

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FIN DE CARRERA

**SÍNTESIS EXACTA DE REDES DE DIFRACCIÓN DE
BRAGG EN FIBRA ÓPTICA BASADA EN ALGORITMOS
DE MEDIOS MULTICAPA**

AUTOR: D. PEDRO SANZ MARCOS

TUTOR: D. ALEJANDRO CARBALLAR
RINCÓN

SEVILLA, JUNIO 2004

**SÍNTESIS EXACTA DE REDES DE DIFRACCIÓN DE BRAGG EN FIBRA
ÓPTICA BASADA EN ALGORITMOS DE MEDIOS MULTICAPA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

AUTOR: D. Pedro Sanz Marcos.
TUTOR: D. Alejandro Carballar Rincón.

TRIBUNAL

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

FECHA DE LECTURA:

CALIFICACIÓN:

RESUMEN

En este proyecto se aborda el problema de la síntesis de redes de difracción en fibra óptica. Se hará una revisión del marco en el cual las redes de difracción tienen su principal interés, para luego fijar una serie de objetivos, los objetivos de este proyecto, que se centrarán en el estudio de estas redes y los métodos para su síntesis.

Una vez establecidos los objetivos del proyecto, que en su parte más importante se reducen al desarrollo de un nuevo algoritmo de síntesis, pasaremos a estudiar cuál es la situación actual en la investigación sobre síntesis de redes de difracción. Debido a que el proceso de síntesis se encuentra ligado al de análisis, haremos un recorrido por los algoritmos existentes, tanto de síntesis como de análisis, comentando sus ventajas e inconvenientes. De esta forma sentaremos las bases para explicar a fondo el algoritmo propuesto en el presente proyecto y así poder establecer una comparación, al menos teórica, entre las diferentes soluciones. Se explicarán con detalle todos los aspectos del mismo, enfatizando en aquéllos que se relacionan con algoritmos ya propuestos, o que solucionan aspectos negativos de los mismos. Se comenzará con una explicación cualitativa del algoritmo para pasar más tarde a una revisión paso a paso del mismo, deteniéndonos en todos los cálculos matemáticos necesarios para su comprensión.

Se mostrarán una serie de simulaciones realizadas mediante MatlabTM, que muestran lo que el algoritmo de síntesis es capaz de hacer. En un primer lugar se presentan una serie de tests que prueban que el algoritmo funciona correctamente, y más tarde se pasa a la síntesis de redes reales.

Una vez explicado el algoritmo y su funcionamiento, veremos que realmente es posible especificar cualquier tipo de filtro y sintetizarlo, al menos de forma teórica. Sin embargo, hay que pasar de la síntesis a la fabricación, ya que el objetivo último de la síntesis teórica es el que se puedan aprovechar sus resultados para pasar de la teoría a la práctica, es decir, fabricar redes de difracción de Bragg en fibra cuyas características se ajusten a las especificaciones definidas en principio de forma teórica. Comentaremos los procesos de fabricación de estas redes, así como los problemas derivados de pasar de la síntesis a la fabricación.

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1: Introducción	2
1.1. Introducción a los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.....	2
1.2. Las redes de difracción de Bragg	9
1.3. Objetivos	13
CAPÍTULO 2: Análisis y síntesis de redes de difracción.....	15
3.1. Análisis y síntesis de redes de difracción	15
3.2. Conclusiones	21
CAPÍTULO 3: Algoritmo exacto de síntesis mediante la teoría de medios multicapa	22
3.1. Consideraciones previas.....	22
3.2. Obtención de los índices de refracción	27
3.3. Desarrollo del algoritmo	32
3.4. Comentarios al funcionamiento del algoritmo	38
3.5. Proceso de especificaciones	39
3.6. Mejora del rendimiento del algoritmo en cuanto a velocidad	42
CAPÍTULO 4: Ejemplos de funcionamiento del algoritmo.....	48
4.1. Prueba mediante redes cortas.....	48
4.2. Síntesis de redes reales.	69
CAPÍTULO 5: Procesos de fabricación.....	83
5.1. El paso de la síntesis a la fabricación.....	83
5.2. Resumen de métodos de fabricación para redes de difracción.....	84
CAPÍTULO 6: Conclusiones y líneas abiertas.....	90
Referencias	92

CAPÍTULO 1: Introducción

En este proyecto se aborda el problema de la síntesis de redes de difracción en fibra óptica. Para comprender el marco en el que se desenvuelve el proyecto, y para entender los problemas a los que ha de enfrentarse, es necesario hacer una serie de comentarios sobre los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, sus tendencias en la actualidad, y cómo las redes de difracción pueden ayudar al desarrollo de estos sistemas. Éste es precisamente el objetivo de este primer capítulo introductorio, hacer una revisión del marco en el cual las redes de difracción tienen su principal interés, para luego fijar una serie de objetivos, los objetivos de este proyecto, que se centrarán en el estudio de estas redes y los métodos para su síntesis.

1.1. Introducción a los sistemas de comunicaciones por fibra óptica

La tecnología actual avanza día a día de acuerdo a las necesidades con que se va enfrentando el hombre en su vida cotidiana, es el caso de las telecomunicaciones en general y específicamente en las comunicaciones vía fibra óptica. La fibra óptica se encuentra en una etapa de evolución. Desde su entrada en el mercado comercial en los pasados años 70, la fibra óptica ha madurado y encontrado aceptación en diversos ámbitos de las telecomunicaciones, desde pequeñas redes de área local de alta velocidad, hasta largos sistemas de transporte de datos submarinos, y en un ámbito más comercial, las redes de televisión por cable.

La red óptica se enfrenta actualmente nuevos retos, ya que su esencia es que la fibra debe llevar mayores longitudes de onda diferentes a lo largo de mayores distancias, siendo el problema al que se enfrentan estos sistemas de comunicaciones la dispersión de los pulsos digitales y la atenuación, que limitan tanto el ancho de banda máximo a transmitir como la longitud máxima permitida para un enlace sin regeneración. Sin embargo, las fibras ópticas permiten hoy día enlaces del orden de centenas de kilómetros a velocidades superiores a los 10Gbps [CARBALLAR-03].

1.1.1. La fibra óptica

Una fibra óptica se puede definir como fibra o varilla de vidrio u otro material transparente con un índice de refracción alto que se emplea para transmitir luz. Cuando la luz entra por uno de los extremos de la fibra, se transmite con muy pocas pérdidas incluso aunque la fibra esté curvada, hasta el otro extremo.

Una fibra óptica está compuesta por una estructura de núcleo/corteza que queda dispuesta como se indica en la figura 1.1. El material de la corteza suele ser Silicio puro, mientras que el del núcleo suele realizarse con Silicio dopado. Este dopaje del núcleo provoca un cambio en el índice de refracción del material, creándose así una interfaz entre el núcleo y la corteza cuya diferencia en los índices de refracción se comporta a

todos los efectos como una lente convergente que guía a la luz, a ciertas longitudes de onda, a través del núcleo y a lo largo de la fibra [RUSSEL-93].

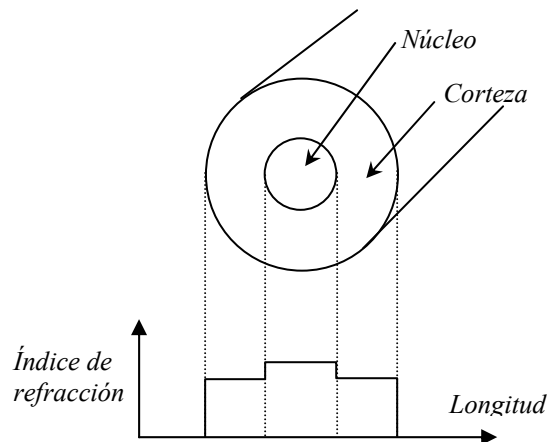


Fig 1.1 Estructura interna de una fibra óptica. El índice de refracción del núcleo es ligeramente superior al de la corteza para producir el efecto de guiado de la luz a través del núcleo de la fibra. En fibras comerciales, la corteza se rodea de otra capa formada por materiales plásticos que protegen a la fibra de la humedad y de roturas por tracción.

Cuando dopamos el Silicio del núcleo con Germanio, lo más habitual en comunicaciones ópticas, se crean dos ventanas de transmisión a las longitudes de onda de $1.3\mu\text{m}$ y $1.55\mu\text{m}$. A estas longitudes de onda, el núcleo de la fibra resulta tan transparente que un observador podría ver a través de él el fondo de la fosa de las Marianas (11 km. de profundidad) con toda nitidez desde un barco situado en la superficie [RUSSEL-93].

Para introducir luz en la fibra se utilizan principalmente dos métodos, el primero de ellos consistente en el uso de diodos LED, y el segundo consistente en el uso de LASERes, más extendido que el primero. Sea cual fuere el método de inserción de luz en la fibra, la luz incidente es modulada en forma digital, es decir, en cada instante se decide si se inyecta un pulso de luz ("1" lógico) o no ("0" lógico). Esta luz es guiada por la estructura de la fibra hasta llegar al destino, donde es recogida por un diodo fotodetector, o sistema similar, con una circuitería adicional que discrimina el hecho de que estén llegando o no pulsos de luz para reconstruir la señal digital a la salida del receptor.

La luz que viaja por el núcleo de la fibra óptica se mantiene confinada dentro del mismo gracias a las reflexiones que se producen en la interfaz núcleo/corteza. La naturaleza de estas reflexiones determina lo que se conoce como *modos de propagación*, que son las distintas formas posibles que adopta el campo electromagnético para propagarse dentro del núcleo de una fibra. Según el ángulo con que se introduzca el haz de luz en la fibra, y según la discontinuidad del índice de refracción en el interfaz núcleo/corteza, el campo electromagnético deberá adoptar ciertas características para propagarse a lo largo de la fibra. Más concretamente, podemos decir que cuando se inyecta luz en la fibra se están inyectando todos los

modos de propagación posibles, pero sólo aquéllos que cumplan con ciertas condiciones serán los que lleguen al otro extremo de la fibra, atenuándose los restantes en los primeros milímetros [CARBALLAR-03].

Este hecho produce la clasificación de las fibras ópticas según los modos de propagación que son capaces de soportar. Decimos que una fibra es *monomodo* si sólo un modo puede cumplir las condiciones necesarias para propagarse por la fibra, y diremos que una fibra es *multimodo* cuando son varios los modos posibles para la propagación. Las fibras *multimodo* serán las que nos interesen en el estudio de las redes de difracción de Bragg, ya que, como veremos más adelante, es necesario que se produzca lo que se denomina un *acoplo de modos* [ERDOGAN-97] entre los distintos modos de propagación que viajan a lo largo de la fibra, para que dichas redes tengan su funcionalidad. En su momento se tratará este concepto con algo más de detalle.

A continuación se describirán algunas de las propiedades más importantes de las fibras ópticas para completar una visión general de las mismas.

Atenuación.

El campo electromagnético que se propaga a lo largo del núcleo de una fibra tiende a atenuarse por diferentes razones, según aumenta la distancia. Se tienen tres causas principales de atenuación: una gran tendencia conforme se incrementa la longitud de onda (Dispersión Rayleigh), atenuación en los picos de absorción asociados con el ión hidroxyl (OH⁻), y una tendencia al aumento de la atenuación al incrementar las longitudes de onda por encima de los 1600 nm, debidas a las pérdidas inducidas por la absorción del Silicio. Existen una serie de longitudes de onda en las que la atenuación es más baja. Estas longitudes de onda se denominan *ventanas de transmisión*, ya que se aprovecha su menor atenuación para usarlas en sistemas de comunicaciones ópticas. La primera ventana se observa en torno a los 850nm, la segunda se tiene en torno a los 1330nm, obteniéndose atenuaciones del orden de 0.35dB/km, y la tercera, utilizada en fibras monomodo, se encuentra alrededor de los 1550nm (0.2dB/km) [CARBALLAR-03].

Dispersión Cromática

La dispersión cromática describe la tendencia en cuanto a ensanchamiento de pulsos que tienen las diferentes longitudes de onda que viajan a diferentes velocidades en una fibra. En longitudes de onda donde la dispersión cromática es alta, los pulsos ópticos tienden a expandirse en el tiempo y provocar interferencia, lo cual puede producir una inaceptable calidad de recepción. La dispersión cromática limita entonces los enlaces por fibra en cuanto a ancho de banda, ya que pulsos suficientemente espaciados (ancho de banda menor) podrán viajar más lejos hasta que el ensanchamiento produzca interferencia, pero en el otro extremo, velocidades rápidas de bit (ancho de banda mayor) sufrirán los efectos perjudiciales del ensanchamiento en una distancia mucho más corta. Existe otro tipo de dispersión, apreciable en fibras multimodo, denominada *dispersión intermodal*, que se produce debido al acoplo de los distintos modos que viajan por la fibra, pudiendo interferir unos con otros.

No linealidad de la Fibra Óptica

Si se introducen en la fibra señales luminosas con altos niveles de potencia, pueden producirse interacciones con la estructura de la fibra que provocan no linealidades en el comportamiento de la misma, las cuales pueden afectar de forma adversa al desarrollo de la comunicación. Las no linealidades de la fibra caen dentro de dos categorías: *dispersión estimulada* y *fluctuación de índices refractivos*. Los niveles de potencia en los cuales los diferentes fenómenos no lineales se manifiestan, son conocidos como *umbrales*.

Dispersión Estimulada (Stimulated Scattering).

Esta no linealidad ocurre en sistemas de modulación intensos cuando las señales ópticas interactúan con las ondas acústicas o con vibraciones moleculares en la fibra de Silicio. Esta interacción dispersa la luz y la cambia a una longitud de onda mayor. Hay dos formas de dispersión estimulada: *Stimulated Brillouin Scattering* y *Stimulated Raman Scattering*.

Fluctuaciones del índice de refracción (Refractive Index Fluctuations).

Aunque el índice de refracción de una fibra óptica de Si es constante a bajos niveles de potencia óptica, las altas potencias relacionadas con los amplificadores ópticos pueden modular el índice variando la intensidad óptica de la señal de transmisión. Los efectos de la no linealidad de los índices de refracción caen dentro de tres categorías: *Self-Phase Modulation*, *Cross-Phase Modulation* y *Four-Wave Mixing*.

Se ha descrito de forma muy somera el comportamiento de una fibra óptica, pero es evidente que el proceso señalado es mucho más complejo, ya que la estructura núcleo/corteza puede presentar pérdidas cuando el radio de curvatura de la fibra es muy pequeña, los modos de propagación dependen de las condiciones de inyección de luz, existen una serie de efectos de segundo orden que limitan bien el alcance de la señal o el ancho de banda de los datos a transmitir, etc. Todas estas consideraciones pueden estudiarse en profundidad en las referencias reseñadas en la bibliografía, y aunque es necesario comprenderlas para un correcto entendimiento del funcionamiento de los sistemas de comunicaciones ópticas, realmente tan sólo es necesario un conocimiento no muy profundo para comprender los temas que se tratarán en el presente proyecto.

En cualquier caso, se entiende que el lector al que va dirigido este proyecto posee cierta experiencia en el estudio de sistemas basados en fibra óptica, por lo que se recomienda al lector profano en la materia un estudio previo de estos sistemas basándose en la bibliografía que acompaña.

1.1.2. Sistemas de comunicaciones ópticas por fibra

La fibra óptica presenta unas características en principio muy buenas para su uso en sistemas de comunicaciones. Las altas velocidades que se consiguen en el transporte de datos y las largas distancias que se pueden cubrir debido a la baja atenuación hacen muy atractiva su aplicación. Podemos enumerar diversas ventajas del uso de la fibra óptica en sistemas de comunicaciones, aparte de las ya comentadas:

- Insensibilidad a la interferencia electromagnética, lo cual resuelve un importante problema de los medios tradicionales de transmisión de datos como los cables de cobre.
- Seguridad en las comunicaciones, ya que resulta muy difícil extraer la señal de luz de la fibra malintencionadamente.
- Livianidad y reducido tamaño del cable.
- Sin puesta a tierra de señales, como ocurre con alambres de cobre que quedan en contacto con ambientes metálicos.
- Relativamente fácil de instalar.

Sin embargo, el hecho de que el medio físico se convierte ahora en un soporte de vidrio, en lugar de cobre, plantea numerosos problemas. Si bien es cierto que la fibra presenta numerosas ventajas para la transmisión, hemos de pensar que el origen de datos a transmitir es en la mayoría de los casos, eléctrico. Para transmitir datos de voz, por ejemplo, es necesario un micrófono, a cuya salida encontramos señales eléctricas. Antes de entrar en la red de transmisión, la señal eléctrica ha de pasar por una serie de equipos eléctricos, como filtros, multiplexores o derivadores, y al llegar a la fibra, es necesario hacer un cambio de medio físico. Lo mismo ocurre con las redes de datos en cuyos extremos encontramos ordenadores, controladores, maquinaria, etc.

Esta limitación es la que ha dejado a la fibra en un lugar dentro de las redes de comunicaciones destinado únicamente a las partes dorsales o de transporte de las grandes redes de datos. El concepto es muy simple, se producen distintas señales eléctricamente, y al llegar a la red dorsal, se multiplexan dentro de una fibra para cubrir grandes distancias.

1.1.3. WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*)

Para aumentar el caudal de datos a transmitir por una fibra óptica, se utiliza la técnica de multiplexado en longitud de onda, también conocido por su denominación americana WDM (*Wavelength-Division Multiplexing*). Consiste éste último en enviar varias señales de diferentes longitudes de onda simultáneamente por la misma línea. El multiplexado y demultiplexado en longitud de onda se efectúan por medio de componentes ópticos pasivos, de modo similar a la descomposición y la recomposición de los colores del arco iris por un prisma. El multiplexado en longitud de onda también

abre perspectivas de direccionamiento óptico en las redes. De esta manera, las comunicaciones se podrán dirigir en diferentes direcciones según su longitud de onda.

Las fibras conservan, pese a las precauciones tomadas en su fabricación, una propiedad bien conocida de la materia transparente: la de dispersar los colores. Es exactamente la misma propiedad responsable de la descomposición de la luz blanca por un prisma de vidrio. Es la *dispersión cromática* que ya hemos comentado, y es aprovechada en el multiplexado en longitud de onda.

Recordemos que la velocidad de propagación de la luz en la materia transparente depende de la longitud de onda. El índice de refracción óptico (cociente entre la velocidad en el vacío y la velocidad en el medio material) también es por lo tanto función de la longitud de onda, y ésta es la razón por la que un prisma desvía con ángulos diferentes los rayos de diferentes colores.

En una fibra óptica, este efecto de dispersión cromática tiene como consecuencia el aumento de la anchura de los impulsos. Todo se debe al hecho de que un impulso luminoso breve no tiene una longitud de onda (o una frecuencia) perfectamente determinada. Debido a la dispersión, las diferentes componentes de la señal se propagan por la fibra a velocidades diferentes, según la longitud de onda de cada una. Los impulsos se ensanchan, de la misma forma que un pelotón de corredores se estira en una carretera. Por lo tanto se pueden llegar a mezclar con los impulsos vecinos, provocando errores de detección. Aunque la dispersión cromática resulta aceptable a los caudales de información moderados, este inconveniente pesa doblemente a muy altos caudales. Cuanto más elevado es el caudal, más breves son y más próximos están unos de otros los impulsos. Y como los impulsos muy breves contienen más componentes que los largos, tienden a ensancharse más, con lo que aumenta la superposición entre impulsos sucesivos. Por lo tanto la dispersión cromática limita muy pronto el caudal.

Análogamente, las fibras no transmiten exactamente a la misma velocidad los modos de polarización diferentes. Y a consecuencia de la interferencia de polarización debida a las fibras, los impulsos están constituidos por una mezcla aleatoria de polarizaciones. Los bits transmitidos terminan por desdoblarse causando errores de detección.

Otro problema importante es la *dispersión no lineal*, que también hemos comentado. A partir de cierto nivel de intensidad, el índice de refracción del medio empieza a variar en función de la intensidad. Por lo tanto las intensidades pequeñas no viajan a la misma velocidad que las grandes.

Existe un medio elegante de escapar de este dilema: el *solitón*. Se trata de un impulso muy breve que conjuga idealmente la dispersión cromática y la dispersión no lineal neutralizándolas. El solitón es una señal cuya intensidad y longitud de onda media se han calculado de forma que los efectos de dispersión (variación de la velocidad de propagación debida a la longitud de onda de una parte, y debida a la intensidad de otra) se compensan. La transmisión por solitones ha revolucionado los sistemas de comunicaciones por fibra óptica posibilitando el sistema WDM. Siguiendo este avance, se plantea, al igual que ya ocurriera con las comunicaciones a través del hilo de cobre, saltar de la multiplexación en frecuencia (en el caso de la fibra, en longitud de onda), a la mutiplexación por división en el tiempo, que en comunicaciones ópticas recibe el nombre de OTDM (Optical Time Division Multiplexing).

Desde otro punto de vista, a la vez que la tecnología avanza para mejorar la red dorsal mediante el uso de WDM u OTDM, la tendencia es también cubrir con fibra cada vez una mayor parte de la red, no sólo la de transporte, sino llegando incluso al usuario terminal. Todas estas tendencias se encuentran con el problema común que plantea el cambio de medio físico. Si pensamos en una red cualquiera de las actualmente implantadas mediante tecnologías de cobre, encontraremos multitud de elementos, como filtros, concentradores, repartidores, y en última instancia, terminales, que sólo encontramos en el dominio eléctrico. Para salvar este inconveniente se plantean dos soluciones. La primera es la que se tiene de algún modo en la actualidad, y consiste en pasar del dominio óptico al eléctrico antes de llegar a estos componentes de red, y a su salida realizar una reconversión para pasar de nuevo al dominio óptico. Esta solución tiene el gran inconveniente de que los equipos eléctricos no soportan las velocidades de transmisión de las fibras, por lo que todo componente eléctrico se convierte en un *cuello de botella* en toda red basada en fibra. Otra solución sería intentar desarrollar los componentes de red mediante una tecnología completamente óptica, lo que daría lugar a redes completamente ópticas. Esta solución es la mejor y a lo que tienden las investigaciones, pero todavía queda mucho camino por recorrer.

Las redes de difracción de Bragg, objeto de este proyecto, vienen a facilitar esta última tendencia, ya que permiten la fabricación de algunos componentes de red en el dominio óptico.

1.2. LAS REDES DE DIFRACCION DE BRAGG

Podemos definir una red de difracción de Bragg como una perturbación periódica en el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, que se forma por exposición del mismo a un patrón de interferencia óptica intenso.

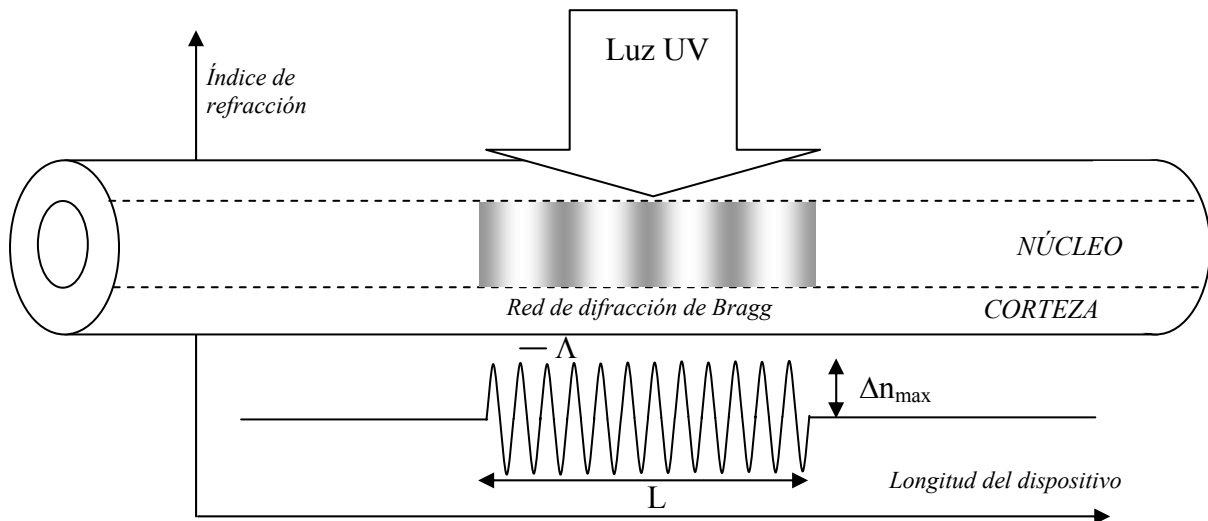


Fig. 1.2. Perturbación periódica del índice de refracción. El gráfico muestra cómo se produce una perturbación periódica en el índice de refracción del núcleo cuando hacemos incidir sobre el mismo un patrón de radiación ultravioleta.

Como podemos observar en el gráfico, tres son los parámetros fundamentales que caracterizan una red difracción de Bragg:

- Longitud de la perturbación (L).
- Periodo de la perturbación (Λ).
- Amplitud de la perturbación ($\Delta n_{\max}$).

El efecto que tiene esta perturbación es el filtrado paso de banda, ya que al llegar la luz a la zona donde la perturbación ha sido introducida, unas longitudes de onda se reflejarán, mientras que las restantes se dejarán pasar. Este filtrado óptico presenta una alta selectividad en longitud de onda (se pueden producir bandas de paso estrechas con caídas abruptas), las pérdidas de inserción son pequeñas, ya que no tenemos cambio de medio físico, no es sensible al estado de polarización gracias a la simetría cilíndrica de la fibra, y por último, se trata de un filtrado de gran versatilidad, ya que podemos obtener muchas características de filtrado jugando con los tres parámetros mencionados con anterioridad.

El principio de funcionamiento de la red puede explicarse a partir de una suma sucesiva de reflexiones coherentes en los saltos de índice de refracción [CARBALLAR-99]. Sabemos que un cambio en el índice de refracción supone para la luz una reflexión y una refracción. Como la perturbación introduce cambios continuos en el índice, en cada punto de la red se provocan dichas reflexiones y refracciones. La suma de todas

ellas da lugar a la característica de filtrado, que depende, por tanto, del tipo de perturbación introducida.

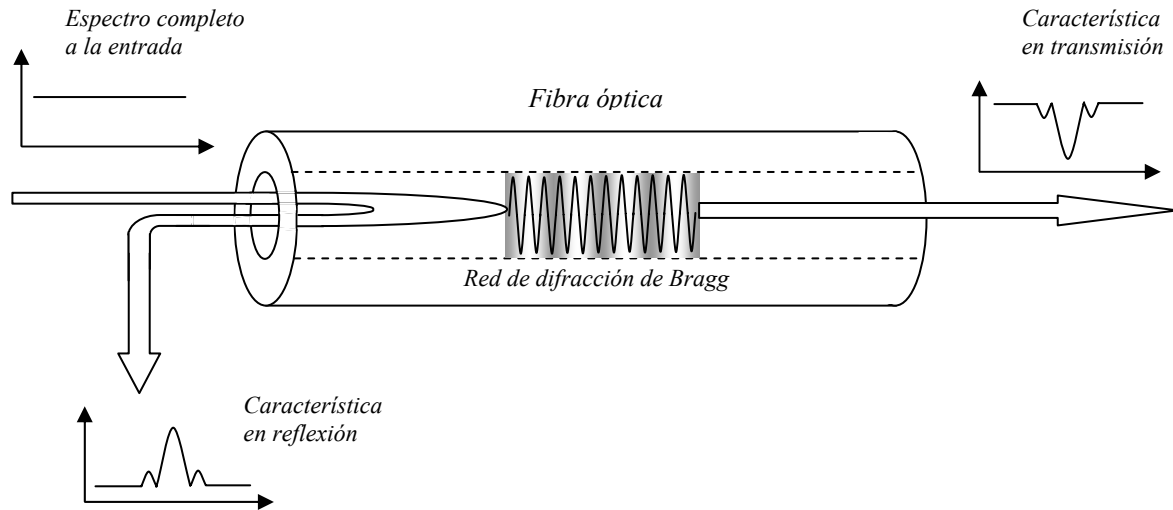


Fig. 1.3. Principio de operación de una red de difracción de Bragg. Cuando la luz llega a la red de difracción, parte de ella se refleja, y parte se transmite, dando lugar a respuestas en frecuencia complementarias.

La característica de filtrado se hace mucho más acusada cuando las reflexiones se producen en fase. Esto puede conseguirse haciendo que la diferencia de fase entre cada reflexión se aproxime lo más posible a 2π . Si suponemos que la perturbación es sinusoidal, como la que se representa en la figura 1.2., podremos obtener una característica de filtrado en reflexión (la señal filtrada se recoge en el mismo punto en el que se introduce la señal de entrada) dada por reflexiones en fase dentro de la red con tal de que la frecuencia de la sinusoide de la perturbación cumpla la siguiente condición (denominada *Condición de Bragg*):

$$\Delta f = 2\beta\Lambda = 2m\pi$$

Transformando la igualdad anterior, obtenemos que las longitudes de onda reflejadas por la red son aquellas que cumplen:

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{efectivo}} \Lambda = m\pi \Rightarrow \lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{efectivo}} \frac{\Lambda}{m}$$

Tenemos un valor discreto de longitudes de onda reflejadas, parametrizado por el valor m (orden de Bragg). En esta ecuación, el índice de refracción efectivo, n_{efectivo} , es el índice de refracción que ve la luz en su propagación, y depende del índice de confinamiento del modo de propagación.

Este estudio del comportamiento de la red es muy aproximado ya que sólo tiene en cuenta la primera reflexión de la luz cuando encuentra un cambio de índice de

refracción. Hemos de tener en cuenta que esto sólo se cumple en el primer punto de cambio de índice de la red, porque a medida que avanzamos internamente en su estructura, la luz ve multitud de cambios de índices en ambos sentidos que provocan infinitas reflexiones y refracciones internas. La *teoría de modos acoplados*, que veremos más adelante, se ocupa de estas reflexiones internas para obtener un análisis más detallado del comportamiento de las redes de difracción [ERDOGAN-97].

Sin embargo, de las ecuaciones anteriores podemos desprender una serie de características generales de las redes de difracción. Por ejemplo, vemos que al variar el período de la red, varía la longitud de onda de Bragg, por lo que se traslada la característica de filtrado a otro lugar del espectro.

Otras propiedades importantes se estudian a partir de la *teoría de modos acoplados*. Una de estas propiedades, que sin embargo sólo se cumple bajo la hipótesis de primera reflexión, es que la característica en reflexión es proporcional a la *transformada de Fourier* de la perturbación. De este modo, una red formada por una perturbación senoidal, tendrá una característica en reflexión parecida a una función *sinc()*. Cuando mayor sea la longitud de la perturbación, el ancho de banda disminuirá.

Existen muchos tipos de redes de difracción aparte de la red construida a partir de una perturbación de tipo sinusoidal como la ya comentada. Otros tipos de redes son:

- *Redes uniformes*: Presentan variaciones del índice cuya envolvente es constante y su periodo de red no varía a lo largo de la estructura. La red comentada con anterioridad es un tipo de red uniforme.
- *Redes apodizadas*: Presentan una envolvente normalmente simétrica, cuyo objeto es suavizar los extremos de la red para adaptarlos al índice medio del núcleo de la fibra y obtener características de filtrado con una reducción de lóbulos secundarios en la banda de rechazo.
- *Redes chirpeadas*: Presentan una variación del periodo de red a lo largo de la estructura. El hecho de tener varios periodos en la misma red supone un mayor ancho de banda debido al hecho de que la *condición de Bragg* se verifica para diferentes longitudes de onda.

Teniendo en cuenta estos tipos de redes, se puede construir una expresión general para la perturbación que caracteriza una red de difracción y que viene dada como: [FECED-99]

$$n(z) = n_o + \left\{ \frac{\Delta n(z)}{2} e^{j[K_o z + \theta(z)]} \right\}$$

donde:

$n(z)$ es el índice de refracción a lo largo del *eje z*, tomado como eje de la fibra.

n_o es el índice de refracción del núcleo de la fibra.

$\Delta n(z)$ es la función de apodización

K_o es el coeficiente de acoplamiento, que marca la propagación de la luz a lo largo de la red.

$\theta(z)$ es la función de variación del periodo de red.

Las aplicaciones que tienen las redes de difracción en las comunicaciones ópticas son muy numerosas. La primera ya la hemos comentado, y no es otra que el filtrado en el dominio óptico, lo que hace innecesario pasar al dominio electrónico para utilizar filtros convencionales. De este modo, podemos realizar selecciones de canal en sistemas WDM sin salir de la tecnología óptica. Otras aplicaciones importantes son:

- Uso como espejos selectivos en longitud de onda. Las redes uniformes reflejan una única longitud de onda (bajo aproximación) lo que permite, por ejemplo, estabilizar la salida de LASERs de semiconductor.
- Realización de LASERs en fibra, utilizando fibras dopadas con Erblio como medio activo, se usa la misma propiedad anterior, para reflejar longitudes de onda determinadas y así crear cavidades resonantes en las propias fibras.
- Compensación de la dispersión, mediante redes chirpeadas que aceptan todo el ancho de banda de entrada, ya que cada modo de propagación se reflejará dentro de la estructura de la red en un lugar diferente, compensándose así los retardos si elegimos unos valores de diseño adecuados.
- Ecualización de ganancia en amplificadores en fibra (EDFAs), con redes de acoplo codireccional.
- Sensores, siendo este un campo que se está desarrollando en gran medida, ya que las variaciones de los parámetros de la red con los factores ambientales permite aplicaciones de sensado muy precisas.

1.3. OBJETIVOS

Hemos comentado con anterioridad la importancia que supone el desarrollo de componentes de red en el dominio óptico para favorecer el desarrollo de redes construidas en su totalidad con tecnología óptica. Hemos visto cómo las redes de difracción de Bragg pueden contribuir a este desarrollo, ya que permiten multitud de aplicaciones en este sentido.

No hemos comentado cuál es el proceso que se sigue a la hora de fabricar una red de difracción (lo haremos más adelante), pero sí que hemos comprendido que el patrón de interferencia que grabemos en el núcleo de la red determinará totalmente el comportamiento de la misma.

Se considera a Ken Hill como descubridor de las redes de difracción en 1978 [HILL-78]. Hill introdujo longitudinalmente una onda estacionaria en una fibra óptica mediante un *laser* de Argón. Dicho patrón estaba formado por la reflexión del 4% de la luz en el extremo opuesto de la fibra y la luz incidente, y cuando se retiró el *laser* tras un cierto tiempo de exposición, el patrón de interferencia quedó grabado en el núcleo de la fibra.

Este ejemplo sirve para ilustrar que el descubrimiento de las redes de difracción fue casi una casualidad, y el hecho de que el patrón de interferencia grabado produjera una característica de filtrado fue un descubrimiento que no obedecía a ningún resultado de ninguna investigación previa.

Sin duda, el descubrimiento es extremadamente útil, pero, para obtener una característica de filtrado deseada, era totalmente desconocida la fórmula para hallar el patrón de interferencia que habría de grabarse en el núcleo. Es por este motivo que la síntesis de redes de difracción de Bragg consistía en sus primeras etapas en ensayos de prueba-error, y en conocimientos adquiridos por la experiencia. Con el tiempo, han ido apareciendo algoritmos matemáticos de síntesis, pero nunca exentos de problemas. Por un lado se tienen los algoritmos basados en teoría de acoplo de modos, que resultan matemáticamente complejos, y que su exactitud depende del grado de aproximación que aceptemos en los cálculos. Para salvar esta complejidad, se proponen algoritmos que dividen las redes en partes de estructura conocida para aplicar aproximaciones sobre cálculos realizados con anterioridad para otras redes, pero estos algoritmos carecen de exactitud. Por otro lado se tienen algoritmos que son mucho más exactos, basados en la discretización de la red (teoría de medios multicapa), pero en la mayoría de los casos, o bien requieren de un tiempo de cálculo demasiado largo, o bien necesitan parámetros que a priori son desconocidos desde el punto de vista de la síntesis y que deben ser recuperados de la experiencia.

