

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 695 323**

21 Número de solicitud: 201831118

51 Int. Cl.:

G02B 6/43

(2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

19.11.2018

43 Fecha de publicación de la solicitud:

03.01.2019

Fecha de concesión:

08.05.2019

45 Fecha de publicación de la concesión:

16.05.2019

73 Titular/es:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(100.0%)**

**Ctro. Apoyo a la Innovación, la Investigación y la
Transferencia de Tecnología CTT, Edf. 6G,
Camino de Vera, s/n
46022 Valencia (Valencia) ES**

72 Inventor/es:

**CAPMANY FRANCOY, José;
GASULLA MESTRE, Ivana y
PÉREZ LÓPEZ, Daniel**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **MÉTODO DE CONFIGURACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTÓNICOS PROGRAMABLES BASADOS EN ESTRUCTURAS MALLADAS DE GUIAONDAS ÓPTICAS INTEGRADAS**

57 Resumen:

Método de configuración y optimización de dispositivos fotónicos programables basados en estructuras malladas de guíaondas ópticas integradas.

El método objeto de la invención permite llevar a cabo la configuración y optimización de prestaciones escalable para circuitos ópticos programables basados en estructuras malladas, de tal manera que puedan realizar funciones de procesamiento óptico/cuántico de señal. El objeto de la invención se puede aplicar en circuitos con grados de complejidad arbitrarios implementados mediante la programación de una malla de guía de onda. El método objeto de la invención permite llevar a cabo no solo el análisis y evaluación de prestaciones, sino también la posterior programación y optimización de dispositivos ópticos programables.

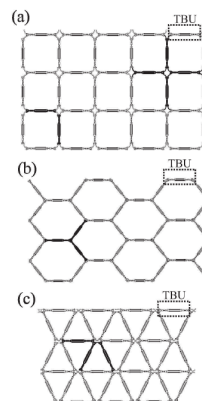


FIG. 1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

ES 2 695 323 B2

DESCRIPCIÓN

MÉTODO DE CONFIGURACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTÓNICOS
PROGRAMABLES BASADOS EN ESTRUCTURAS MALLADAS DE GUIAONDAS
ÓPTICAS INTEGRADAS

5

OBJETO DE LA INVENCION

El objeto de la invención se enmarca en el campo técnico de la física.

10

Más concretamente el objeto de la invención tiene su ámbito en el campo de la fotónica.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15 Existe una amplia literatura en estructuras integradas ópticas programables. Las podemos diferenciar en dos tipos: una primera batería de dispositivos que ofrecen la programación de subsistemas y el acceso a los mismos y una segunda basadas en la discretización completa de todos los subsistemas y sistemas de enrutado en guías de ondas que conforman estructuras malladas. Entre ambos tipos se pueden catalogar las matrices de conmutación
20 óptica.

La fotónica multifuncional programable (PMP) busca el diseño de sistemas ópticos integrados comunes mediante configuraciones de hardware que pueden implementar una amplia variedad de funcionalidades mediante programación. Varios autores han reportado
25 trabajos teóricos proponiendo diferentes configuraciones y principios de diseño basados en la cascada de divisores de haz o Interferómetros *Mach Zehnder* integrados (MZIs).

Una arquitectura más versátil se puede obtener siguiendo principios similares a los de los desarrollos basados en arrays de puertas programables de campo (FPGA) en electrónica
30 dando lugar a los arrays de puertas fotónicas programables (FPPA). El concepto principal es desglosar circuitos complejos en una gran red de unidades de sintonización unitarias idénticas implementadas e interconectadas por medio de una malla o red de guía de onda bidimensional (2D) integrada. De esta manera se pueden obtener diferentes funcionalidades seleccionando el camino adecuado a través de la malla y los desfases locales. Así, una
35 funcionalidad compleja se sintetiza mediante la programación de interferencias ópticas

activando los recursos necesarios dentro de la malla. Las mallas 2D integradas formadas por la replicación de una unidad de sintonización conforman celdas uniformes (cuadrada, hexagonal o triangular) que proporcionan geometrías regulares y periódicas, donde cada lado de la celda básica se implementa mediante dos guías de onda acopladas por una
5 unidad básica sintonizable (TBU) independiente (división de potencia y fase).

Hoy en día, se han demostrado configuraciones con un número reducido de celdas (es decir, hasta siete) que demuestran la capacidad de emular tanto arquitecturas de proceso de señal tradicional como transformaciones de matriz lineales arbitrarias de uso común como
10 base en la mayoría aplicaciones dirigidas a chips fotónicos. Por ejemplo, en información cuántica, soporte de transformaciones $N \times N$ en implementación de puertas lógicas simples y complejas, emulación de circuitos de muestreo de bosones y laboratorios cuántico en un chip (*quantum lab-on-a-chip*).

Las mallas de guía de onda abren el camino para sistemas de información cuántica integrados reconfigurables a gran escala con un potencial para reemplazar los enfoques actuales basados en configuraciones estáticas. En las interconexiones de procesadores informáticos, el interprocesador de banda ancha reconfigurable y las interconexiones informáticas son fundamentales en computación de alto rendimiento y centros de datos. Las
15 transformaciones lineales fotónicas proporcionan una opción limpia, sin diafonía y de alta velocidad para la gestión de recursos del procesador central. En señal óptica el procesamiento y transformaciones lineales que pueden ser compatibles con los procesadores PMN basados en la guía de onda en mallas 2D incluyen varias operaciones que son fundamentales para el procesamiento de la señal óptica, como, por ejemplo: FFT
20 óptica, transformación de Hilbert, integradores y diferenciadores. En neurofotónica, las transformaciones de matriz unitaria ($N \times M$) y no unitaria ($N \times M$) son elementos fundamentales que preceden a las operaciones de umbral no lineal en redes neuronales. La disponibilidad de procesadores PMP abre una vía interesante de investigación en este campo emergente. En biofotónica, los PMP admiten la implementación de sensores con entrada simple y
30 múltiple / salida múltiple (MIMO) que permiten la implementación de estructuras interferométricas para *lab-on-a-chip* capaces de detectar una multiplicidad de parámetros.

Por último, pero no menos importante, en física avanzada, la malla de guía ondas proporciona una plataforma 2D programable para implementar diferentes sistemas
35 topológicos, como estructuras de cavidades de múltiples anillos para apoyar la investigación en dimensiones sintéticas y dispositivos basados en Principios de aislamiento topológico.

La extensión de las mallas de la guía de ondas 2D para dar cuenta de un mayor número de número de TBUs (> 80) es imprescindible para implementar estructuras más complejas y conducen a los circuitos integrados fotónicos de escala grande (LS) o escala muy grande (VLS).

5

La escalabilidad aumenta dramáticamente la cantidad de funcionalidades que se pueden implementar con un hardware determinado. Sin embargo, la escalabilidad de las mallas de guías de onda origina que la configuración y las prestaciones obtenidas de los circuitos programados se vean afectadas por pérdidas excesivas, niveles de interferencias ópticas no deseadas y un aumento en la complejidad de configuración del sistema. La configuración global de la malla apoyada únicamente en un mapeo inicial que asume el comportamiento ideal de las TBU resulta menos fiable a medida que se aumenta el número de TBUs. Además, el funcionamiento deficiente de una única TBU puede ocasionar graves deterioros en el comportamiento global del circuito. Por otro lado, al igual que ocurre con cualquier

10 circuito óptico con elementos no ideales, las prestaciones se reducen por la acumulación de interferencias ópticas no deseadas. Por ejemplo, en el caso práctico de síntesis/emulación de matrices de conmutación, una porción de la señal de salida puede derivarse a puertos no deseados actuando como ruido. El grado de acoplo no deseado depende del grado de interferencia óptica de cada componente (TBU en el caso de mallas de guías de onda). Por

15 el mismo motivo, un mallado de guías de onda emulando dos circuitos al mismo tiempo produce un acoplo indeseado entre ambos. La conexión física entre ambos es evidente y los niveles de interferencia no-deseada pueden de nuevo limitar las prestaciones obtenidas.

20

Para superar estas limitaciones físicas y de diseño se debe disponer de un método de configuración y optimización de prestaciones escalable. Este método es además imprescindible para realizar un mapeo tecnológico óptimo del circuito a emular sobre los recursos hardware ofrecidos por la malla. El núcleo de este método requiere una correcta caracterización espectral representada por la matriz global de dispersión del sistema. Una vez obtenida, diferentes algoritmos de optimización deberían modificar los parámetros de

25 cada TBU para producir la configuración y la mejora de prestaciones deseada mediante la evaluación de la matriz de dispersión. El elevado número de puertos de entrada / salida y las interconexiones internas que permiten la propagación y re-alimentación en múltiples direcciones en la estructura 2D hacen que técnicas de configuración y optimización convencionales no puedan ser utilizadas. De hecho, aquí reside la diferencia entre una pura

30 técnica de análisis matemático de una estructura 2D y el proceso de optimización propuesto.

35

Mientras que en la primera solo es necesario poder caracterizar el efecto que los recursos empleados ejercen sobre la transferencia entre los puertos de entrada y salida de señal útil, en los procedimientos de optimización es necesario tener en cuenta el efecto de TODOS los recursos sobre todas las posibles configuraciones entrada y salida, puesto que la optimización del funcionamiento de la estructura requiere disponer de información acerca de los recursos empleados así como también de los que quedan, en principio, en reposo.

A día de hoy, se tiene constancia de:

10 US2015086203A1 "Method and apparatus for optical node construction using field programmable photonics" y US2018139005A1 donde respectivamente se detalla un aparato para enrutar señales ópticas. No se trata de un procesador de señal programable, si no de un dispositivo para encaminar/amplificar canales de un puerto a otro con la posibilidad de seleccionar la longitud de onda. Estos dispositivos se conocen en el arte como matrices
15 ópticas de conmutación.

US2018234177A1 donde se describe una matriz de circuito integrado programable para pruebas ópticas definido por una estructura fija para testear dispositivos de transmisión/recepción de señal. El mismo puede modificar el tipo de modulación, potencias y
20 velocidades.

WO2016028363A2 donde se detalla un circuito integrado fotónico programable que implementa transformaciones ópticas lineales arbitrarias en el modo espacial con alta fidelidad. Bajo un modelo de fabricación realista, se analizan las implementaciones programadas de la puerta CNOT, la puerta CPHASE, el algoritmo de estimación de fase
25 iterativa, la preparación del estado y los recorridos aleatorios cuánticos. La programabilidad mejora dramáticamente la tolerancia del dispositivo a las imperfecciones de fabricación y permite que un solo dispositivo implemente una amplia gama de experimentos de óptica lineal tanto cuánticos como clásicos. Los resultados sugieren que los procesos de
30 fabricación existentes son suficientes para construir dicho dispositivo en plataformas de fotónica de silicio. Este documento, se puede entender como referido a un dispositivo interferométrico que realiza transformaciones ópticas lineales. Dicho dispositivo únicamente es capaz de realizar combinaciones progresivas de la señal, es decir, la señal no puede recircular ni combinarse en nodos simultáneos o de nivel anterior.

35

WO2004015471A2 donde se hace referencia a un conjunto de bloques funcionales conectados entre sí mediante una matriz óptica de enrutamiento/conmutación. Se detalla un dispositivo cuyos bloques funcionales están físicamente fabricados de manera personalizada antes de ser programados. El usuario elige si accede o no a los mismos mediante la conmutación de circuitos.

Asimismo, se conoce el documento titulado "Reconfigurable lattice mesh designs for programmable photonic processors and universal couplers" de Perez Daniel; Gasulla Ivana; Capmany Jose; Soref Richard A., publicado en 2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), donde se detallan dos geometrías de diseño de malla, la retícula hexagonal y triangular, para la implementación de núcleos ópticos sintonizables en procesadores fotónicos programables y acopladores universales. Se comparan con una topología de malla cuadrada propuesta anteriormente en términos de una serie de cifras de mérito que tienen en cuenta las métricas que son relevantes para la integración en el chip del hallazgo de malla que la malla hexagonal es la opción más adecuada. Y también que el documento titulado "Multipurpose silicon photonics processor core" (<https://www.nature.com/articles/s41467-017-00714-1>) de Perez Daniel; Gasulla Ivana; Capmany Jose et al., publicado en *Nature communications* el 27 de noviembre de 2017, detalla circuitos integrados fotónicos específicos de la aplicación, en los que circuitos / chips particulares están diseñados para realizar funcionalidades particulares de manera óptima. Un enfoque diferente inspirado en las matrices de compuertas programables de campo electrónicas es el procesador fotónico programable, donde un hardware común implementado por una malla de guía de ondas fotónicas bidimensionales realiza diferentes funcionalidades a través de la programación. Se divulgan más de 20 funcionalidades diferentes con una estructura simple de siete celdas hexagonales, que se puede aplicar a diferentes campos, incluidas las comunicaciones, detección química y biomédica, procesamiento de señal, redes multiprocesador y sistemas de información cuántica. Si bien en ambos documentos se hace referencia a las geometrías de malla a la par que se proponen y comparan las arquitecturas físicas y ejemplos simples de configuración. Sin embargo, no se trata ni se propone ningún método para su configuración efectiva, y optimización de prestaciones para mallas con un número arbitrariamente elevado de TBUs. Por ejemplo, analizar analíticamente las mallas presentadas puede resolverse en cuestión de días. Sin embargo, pasar de 4 celdas a 20 hace que su desarrollo analítico con métodos convencionales resulte impracticable. Lo mismo ocurre con su configuración, programación y optimización de los circuitos. Por tanto, es necesario un método aplicable a todo tipo de estructuras malladas.

