejemplo.

Las figuras 5A y 5B son representaciones lógicas esquemáticas convencionales de una máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, que incluye una cinta y un cabezal de entrada; una cinta y un cabezal de contador lógico; una cinta y un cabezal de localizador; y una cinta y un cabezal de salida.

Las figuras 6 y 7 son nomogramas.

45 Descripción detallada

La divulgación presenta el diseño, la realización y el funcionamiento de realizaciones de una máquina de Turing de funcionamiento químico. En algunas realizaciones, la máquina de Turing de funcionamiento químico combina una cinta de entrada potencialmente infinita y una máquina de estados finitos (FSM) que usa reacciones químicas. En algunas realizaciones, una vez que la información en la cinta de entrada se ha introducido en la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención usa energía química (es decir, reacciones químicas) para todas las características involucradas en su funcionamiento, incluidas sus transiciones de estado lógicas, y no

requiere ninguna intervención mecánica, eléctrica, electrónica ni ninguna otra forma de intervención externa durante el transcurso de su funcionamiento lógico.

En algunas realizaciones, la máquina de estados finitos se basa en la dinámica de los estados de las propiedades bien conocidas y ampliamente documentadas de la versión en reactor de tanque con agitación continua (CSTR) o semicontinuo o discontinuo (por ejemplo, de flujo intermitente) multiestado de la reacción de Belousov/Zhabotinsky (B/Z). En esta realización, el “alfabeto” (por ejemplo, un alfabeto de dos elementos o un alfabeto de dos letras) en las que se introduce información en la máquina a través de la cinta de entrada que se basa en un alfabeto de dos letras o dos símbolos, puesto que corresponde a la adición de dos especies químicas diferentes. Dependiendo del orden específico en las que se añaden cantidades predeterminadas de dos especies químicas diferentes a un reactor que comprende una disolución de reactante que comprende un reactante (por ejemplo, en una disolución acuosa), la reacción B/Z se impulsa a un número finito de estados. Estos estados se perciben/detectan y pueden interpretarse como el resultado de la “computación” realizada por la máquina de Turing de funcionamiento químico en respuesta a la secuencia ordenada particular de estímulos/entradas proporcionada por la cinta de entrada. La fuente de energía para el funcionamiento de la máquina de Turing de funcionamiento químico es la energía química gastada en las reacciones químicas que tienen lugar durante las computaciones.

En algunas realizaciones, el “alfabeto” en el que se introduce la información en la cinta de entrada de la máquina de Turing de funcionamiento químico descrita en este documento comprende un paréntesis abierto (“(” y un paréntesis cerrado “)”). En tales realizaciones, una máquina de Turing de funcionamiento químico tal como se describe en el presente documento puede estar configurada como el “verificador de paréntesis” básico para decidir si una secuencia de paréntesis abiertos y cerrados está bien formada, es decir, si para cada paréntesis abierto en la secuencia existe un paréntesis cerrado correspondiente. De hecho, la máquina de Turing de funcionamiento químico es, en algunas realizaciones, la generalización química del verificador de paréntesis canónico genérico construido por Minsky en la década de 1950. Véase, por ejemplo, Minsky 1967, *Computation: Finite and Infinite Machines*, Prentice Hall. La máquina de Minsky se conoce por ser una de las máquinas de Turing más simples. Hasta la fecha, tales máquinas se han construido basándose en la mecánica, la electrónica y, en teoría, el uso de enzimas con propiedades químicas conocidas, pero su implementación física o química real a partir de los primeros principios no se ha realizado. Las máquinas como la de Minsky nunca se han diseñado e implementado usando medios químicos; es decir, sin usar ni hacer ninguna referencia a la química de los sistemas vivos existentes y con un control total por parte del diseñador sobre su funcionalidad, funcionamiento, diseño y construcción.

La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención es la realización práctica del concepto de una computación química llevada a cabo en cualquier sistema inorgánico (por ejemplo, independiente de la vida existente), y se basa en una reacción química oscilatoria. Sus principios son generales y pueden extenderse, por ejemplo, a cualquier sistema químico inorgánico o cualquier sistema químico organometálico. La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención abre el camino para la construcción de ordenadores con base química que estén programados químicamente y se hagan funcionar químicamente y tengan la capacidad de ejecutar funciones preprogramadas, llevar a cabo operaciones y manejar información de una manera completamente autónoma. Tales ordenadores con base química pueden ser capaces de responder químicamente a los estímulos químicos de tal manera que el resultado sea una respuesta química ordenada, relacionada de manera única con los estímulos en una cinta de entrada, que es el resultado de la implementación mediante la química de algún procedimiento eficaz (es decir, un algoritmo)

Sin embargo, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención no está restringida a la química inorgánica. Es una construcción general, y como tal también puede implementarse en sistemas bioquímicos, tanto que se producen de manera natural como sintéticos. Esto es así, siempre que el sistema bioquímico sea oscilatorio y tenga, al menos, dos sustratos o un sustrato y una sustancia adicional que pueda comportarse como un sustrato a los efectos de la oscilación. La naturaleza oscilatoria de la química es necesaria para tratar la presencia de no linealidades en el procedimiento (o algoritmo) implementado por la máquina de Turing de algunas realizaciones de la presente invención. En las implementaciones no químicas de las máquinas de Turing, esto se realiza a través de interruptores de encendido-apagado, tales como relés que, interconectados de manera apropiada, permiten la expansión de las no linealidades en el procedimiento como una expansión en serie de potencias (Shannon 1940, *A Symbolic Analysis of Relays and Switching Circuits*, M. Sc. Thesis, MIT; Lloyd 1992, *Phys. Lett. A* 167 255-260. En la máquina de Turing de funcionamiento químico de diversas realizaciones de la presente invención, esto se realiza en cambio mediante una expansión de la no linealidad usando una serie de Fourier. Las oscilaciones en la química proporcionan los elementos para las funciones seno y coseno que son la base para la expansión en una serie de Fourier. La necesidad de al menos dos sustratos (o un sustrato y una sustancia adicional que pueda comportarse como un sustrato a los efectos de la oscilación) para la reacción oscilatoria aparece debido a la necesidad de proporcionar las “letras” del alfabeto en el que se presenta el problema (por ejemplo, una secuencia arbitraria de paréntesis abiertos y cerrados) a la máquina de Turing de funcionamiento químico de las diversas realizaciones de la presente invención. De hecho, un alfabeto de dos letras es la longitud mínima de un alfabeto necesario para expresar, quizás en una versión codificada, cualquier mensaje de longitud arbitraria.

Por tanto, la máquina de Turing de funcionamiento químico de diversas realizaciones de la presente invención es independiente de la naturaleza, el origen o la química específica. Tanto una química inorgánica como orgánica y, en

- cualquier caso, sintética o natural hará funcionar la máquina. Siempre que se use una reacción química oscilatoria en la que haya dos sustratos (o un sustrato y una sustancia adicional que pueda comportarse como un sustrato a los efectos de la oscilación), es posible su realización por cualquier persona con conocimiento de la técnica. El oscilador de dos sustratos puede basarse en la química inorgánica (como en el caso de la reacción de Belousov-Zhabotinsky) en osciladores orgánicos sintéticos u osciladores biológicos (como en el caso de redes sintéticas de reguladores transcripcionales (Elowitz y Liebler 2000, *Nature* 403: 335-338) o en química orgánica y bioquímica natural existente (como en el caso de las oscilaciones glicolíticas (Sel'kov 1968, *European J. Biochem.* 4: 79-86; Hess y Boiteaux 1971, *Annu Rev Biochem.* 40: 237-258; Chance, Pye, Ghosh y Hess 1973, *Biological and Biochemical Oscillators* (Academic Press); Novak y Tyson 2008, *Nat Rev Mol Cell Biol.* 12: 981-991).
- 5
- 10 La enzima fotoluminiscente fosfofructocinasa (PFK) proporciona un ejemplo de un “oscilador biológico”, por ejemplo Tyson 2002, *Biochemical Oscillations*, en Fall, Marland, Wagner, Tyson, eds., *Computational Cell Biology* (Springer-Verlag) 230-260, que fosforila la fructosa-6-fosfato para producir fructosa-1,6-bifosfato con adenosina trifosfato (ATP) como donador de fosfato. En la glicólisis, el ATP es tanto un sustrato como un inhibidor de PFK, mientras que el producto de la reacción, la adenosina difosfato (ADP), también es un activador de la enzima. El ADP sería análogo a la primera especie química, mientras que el ATP sería análogo a la segunda especie química en la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de esta invención. Además, en lugar de monitorizar las oscilaciones del potencial redox de la disolución de reactante tal como se hace en la realización inorgánica de Belousov-Zhabotinsky, en este caso se monitoriza la fluorescencia de la enzima PFK y sus oscilaciones posteriores y cambios en amplitud a medida que se alimenta una secuencia de gotas de ADP y ATP a la máquina de Turing.
- 15
- 20 La máquina de Turing de funcionamiento químico de la presente invención se basa en una reacción química oscilatoria y comprende:
- un reactor que comprende una disolución de reactante que comprende un reactante;
- una fuente de primera especie química para proporcionar una cantidad seleccionada de una primera especie química;
- 25 una fuente de segunda especie química para proporcionar una cantidad seleccionada de una segunda especie química;
- uno o más controladores acoplados para controlar la adición de las especies químicas primera y segunda de las fuentes de especie química primera y segunda en respuesta a una entrada; y
- 30 uno o más sensores situados para detectar cambios en el reactante a medida que el controlador controla las fuentes de especie química primera y segunda para añadir cantidades seleccionadas de las especies químicas primera y segunda respectivas al reactor, en la que el controlador recibe señales correspondientes al estado del reactante y correlaciona los estados del reactante con un resultado que se computa en función de la entrada.
- Tal como se usa en el presente documento, el término “disolución de reactante” incluye, pero no se limita a, un reactante que se disuelve en un disolvente. El disolvente puede ser cualquier disolvente o combinación de disolventes adecuados. Dicho disolvente puede seleccionarse de agua, alcoholes C₁-C₄ tales como metanol, etanol, iso-propanol, t-butanol, y similares y mezclas de los mismos. Los codisolventes como, por ejemplo, dimetilformamida y dimetilsulfóxido también pueden estar presentes en la disolución de reactante. Finalmente, también pueden estar presentes ácidos (por ejemplo, las disoluciones acuosas de ácido que comprenden ácido sulfúrico, ácido nítrico o cualquier otro ácido inorgánico fuerte equivalente o mezclas de los mismos) en la disolución de reactante.
- 35
- 40 En algunas realizaciones, el reactor que comprende la disolución de reactante puede ser un reactor de tanque con agitación continua (CSTR) o semicontinuo o discontinuo (por ejemplo, de flujo intermitente) lleno con la disolución de reactante. El reactor puede ser de cualquier tamaño adecuado, desde un tamaño de picolitros a un tamaño de nanolitros, a un tamaño de microlitros a un tamaño de varios litros a una escala de planta piloto, e incluso a escala industrial. Los expertos en la técnica podrán determinar el tamaño apropiado del reactor.
- 45 En algunas realizaciones, la disolución de reactante es ácida. La disolución de reactante puede acidificarse usando disoluciones de ácido (por ejemplo, disoluciones acuosas de ácido) que comprenden ácido sulfúrico, ácido nítrico o cualquier otro ácido inorgánico fuerte equivalente o mezclas de los mismos.
- Tal como se usa en el presente documento, el término “reactante” incluye, pero no se limita a, un compuesto que puede alcanzar estados metaestables o un régimen oscilatorio, que también puede denominarse un sistema oscilatorio que tiene dos sustratos o un sustrato y una sustancia adicional que puede comportarse como un sustrato a efectos de la oscilación. Dicho compuesto o sistema oscilatorio puede ser de naturaleza inorgánica, organometálica u orgánica y, en cualquier caso, sintético o natural.
- 50
- Tal como se usa en el presente documento, el término “estados metaestables” se refiere ampliamente a un estado inestable y transitorio, pero de vida relativamente larga de un sistema químico.
- 55 Los compuestos que tienen estados metaestables o sistemas oscilatorios tal como se hizo referencia anteriormente