Por tanto, el objetivo de este proyecto será precisamente encontrar un algoritmo exacto que permita sintetizar redes de difracción de Bragg sin conocer parámetros previos de las mismas, y a ser posible, sin tener un tiempo de computación demasiado largo. El camino a seguir será mejorar los algoritmos existentes basados en la teoría de medios multicapa, y aplicar técnicas que permitan aumentar la velocidad de cómputo de los mismos.

Para no perder la conciencia situacional de los objetivos de este proyecto, se propone una pirámide de objetivos, en la que la cúspide será el objetivo concreto del proyecto, y se irá desarrollando hasta su base para ver cómo ese objetivo concuerda con otros objetivos más amplios y que superan, con mucho, el ámbito de aplicación del presente proyecto.

De este modo, tenemos que el objetivo concreto es la **síntesis exacta de redes de difracción de Bragg en fibra mediante la teoría de medios multicapa**, lo cual permitirá aportar un grado de conocimiento más en el **desarrollo de componentes de red basados en tecnología óptica**. Este desarrollo permitirá, en un futuro, aportar un granito de arena más al objetivo ambicioso de **evolucionar las redes ópticas basadas en WDM**, y la evolución de dichas redes, a su vez, permitirá la transición a las futuras **redes 100% ópticas**.

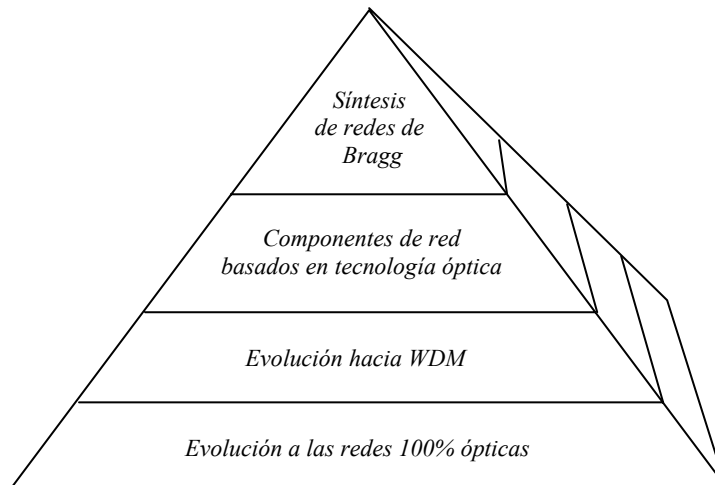


Fig. 1.4. Pirámide de objetivos del presente proyecto.

CAPÍTULO 2: Análisis y síntesis de redes de difracción.

Una vez establecidos los objetivos del proyecto, pasaremos a estudiar cuál es la situación actual en la investigación sobre síntesis de redes de difracción. Debido a que el proceso de síntesis se encuentra ligado al de análisis, haremos en este apartado un recorrido por los algoritmos existentes, tanto de síntesis como de análisis, comentando sus ventajas e inconvenientes. De esta forma sentaremos las bases para, en el siguiente capítulo, explicar a fondo el algoritmo propuesto en el presente proyecto y así poder establecer una comparación, al menos teórica, entre las diferentes soluciones.

3.1. Análisis y síntesis de redes de difracción

Para realizar algoritmos de síntesis que ofrezcan garantías de funcionamiento, es necesario conocer de la forma más exacta posible el principio de funcionamiento interno de las redes de difracción. Para alcanzar este grado de funcionamiento es necesario refinar al máximo los algoritmos de análisis, que permiten, dada una perturbación del índice de refracción del núcleo de la fibra, hallar la reflectividad de la red.

Estos algoritmos de análisis se encuentran en un estado muy avanzado en la investigación, y podemos encontrar ya algunos que gozan de gran exactitud ante cualquier perturbación dada [CARBALLAR-99], permitiendo incluso reconstruir la fase a partir del módulo de la reflectividad, con resultados bastante aceptables.

El método a priori más simple para el análisis de una red de difracción es la integración numérica directa de las ecuaciones de acoplo de modos [KASHYAP-99]. Este método es sencillo y directo, aunque no muy rápido. Otros métodos basados en la solución de estas ecuaciones han sido publicados, estando muy extendido este modo de afrontar el problema.

Otro método interesante consiste en dividir la estructura de la red en pequeñas capas. Dependiendo de la anchura de cada capa tendremos distintos algoritmos, desde el algoritmo de la *matriz de transferencia*, que resuelve las ecuaciones de acoplo para una red uniforme, y luego subdivide la red a analizar en subcapas de redes aproximadamente uniformes [KASHYAP-99], o los métodos que dividen incluso cada periodo de red en distintas capas [CARBALLAR-99].

3.1.1. Teoría de modos acoplados

La teoría de acoplo de modos supone un método directo e intuitivo para el análisis de redes de difracción. El modelo parte de la base de que en el interior de la red se tienen dos campos electromagnéticos, que se propagan en la misma dirección y en sentidos contrarios. El campo eléctrico total se puede entonces modelar según la siguiente expresión:

$$E_{total}(x, y, z) = b_{codireccional}(z)\Phi(x, y) + b_{contradireccional}(z)\Phi(x, y)$$

donde b es una función que determina la propagación de manera longitudinal, y Φ determina la propagación de manera transversal.

Si suponemos que la perturbación del índice de refracción se encuentra sólo longitudinalmente (es sólo función de z), entonces podemos resolver la ecuación anterior para unas condiciones de contorno en las que se produce una variación periódica del índice de refracción, llegando a las conocidas expresiones de acoplo de modos [ERDOGAN-97]:

$$\begin{aligned}\frac{dE^+}{dz} &= -j\delta E^+ + q(z)E^- \\ \frac{dE^-}{dz} &= j\delta E^- - q^*(z)E^+\end{aligned}$$

Los coeficientes b referidos en la expresión anterior se relacionan con los campos en uno y otro sentido (E^+ y E^-) como sigue:

$$\begin{aligned}b_{codireccional}(z) &= E^+(z)e^{(j\frac{\pi}{\Lambda}z)}e^{(j\int_0^z \alpha(z')dz')} \\ b_{contradireccional}(z) &= E^-(z)e^{(j\frac{\pi}{\Lambda}z)}e^{(j\int_0^z \alpha(z')dz')}\end{aligned}$$

donde $\alpha(z)$ es una función que determina la variación del índice de refracción efectivo, y δ es la distancia a la frecuencia central de la red de difracción y depende de la constante de propagación como:

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$$

El coeficiente de acoplo que aparece en las ecuaciones de acoplo de modos depende de la constante de acoplo (K) y de la función $\alpha(z)$ como:

$$q(z) = jK(z)e^{-2j\int_0^z \alpha(z')dz'}$$

Tal y como marcan los límites de la integral, se considera que la red comienza en $z=0$ y termina en $z=L$. Dada la solución de estas ecuaciones, para calcular la característica en reflexión en cualquiera de los puntos de la red basta con evaluar la siguiente expresión:

$$reflectividad(z') = \frac{E^-(z=z')}{E^+(z=z')}$$

Sin embargo, la resolución de estas ecuaciones no siempre es directa, y en redes complejas puede llegar a ser extremadamente complicada. Dado que la solución para redes uniformes es simple y directa, éste es un buen método para analizarlas, y sirve de base para otros métodos que descomponen la red a analizar en capas formadas por redes uniformes.

Para finalizar este breve comentario sobre la teoría de acoplo de modos, comentar que existen dos tipos de redes de difracción en función de que el acoplo se produzca en la misma dirección que el modo incidente (redes de acoplo codireccional o de periodo largo) o que el acoplo se produzca en sentido contrario (redes de acoplo contradiereccional o de periodo corto). Estas últimas serán las que nos interesen en este proyecto, ya que nos interesará la característica en reflexión de las redes. En una red de acoplo contradiereccional, el modo incidente acopla potencia al mismo modo, pero reflejado, y con una característica en reflexión paso de banda.

3.1.2. Síntesis de redes de difracción

Si bien el problema del análisis ha sido bien estudiado y se han hallado soluciones al mismo bastante satisfactorias, no podemos decir lo mismo de la síntesis. La síntesis de una red de difracción consistirá en el paso inverso al que realiza el análisis, es decir, queremos hallar la perturbación que se debe grabar en el núcleo de una fibra para obtener una característica de filtrado que se ajuste a unas especificaciones deseadas de partida.

Diversos autores se han enfrentado a este problema desde ángulos distintos. Una de las técnicas más utilizadas es la *dispersión electromagnética inversa*. La versión más simple, aunque también la más inexacta, de esta técnica consiste en explotar la relación existente entre la función de acoplamiento de la red de difracción y la respuesta espectral del filtro a través de la transformada de Fourier, lo que se conoce como *aproximación de Born de primer orden*. Esta técnica es sin embargo muy inexacta cuando la reflectividad es alta y no es conveniente para el diseño de filtros mediante redes de difracción.

El segundo tipo de técnicas utilizadas dentro de la *dispersión inversa* es la resolución exacta de las ecuaciones de Gelfand-Levitan-Marchenko, que derivan de la fórmula invertida de la ecuación de Schrodinger. El problema de estos métodos es que cuando las redes son complejas, el planteamiento y solución de las ecuaciones también lo es, y las aproximaciones que se realicen conllevan inexactitudes. Peral [PERAL-96] obtiene una solución iterativa a estas ecuaciones que permite sintetizar redes con cierta complejidad.

Un tercer tipo de técnicas, conocidas como *directas* o *diferenciales*, identifican el medio que se está sintetizando dividiéndolo en capas y sintetizando una a una estas capas de forma recursiva [FECED-99]. Estos algoritmos se conocen en la literatura anglosajona como algoritmos *layer-peeling*.

3.1.2.1. Algoritmo de Feced, Zervas y Muriel

Por su importancia, dedicaremos aquí unas líneas al algoritmo propuesto por R. Feced, M. Zervas y M. A. Muriel en 1999. El algoritmo puede consultarse en el artículo publicado por estos autores [FECED-99]. Consiste básicamente en calcular la función de acoplo $q(z)$ a partir de la respuesta impulsiva de la característica en reflexión, lo cual es un dato en el proceso de síntesis. El algoritmo resuelve iterativamente las ecuaciones de acoplo de modos, suponiendo que en el instante $t=0$, y al inicio de la red ($z=0$), se introduce un impulso dado por:

$$b_F(0, \beta) = 1$$

La solución de las ecuaciones de acoplo de modos proporciona el coeficiente de acoplamiento para una red truncada en la primera capa definida. Si tenemos en cuenta la relación entre la función de acoplo y la respuesta impulsiva:

$$h_R(\tau) = -\frac{1}{2}q\left(\frac{\tau}{2}\right) + h_T(\tau)$$

donde $h_T(\tau)$ es la respuesta impulsiva en el tiempo τ correspondiente a un medio truncado en $z=(\tau/2)^-$, y h_R es la suma de todos los caminos de propagación posibles (z, τ) entre $(0,0)$ y $(0,\tau)$, podemos entonces reconstruir la función de acoplo en un punto $\tilde{z}$ conociendo el valor de la respuesta impulsiva en $\tau=2\tilde{z}$ y el valor de la función de acoplo en $z < \tilde{z}$.

Recapitulando, tenemos un medio que discretizamos en múltiples capas, las cuales vamos calculando de forma iterativa a partir de una condición inicial que supone un impulso a la entrada de la red. Mediante la resolución de las ecuaciones de acoplo de modos con las condiciones de contorno adecuadas, vamos resolviendo cada capa, y los resultados se van almacenando en una matriz de transferencia que se actualiza a cada capa que se va resolviendo. Este algoritmo tiene una cierta aproximación, derivada de la discretización del medio, pero resulta bastante exacto y eficiente en los cálculos. Una pequeña mejora que proporciona algo más de eficiencia ha sido propuesta por Skaar, Wang y Erdogan [SKAAR-01].

El algoritmo de Feced proporciona unos resultados excelentes, ya que el trabajo con la respuesta impulsiva asegura que se tienen en cuenta todas las reflexiones internas que se producen en la estructura. Con este algoritmo, el autor sintetiza filtros paso banda con caídas abruptas de hasta -60dB, y filtros compensadores de la distorsión de tercer orden con unos resultados más que aceptables.

Si cabe alguna crítica al algoritmo, sería quizá el tiempo de cómputo y al complejidad de cálculo, que crece con el cuadrado del número de puntos de la red. Este hecho será una constante en prácticamente todos los algoritmos de síntesis, en los que encontraremos un compromiso entre velocidad y exactitud a medida que crece la complejidad o la longitud de la red.

Sin embargo, la gran importancia de este algoritmo radica en la discretización del medio, lo cual permite afrontar redes de una complejidad que sería impensable afrontar con métodos de síntesis basados en aplicar las ecuaciones de acoplo de modos a la estructura de la red completa. Precisamente esta discretización del medio inspirará el algoritmo que se presenta en este proyecto, aunque la síntesis de cada capa será radicalmente diferente.

3.1.2.2. Algoritmo de Poladian

Con el objetivo de obtener un algoritmo de síntesis simple, cuyo planteamiento matemático no oscurezca el proceso, L. Poladian [POLADIAN -00] propone un algoritmo en el cual se van resolviendo las ecuaciones de acoplo de modos al mismo tiempo que se evalúa una integral que denomina *relación de síntesis*. Más concretamente, expresamos las ecuaciones de acoplo de modos como:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dz}u(z,\delta) &= j\delta u(z,\delta) + jq(z)v(z,\delta) \\ \frac{d}{dz}v(z,\delta) &= -j\delta v(z,\delta) - jq^*(z)u(z,\delta)\end{aligned}$$

donde los perfiles del campo $u(z,\delta)$ y $v(z,\delta)$ se obtienen aplicando condiciones de contorno $u(L,\delta)=1$ y $v(L,\delta)=0$ en el punto $z=L$ de la red y solucionando las ecuaciones diferenciales en el sentido de las z decrecientes hasta $z=0$. El coeficiente de reflexión queda por tanto como:

$$r(z,\delta) = \frac{v(z,\delta)}{u(z,\delta)}$$

El algoritmo de Poladian funciona entonces como sigue: las condiciones de contorno $u(0,\delta)=1$ y $v(0,\delta)=r(\delta)$ se especifican al inicio de la red. Se resuelve el sistema de ecuaciones acopladas en la dirección de las z crecientes para obtener los coeficientes de reflexión parciales $r(z,\delta)$, mientras que simultáneamente se evalúa $q(z)$ para cada valor de z de acuerdo a la integral:

$$q(z) = \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r^*(z,\delta) d\delta$$

que es la *relación de síntesis* comentada con anterioridad.

Este algoritmo es quizá el más simple que podemos proponer, pero adolece de una gran exactitud, de acuerdo al compromiso entre complejidad y exactitud que también comentábamos anteriormente.

3.1.2.3. Algoritmo de Rouard

Volviendo a la teoría de medios multicapa, otro método interesante es el método de Rouard [KASHYAP-99], que consiste en dividir la estructura en capas para luego reemplazar cada capa por una interfaz con una reflectividad compleja, que incluya el cambio de fase al atravesar la capa. Se aplica entonces una técnica recursiva para ir calculando el coeficiente de reflexión complejo que representa a cada capa. Este método es simple y directo, pero tiene el problema de que arrastra pequeños errores en el cálculo de los coeficientes, lo que puede ser un problema cuando las longitudes de la red son muy grandes, o el número de capas aumenta. Adelantamos aquí también que el algoritmo propuesto en este proyecto se basa también en parte en la representación de capas por interfaces con coeficientes de reflexión, pero, como veremos, los errores se cancelan resultando un método exacto.

3.2. Conclusiones

En este breve repaso por los actuales métodos de síntesis publicados, vemos que los métodos derivados de la solución de las ecuaciones de modos acoplados son los más extendidos. Aplicar dichas ecuaciones a la red completa a sintetizar supone un método directo y relativamente sencillo a pesar de la dificultad matemática que supone el manejo de ecuaciones diferenciales acopladas, pero cuando las redes presentan complejidades como variaciones en el periodo de red o saltos de fase, la aplicación directa de las ecuaciones resulta inmanejable.

Ello supone la necesidad de dividir la red en capas de mayor o menor longitud, lo que supone entrar en la teoría de medios multicapa. Dado que la solución de las ecuaciones de acoplo de modos es sencilla para redes uniformes, lo más directo parece dividir la red a sintetizar en secciones uniformes y aplicar las ecuaciones, pero en el proceso de síntesis este método es demasiado inexacto. Llevar el espesor de las capas a longitudes del orden del periodo de red supone un gran incremento de exactitud, pero por otro lado, bien la complejidad del cálculo matemático o el tiempo de simulación se vuelven demasiado grandes si se quiere mantener un alto grado de exactitud.

CAPÍTULO 3: Algoritmo exacto de síntesis mediante la teoría de medios multicapa

Una vez comprendidos los problemas que presenta la síntesis de redes de difracción, entramos en materia para explicar el algoritmo propuesto en el presente proyecto. Se explicarán con detalle todos los aspectos del mismo, enfatizando en aquéllos que se relacionan con algoritmos ya propuestos, o que solucionan aspectos negativos de los mismos. Se comenzará con una explicación cualitativa del algoritmo para pasar más tarde a una revisión paso a paso del mismo, deteniéndonos en todos los cálculos matemáticos necesarios para su comprensión.

3.1. Consideraciones previas

3.1.1. División de la red en capas

Al tratarse de un algoritmo basado en la teoría de medios multicapa, el primer paso será dividir la red a sintetizar en capas. Para decidir la longitud que tendrán dichas capas, se tomará como dato la reflectividad que se quiere conseguir con la red a sintetizar, se observará la máxima frecuencia existente en la banda de paso y a partir de ella y de las ecuaciones que determinan el comportamiento de las redes de difracción, se determinará el periodo mínimo que tendrá la red. Con este periodo mínimo se hallará la longitud de las capas, que será siempre al menos un orden de magnitud menor que la longitud de dicho periodo mínimo de red. Un estudio más detallado de este cálculo se puede observar en el capítulo dedicado a especificaciones que se desarrolla más adelante. La razón de escoger una longitud de capa tan pequeña es la de tener un algoritmo que funcione bien independientemente de la complejidad de la red, asegurándonos de que con estas longitudes de capa cubrimos con exactitud saltos de fase y otras variaciones pequeñas que pasarían desapercibidas con longitudes de capa mayores, perdiéndose la exactitud deseada.

Una vez determinada la longitud de capa, es importante remarcar que dicha longitud no permanecerá constante a lo largo del proceso de síntesis, con objeto de mantener la exactitud. Para explicar este hecho es necesario comprender primero que este algoritmo se basa en la interpretación de la respuesta impulsiva en reflexión de la red, la cual obtenemos directamente mediante la transformada de Fourier de la reflectividad, que será un dato del problema. Cada capa se calculará mediante un punto de dicha respuesta impulsiva, es decir, el valor de la respuesta impulsiva en $t=0$ servirá para determinar el valor del índice de refracción en $z=0$, y el siguiente valor de la respuesta impulsiva, en $t=t_1$, servirá para obtener el valor del índice de refracción en:

$$h_R(t=t_1) \Rightarrow n(z = \frac{c}{n} t_1)$$

donde n es el valor del índice de refracción calculado de la capa anterior mediante el valor en $t=0$ de la respuesta impulsiva en reflexión.

Debido a que el algoritmo se programará en un computador, y debido a las propias definiciones de la transformada discreta de Fourier, el tiempo que transcurre entre cada dos puntos de la respuesta impulsiva es siempre constante y depende del número de puntos que se tomen para definir la respuesta en frecuencia de la reflectividad. Si suponemos que la longitud de capa es constante, estamos cometiendo un error, ya que **al variar el índice de refracción en cada capa, la velocidad con la que la luz recorre la estructura va variando al compás de la variación de dicho índice**. Entonces, si el tiempo entre muestras es constante, y la velocidad de la luz es variable, no queda más remedio que aceptar que la longitud de capa debe ser también variable, para no incurrir en errores que lleven a inexactitudes.

Es muy importante remarcar que errores de este tipo pueden llevar a una no convergencia del algoritmo, y por tanto hay que controlarlos de forma sistemática. De todos modos, profundizaremos en estas cuestiones cuando analicemos el fundamento matemático del algoritmo.

3.1.2. Estructura de cada capa y matriz de transmisión.

Entraremos ahora a analizar cómo va a ser la estructura de las capas que vamos a tratar. Ya hemos visto que su longitud será variable y dependerá del índice de refracción, ahora nos detendremos en observar el modelo de su estructura interna, que hemos representado en la figura 3.1.

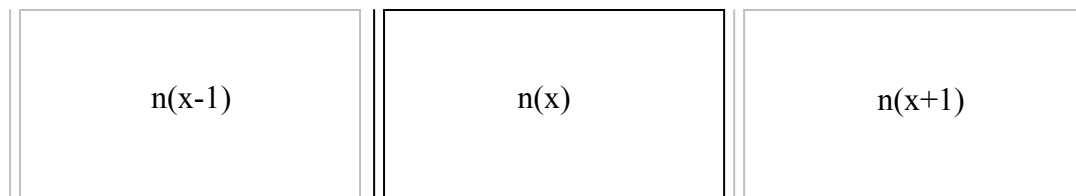


Fig. 3.1. Estructura de capas de la red de difracción. Se observa que cada capa es una guía de ondas (en este caso luminosas) con coeficiente de refracción constante. Se ha remarcado la interfaz entre cada capa como una lámina de espesor despreciable.

Modelaremos la estructura del núcleo de la fibra como una sucesión de capas de material dieléctrico con índice de refracción constante. La pequeña longitud de capa que se tomará, que ya hemos comentado que se tomará como mínimo un orden de magnitud menor que el mínimo periodo de red, asegurará que se mantiene la exactitud y que el pequeño error cometido será despreciable. Como existe un cambio de índice entre cada capa, tenemos una interfaz entre dieléctricos que marcará la discontinuidad del cambio de índice.

Cada capa, como vemos en el dibujo, se compone de dos estructuras. La primera de ellas es la interfaz dieléctrica que acabamos de comentar, y la segunda es una capa de dieléctrico con índice de refracción constante y longitud la marcada por el tiempo entre muestras de la respuesta impulsiva y la velocidad de la luz en el medio dieléctrico.

Para estudiar una estructura multicapa como la mostrada, existe una formulación matemática que permite modelar cada capa con una matriz, y el conjunto entero como la multiplicación de las matrices de cada capa, lo cual hace que el manejo matemático sea sencillo. Para no perdernos en formulaciones matemáticas cuando veamos el algoritmo de forma cuantitativa, desarrollaremos ahora el modelado matemático de las capas mediante las denominadas *matrices de transmisión*, para luego utilizarlo directamente.

La *matriz de transmisión* es una de las formas más frecuentes de caracterizar redes de microondas de dos puertos, aunque también podemos aplicarla al ámbito de la fotónica, que es lo que aquí nos interesa. La *matriz de transmisión* se define, para una estructura de dos puertos, como indica la figura, y su principal ventaja radica en que la matriz de transmisión de estructuras de dos puertos en cascada es el producto de las submatrices de transmisión de todas las subestructuras [REINA-03].

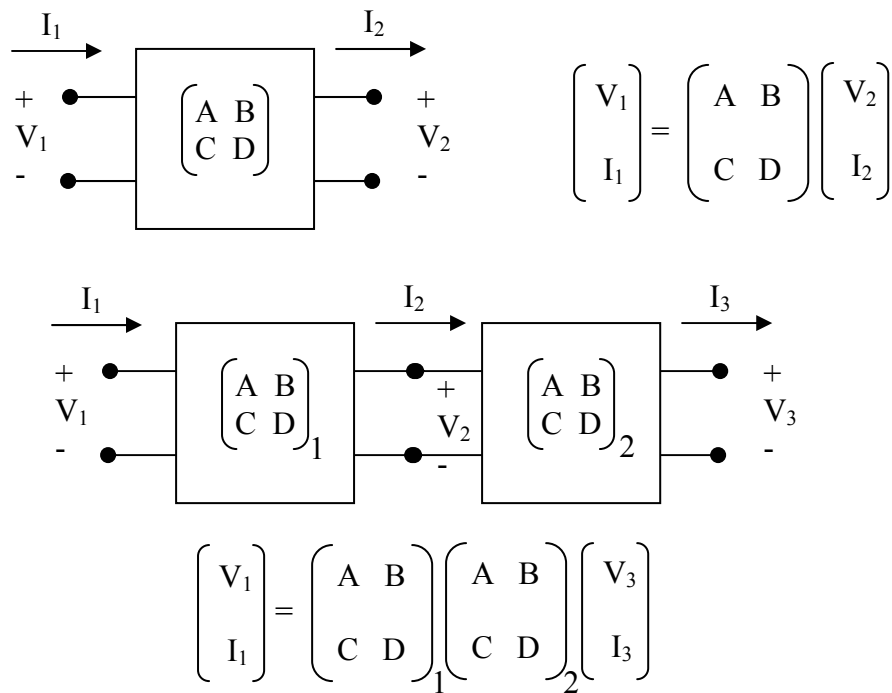


Fig. 3.2. Matriz de transmisión. En la parte superior se ha representado la definición de dicha matriz, y en la inferior, la propiedad de que la matriz de transmisión de dos bloques en cascada es el producto de las matrices de transmisión de cada uno de esos bloques.

Para calcular las matrices de transmisión de las distintas capas, resulta de utilidad otra matriz, denominada *matriz de transmisión de ondas* que relaciona ondas incidentes y reflejadas. Se define de la siguiente forma:

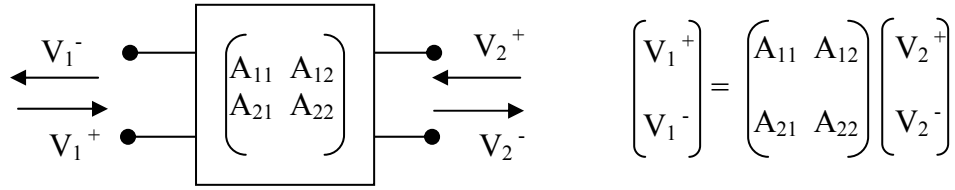


Fig. 3.3. Definición de la matriz de transmisión de ondas.

Los elementos de la matriz de transmisión se pueden expresar en función de los coeficientes de reflexión y transmisión del medio pasando por el cálculo intermedio de los parámetros s de la estructura. Para calcular los parámetros de la matriz de transmisión de ondas de la interfaz que separa medios dieléctricos con distintos índices de refracción, tenemos:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \frac{1}{s_{21}} = \frac{1}{\tau_{12}} = \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \\
 A_{12} &= \frac{-s_{22}}{s_{21}} = \frac{\rho_{12}}{\tau_{12}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \\
 A_{21} &= \frac{s_{11}}{s_{21}} = \frac{\rho_{12}}{\tau_{12}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \\
 A_{22} &= \frac{s_{12}s_{21} - s_{11}s_{22}}{s_{21}} = \frac{1}{\tau_{12}} = \frac{n_1 + n_2}{2n_1}
 \end{aligned}$$

Debido a que se trata de un medio simétrico y recíproco, se han aprovechado las características de este tipo de medios para simplificar las expresiones. Para el caso de la interfaz que separa los medios dieléctricos de longitud finita e índice de refracción constante, $n_1 = n_2$ y por tanto, y aplicando las ecuaciones de transformación entre la matriz de transmisión de ondas y la matriz de transmisión, se tiene que:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Vemos entonces que para la interfaz que separa los medios dieléctricos de longitud finita e índice de refracción constante, la matriz de transmisión es la matriz unidad. Este resultado es de gran importancia debido a que simplifica los cálculos al realizar la multiplicación en cascada de todas las matrices de transmisión de la estructura.

Para hallar la matriz de transmisión de la capa dieléctrica que completa la estructura de la capa que estamos analizando, se seguirá un procedimiento similar. No nos detendremos en este caso a realizar los cálculos, que por su generalidad pueden encontrarse en la bibliografía [REINA-03]. Se puede demostrar que la matriz de transmisión de un segmento de línea de transmisión de longitud L e impedancia característica Z_c viene dada por:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta L) & jZ_c \sin(\beta L) \\ jY_c \sin(\beta L) & \cos(\beta L) \end{pmatrix}$$

En nuestro caso tenemos una línea de transmisión, pero formada por un segmento de fibra óptica. Esto significa que debemos particularizar la constante de propagación como:

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$$

donde n es el índice de refracción de la capa a analizar, y Z_c es la impedancia característica del segmento, que también depende del índice de refracción:

$$Z_c = \frac{120\pi}{n}$$

Debido a que una capa está formada por una interfaz que separa medios dieléctricos y un segmento de fibra con índice de refracción constante, para hallar la matriz de transmisión de una capa habrá que multiplicar las matrices de transmisión de estos dos elementos. Como una de ellas es la unidad, la matriz de transmisión de una capa es la matriz de transmisión dada por:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta L) & jZ_c \sin(\beta L) \\ jY_c \sin(\beta L) & \cos(\beta L) \end{pmatrix}$$

y por tanto, la matriz de transmisión de toda la estructura de la red de difracción se hallará multiplicando las matrices de transmisión de cada una de las capas. Más adelante, en la explicación matemática del algoritmo de síntesis, veremos los pasos necesarios para realizar estos cálculos.

3.2. Obtención de los índices de refracción

Pasaremos ahora a describir el proceso que sigue el algoritmo para sintetizar la red, siguiendo una perspectiva completamente cualitativa. Será en el apartado siguiente donde, tras todas las consideraciones previas vistas, analicemos el algoritmo desde un punto de vista cuantitativo para comprender todos sus aspectos.

El método será, como hemos comentado anteriormente, dividir la red de difracción en capas, y el algoritmo se basará en ir obteniendo el índice de refracción correspondiente a cada capa, utilizando como dato de partida la respuesta impulsiva en reflexión, y utilizando las matrices de transmisión para ir avanzando por las capas del dispositivo.

Cuando la luz viaja por el núcleo de la fibra, lo hace por un medio que tiene, al menos teóricamente, un índice de refracción constante. Es al llegar a la red de difracción cuando la luz ve un cambio en el índice de refracción y experimenta la primera reflexión y refracción. Este hecho se ilustra en la figura que acompaña.

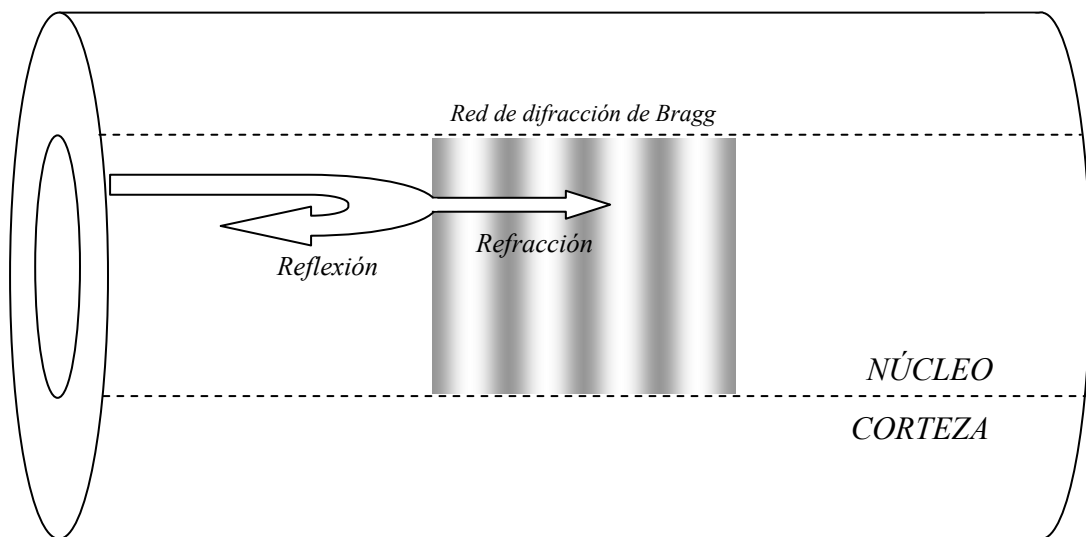


Fig. 3.4. Primera reflexión de la luz en la red. Se ha representado dicha reflexión de una forma muy esquemática para hacer notar que la red de difracción es un elemento que rompe con la estructura normal del núcleo de la fibra.

La luz reflejada en este primer instante es la primera componente de luz que contribuye a la reflectividad de la red. Por ello, la información de esta primera reflexión está contenida en el primer coeficiente de la respuesta impulsiva en reflexión, como muestra la siguiente expresión:

$$h_r(0) = \rho_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

siendo n_0 el índice de refracción del núcleo de la fibra, y n_1 el índice de refracción de la primera capa, que queremos sintetizar. Por tanto, si tenemos especificada la respuesta frecuencial en reflexión, podemos, mediante la transformada de Fourier, obtener la respuesta impulsiva en reflexión, y mediante la expresión anterior, sintetizar cuál debe ser el índice de refracción de la primera capa.

Como hemos comentado, al llegar a esta primera capa la luz sufre una reflexión (que contribuye a la reflectividad del dispositivo) y una refracción, es decir, una componente de la luz que se adentra en la red, cruza la primera capa, y encuentra una nueva interfase en la que el índice de refracción vuelve a cambiar, produciéndose nuevamente una reflexión y una refracción. El proceso de reflexión y refracción que sufre la luz en esta segunda capa queda ilustrado en la siguiente figura.

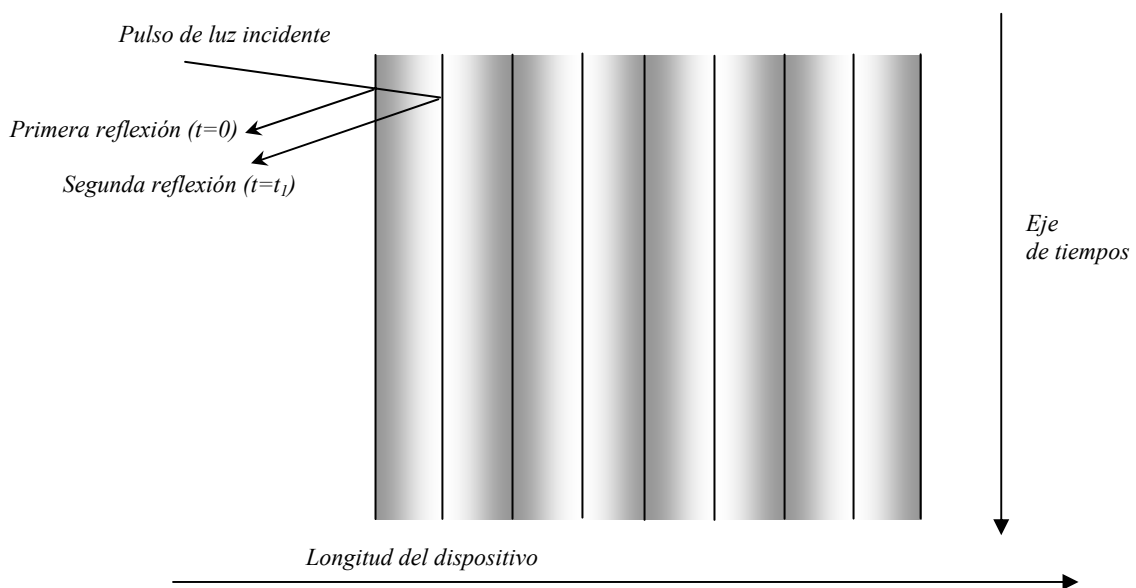


Fig. 3.5. Reflexión en la segunda capa de la red. En esta figura se muestran las capas separadas por líneas continuas. Se entiende que el eje vertical es de tiempos, y por eso observamos los haces de luz como líneas inclinadas, debido a que la luz tarda cierto tiempo en recorrer las capas. En el dispositivo real, se entiende que la luz incidente llega perpendicular a la red de difracción.