De manera similar, en el documento titulado “All-optical programmable photonic integrated circuit: An optical analogy to electronic FPGA” de los autores Depeng Mao; Peng Liu; Liang Dong, publicado en 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS 2011); Beijing, China; 5 - 9 June 2011, describe una plataforma fotónica totalmente programable de circuitos integrados programables aprovechando las ventajas de tres técnicas: cristales fotónicos de silicio bidimensionales, dispositivos digitales de microespejo y cristales líquidos foto sensibles. Este documento básicamente propone una plataforma fotónica “programable” de circuitos integrados. Realmente se trata de un dispositivo programado en máscara (con grandes equipos de laboratorio o empresa de fabricación de chips, más que un dispositivo programado en campo (*field-programmed*)). Concretamente se basa en la fotosensibilidad de los componentes para modificar el índice efectivo de las guías de onda y se describe la metodología o mecanismo de sintonización de la plataforma.

15 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

El objeto de la invención es un método de configuración y optimización de prestaciones escalable para circuitos ópticos programables basados en estructuras malladas, de tal manera que puedan realizar funciones de procesamiento óptico/cuántico de señal; en adelante método de la invención o método objeto de la invención.

El método de la invención comprende, en primer lugar, una discretización/segmentación/división de la malla en unidades más pequeñas TBUs o conjunto de TBUs que replicados forman la malla. A continuación, el núcleo del método objeto de la invención requiere una correcta caracterización espectral representada por la matriz de dispersión del sistema, es decir, la respuesta en frecuencia completa (ángulo y fase de todos los puertos de entrada/salida) de estructuras altamente acopladas. Una vez obtenida, diferentes algoritmos de optimización modifican el parámetro o los parámetros de cada TBU para producir la configuración y la mejora de prestaciones deseada; dicho parámetro a optimizar está relacionado con la programación del dispositivo óptico programable, por ejemplo se puede seleccionar de entre el conjunto consistente en: consumo total de potencia, reducción de pérdidas, reducción de interferencias y diafonías, aislamiento entre circuitos y reducción de área empleada. Por ejemplo, se pueden modificar las TBUs inactivas que no forman parte del objetivo principal para reducir las interferencias ópticas y proporcionar una relación señal a ruido óptimas minimizando los valores correspondientes de la matriz del sistema. Además, se puede optimizar parcialmente el

sistema respetando un compromiso entre consumo de potencia total y optimización realizando la optimización únicamente en un subconjunto de TBUs inactivos. La aplicación del método habilita la viabilidad de estructuras fotónicas programables altamente acopladas (malladas), en adelante mallas y como resultado se obtienen ventajas técnicas.

5

Para la obtención de la matriz de dispersión que caracteriza el sistema, el elevado número de puertos de entrada / salida y las interconexiones internas que permiten la propagación y realimentación en múltiples direcciones en la estructura 2D hacen que técnicas de configuración y optimización convencionales no puedan ser utilizadas

10

A modo de explicación descriptiva no limitante aplicando a mallas de topología hexagonal el método objeto de la invención, se tiene una segmentación de mallas de guías de ondas hexagonales 2D en bloques básicos n-1 bloques formados por tres TBU cada uno (en adelante tri-TBU). Una vez segmentado, se obtiene de forma recursiva la matriz de dispersión analítica que define la malla completa en función de la matriz que definía la malla con n-1 tri-TBUs y la matriz de dispersión que define la nueva tri-TBU a incorporar. Como resultado se obtiene la matriz de dispersión analítica de cualquier circuito de malla de guía de onda fotónica integrada compuesta por un número arbitrario de TBUs. A continuación, se modifican los valores de cada TBU y se repite el proceso para conseguir mejoras en las prestaciones deseadas (relativas al funcionamiento de propósito específico o genéricas como reducción de interferencia óptica, consumo de potencia o pérdidas acumuladas en circuitos fotónicos complejos programables.

15

20

25

30

De nuevo, el método de la invención permite diseñar las regiones (TBUs) no utilizadas de la malla de la guía de onda para que puedan emplearse para gestionar contribuciones no deseadas de señales reflejadas y de interferencia y, por lo tanto, optimizar el rendimiento del chip; permitiendo asimismo estudiar todas las respuestas de entrada / salida mientras los parámetros internos de las unidades sintonizables básicas (*tunable basic units* (TBU)) varían, haciendo posible la optimización de errores a través de optimización multiparámetro con la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático para la autocorrección de circuitos.

35

El método propuesto aquí está desarrollado para una malla de guía de onda hexagonal, sin embargo, se puede aplicar a cualquier topología de malla 2D uniforme y no uniforme; el núcleo del método parte de la aplicación de la inducción matemática (IM), que es una técnica que puede emplearse para probar alguna regla o patrón en particular, generalmente

infinito o arbitrariamente grande y se basa en dos pasos, un paso base donde se establece un caso simple y un paso de inducción, que implica mostrar que un ejemplo grande arbitrario se deriva lógicamente de uno ligeramente más pequeño. En términos matemáticos, el principio de inducción establece que para un entero fijo b y para cada entero $n \geq b$, sea $S(n)$ una afirmación que incluya n . Si (i) $S(b)$ es verdadero y (ii) para cualquier entero $k \geq b$, $S(k) \rightarrow S(k + 1)$ entonces para todos $n \geq b$, la declaración $S(n)$ es verdadera. Este principio aparentemente simple oculta, de hecho, una técnica de prueba muy sólida que encuentra aplicaciones en una gran variedad de campos que incluyen probabilidad, geometría, teoría de juegos, teoría de grafos, complejidad de sistemas y sistemas artificiales.

El objeto de la invención permite ser aplicado a la fotónica programable, la cual tiene aplicaciones en innumerables campos, solo por nombrar algunos:

- Fotónica RF: filtros reconfigurables, líneas de retardo de tiempo real sintonizables, cambios de fase, arbitrarios, generadores de forma de onda, ADCs, medición de frecuencia.
- Cuántica: Implementación de transformaciones unitarias generales $N \times N$ que apoyan la operación de puertas lógicas, emulación de circuitos aleatorios y laboratorio cuántico en un chip.
- Telecomunicaciones: Conmutadores, multiplexores de adición / caída, convertidores de modo en Sistemas SDM.
- Interconexiones: Interconexiones reconfigurables de banda ancha e interconexiones informáticas.
- Procesamiento de señales ópticas: FFT ópticos, transformadas de Hilbert, integradores, diferenciadores.
- Neurofotónica: Transformaciones de matriz unitaria ($N \times M$) y no unitaria ($N \times M$) para Redes neuronales, computación de espigas y yacimientos.
- Sensores: Soporte de estructuras interferométricas simples y MIMO para *lab-on-a-chip* y aplicaciones de detección multiparamétrica.
- Física avanzada: Implementación de estructuras de cavidades de anillo múltiple para soportar materiales sintéticos dimensiones.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra diferentes circuitos mallados y opciones de segmentación en TBUs o subconjunto de TBUs. Todos ellos y cualquier circuito que pueda discretizarse en unidades idénticas de sintonización son susceptibles de la aplicación del método presentado. (a) Aplicación en mallas cuadradas, (b) aplicación en mallas hexagonales, (c) aplicación en mallas triangulares.

Figura 2.- Muestra la discretización en TBUs para diferentes topologías de circuitos mallados (a) Uniforme hexagonal, (b) Uniforme cuadrada, (c) Uniforme triangular, (d) Uniforme interferómetro de propagación unidireccional y (e) no uniforme en la que cada TBU puede tener una orientación y un tamaño diferente.

Figura 3.- Muestra el bloque de construcción tri-TBUs para mallas de guías de onda hexagonales 2D y la relación de aumento entre el número de nodos ópticos y puertos ópticos con el número de celdas. (a), tri-TBU compuesto de tres TBU y símbolo asociado, (b), dos tri-TBUs interconectados por el nodo óptico P1, (c) Tres tri-TBUs que crean una celda hexagonal cerrada, (d), ocho tri-TBUs interconectados para obtener una malla de guía de onda formada por cuatro celdas. (e), número de nodos ópticos (ON) y puertos ópticos versus número de celdas cerradas (C) en un circuito fotónico integrado de mall guía de onda IC.

Figura 4.- Muestra de manera ilustrada el método inductivo para obtener la matriz de dispersión $H(n)$ de una malla de guía de ondas 2D hexagonal compuesta de n unidades tri-TBU básicas mediante la adición de una unidad de tri-TBU $H(1)$ a una malla de guía de ondas 2D hexagonal compuesta de $n-1$ unidades de tri-TBU básicas $H(n-1)$ y un diagrama de flujo de señal general para derivar $H(n)$ en función de $h(n-1)$ y $H(1)$. a, Escenario de interconexión 0. b, Escenario de interconexión 1. c, Escenario de interconexión 2. d, Escenario de interconexión 3.

Figura 5.- Muestra de manera ilustrada el escenario 0. (a) Esquema de conexión con malla $n-1$, (b) diagrama de interconexión con la etiqueta contribuciones, (c) secciones resultantes

de la matriz. $S1: x = P - 1$. La contribución directa dentro de los puertos de la red N no está incluida en la gráfica.

Figura 6.- Muestra de manera ilustrada el escenario 1. (a) Esquema de conexión con malla $n - 1$, (b) diagrama de interconexión con la etiqueta contribuciones, (c) secciones resultantes de la matriz. $S1: x = P - 1, y = P$. La contribución directa dentro de los puertos de la red N no está incluida en la gráfica.

Para los grafos que muestran el flujo de señal, las conexiones $N, M, X, Y, F, D, E', F', Q, R, C', D', A', B', S, U, I, J, B, F, hyy, hzz, hxx$ representan rutas de flujo de señal con funciones de transferencia dadas por los coeficientes de la matriz de dispersión $H(n-1)$. Las conexiones $K, L, O, P, A, H, C, E, T, G, V, W$ representan las vías de flujo de señal adicionales que resultan de la tri-TBU adicional.

Figura 7.- Muestra de manera ilustrada el escenario 2. (a) Esquema de conexión con malla $n-1$, (b) diagrama de interconexión con la etiqueta contribuciones, (c) secciones resultantes de la matriz. $x = P - 1, y = P$. Notar que la contribución directa dentro de los puertos de la red N no se incluye en la gráfica.

Figure 8.- Muestra de manera ilustrada el escenario 3. (a) Esquema de conexión con malla $n - 1$, (b) diagrama de interconexión con las contribuciones etiquetadas, (c) secciones de matriz resultantes. $x = P - 2, y = P - 1, z = P$. La contribución directa dentro de los puertos de la red no se incluye en el gráfico.

Figuras 9-11.- Ilustran ejemplos prácticos de uso del método y las ventajas técnicas obtenidas. En el primer caso se ha configurado una estructura que implementa un filtro óptico basado en cavidades interferométricas y se ha evaluado la respuesta del mismo para cada combinación de configuraciones de TBU exploradas. Para el segundo caso (Figura 10), la malla se programa para realizar un circuito óptico complejo formado por 4 cavidades resonantes cargadas en un interferómetro MZI balanceado. La optimización se lleva a cabo para evaluar las prestaciones relacionadas con el filtrado (rango de extinción, pérdidas y rizado en la banda de paso). Para el tercer caso (Figura 11), la malla implementa dos circuitos independientes. El primero está basado en tres cavidades acopladas y el segundo es un filtro de dos muestras de tipo MZI no balanceado. La figura muestra que la aplicación del método propuesto devuelve una mejora en la reducción de interferencias ópticas entre circuitos, mejorando el rendimiento de ambos.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

En un ejemplo de realización preferente del objeto de la invención se parte de una malla de guías de onda 2D formadas a partir de la replicación de un elemento de sintonización básico implementado mediante dos guías de onda acopladas por una unidad básica sintonizable (TBU) independiente (en división de potencia y fase) unidad básica sintonizable (TBU) que se configura mediante elementos de sintonización basados en: MEMS, sintonización termoóptica, sintonización electro-óptica o sintonización optomecánica o electro-capacitiva.

- Esta unidad básica sintonizable (TBU) se puede implementar preferentemente mediante interferómetros de Mach–Zehnder (MZI), balaceados, sintonizables o mediante un acoplador direccional de doble accionamiento y representable mediante una matriz de transmisión de 2×2 H_{TBU} . Dependiendo de la orientación y la interconexión de las TBUs se originan topologías uniformes (cuadradas, hexagonales, triangulares etc.) o no uniformes si cada TBU tiene una longitud y una orientación arbitraria. A continuación, se realiza una segmentación teórica en TBUs o subconjunto de TBUs de la malla objetivo para la aplicación de implementación de la inducción matemática (IM). En el caso de mallas de guía de ondas hexagonales, una opción para el bloque de construcción básico o tri-TBU está formado por tres TBU (A, B y C) conectados en una configuración en Y tal y como se muestra en la Figura 3.a. El conjunto tri-TBU se describe mediante una matriz de dispersión 6×6 calculada a partir de las tres matrices de dispersión H_{TBU} que describen sus respectivos TBU internos. Para ayudar en la ilustración gráfica del método, emplearemos un símbolo de triángulo para representar la tri-TBU, donde cada puerto tiene, en principio, conexiones internas a los cuatro puertos opuestos (es decir, el puerto 1 a los puertos 3,4,5,6, etc.). La tri-TBU puede replicarse y distribuirse N veces para generar cualquier disposición de malla hexagonal deseada de cualquier tamaño. Por ejemplo, las Figuras 3b y 3c muestran el proceso que lleva a la construcción de una sola celda hexagonal compuesta por tres tri-TBU (emplearemos la notación A_i , B_i , C_i para identificar los TBU que componen el tri-TBU i).
- Incluso para la estructura más simple que representa la celda unitaria, ya se tienen doce puertos de entrada / salida y seis nodos auxiliares intermedios necesarios para el cálculo de la matriz de transferencia de 12×12 (es decir, 144 elementos). Con un número creciente de celdas, las cifras anteriores muestran un aumento drástico. Por ejemplo, la estructura de cuatro celdas que se muestra en la figura 3.d, que aún es una estructura de baja complejidad, cuenta con veinte puertos de entrada / salida, treinta y ocho nodos internos y una matriz de dispersión de 20×20 (es decir, 400 elementos). La Figura 3.e proporciona el

número exacto de puertos de entrada / salida y los nodos internos en función del número de celdas hexagonales, y muestra claramente que la derivación analítica de matrices de dispersión para mallas 2D se vuelve aparentemente inabordable incluso para un recuento de células muy bajo.