incluyen, pero no se limitan a, complejos/catalizadores de metal de transición como, por ejemplo, complejos de rutenio (II), complejos de rutenio (III), complejos de cerio (III) o complejos de cerio (IV), en los que el complejo/catalizador de metal de transición oscilará entre dos estados de oxidación (por ejemplo, rutenio (II) y rutenio (III)). En algunas realizaciones, los ligandos del complejo de metal de transición son bipyridina como, por ejemplo, en el complejo tris(bipyridina)rutenio (II). En una definición general, los sistemas oscilatorios pueden estar formados, por ejemplo, por rutenio (II)/rutenio (III), cerio (III)/cerio (IV) o Fe (II)/Fe (III). Otro posible sistema oscilatorio según la presente invención se basa en el par I_2/IO_3^- . Este sistema actúa en presencia de peróxido de hidrógeno (Bray 1921, JACS. 43 (6):1262; Liebafsky 1969, Anal. Chem., 4: 1894-1897) y, adicionalmente, en presencia de manganeso (II) (Briggs & Rauscher 1973 J. Chem. Ed. 50: 496). Otros sistemas oscilatorios según la presente invención emplean azufre, fósforo o cobalto; el sistema de fosfofructocinasa (PFK) proporciona un ejemplo de oscilador biológico en la glicólisis. Hess y Boiteaux 1973 *op. cit.* En una realización particular, el complejo de metal de transición es ferroína-ferriína u otros iones o complejos de metal de transición que tienen al menos dos estados de oxidación que difieren en un sólo electrón y que cambian el color de la disolución cuando se cambia de un estado de oxidación al otro. También se contemplan mezclas de cualquiera de estos catalizadores.

Ahora debe quedar claro que todo lo que la máquina de Turing de diversas realizaciones de la presente invención requiere para funcionar es una reacción oscilatoria. En la bibliografía se describen diferentes reacciones oscilatorias adecuadas para la presente invención. Por ejemplo, Noyes y Field 1974, Journal of Chemical Physics, 60(5): 1877-1884 y Epstein *et al.* 2003, Dalton Trans. 1201-1217, incluidos en el presente documento como referencia, proporcionan una revisión de reacciones oscilatorias conocidas y reglas generales para la búsqueda sistemática de nuevas combinando un modelo matemático genérico, un reactor de tanque agitado de flujo continuo para mantener el sistema alejado del equilibrio y una cinética de reacción inorgánica. Este enfoque descrito por Epstein *et al.* 2003, Dalton Trans. 1201-1217 se basa en los siguientes principios:

(1) La oscilación sostenida puede ocurrir si un sistema se mantiene alejado del equilibrio. Una forma de hacerlo es realizar la reacción en un reactor de flujo, que permite la entrada continua de nuevos reactantes y la salida de productos.

(2) Las reacciones autocatalíticas a veces presentan un comportamiento biestable cuando se realizan en un reactor de flujo. Es decir, para determinados conjuntos de concentraciones de entrada y velocidad de flujo, el sistema puede, dependiendo de su historial, alcanzar cualquiera de los dos estados estacionarios, cada uno de los cuales es estable frente a pequeñas perturbaciones.

(3) Si un sistema biestable se ve sujeto a una realimentación que afecta a la concentración de las especies autocatalíticas en una escala temporal larga con respecto a los tiempos característicos para que el sistema se relaje a sus estados estacionarios, entonces al intensificar la realimentación, debe ser posible hacer que oscile el sistema, esencialmente entre los dos estados estacionarios, ya no estables.

(4) La situación descrita anteriormente puede generarse eligiendo una reacción autocatalítica, realizándola en un reactor de flujo para determinar las condiciones para la biestabilidad y luego añadiendo una especie de realimentación que reaccione de manera suficientemente lenta con las especies apropiadas en la reacción autocatalítica. El aumento de la concentración de la especie de realimentación en el flujo de entrada debe llevar al sistema a su estado oscilatorio.

Por tanto, la máquina de Turing de la invención puede funcionar con reacciones oscilantes bien conocidas, como la reacción de Belousov-Zhabotinsky mencionada anteriormente, la reacción de Briggs-Rauscher o la reacción de Bray-Liebafsky, y también con sistemas más recientes descubiertos siguiendo el enfoque mencionado anteriormente u otros medios. Además, aunque no son los únicos posibles, sistemas que pueden ser apropiados se basan en la química del azufre (Orban y Epstein 1985, J. Am. Chem Soc., 107: 2302-2305; Fredrichs, Mlnarik, Grun y Thompson 2001, J. Phys. Chem A, 105: 829-837), el fósforo (K. Kurin-Csorgei, M. Orbán, A. M. Zhabotinsky e I. R. Epstein, 2001, Faraday Discuss., 120: 11-19), el cobalto (He, Kustin, Nagypál y Peintler 1994, Inorg. Chem., 33: 2077-2078) y el manganeso (Doona, Kustin, Orbán y Epstein 1991, J. Am. Chem. Soc., 113: 7484-7489) así como reacciones orgánicas (J. H. Jensen 1983, J. Am. Chem Soc., 105: 2639-2641) También dan lugar a reacciones oscilantes con un valor promedio de amplitud de oscilaciones, ρ y una frecuencia de oscilación f que pueden medirse y usarse para realizar una computación química en la máquina de Turing de la presente invención.

En algunos ejemplos, el reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante puede estar equipado con un controlador de temperatura. En algunos ejemplos, el controlador de temperatura puede mantener la temperatura del reactor, que es preferiblemente de entre 15 y 25°C, más preferiblemente entre 20 y 25°C, dentro de $\pm 0,2^\circ\text{C}$, de modo que la reacción B/Z puede llevarse a cabo cerca de condiciones isotérmicas. En otras realizaciones, el reactor que comprende la disolución de reactante puede estar equipado con un medidor de reducción-oxidación (redox) para monitorizar el potencial redox dentro del reactor. En todavía otras realizaciones, el reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante está equipado con un espectrofotómetro (por ejemplo, un espectrofotómetro UV-Vis) para determinar los cambios en la absorbancia y la intensidad de absorbancia de la disolución en el reactor. En algunos ejemplos, las mediciones de absorbancia se pueden tomar cada 100 milisegundos, seleccionadas de modo que pueda monitorizarse la evolución de las reacciones químicas a medida que se aproximan a sus estados metaestables. Este proceso puede llevar varios

períodos de oscilación de la reacción B/Z que funciona en determinadas condiciones y, por tanto, en aproximadamente 100 segundos, pueden tomarse aproximadamente 1000 mediciones de absorbancia.

En algunos ejemplos, la fuente de primera especie química puede ser una bureta, un cuentagotas, una bomba de jeringa o cualquier medio que pueda contener la primera especie química (por ejemplo, una vesícula). En algunas realizaciones, la fuente de primera especie química puede ser una bureta. En el caso de una bureta, la bureta está equipada con un controlador acoplado para controlar la adición de la primera especie química desde la fuente de primera especie química en respuesta a una entrada. En el contexto de una bureta, el controlador puede ser, en algunas realizaciones, una llave de paso. En algunos ejemplos, el controlador también puede ser una bomba de jeringa, una válvula de solenoide, válvulas de gel microfluídicas o de funcionamiento químico, o similares. En otros ejemplos, el controlador puede ser cualquier medio mediante el cual pueda liberarse la primera especie química, incluidas vesículas que contienen la primera especie química que liberarán (por ejemplo, mediante rotura) la primera especie química en respuesta a una entrada.

La fuente de primera especie química permite la adición de cantidades discretas de la primera especie química al reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante. En algunas realizaciones, la primera especie química comprende un agente oxidante. En algunos ejemplos, dicho agente oxidante está en forma de un sólido, preferiblemente en forma de cristales; alternativamente, el agente oxidante está en forma de una disolución.

Tal como se usa en el presente documento, el término “disolución de agente oxidante” incluye, pero no se limita a, un agente oxidante que se disuelve en un disolvente. Dicho disolvente puede seleccionarse de agua, alcoholes C₁-C₄ y mezclas de los mismos. Los agentes oxidantes incluyen, pero no se limitan a, iones bromato (BrO₃⁻), iones yodato (IO₃⁻), y similares. Los agentes oxidantes que comprenden iones bromato incluyen, pero no se limitan a, bromato de litio, bromato de potasio, bromato de sodio, o cualquier otra sal de bromato soluble de metales alcalinos y mezclas de los mismos.

En algunos ejemplos, la fuente de segunda especie química puede ser una bureta, un cuentagotas, una bomba de jeringa o cualquier medio que pueda contener la segunda especie química (por ejemplo, una vesícula). En algunas realizaciones, la fuente de segunda especie química puede ser una bureta. En el caso de una bureta, la bureta está equipada con un controlador acoplado para controlar la adición de la segunda especie química desde la fuente de segunda especie química en respuesta a una entrada. En el contexto de una bureta, el controlador puede ser, en algunos ejemplos, una llave de paso. En algunos ejemplos, el controlador también puede ser una bomba de jeringa, una válvula de solenoide, válvulas de gel microfluídicas o de funcionamiento químico, o similares. En otras realizaciones, el controlador puede ser cualquier medio mediante el cual puede liberarse la segunda especie química, incluidas vesículas que contienen la segunda especie química que liberarán (por ejemplo, mediante rotura) la segunda especie química en respuesta a una entrada.

La fuente de segunda especie química permite la adición de cantidades discretas de la segunda especie química al reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante. En algunas realizaciones, la segunda especie química comprende un agente reductor. En algunos ejemplos, dicho agente reductor está en forma de un sólido, preferiblemente en forma de cristales; alternativamente, el agente reductor está en forma de una disolución.

Tal como se usa en el presente documento, el término “disolución de agente reductor” incluye, pero no se limita a, un agente reductor que se disuelve en un disolvente. Dicho disolvente puede seleccionarse de agua, alcoholes C₁-C₄ y mezclas de los mismos. Los agentes reductores incluyen, pero no se limitan a, ácido malónico, ácido ascórbico, ácido carbónico, ácido cítrico, ácido succínico u otras cetonas, dicetonas o ácidos dicarboxílicos adecuados, y mezclas de los mismos.

El uno o más sensores pueden ser cualquier tipo de sensor conocido en la técnica. En algunas realizaciones, el uno o más sensores pueden ser un sensor redox, un sensor de pH, un sensor de temperatura, un sensor de presión, un sensor UV-Vis o combinaciones de los mismos.

Los expertos en la técnica reconocerán que existen muchas variantes de la reacción B/Z, que usan diferentes tipos de agentes oxidantes, agentes reductores y complejos metálicos. Por tanto, se contempla que pueda adaptarse la máquina para manejar diferentes cadenas construyendo máquinas de Turing equivalentes con variantes de la reacción B/Z.

Los expertos en la técnica también reconocerán que cambiar la disolución de reactante que comprende el reactante (por ejemplo, cambiando el reactante, incluyendo el cambio del complejo/catalizador de metal de transición), la primera especie química y/o la segunda especie química puede dar como resultado cambios en las velocidades cinéticas de una o varias de las reacciones individuales en la reacción B/Z, cambiando, a su vez, las características de oscilación. Por consiguiente, pueden aprovecharse variantes de la reacción B/Z para diseñar una máquina de Turing de funcionamiento químico con la respuesta deseada adaptada a las posibilidades de monitorización disponibles o deseadas.