La luz que se refleja en la segunda capa vuelve hacia atrás y llega a la interfase entre la primera capa y la segunda. En dicha interfase se vuelve a producir una reflexión y una refracción, como en toda discontinuidad. El proceso de refracción es el que nos interesa, ya que provoca que la luz llegue finalmente al principio del dispositivo, donde vuelve a sufrir una refracción más hasta salir de él. La luz que llega hasta este punto proviene de la reflexión directa en la segunda capa, y se relaciona con el valor del coeficiente de la respuesta impulsiva en reflexión en el siguiente instante de tiempo. La siguiente expresión, derivada, como en el caso anterior, de las fórmulas de Fresnel, indica el proceso que tiene lugar y cómo se puede sintetizar el índice de refracción de la segunda capa a partir del segundo coeficiente de la respuesta impulsiva en reflexión.

$$h_r(1) = \tau_{01}\rho_{12}\tau_{10}$$

$$\rho_{12} = \frac{h_r(1)}{\tau_{01}\tau_{10}} = \frac{(n_0 + n_1)^2 h_r(1)}{4n_0 n_1}$$

$$n_2 = n_1 \left[\frac{1 - \rho_{12}}{1 + \rho_{12}} \right]$$

A la hora de sintetizar la tercera capa el problema no es tan sencillo, ya que intervienen las resonancias internas. En la siguiente figura se representa la situación, en la que podemos apreciar que la luz que se refleja hacia el principio del dispositivo contiene la componente de reflexión directa en la primera capa, con la que hemos estado trabajando en las capas anteriores, y también otra componente formada por una resonancia interna en la primera capa.

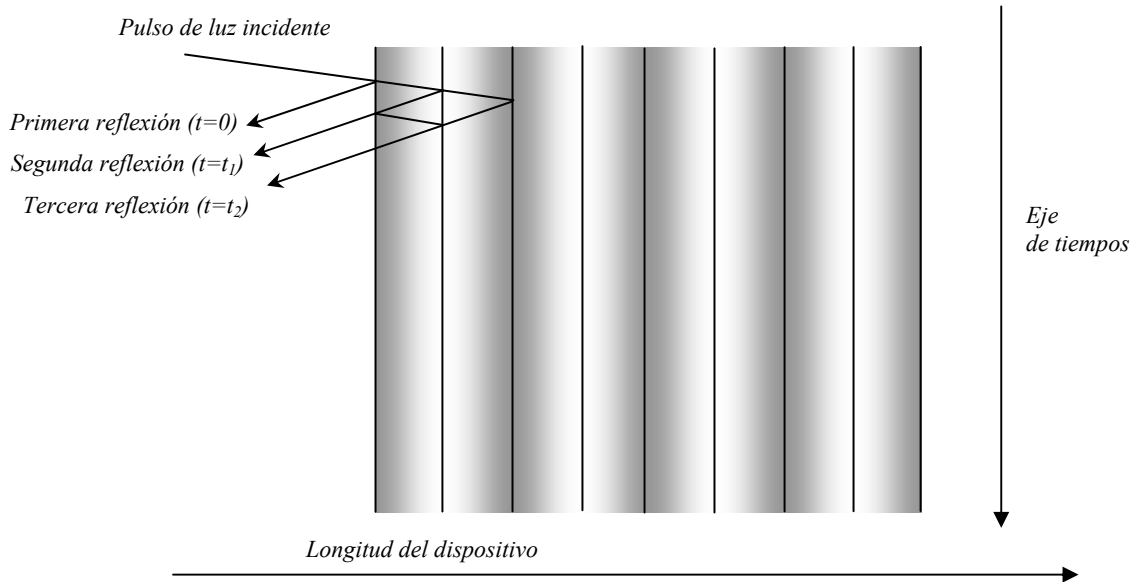


Fig. 3.6. Reflexiones en la tercera capa. En esta figura se observa cómo la luz que se refleja en la segunda capa se vuelve a reflejar en la primera, luego nuevamente en la segunda (reflexiones internas) para más tarde contribuir al haz de luz que finalmente sale del dispositivo en el instante t_2 , junto con el haz de reflexión directa en la tercera capa. Es por ello que para el cálculo de esta capa debemos tener en cuenta las reflexiones internas.

Conocemos el proceso para sintetizar el índice de refracción cuando sólo tenemos una reflexión directa, utilizando las fórmulas de Fresnel, pero no podemos ignorar las resonancias internas si queremos mantener la exactitud del algoritmo. Afortunadamente, podemos dividir el problema en dos partes. Por un lado, podemos estudiar a reflexión directa, problema que sabemos cómo resolver, y por otro, tenemos el problema de las resonancias internas.

Como ambos problemas están superpuestos, podemos también aplicar superposición en lo que se refiere al coeficiente de la respuesta impulsiva en reflexión, dividiéndolo en parte de reflexión directa, y en parte correspondiente a reflexiones internas:

$$h_r(2) = h_r^{ri}(2) - h_r^{rd}(2)$$

El valor de $h_r(2)$ es conocido, por ser un dato, y el valor de h_r^{ri} nos es desconocido. Si pudiéramos obtenerlo, podríamos entonces hallar el valor de h_r^{rd} y con él, a través de las fórmulas de Fresnel, el valor del índice de refracción sintetizado para la primera capa. Conceptualmente, lo que se está haciendo es descomponer el problema en la reflexión directa y las resonancias internas. Una vez que sabemos que a través de la reflexión directa y las fórmulas de Fresnel podemos solucionar el problema de síntesis, lo que debemos hacer es restar al problema total el problema de las resonancias internas para completar el algoritmo.

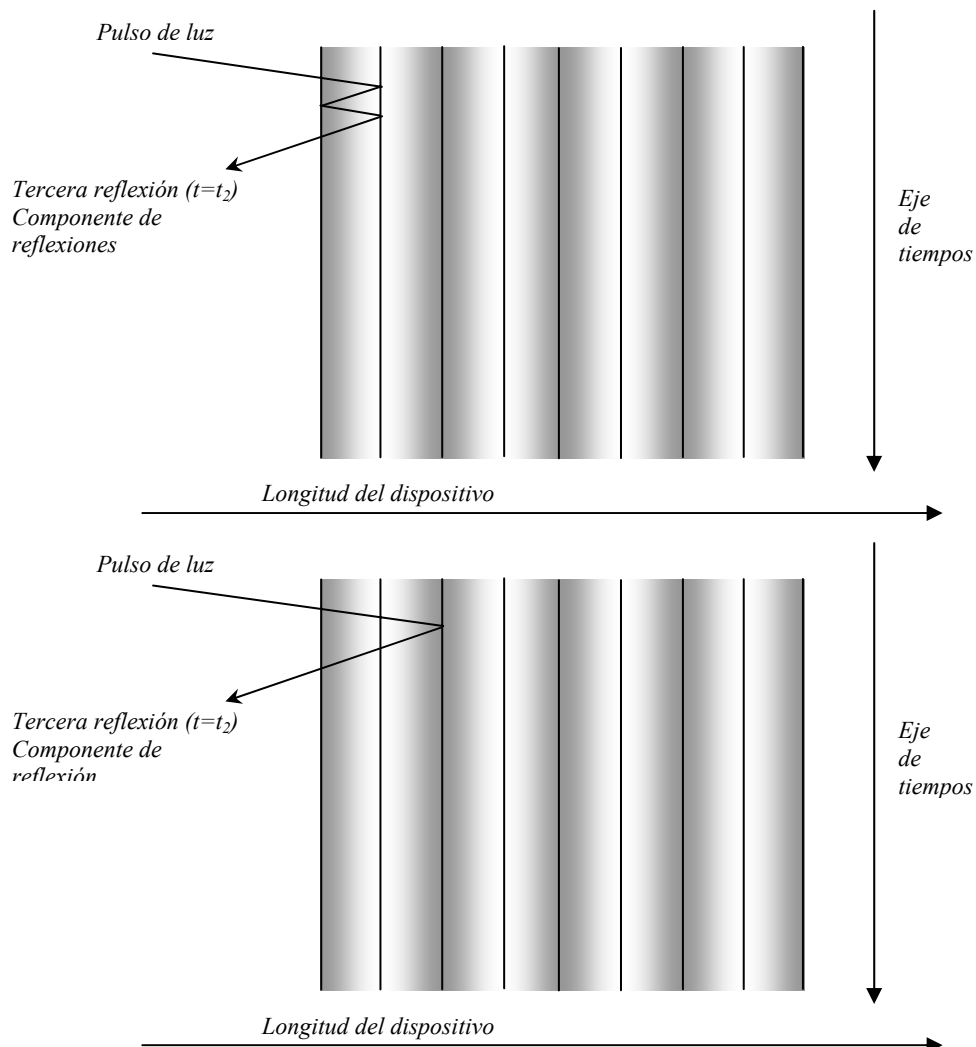


Fig. 3.7. Separación de resonancias internas y reflexión directa. En la parte superior de la figura se representan las componentes de reflexión interna, que tienen lugar en el seno de la primera capa, y en la parte inferior se representa la componente de reflexión directa, a partir de la cual se puede sintetizar el índice de refracción.

Como veremos en el apartado siguiente, la formulación de matrices de transmisión permite separar los problemas de las resonancias internas y la reflexión directa, a la vez que permite trasladar todo este contexto de una capa a otra para ir obteniendo recursivamente todos los índices de refracción de la red.

Una conclusión muy importante que se debe extraer es que la división en capas viene marcada desde el proceso de especificaciones. Cuando se establezca el número de puntos que tendrá la reflectividad, la respuesta impulsiva en reflexión tendrá el mismo número de puntos que la reflectividad, debido a las propiedades de la FFT. El número de puntos de la respuesta impulsiva en reflexión, a su vez, marcará el tiempo entre muestras (a mayor número de puntos, menor tiempo entre muestras). El tiempo entre muestras, junto con el índice de refracción, del cual depende la velocidad de la luz, determinará la longitud de cada capa. Por ello, hemos de concluir que el proceso de especificaciones determinará siempre el correcto funcionamiento del algoritmo, y por ello es muy importante que las especificaciones se determinen correctamente. Trataremos de dicho apartado sobre especificaciones más adelante en esta memoria.

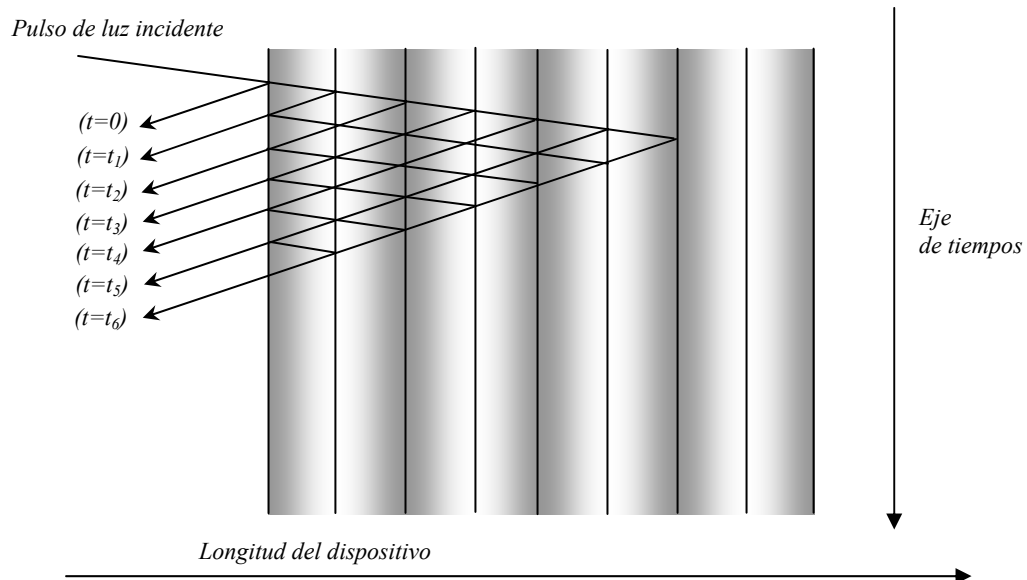


Fig. 3.8. Generalización del proceso de reflexiones en las distintas capas del dispositivo. En la figura se observa cómo a medida que avanzamos en el dispositivo, las reflexiones internas tienen cada vez una mayor contribución. Sin embargo, esto no afecta a la complejidad del algoritmo ni a su rendimiento en cada capa, ya que cada capa se calcula a partir de actualizar la matriz de transmisión, que tiene todas estas reflexiones en cuenta.

3.3. Desarrollo del algoritmo

Una vez visto el algoritmo de una forma cualitativa, pasaremos ahora a un estudio paso a paso del mismo, deteniéndonos en todas las consideraciones matemáticas necesarias. Se recomienda, para este apartado, consultar los planos del presente proyecto, que incluyen los diagramas de flujo del algoritmo y el código del mismo. Es importante recalcar que el algoritmo que presentaremos aquí no se implementa exactamente igual en el código final del mismo. Más adelante comentaremos que para mejorar la eficiencia en cuanto a velocidad del algoritmo, será necesario aplicar una serie de técnicas especiales. Estas técnicas se encuentran ya aplicadas en el código que aparece en los planos, y no serán comentadas en este apartado, sino más adelante. Sin embargo, es importante recalcar que las mejoras en cuanto a velocidad no modifican de ningún modo la base matemática, por lo que el algoritmo se presenta aquí tal cual es.

Una vez realizada esta consideración, comenzaremos a estudiar matemáticamente el algoritmo. Lo primero que debemos realizar son una serie de cálculos previos que se utilizarán a lo largo de todo el proceso.

Como ya se ha venido comentando, la respuesta impulsiva en reflexión es un dato del problema, proveniente del proceso de especificaciones (para un listado de los datos del problema, consultar el pliego de condiciones). De la respuesta impulsiva en reflexión se obtiene la reflectividad (en frecuencia), y de dicha reflectividad obtenemos la frecuencia máxima con la que vamos a trabajar. A partir de dicha frecuencia máxima se obtiene una anchura de capa mínima, a través de la siguiente relación:

$$\Delta z = \frac{c/n_{med}}{4f_{max}}$$

Demostración:

Sabemos, por las propiedades de la transformada de Fourier, que: $\frac{1}{f_{max}} = \Delta t$

Por otro lado, el tiempo de muestreo es el tiempo que tarda la luz en recorrer una capa dos veces (ida y vuelta), por lo que, tomando un índice de refracción medio:

$$t_{muestreo} = \frac{2\Delta z}{c/n_{med}}$$

Sustituyendo: $\Delta t = 2t_{muestreo} \Rightarrow f_{max} = \frac{1}{2t_{muestreo}} = \frac{1}{4\Delta z / (c/n_{med})}$

De donde se obtiene la expresión que queríamos demostrar

Realizaremos una serie de consideraciones adicionales sobre este valor, que será de vital importancia cuando apliquemos las matrices de transmisión para trasladarnos de una capa a otra.

Al inicio del algoritmo se realiza este cálculo y otros que no vamos a comentar aquí, referentes reserva de memoria de las variables, puesta al valor inicial de índices, etc., que corresponden a una preparación de datos para su tratamiento en matlab.

Realizados estos cálculos previos, calculamos los índices de refracción de las primeras capas, que como hemos comentado anteriormente, no requieren del cálculo de la respuesta resonante. Como vimos en el apartado anterior:

$$h_R(0) = \rho_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \Rightarrow n_1 = n_0 \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$$

$$h_r(1) = \tau_{01} \rho_{12} \tau_{10}$$

$$\rho_{12} = \frac{h_r(1)}{\tau_{01} \tau_{10}} = \frac{(n_0 + n_1)^2 h_r(1)}{4n_0 n_1}$$

$$n_2 = n_1 \left[\frac{1 - \rho_{12}}{1 + \rho_{12}} \right]$$

Para la tercera capa es necesario el cálculo de la respuesta resonante. Para realizar este cálculo, supondremos que la capa anterior a la que estamos sintetizando es infinita, de este modo, la luz que se refracta hacia delante en el dispositivo no vuelve a reflejarse en un medio posterior, sino que se pierde en el infinito. De este modo, tenemos la situación correspondiente a las resonancias internas:

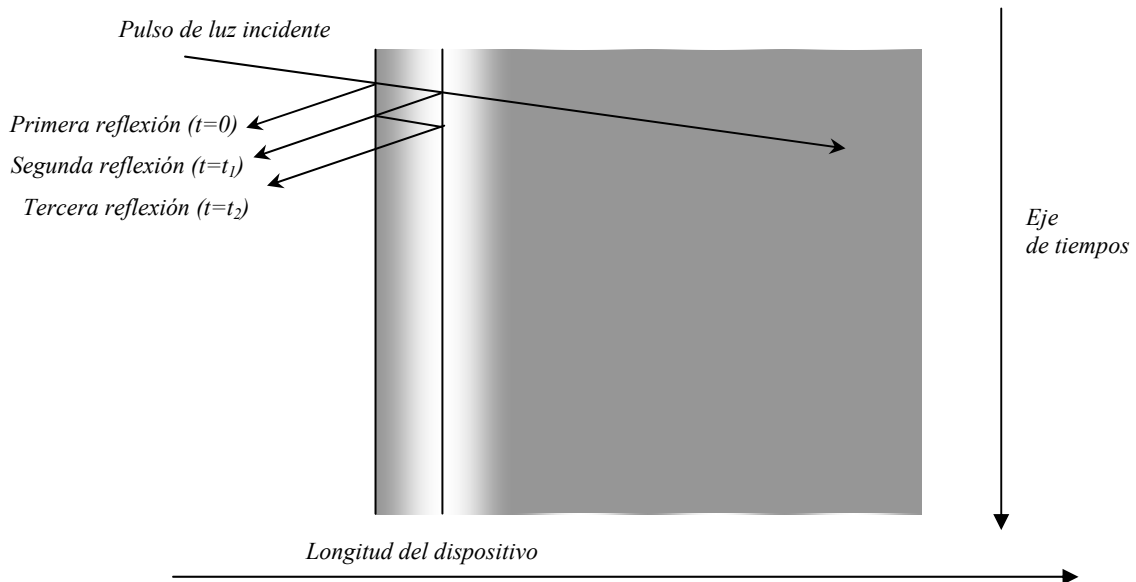


Fig. 3.9. Resonancias internas con medio infinito. Observamos en la figura que si el medio siguiente es infinito, la componente directa de la luz nunca vuelve, y por tanto no se superpone a las resonancias internas en el instante $t=t_2$. Este formalismo matemático es el que se utiliza para separar la respuesta resonante de la respuesta total.

Para hallar la respuesta en frecuencia de las resonancias internas utilizaremos la matriz de transmisión. La situación que tenemos es la siguiente:

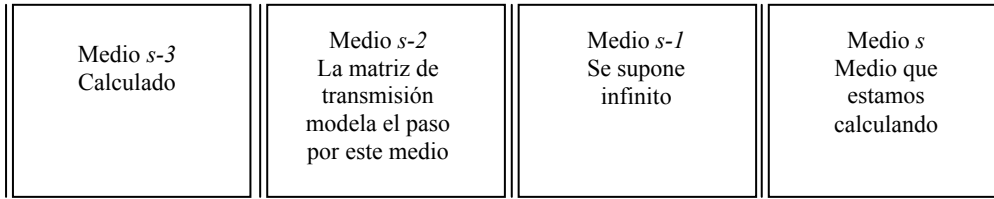


Fig. 3.10. Situación de cálculo general para la síntesis del índice de refracción del medio nombrado como s . Las impedancias necesarias se calculan teniendo en cuenta las referencias aquí designadas, sabiendo que mantener este orden es fundamental para la convergencia del algoritmo.

Como observamos en la figura, la primera capa ya ha sido calculada, al igual que la segunda. Lo que buscamos son las resonancias internas que se producen dos capas hacia atrás de la que estamos calculando, como ya hemos visto en las figuras. Por ello, la segunda capa se modela como de espesor infinito (estamos calculando la tercera capa) y aplicamos la matriz de transmisión a la primera capa para obtener la respuesta en frecuencia de las resonancias internas, que se producen, para este caso, en la primera capa.

Para ser más precisos, lo que se está haciendo no es calcular la respuesta en frecuencia de las resonancias internas, sino la respuesta en frecuencia en reflexión de la estructura completa a través de la matriz de transmisión. La clave está en que al suponer infinita la capa que se encuentra a continuación de las resonancias internas, la respuesta que se calcula es la correspondiente a éstas.

Se puede demostrar [REINA-03] que la respuesta impulsiva de las resonancias internas, a la que anteriormente hemos llamado h_r^{ri} , se puede obtener a partir de los elementos de la matriz de transmisión como:

$$H_r(\omega) = FFT(h_r(t)) = \frac{A + \frac{B}{Z_2} - CZ_0 - D \frac{Z_0}{Z_2}}{A + \frac{B}{Z_2} + CZ_0 + D \frac{Z_0}{Z_2}}$$

Los elementos A,B,C y D son los elementos de la matriz de transmisión, que como vimos en un apartado anterior, viene dada por:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta L) & jZ_c \sin(\beta L) \\ jY_c \sin(\beta L) & \cos(\beta L) \end{pmatrix}$$

Donde las impedancias son:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{n_0}$$

$$Z_c = \frac{120\pi}{n_{s-1}}$$

$$Z_2 = \frac{120\pi}{n_{s-2}}$$

donde n_0 es el índice de refracción del núcleo, n_{s-2} es el índice de refracción de la capa anterior a la considerada infinita, es decir, la capa atravesada por la matriz, y n_{s-1} es el índice de refracción de la capa considerada infinita.

El argumento de las funciones trigonométricas es:

$$\Phi = \frac{\omega}{c} n(z) \Delta z$$

Aquí es donde observamos el parámetro Δz que comentábamos con anterioridad. La importancia del parámetro Φ es muy grande, porque significa el desplazamiento de la onda a través de una capa cuya longitud es constante. A continuación demostraremos que la exactitud se mantiene siempre a pesar de que la longitud de las capas vaya variando, ya que el argumento de las funciones trigonométricas, que es lo que marca el desplazamiento de la matriz por el dispositivo, se mantiene constante.

Demostración:

Si particularizamos para una capa concreta de longitud z_m , se tiene: $\Phi = \frac{\omega}{c} n(z) \Delta z = \frac{2\pi f}{c} z_m n(z)$

La longitud de esta capa se puede expresar como: $z_m = \frac{c}{n(z)} t_{\text{muestreo}}$, luego si sustituimos en la expresión anterior:

$\Phi = n(z) \frac{c}{n(z)} t_{\text{muestreo}} \frac{2\pi f}{c} = t_{\text{muestreo}} 2\pi f$, y como $t_{\text{muestreo}} = \frac{\Delta z}{c/n_0}$, entonces queda:

$$\Phi = \frac{n_0 z_m \Delta z f}{c}$$

Una vez llegados a este punto, tenemos la respuesta impulsiva en reflexión total, que es un dato, y la respuesta impulsiva en reflexión de las resonancias internas. Restando una de la otra obtenemos la respuesta impulsiva en reflexión de la reflexión directa, y mediante la fórmula de Fresnel, obtenemos el coeficiente de reflexión correspondiente a la capa que estamos sintetizando.

$$\rho_{23} = \frac{h_r(2) - h_r^{ri}(2)}{\prod_{k=0}^1 \frac{4n_k n_{k+1}}{(n_k + n_{k+1})^2}}$$

Obtenido el coeficiente de reflexión, el índice de refracción se puede calcular a partir del último obtenido (en este caso de la capa 2):

$$n_3 = n_2 \left(\frac{1 - \rho_{23}}{1 + \rho_{23}} \right)$$

Este proceso se repetirá para todas las capas posteriores, ya que a partir de la tercera capa, las resonancias internas intervendrán en todas las restantes. En el algoritmo, esto se traduce en un bucle. En dicho bucle, lo más importante será ir avanzando por las capas mediante la matriz de transmisión, lo cual se puede realizar con suma facilidad debido a la propiedad de estas matrices de que se pueden ir multiplicando para obtener la matriz de un conjunto de dispositivos en serie (en este caso las capas). Tendremos una matriz de transmisión acumulada, correspondiente al avance por el dispositivo del campo eléctrico, y a cada iteración, se irá calculando la matriz de la nueva capa a sintetizar, y se multiplicará con la matriz de transmisión acumulada para ir recorriendo el dispositivo, y tener una matriz total que tenga en cuenta la totalidad de las resonancias internas. A modo de resumen, lo que se realiza en este bucle del algoritmo es lo siguiente:

1. Se calcula la matriz de transmisión de la capa anterior a la anterior de la que estamos sintetizando. Para ello, se recalculan las impedancias con los valores de los índices de refracción ya sintetizados:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{n_0}$$

$$Z_c = \frac{120\pi}{n_{s-1}}$$

$$Z_2 = \frac{120\pi}{n_{s-2}}$$

2. Se multiplica esta matriz de transmisión recién calculada con la matriz de transmisión acumulada para tener en cuenta las resonancias internas nuevas, y las que se producen en toda la parte anterior del dispositivo, ya tenidas en cuenta para el cálculo de capas anteriores.
3. Se obtiene la función de transferencia resonante a partir de los elementos de la matriz de transmisión, y se realiza la transformada inversa de Fourier para obtener el valor requerido de la respuesta impulsiva resonante en reflexión.
4. Se calcula el coeficiente de reflexión acumulado, necesario para la aplicación de la fórmula de Fresnel, y con él, el coeficiente de reflexión de la capa a sintetizar.
5. Con el coeficiente de reflexión de la capa a sintetizar, se calcula el índice de refracción de la nueva capa.

Matemáticamente, la síntesis del índice de refracción de la capa genérica s se calcula como:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \prod_{r=1}^{s-1} \begin{pmatrix} \cos(\Phi) & jZ_r \sin(\Phi) \\ \frac{j \sin(\Phi)}{Z_r} & \cos(\Phi) \end{pmatrix}$$

$$\Phi = \frac{n_0 \Delta z 2\pi f}{c}$$

$$Z_i = \frac{120\pi}{n_i}$$

$$H_r(\omega) = \frac{A + \frac{B}{Z_{s-1}} - CZ_0 - D \frac{Z_0}{Z_{s-1}}}{A + \frac{B}{Z_{s-1}} + CZ_0 + D \frac{Z_0}{Z_{s-1}}}$$

$$h_r^{ri}(s-1) = IFFT(H_r(\omega))$$

$$\rho_{s-1,s} = \frac{h_r(s-1) - h_r^{ri}(s-1)}{\prod_{k=0}^{s-2} \frac{4n_k n_{k+1}}{(n_k + n_{k+1})^2}}$$

$$n_s = n_{s-1} \left(\frac{1 - \rho_{s-1,s}}{1 + \rho_{s-1,s}} \right)$$

3.4. Comentarios al funcionamiento del algoritmo

El algoritmo presentado es un algoritmo exacto, ya que el único error que se comete es el derivado de suponer que el índice de refracción no varía en la longitud de cada capa. Sin embargo, este error se reduce mucho considerando que la longitud de capa que se toma es muy inferior a un periodo de red. Además, y como veremos más adelante cuando veamos los resultados que produce el algoritmo, experimentalmente este error resulta despreciable.

En este sentido hemos de resaltar que todas las ecuaciones que aquí se presentan requieren que sus parámetros estén ajustados lo máximo posible para que el algoritmo funcione correctamente. Para dar una idea de la exactitud que se requiere, podemos poner como ejemplo que el error en la especificación del cuarto decimal en la velocidad de la luz entre el proceso de especificaciones y de síntesis es motivo suficiente como para desplazar la banda de paso del filtro resultante unos cuantos MHz. Sin embargo, este error no se produce por suponer constante el índice de refracción en la longitud de cada capa, lo que da una forma de justificación de que el algoritmo es exacto.

Otro punto importante a destacar es que el algoritmo no utiliza las formulaciones derivadas de la teoría de modos acoplados. Las únicas expresiones matemáticas complejas a utilizar son la fórmula de Fresnel y ecuaciones derivadas y la matriz de transmisión. Esto resta una gran complejidad matemática al algoritmo y hace mucho más sencilla su interpretación.

En el apartado de velocidad, del cual no hemos comentado nada aún, hemos de decir que el algoritmo resulta mucho más rápido que otros algoritmos basados en una parecida formulación matemática. Al ser muy simples los cálculos a realizar, la velocidad no se basa en lo rápido que la computadora sea capaz de resolver expresiones complejas (como ocurriría en el caso de algoritmos basados en la teoría de acoplo de modos) sino que se basa en el número de operaciones básicas que la máquina sea capaz de realizar en la unidad de tiempo. En un apartado sobre velocidad de computación que se desarrolla más adelante en este documento tratamos las dos operaciones matemáticas que más limitan la rapidez de computación, que son la multiplicación de matrices y la transformada inversa de Fourier que se realizan en cada iteración del bucle.

3.5. Proceso de especificaciones

Como ya hemos comentado, el proceso de especificaciones es muy importante en este algoritmo, porque la división de la red en capas se produce precisamente al establecer las especificaciones de partida. Como ya hemos comentado en apartados anteriores, la herramienta principal para el algoritmo como dato inicial es la respuesta impulsiva en reflexión. Si especificamos una reflectividad, por ejemplo, de 100 puntos, y esperamos sintetizar dicha reflectividad con una red de 1mm, por ejemplo, nos encontraremos que cada capa tendrá una longitud media de 10 micras. Esta longitud de capa es demasiado grande, ya que en función de la frecuencia donde se encuentre la banda de paso, puede contener varios periodos de red, perdiéndose toda la exactitud del algoritmo, y llegando muy posiblemente a una situación de no convergencia.

Por este motivo es necesario hacer una serie de cálculos previos a la hora de establecer el número de puntos que deberá tener la reflectividad especificada. Debemos encontrar la frecuencia máxima, y a través de ella, calculamos el mínimo periodo de red mediante la siguiente fórmula:

$$\Lambda_{\min} = \frac{c}{2f_{\max_BP}n_0}$$

Una vez encontrado el mínimo periodo que tendrá la red de difracción, debemos elegir cuantos puntos, o dicho de otra manera, cuantas capas, tendrá la red por cada unidad de periodo mínimo, siendo este periodo mínimo el más crítico. Debemos tener cuidado al elegir este número, atendiendo a las siguientes consideraciones:

- No debe ser un número demasiado pequeño, porque en ese caso perdemos exactitud.
- No debe ser un número demasiado grande, pues podríamos tener la exactitud asegurada, pero estaríamos incrementando el tiempo de simulación.
- Debe ser un número primo, para que en las zonas en las que el periodo mínimo se sucede, los puntos de muestreo sean siempre los mismos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y teniendo en cuenta sobre todo la experiencia, simulando redes iguales con diferentes números de puntos por periodo mínimo, se ha llegado a la conclusión de que el valor óptimo para la mayoría de los casos es de **13 puntos por periodo mínimo**.

El siguiente paso será decidir la longitud de la red a sintetizar. Este paso es experimental, y obedece sobre todo a la experiencia. Como norma general, deberemos saber que será mas sencillo obtener caídas más abruptas en los filtros cuanto mayor sea la longitud de la red.

Una vez establecido el número de puntos que deberá tener la reflectividad especificada (lo cual se obtiene multiplicando el número de periodos mínimos que contiene la red por el número de puntos por periodo mínimo especificado), lo siguiente que debemos tener en cuenta es que dicha reflectividad debe contener todas las frecuencias del espectro, es decir, debe partir desde la frecuencia DC (0 Hz). La razón de que esto tenga que ser así es, una vez más, en aras de la exactitud. Si en lugar de

tener unas especificaciones desde DC tenemos unas especificaciones paso-banda, el resultado, desde el punto de vista de la transformada de Fourier, tan importante en este algoritmo, es que estamos enventanado la respuesta, lo cual provoca una serie de lóbulos secundarios adicionales. Estos lóbulos secundarios introducen inexactitudes en los valores de la respuesta impulsiva, que hacen que el algoritmo no converja.

Deberemos, por tanto, establecer un vector de frecuencias que partirá desde DC, pero del cual no conocemos aún su frecuencia máxima. Sin embargo, sabemos que será:

$$f_{\max} = N_{\text{puntos}} f_{\text{muestreo}}$$

y sabemos que:

$$f_{\text{muestreo}} = \frac{1}{2t_{\text{end}}}$$

siendo t_{end} el tiempo que tarda la luz en recorrer la longitud del dispositivo, y demostrándose la ecuación anterior con una propiedad de la transformada de Fourier que dice que la distancia en frecuencia entre dos puntos de la respuesta en frecuencia es igual al inverso del tiempo que se ha especificado para la ventana temporal. t_{end} es un parámetro fácil de obtener, ya que resulta de:

$$t_{\text{end}} = \frac{L}{c/n_0}$$

siendo L la longitud del dispositivo.

Teniendo el vector de frecuencias y el número de puntos, el establecimiento de las especificaciones de reflectividad consiste simplemente en introducir un valor entre 0 (transmisión) a 1 (reflectividad máxima) para cada una de las frecuencias contenidas en el vector de frecuencias.

Después de aplicar este procedimiento, es necesario hallar la respuesta impulsiva en reflexión, que como sabemos será la base para el funcionamiento del algoritmo. Este paso no es precisamente sencillo, ya que hay que tener muy en cuenta las propiedades de la transformada de Fourier y las propiedades del cálculo de la FFT que realiza Matlab™. Deberemos tener en cuenta una serie de factores, como:

- Matlab realiza un cálculo de la FFT que da como resultado una respuesta en frecuencia con DC como frecuencia central.
- En el proceso de especificaciones descrito, sólo hemos especificado frecuencias positivas.
- El algoritmo sólo trabaja con tiempos positivos (funciones causales), pero la respuesta en frecuencia especificada tiene que estarlo tanto en frecuencias positivas como negativas.

Por ello, habrá que manejar con extremo cuidado este proceso, que puede variar en cada caso de especificaciones de red. Por ejemplo, para una red en la que se especifica la reflectividad, serán necesarios los siguientes pasos:

- Hacer la IFFT de la respuesta en frecuencia con las frecuencias positivas.
- Intercambiar las dos mitades de la respuesta impulsiva.
- Hacer la FFT de dicha respuesta impulsiva.
- Crear un vector con esa FFT, un 0 como frecuencia central, y luego dicha FFT a continuación leída en sentido contrario.
- Realizar la IFFT de dicho vector.
- Reducir a la mitad dicha IFFT, ya que tenemos el doble de puntos. Esto se hará tomando los puntos centrales de la respuesta.

Este proceso se ilustra mucho mejor en el apartado de *planos*, donde se incluye el código fuente de unas especificaciones para un filtro ideal.

Cabe resaltar que si la longitud de la red resulta demasiado corta, se puede proceder, bien a comenzar de nuevo el proceso de especificaciones con una longitud mayor para observar los resultados, o bien aplicando una función de apodización a la respuesta impulsiva obtenida que suavice los bordes de la misma.

Cabe destacar también que no siempre se tiene que especificar directamente la respuesta en frecuencia a partir de la reflectividad. Si queremos, por ejemplo, obtener un filtro que ecualice el retardo o la fase, se especificarán estas últimas, y a partir de procesos de derivación e integración se obtendrá la reflectividad.