5

Además, los métodos numéricos para analizar las respuestas de los circuitos, como el FDTD (*finite-difference time domain*) y las soluciones basadas *eigen-mode*, no se escalan bien a medida que aumenta el número de componentes en el circuito fotónico.

- 10 Formalmente el método objeto de la invención se expresa de la siguiente manera, una estructura 2D formada por un tri-TBU se describe por una matriz de dispersión unitaria $H(1)$ con coeficientes conocidos. Luego, si una estructura 2D formada por $n-1 \geq 1$ tri-TBUs se describe mediante una matriz de dispersión unitaria $H(n-1)$ con coeficientes conocidos, la estructura compuesta por n tri-TBUs obtenida de la adición de un tri-TBU adicional $H(1)$ a la
- 15 primera se describe mediante una matriz de dispersión unitaria $H(n)$ con coeficientes conocidos.

- Este método permite la derivación secuencial de la matriz de dispersión de una malla de guía de ondas hexagonal arbitraria de orden n utilizando la matriz de dispersión de la malla
- 20 de orden inferior anterior $H(n-1)$ y la del tri-TBU $H(1)$ recién agregado. Su cálculo final dependerá de cómo se conecte el tri-TBU adicional a la malla de orden inferior anterior. Se pueden identificar cuatro escenarios de interconexión diferentes, como se muestra en la figura 2a, 4.a a 4.d, dependiendo de la cantidad de puertos que están interconectados y la cantidad de nuevas celdas hexagonales completas que aparecen después de la
- 25 incorporación de la nueva tri-TBU.

- En un primer escenario, escenario 0, referido al caso más simple que representa el punto de partida del diseño de una nueva malla, se tiene que sólo uno de los 6 puertos que definen la trama triple es conectado a los puertos de la malla anterior la adición del nuevo tri-TBU
- 30 aumenta el número de puertos de malla en 4, incrementando el número de filas y columnas en la matriz de dispersión, de manera correspondiente.

En un segundo escenario, escenario 1, la adición de la nueva tri-TBU aumenta el número de puertos de malla en 2, pero el número de celdas hexagonales completas no aumenta.

35

En un tercer escenario, escenario 2, la adición del nuevo tri-TBU aumenta el número de puertos en 2 y el número de celdas completas en 1.

5 En un cuarto escenario, escenario 3, la adición de la nueva red de tres celosías no aumenta el número de puertos, ya que conecta 3 puertos a la malla anterior y el número de celdas completas se incrementa en 1.

La Figuras 5-8 ilustran para cada escenario el diagrama de flujo de señal más general que se debe tener en cuenta para derivar la matriz de dispersión global $H(n)$ en función de $H(n-1)$ y $H(1)$. Los nodos s, r mostrados en el lado izquierdo representan cualquier par de puertos de entrada y salida respectivamente (los rangos de variación permitidos para s, r también se muestran según el escenario, donde P es el conteo de puertos de entrada / salida de $H(n-1)$ antes de la conexión del tri-TBU adicional). Los nodos x, y, z identifican los puertos de entrada/salida de $H(n-1)$ que se emplean para conectar esta malla al tri-TBU recién agregado (los valores permitidos para x, y, z también se muestran en función del escenario). En las Figura 5-8 las conexiones

$$N, M, X, Y, F, D, E', F', Q, R, C', D', A', B', S, U, I, J, B, F, hyy, hzz, hxx$$

representan rutas de flujo de señal con funciones de transferencia dadas por los coeficientes de la matriz de dispersión $H(n-1)$. Mientras que las conexiones $K, L, O, P, A, H, C, E, T, G, V, W$ representan las vías de flujo de señal adicionales que resultan de la tri-TBU adicional. Las funciones de transferencia (coeficientes de matriz adicionales) para estas conexiones deben calcularse para obtener la matriz de dispersión global $H(n)$.

Para poder llevar a cabo las citadas derivadas se hace uso de los cuatro escenarios antes descritos, de esta manera se tiene que:

25

En el escenario 0 solo uno de los 6 puertos de la nueva tri-TBU ($Latt N$) que se añade a $H(n-1)$ está conectado a la malla de orden $n-1$. Como se muestra en la Figura 4.a, la adición de la una tri-TBU ($Latt N$) aumenta el número de puertos de malla en 4, y correspondientemente, el número de filas y columnas en la matriz de dispersión $H(n)$. El diagrama de interconexión, que se muestra en la Figura 5b, ilustra las posibilidades de flujo de señal dentro de la malla de orden $n-1$ y entre esta malla y la nueva tri-TBU agregada a través del nodo de interfaz $x = P$. Este esquema de interconexión define un sistema de ecuaciones asociadas al nodo x que se puede resolver, dando lugar a las siguientes

ecuaciones (ec. 1) que proporcionan los coeficientes de matriz que caracterizan los nuevos puertos de malla de la guía de ondas:

$$\begin{aligned}
 &\text{Submatrix 1} && h_{s,r} = X = h_{s,r}^{N-1}. \\
 &\text{coefficients:} && \\
 &\text{Submatrix 2} && h_{s,(P,\dots,P+4)}^N = GB' \\
 &\text{coefficients:} && \\
 &\text{Submatrix 3} && h_{(P,\dots,P+4),r}^N = TS, \\
 &\text{coefficients:} && \\
 &\text{Submatrix 4} && h_{(P,\dots,P+4),(P,\dots,P+4)}^N = Th_{xx}G + IntCon, \\
 &\text{coefficients:} &&
 \end{aligned} \tag{1}$$

- 5 donde *IntCon* representa las conexiones internas dadas por la matriz de dispersión de la celda unitaria adicional de triple trama *latt n*.

Escenario 1: aquí, la adición del nueva tri-TBU *latt n* aumenta el número de puertos de malla en dos pero el número de células hexagonales completas no aumenta, como se muestra en la Figura 6.a. Figuras 6.b. y 6.c donde se ilustra el diagrama de interconexión asociado a resolver y la matriz resultante para la malla de orden *n* respectivamente. En este caso, las ecuaciones resultantes son más complejas ya que se requieren dos nodos de interfaz ($x = P - 1$ e $y = P$). Resolviendo el sistema de ecuaciones relacionadas con los nodos $x = P - 1$ e $y = P$ se consigue que las ecuaciones (Ec.2) proporcionen los coeficientes de la matriz que caracterizan los nuevos puertos de la malla de la guía de ondas y las cuatro submatrices:

$$\begin{aligned}
 \text{SM1} &&& h_{s,r} = X = h_{s,r}^{N-1}, \\
 \text{SM2} &&& h_{s,(P-1,\dots,P+2)} = B'G + DP, \\
 \text{SM3} &&& h_{(P-1,\dots,P+2),r} = OE' + TS, \\
 \text{SM4} &&& h_{(P-1,\dots,P+2),(P-1,\dots,P+2)} = T(h_{xx}G + PM) + \\
 &&& O(h_{yy}P + GN).
 \end{aligned} \tag{2}$$

- 20 En el escenario 2 la adición de la nueva tri-TBU aumenta el número de puertos en dos y el número de celdas hexagonales completas por uno, tal y como se muestra en la Figura 7.a. En este caso, el diagrama de flujo de la señal se muestra la figura 7.b donde se incluye la

posibilidad de recirculación entre los nodos de interfaz $x = P - 1$ e $y = P$ y la unidad tri-TBU recién agregada $latt n$ como se muestra en las conexiones V, W . El procedimiento es similar a los dos escenarios 0 y 1 anteriores resolviendo el sistema de ecuaciones asociadas a los nodos y, x ; de esta manera, resolviendo el sistema de ecuaciones relacionadas con los

5 nodos $x = P - 1$ e $y = P$ se obtienen las ecuaciones (Ec. 3) que proporcionan los coeficientes de la matriz de dispersión que caracterizan los nuevos puertos de malla de la guía de ondas y las cuatro submatrices:

10

$$\begin{aligned}
 \text{SM1} \quad h_{s,r} &= X + \left[\frac{DW[h_{xx}^{(N-1)}VE' + (1-VN)S] + B'V[h_{yy}^{(N-1)}WS + (1-MW)E']}{(1-VN)(1-MW) - h_{xx}^{(N-1)}h_{yy}^{(N-1)}VW} \right], \\
 \text{SM2} \quad h_{s,(P-1,\dots,P+2)} &= UG + F'P + \left(\frac{F'W[h_{xx}^{(N-1)}(G + VPh_{yy}^{(N-1)}) + (1-VN)MP] + UV[h_{yy}^{(N-1)}(P + WGH_{xx}^{(N-1)}) + (1-MW)NG]}{(1-VN)(1-MW) - h_{xx}^{(N-1)}h_{yy}^{(N-1)}VW} \right), \\
 \text{SM3} \quad h_{(P-1,\dots,P+2),r} &= \frac{\left(O[h_{yy}^{(N-1)}WS + (1-MW)E'] + T[h_{xx}^{(N-1)}VF + (1-NV)S] \right)}{(1-VN)(1-MW) - h_{xx}^{(N-1)}h_{yy}^{(N-1)}VW}, \\
 \text{SM4} \quad h_{(P-1,\dots,P+2),(P-1,\dots,P+2)} &= \left(\frac{O[h_{yy}^{(N-1)}P + h_{yy}^{(N-1)}Wh_{xx}^{(N-1)}G + (1-MW)NG] + T[h_{xx}^{(N-1)}G + h_{yy}^{(N-1)}Vh_{xx}^{(N-1)}P + (1-VN)MP]}{(1-VN)(1-MW) - h_{xx}^{(N-1)}h_{yy}^{(N-1)}VW} \right) \\
 &+ IntCont.
 \end{aligned} \tag{3}$$

En el tercer escenario, tal y como se muestra en la figura 8.a, la adición de la nueva tri-TBU no aumenta el número de puertos, ya que conecta tres puertos a la malla anterior y el número de celdas completas es aumentado en uno. Aquí, el diagrama de interconexión

15 involucra tres nodos de interfaz x, y, z , (representados en Figura 8b). El procedimiento para obtener los coeficientes de las diferentes submatrices es similar a los tres escenarios anteriores, pero con más complicación dada la complejidad del resultado de la adición lo cual conduce a:

$$\begin{aligned} \xi_2 &= C(MK + H_{xx}E) + L(NE + H_{yy}K), \\ \xi_1 &= 1 - FE - IK - H_{zz}\xi_2, \\ z_1 &= \frac{\left(C'(1 - BC - JL) + \right.}{\left(SC + E'L \right) H_{zz}} \frac{\left. \right)}{\left(\xi_1(1 - BC - JL) - \right.} \frac{\left. \right)}{(BC + JL)H_{zz}\xi_2}, \\ z_4 &= \frac{(CS + LE' + \xi_2 z_1)}{(1 - CB - LJ)}, \end{aligned}$$

SM1

$$h_{s,r} = X + (DK + B'E)z_1 + Rz_4.$$

$$\begin{aligned} \xi_2 &= C(MK + H_{xx}E) + L(NE + H_{yy}K), \\ \xi_1 &= 1 - FE - IK - H_{zz}\xi_2, \end{aligned}$$

$$z_1 = \frac{\left((1 - BC - JL)(IP + FG) + \right.}{H_{zz} \left(H + CH_{xx}G + CMP \right)} \frac{\left. \right)}{\left(\xi_1(1 - BC - JL) - \right.} \frac{\left. \right)}{(BC + JL)H_{zz}\xi_2},$$

SM2

$$z_4 = \frac{\left(H + CH_{xx}G + CMP + LH_{yy}P + \right.}{LNG + z_1\xi_2} \frac{\left. \right)}{(1 - BC - JL)},$$

$$h_{s,(P-1,\dots,P+2)} = D(P + Kz_1) + Rz_4 + B'(G + Ez_1).$$

$$\begin{aligned} \chi_1 &= NE + H_{yy}K, \\ \chi_2 &= MK + H_{xx}E, \\ \chi_3 &= 1 - IK - FE, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (1 - BC)\chi_1 + JC\chi_2, \\ \alpha_2 &= (1 - BC)\chi_3 - CH_{zz}\chi_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= (1 - BC)E' + JCS, \\ \beta_2 &= -(1 - BC)C' - CH_{zz}S, \end{aligned}$$