La concentración inicial del reactante en la disolución de reactante es la que puede establecerse en un modo oscilatorio mediante la adición de una segunda especie química en presencia de las cantidades correspondientes de la primera especie química, e impulsa la reacción a un modo oscilatorio. El establecimiento de la concentración de

reactante y ácido eventual en la disolución de reactante, así como las concentraciones de los agentes oxidantes y reductores en las fuentes de especie química y las cantidades respectivas (volumen de gota) de los agentes oxidantes y reductores que van a añadirse a la disolución de reactivo será un trabajo de rutina para los expertos en la técnica (Noyes y Furrow 1982). Sin embargo, más específicamente, la concentración inicial del reactante en la disolución de reactante, por ejemplo de un complejo de rutenio o cerio, es preferiblemente de entre 10^{-5} M y 10^{-2} M, más preferiblemente entre 10^{-4} M y 10^{-3} M. La concentración inicial de ácido en la disolución de reactivo es preferiblemente de entre 10^{-2} M y 1 M, más preferiblemente entre 10^{-1} M y 1 M. Además, la concentración del agente oxidante en la disolución de agente oxidante es preferiblemente de entre 5 M y 20 M, más preferiblemente entre 10 M y 15 M; mientras que la concentración del agente reductor en la disolución de agente reductor es preferiblemente de entre 1 M y 15 M, más preferiblemente entre 5 M y 10 M. Finalmente, el volumen de gota para las disoluciones oxidante y reductora es preferiblemente de entre 1,0 y 0,4 ml, preferiblemente desde 0,8 hasta 0,5 ml.

Tal como se comenta con mayor detalle a continuación, una máquina de Turing de funcionamiento químico también puede lograrse cambiando la concentración relativa de las especies químicas primera y segunda usadas para construir una cinta de entrada, hasta el punto en el que pueda usarse la forma sólida de las especies químicas primera y segunda, sin dilución en un disolvente. Por ejemplo, pueden usarse cristales de la primera especie química y cristales de la segunda especie química, ajustando para la estequiometría, en lugar de una disolución de la primera especie química y una disolución de la segunda especie química.

Incluso puede cambiarse la definición o identificación química del alfabeto de entrada (por ejemplo, representando iones bromato un paréntesis cerrado y representando el ácido malónico un paréntesis abierto). Para cualquiera de estas máquinas de Turing de funcionamiento químico, puede asociarse un nomograma (es decir, un gráfico precalibrado frente al que se comparan los resultados de la computación que tiene lugar y el resultado que está interpretándose; véanse los ejemplos) en las que las respuestas que se encuentran en cualquier etapa de computación por encima del nomograma son ilógicas.

La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención comprende una máquina de estados finitos (FSM) y una cinta de entrada. La FSM tiene, en algunos ejemplos, cinco estados más un estado inicial y un estado final. Estos cinco estados se describen con mayor detalle en los ejemplos proporcionados en el presente documento. Sin embargo, la FSM puede tener más de cinco estados más un estado inicial y un estado final.

En algunas realizaciones, el funcionamiento lógico de la máquina puede describirse mediante un conjunto de cuatro cintas y cabezales que, aunque no físicos, ayudan a capturar y representar las características específicas de la química. La FSM se implementa como un reactor que comprende un reactante que está listo para pasar a múltiples estados tan pronto como determinados productos químicos (es decir, las especies químicas primera y segunda) se añaden al reactor. Las computaciones tienen lugar en la FSM tras la introducción de una secuencia de estímulos en forma de gotas de cualquiera de las dos sustancias (es decir, la primera especie química y la segunda especie química) correspondientes a las dos letras de un alfabeto de dos símbolos, a saber, “(“ y “)“.

La secuencia está contenida en la cinta de entrada. Cuando se añade al reactante en la FSM, la química se ha diseñado de tal manera que estos estímulos a las reacciones químicas producen resultados químicos que actúan, a su vez, como estímulos para estados posteriores en la FSM. Los resultados son el resultado químico de la actividad consiguiente de las reacciones químicas que constituyen los cinco estados (más el inicial) de la FSM. Estos incluyen estados oscilatorios, y los resultados se manifiestan por cambios en la frecuencia de oscilación entre colores y en la intensidad promedio de sus tonos a medida que se manifiestan en la disolución de reactante. Estos cambios pueden apreciarse fácilmente a simple vista o, en algunas realizaciones, con un espectrofotómetro.

En algunas realizaciones, la FSM puede adoptar la forma de un reactor 100 que comprende una disolución de reactante 102, tal como se muestra en la figura 1) Véase también, la figura 4. Una fuente de primera especie química 106, en este caso una primera bureta, se usa para proporcionar una cantidad seleccionada de la primera especie química, iones bromato. Una fuente de segunda especie química 104, en este caso una segunda bureta, se usa para proporcionar una cantidad seleccionada de una segunda especie química, en este caso ácido malónico. Se acopla un controlador 108, en este caso una llave de paso, una para la fuente 106 y otra para la fuente 104, para controlar la adición de las especies químicas primera y segunda desde la fuente de primera especie química 106 y la fuente de segunda especie química 104, en respuesta a una entrada. Puede situarse sensor 114 (por ejemplo, puede ser un sensor redox, un sensor de pH, un sensor de temperatura, un sensor de presión, un sensor de UV-Vis o combinaciones de los mismos) para detectar cambios en el reactante a medida que el controlador controla las fuentes de especie química primera y segunda para añadir cantidades seleccionadas de las especies químicas primera y segunda respectivas al reactor, en el que el controlador recibe señales 110 (por ejemplo, un paréntesis abierto) y 112 (por ejemplo, un paréntesis cerrado) que representan los estados de los reactantes y correlaciona los estados de los reactantes con un resultado que se computa como una función de la entrada.

En la realización en la que la FSM es tal como se muestra en la figura 1, la FSM, en su estado inicial (panel más a la izquierda) responde después de una entrada de “paréntesis abierto” (panel central) seguida de una entrada de “paréntesis cerrado” (panel más a la derecha). El complejo de Ru (II) colorea la FSM en su estado inicial (es decir, un tono naranja de una intensidad dada) que cambia a un primer estado (es decir, tono verde de una intensidad

dada) a medida que el catalizador reacciona y se transforma en el estado de Ru (III). Después de la entrada de “paréntesis cerrado”, la FSM inicia oscilaciones con una frecuencia (“ f ”) dada y el color oscila entre dos intensidades y tonos específicos.

5 En el ejemplo en el que la FSM es un “verificador de paréntesis”, la combinación de cinta/FSM verifica si una secuencia de paréntesis abiertos y cerrados “alimentados” a la máquina de Turing coincide. Por ejemplo, las dos secuencias “(())” y “() ()” coinciden, mientras que las secuencias “(()” y “((())” no coinciden. En el caso en el que los paréntesis coinciden, el procedimiento eficaz ejecutado por la FSM en la máquina de Turing de funcionamiento químico dará una respuesta positiva (por ejemplo, lógica) al primer grupo de dos entradas. En el caso de que los paréntesis no coincidan, el procedimiento eficaz ejecutado por la FSM en la máquina de Turing de funcionamiento químico dará una respuesta negativa (por ejemplo, ilógica) al segundo grupo de dos entradas. Tal como se usa en el presente documento, el término “ilógico” se refiere a una expresión que no tiene sentido, en relación con una secuencia de paréntesis abiertos y cerrados coincidentes.

15 Tal como puede observarse en la figura 1, el procedimiento implementado por la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención es general. Además, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención puede construirse a partir de piezas y sustancias químicas fácilmente disponibles y no requiere equipos especializados. En algunas aplicaciones especializadas, sin embargo, pueden tener que diseñarse y construirse reactores y sistemas de alimentación (es decir, fuentes de especies químicas) *ad hoc*, por ejemplo, incorporando los componentes necesarios para llevar a cabo la reacción B/Z en perlas de polímero (por ejemplo, perlas de resina que se cargan con el reactante) a las que se alimentan las “letras del alfabeto”, también conocidas como las especies químicas primera y segunda, generando así una gran cantidad de configuraciones potenciales, cada una de las cuales puede programarla el usuario/diseñador para ejecutar alguna actividad simple, mientras que el conjunto conduce a un comportamiento emergente programado, incluidas las oscilaciones en fase y la división del conjunto, lo que puede conducir a una autorreplicación controlada) o dentro de geles (por ejemplo, gel de agarosa) para los que tiene lugar un acoplamiento quimiomecánico.

Al leer el resultado del funcionamiento de cualquier máquina de Turing, incluida la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, es necesaria una interfaz entre la salida de la máquina y el usuario. Por ejemplo, en las máquinas de Turing convencionales, se interpreta que un “1” impreso por una máquina de Turing mecánica del verificador de paréntesis convencional en una cinta de salida significa que hay una “coincidencia de paréntesis” y que un “0” significa que “los paréntesis no coinciden”. En este documento se hace referencia a esta interfaz como el “nomograma” para la máquina de Turing de algunas realizaciones de la presente invención y está diseñada para permitir que el usuario entienda el resultado.

EJEMPLOS DE LA OPERACIÓN LÓGICA DE REALIZACIONES DE UNA MÁQUINA DE TURING DE FUNCIONAMIENTO QUÍMICO

35 A continuación se describe la implementación de una computación mediante una realización de la máquina de Turing de funcionamiento químico descrita actualmente que incluye una fórmula química genérica (“receta”) para su realización simple. También se describe un ejemplo de configuración de un sistema de monitorización; la estructura lógica de la cinta; y los estados y la máquina de estados finitos que representan la química. Estos ejemplos se exponen para ayudar a comprender las realizaciones de la invención y, por supuesto, no deben interpretarse como que limitan específicamente las realizaciones de la invención descritas y reivindicadas en el presente documento.

La computación

45 Las computaciones llevadas a cabo por la máquina de Turing de funcionamiento químico a través de sus estados y cintas, implementan un “procedimiento eficaz” que se describe con mayor detalle a continuación. Los ejemplos de computaciones se llevan a cabo mediante una realización que consiste en un verificador de paréntesis (véase a continuación). El procedimiento eficaz fue diseñado para capturar los requisitos especiales de las reacciones químicas descritas en este documento y permite que la máquina de Turing de funcionamiento químico genere “respuestas” que se identifican fácilmente mediante el examen directo del estado del reactor después de una computación, usando instrumentación química convencional tal como electrodos de referencia o un espectrofotómetro.

50 Estas respuestas, $\langle \rho \rangle$, f , obtenido de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención corresponden directamente a la cantidad

$$\langle \rho \rangle = \frac{[\text{Ru(III)}]}{[\text{Ru(II)}] + [\text{Ru(III)}]}$$

55 y a la frecuencia f de oscilación entre los dos estados [Ru (II)] y [Ru (III)] de un Ru-bpy que está involucrado en la reacción B/Z en la que el bromato de litio representa “(” y el ácido malónico representa “)””; mientras que $\langle \rho \rangle$ es el valor de la amplitud de oscilación promedio.

La computación se lleva a cabo en un reactor agitado, que contiene 100 ml de una disolución de reactante con las concentraciones que se muestran en la tabla 1. El reactor está protegido de la luz para evitar interferencia en la cinética química calculada de reacciones fotosensibles y se mantiene a una temperatura constante de $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Tabla 1: Concentraciones iniciales de reactantes en el reactor de 100 ml.

H_2SO_4	0,6 M
$\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$	$0,24 \times 10^{-3}$ M
$\text{Ru}(\text{bpy})_3^{3+}$	0 M
BrO_3^-	0 M
Ácido malónico	0 M

- 5 Los volúmenes de gota usados para “escribir” la cinta de entrada tienen las características mostradas en la tabla 2.

Tabla 2: Gotitas de “alfabeto” para construir la cinta de entrada

	BrO_3^-	Ácido malónico
Volumen de gota (ml)	0,7	0,6
Concentración (M)	13,98	7,33

- 10 Las gotas de bromato altamente concentradas pueden obtenerse a partir de LiBrO_3 disponible comercialmente. El bromato de litio y el ácido malónico se disuelven en la disolución del reactor para dar un cambio gradual en la concentración de BrO_3^- del reactor de 0,1 M y en la concentración de ácido malónico del reactor de 0,045 M, respectivamente. Estos afectan a la extensión de todas las reacciones modificando por tanto las características de oscilación química de ambos productos, así como otras propiedades específicas de la reacción y cambian las propiedades detalladas de los estados de la FSM.