3.6. Mejora del rendimiento del algoritmo en cuanto a velocidad

El principal problema de los algoritmos de síntesis de redes de difracción de Bragg es que su rendimiento en cuanto a velocidad de computación suele ser muy bajo. Esto es debido a que se deben calcular los parámetros de un número muy grande de capas, lo cual ralentiza la ejecución.

En la síntesis de este algoritmo, debemos aprovechar las ventajas que presenta frente a otros métodos. Ya que la principal característica del mismo es su simplicidad matemática, el rendimiento en cuanto a computación no se ve mermado por el hecho de que la computadora deba realizar cálculos complejos (como la resolución de ecuaciones diferenciales acopladas), sino por el hecho de que debe realizar un gran número de operaciones sencillas en el menor tiempo posible. En cuanto a mejoras en el rendimiento del algoritmo, se han seguido en este proyecto dos líneas de investigación, que son la optimización de los cálculos matriciales adaptando los mismos a la forma en que MatlabTM los ejecute más rápidamente, y por otro lado, la búsqueda de un algoritmo para la computación de la transformada de Fourier que se adapte completamente a las necesidades del algoritmo de síntesis y que no realice cálculos innecesarios para esta aplicación.

3.6.1. Optimización de cálculos matriciales en MatlabTM

Existen una serie de técnicas que permiten acelerar la velocidad de ejecución de MatlabTM. En la documentación de este programa, así como en la página web de la compañía MathWorksTM y en distintos foros de discusión se pueden encontrar diversos artículos que explican los puntos fuertes y débiles de esta aplicación en cuanto a velocidad, y las técnicas que permiten mejorarla. Algunas de las técnicas básicas para mejorar la velocidad son:

- *Vectorizar los bucles.* Lo cual consiste en eliminar el mayor número posible de bucles tipo *for* en el programa, sustituyéndolos por *arrays* vectorizados o funciones internas de la aplicación que permiten realizar las mismas tareas. En el caso del algoritmo al que se refiere el presente proyecto, tan sólo existe un bucle de este tipo en el programa, y dada su naturaleza (es el bucle de cálculo de capa, y contiene un gran número de operaciones a realizar), es imposible sustituirlo por un *array* vectorizado.
- *Reservar memoria.* Es muy ventajoso perder algo tiempo en reservar memoria para vectores y matrices de grandes dimensiones antes de su uso, ya que de este modo MatlabTM no necesita acudir al gestor de memoria dinámica para ir dando tamaño a los *arrays*. De este modo, se consigue un incremento neto de la velocidad de computación.
- *Usar funciones en lugar de scripts.* Es una técnica que no se ha utilizado en este algoritmo, ya que el único código repetitivo (susceptible de ser realizado mediante una función) es el que se encuentra dentro del bucle. Utilizar una función para implementar un bucle *for* no resulta en ninguna mejora, ya que el cambio de contexto que supone la llamada a la función no contrarresta la pérdida de rendimiento que supone el uso de este tipo de bucles. Sin embargo, fuera de

la implementación del algoritmo sí se ha utilizado esta técnica, como por ejemplo, para las funciones de análisis, o las simulaciones de redes cortas.

- *Usar ficheros MEX.* Es una técnica que traduce el código de un *script* de Matlab™ a código C, de forma que se puede ejecutar en código máquina una vez compilado. Esta técnica no resulta muy eficiente cuando se han empleado todas las anteriores, pero siempre supone una pequeña mejora en cuanto a velocidad.
- *Matlab™ JIT (Just In Time) accelerator.* Se trata de una mejora del intérprete de comandos de Matlab™ que se encuentra disponible a partir de la versión 6.5. Si se activa la opción JIT, ciertas instrucciones son aceleradas de forma que el rendimiento aumenta. Las condiciones que se deben cumplir para que el JIT entre en funcionamiento se han seguido a la hora de programar el algoritmo en la medida de lo posible (dichas condiciones se pueden consultar en la documentación de Matlab™), pero el hecho de que este acelerador no funcione cuando existen estructuras de datos que manejan números complejos, lo cual es una constante en este algoritmo, provoca que el rendimiento no se vea mejorado gracias a él. Se han realizado pruebas de reescribir el algoritmo utilizando estructuras de datos reales tratando por separado las partes real e imaginaria, pero el incremento de operaciones a realizar no compensa la mejora que introduce el acelerador JIT.

Una vez se han seguido todas estas recomendaciones, se utiliza el programa *Matlab™ profiler*, que indica al usuario el tiempo que se dedica a la ejecución de cada línea del *script*, y con ello, permite identificar mediante estadística cuáles son los *cuellos de botella* que provocan que la velocidad de ejecución sea más lenta.

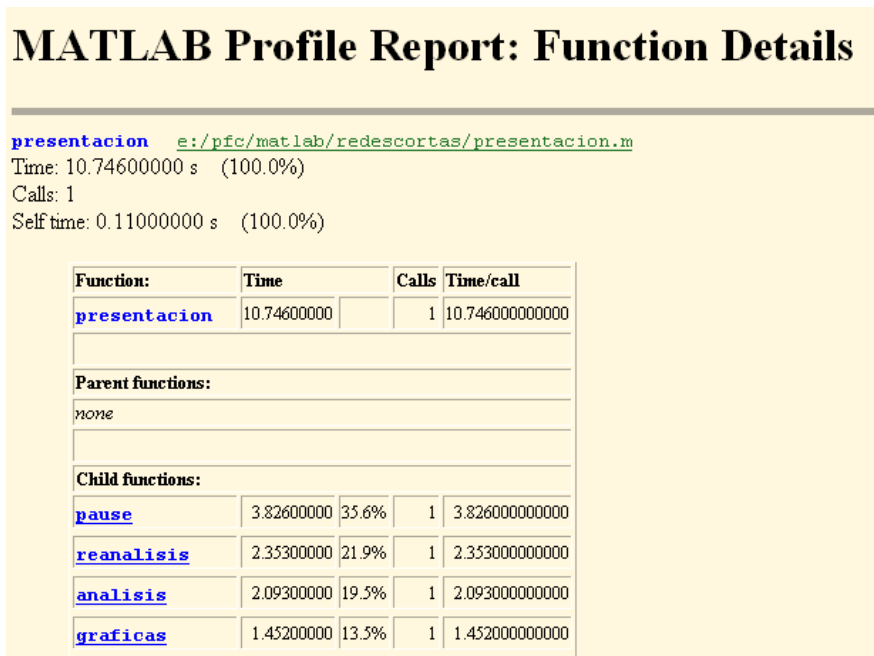


Fig. 3.11. Aspecto de Matlab™ Profiler

Utilizando el *profiler* lo primero que se observa es que se invierte mucho tiempo en actualizar la matriz de transmisión (al hacer una multiplicación de matrices). Diversos ensayos *prueba-error* han demostrado que la estructura que tiene la matriz de transmisión no es adecuada para realizar la operación de multiplicación de matrices con el operador * de Matlab™. Estas matrices son de dimensión 2x2, pero cada elemento contiene a su vez un vector con tantas componentes como valores de frecuencias tengamos asignados, desde DC hasta frecuencias ópticas, como ya hemos comentado. La opción de utilizar matrices tridimensionales queda descartada desde un principio, ya que una de las premisas para aumentar la velocidad es no tener *arrays* de más de dos dimensiones. Tras diferentes pruebas se ha llegado a la conclusión de que la mejor manera de multiplicar las matrices es separar cada elemento en un vector (unidimensional) y realizar la multiplicación elemento a elemento, es decir:

$$M_1 = \begin{pmatrix} [A_1, A_2, \dots, A_n] & [B_1, B_2, \dots, B_n] \\ [C_1, C_2, \dots, C_n] & [D_1, D_2, \dots, D_n] \end{pmatrix}$$
$$M_2 = \begin{pmatrix} [E_1, E_2, \dots, E_n] & [F_1, F_2, \dots, F_n] \\ [G_1, G_2, \dots, G_n] & [H_1, H_2, \dots, H_n] \end{pmatrix}$$
$$\Rightarrow$$
$$A = [A_1, A_2, \dots, A_n]$$
$$B = [B_1, B_2, \dots, B_n]$$
$$\dots\dots\dots$$
$$H = [H_1, H_2, \dots, H_n]$$
$$M_1 \times M_2 = M_3 = \begin{pmatrix} I & J \\ K & L \end{pmatrix}$$

entonces:

$$\begin{aligned} I &= [A_1 E_1 + B_1 G_1, \dots, A_n E_n + B_n G_n] \\ J &= [A_1 F_1 + B_1 H_1, \dots, A_n F_n + B_n H_n] \\ K &= [C_1 E_1 + D_1 G_1, \dots, C_n E_n + D_n G_n] \\ L &= [C_1 F_1 + D_1 H_1, \dots, C_n F_n + D_n H_n] \end{aligned}$$

Además, si elegimos un orden en concreto para realizar estas multiplicaciones, evitamos tener que reservar, y por tanto, gestionar, memoria para variables auxiliares. En las siguientes ecuaciones observamos el método óptimo:

$$\begin{aligned} I &= [A_1 E_1 + B_1 G_1, \dots, A_n E_n + B_n G_n] \\ J &= [A_1 F_1 + B_1 H_1, \dots, A_n F_n + B_n H_n] \\ L &= [C_1 F_1 + D_1 H_1, \dots, C_n F_n + D_n H_n] \\ K &= [C_1 E_1 + D_1 G_1, \dots, C_n E_n + D_n G_n] \end{aligned}$$

El *profiler* nos indica también que se está invirtiendo demasiado tiempo en realizar otra serie de operaciones, aunque en menor medida. Se trata de operaciones en principio sencillas, pero que requieren expresiones muy largas, como la obtención de la función de transferencia resonante interna a partir de los elementos de la matriz, o la

obtención del coeficiente de reflexión. Nuevamente, se someten dichas operaciones a ensayos *prueba-error*, obteniéndose una separación en operaciones más pequeñas y una ordenación óptima que es la que se puede observar en el código correspondiente al algoritmo.

3.6.2. Adaptación del algoritmo FFT a las necesidades de cálculo del algoritmo

Al comentar el algoritmo se ha observado que para obtener la respuesta impulsiva que no tiene en cuenta las resonancias internas, necesaria para calcular el índice de refracción sintetizado, es necesario restar de la respuesta impulsiva total la respuesta impulsiva correspondiente a las resonancias internas. Esta última se obtiene de la transformada inversa de Fourier (IFFT) de la función de transferencia resonante, que se obtiene a su vez a partir de los coeficientes de la matriz de transmisión. Sin embargo, sólo necesitamos un valor de esta IFFT, que es el correspondiente al instante de tiempo en que la luz sale del dispositivo por el mismo sitio en que entró, después de haber efectuado una sólo reflexión en la capa que se está sintetizando. Por tanto, es claro que si utilizamos el algoritmo implementado en MatlabTM para la IFFT, estamos realizando un número de operaciones innecesarias enorme, porque para cada IFFT que se realiza, ésta se calcula para todos los instantes de tiempo correspondientes a todas las frecuencias que contiene el vector de la función de transferencia.

Surge así el reto de mejorar la eficiencia de la IFFT, pero sin embargo, no es este un problema con solución trivial, como podría pensarse. Lo primero en lo que se podría pensar es en utilizar la fórmula del algoritmo para la IFFT derivada de la pura definición de la misma [OPPENHEIM-00]:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, \forall n$$

Particularizando para el punto que nos interesa, la formula quedaría como:

$$x(n_1) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi kn_1}{N}}$$

El problema es que al implementar la IFFT de esta forma, sin utilizar las fórmulas para el cálculo de la FFT de MatlabTM, sino escribiendo el código manualmente para ahorrar operaciones, el cálculo resulta muy lento. Esto es debido a que la fórmula que implementa la IFFT en MatlabTM es un programa escrito en código máquina que sigue los algoritmos más recientes para la realización rápida de la FFT/IFFT, denominados FFTW (Fastest Fourier Transform of the West) [FRIGO-03]. Por tanto, se puede comprobar experimentalmente que incluso ahorrándonos un buen número de operaciones, hacer la IFFT con el algoritmo que incluye MatlabTM, aún siendo para todas las frecuencias, y seleccionando después sólo el punto que nos interesa, es mucho más rápido que implementar manualmente el cálculo. Esto es así incluso aunque empleemos todos nuestros esfuerzos en aplicar técnicas de mejora de rendimiento al cálculo manual, o lo implementemos en código C mediante un fichero *MEX*.

Es por ello que si se quiere mejorar el rendimiento de este cálculo se debe hacer un replanteamiento del algoritmo de la IFFT. El algoritmo ideado para este proyecto se ha denominado *Transformada de Fourier de Cálculo Distribuido (TFCD)*. Se basa en el hecho de que para el caso particular del algoritmo de síntesis tratado en este proyecto, en cada iteración del bucle es necesario calcular un solo punto de la IFFT, pero además, se usa la propiedad de que en cada iteración, el punto que se calcula es precisamente el siguiente punto al que se calculó en la iteración anterior.

Veamos cómo funciona matemáticamente el algoritmo TFCD. En primer lugar es necesario realizar una serie de operaciones preliminares a la entrada en el bucle. El algoritmo TFCD recibe el apellido *distribuido* precisamente porque parte del algoritmo se realiza fuera del bucle, luego se pueden incluir instrucciones o código intermedios, y luego el resto del algoritmo TFCD se implementa dentro del bucle, pudiendo haber además dentro de este bucle otro código que nada tenga que ver con el cálculo de la IFFT mediante la TFCD.

El algoritmo se basa en el siguiente principio: cuando se calcula el primer punto de la IFFT, se hace para $n=0$, y con este valor de n se calcula el sumatorio y se hacen las operaciones necesarias indicadas en la definición. Para calcular el segundo punto, se hará para $n=1$, pero aquí podemos aprovechar la siguiente propiedad:

$$e^{j\frac{2\pi(n+1)k}{N}} = e^{j\frac{2\pi nk}{N}} e^{j\frac{2\pi k}{N}}$$

esto significa que, de una iteración a la siguiente, para actualizar los *Twiddle Factors*, que es como se conoce a la exponencial de la IFFT/FFT, sólo es necesario multiplicar por un valor constante.

En primer lugar se realiza una reserva de memoria para los *Twiddle Factors*, y se calcula el primero de ellos, teniendo en cuenta que k es en este caso un vector que contiene a todas las frecuencias. Por tanto, antes de entrar en el bucle realizamos la preparación de los *Twiddle Factors* como sigue:

$$\begin{aligned} n &= 1 \\ M &= 2 * N_{\text{puntos}} \\ k &= [0, \dots, M-1] \\ \text{Re}(\text{Twiddle}) &= \cos\left(\frac{2\pi nk}{M}\right) \\ \text{Im}(\text{Twiddle}) &= \sin\left(\frac{2\pi nk}{M}\right) \\ \text{Twiddle} &= \text{Re}(\text{Twiddle}) + j \text{Im}(\text{Twiddle}) \end{aligned}$$

Hemos de destacar que se toma un número doble de puntos porque trataremos con frecuencias positivas y negativas. Una vez hemos entrado en el bucle, terminamos con el algoritmo de la IFFT, particularizando sólo para el punto que nos interesa:

$$x(n_1) = \frac{1}{M} HR * Twiddle$$

donde HR es la respuesta en frecuencia a la cual queramos aplicar la IFFT. Hay que hacer constar que tanto HR como $Twiddle$ son vectores, y por tanto, la función $*$ de Matlab™ lo que hace es multiplicar elemento a elemento, y sumar todas las componentes resultantes de dicha multiplicación, con lo cual se está completando el algoritmo de la IFFT.

En la siguiente iteración a realizar, como el punto que nos interesa es justamente el siguiente, para $n=2$, lo único que tendremos que hacer será actualizar los *Twiddle Factors*:

$$Twiddle_{n=2} = Twiddle_{n=1} Twiddle_{n=1}$$

Y en iteraciones sucesivas, la actualización de los *Twiddle Factors* se hará siempre multiplicando por un vector de constantes:

$$Twiddle_{n=3} = Twiddle_{n=2} Twiddle_{n=1}$$

.....

$$Twiddle_{n=s} = Twiddle_{n=s-1} Twiddle_{n=1}$$

Esta forma de implementar la IFFT resulta mucho más rápida que la que resulta de aplicar la función *IFFT* de Matlab™ y seleccionar más tarde el punto que nos interesa. Además, resulta obvio que realizando el cálculo de esta forma, el número de operaciones total es equivalente al de realizar una sólo IFFT de M puntos, mientras que que en el caso de la *IFFT* de Matlab™ hay que realizar una IFFT de M puntos en cada iteración. Los resultados experimentales indican que la reducción en tiempo al aplicar la TFCD al algoritmo de síntesis se sitúa en torno al 70%.

Como último comentario a la optimización del rendimiento del algoritmo en cuanto a velocidad, se fueron realizando una serie de pruebas, desde la obtención del algoritmo funcionando, hasta la aplicación de todas las técnicas de incremento de velocidad de computación. En un ordenador personal equipado con un procesador Pentium™ IV @ 2 GHz, con 512 Mb de RAM, y con la versión 6.5 de Matlab™, la primera simulación del algoritmo, para una red uniforme de 3mm supuso un tiempo de 31 horas, 31 minutos y 8 segundos.

Tras aplicar todas las técnicas comentadas anteriormente, se realizó una simulación que sintetizó la misma red anterior en un tiempo de 1 hora, 21 minutos y 8 segundos, lo que supone una **reducción de tiempo del 95,7%**

CAPÍTULO 4: Ejemplos de funcionamiento del algoritmo.

En este apartado demostraremos el funcionamiento del algoritmo descrito en apartados anteriores. Lo que se muestra aquí son una serie de simulaciones realizadas mediante MatlabTM, que muestran lo que el algoritmo de síntesis es capaz de hacer. En un primer lugar se presentan una serie de tests que prueban que el algoritmo funciona correctamente, y más tarde se pasa a la síntesis de redes reales.

4.1. Prueba mediante redes cortas.

Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo, se propone un método que consiste en sintetizar una red que conozcamos perfectamente. De esta forma, al conocer perfectamente el resultado que debe proporcionar el método de síntesis, sabremos si el algoritmo está funcionando correctamente o no.

El método que se propone consiste en definir una perturbación cualquiera de forma manual. En este caso, se han elegido varias redes con unas características especiales, como son su corta longitud, y un incremento del índice de refracción que podría no corresponderse a una red real. Además, se han elegido perturbaciones cuyo uso no es muy extendido en la realidad, como por ejemplo el de una red cuadrada apodizada. Estas características se han elegido así para forzar al algoritmo en situaciones poco previsibles, y así verificar su funcionamiento en todo tipo de circunstancias. La longitud de las redes se ha elegido muy corta para disminuir el tiempo de simulación, ya que en este momento sólo nos interesa verificar el correcto funcionamiento del método.

Tras la definición de la perturbación, se analiza la misma para obtener su característica en reflexión en el dominio de la frecuencia. Para ello se ha elegido el método propuesto por Carballar [CARBALLAR-99], ya que se trata de un método de análisis exacto que proporciona una elevada fiabilidad. Una vez obtenida la característica en reflexión, se obtiene su transformada inversa de Fourier para hallar la respuesta impulsiva en reflexión, que es el principal dato de partida para el algoritmo de síntesis aquí propuesto.

Al sintetizar la red correspondiente a dicha respuesta impulsiva, deberemos obtener una perturbación del índice de refracción completamente similar a la que definimos al principio de la prueba, ya que se supone en principio que el análisis y la síntesis realizadas son exactas. Sólo se validará el funcionamiento del algoritmo si esto ocurre de esta manera, y como comprobaremos más adelante, así ocurrirá.

Para comenzar con la prueba del algoritmo mediante redes cortas, proponemos una red uniforme, constituyendo ésta la prueba más básica que podríamos realizar. Las siguientes figuras muestran el desarrollo de esta prueba. Destacaremos aquí que el resto de las pruebas se realizarán de la misma forma, con el mismo tipo de figuras, por lo que nos extenderemos en los comentarios sólo para la primera.

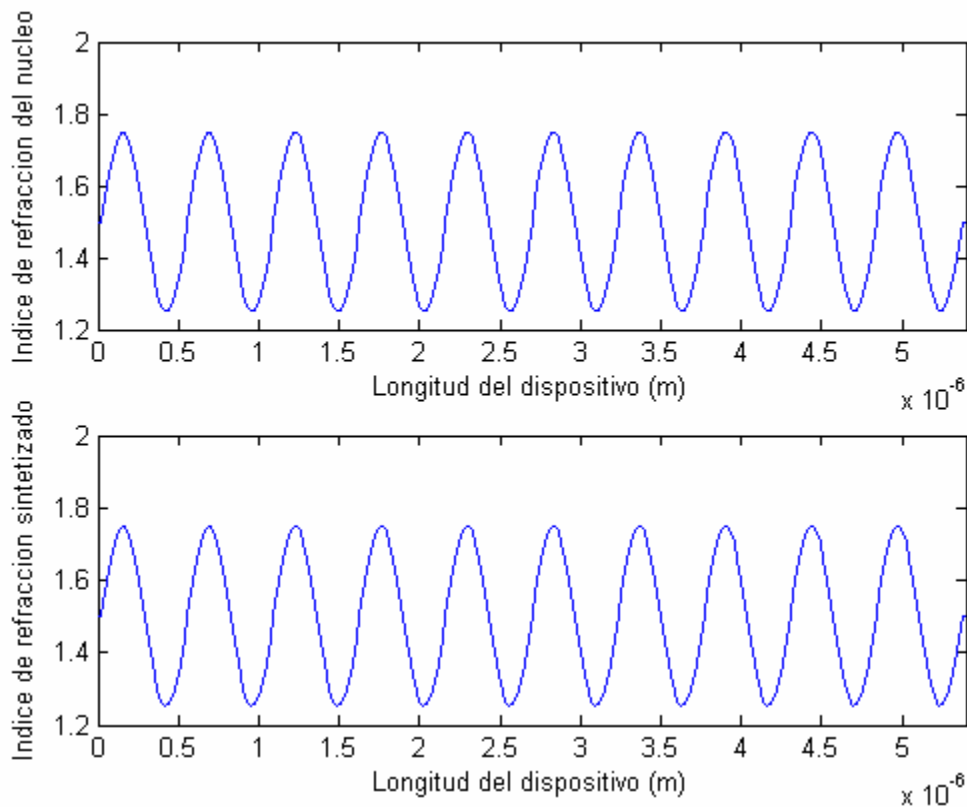


Fig. 4.1. Índices de refracción original (arriba) y sintetizado (abajo) para una red uniforme de corta longitud cuyo propósito es únicamente el de la prueba del algoritmo.

Como podemos observar, en la figura anterior se muestran el índice de refracción original, definido manualmente, y el sintetizado por el algoritmo, constituyendo esta figura el dato de partida y el resultado final del proceso. Las similitudes son enormes, como podemos apreciar en la figura siguiente, donde el índice de refracción sintetizado (línea punteada) aparece superpuesto al índice de refracción original (línea continua).

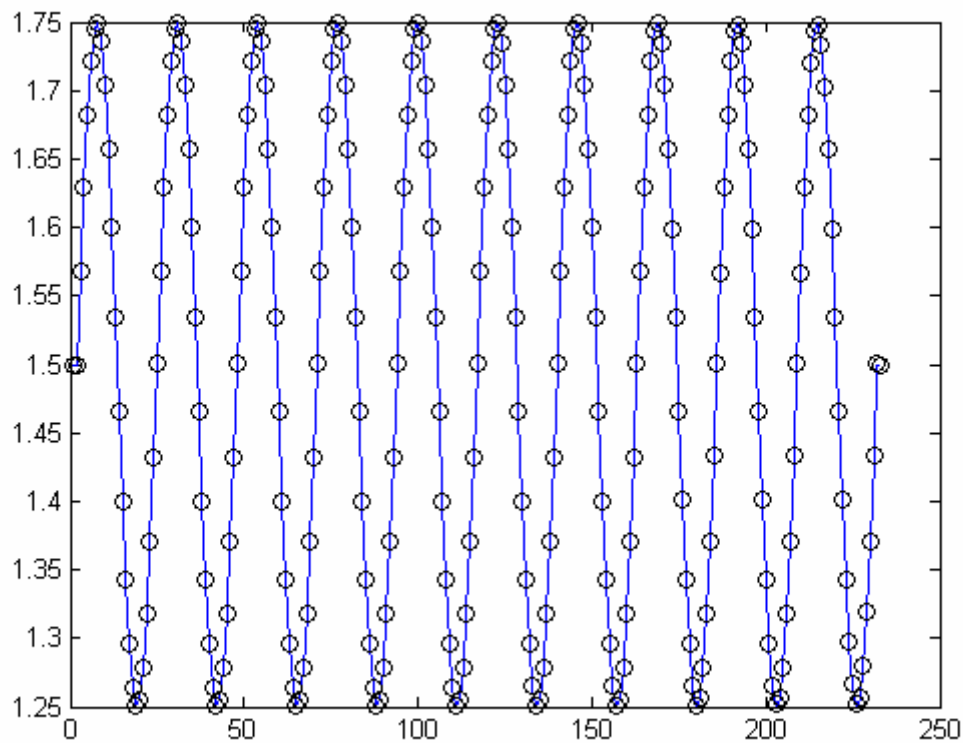


Fig. 4.2. Superposición del índice de refracción sintetizado (línea punteada) sobre el índice de refracción original (línea continua) para una red uniforme. Se comprueba que el funcionamiento del algoritmo es correcto, y además se hace notar que el hecho de utilizar un número primo en el número de puntos por periodo, las muestras siempre coinciden en los mismos lugares en cada periodo.

Podemos apreciar que el resultado es también satisfactorio en el dominio de la frecuencia. En la siguiente figura se muestra, por un lado, la reflectividad original, obtenida mediante el proceso de análisis de la perturbación definida como dato del problema, y la reflectividad sintetizada, es decir, la reflectividad obtenida tras aplicar nuevamente el algoritmo de análisis a la red de difracción sintetizada.

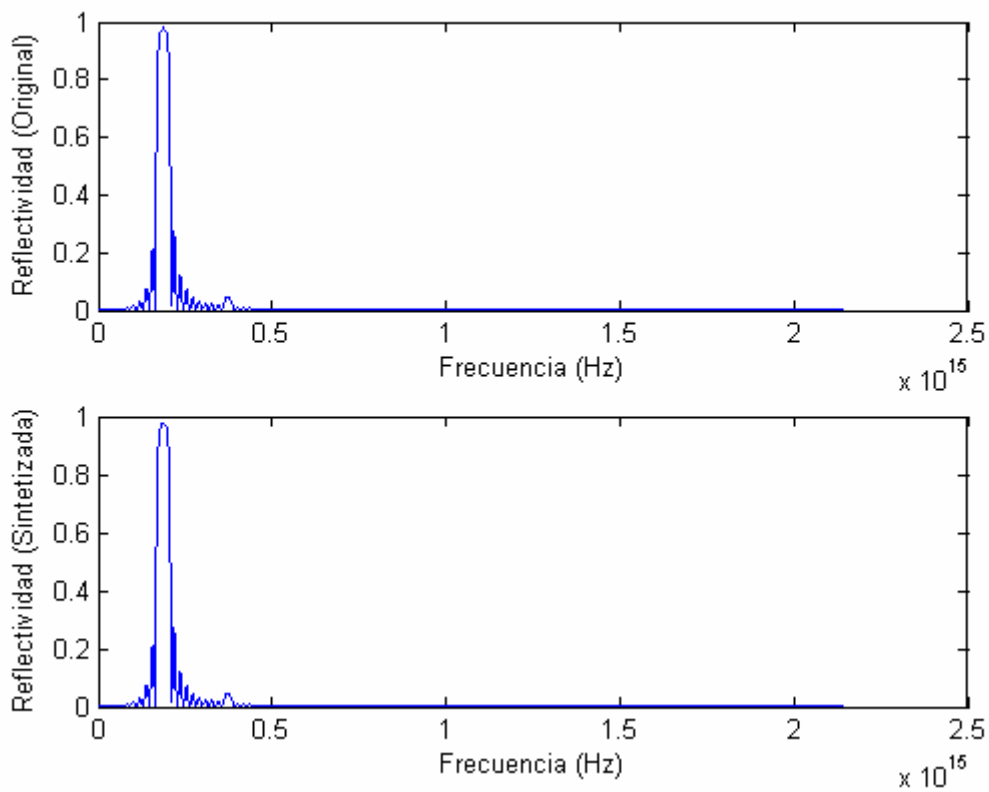


Fig. 4.3. Reflectividad original (arriba) y sintetizada (abajo) obtenidas aplicando el algoritmo de análisis de redes de difracción sobre los índices de refracción original y sintetizado de una red de difracción uniforme. Se observa aquí también el buen comportamiento del algoritmo.

Como última figura, se muestra en el siguiente gráfico una comparación entre el índice de refracción y la respuesta impulsiva en reflexión, que caracteriza a la red en el dominio del tiempo.

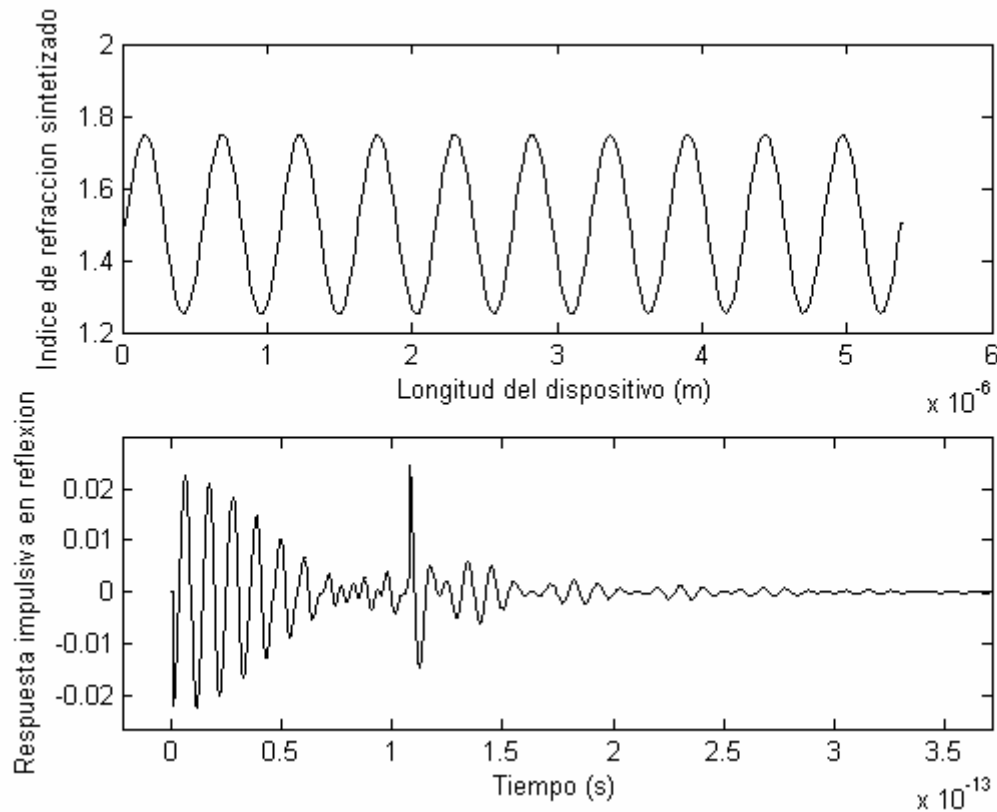


Fig. 4.4. Respuesta impulsiva en reflexión obtenida a partir de la red de difracción original uniforme (abajo), la cual sirve de base para obtener el índice de refracción sintetizado (arriba).

La siguiente red con la que probaremos el algoritmo será una red un poco más compleja, se trata de una red uniforme, como la anterior, con la particularidad de que la forma de la perturbación no será sinusoidal, sino que se tratará de una función de pulsos cuadrados. Las siguientes figuras, análogas a las anteriores, muestran que el algoritmo se comporta correctamente también en este caso.

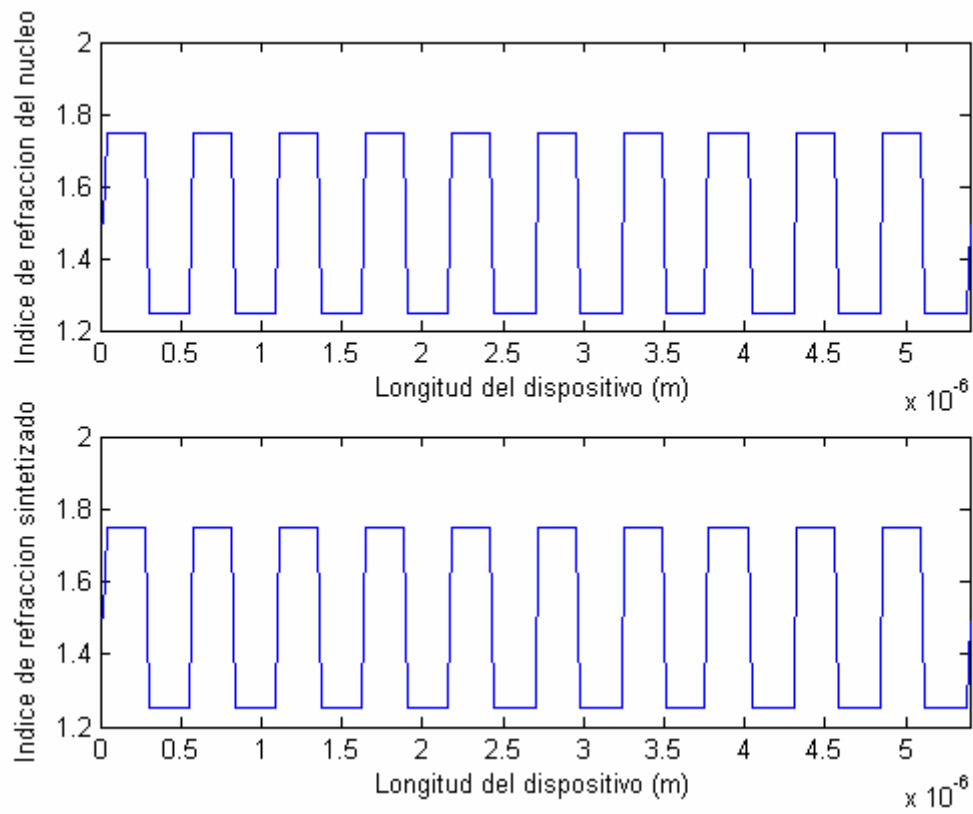


Fig. 4.5. Índices de refracción original (arriba) y sintetizado (abajo) para una red uniforme cuadrada de corta longitud cuyo propósito es únicamente el de la prueba del algoritmo.