SM3

:

$$z_5 = \frac{(1 - BC - JL)\beta_2 - H_{zz}L\beta_1}{(H_{zz}L\alpha_1 - (1 - BC - JL)\alpha_2)},$$

$$y_3 = \frac{\beta_1 + \alpha_1 z_5}{(1 - BC - JL)},$$

$$x_3 = (S + B L y_3 + \chi_2 z_5) / (1 - BC),$$

$$h_{(P-1,\dots,P+2)r} = Oy_3 + Az_5 + Tx_3.$$

$$\begin{aligned}\chi_1 &= NE + H_{yy}K, \\ \chi_2 &= MK + H_{xx}E, \\ \chi_3 &= 1 - IK - FE,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -\chi_2(H_{yy}P + JH + NG) + \dots \\ &\quad \chi_1(H_{xx}G + BH + MP),\end{aligned}$$

$$\alpha_2 = (1 - BC)\chi_1 + JC\chi_2,$$

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= -\chi_3(H_{xx}G + BH + MP) - \dots \\ &\quad \chi_2(H_{zz}H + IP + FG),\end{aligned}$$

$$\alpha_4 = \chi_2CH_{zz} - \chi_3(1 - BC),$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= (1 - JL)\chi_2 + BL\chi_1, \\ \beta_2 &= \chi_3BL + \chi_2H_{zz}L,\end{aligned}$$

SM4

$$y_3 = (\alpha_3\alpha_2 - \alpha_1\alpha_4) / (\alpha_4\beta_1 + \alpha_2\beta_2),$$

$$x_3 = (-y_3 \cdot \beta_2 + \alpha_3) / \alpha_4,$$

$$z_5 = \begin{pmatrix} y_3(1 - JL) \\ -H_{yy}P - JH - JCx_3 - NG \end{pmatrix} / \chi_1,$$

or

$$z_5 = \begin{pmatrix} H_{zz}H + IP + FG + \\ H_{zz}Cx_3 + H_{zz}Ly_3 \end{pmatrix} / \chi_3,$$

$$\begin{aligned}h_{\{P-1, \dots, P+2\} \{P-1, \dots, P+2\}} &= \\ &= Oy_3 + Az_5 + Tx_3 + IntCont.\end{aligned}$$

Esto completa el conjunto completo de expresiones analíticas que permiten implementar el núcleo del algoritmo encargado de la evaluación de la matriz de dispersión que define el sistema dados los valores de cada TBU. A continuación, se emplea de forma recursiva el núcleo del método para configurar y para optimizar las prestaciones de la malla.

5

A modo de ejemplo de implementación se aporta en este documento una serie resultados experimentales que refuerzan las aseveraciones anteriores en cuanto a la flexibilidad y las ventajas del objeto de la invención.

- 10 De esta manera se tiene que el método de la invención se aplica para configurar, optimizar y evaluar circuitos de diferentes grados de complejidad implementados mediante la programación de una malla de guía de onda de 40 entradas / 40 salidas. Esto implica el cálculo de $40 \times 40 = 1600$ coeficientes de matriz sujetos a condiciones variables impuestas por la gran cantidad de posibles combinaciones de configuración individual de los
- 15 parámetros de cada TBU. Además, para cada longitud de onda, el método objeto de la invención permite evaluar la matriz 40×40 en unos pocos segundos para cada iteración del proceso de optimización / configuración.

REIVINDICACIONES

1.-Método de configuración y optimización de dispositivos ópticos programables basados en estructuras ópticas malladas, siendo una estructura óptica mallada una estructura altamente acoplada definida por al menos tres o más unidades básicas sintonizables (TBU) implementadas mediante dos guías de onda acopladas proporcionando valores independientes de división de potencia y fase; estando el método caracterizado por que comprende:

- a. segmentación de una malla completa en unidades básicas sintonizables (TBUs) o subconjuntos de las unidades básicas sintonizables (TBUs) en una configuración inicial,
- b. determinar la respuesta en frecuencia completa con las unidades básicas sintonizables (TBUs) en una configuración inicial, donde dicha respuesta completa comprende amplitud y fase de los puertos de entrada/salida de la malla de guías de onda 2D,
- c. calcular al menos un parámetro de la malla de guías de onda 2D partir del resultado del paso anterior, y
- d. modificar la configuración de al menos una unidad básica sintonizable (TBU) en base al parámetro calculado en el paso anterior.

2.- Método según reivindicación 1 donde la respuesta en frecuencia de la malla completa se obtiene mediante la aplicación de un método inductivo en el que la matriz resultante se obtiene mediante la matriz que define una malla formada por $n-1$ subconjuntos de unidades básicas sintonizables (TBUs) y la matriz que define un subconjunto adicional que se encuentra conectado a la malla formada por $n-1$ subconjuntos de unidades básicas sintonizables (TBUs).

3.- Método según reivindicación 1 donde la evaluación y la modificación de las unidades básicas sintonizables (TBUs) se lleva a cabo mediante algoritmos recursivos.

4.- Método según reivindicación 3 donde los algoritmos recursivos comprenden:

- a. seleccionar los elementos que conforman el circuito principal a programar,
- b. seleccionar un subconjunto de unidades básicas sintonizables (TBUs) colindantes al circuito a emplear y modificar su configuración,
- c. realizar la evaluación de la malla completa del sistema que define la malla óptica programable 2D,

- d. comprobar el estado del parámetro a optimizar,
- e. calcular el cambio en la configuración de cada unidad básica sintonizable (TBU) no presente en el circuito principal, y
- f. repetir los pasos b-e recursivamente hasta alcanzar la optimización deseada.

5

5.- Método según reivindicación 2 donde el número de puertos a conectar y el número de cavidades nuevas originadas tras la interconexión de cada nuevo subconjunto de unidades básicas sintonizables (TBUs) define un escenario de interconexión distinto seleccionado de entre:

10

- a. un escenario 0 se define por la interconexión en un único puerto,
- b. un escenario 1 se define por la interconexión de dos puertos y ninguna nueva cavidad,
- c. un escenario 2 se define por la interconexión de dos puertos y el origen de una nueva cavidad, y
- un escenario 3 se define por la interconexión de tres puertos y el origen de una nueva cavidad.

15

6.- Método según reivindicación 1 caracterizado por adicionalmente utilizar para optimizar el circuito principal aquellas unidades básicas sintonizables (TBUs) que no componen el circuito principal mediante repetición de la aplicación del método descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3.

20

7.- Método según reivindicación 1 donde la etapa de evaluación global del circuito programable combine la evaluación analítica con la monitorización experimental de la señal óptica en un subconjunto de los puertos de salida o puntos internos del circuito.

25

8.- Método según reivindicación 1 donde la unidad básica sintonizable (TBU) es un interferómetro no resonante de tipo Mach-Zehnder (MZI).

30

9.- Método según reivindicación 4 donde el interferómetro de Mach-Zehnder (MZI) es balanceado, es decir, donde ambos brazos que conforman el interferómetro son iguales con pérdidas de 3 dB.

35

10.- Método según reivindicación 1 donde la unidad básica sintonizable (TBU) es un acoplador direccional de doble accionamiento.

11.- Método según reivindicación 1 donde la unidad básica sintonizable (TBU) es un interferómetro resonante.

12.- Método según reivindicación 1 donde la unidad básica sintonizable (TBU) tiene un
5 número arbitrario de puertos.

13.- Método según reivindicación 1 donde la unidad básica sintonizable (TBU) se configura mediante elementos de sintonización basados en: MEMS, sintonización termoóptica, sintonización electro-óptica, sintonización optomecánica o electro-capacitiva.

10

14.- Método según reivindicación 1 en el que los subconjuntos de unidades básicas sintonizable (TBU) formen topologías uniformes de circuitos ópticos programables 2D.

15.- Método según reivindicación 1 en el que los subconjuntos de unidades básicas
15 sintonizable (TBU) forman topologías no-uniformes de circuitos ópticos programables 2D.

16.- Método según reivindicación 1 donde el parámetro a calcular y optimizar está relacionado con la programación del dispositivo óptico programable.

20 17.- Método según reivindicación 16 donde el parámetro a calcular y optimizar se selecciona de entre el conjunto consistente en: consumo total de potencia, reducción de pérdidas, reducción de interferencias y diafonías, aislamiento entre circuitos y reducción de área empleada.