- 15 Usando los reactivos enumerados anteriormente en las proporciones facilitadas en las tablas 1 y 2, el reactor puede realizar computaciones para un máximo de siete paréntesis coincidentes, tal como se muestra en la figura 2. Si se introducen más paréntesis, la red de reacción B/Z experimenta una transición a un régimen de estado estacionario, es decir, a un régimen no oscilatorio.

- 20 Una estrategia para permitir la computación de expresiones más largas sin la transición a un régimen no oscilatorio consiste en cambiar el “alfabeto” de entrada, en particular aumentando la concentración relativa del ácido malónico en las gotas con respecto a las gotas de bromato. Hay que tener en cuenta que si se cambian las concentraciones, el nomograma (que se describirá a continuación) debe volver a calibrarse. Pero, para un conjunto dado de concentraciones, el nomograma, una vez disponible, es único y es válido para la interpretación de cualquier expresión que vaya a someterse a prueba.

- 25 La figura 3 muestra un ejemplo en el que se ha cambiado la concentración de reactivos en las gotas para que cuando se añadan al reactor, las gotas se diluyan en la disolución del reactor para dar un cambio gradual en la concentración de BrO_3^- del reactor de 0,045 M y en la concentración de ácido malónico del reactor de 0,1 M, respectivamente. Tal como se muestra, la longitud de las secuencias de entrada que pueden computarse es considerablemente más larga que en el ejemplo anterior, pero el equipo de monitorización requerirá más precisión para detectar los cambios relativos en la media de oscilación y la frecuencia de oscilación que son menores que los obtenidos con las concentraciones facilitadas en la tabla 2.

- 30 Pueden usarse equipos de laboratorio convencionales para controlar las oscilaciones de complejos de metal y las oscilaciones asociadas en el color de la disolución que son la respuesta de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención. Normalmente, el potencial redox y el color se monitorizan con la ayuda de electrodos de referencia (por ejemplo, electrodo de trabajo de Pt y uno de cuasi referencia) conectados a un electrómetro y un espectrofotómetro (por ejemplo, monitorizando la absorción de luz de longitud de onda de 635 nm), respectivamente. En realizaciones en las que la reacción B/Z es una reacción catalizada por rutenio, las oscilaciones químicas pueden monitorizarse usando un sistema tal como el que se describe a continuación. En la figura 4, se muestra un ejemplo de un sistema de monitorización, que es un sistema de monitorización óptico convencional y está disponible en la bibliografía pública. Véase, por ejemplo, T. Amemiya *et al.* (2002). Este sistema 400 comprende un láser de diodo 402 (por ejemplo, uno que emite luz de longitud de onda de 635 nm); un troceador óptico 404 para modular el rayo láser; una lente de enfoque 406; un filtro de densidad neutra 408; un fotodiodo 410 para medir la intensidad del haz 412 (línea discontinua) después de pasar a través de la disolución 414 (que comprende un complejo metálico y otros reactivos) comprendido en el reactor 416; un filtro de color 418; un preamplificador de corriente 420 para amplificar la señal de corriente fotoeléctrica del fotodiodo 410; un amplificador sincrónico bifásico 422 para amplificar adicionalmente la señal; y un ordenador 424 para recibir e interpretar la señal. 45 El sistema de monitorización 400 también comprende un controlador de temperatura 426, conectado al transmisor de temperatura 427, para controlar la temperatura del reactor 416; y el controlador de temperatura 428, conectado al transmisor de temperatura 429, para controlar la temperatura de las fuentes de especie química primera y segunda 432 y 430, respectivamente. Finalmente, el sistema de monitorización 400 comprende un controlador de bomba 434 acoplado para controlar la adición de ácido malónico a través del conducto 440 (que está en comunicación de fluido

5 con la fuente de segunda especie química 430 y el reactor 416) y un controlador de bomba 436 acoplado para controlar la adición de iones bromato a través del conducto 442 (que está en comunicación de fluido con la fuente de primera especie química 432 y el reactor 416). En algunos ejemplos, el sistema de monitorización 400 también comprende un electrómetro 438. En algunos ejemplos, el sistema 400 también comprende un mecanismo de agitación 444 para agitar la disolución 414.

La estructura lógica de la cinta y la máquina de estados finitos que representan la química anterior. Se ilustra en el ejemplo 1, la cadena de paréntesis “() ()” y en el ejemplo 2, la cadena de paréntesis “() ((“

10 El siguiente ejemplo ilustra cómo la combinación FSM/cinta, que compone la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, actúan conjuntamente. Estos ejemplos describen la evolución de los diversos estados (es decir, los cinco estados) en la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención.

15 La química anterior de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención tiene una estructura que es equivalente al menos a los siguientes componentes y estados lógicos. Obsérvese que las cintas (excepto la cinta de entrada) son construcciones conceptuales cuyo papel en lo siguiente es describir el funcionamiento lógico de realizaciones de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la invención.

La estructura lógica

En primer lugar, se proporciona una breve descripción de los componentes de la estructura lógica para las realizaciones de la presente invención. Véanse las figuras 5A y 5B.

20 CINTA DE ENTRADA Y CABEZAL DE ENTRADA: La cinta de entrada contiene una cadena de paréntesis tal como la suministra el usuario. Esta es la cadena que el usuario desea verificar si es lógica o no, y si es ilógica qué tipo de paréntesis está de más. El cabezal es un dispositivo de “sólo lectura” que lee cada símbolo en la cinta en orden consecutivo.

25 CINTA DE CONTADOR LÓGICO Y SU CABEZAL: Esta cinta inicialmente tiene un sólo “0” escrito en ella. El cabezal de esta cinta es un dispositivo de “lectura y escritura”. El propósito de este componente es realizar un seguimiento del número de “(“ que no se han cancelado aún con un “)” correspondiente. En todo momento, el número de “(“ que no se han cancelado aún se visualiza en la cinta en sistema unario.

30 CINTA DE LOCALIZADOR Y SU CABEZAL: La cinta de localizador es una cinta bidimensional infinita que sirve como archivador. Dicha cinta incluye ubicaciones que pueden leerse o escribirse con una entrada apropiada; dichos lugares se denominan celdas. Cada celda contiene un par de valores de <p> y frecuencia, *f*, asociados con una determinada combinación de entradas totales y número total de “(“ desapareados. El cabezal es un dispositivo de “sólo lectura” que se mueve a diferentes celdas para hallar los valores correctos de <p> y frecuencia, *f*, que describen el sistema en un momento determinado. El cabezal de esta cinta se mueve una fila hacia abajo para cada entrada alfabética y sirve como contador para el número total de entradas añadidas en el momento actual.

35 CINTA DE SALIDA Y SU CABEZAL: Esta cinta está inicialmente en blanco, y el cabezal es un dispositivo “de sólo escritura” que escribe en la cinta los valores de <p> y frecuencia, *f*, del sistema en cada momento. Estos valores los proporciona la CINTA DE LOCALIZADOR Y SU CABEZAL, que se describen a continuación.

40 CONTROL DE CABEZAL: esta es la unidad central que controla el movimiento de los cabezales en las direcciones especificadas tanto por el estado de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, como por los estímulos que recibe el control de cabezal de las diversas cintas.

No todas las cintas se implementan físicamente en la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, cuando son necesarias para tener una descripción lógica clara de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención.

El funcionamiento de los componentes lógicos anteriores

45 A continuación, se proporciona una breve descripción del funcionamiento lógico de cada uno de los componentes anteriores.

LA CINTA Y EL CABEZAL DE ENTRADA: la cinta la crea el usuario de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención. Contiene la cadena de paréntesis que el usuario desea determinar si es lógica o no. El usuario debe finalizar esta cadena con una “E” impresa en la cinta.

50 LA CINTA Y EL CABEZAL DE CONTADOR LÓGICO: La cinta comienza con todas las celdas en blanco, excepto una que contiene un “0”. Esta cinta y cabezal harán un seguimiento del número de “(“ no coincidentes con que se encuentra la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, mientras lee desde la CINTA DE ENTRADA, imprimiendo un 1 para cada “(“. El número total está escrito en sistema unario. Este número disminuye al reemplazar uno de los 1 por un “0”, cada vez que la máquina de Turing de funcionamiento

químico de las realizaciones de la presente invención lee un “)” que se corresponde con un “anterior” (“.

5 LA CINTA Y EL CABEZAL DE SALIDA: la cinta está inicialmente en blanco. Esta parte de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención registrará la salida después de que se lea cada símbolo de la CINTA DE ENTRADA. La salida es un conjunto que contiene un valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle \rho \rangle$ y una frecuencia de oscilación f . Estos valores se hallan en la CINTA DE LOCALIZADOR y simplemente se copian en la CINTA DE SALIDA. También puede imprimirse una “X” en la cinta de salida; esto significa que la cadena de entrada era ilógica.

10 La CINTA Y EL CABEZAL DE LOCALIZADOR actúan como un archivador del que extrae la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención. Esta es una cinta bidimensional que contiene pares que especifican una determinada amplitud promedio del valor de las oscilaciones, ρ y una frecuencia de oscilación f . Estos valores son únicos para la lectura de entrada por la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención hasta cualquier punto en el tiempo. El cabezal de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se mueve una celda hacia abajo cada vez que se lee una entrada. Además, el cabezal se mueve una celda hacia la derecha si se leyó un “(“ desde la CINTA DE ENTRADA y una celda hacia la izquierda si se leyó un “)”

15 El movimiento vertical del cabezal en la cinta de localizador cuenta el número total de entradas. Los movimientos hacia izquierda y derecha colocan el cabezal sobre un determinado conjunto, $\{\langle \rho \rangle, f\}$, correspondiente a un determinado número de paréntesis abiertos y un determinado número de paréntesis cerrados que se han leído por la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención.

20 El CABEZAL DE LOCALIZADOR comienza en la entrada (0,0) de esta cinta, correspondiente a que no se leen entradas desde la CINTA DE ENTRADA. La columna asociada a esta celda contiene todos los conjuntos, $\{\rho^*, f^*\}$, que corresponden a un número igual de paréntesis abiertos y cerrados que se leen por la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención hasta determinado tiempo.

25 En cualquier momento después de que se haya leído alguna entrada, el número de celdas lejos de la columna de cero en la que el cabezal es exactamente igual al número escrito en sistema unario en la CINTA DE CONTADOR LÓGICO.

30 La columna de B representa las celdas a las que llegará el cabezal sólo si se ha leído un exceso de paréntesis cerrados, por tanto, la cadena de paréntesis es ilógica. Si el cabezal encuentra una “B” en la celda a la que se mueve, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se detiene y declara la entrada “ilógica”.

Las celdas en blanco en esta cinta representan celdas a las que el cabezal nunca se moverá porque su ubicación corresponde a una combinación imposible de contador total y contador lógico.

Los estados de la máquina de estados finitos que hacen que sea equivalente a la química

35 Los cinco estados de la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención son los siguientes:

ESTADO I (inicial): este es el primer estado en el que entra la máquina tras el inicio. Filtra inmediatamente las cadenas de paréntesis que comienzan de manera ilógica (por ejemplo, comienzan con “))”) enviándolas al estado Q2 y etiquetándolas como “ilógicas”. Si la cadena comienza con “(“, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pasa al estado Q1.

40 ESTADO Q1: este estado indica al control de cabezal que mueva el cabezal en la cinta de contador lógico una celda hacia la derecha, y el cabezal en la cinta de localizador una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha. En este estado, la máquina sólo responde a un estímulo de la cinta de localizador. La respuesta a este estímulo tiene dos partes. La primera parte es que el par de $\langle \rho \rangle$ y frecuencia, f , correspondiente (tal como lo proporciona la cinta de localizador) se imprime en la cinta de salida. La segunda parte es que se imprime un “1” en la cinta de contador lógico. Obsérvese que la máquina sólo puede pasar al estado Q3 desde este estado.