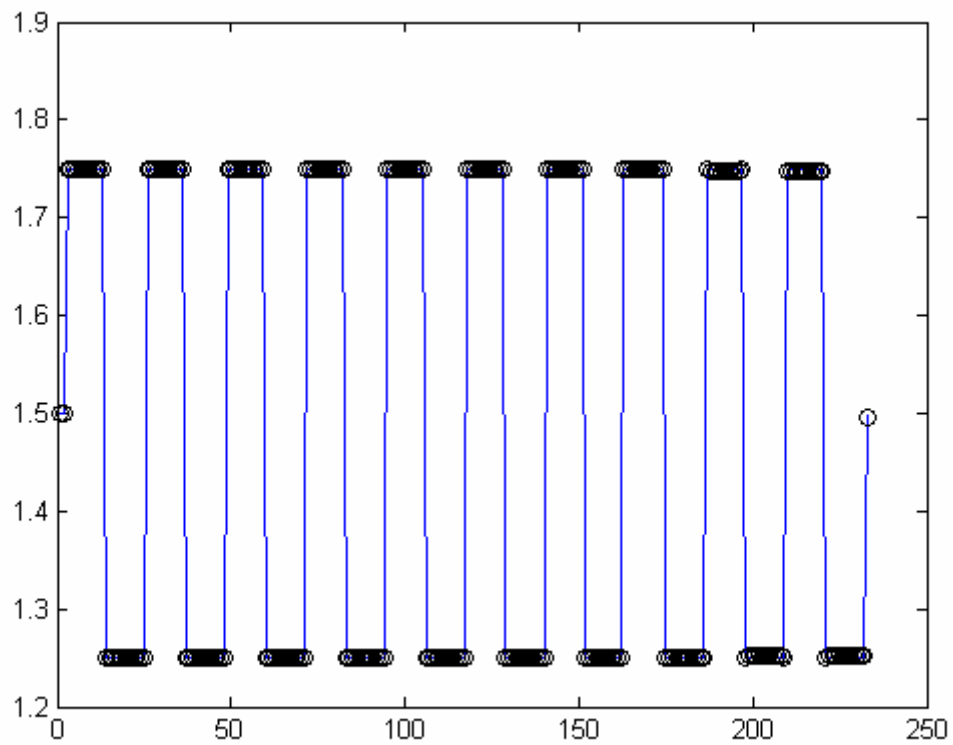


Fig. 4.6. Superposición del índice de refracción sintetizado (línea punteada) sobre el índice de refracción original (línea continua) para una red uniforme cuadrada. Se comprueba que el funcionamiento del algoritmo es correcto, y además se hace notar que el hecho de utilizar un número primo en el número de puntos por periodo, las muestras siempre coinciden en los mismos lugares en cada periodo.

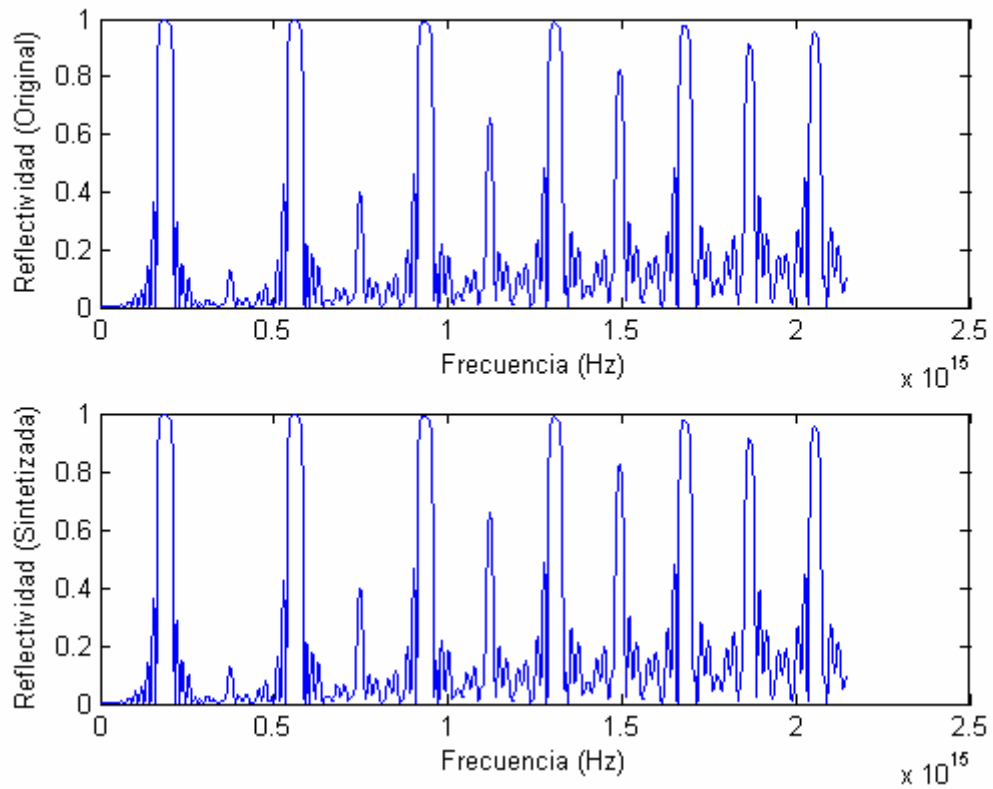


Fig. 4.7. Reflectividad original (arriba) y sintetizada (abajo) obtenidas aplicando el algoritmo de análisis de redes de difracción sobre los índices de refracción original y sintetizado de una red de difracción uniforme cuadrada. Se observa aquí también el buen comportamiento del algoritmo en cuanto al dominio de la frecuencia.

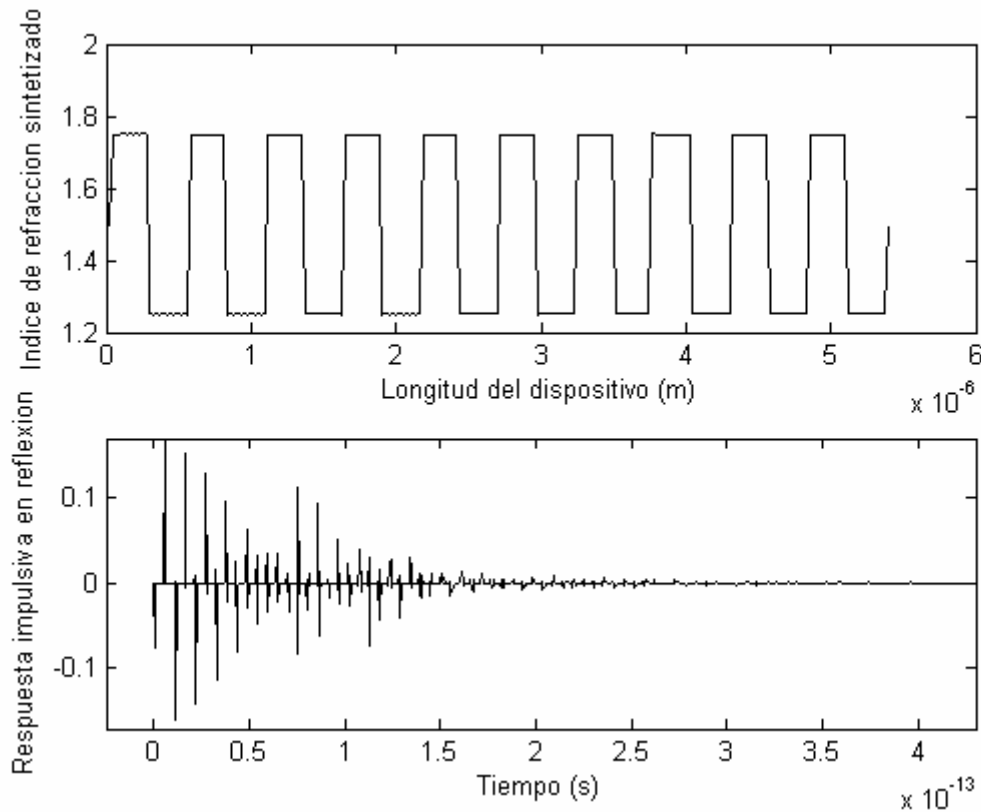


Fig. 4.8. Respuesta impulsiva en reflexión obtenida a partir de la red de difracción original uniforme cuadrada (abajo), la cual sirve de base para obtener el índice de refracción sintetizado (arriba).

Probamos ahora si el algoritmo es también capaz de sintetizar redes en las que existe una función de apodizado. Las siguientes dos redes que se proponen son las redes uniformes anteriores (sinusoidal y cuadrada), a las cuales se aplica una función de apodización. Cabe destacar la reducción de los lóbulos secundarios que se observa en el caso de la red uniforme sinusoidal.

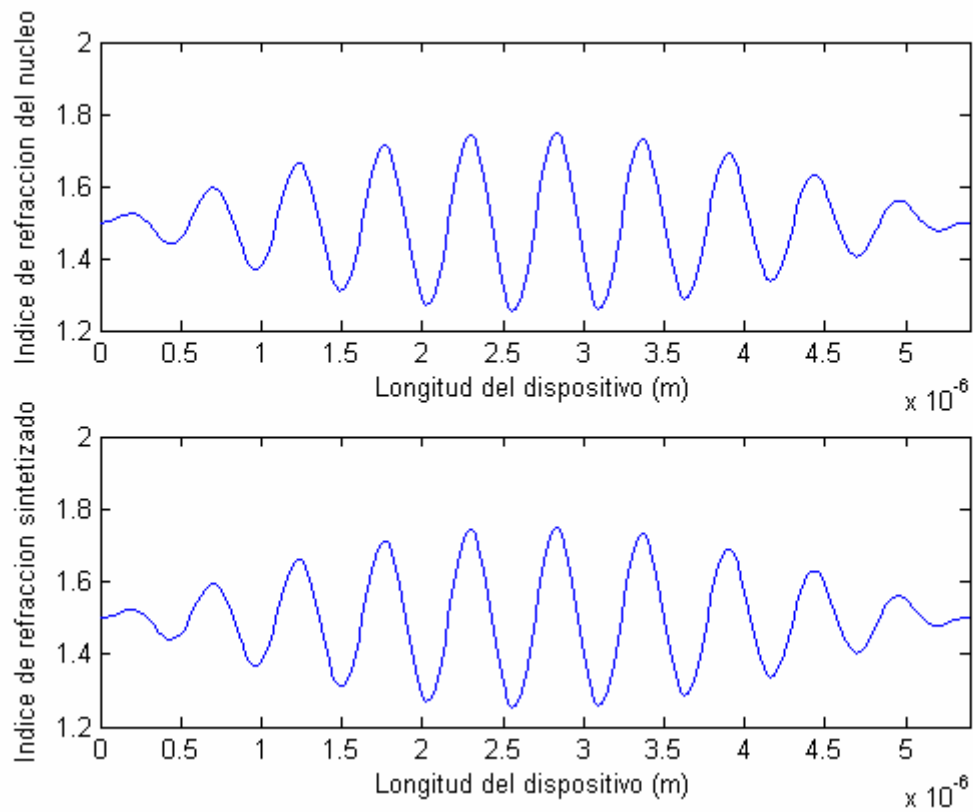


Fig. 4.9. Índices de refracción original (arriba) y sintetizado (abajo) para una red uniforme apodizada de corta longitud cuyo propósito es únicamente el de la prueba del algoritmo.

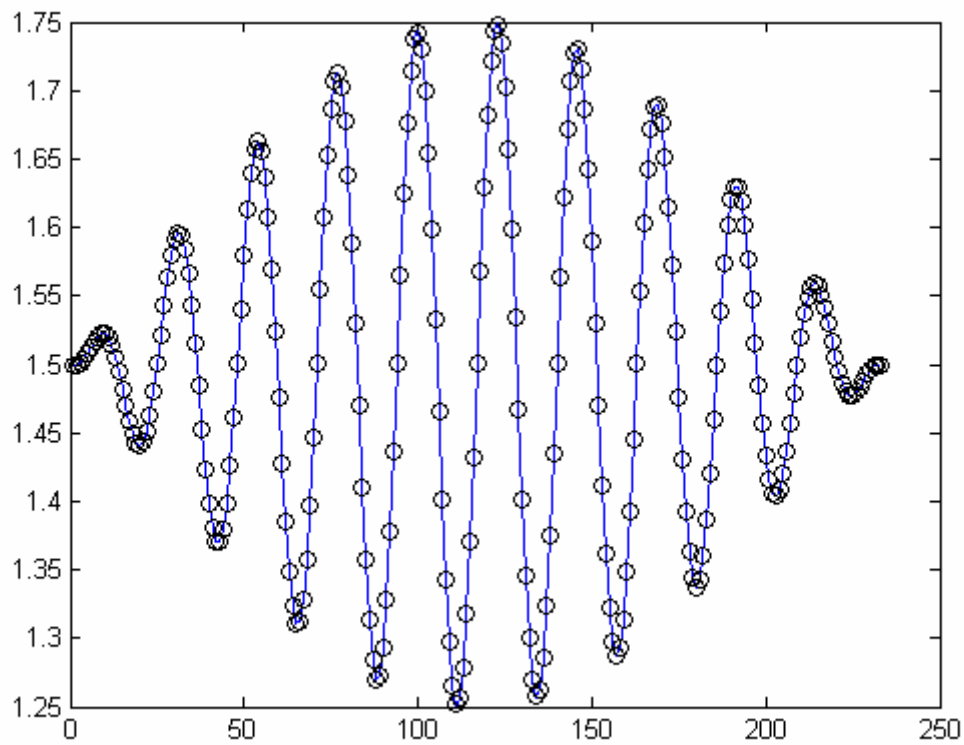


Fig. 4.10. Superposición del índice de refracción sintetizado (línea punteada) sobre el índice de refracción original (línea continua) para una red uniforme apodizada. Se comprueba que el funcionamiento del algoritmo es correcto, y además se hace notar que el hecho de utilizar un número primo en el número de puntos por periodo, las muestras siempre coinciden en los mismos lugares en cada periodo.

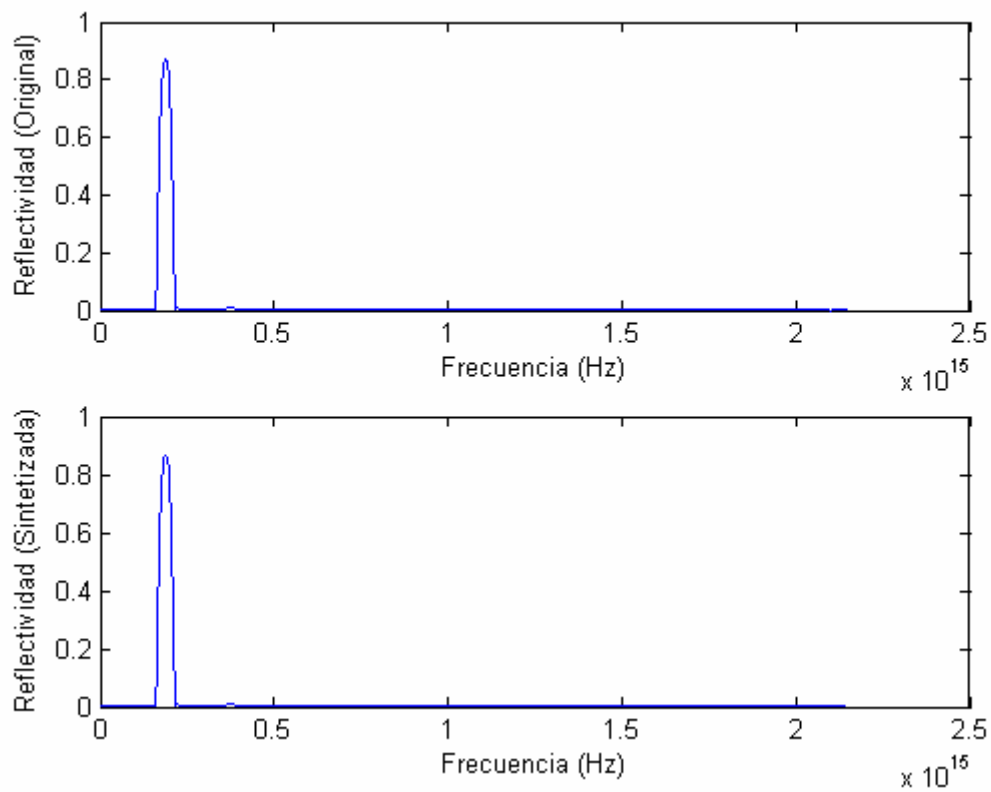


Fig. 4.11. Reflectividad original (arriba) y sintetizada (abajo) obtenidas aplicando el algoritmo de análisis de redes de difracción sobre los índices de refracción original y sintetizado de una red de difracción uniforme cuadrada. Se observa aquí también el buen comportamiento del algoritmo en cuanto al dominio de la frecuencia, y cómo el hecho de introducir una función de apodización reduce los lóbulos secundarios a ambos lados de la banda de paso.

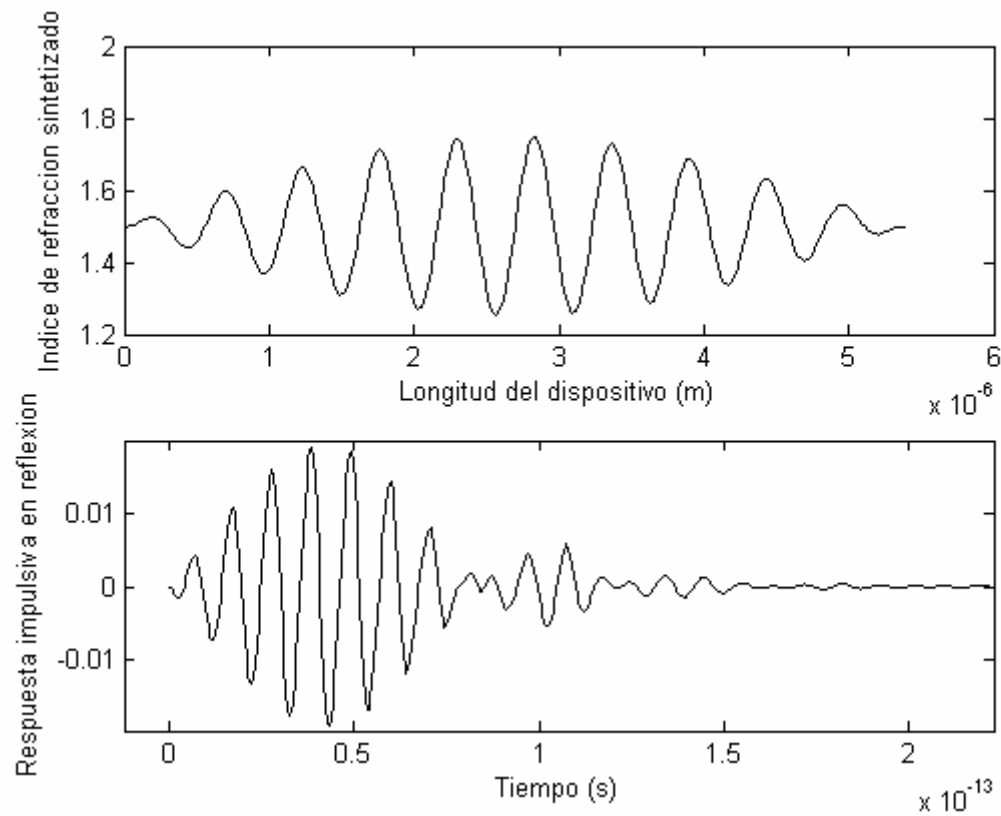


Fig. 4.12. Respuesta impulsiva en reflexión obtenida a partir de la red de difracción original uniforme apodizada (abajo), la cual sirve de base para obtener el índice de refracción sintetizado (arriba).

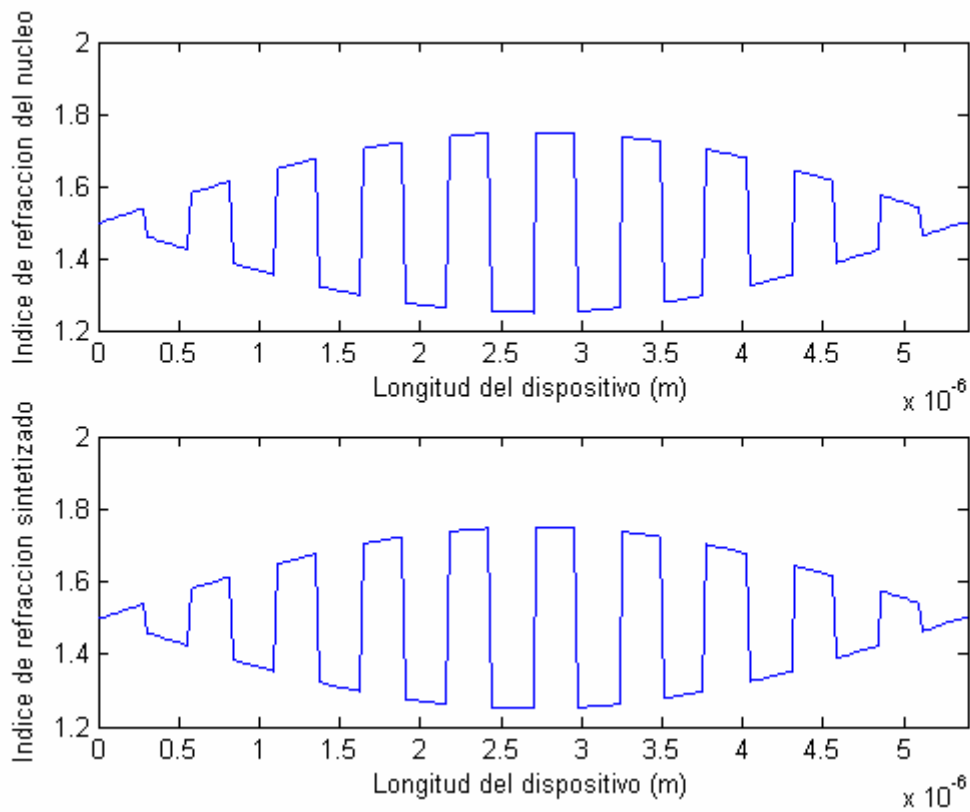


Fig. 4.13. Índices de refracción original (arriba) y sintetizado (abajo) para una red uniforme cuadrada y apodizada de corta longitud cuyo propósito es únicamente el de la prueba del algoritmo.

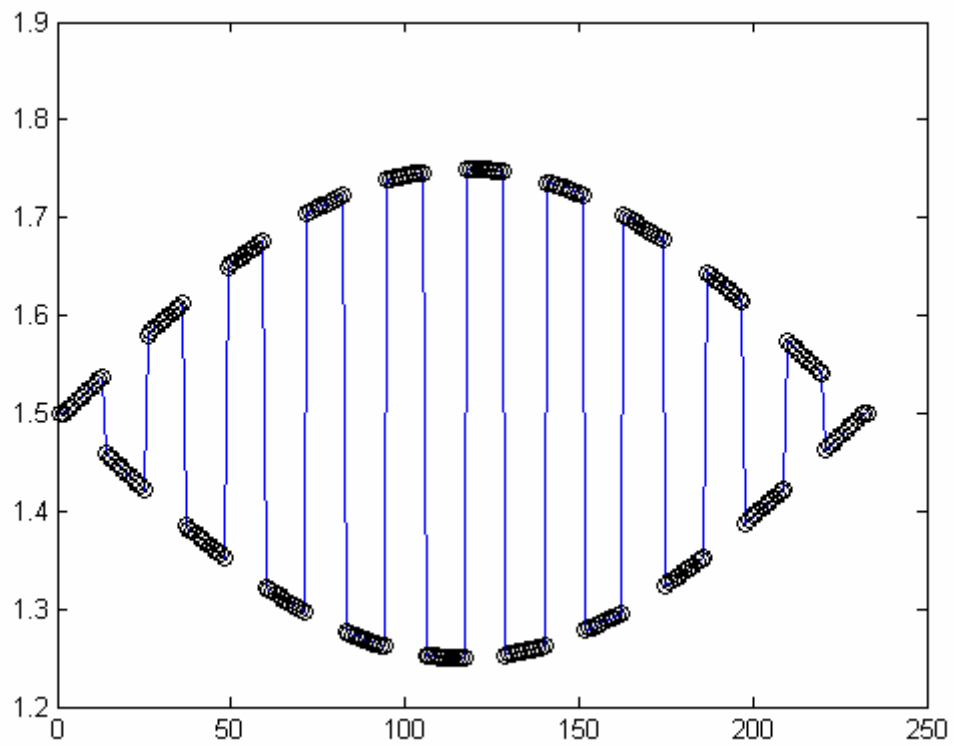


Fig. 4.14. Superposición del índice de refracción sintetizado (línea punteada) sobre el índice de refracción original (línea continua) para una red uniforme cuadrada apodizada. Se comprueba que el funcionamiento del algoritmo es correcto, y además se hace notar que el hecho de utilizar un número primo en el número de puntos por periodo, las muestras siempre coinciden en los mismos lugares en cada periodo.

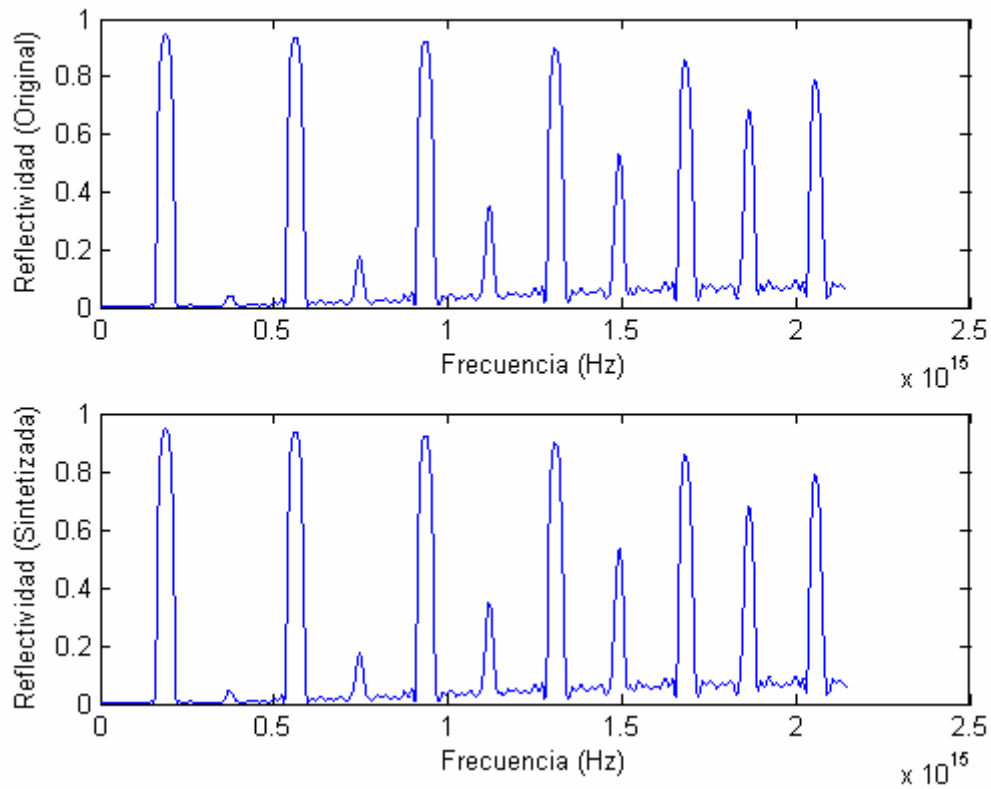


Fig. 4.15. Reflectividad original (arriba) y sintetizada (abajo) obtenidas aplicando el algoritmo de análisis de redes de difracción sobre los índices de refracción original y sintetizado de una red de difracción uniforme cuadrada y apodizada. Se observa aquí también el buen comportamiento del algoritmo en cuanto al dominio de la frecuencia.

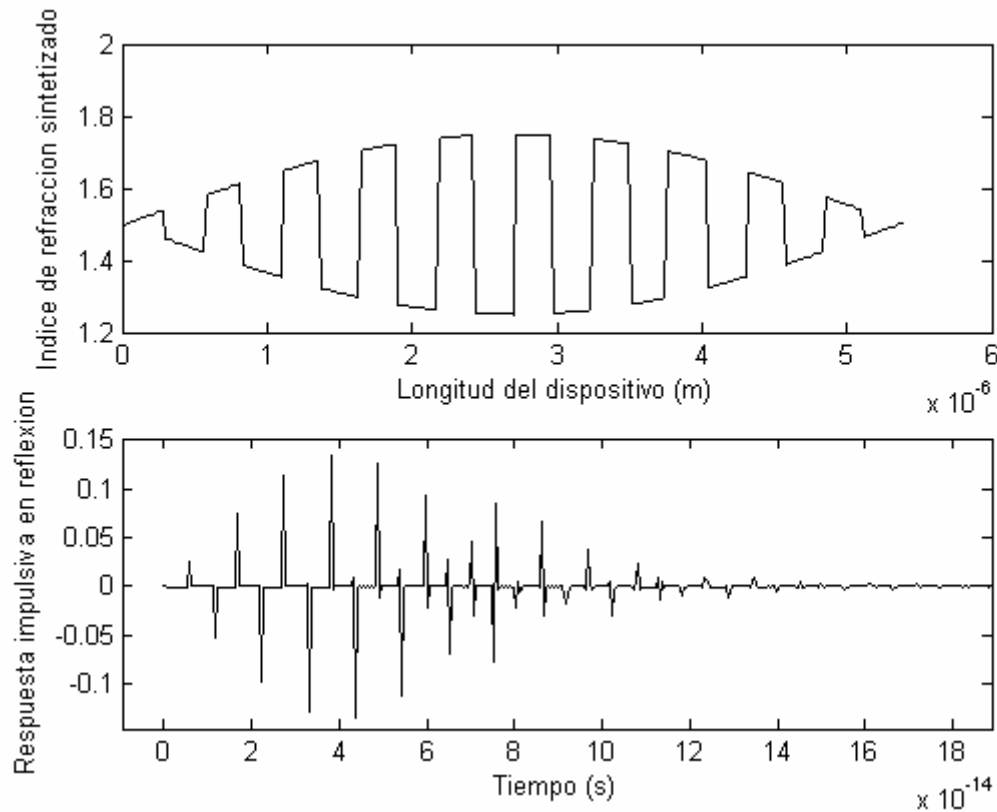


Fig. 4.16. Respuesta impulsiva en reflexión obtenida a partir de la red de difracción original uniforme cuadrada y apodizada (abajo), la cual sirve de base para obtener el índice de refracción sintetizado (arriba).

Para finalizar esta batería de pruebas, probamos ahora la capacidad del algoritmo de sintetizar redes en las cuales varía el periodo. La siguiente red se conoce como red *uniforme chirpeada*, y tiene la característica de que el periodo de red varía linealmente con la longitud de la misma. Como podremos comprobar en las siguientes figuras, el algoritmo funciona correctamente también para este caso.

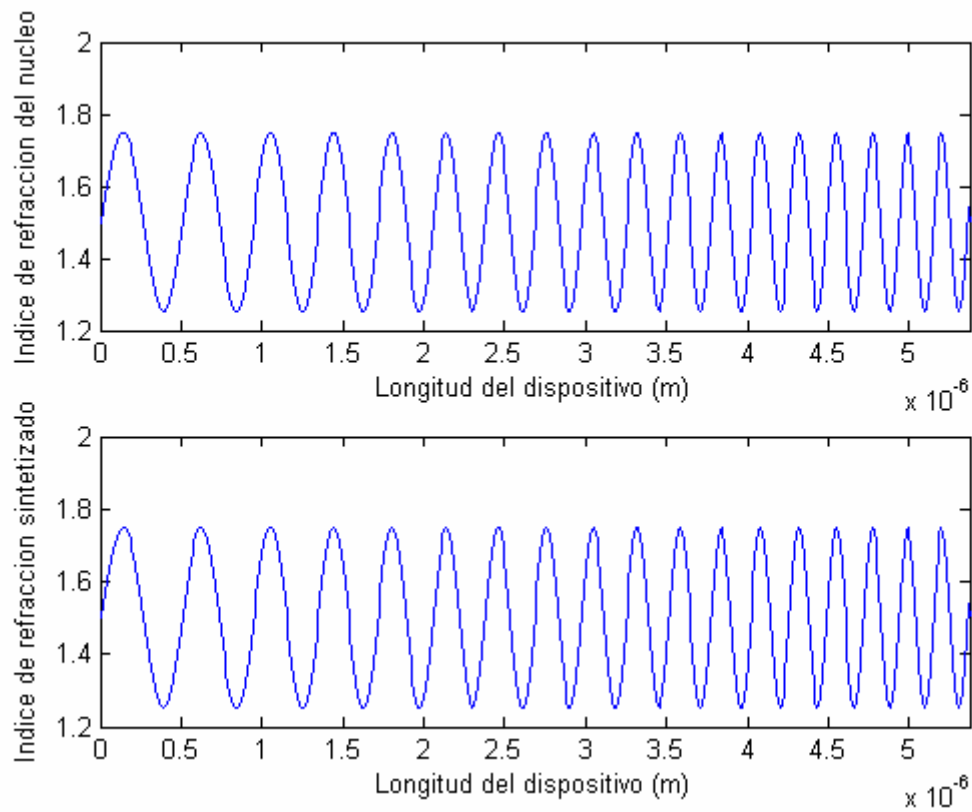


Fig. 4.17. Índices de refracción original (arriba) y sintetizado (abajo) para una red chirpeada de corta longitud cuyo propósito es únicamente el de la prueba del algoritmo.

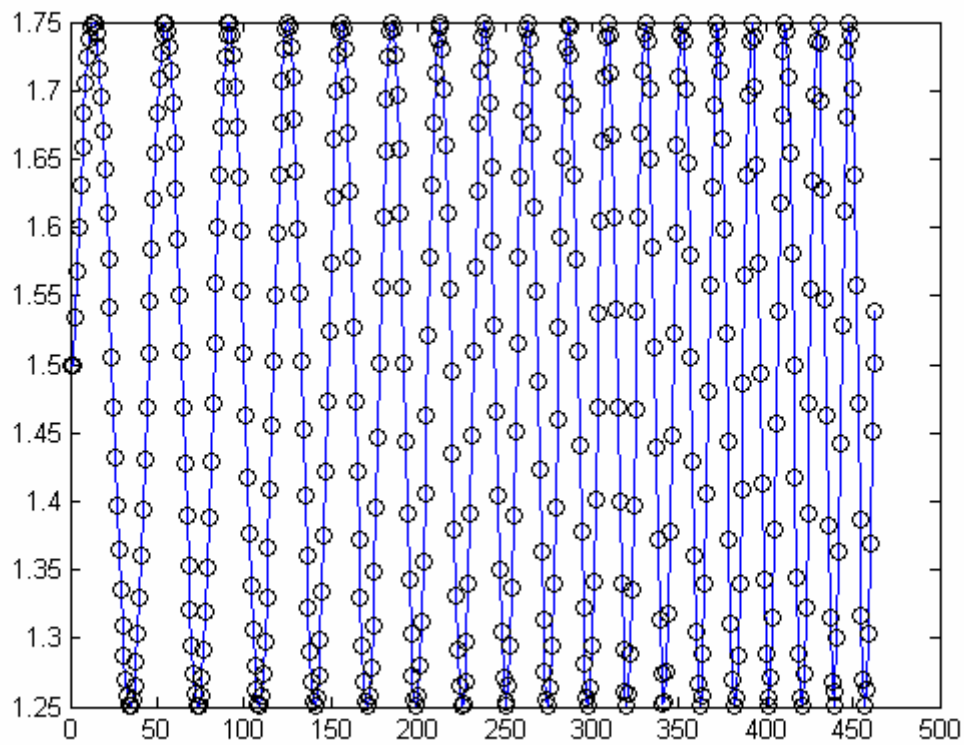


Fig. 4.18. Superposición del índice de refracción sintetizado (línea punteada) sobre el índice de refracción original (línea continua) para una red chirpeada. En este caso las muestras no coinciden en cada periodo, por el hecho de que el mismo va variando linealmente con la longitud del dispositivo.