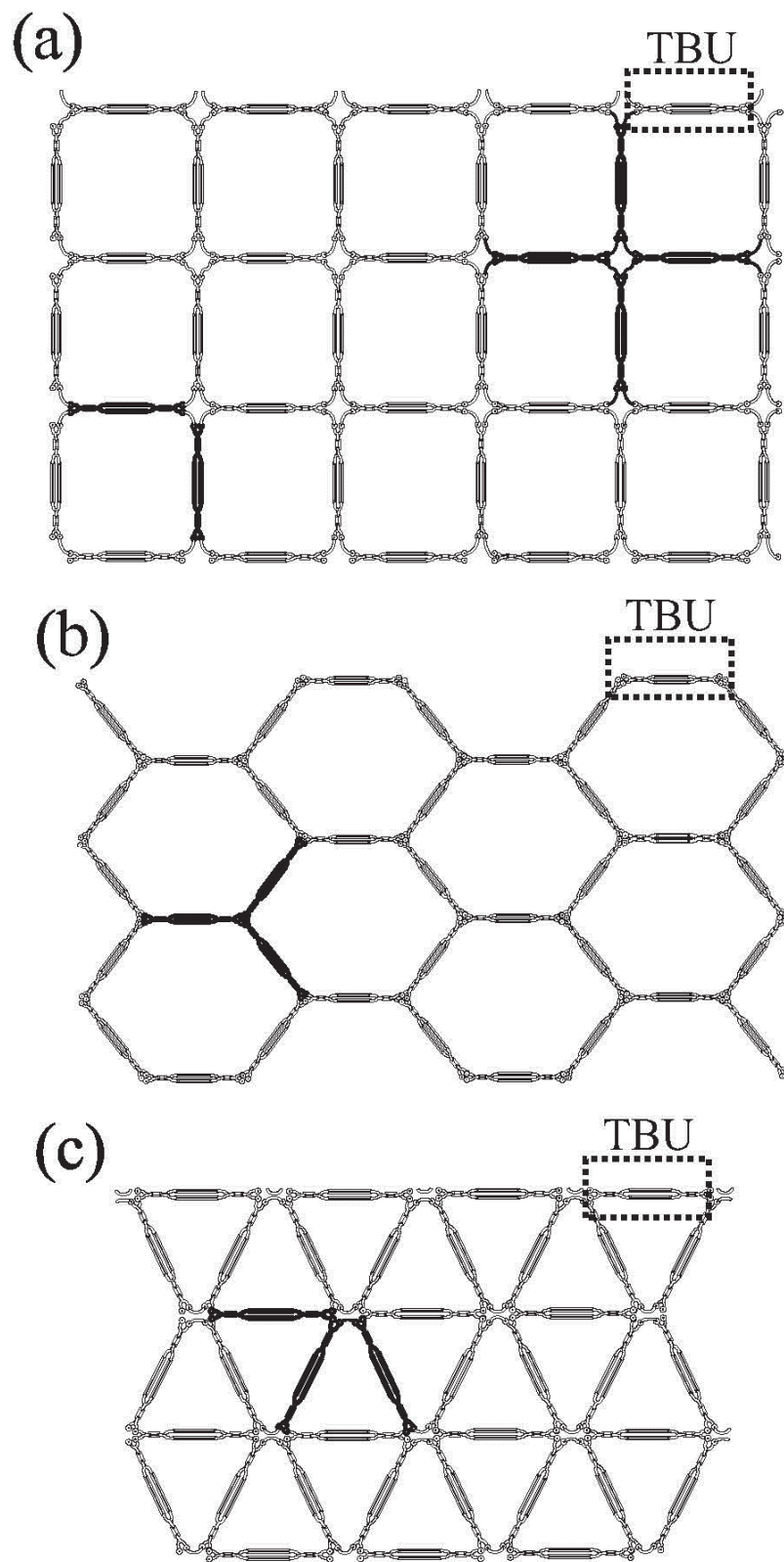


FIG. 1

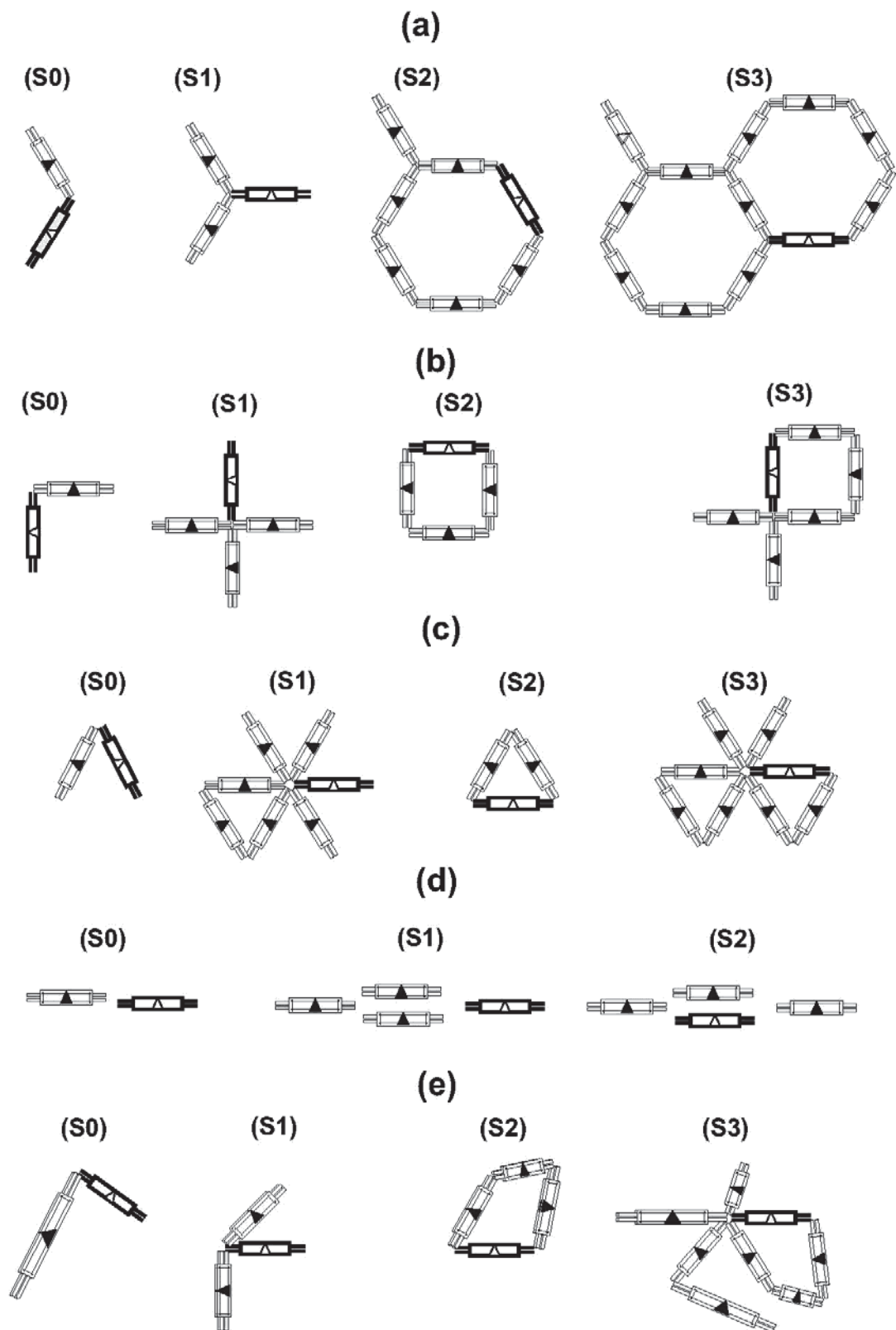


FIG. 2

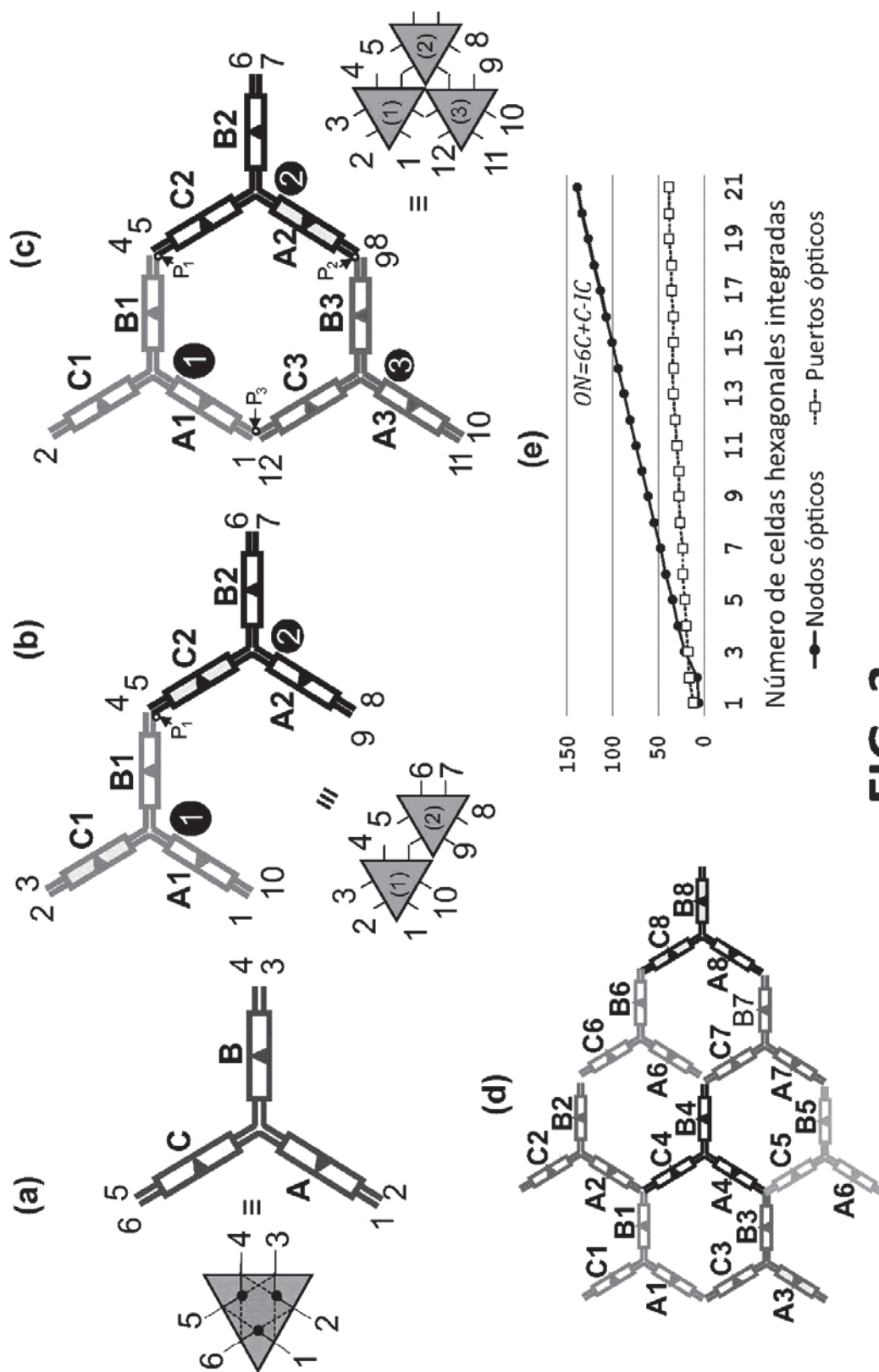
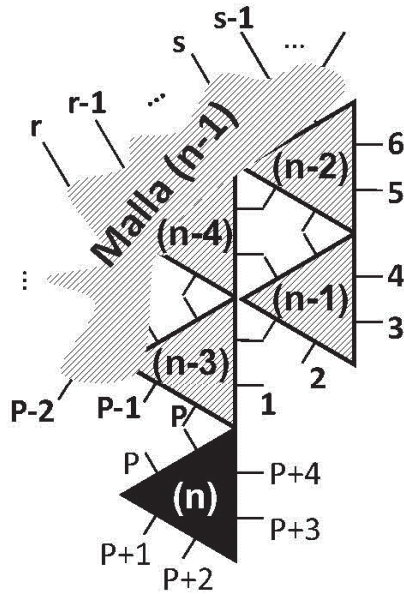
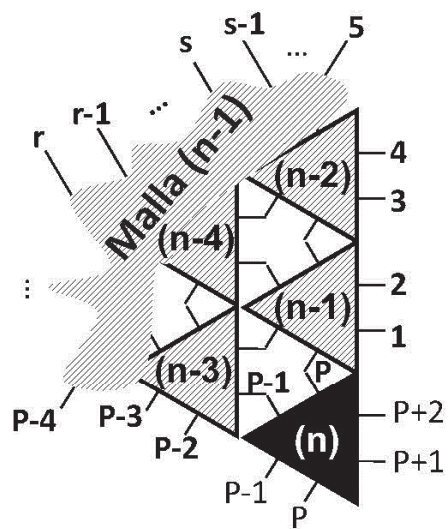


FIG. 3

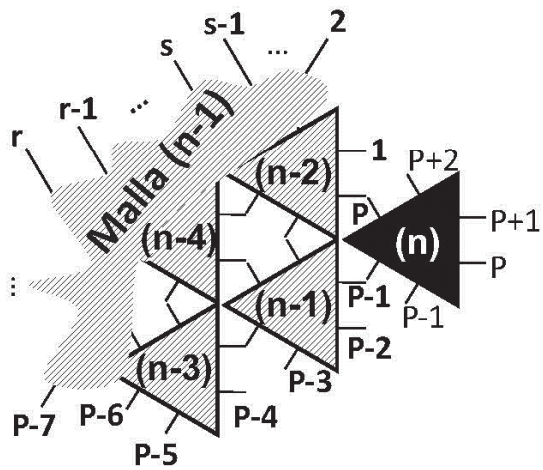
(a) Escenario 0, (S0)



(b) Escenario 1, (S1)



(c) Escenario 2, (S2)



(d) Escenario 3, (S3)