45 ESTADO Q2: La máquina sólo pasa a este estado si sucede que el primer símbolo en la cinta de entrada es “)”. Este estado instruye al control de cabezal que mueva el cabezal en la cinta de localizador una celda hacia abajo y una celda hacia la izquierda. El cabezal en la cinta de localizador se encontrará con una “B” escrita en esta celda. Esto hará que la máquina imprima una “X” en la celda actual en la cinta de salida y se detenga. La “X” indica que la cadena de entrada era ilógica.

50 ESTADO Q3: en este estado, el control de cabezal moverá los cabezales en las cintas de entrada y salida una celda hacia la derecha. En este estado, la máquina sólo responde a un estímulo de la cinta de entrada. Si el estímulo es “(“ la máquina pasa al estado Q1. Por otro lado, si el estímulo es “)”, la máquina pasa al estado Q4 y la respuesta es un “0” impreso en la cinta de contador lógico. Si la cinta de contador lógico tenía algún 1 en la cinta, este “0” reemplazará a uno de ellos. Si el estímulo es “E”, la máquina pasa al estado Q5.

55

ESTADO Q4: en este estado, el control de cabezal mueve el cabezal del contador lógico una celda hacia la izquierda, y el cabezal en la cinta de localizador una celda hacia abajo y una celda hacia la izquierda. Obsérvese que cuando está en este estado, la máquina sólo responde a un estímulo de la cinta de localizador. Si el estímulo es una "B", la máquina imprime una "X" en la cinta de salida y se detiene. Si el estímulo es un par de $\langle \rho \rangle$ y frecuencia, f , desde la cinta de localizador, la respuesta es imprimir este par en la cinta de salida, y la máquina pasa al estado Q3.

ESTADO Q5: En este estado no se mueven cabezales. Los estímulos vienen por pares: una parte de la cinta de contador lógico y la otra de la cinta de localizador. La parte del estímulo que proviene de la cinta de localizador puede ser un par de $\langle \rho \rangle$ y frecuencia, f , específico. La parte del estímulo de la cinta de contador lógico puede ser o bien un "1" o bien "0". Si es "0", la máquina imprime la actual $\langle \rho \rangle$ y frecuencia, f , del sistema en la cinta de salida; esto indica que la cadena es lógica y tiene paréntesis coincidentes. Si es "1", entonces la máquina imprime una "X" en la cinta de salida (la cadena es ilógica porque al menos un "(" permaneció sin coincidencia).

El nomograma

Para el ejemplo de la coincidencia de paréntesis usando la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, el nomograma traduce las computaciones de la máquina (propiedades oscilatorias que consisten en la frecuencia de las oscilaciones químicas y el valor promedio de ρ) en una de las siguientes cuatro posibilidades: "Sí, el resultado es que los paréntesis coinciden"; "No, la expresión introducida tiene demasiados paréntesis abiertos"; "No, la expresión introducida tiene demasiados paréntesis cerrados"; o "No, la expresión introducida es ilógica".

Dado un conjunto de parámetros químicos para la reacción B/Z usada en la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención, el nomograma puede construirse y usarse para interpretar cualquier computación realizada por cualquier instancia de esta máquina. El nomograma es equivalente a una curva de calibración o curva de referencia para la reacción y para el problema en cuestión resuelto por la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención. Por tanto, dado un conjunto de condiciones de reacción (por ejemplo, concentración de reactante; concentración de primera especie química; y la concentración de segunda especie química), debe usarse el mismo nomograma para todas las computaciones. Sin embargo, si se modifican las condiciones de reacción, por ejemplo, si se cambia el tamaño o la concentración de las gotas usadas como el alfabeto de entrada, entonces la máquina química puede requerir una nueva calibración y puede ser necesario un nuevo nomograma. Lo mismo se aplica si la reacción química subyacente no era el sistema B/Z y si estaba implicada una química diferente.

El nomograma es una curva en escalera que muestra la amplitud promedio de las oscilaciones sólo para el caso de pares de paréntesis coincidentes (o cancelados). El nomograma es un gráfico precalibrado frente al que se comparan los resultados de la computación que se lleva a cabo y a partir del cual se interpretan los resultados. El gráfico representa tanto las oscilaciones en ρ como su valor promedio en función del tiempo a medida que se añade una secuencia seleccionada de paréntesis a la FSM. Más específicamente, está construido de modo que satisfaga lo siguiente:

una expresión con paréntesis coincidentes termina con la respuesta impresa exactamente en la línea del nomograma en la última celda computada de la cinta de salida;

una expresión con paréntesis abiertos de más termina con la respuesta impresa por encima de la línea del nomograma en la última celda computada de la cinta de salida;

una expresión con paréntesis cerrados de más termina con la respuesta impresa por debajo de la línea del nomograma en la última celda computada de la cinta de salida;

una expresión ilógica da como resultado una respuesta impresa por debajo del nomograma en la etapa correspondiente en la que la expresión se volvió ilógica;

para un número impar de paréntesis de entrada, la respuesta se encontrará o bien por encima o bien por debajo de la línea del nomograma (paréntesis abiertos o cerrados de más, respectivamente); y

sólo cuando en configuraciones en las que no hay paréntesis abiertos o cerrados de más, la respuesta del sistema químico se encuentra precisamente en la curva del nomograma.

Ejemplo 1 de funcionamiento real: Verificación de la cadena de paréntesis "() ()"

En primer lugar, se escribe la cadena que va a verificarse, de antemano, en la cinta de entrada. Además, se escribe una "E" en esta cinta inmediatamente después del último paréntesis en la cadena. Esto indicará a la máquina el final de la cadena. Véase la figura 5A.

La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se inicia en el estado (I), en el que se lee el primer paréntesis desde la cinta de entrada. El primer paréntesis es abierto "(" En este punto,

se añade un volumen de iones bromato. La máquina pasa al estado (Q1). Como resultado, el cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la derecha y el cabezal en el localizador la cinta se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha.

5 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está ahora en el estado (Q1). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Además, se imprime un "1" en la cinta de contador lógico. Además, los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.

10 El valor de amplitud de oscilación promedio $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia que se escribieron en la cinta de salida, o de manera equivalente, se copiaron de la cinta de localizador, son 1 y 0, respectivamente, puesto que la máquina sólo ha leído un tipo de símbolo.

15 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está ahora en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es un paréntesis cerrado ")". Véase la figura 5B. Se añade un volumen de ácido malónico. Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q4). Se imprime un "0" en la cinta de contador lógico, reemplazando el "1" que se imprimió anteriormente. Luego, el cabezal de la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la izquierda, y el cabezal de la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la izquierda.

20 El periodo de tiempo entre las dos entradas, "(" y ")" debe ser lo suficientemente largo como para garantizar que la reacción química haya alcanzado un estado estacionario para esa configuración particular.

25 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q4). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.

30 La frecuencia que se escribió en la cinta de salida, o de manera equivalente, se copió de la cinta de localizador, en este punto, es distinta de cero puesto que se han leído ambos tipos de entradas desde la cinta de entrada. El valor de amplitud de oscilación promedio $\langle\rho\rangle$ se encuentra en el nomograma, puesto que se ha añadido exactamente uno de cada tipo de entrada. Véase la figura 6.

35 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es "(" (es decir, se añade un volumen de iones bromato). Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q1). El cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la derecha, y el cabezal en la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha.

40 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q1). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en la celda actual de la cinta de salida. Además, se imprime un "1" en la cinta de contador lógico. Además, los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.

45 La frecuencia ha aumentado. El valor de amplitud de oscilación promedio se encuentra por encima del nomograma, puesto que en este punto se han leído más "(" desde la cinta de entrada que ")".

50 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es un paréntesis cerrado ")" (es decir, se añade un volumen de ácido malónico). Esto hace que la máquina pase al estado (Q4). Se imprime un "0" en la cinta de contador lógico, reemplazando el "1" que se imprimió anteriormente. Luego, el cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la izquierda, y el cabezal en la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la izquierda.

55 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q4), el cabezal de la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Los cabezales tanto de la cinta de entrada como

de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.

Una vez más, la frecuencia ha aumentado. El valor de amplitud de oscilación promedio ahora se encuentra en el nomograma, puesto que en este punto dos de cada tipo de entrada, es decir, dos “(” y dos “)”, se han leído desde la cinta de entrada.

- 5 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es “E”. Esto señala el final de la cadena de paréntesis y hace que la máquina pase al estado (Q5). No se imprime nada en ninguna cinta, ni se mueve ningún cabezal durante la transición al estado (P5).

- 10 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q5). El cabezal en la cinta de contador lógico lee el símbolo impreso en la celda en la que se encuentra actualmente, y el cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle \rho \rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . El símbolo leído desde la cinta de contador lógico es “0” en este caso. Esto hará que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención imprima, en la cinta de salida, el conjunto de números copiados de la cinta de localizador.
- 15 Entonces, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se detendrá.

En este punto, el valor de frecuencia y de amplitud de oscilación promedio permanecen inalterados puesto que no se ha introducido ninguna entrada adicional en el sistema químico.

- 20 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se ha detenido. La cinta de salida contiene sólo una lista de pares que se copiaron de la cinta de localizador. El hecho de que no se imprima ninguna “X” en la cinta de salida indica que la cadena de paréntesis en la cinta de entrada es “lógica”. Además, las dos últimas celdas de la cinta de salida contienen el mismo par de números. Esto muestra que, puesto que no se leyeron más paréntesis abiertos o cerrados desde la cinta de entrada, el valor de amplitud de oscilación promedio y la frecuencia deben permanecer inalterados.

- 25 Puesto que la frecuencia es distinta de cero y el valor de amplitud de oscilación promedio se encuentra exactamente en el nomograma en la última celda y en ningún punto en el tiempo disminuyó por debajo de la línea del nomograma, esto indica que la cadena de entrada de paréntesis era “lógica”.

El nomograma y la respuesta de la máquina para la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención para la cadena “() ()” se muestran en la figura 6)

- 30 Ejemplo 2 de funcionamiento real: Verificación de la cadena de paréntesis “() ((”

En primer lugar, se escribe la cadena que va a verificarse, de antemano, en la cinta de entrada. Además, se escribe una “E” en esta cinta inmediatamente después del último paréntesis en la cadena. Esto indicará a la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención el final de la cadena.

- 35 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se inicia en el estado (I), en el que se lee el primer paréntesis desde la cinta de entrada. El primer paréntesis es abierto “(”, por tanto, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pasa al estado (Q1). Como resultado, el cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la derecha y el cabezal en la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha.

- 40 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q1). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle \rho \rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Además, se imprime un “1” en la cinta de contador lógico. Además, los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.
- 45

El valor de amplitud de oscilación promedio $\langle \rho \rangle$ y la frecuencia que se escribieron en la cinta de salida, o de manera equivalente, se copiaron de la cinta de localizador, son 1 y 0, respectivamente, puesto que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención sólo ha leído un tipo de símbolo.

- 50 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es un paréntesis cerrado “)”. Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q4). Se imprime un “0” en la cinta de contador lógico, reemplazando el “1” que se imprimió anteriormente. Luego, el cabezal de la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la izquierda, y el cabezal de la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la izquierda.