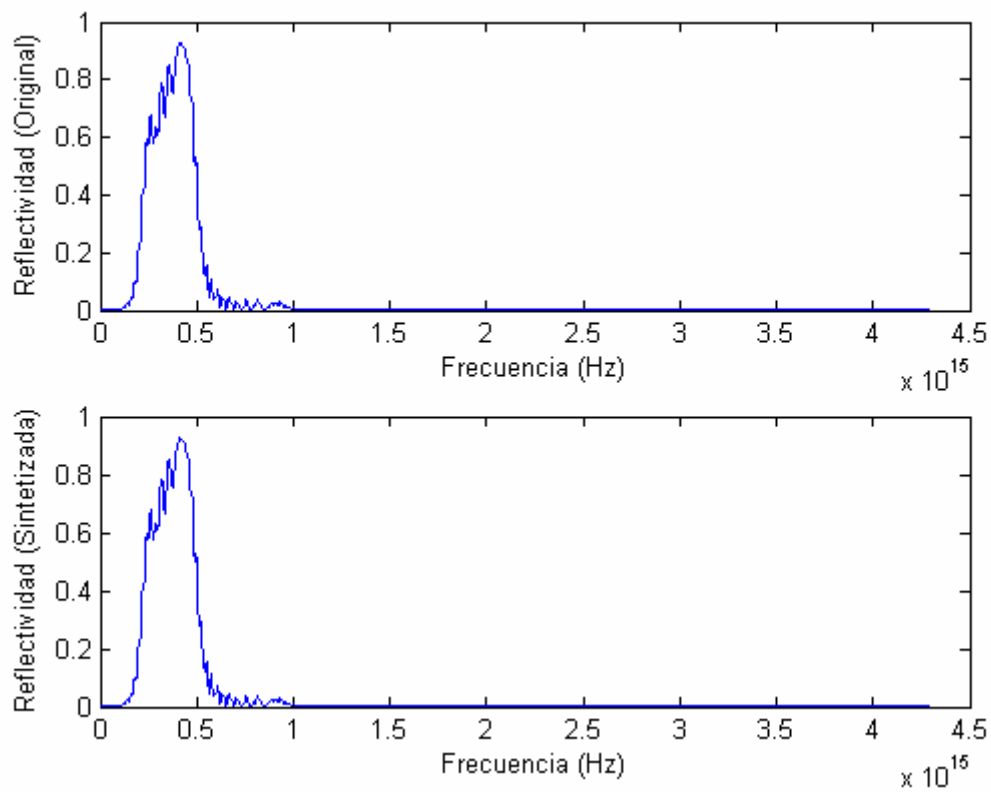


Fig. 4.19. Reflectividad original (arriba) y sintetizada (abajo) obtenidas aplicando el algoritmo de análisis de redes de difracción sobre los índices de refracción original y sintetizado de una red de difracción chirpeada. Se observa aquí también el buen comportamiento del algoritmo en cuanto al dominio de la frecuencia.

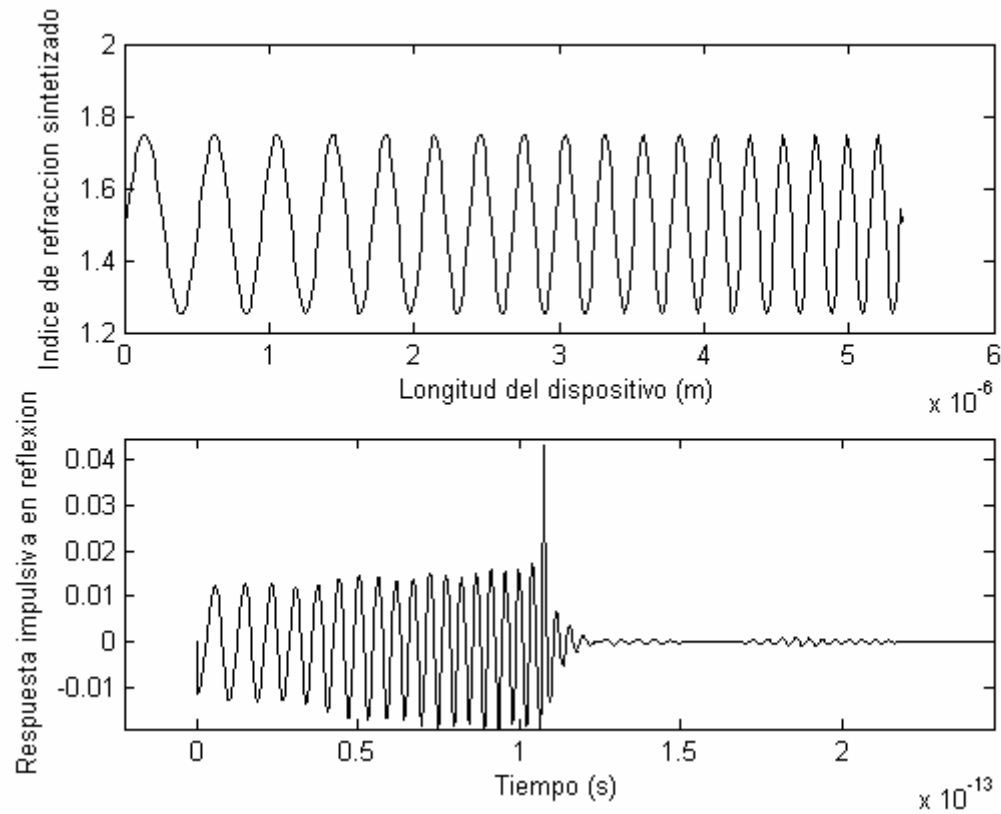


Fig. 4.20. Respuesta impulsiva en reflexión obtenida a partir de la red de difracción original chirpeada (abajo), la cual sirve de base para obtener el índice de refracción sintetizado (arriba).

4.2. Síntesis de redes reales.

Tras comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo para redes a priori sencillas, pasaremos ahora a la síntesis de redes reales. Lo haremos de forma gradual, para ir comprobando que el algoritmo va funcionando siempre correctamente según va aumentando la complejidad de las condiciones de partida.

Para ello, se propone en primer lugar la simulación de una red cuyas especificaciones serán las de un filtro pasa de banda en la banda de comunicaciones ópticas, buscando una característica de filtrado rectangular ideal.

Tras aplicar el algoritmo, se obtendrá el índice de refracción sintetizado, y se aplicará el algoritmo de análisis para verificar que la reflectividad sintetizada se corresponde con la especificada

Las características de la red son:

- Longitud igual a 10 milímetros
- Buscamos un ancho de banda de 200GHz en la banda de comunicaciones ópticas, en concreto entre los 192.7 THz y los 192.9 THz.
- Índice de refracción del núcleo: 1.452
- Tiempo de simulación: 54 horas, 52 minutos y 3 segundos en un ordenador equipado con procesador Pentium®IV @ 2GHz, sistema operativo Windows XP™, y Matlab™ versión 6.5.

En la siguiente figura tenemos la representación del índice de refracción sintetizado, resultado del proceso de aplicación del algoritmo de síntesis. Lo primero que observamos es que el aumento de índice de refracción es perfectamente alcanzable con los métodos de fabricación actuales. Observamos por otra parte que quizá se debiera haber aumentado la longitud del dispositivo a sintetizar, ya que por la parte derecha parece que la función que marca la variación del índice queda algo recortada. Esto se sabía a priori antes de sintetizar la red, y tras el proceso de especificaciones, ya que se aplicó una función de apodización a la respuesta impulsiva. Sin embargo, los resultados son muy buenos, como se puede apreciar en la figura 4.22., que representa en detalle la reflectividad del dispositivo, obtenida después de aplicar un algoritmo de análisis al índice de refracción sintetizado.

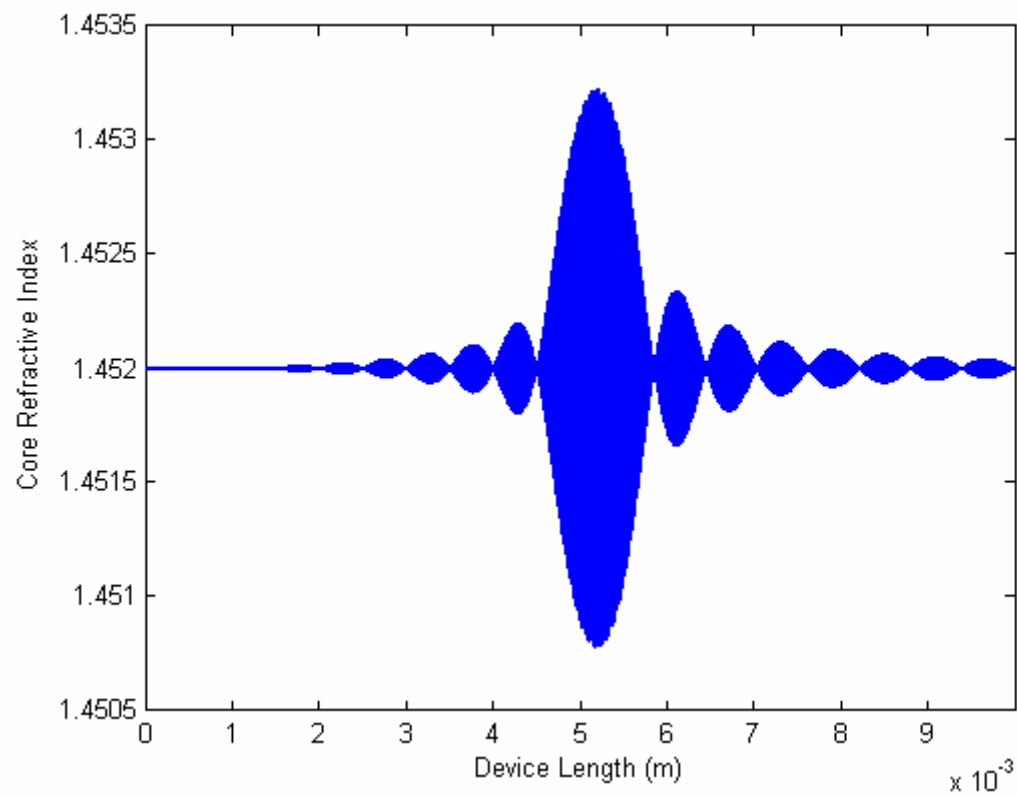


Fig. 4.21. Índice de refracción sintetizado por el algoritmo a partir de las especificaciones. Corresponde a un filtro ideal de 200GHz de ancho de banda

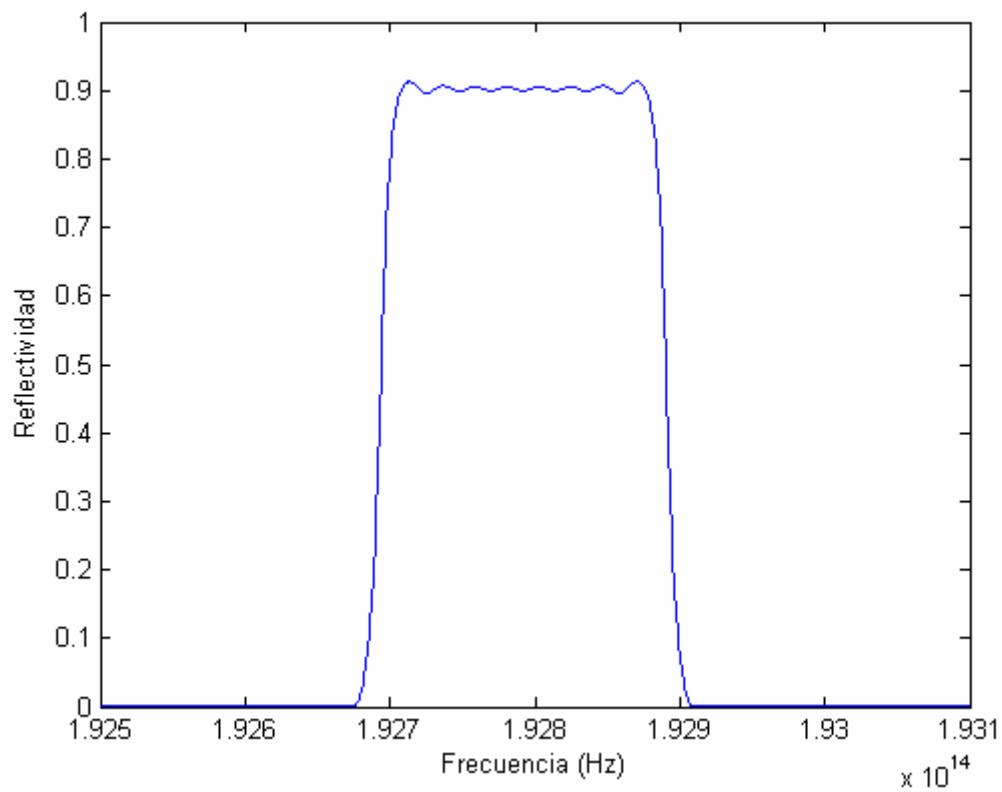


Fig. 4.22. Reflectividad del dispositivo sintetizado, obtenida mediante un proceso de análisis. Se observa cómo la caída es muy abrupta, y cómo no existen lóbulos secundarios. El pequeño rizado en la banda de paso se debe a que no se ha seleccionado una longitud adecuada de síntesis, hubiera sido preferible una longitud mayor.

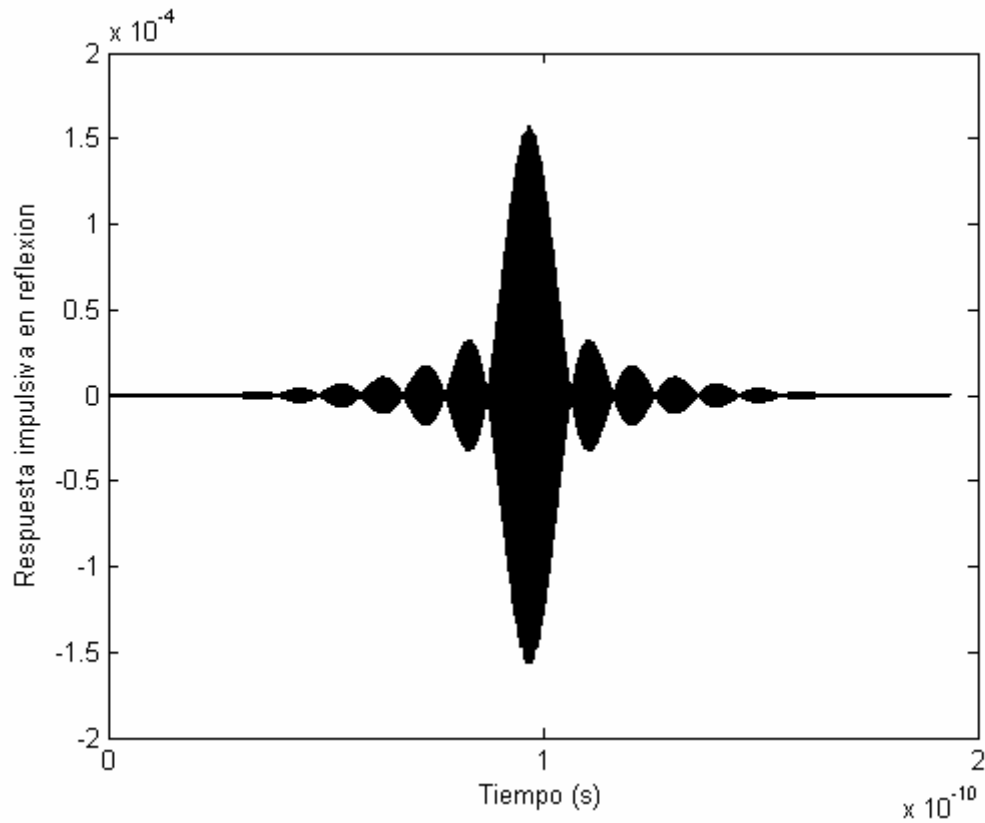


Fig. 4.23. Respuesta impulsiva en reflexión, obtenida a partir del proceso de especificaciones. Se ha aplicado una función de apodización para compensar los efectos de una corta longitud.

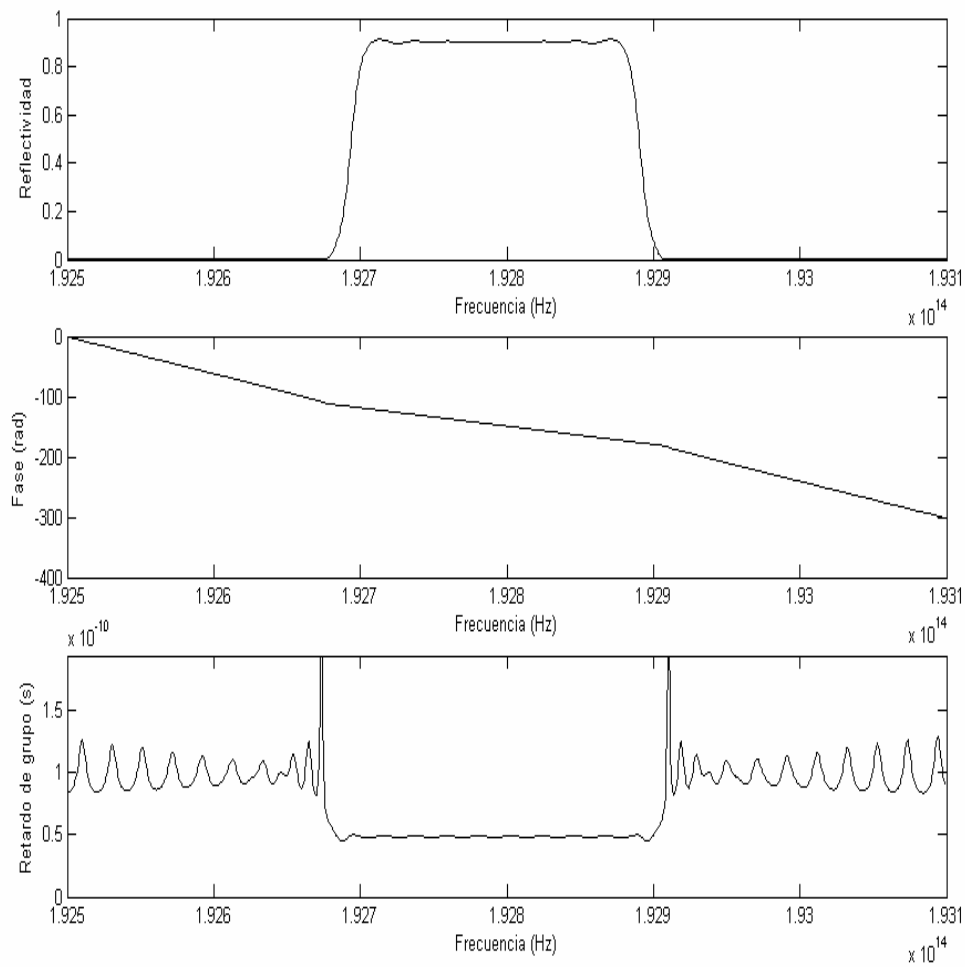


Fig. 4.24. En esta figura comparamos la reflectividad (arriba) con la respuesta en fase (centro) y en retardo de grupo (abajo). Se observa cómo la fase es perfectamente lineal en el ancho de banda de la banda pasante, y como consecuencia, el retardo de grupo es prácticamente plano. Estas características hacen que la red sintetizada ofrezca una excelente respuesta para el filtrado de señales en el dominio óptico.

Una vez comprobado el buen funcionamiento del algoritmo también en este caso, pasaremos ahora a realizar una prueba más exigente: crearemos unas especificaciones en las que se intentarán conseguir dos bandas de paso rectangulares ideales con una red de la misma longitud. Las especificaciones demandadas a la red son:

- Longitud igual a 10 milímetros
- Buscamos un ancho de banda de 200GHz en dos bandas de comunicaciones ópticas, en concreto entre los 192.7 THz y los 192.9 THz, y entre los 185.8 THz y los 186.0 THz.
- Índice de refracción del núcleo: 1.452

Los resultados obtenidos son los que se muestran en las siguientes figuras. Como se puede comprobar, se obtienen las dos bandas de paso especificadas, sin lóbulos secundarios, con lo cual vemos que se han conseguido sintetizar las dos bandas de paso ideales sin necesidad de aumentar la longitud de la red. Esto es un resultado de gran importancia, ya que los métodos de síntesis tradicionales proponen sintetizar cada banda de paso por separado, para luego poner una red de difracción a continuación de la otra y así obtener el filtro con las dos bandas deseadas. Como se puede observar también las figuras, el comportamiento en cuanto a fase y retardo de grupo es también muy bueno.

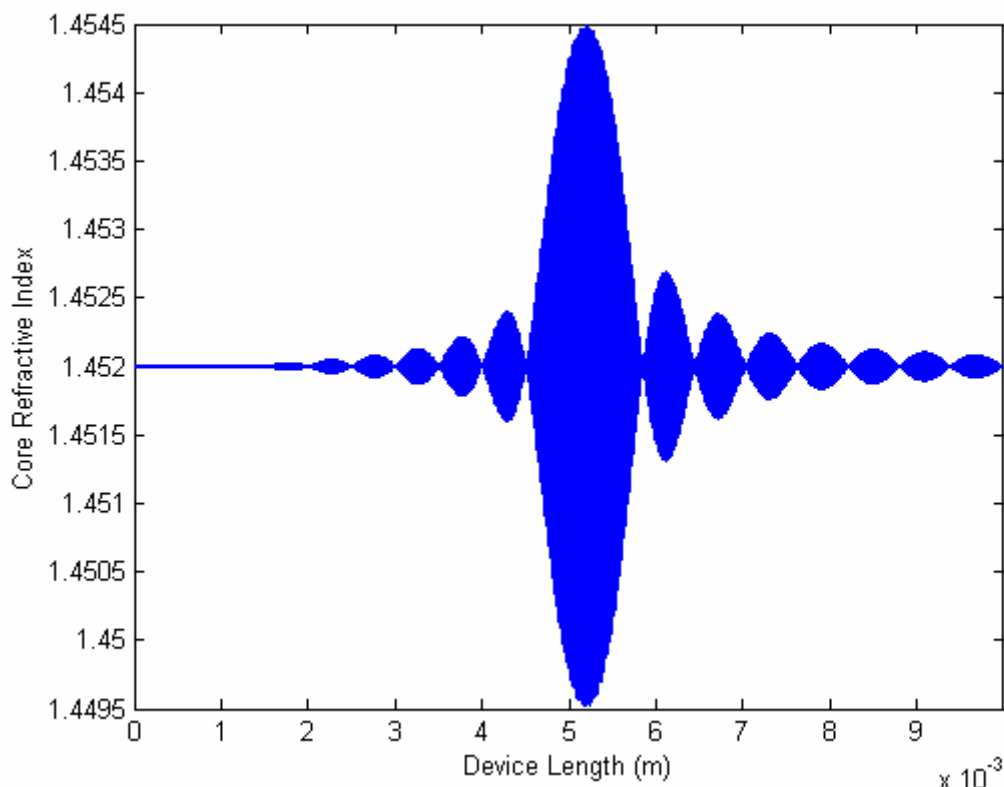


Fig. 4.25. Índice de refracción sintetizado por el algoritmo a partir de las especificaciones. Corresponde a un filtro ideal de con dos bandas de paso de 200GHz.

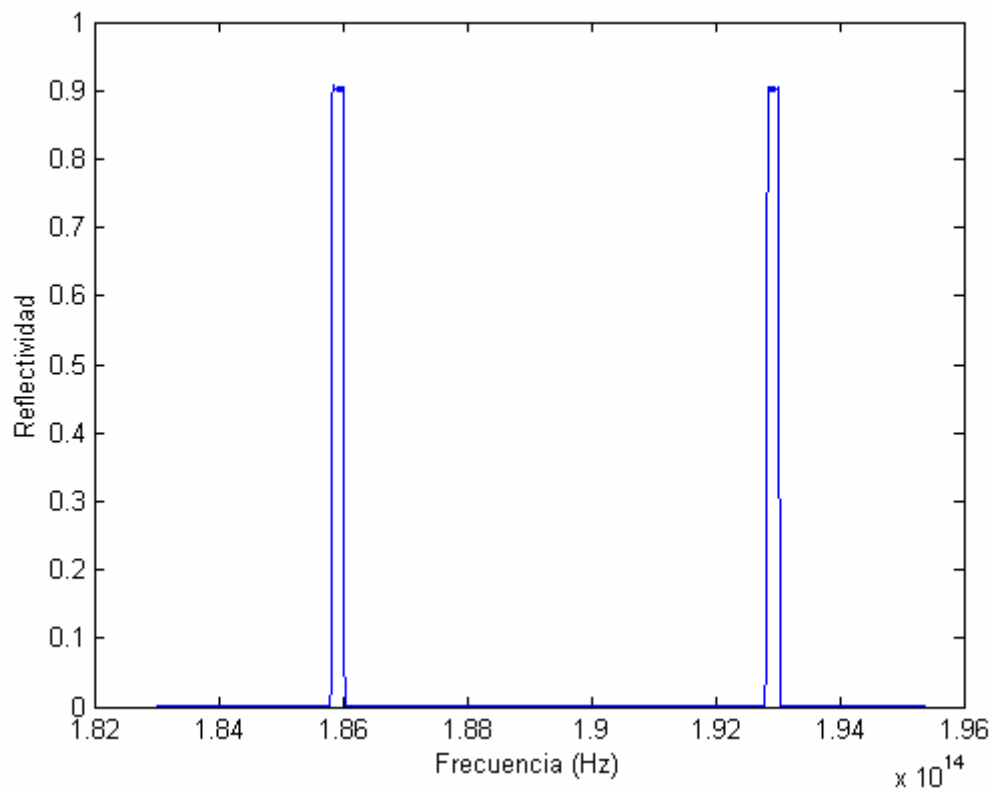


Fig. 4.26. Reflectividad del dispositivo sintetizado, obtenida mediante un proceso de análisis. Se observa cómo la caída es muy abrupta, y cómo no existen lóbulos secundarios. El pequeño rizado en la banda de paso se debe a que no se ha seleccionado una longitud adecuada de síntesis, hubiera sido preferible una longitud mayor.

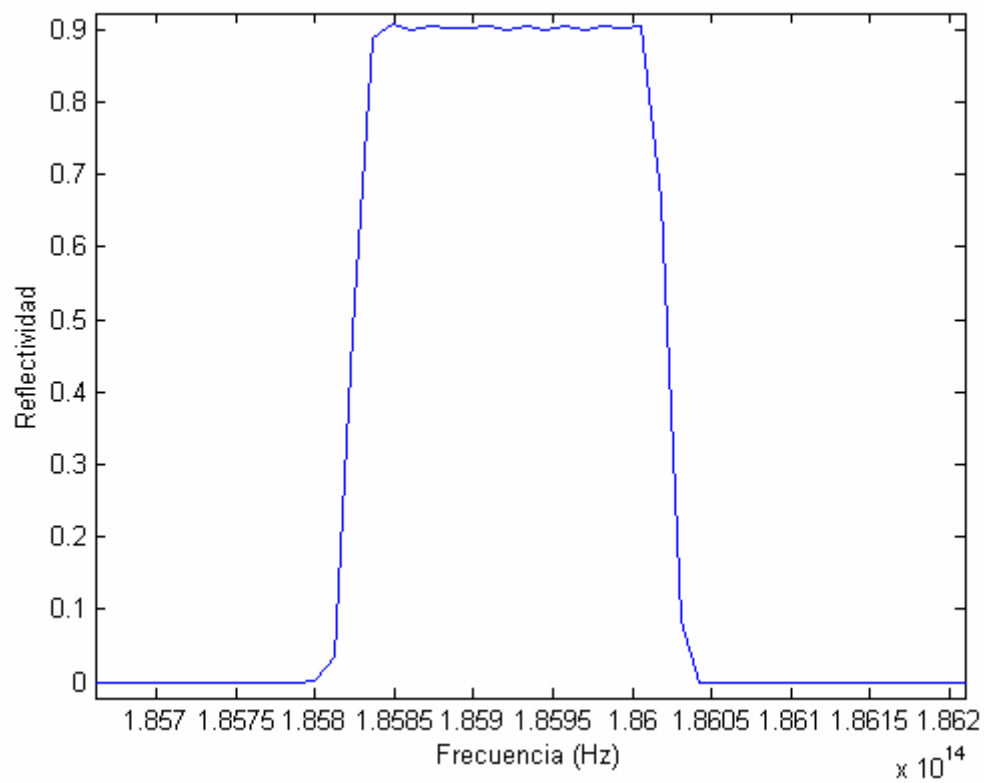


Fig. 4.27. Detalle de una de las bandas de paso de la reflectividad anterior, donde se observan con más precisión las características mencionadas.

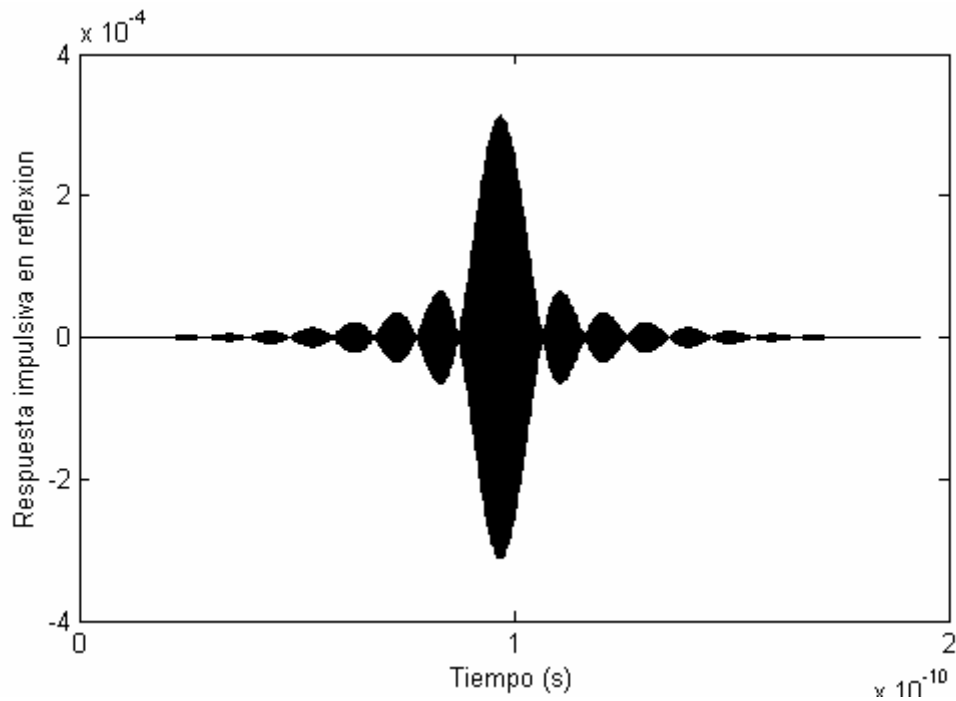


Fig. 4.28. Respuesta impulsiva en reflexión, obtenida a partir del proceso de especificaciones. Se ha aplicado una función de apodización para compensar los efectos de una corta longitud.

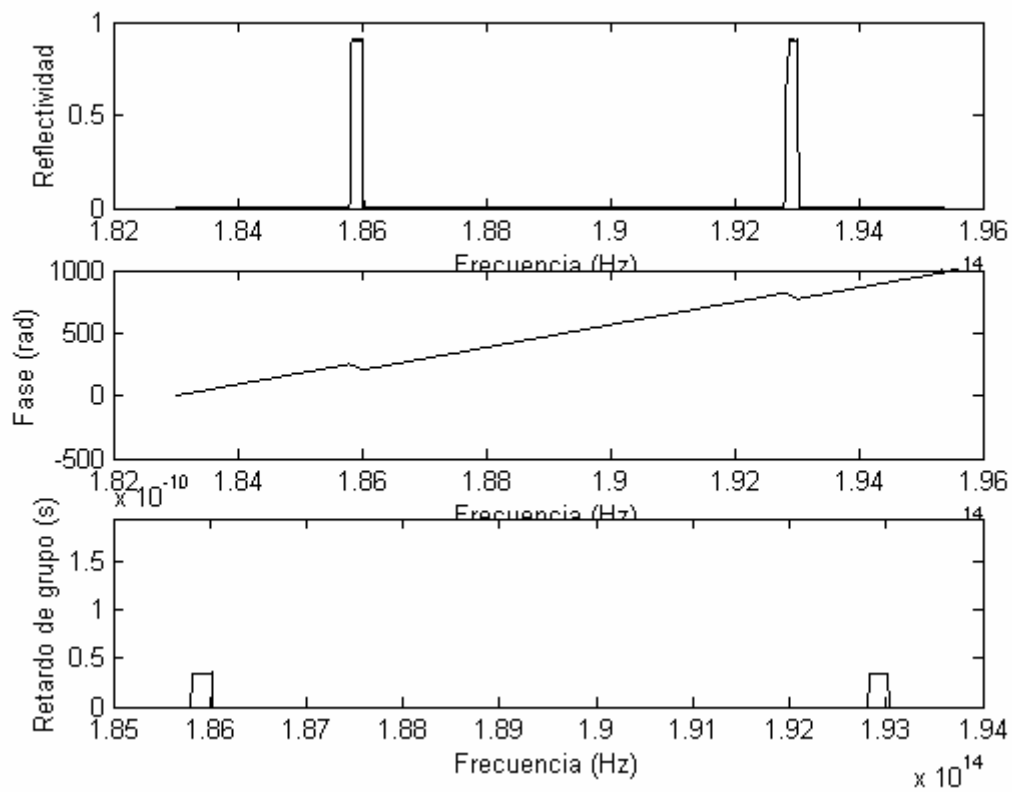


Fig. 4.29. En esta figura comparamos la reflectividad (arriba) con la respuesta en fase (centro) y en retardo de grupo (abajo). Se observa cómo la fase es perfectamente lineal en el ancho de banda de la banda pasante, y como consecuencia, el retardo de grupo es prácticamente plano. Estas características hacen que la red sintetizada ofrezca una excelente respuesta para el filtrado de señales en el dominio óptico.

Con la misma longitud de red, trataremos ahora, como última prueba, de conseguir una característica de filtrado en forma triangular, es decir, la banda de paso tendrá ahora una caída lineal. Las características de esta red serán:

- Longitud igual a 10 milímetros
- Buscamos una respuesta triangular, centrada en 1.929 THz y cuyas caídas lineales se extiendan hasta 1.924 THz y 1.934 THz
- Índice de refracción del núcleo: 1.452

Los resultados obtenidos son los que se muestran en las siguientes figuras. Como se puede comprobar, se obtiene una característica de filtrado rectangular, tal y como estaba especificado, y además tenemos que las respuestas en fase y en retardo de grupo son excelentes para el filtrado de señales. Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

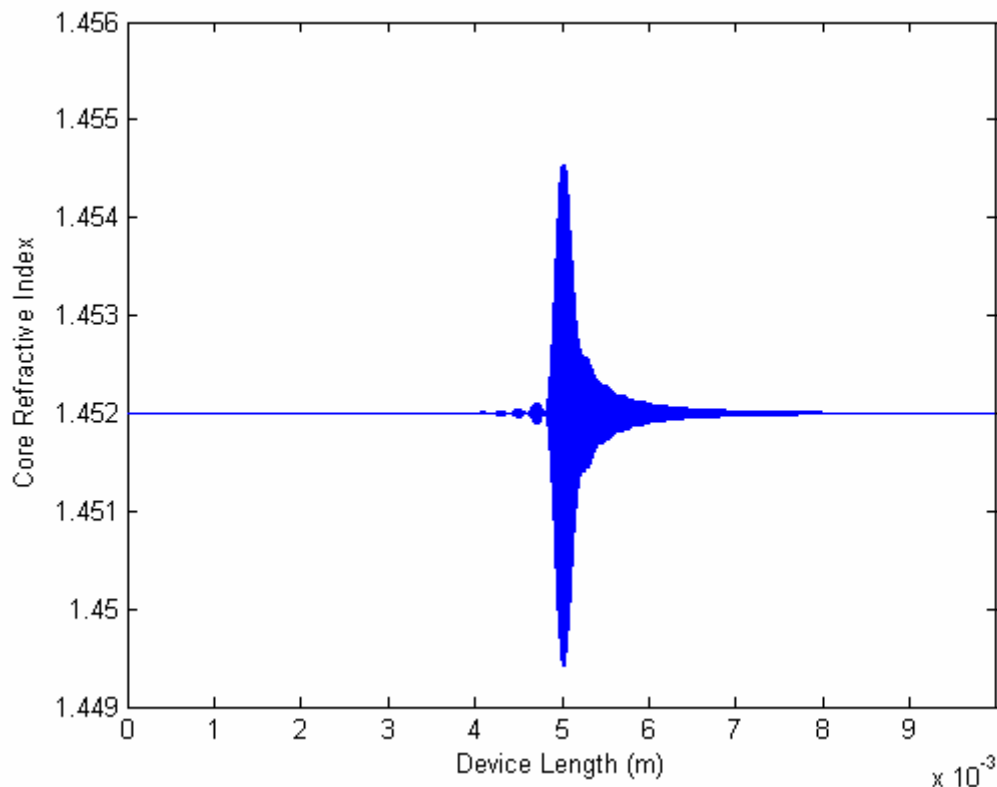


Fig. 4.30. Índice de refracción sintetizado por el algoritmo a partir de las especificaciones. Corresponde a un filtro triangular.