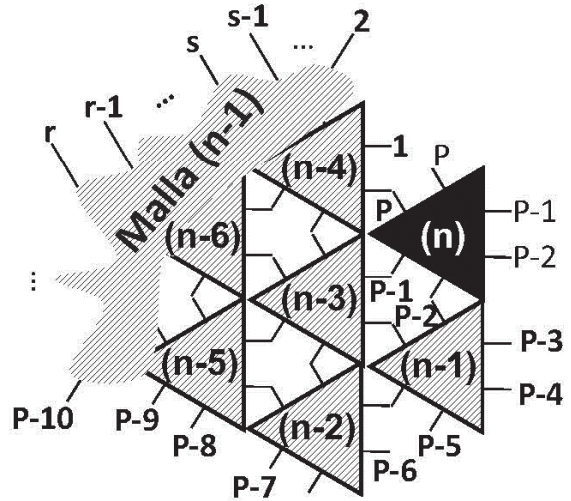


FIG. 4

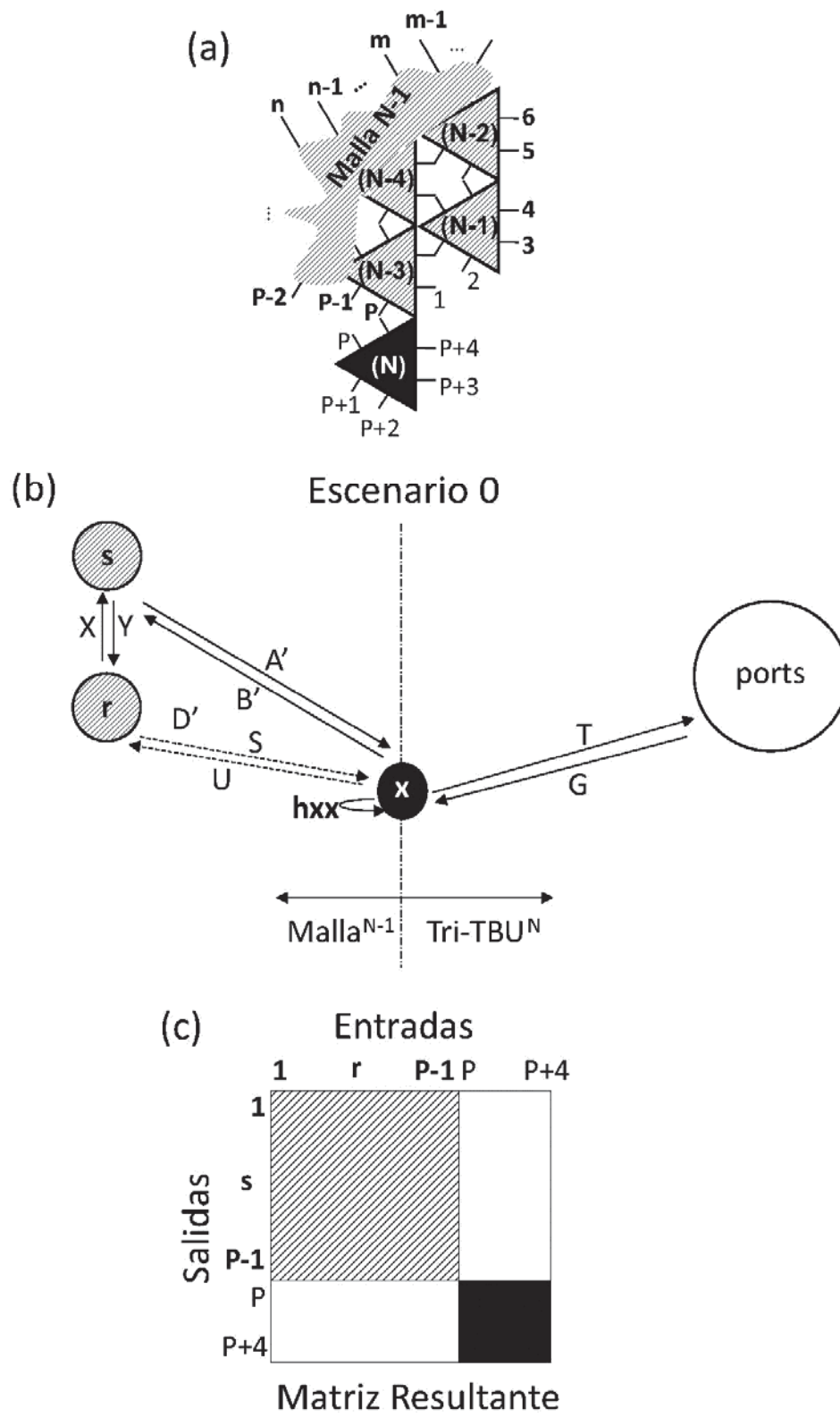


FIG. 5

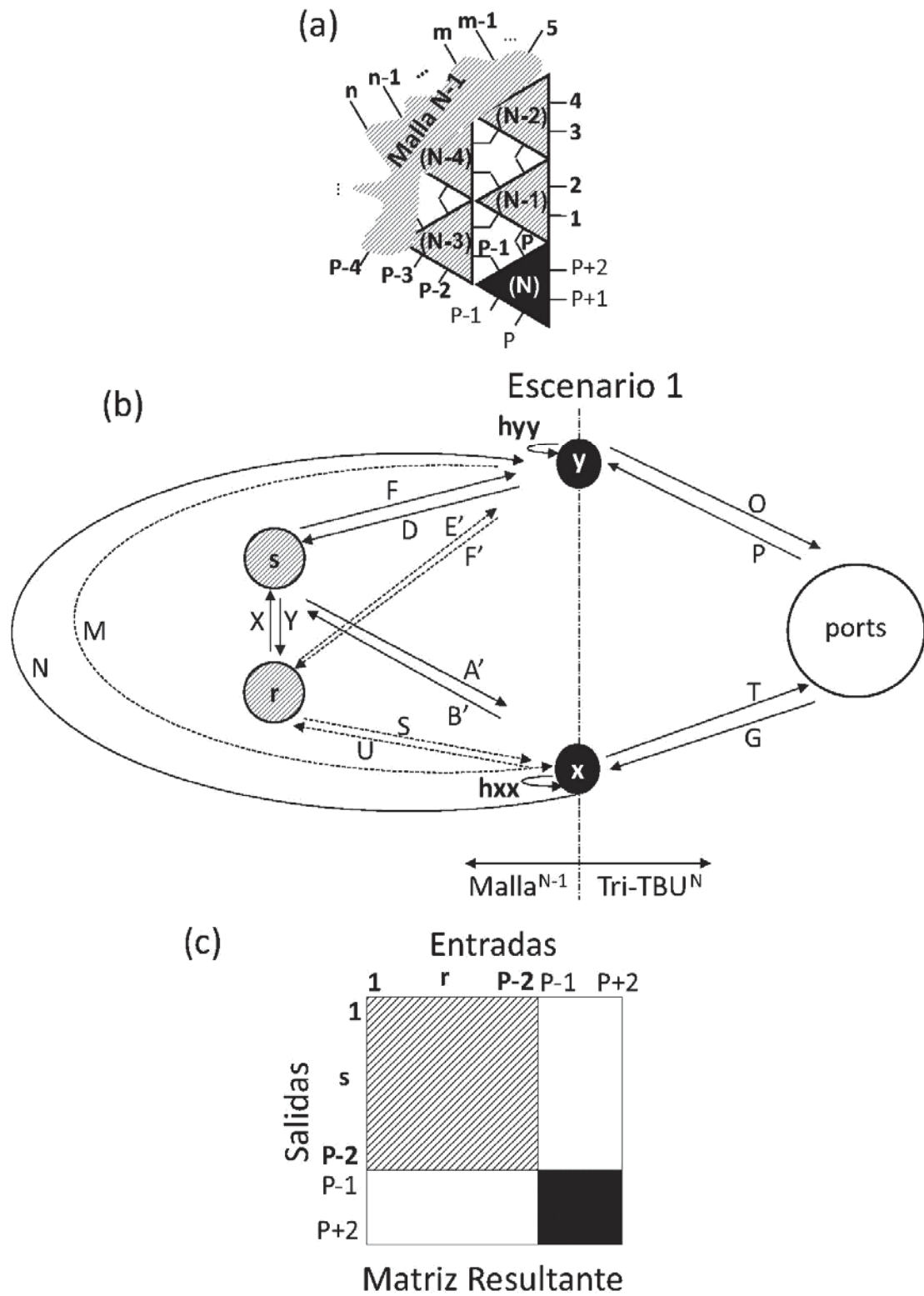


FIG. 6

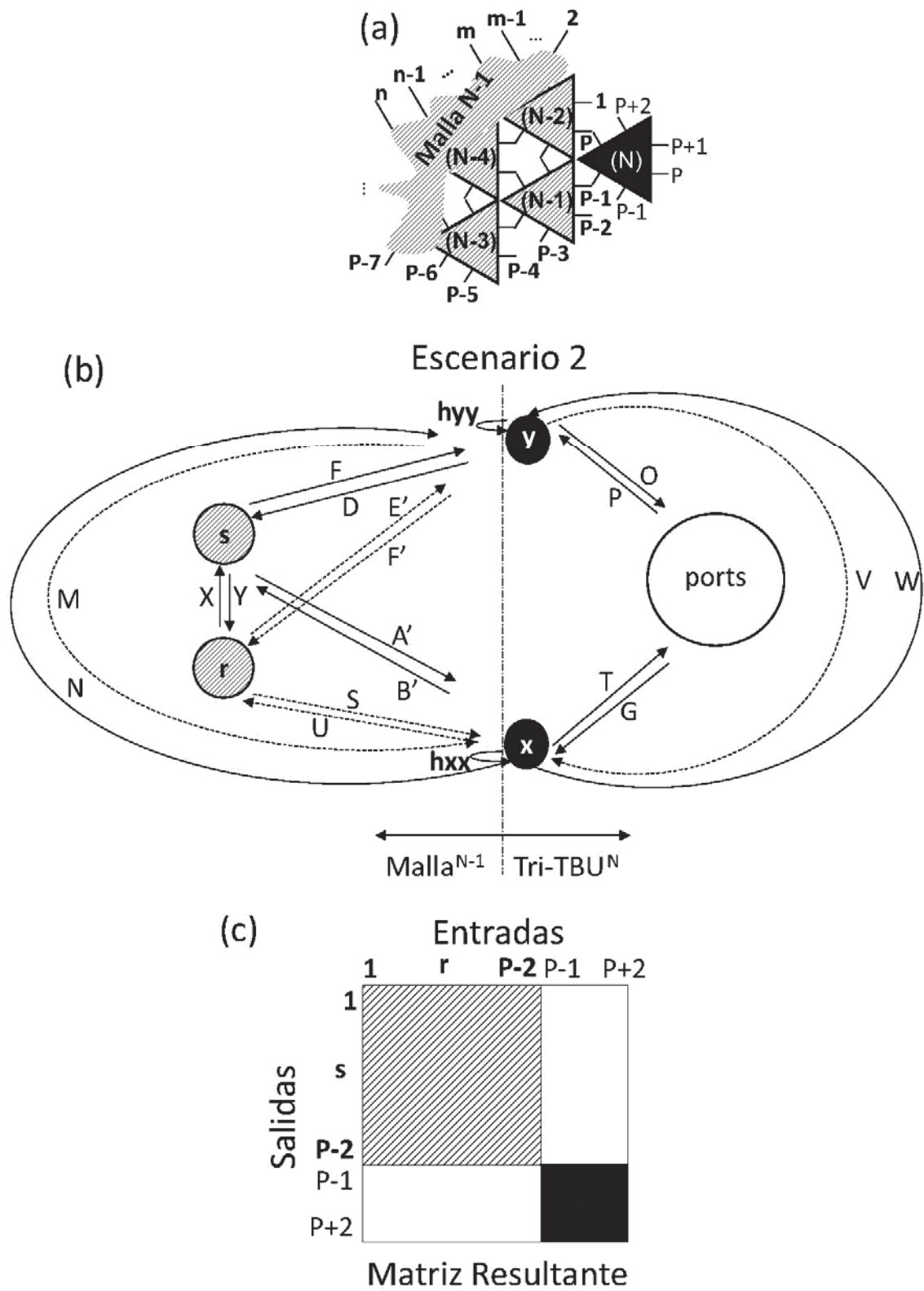


FIG. 7

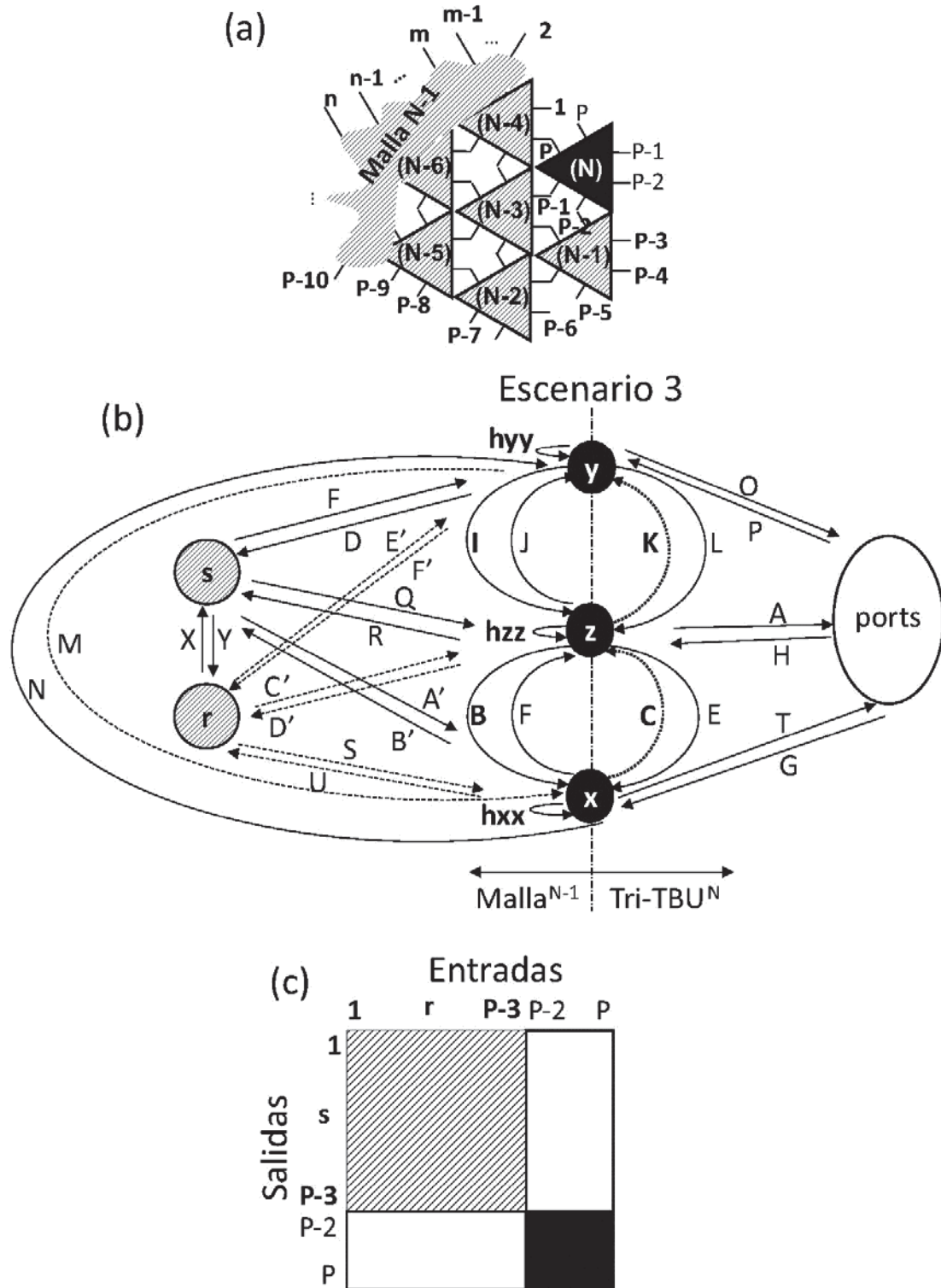


FIG. 8

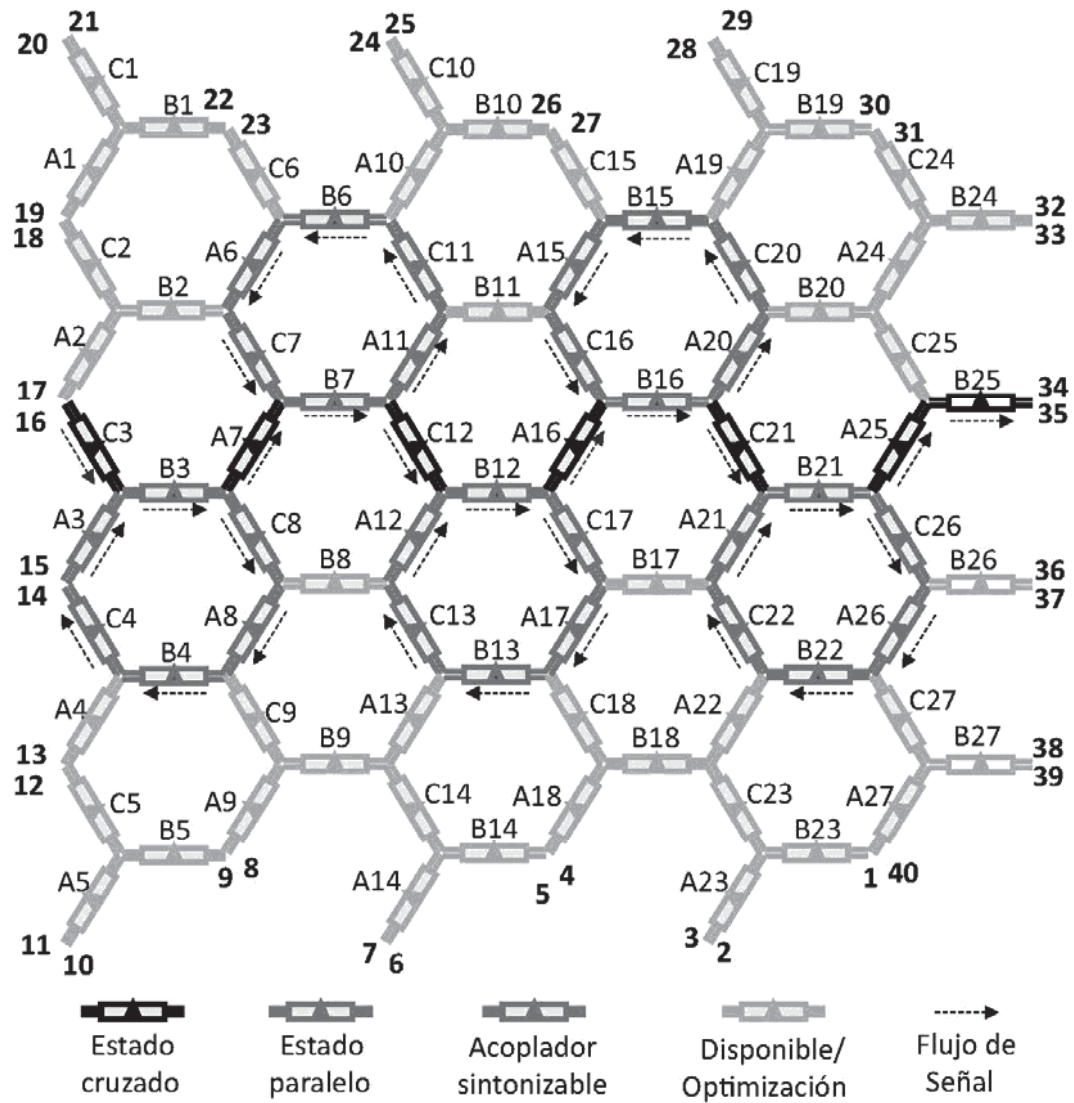


FIG. 9a

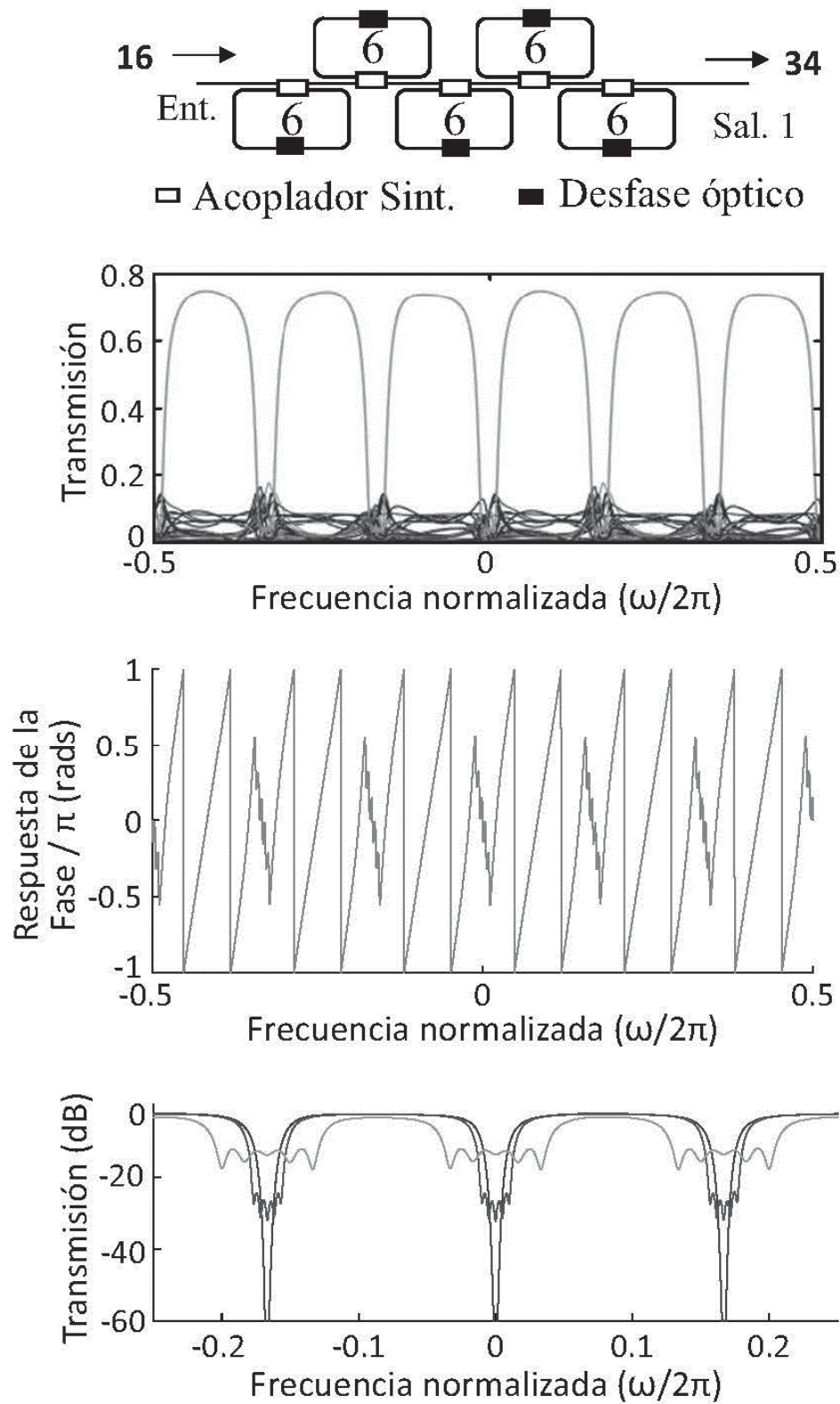