- 5 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q4). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.
- 10 La frecuencia que se escribió en la cinta de salida, o de manera equivalente, se copió de la cinta de localizador, en este punto, es distinta de cero puesto que ambos tipos de entradas se han leído desde la cinta de entrada. El valor de amplitud de oscilación promedio $\langle\rho\rangle$ se encuentra en el nomograma, puesto que se ha añadido exactamente uno de cada tipo de entrada. Véase la figura 7.
- 15 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es “(”. Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q1). El cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la derecha, y el cabezal en la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha.
- 20 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q1). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención pase al estado (Q3). El par de números de la cinta de localizador se imprime en la celda actual de la cinta de salida. Además, se imprime un “1” en la cinta de contador lógico. Además, los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.
- 25 La frecuencia ha aumentado. El valor de amplitud de oscilación promedio se encuentra por encima del nomograma, puesto que en este punto se han leído más “(” desde la cinta de entrada que “)”.
La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es un paréntesis abierto “(”. Esto hace que la máquina pase al estado (Q1). El cabezal en la cinta de contador lógico se mueve una celda hacia la derecha, y el cabezal en la cinta de localizador se mueve una celda hacia abajo y una celda hacia la derecha.
- 30 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q1). El cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio, $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . Esto hace que la máquina pase al estado (Q3). El conjunto de números de la cinta de localizador se imprime en una celda de la cinta de salida. Además, se imprime un “1” en la cinta de contador lógico. Además, los cabezales tanto de la cinta de entrada como de la cinta de salida se mueven una celda hacia la derecha.
- 35 La frecuencia ha aumentado. El valor de amplitud de oscilación promedio se encuentra incluso más por encima del nomograma, puesto que en este punto se han leído dos “(” de más desde la cinta de entrada.
La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q3). Se lee la siguiente entrada desde la cinta de entrada. En este caso, la entrada es “E”. Esto señala el final de la cadena de paréntesis y hace que la máquina pase al estado (Q5). No se imprime nada en ninguna cinta, ni se mueve ningún cabezal durante la transición al estado (P5).
- 40 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención está en el estado (Q5). El cabezal en la cinta de contador lógico lee el símbolo impreso en la celda en la que se encuentra actualmente, y el cabezal en la cinta de localizador lee, desde la celda en la que se encuentra actualmente, su valor de amplitud de oscilación promedio $\langle\rho\rangle$ y la frecuencia de oscilación, f . El símbolo leído desde la cinta de contador lógico es “1” en este caso. Esto hará que el cabezal de la cinta de salida imprima una “X” en la cinta de salida. Entonces, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se detendrá.
- 45 La frecuencia y el valor de amplitud de oscilación promedio permanecen inalterados ya que no se ha introducido ninguna entrada adicional en el sistema.
- 50 La máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención se ha detenido. La cinta de salida contiene la lista de pares copiados de la cinta de localizador. Sin embargo, en la última celda impresa hay una “X”. Esto indica que la cadena de paréntesis en la cinta de entrada es “ilógica”. Además, el hecho de que se haya leído un “1” desde la cinta de contador lógico indica que la cadena de paréntesis contenía demasiados paréntesis abiertos. Después de procesar toda la cadena, quedaron paréntesis abiertos que no se habían “cancelado” o “hecho coincidir” con paréntesis cerrados.
- 55 El valor de amplitud de oscilación promedio se encuentra por encima del nomograma en la última celda. Esto indica

“(de más en la cadena de entrada. Por tanto, la cadena es “ilógica”.

5 En los ejemplos facilitados anteriormente, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención comprende un reactor que se hace funcionar en un formato semicontinuo, con algunas alimentaciones discretas de las especies químicas primera y segunda que componen la cinta de entrada añadida a
10 pasos de tiempo constantes y sin flujos de salida desde el reactor. En algunas realizaciones, la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención puede modificarse de modo que el reactor funcione como un CSTR, con alimentación y flujo de salida continuos. En este caso, la cadena de entrada que va a computarse se representa como cambios graduales de cualquiera de las dos especies añadidas (es decir, las especies químicas primera y segunda) para representar “(” y “)” a intervalos de tiempo fijos (más largos que el tiempo de residencia en el reactor).

El nomograma y la respuesta de la máquina para la máquina de Turing de funcionamiento químico de las realizaciones de la presente invención para la cadena “(((” se muestran en la figura 7.

REIVINDICACIONES

1. Máquina de Turing de funcionamiento químico basada en una reacción química oscilatoria no lineal que comprende:
 - 5 medios para proporcionar una secuencia de datos para alimentar un reactor que comprende una disolución de reactante que comprende un reactante que puede alcanzar múltiples estados; consistiendo la secuencia de datos en símbolos de un alfabeto de dos símbolos;
 - una fuente de primera especie química para proporcionar una cantidad seleccionada de una primera especie química al reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante, correspondiendo la primera especie química a un primer símbolo en el alfabeto de dos símbolos;
 - 10 una fuente de segunda especie química para proporcionar una cantidad seleccionada de una segunda especie química al reactor que comprende la disolución de reactante que comprende el reactante, correspondiendo la segunda especie química a un segundo símbolo en el alfabeto de dos símbolos;
 - uno o más controladores acoplados para controlar la adición de la primera especie química y la segunda especie química de la fuente de primera especie química y la fuente de segunda especie química en respuesta a dichos medios para proporcionar; y
 - 15 uno o más sensores situados para detectar cambios en el reactante a medida que el controlador controla la fuente de primera especie química y la fuente de segunda especie química para añadir cantidades seleccionadas de la primera especie química y la segunda especie química respectivas al reactor,
 - 20 en la que el controlador recibe señales representativas de la amplitud y frecuencia de las oscilaciones de la reacción química oscilatoria no lineal correspondientes al estado del reactante y correlaciona los estados del reactante en el reactor con un resultado que es una función computada químicamente de la entrada;
 - caracterizado porque la máquina de Turing de funcionamiento químico usa energía química para todas las transiciones de estado de la reacción química y no requiere ninguna intervención mecánica, eléctrica, electrónica ni ninguna otra forma de intervención externa para su funcionamiento.
- 25 2. Máquina de Turing según la reivindicación 1, en la que el uno o más sensores comprenden un sensor redox, un sensor de pH, un sensor de temperatura, un sensor de presión, un sensor UV-Vis o combinaciones de los mismos.
3. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, en la que la primera especie química comprende un agente oxidante y la segunda especie química comprende un agente reductor.
- 30 4. Máquina de Turing según la reivindicación 3, en la que el agente oxidante comprende iones bromato.
5. Máquina de Turing según la reivindicación 3, en la que el agente reductor comprende ácido malónico.
6. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en la que el reactor es un reactor de tanque con agitación continua, un reactor semicontinuo o un reactor discontinuo.
- 35 7. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el sensor comprende un espectrómetro adaptado para detectar de manera periódica cambios de color en la disolución de reactante.
8. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la que la fuente de primera especie química y/o la fuente de segunda especie química comprenden buretas o bombas de jeringa.
9. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en la que el reactante comprende un compuesto que puede alcanzar estados metaestables o un régimen oscilatorio.
- 40 10. Máquina de Turing según la reivindicación 9, en la que el reactante comprende un complejo de metal de transición.
11. Máquina de Turing según la reivindicación 10, en la que el complejo de metal de transición es un complejo de rutenio, un complejo de cerio, un complejo de hierro, un complejo de manganeso o un complejo de cobalto.
- 45 12. Máquina de Turing según la reivindicación 11, en la que el complejo de rutenio es un complejo de tris(bipiridina)rutenio (II).
13. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en la que la entrada comprende una secuencia de paréntesis.
14. Máquina de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, que comprende además una interfaz

entre la salida de la máquina de Turing y el usuario, en la que la interfaz comprende un nomograma.

15. Unidad central de procesamiento de un ordenador químico programable, comprendiendo la unidad central de procesamiento una o más máquinas de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.
- 5 16. Ordenador químico programable que comprende una unidad central de procesamiento que comprende una o más máquinas de Turing según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.
17. Método para hacer funcionar una máquina de Turing de funcionamiento químico basada en una reacción química oscilatoria no lineal, que comprende:
- proporcionar una secuencia de datos para alimentar un reactor;
- 10 proporcionar dicho reactor que comprende una disolución de reactante que comprende un reactante que puede alcanzar múltiples estados;
- proporcionar una entrada a un controlador, acoplado para controlar la adición de una primera especie química y una segunda especie química desde una fuente de primera especie química y una fuente de segunda especie química, en respuesta a la entrada, comprendiendo la entrada una secuencia de datos que consiste en símbolos de un alfabeto de dos símbolos, proporcionando un símbolo una entrada al controlador para añadir la primera especie química y proporcionando otro símbolo una entrada al controlador para añadir la segunda especie química;
- 15 detectar cambios en el reactor a medida que el controlador controla las fuentes de primera especie química y las fuentes de segunda especie química para añadir cantidades seleccionadas de la primera especie química y la segunda especie química respectivas al reactor,
- 20 en el que el controlador recibe señales que son representativas de la amplitud y frecuencia de las oscilaciones de la reacción química oscilatoria no lineal correspondientes a los estados del reactante en el reactor; y
- correlacionar los estados del reactante en el reactor con un resultado que es una función computada químicamente de la entrada;
- 25 caracterizado porque el método para hacer funcionar una máquina de Turing de funcionamiento químico basada en una reacción química oscilatoria no lineal usa energía química para todas las transiciones de estado de la reacción química y no requiere ninguna intervención mecánica, eléctrica, electrónica ni ninguna otra forma de intervención externa para su funcionamiento.
- 30 18. Método para hacer funcionar una máquina de Turing de funcionamiento químico según la reivindicación 17, que comprende además la etapa de comparar el resultado que es una función computada químicamente de la entrada con los resultados de una computación de nomograma usando la interfaz que comprende un nomograma.