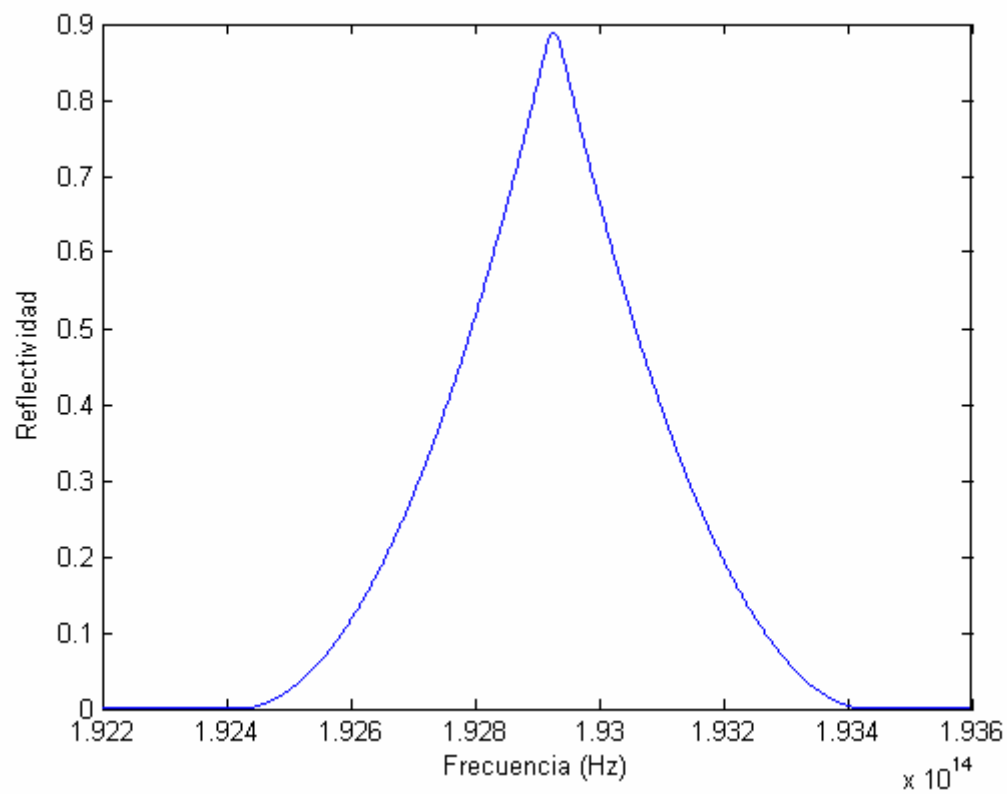


Fig. 4.31. Reflectividad del dispositivo sintetizado, obtenida mediante un proceso de análisis. Se observa cómo la forma del filtro es prácticamente triangular, cumpliéndose así las especificaciones.

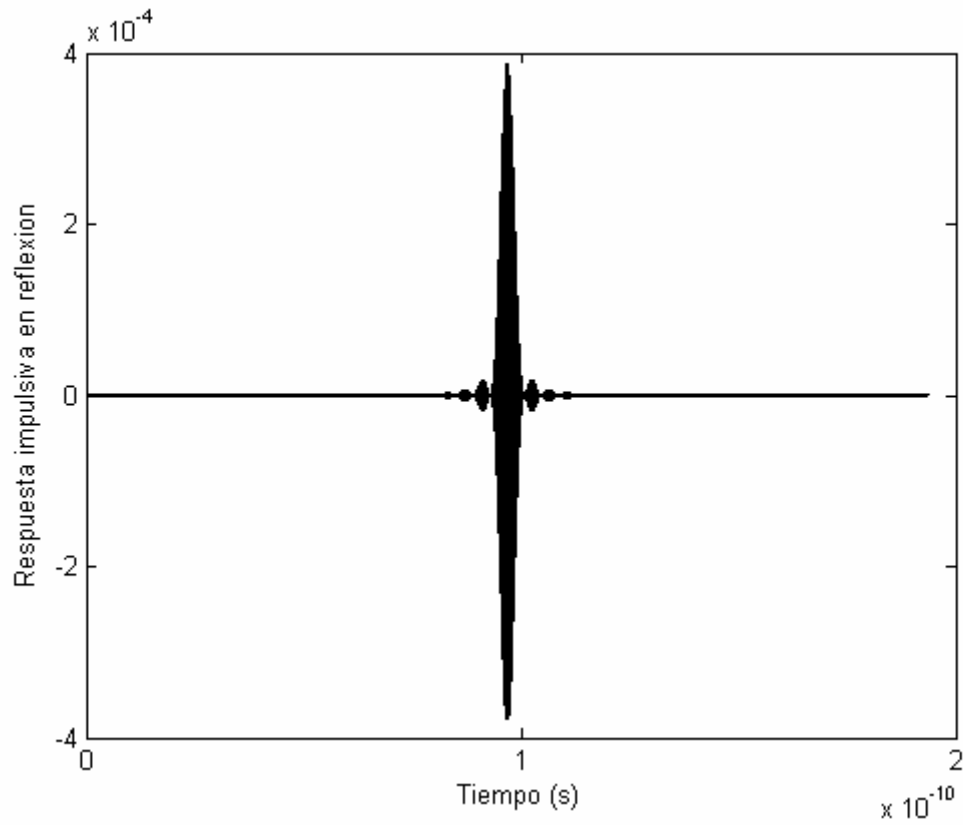


Fig. 4.32. Respuesta impulsiva en reflexión, obtenida a partir del proceso de especificaciones. Se ha aplicado una función de apodización para compensar los efectos de una corta longitud.

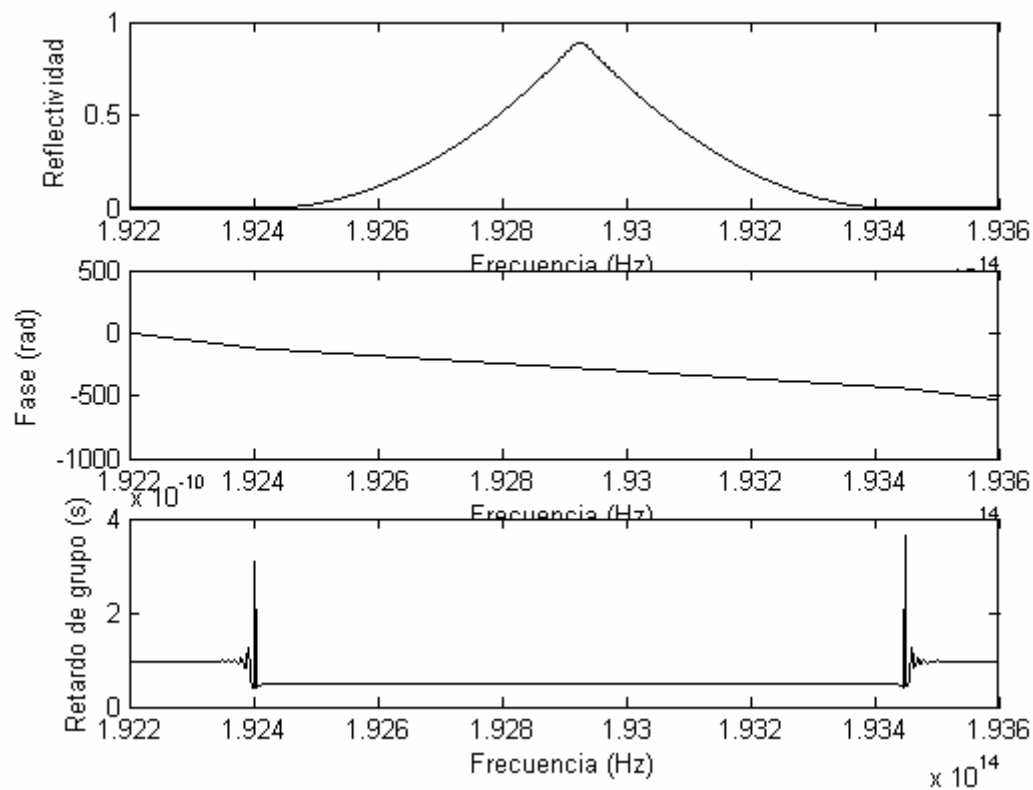


Fig. 4.33. En esta figura comparamos la reflectividad (arriba) con la respuesta en fase (centro) y en retardo de grupo (abajo). Se observa cómo la fase es perfectamente lineal en el ancho de banda de la banda pasante, y como consecuencia, el retardo de grupo es prácticamente plano. Estas características hacen que la red sintetizada ofrezca una excelente respuesta para el filtrado de señales en el dominio óptico.

CAPÍTULO 5: Procesos de fabricación.

Una vez explicado el algoritmo y su funcionamiento, vemos que realmente es posible especificar cualquier tipo de filtro y sintetizarlo, al menos de forma teórica. Sin embargo, hay que pasar de la síntesis a la fabricación, ya que el objetivo último de la síntesis teórica es el que se puedan aprovechar sus resultados para pasar de la teoría a la práctica, es decir, fabricar redes de difracción de Bragg en fibra cuyas características se ajusten a las especificaciones definidas en principio de forma teórica. En este apartado comentaremos los procesos de fabricación de estas redes, así como los problemas derivados de pasar de la síntesis a la fabricación.

5.1. El paso de la síntesis a la fabricación.

Tras el proceso de síntesis, conocemos de forma exacta las variaciones en el índice de refracción que se deben producir en el seno del núcleo de la fibra óptica para que su respuesta en reflexión tenga las características de filtrado que deseamos. El ámbito de la fabricación de las redes de difracción es muy distinto al ámbito de desarrollo de los algoritmos de síntesis, en fabricación, estamos en un entorno eminentemente práctico donde los errores provienen de una falta de precisión en el manejo de componentes o maquinaria, y donde no siempre podemos grabar en la fibra el patrón de variación del índice que deseamos.

Para conocer todos estos problemas, daremos a continuación un paseo rápido por los métodos de fabricación existentes, para luego decidir cómo se ajusta nuestro algoritmo de síntesis a los problemas reales de la fabricación de redes de difracción de Bragg en fibra.

5.2. Resumen de métodos de fabricación para redes de difracción.

La primera red de difracción, construida por Hill en 1978 [HILL-78] consistía en la grabación del índice de refracción en el núcleo de la fibra a través de luz incidente longitudinal en el núcleo de la fibra, que creaba una onda estacionaria a causa de la reflexión en el extremo contrario del núcleo.

Hoy día sabemos que el hecho que produce la grabación del índice de refracción es la exposición del núcleo de la fibra a un determinado patrón de luz ultravioleta de cierta potencia, lo cual se consigue haciendo incidir una fuente de luz UV en una determinada zona controlada dentro de la longitud de la fibra de manera transversal.

El proceso se conoce como *absorción bifotónica de la luz LASER azul/verde*. Consiste en la absorción de dos fotones hacia un nivel de energía superior, lo cual inicial la ionización de enlaces oxígeno-deficientes (llamados también *defectos*) cuya banda de absorción se centra en 245nm. Los electrones liberados en este proceso son atrapados en otros lugares, siendo el resultado un cambio en el índice de refracción del cristal que permanece aún después de apagar el LASER incidente [RUSELL-93].

Los tiempos de exposición a la luz ultravioleta varía entre 20ns (conseguidos un pulso LASER de excímero a 248nm [RUSELL-93]) y varios minutos. Las redes así construidas pueden soportar altas temperaturas, del orden de hasta 250°C, y tienen un tiempo de vida superior a las decenas de años si las condiciones de funcionamiento no superan los 200°C [OSA-94].

Las técnicas de fabricación más comunes están basadas en la *interferometría* y en las *máscaras de fase*. Dedicaremos una atención especial también a la técnica *escritural punto a punto*, por su interés relacionado con el algoritmo propuesto en el presente proyecto.

5.2.1. Fabricación de redes de difracción mediante interferómetros

Se trata de un método propuesto por Meltz [MELTZ-89], y consiste en atacar al núcleo de la fibra con luz ultravioleta desde un lado de la misma, es decir, transversalmente. Se utiliza un interferómetro para seleccionar manualmente la longitud de onda de Bragg con independencia de la longitud de onda del haz ultravioleta incidente (algo que no se puede hacer con el método de Hill). En la siguiente figura se ilustra el proceso:

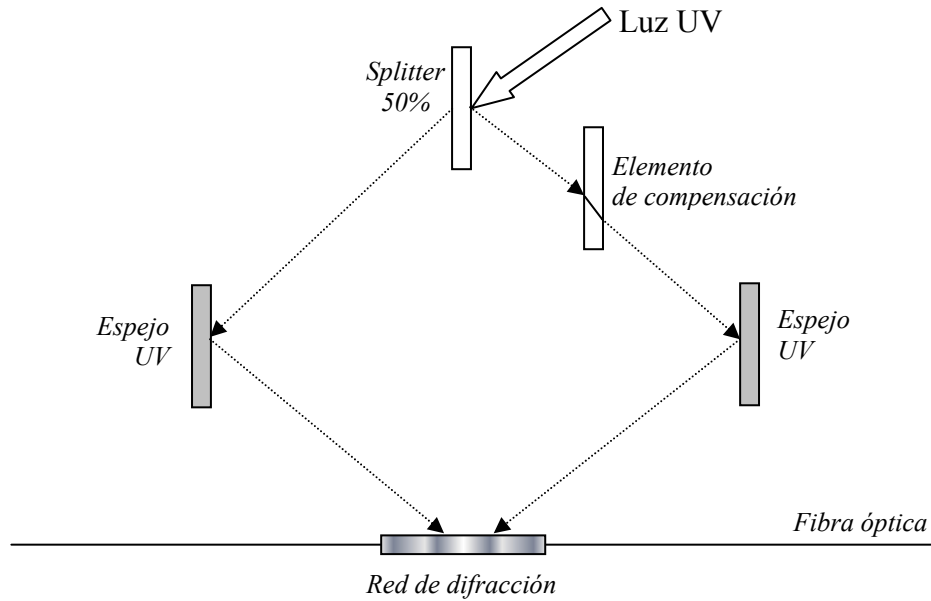


Fig. 5.1. Interferómetro para la inscripción de redes de difracción en fibra óptica. El sistema de espejos crea un patrón de interferencia en la zona de la fibra destinada a la red de difracción, siendo dicho patrón el responsable, tras un cierto tiempo de exposición, de la inscripción permanente de un cambio en el índice de refracción del núcleo de la fibra.

La luz ultravioleta se divide en dos haces que son llevados nuevamente al mismo punto, en este caso la zona de la fibra donde queremos inscribir la red, mediante dos espejos. La longitud de onda de Bragg será inversamente proporcional al seno del semiángulo con el que los dos haces son guiados hacia la fibra, como indica la siguiente relación, que se cumple para el esquema mostrado en la figura anterior:

$$\lambda_{Bragg} = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{n_{uv} \sin(\frac{\theta}{2})}$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra, λ_{uv} es la longitud de onda de la luz ultravioleta, n_{uv} es el índice de refracción de los espejos y θ es el ángulo con que llegan los dos haces a la fibra.

Este método resulta muy bueno para inscribir redes de difracción con haces de un solo pulso a longitudes de onda dentro del espectro visible. Sin embargo, la existencia de vibraciones mecánicas en el montaje, y el largo camino que recorren los haces de luz a través del aire pueden ocasionar errores en el espectro interferente resultante, degradándose la calidad del método cuanto mayor es el tiempo de exposición [KASHYAP-99].

Nótese que la diferencia en la longitud de los caminos que recorren los dos haces debe ser nula, y por eso es necesario introducir un elemento de compensación en el camino del haz que no pasa a través del divisor de haces.

5.2.2. Fabricación de redes de difracción mediante máscaras de fase

Una máscara de fase no es más que una red de difracción realizada en un sustrato de Silicio. El grabado en el Silicio de dicha red se realiza mediante procesos de *etching* muy controlados, en los que el espaciado entre las ranuras de difracción y la profundidad de dichas ranuras son datos que marcarán con suma precisión el patrón difractado de luz ultravioleta.

El principio de operación consiste en que la luz ultravioleta incidente en la máscara de fase se difracta en diferentes órdenes, que numeramos como $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Los haces incidente y refractado satisfacen la *ecuación general de la difracción* [KASHYAP-99]:

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\sin(\frac{\theta_m}{2}) - \sin(\theta_i)}$$

donde Λ_{pm} es el periodo de la máscara de fase, θ_m es el doble del ángulo del orden difractado, λ_{uv} es la longitud de onda del haz ultravioleta y θ_i es el ángulo del haz ultravioleta incidente. La siguiente figura muestra el esquema general de la difracción debida a una máscara de fase:

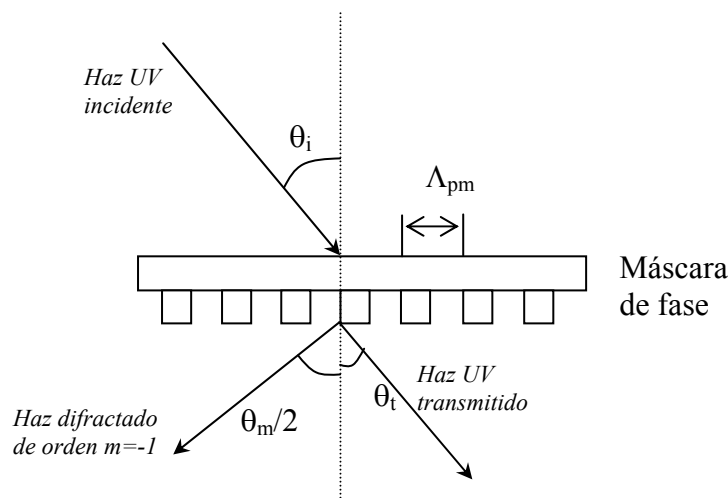


Fig 5.2. Esquema del proceso de difracción que ocurre cuando un haz incidente de luz llega a una máscara de fase. Gracias al grabado de dicha máscara, podemos controlar el haz difractado.

Para controlar el patrón grabado en el núcleo de la fibra, es necesario minimizar el número de órdenes difractados en la máscara de fase, lo cual se consigue si el haz

incidente en dicha máscara tiene un ángulo $\theta_i = 0$. En este caso, la radiación se divide en el orden 0 y los órdenes ± 1 . Estos dos últimos órdenes se pueden hacer coincidir en el núcleo de la fibra mediante dos espejos, tal y como se vio en el método consistente en interferómetros.

El periodo de la red inscrita finalmente en la fibra óptica dependerá del periodo de la máscara de fase. Se puede demostrar [KASHYAP-99] que dichos periodos se relacionan mediante la ecuación:

$$\Lambda_g = \frac{N\lambda_{\text{Bragg}}}{2n_{\text{eff}}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}$$

donde $N \geq 1$ es un entero que indica el orden del periodo de la red de difracción. El orden 0 de difracción debe ser minimizado todo lo posible en intensidad, ya que se cruza en el camino de los órdenes ± 1 que se utilizan para inscribir la red en la fibra óptica. Esto se consigue con técnicas de ajuste del espaciado entre las ranuras de la máscara de fase, pero sólo puede obtenerse la reducción cuasi-total para una única longitud de onda, por lo que cambiar el LASER de luz ultravioleta incidente requiere también el cambio de la máscara de fase.

La técnica de las máscaras de fase está muy extendida, llegando a la construcción de interferómetros en los que la máscara de fase es el elemento principal. Introduciendo espejos rotatorios, o dejando libre el movimiento de la fibra en ciertos ejes durante el proceso de inscripción, se pueden obtener distintos tipos de redes de difracción mediante esta técnica.

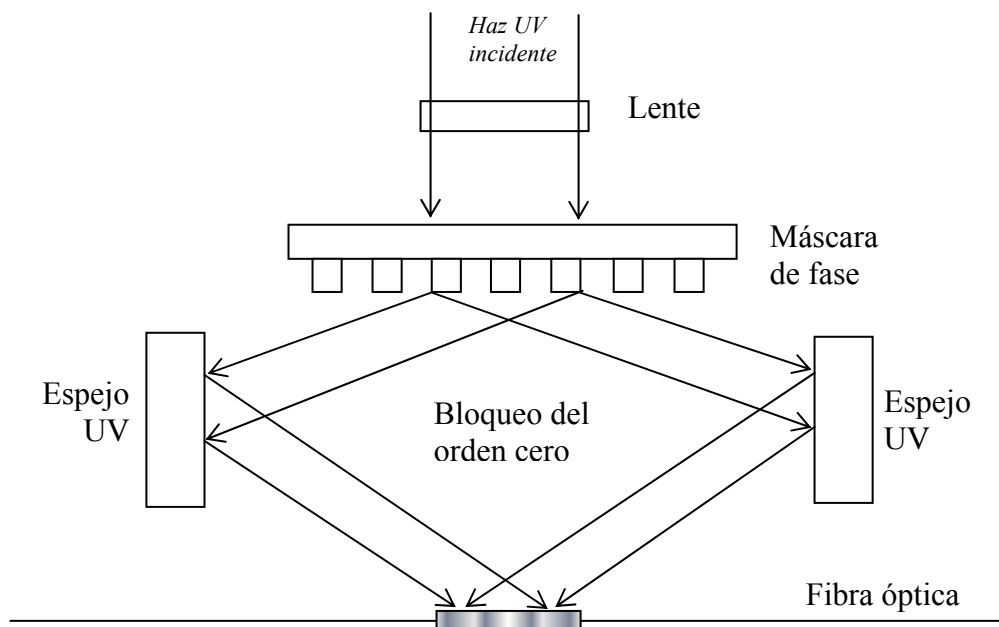


Fig 5.3. Esquema de fabricación de una red de difracción con máscara de fase, en un montaje que a base de reflexiones en espejos consigue eliminar el efecto del haz transmitido por la máscara.

5.2.3. Técnica de grabado punto a punto

La técnica de grabado punto a punto es una derivación de la técnica del interferómetro con máscara de fase, que se basa en que se puede restringir la zona de exposición a la luz ultravioleta del núcleo de la fibra a longitudes menores que un periodo de red. Por ejemplo [KASHYAP-99], para una red de difracción de longitud de onda $1.5\mu\text{m}$, su periodo es de unas $0.5\mu\text{m}$, y el mínimo tamaño de una zona de exposición para un LASER de 244nm es justamente la mitad.

Esta técnica es muy interesante, pero es muy difícil de aplicar, ya que es complicado manejar con exactitud el movimiento de la zona de exposición a lo largo del núcleo de la fibra. Se trata de un método muy bueno para redes en las que el periodo de red es muy grande, siempre y cuando la red no sea demasiado larga. El avance de este método, que va de la mano de los avances en las técnicas de fabricación de máscaras de fase, hará este método aplicable para redes cuyo periodo de red sea mucho menor.

5.3. Aplicación de las técnicas de fabricación al algoritmo de síntesis

Es claro que con los métodos de fabricación actuales resulta sencillo inscribir redes de difracción en fibras ópticas siempre y cuando el patrón de variación del índice de refracción se pueda obtener mediante productos de cualquier orden de formas sinusoidales, ya que éstos se pueden obtener con técnicas de interferometría.

Sin embargo, el algoritmo propuesto no tiene en cuenta que el resultado tenga que ser de una forma u otra, ya que ajusta el valor del índice en cada punto para obtener una característica en reflexión fiel a la especificada.

Una forma de adaptar los métodos de fabricación a este algoritmo de síntesis sería el análisis del índice de refracción sintetizado para su descomposición en formas de onda sinusoidales que puedan obtenerse mediante técnicas de interferometría. Este método resulta sencillo para redes no demasiado complejas, en las que no existan demasiadas variaciones del periodo de red, pero resulta más complejo cuando la red sintetizada contiene múltiples variaciones del periodo, y una función de apodización que tampoco sea derivable de una senoide. Sería posible sin embargo el estudio ulterior de este método, aunque no es el objetivo de este proyecto.

Otra forma de adaptar el algoritmo a los métodos de fabricación podría ser afinar la técnica de grabado punto a punto, para que permita inscribir redes cuyos periodos de red estén en el orden de los nm. Una línea de investigación en este sentido podrían ser los *sistemas microelectromecánicos* (MEMS), que permiten una exactitud mecánica enorme en el campo de la nanotecnología. Tampoco es el objetivo de este proyecto profundizar sobre este tema.

CAPÍTULO 6: Conclusiones y líneas abiertas

6.1. Conclusiones.

En este proyecto se ha presentado un algoritmo de síntesis exacta de redes de difracción en fibra óptica que no utiliza la formulación matemática de la teoría de acoplo de modos. Éste es quizá el aspecto más relevante de este algoritmo, que demuestra que es posible la síntesis exacta de estas redes sin acudir a las complejas expresiones que contienen las ecuaciones diferenciales acopladas que modelan el acoplo entre modos de propagación de la luz dentro del núcleo de una fibra. El método propuesto, basado en una teoría que no es nueva (la teoría de medios multicapa), se enfrenta al principal problema de los algoritmos basados en la misma, que es la velocidad de simulación. Si bien se ha conseguido reducir en gran medida el tiempo de simulación para redes de corta longitud (hasta 3mm), igualando la eficacia del método con aquéllos basados en las ecuaciones de acoplo de modos, cuando la longitud de la red a sintetizar aumenta, el tiempo de simulación se hace demasiado largo. Esto nos permite concluir que estamos ante un algoritmo que supera con creces a aquéllos basados en la teoría de acoplo de modos para redes cortas, ya que iguala a los mismos en velocidad, y los supera bien en exactitud o en versatilidad. Sin embargo, para redes más largas, el algoritmo sigue siendo el más exacto y versátil, aunque su eficiencia se ve mermada en cuanto a velocidad.

El hecho de que este problema sea crítico es muy subjetivo, ya que tenemos que tener en cuenta que el proceso de síntesis se realiza una sola vez para luego fabricar el número de redes de difracción que sea necesario. Al no tener que realizar el proceso de síntesis por cada red fabricada, el rendimiento final no tiene porqué verse afectado en gran medida.

6.2. Líneas abiertas

El presente trabajo de investigación profundiza sobre todo en dos aspectos, que son la mejora de la eficiencia de sistemas de computación basados en Matlab™ para el aumento de la velocidad de dicha computación, y la profundización en el conocimiento de la síntesis de redes de difracción de Bragg en fibra óptica.

Sobre el primer aspecto, sería interesante aprovechar las conclusiones obtenidas en este proyecto para aplicar las mejoras en cuanto a velocidad de computación en otros algoritmos de síntesis para aumentar su eficiencia, y por qué no, en cualquier algoritmo basado en el mismo tipo de cálculos.

Por otro lado, y en cuanto a las redes de difracción, este proyecto no pretende, ni mucho menos, dar por zanjada la cuestión en cuanto a síntesis de una manera definitiva, sino que la impresión obtenida es la de que todavía queda mucho por recorrer. El algoritmo presentado pretende ser de utilidad en el presente, y servir como un granito de arena más en la investigación sobre este tema aportando una nueva idea más y otro punto de vista a tener en cuenta.

Referencias

- [CARBALLAR-03] A. Carballar, C. Janer
Apuntes de cátedra de la asignatura: Comunicaciones Ópticas
ESI de Sevilla, 2003
- [CARBALLAR-99] A. Carballar
Estudio de redes de difracción en fibra para su aplicación en comunicaciones ópticas
Tesis Doctoral, U. Politécnica de Madrid, 1999
- [ERDOGAN-97] Turan Erdogan
Fiber Grating Spectra
Journal of lightwave technology, Aug. 1997, pp 1277-1294
- [FECED-99] R. Feced, N. Zervas, M.A. Muriel
An Efficient Inverse Scattering Algorithm for the Design of Nonuniform Fiber Bragg Gratings
IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 35, No. 8, Ago. 1999, pp 1105-1115
- [FRIGO-03] M. Frigo, S. G. Johnson
Fastest Fourier Transform of the West
Massachusetts Institute of Technology, 2003
- [HILL-78] K.O. Hill *et al.*
Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication.
Appl. Phys. Lett. 32, 1978
- [KASHYAP-99] Raman Kashyap
Fiber Bragg Gratings
Academic Press, 1999
- [MELTZ-89] G. Meltz, W.W. Morey, W.H. Glenn
Formation of Bragg Gratings in Optical Fibres by Transverse Holographic Method
Optics Letters, Vol. 14 No. 15 pp 823-825
- [OPPENHEIM-00] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer
Tratamiento de señales en tiempo discreto
Prentice Hall, 2000
- [OSA-94] Optical Society of America
Photoinduced Bragg Gratings in Optical Fibers
Optics And Photonics News, Feb. 1994
- [PERAL-96] E. Peral, J. Capmany, J. Martí.
Design of fiber grating dispersion compensators using a novel iterative solution to the Gel'Fan-Levitan-Marchenko coupled equations
Electronics Letters, Vol. 32, No. 10, pp 918-919
- [POLADIAN-00] L. Poladian
Simple Grating Synthesis Algorithm
Optics Letters, Vol. 25, No. 11, Jun. 2000, pp 787-789

- [REINA-03] L. J. Reina
Apuntes de cátedra de la asignatura: Transmisión Por Soporte Físico
ESI de Sevilla, 2003
- [RUSSELL-93] P.S.J. Russell, J.L. Archambault, L Reekie
Fibre Gratings
Physics World, Oct. 1993
- [SKAAR-01] J. Skaar, L. Wang, T. Erdogan.
On the Synthesis of Fiber Bragg Gratings by Layer Peeling
IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 37, No. 2, Feb. 2001, pp 165-173

PLIEGO DE CONDICIONES

INDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

CAPÍTULO 1: Características de los equipos.....	2
CAPÍTULO 2. Instrucciones de uso.....	3

CAPÍTULO 1: Características de los equipos

El algoritmo desarrollado en este proyecto se ha programado en el lenguaje de interpretación de comandos de Matlab™. Por tanto, será necesario disponer de dicho paquete software para poder ejecutar el algoritmo.

Matlab™ es un software que se ejecuta sobre multitud de plataformas, pero será necesario como mínimo un ordenador personal dotado de un sistema operativo que sea capaz de ejecutar dicha aplicación.

En resumen, el equipamiento básico necesario es:

- Software Matlab™. Se recomienda la versión 6.5, por sus mejoras en cuanto a velocidad de ejecución. No será necesario ninguno de sus paquetes de herramientas adicionales, ya que sólo se utilizan comandos básicos.
- Sistema Operativo, bien en el entorno Windows™ o Linux. Se recomienda cualquier sistema operativo que ofrezca protección de memoria, como Windows 2000™ o Windows XP™. Prácticamente cualquiera de los paquetes libres linux existentes (RedHat, Mandrake,...) permiten la instalación de Matlab™.
- Ordenador personal, se recomienda que su velocidad de proceso sea la mayor posible. Aunque este punto no es restrictivo, se recomienda sobrepasar siempre la velocidad de 1GHz del procesador para no alargar demasiado los tiempos de simulación. La memoria RAM deberá ser acorde con la red a sintetizar. Se ha comprobado que la mayoría de las redes propuestas en este proyecto simulan bien con 256 Mb.
- Para visualizar los resultados, será recomendable un monitor a color con una resolución de al menos 650x480 píxeles.

Evidentemente, cuanto mejor sea el equipo en cuanto a velocidad de computación, antes terminarán las simulaciones. No se ha probado el rendimiento del algoritmo en equipos multiprocesador, pero es posible que no se encuentren mejoras sustanciales, ya que no se puede reprogramar el algoritmo para ejecución en paralelo, ya que cada instrucción requiere, por lo general, datos provenientes de instrucciones anteriores.

Es recomendable que a la hora de realizar una simulación, se detengan todos los procesos que el sistema operativo esté ejecutando y que no se requieran para el funcionamiento más básico del sistema.

Como ya se ha comentado, se puede utilizar el compilador de Matlab™ para traducir el algoritmo a código C. Podría requerirse en este caso una herramienta de edición y compilación de código C para investigar más profundamente este ámbito.

CAPÍTULO 2. Instrucciones de uso

A continuación haremos un breve tutorial para ilustrar el funcionamiento del algoritmo, y cómo ponerlo en marcha. Realizaremos una síntesis de una red a partir de sus especificaciones, deteniéndonos paso a paso, ya que ésta es la forma de uso que se entiende más general para el algoritmo propuesto.

En primer lugar ejecutaremos la aplicación Matlab™, y estando en el directorio de trabajo, escribiremos en el programa:

```
edit especificaciones.m
```

Esto creará un archivo de tipo *script*, en el cual escribiremos los comandos necesarios para generar las especificaciones.

Para generar dichas especificaciones seguiremos las recomendaciones indicadas en el apartado *Especificaciones* que se encuentra en la memoria de este proyecto. Se recomienda también consultar los *Planos* de este proyecto, en los cuales se incluye el código fuente para un ejemplo de especificaciones.

Es conveniente que el fichero de especificaciones concluya con un comando que guarde en un archivo las variables generadas, necesarias para el algoritmo de síntesis. Dichas variables son:

f_i	vector de frecuencias desde DC hasta f_max
f_max	frecuencia máxima de trabajo (no es la frecuencia máxima de la banda de paso)
hr	vector que contiene la respuesta impulsiva en reflexión

Se deberá generar un archivo llamado `especificaciones.mat` que contenga estas variables. Es conveniente que no se incluya ninguna más, ya que los recursos de memoria son muy preciados.

El proceso de especificaciones no termina aquí, ya que el algoritmo de síntesis necesita de otros parámetros para funcionar. Será necesario que editemos el fichero `sisntesis.m` que contiene al algoritmo de síntesis, para modificar el valor de los siguientes parámetros:

no	índice de refracción del núcleo de la fibra a utilizar
----	--

Una vez modificado el parámetro y guardadas en disco las modificaciones, se procederá a escribir las siguientes líneas en Matlab™

```
>>load especificaciones.mat    % Se cargan en memoria las
                                especificaciones
>>sintesis                      % Se ejecuta el algoritmo de
                                síntesis
```

Una vez ejecutado el algoritmo, comenzarán a aparecer informaciones en pantalla relativas al tiempo de ejecución. En total aparecerán 6 mensajes de información:

- Comienzo de la simulación. Se especifica el día y la hora en que comienza la simulación.
- Día y hora al 1% Completo. Se utiliza esta información para estimar el tiempo que tardará la síntesis. Se puede calcular el tiempo transcurrido entre el comienzo y el 1% completo, y al multiplicar dicho tiempo por 100, se obtiene un valor muy aproximado de lo que tardará la síntesis en realizarse.
- Día y hora al 25% completo.
- Día y hora al 50% completo.
- Día y hora al 75% completo.
- Día y hora en que se produce el fin de la simulación.