FIG. 9b

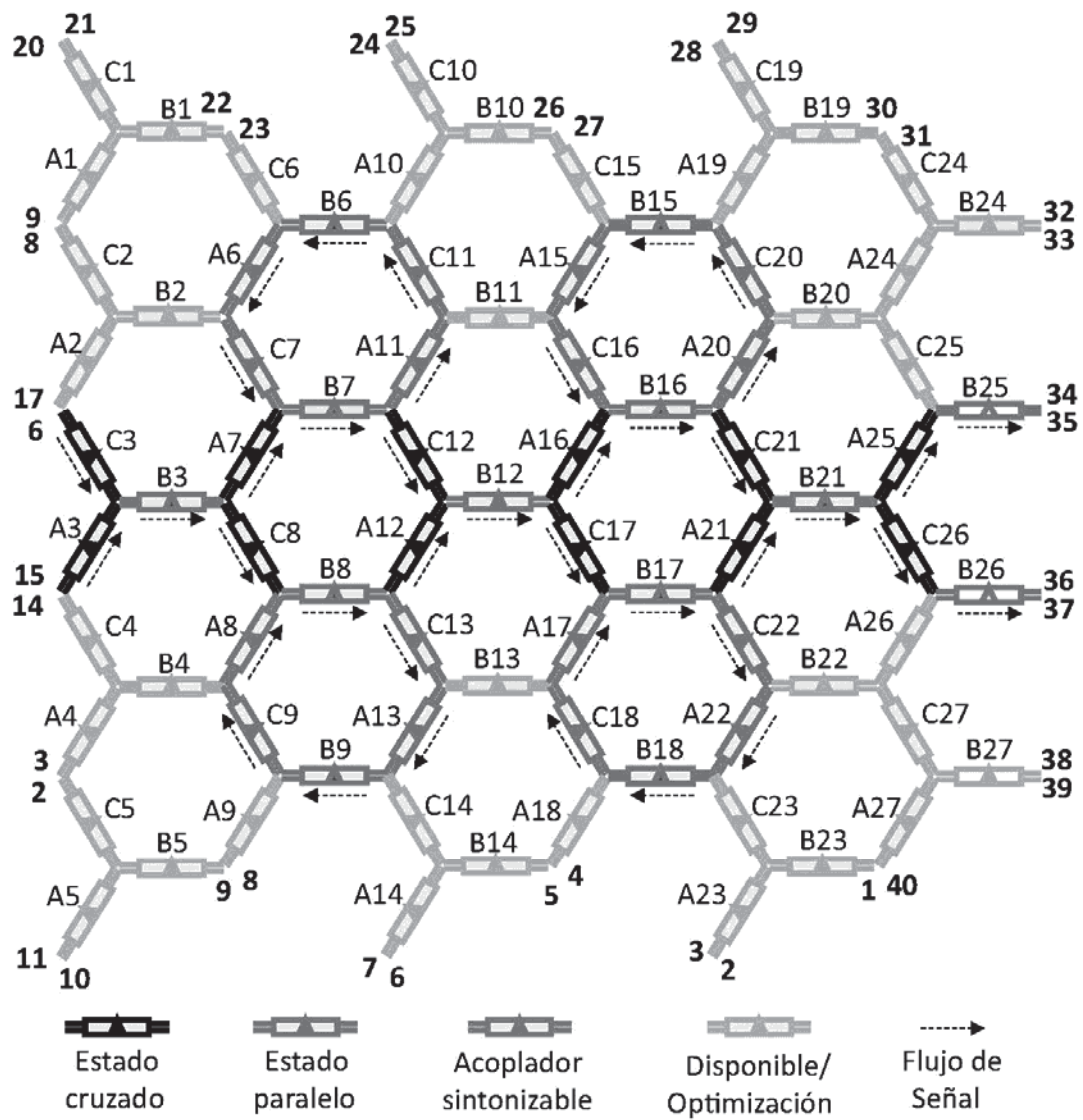


FIG. 10a

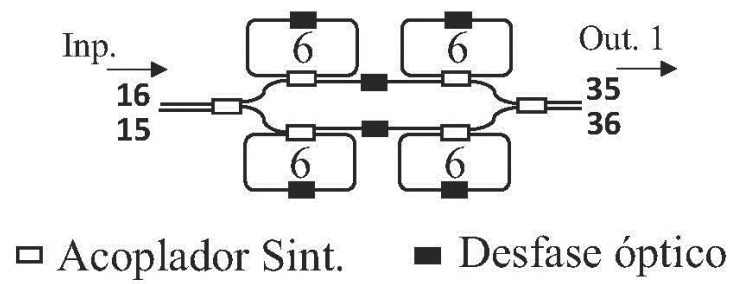


FIG. 10b

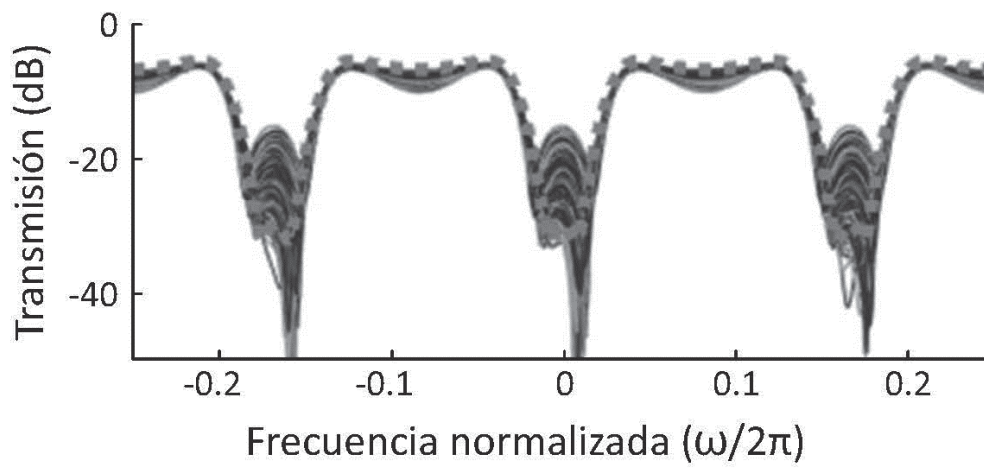


FIG. 10c

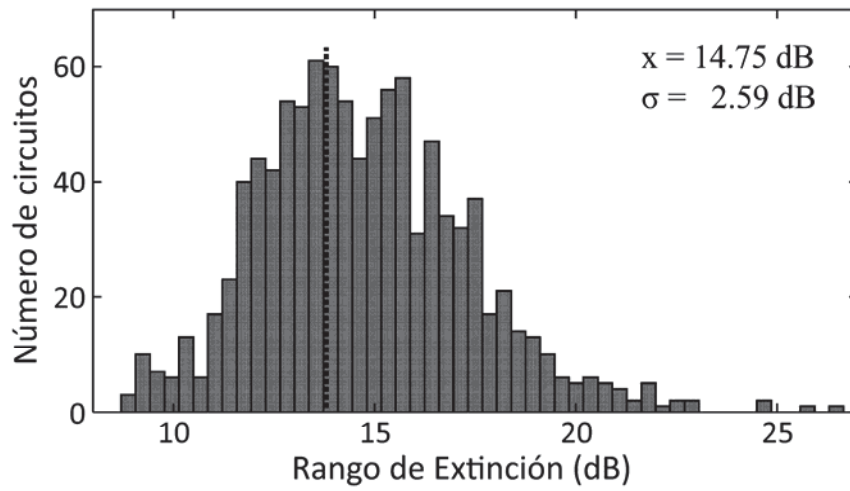


FIG. 10d

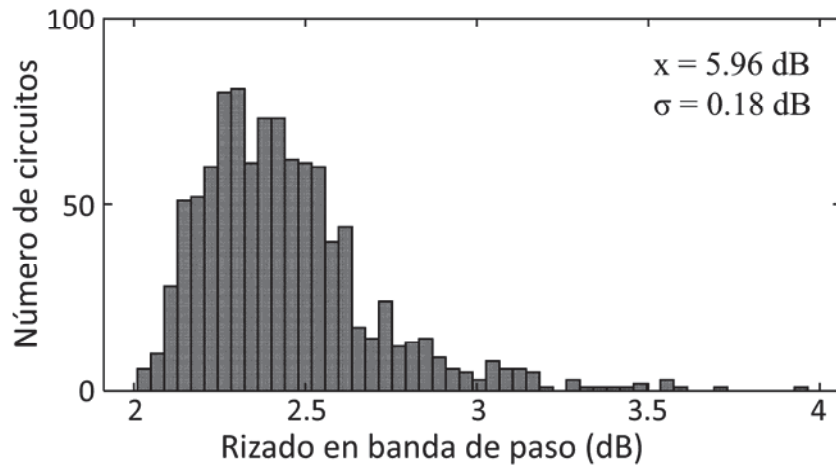


FIG. 10e

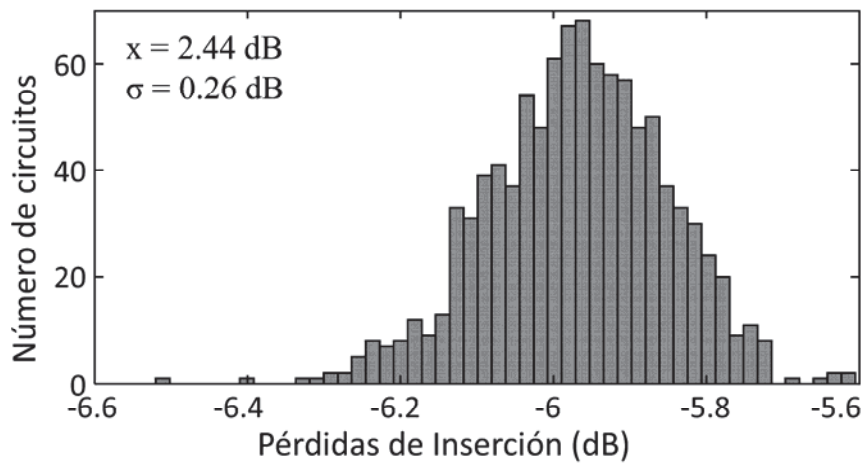