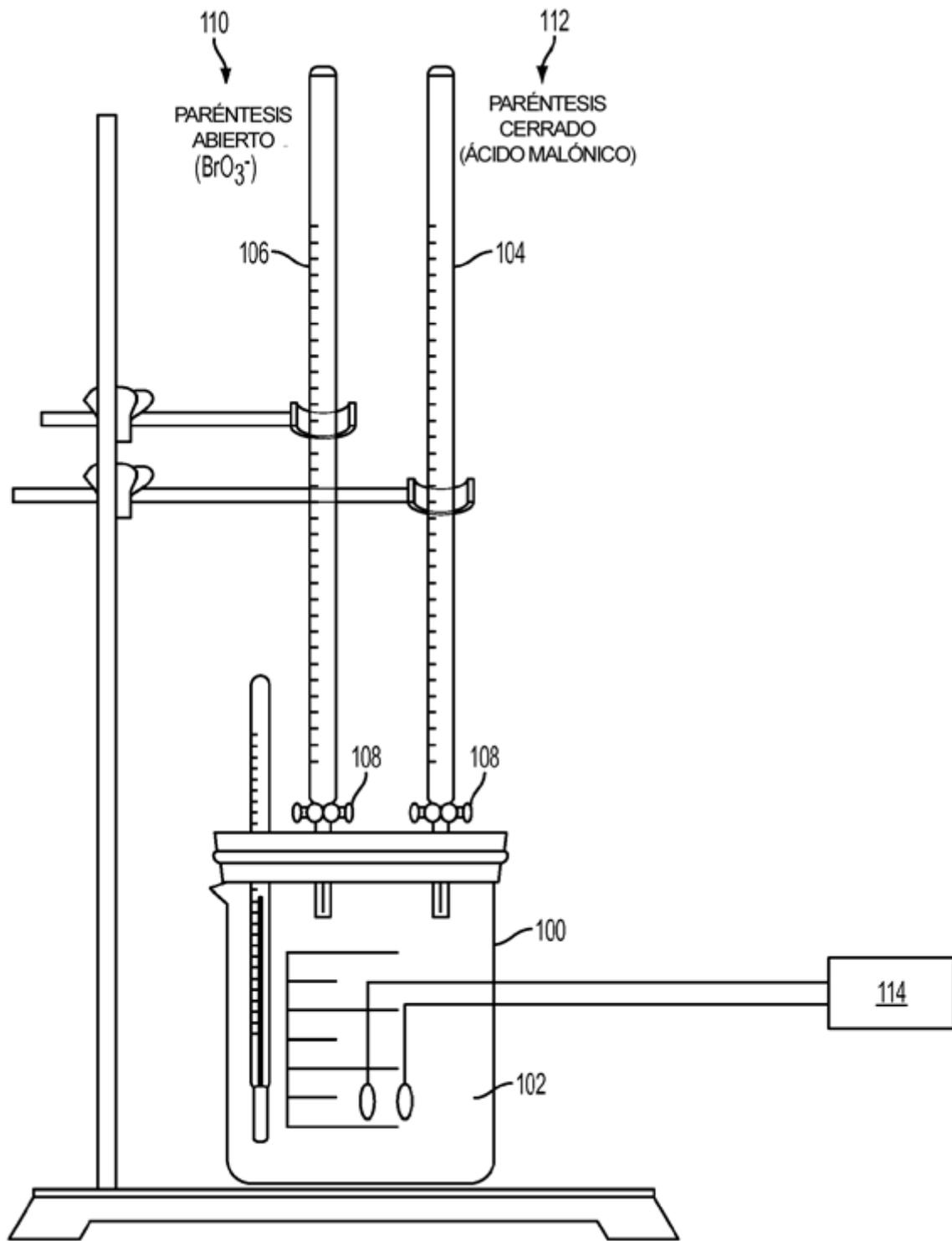


FIG. 1

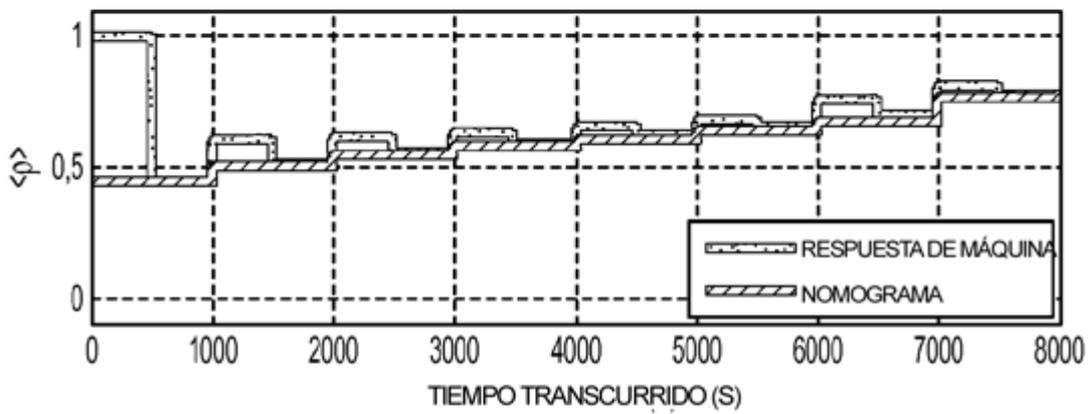
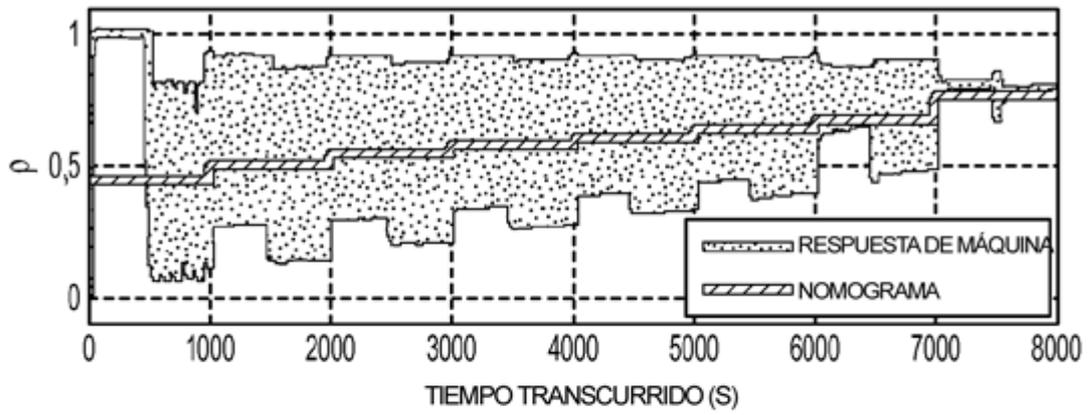