FIG. 10f

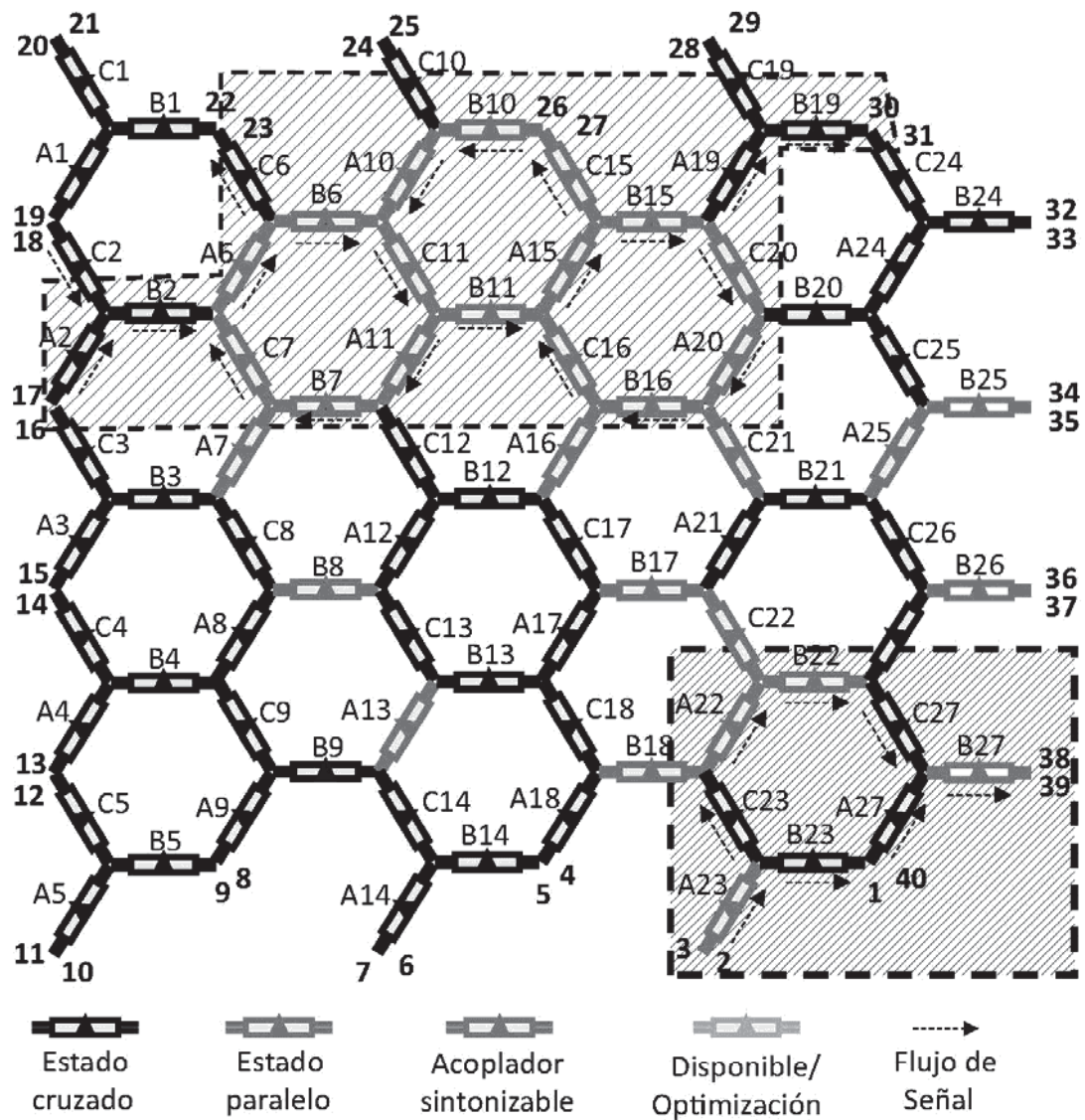


FIG. 11a

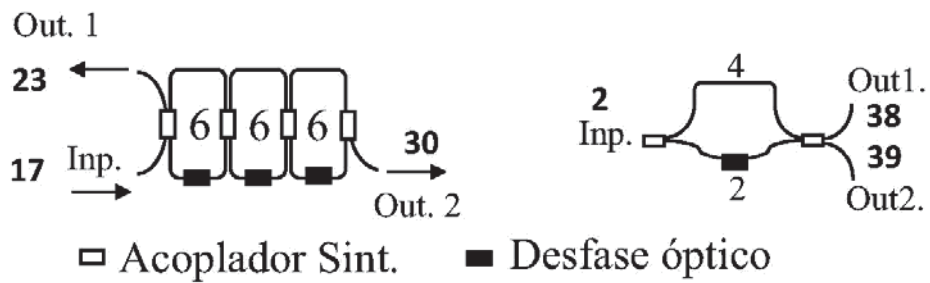


FIG. 11b

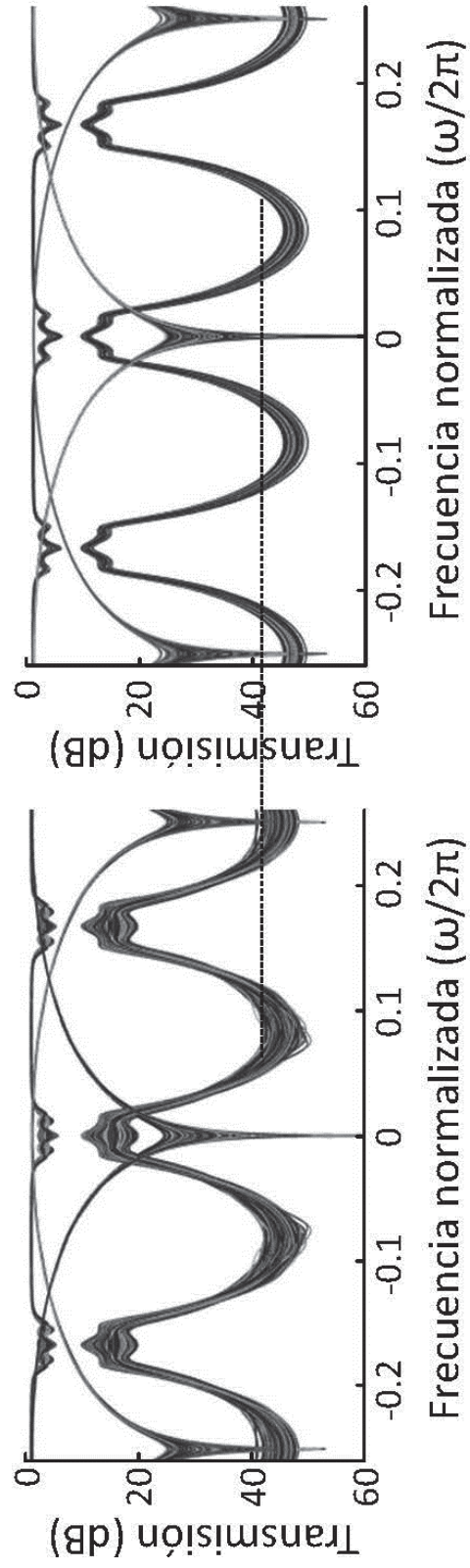


FIG. 11c

FIG. 11d

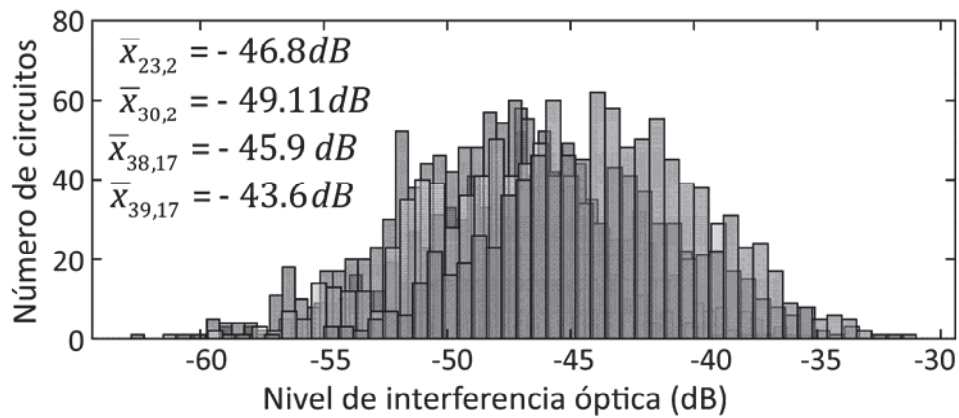


FIG. 11e

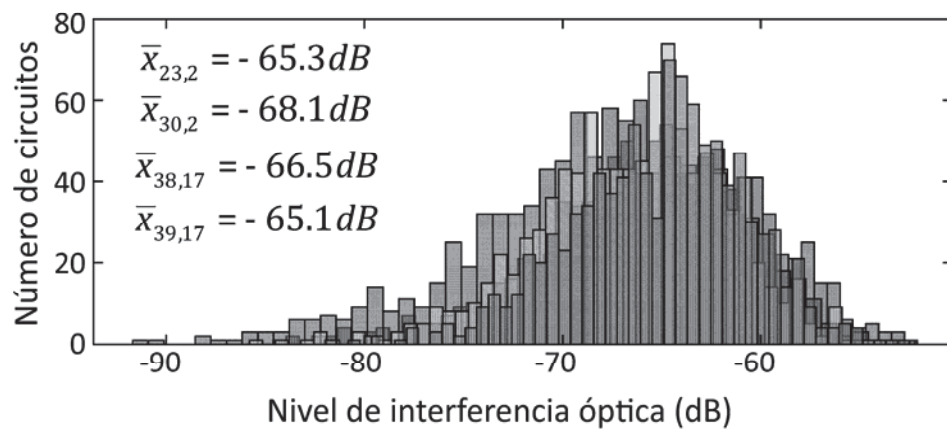


FIG. 11f

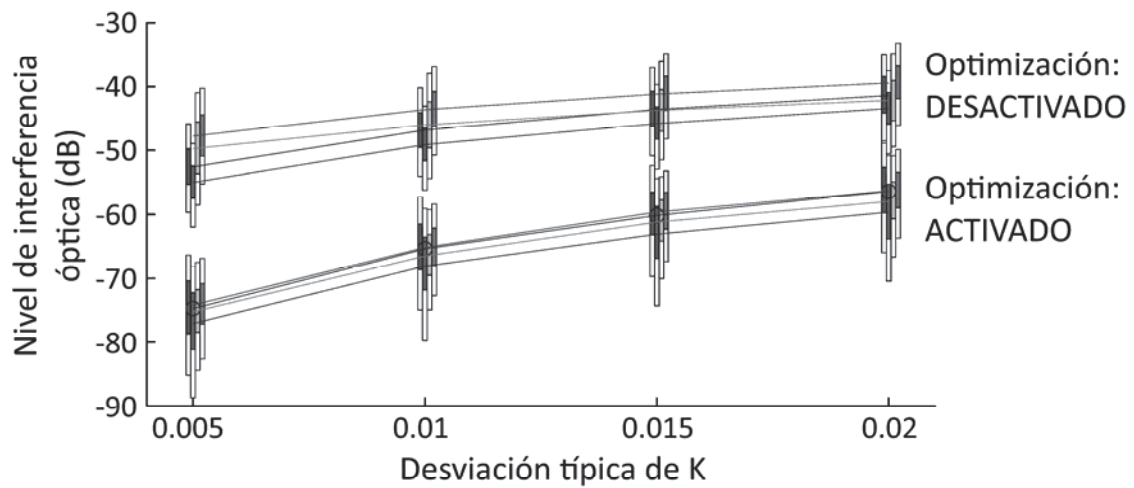


FIG. 11g