FIG. 2

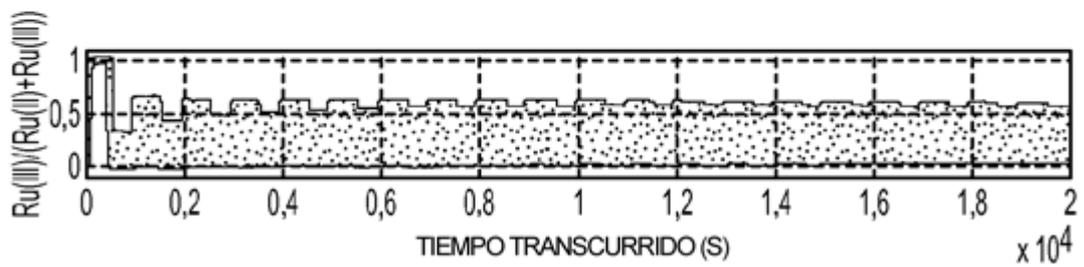


FIG. 3

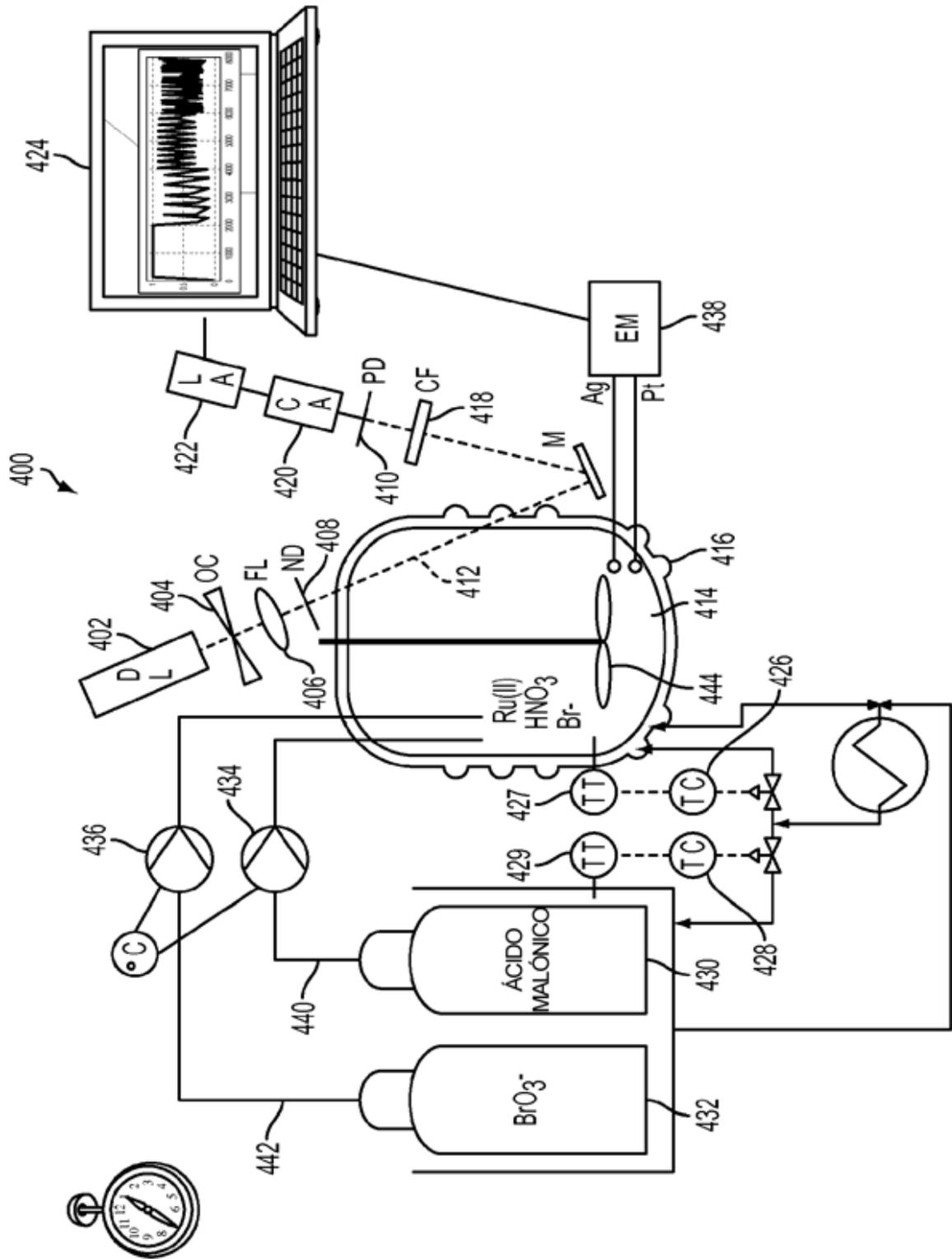


FIG. 4

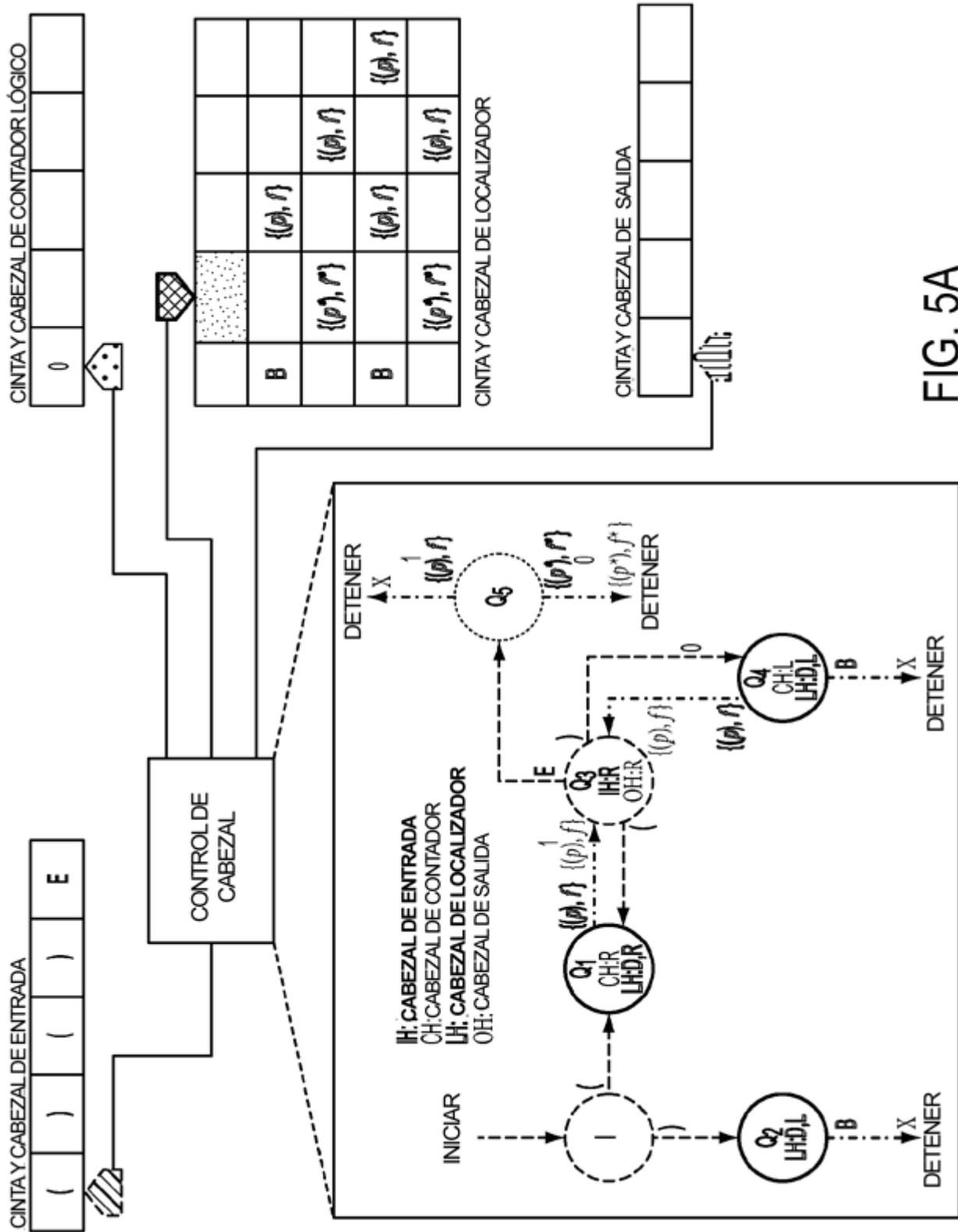


FIG. 5A

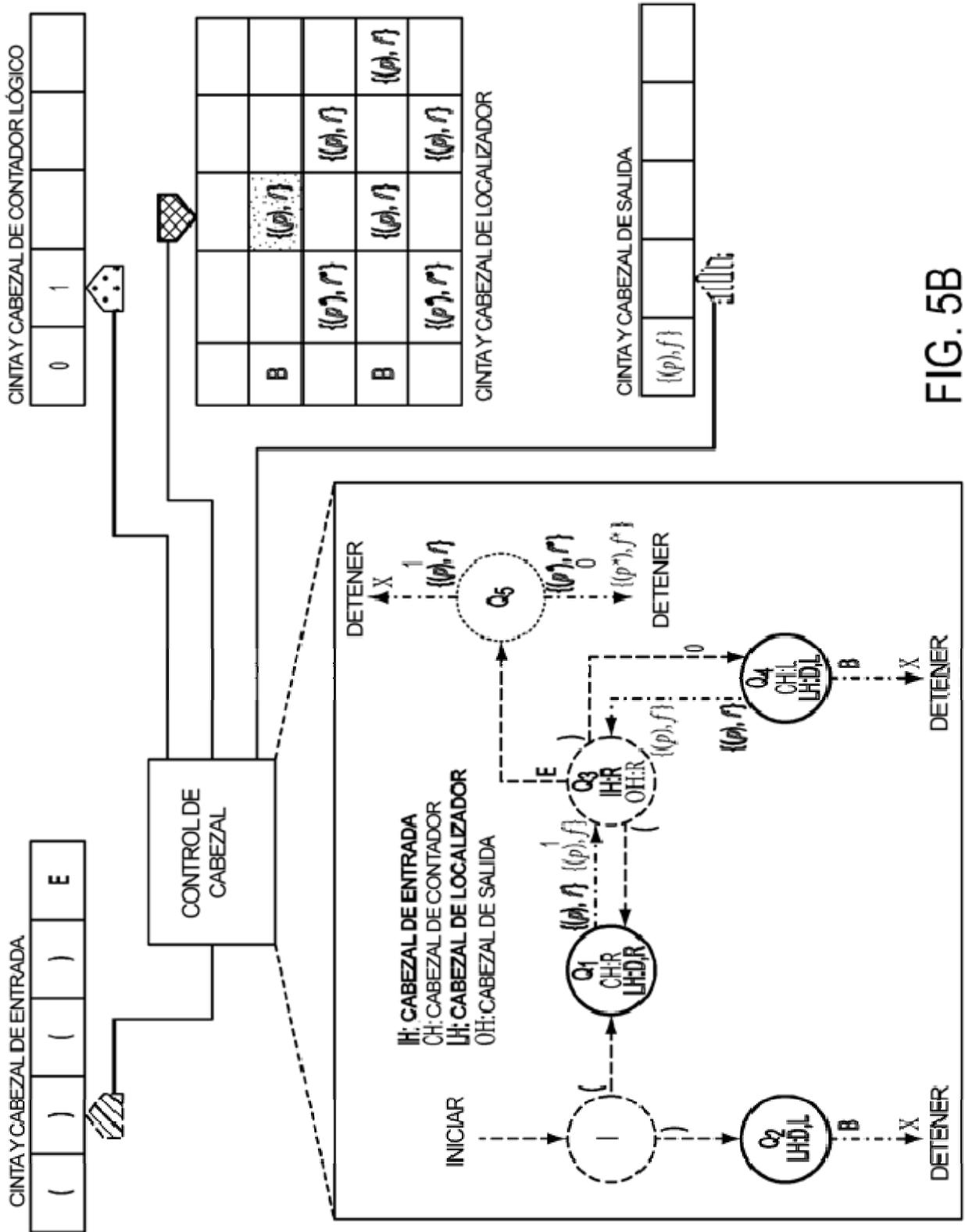


FIG. 5B

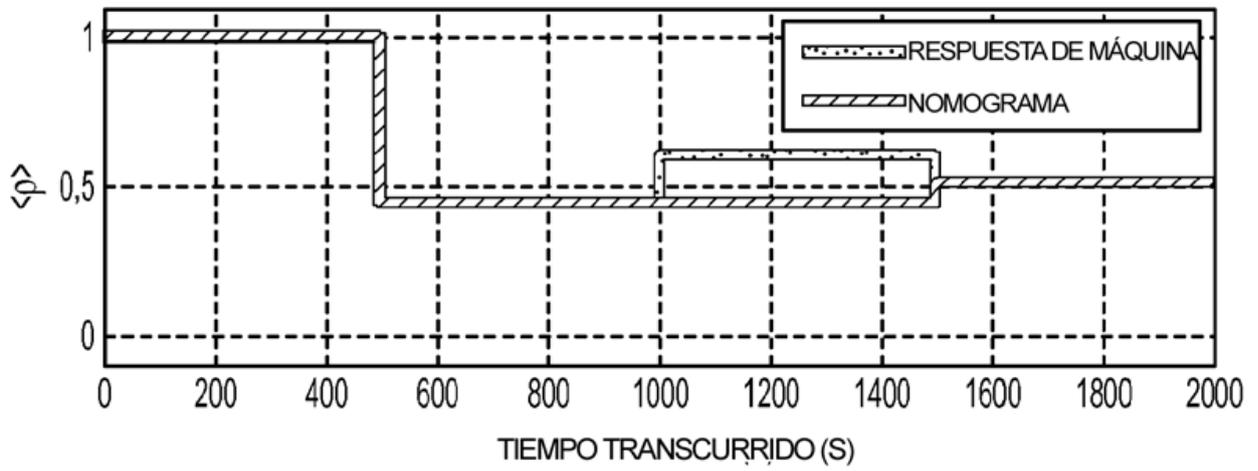
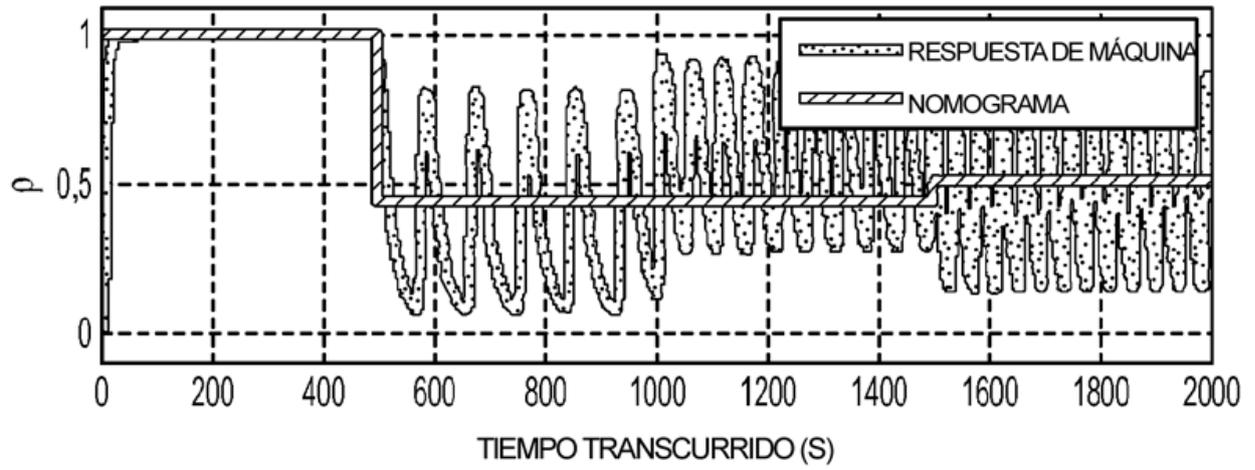


FIG. 6

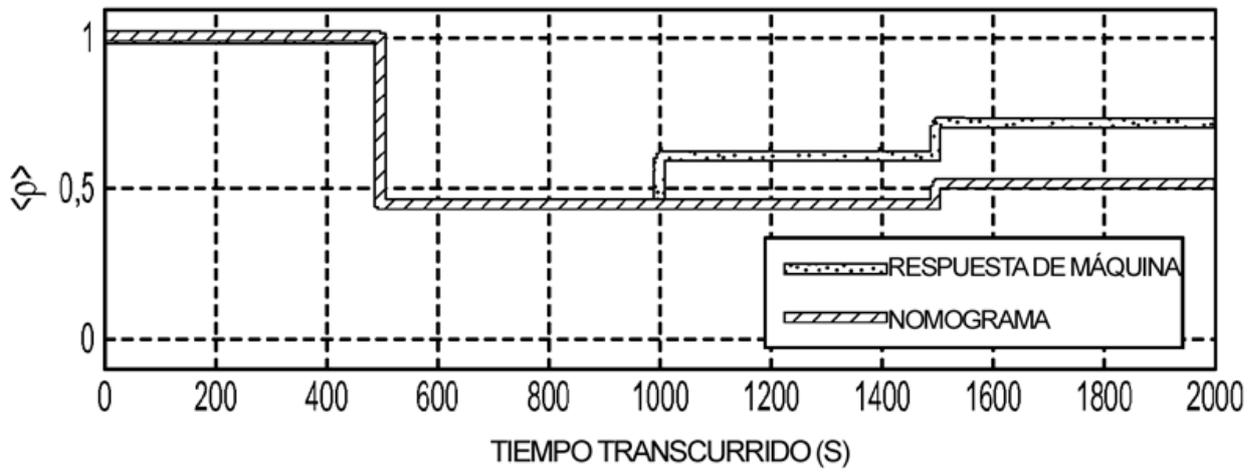
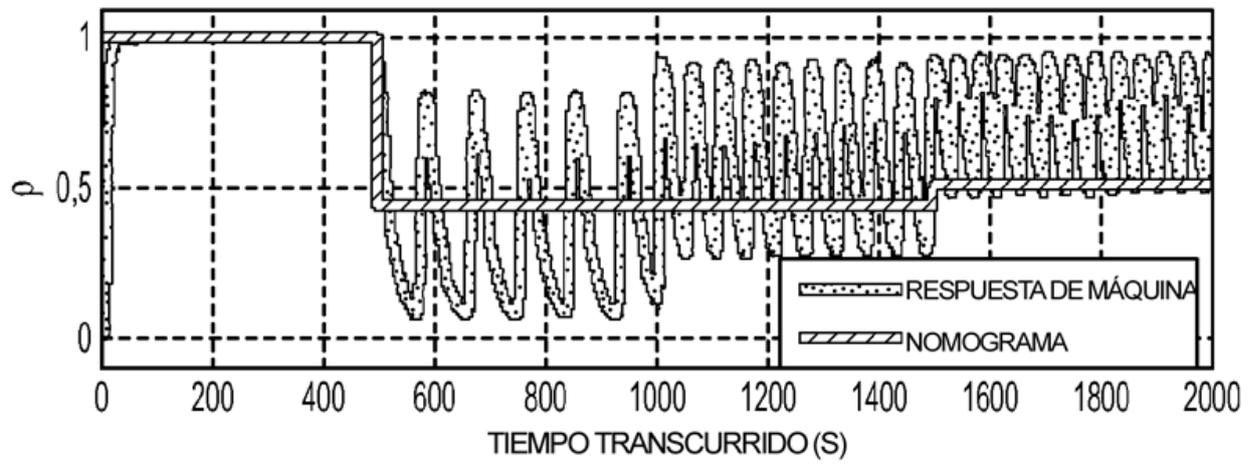


FIG. 7