Tras completarse la simulación, se podrán utilizar los comandos de Matlab™ relacionados con la representación gráfica para generar gráficas de resultados. Es muy importante en este punto que se tenga en cuenta que para la representación del índice de refracción sintetizado en función de la longitud del dispositivo, la longitud de cada capa no es una constante, y por ello habrá que realizar un vector que contenga el valor de longitud que se corresponde a cada punto en que se ha calculado el índice de refracción.

Esto es muy sencillo, si tenemos en cuenta que para una capa con índice de refracción n , y una simulación en la que el tiempo de muestreo es t_m , se tiene que la longitud de capa es:

$$z_{capa} = \frac{c}{n} t_m$$

PLANOS

INDICE DE PLANOS

CAPÍTULO 1: Introducción

CAPÍTULO 2: Diagramas de flujo.....	3
DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS.....	4
DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ESPECIFICACIONES.....	5
DIAGRAMA DE FLUJO DE PRUEBAS DEL ALGORITMO.....	6
DIAGRAMA DE FLUJO DE PRUEBAS MEDIANTE REDES CORTAS.....	7
CAPÍTULO 3: Código fuente.....	8
CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS.....	9
CÓDIGO DEL PROCESO DE ESPECIFICACIONES.....	14
ESPECIFICACIONES RED CORTA UNIFORME PARA PRUEBAS.....	16
ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CUADRADA PARA PRUEBAS.....	17
ESPECIFICACIONES DE RED CORTA APODIZADA PARA PRUEBAS.....	18
ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CUADRADA APODIZADA PARA PRUEBAS.....	19
ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CHIRPEADA PARA PRUEBAS.....	20
FUNCION CAPPER.....	21

CAPÍTULO 1: Introducción

En este apartado del proyecto se encuentran los planos relativos al mismo. Para el caso de un proyecto de desarrollo de un algoritmo en un entorno software, los planos a incluir son los diagramas de flujo de dicho algoritmo, así como los diagramas de flujo de los protocolos y criterios seguidos para realizar procesos de pruebas y especificaciones.

También se incluirá dentro de este apartado de planos el código fuente del algoritmo en un formato interpretable por Matlab™, que es la plataforma que se ha escogido para el desarrollo de dicho algoritmo.

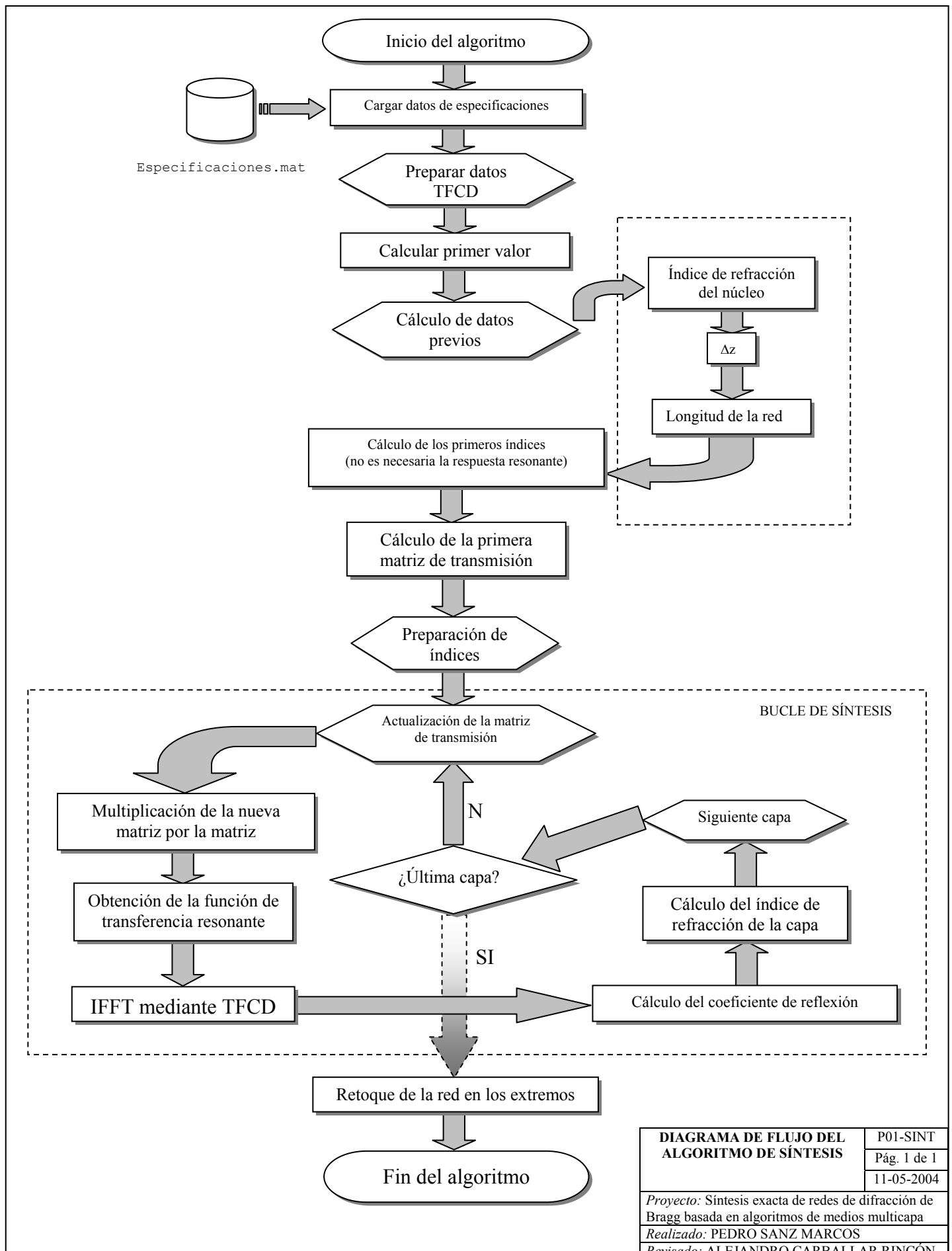
Con el objeto de identificar los planos, se ha incluido en cada uno de ellos un cajetín en el que se contienen los datos del plano. El cajetín normalizado definido es el siguiente:

TÍTULO DEL PLANO	CODIGO
	Pág. X de X
	FECHA
<i>Proyecto:</i> Nombre del proyecto	
<i>Realizado:</i> Autor del plano	
<i>Revisado:</i> Persona que revisa los contenidos	

En este cajetín, el código del plano, que encontramos en la parte superior derecha, es un código cuyo formato es: PXX-YYYY, donde P significa plano, XX es un número de dos cifras que indica el número de plano dentro del proyecto, e YYYY es un código de cuatro letras que constituye un mnemónico para recordar los contenidos del plano. La fecha deberá ir en formato dd/mm/aaaa.

CAPÍTULO 2: Diagramas de flujo

En este capítulo se incluyen los planos que contienen los diversos diagramas de flujo necesarios para una comprensión gráfica y directa del algoritmo y otros procesos relacionados con el mismo que se indican en la memoria del proyecto, tales como pruebas, especificaciones, etc.



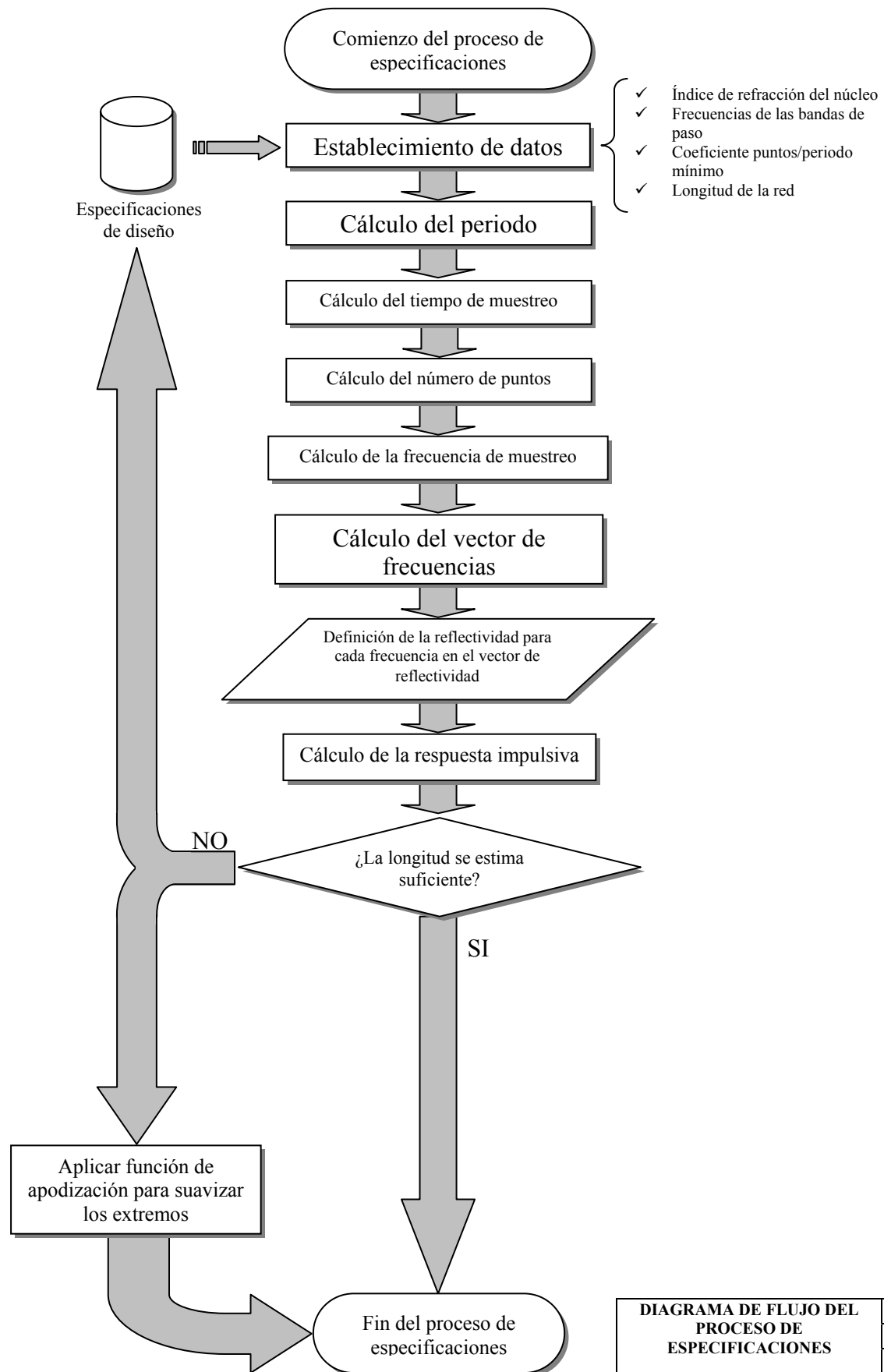


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ESPECIFICACIONES	P02-ESPC
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

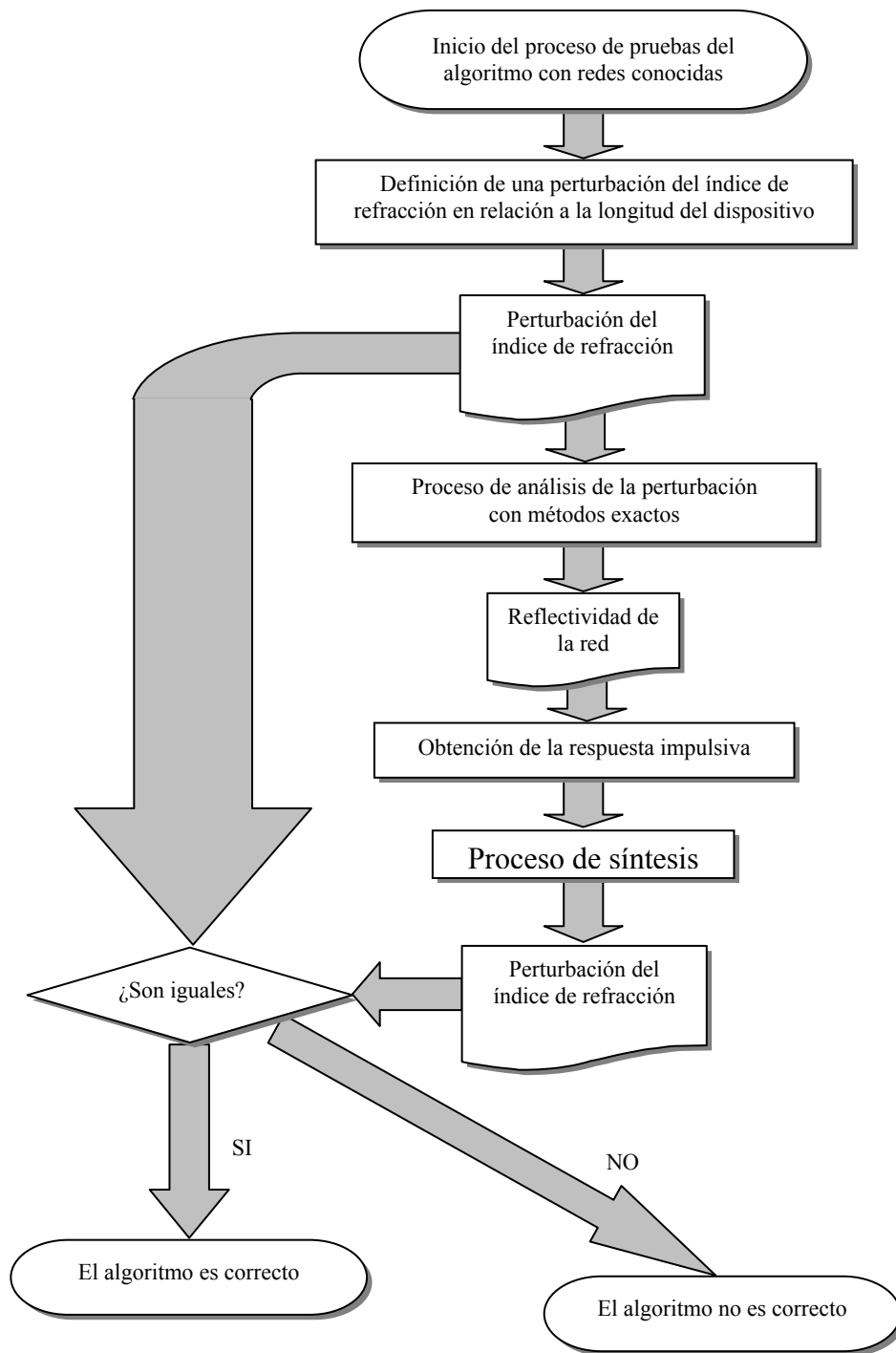


DIAGRAMA DE FLUJO DE PRUEBAS DEL ALGORITMO	P03-PRBS
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

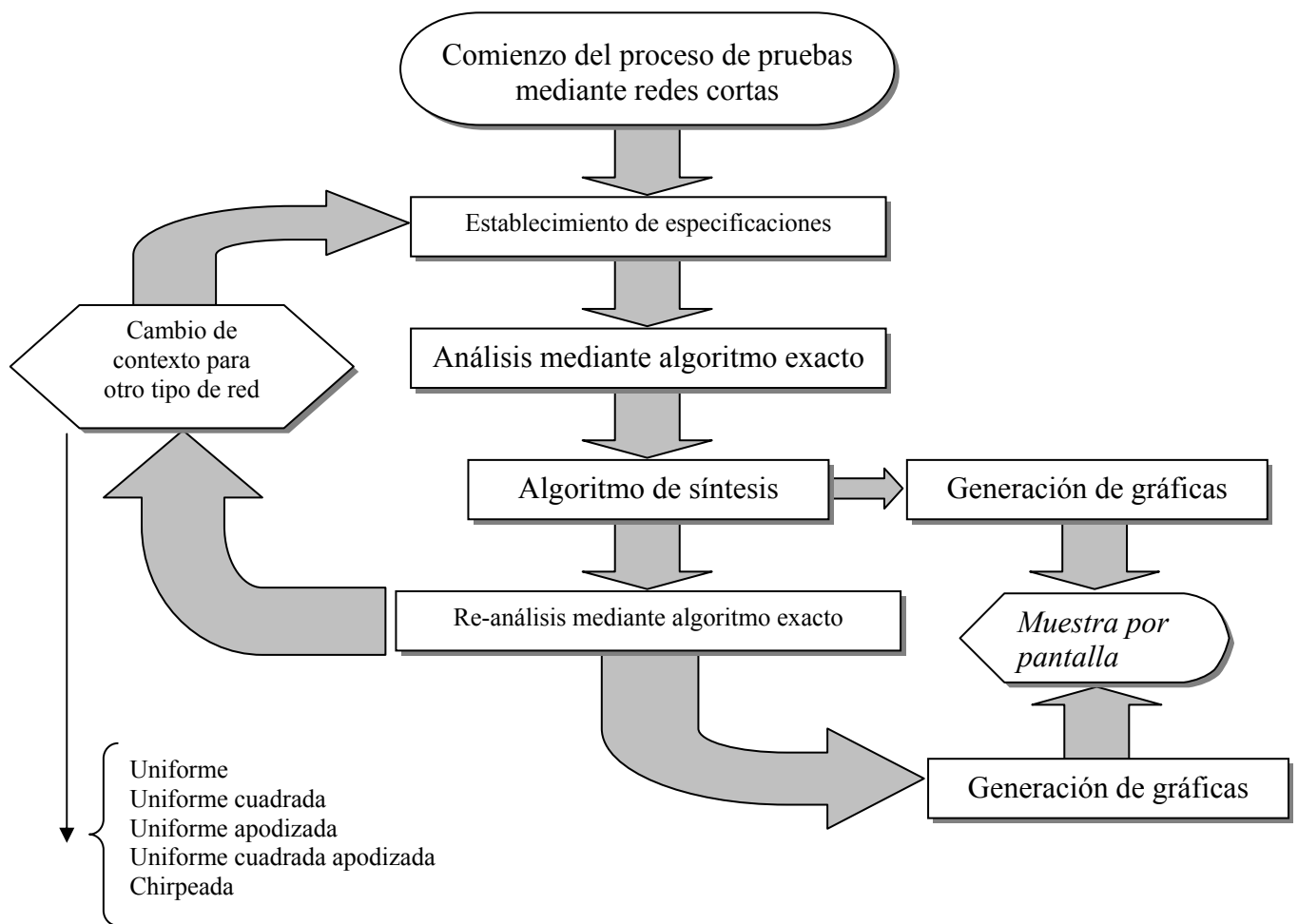


DIAGRAMA DE FLUJO DE PRUEBAS MEDIANTE REDES CORTAS	P04-CRTS
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

CAPÍTULO 3: Código fuente

En este capítulo se muestra el código fuente en formato Matlab™ correspondiente tanto al algoritmo de síntesis como a otros procesos relacionados con este último, como procesos de pruebas del algoritmo, procesos de especificaciones, etc. Se seguirá también el formato normalizado con cajetín para estandarizar el formato de la presentación.

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Programa de sintesis de Redes de Difraccion de Bragg   | %
% |   en fibra optica, basado en la teoria de medios multicapa. | %
% |                                     | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004               | %
% |                                     | %
% ----- %

% ----- %
% |               1. Calculos y consideraciones previas       | %
% ----- %

% Comienzo de la simulacion. Marcamos fecha y hora y cargamos
% en memoria los datos provenientes de las especificaciones
-----

a=fix(clock);
sprintf('Comienza la simulacion\nSon las %d:%d:%d del dia-
%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
load especificaciones.mat

% Calculos previos para el algoritmo TFCD
-----

% El numero de puntos es doble porque para hacer la ifft
% tomamos la respuesta en frecuencia y su conjugada invertida
M = 2*length(f_i);
n = 1;                % Indice temporal
real_TW = zeros(1,M); % Parte real de los Twiddle Factors
imag_TW = zeros(1,M); % Parte imaginaria de los Twiddle Factors
k = [0:M-1];          % Indice frecuencial
argum = 2*pi*n*k/M;   % Argumento de la exponencial en la IFFT

% Calculamos el primer valor de la IFFT (Twiddle), necesario
% para el calculo posterior de los valores restantes
real_TW = cos(argum);
imag_TW = sin(argum);
TW = (real_TW + j*imag_TW);

% El segundo valor es que el usaremos en el bucle, y toma el
% valor del primero para multiplicarse por si mismo
TW_2 = TW;

% ----- %
% |               2. Calculos previos al bucle de sintesis   | %
% ----- %

% Indice de refraccion del nucleo de la fibra
no = 1.5

```

CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS	P05-CGST
	Pág. 1 de 5
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% Calculamos la constante de anchura,
% que va en funcion de la frecuencia maxima

delta_z = (c/no)/(4*f_max);

% Preparamos el vector de indices de refraccion,
% que sera el resultado de la sintesis,
% y calculamos los primeros valores
-----

s = 3; % Indice para la respuesta impulsiva
x = 1; % indice para el indice de refraccion

% A continuacion calculamos el numero de puntos que tendra el indice
% sintetizado. Seran los mismos que tenga la respuesta impulsiva

longitudn_z=length(hr);
n_z_sint = zeros(longitudn_z,1); % Reservamos memoria

% Calculamos los primeros valores: no es necesaria la respuesta resonante

n_z_sint(x) = no*((1-hr(s))/(1+hr(s))); % En este momento, x=1
rol2 = (((no+n_z_sint(x))^2)*hr(s+1))/(4*no*n_z_sint(x));
n_z_sint(x+1) = n_z_sint(x)*((1-rol2)/(1+rol2)); % Calculo de n_z_sint(2)

% Ahora es necesaria la respuesta resonante:
% Definimos la matriz que iremos construyendo en las
% iteraciones y el producto recursivo del coeficiente de reflexion
-----

M_acum_A = ones(length(f_i),1);
M_acum_B = zeros(length(f_i),1);
M_acum_C = zeros(length(f_i),1);
M_acum_D = ones(length(f_i),1);
ros_d_acum = (4*no*n_z_sint(x))/((no+n_z_sint(x))^2);

% Ahora preparamos la entrada al bucle
% para obtener el resto de indices
-----

x = 3; % Ya hemos calculado n_sint(1:2)
s = s+2; % Significa s=5, ya que s=1,2 son valores
% de la respuesta impulsiva en los que no
% hay componente resonante, y s=3,4 ya se
% han calculado

```

CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS	P05-CGST
	Pág. 2 de 5
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% Calculamos el argumento de la exponencial que significa
% el desplazamiento de los campos a traves de cada capa
% de la estructura

phi_w = (no.*delta_z.*2.*pi.*f_i)./c;

% Calculamos los elementos de la matriz de transmision
% Los elementos 1,1=A y 2,2=B seran fijos durante todo
% el proceso, pero los elementos (1,2)=B y (2,1)=C variaran
% en cada iteracion (con cada capa) y por tanto ahora
% solo calculamos valores previos

A = cos(phi_w);
D = cos(phi_w);
Zo = 120*pi;
pre_B = 1j*sin(phi_w)*Zo;
aux_Zo = 1/Zo;
pre_C = 1j*sin(phi_w)*aux_Zo;

% Calculamos el valor de la impedancia que sera fija
% durante todo el proceso (Z(x-3)) y reservamos memoria
% para la respuesta en frecuencia resonante

Ziii = Zo/no;
rfrec = zeros(M,1);
rfrec((M/2)+1)=0; % Recordemos que hay un cero entre la respuesta y su
conjugada

N_frec = length(A);

% -----
% |                               3. Bucle de sintesis                               |
% |                               en cada iteracion se calcula una capa                |
% -----

for x=3:(longitudn_z-2)

    % Calculos de impedancias
    Zi = (Zo)/n_z_sint(x-1); % Capa Posterior
    % La impedancia de la capa actual se calcula en la definicion de C y
    % pre_C, mientras que la de la capa anterior se ha calculado fuera del
    % bucle

    % Actualizamos los valores necesarios de la matriz
    % de transmision
    aux_1 = 1/n_z_sint(x-2);
    B=pre_B*aux_1;
    C=pre_C*n_z_sint(x-2);

```

CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS	P05-CGST
	Pág. 3 de 5
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% Actualizamos la matriz de transmision
M_acum_A_aux = M_acum_A.*A + M_acum_B.*C;
M_acum_B = M_acum_B.*A + M_acum_A.*B;
M_acum_D_aux = M_acum_C.*B + M_acum_D.*A;
M_acum_C = M_acum_D.*C + M_acum_C.*A;
M_acum_A = M_acum_A_aux;
M_acum_D = M_acum_D_aux;

% Obtenemos la funcion de transferencia (resonante)
aux2 = 1/Zi;
HR_aux1 = M_acum_A + (M_acum_B*aux2);
HR_aux2 = (M_acum_C*Ziii)+(M_acum_D*Ziii*aux2);
HR = (HR_aux1 - HR_aux2)./(HR_aux1 + HR_aux2);

% Continuamos el algoritmo TFCD propuesto con las lineas que son
% necesarias unicamente dentro del bucle
rfrec(1:M/2) = HR;
rfrec((M/2)+2:M) = conj(HR((N_frec):-1:2,1));
TW_2 = TW_2.*TW;
fftx = (1/M)*real(TW_2*rfrec);

% Calculamos el denominador de la expresion del coeficiente de
% reflexion
ros_d=(4*n_z_sint(x-2)*n_z_sint(x-1))/((n_z_sint(x-2)+n_z_sint(x-1))^2);
ros_d_acum = ros_d_acum*ros_d;

% El coeficiente de reflexion es
ros = (hr(s)-fftx)/ros_d_acum;

% Y por tanto, el indice de refraccion buscado es
n_z_sint(x) = n_z_sint(x-1)*((1-ros)/(1+ros));

% Actualizamos el indice
s = s+1;

% Las siguientes lineas tienen el unico proposito de seguir el ritmo de
% la simulacion para hacer estimaciones, y no son necesarias para el
% funcionamiento del algoritmo

if x==fix(longitudn_z/100)
a=fix(clock);
sprintf('1 por ciento completo\nSon las %d:%d:%d del dia-\n%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
end
if x==fix(longitudn_z/4)
a=fix(clock);
sprintf('25 por ciento completo\nSon las %d:%d:%d del dia-\n%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
end

```

CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS	P05-CGST
	Pág. 4 de 5
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
end
if x==fix(longitudn_z/2)
a=fix(clock);
sprintf('50 por ciento completo\nSon las %d:%d:%d del dia-
%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
end
if x==fix((3*longitudn_z)/4)
a=fix(clock);
sprintf('75 por ciento completo\nSon las %d:%d:%d del dia-
%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))
end
end

% Para concluir, hacemos unos arreglos posteriores al vector de indice
% sintetizado para evitar valores residuales en los extremos

n_z_sint_aux = [no ; no ; n_z_sint(1:(length(n_z_sint))-2)];
n_z_sint = n_z_sint_aux;
clear n_z_sint_aux;

%%%%%%%%%%%% Fin de la smiulacion %%%%%%%%%%%%%%
a=fix(clock);
sprintf('Termina la simulacion\nSon las %d:%d:%d del dia-
%d,%d,%d',a(4),a(5),a(6),a(3),a(2),a(1))

```

CÓDIGO DEL ALGORITMO DE SÍNTESIS	P05-CGST
	Pág. 5 de 5
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de Bragg   | %
% |   en fibra optica, con caracteristica en frecuencia     | %
% |               rectangular ideal                         | %
% |                                                         | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004              | %
% |                                                         | %
% ----- %

% ----- %
% |               1. Datos previos                          | %
% ----- %

clear all;

c = 3e8;                                     % Velocidad de la luz
no = 1.452;                                % Indice de refraccion del
                                           % nucleo de la fibra
fmax_bp = 192.9e12;                         % Borde superior banda de paso
fmin_bp = 192.7e12;                         % Borde inferior banda de paso
Coeficiente = 13;                           % Coeficiente de puntos por
                                           % periodo
Lper = 20e-3;                               % Longitud de la red de
                                           % difraccion

% ----- %
% |               2. Calculos para la reflectividad         | %
% ----- %

Periodo_min = c/(2*(fmax_bp)*no);            % Periodo de la FBG en funcion
                                           % del borde superior de la
                                           % banda
z_muestreo = Periodo_min/(Coeficiente);      % Distancia de muestreo
t_muestreo = 2*z_muestreo/(c/no);            % Tiempo de muestreo
N_puntos = fix(Lper/(2*z_muestreo));          % Numero de puntos
t_end = Lper/(c/no);                         % Tiempo que tarda la luz en
                                           % recorrer el dispositivo
f_muestreo = 1/(2*t_end);                    % Frecuencia de muestreo
f_min = 0;
f_max = N_puntos*f_muestreo;
f_i = (f_min:f_muestreo:f_max-f_muestreo).'; % Vector de frecuencias
reflectividad = 1e-20*ones(length(f_i),1);   % Vector reflectividad sin
                                           % banda de paso
Punto_fmin_BP = fix(fmin_bp/f_muestreo);     % Punto donde esta el borde de
                                           % la banda de paso (inferior)
Punto_fmax_BP = fix(fmax_bp/f_muestreo);     % Punto donde esta el borde de
                                           % la banda de paso (superior)
reflectividad(Punto_fmin_BP:Punto_fmax_BP) = 0.95; % Valor de la reflectividad en
                                           % la banda de paso

```

CÓDIGO DEL PROCESO DE ESPECIFICACIONES	P06-CGES
	Pág. 1 de 2
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

puntos_BW = 1*(Punto_fmax_BP - Punto_fmin_BP);
reflectividad(Punto_fmax_BP+1:Punto_fmax_BP+1+2*puntos_BW) = -
    linspace(1e-3,1e-20,2*puntos_BW+1);
reflectividad(Punto_fmin_BP-1-2*puntos_BW:Punto_fmin_BP-1) = -
    linspace(1e-20,1e-3,2*puntos_BW+1);

% ----- %
% |          3. Calculo de la respuesta impulsiva          | %
% ----- %

pre_hr = ifft(reflectividad);
pre_hr_izda = pre_hr(1:fix(length(pre_hr)/2));
pre_hr_dcha = pre_hr(fix(length(pre_hr)/2)+1:length(pre_hr));
pre_hr_desp = [pre_hr_dcha;pre_hr_izda];

reflectividad2 = fft(pre_hr_desp);
hr1 = (real(ifft([reflectividad2;0;conj(reflectividad2(length(reflectividad2):-
    -1:2))])));
N_hr = length(hr1);
hr3 = hr1(fix(N_hr/4):fix(N_hr*(3/4)));
N_hr3 = length(hr3);

% ----- %
% |          4. Funcion de apodizado                        | %
% ----- %

N_apodiz = fix(N_hr3/2);
argum_apodiz = [pi:-pi/N_apodiz:0];
N_apodiz = length(argum_apodiz);
f_apodiz_l = (1/2)*(cos(argum_apodiz)+ones(1,N_apodiz)); % Funcion de apodizado
% (izquierda)
f_apodiz_r = fliplr(f_apodiz_l); % Funcion de apodizado
% (derecha)
f_apodiz_total = ones(length(hr3),1); % Reserva de memoria para la
% funcion de apodizado
% completa
f_apodiz_total(1:N_apodiz) = f_apodiz_l; % Mapeamos la parte izquierda
f_apodiz_total((length(hr3) - N_apodiz+1):length(hr3)) = f_apodiz_r;
hr4 = hr3.*f_apodiz_total; % Multiplicamos la funcion de
% apodizado por la respuesta
% impulsiva

clear hr;
clear f_apodiz_l;
clear f_apodiz_r;
clear f_apodiz_total;
clear argum_apodiz;

%%%%%%%%%% Damos valor definitivo a la respuesta impulsiva
hr = hr4;
%%%%%%%%%% Borrado de variables innecesarias
clear hr1,hr3,hr4;
clear pre_hr,pre_hr_dcha,pre_hr_desp,pre_hr_izda;
clear reflectividad,reflectividad2;
pack;

save especificaciones.mat

```

**CÓDIGO DEL PROCESO DE
ESPECIFICACIONES**

P06-CGES

Pág. 2 de 2

11-05-2004

Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa

Realizado: PEDRO SANZ MARCOS

Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de corta   | %
% |   longitud para pruebas del algoritmo de sintesis       | %
% |                                                         | %
% |               Red uniforme                               | %
% |                                                         | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004               | %
% |                                                         | %
% ----- %

% ----- %
% |               1. Definicion y muestreo de la perturbacion | %
% ----- %

% Expresión analítica de la perturbación del índice de refracción
perturbacion= '1.5 + 0.25 .* sin(2.*pi.*z./535e-9)';
Lper = 10*535e-9;          % Longitud de la perturbación

% Otros parametros que necesitamos son:
c=2.99793e8; % Velocidad de la luz
n_med=1.5; % Indice de refraccion medio
t_end=Lper/(c/n_med); % Tiempo de transito hasta el final del dispositivo

% Muestreo de la perturbación

z_muestreo = 535e-9/23;
t_muestreo = 2.*z_muestreo/(c/n_med);

% Muestreo de la perturbación mediante el programa "Capper.m"
[capas] = Capper(Lper,perturbacion,z_muestreo);

% Creación de las muestras que originan la FG
n_z = [n_med; capas; n_med]; % Vector columna

% Borramos variables intermedias
clear capas;

% Definimos la frecuencia de muestreo y el numero de puntos
f_max = 1/(2*t_muestreo);
N_frec = (7*(2*t_end))/t_muestreo;
f_min = 0;
f_muestreo = (f_max-f_min)/N_frec;

```

ESPECIFICACIONES RED CORTA UNIFORME PARA PRUEBAS	P07-CPUN
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de corta   | %
% |   longitud para pruebas del algoritmo de sintesis        | %
% |                                                         | %
% |               Red uniforme cuadrada                      | %
% |                                                         | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004               | %
% |                                                         | %
% ----- %

```

```

% ----- %
% |               1. Definicion y muestreo de la perturbacion | %
% ----- %

```

```

% Expresión analítica de la perturbación del índice de refracción
perturbacion= '1.5 + 0.25 .* sign(sin(2.*pi.*z./535e-9))';
Lper = 10*535e-9; % Longitud de la perturbación

% Otros parametros que necesitamos son:
c=2.99793e8; % Velocidad de la luz
n_med=1.5; % Indice de refraccion medio
t_end=Lper/(c/n_med); % Tiempo de transito hasta el final del dispositivo

% Muestreo de la perturbación
z_muestreo = 535e-9/23;
t_muestreo = 2.*z_muestreo/(c/n_med);

% Muestreo de la perturbación mediante el programa "Capper.m"
[capas] = Capper(Lper,perturbacion,z_muestreo);

% Creación de las muestras que originan la FG
n_z = [n_med; capas; n_med]; % Vector columna
% Borramos variables intermedias
clear capas;

% Definimos la frecuencia de muestreo y el numero de puntos
f_max = 1/(2*t_muestreo);
N_frec = (18*(2*t_end))/t_muestreo;
f_min = 0;
f_muestreo = (f_max-f_min)/N_frec;

```

ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CUADRADA PARA PRUEBAS	P08-CPUC
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de corta   | %
% |   longitud para pruebas del algoritmo de sintesis       | %
% |                                                         | %
% |               Red uniforme apodizada                   | %
% |                                                         | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004              | %
% |----- %

% ----- %
% |               1. Definicion y muestreo de la perturbacion | %
% |----- %

% Expresión analítica de la perturbación del índice de refracción
perturbacion= '1.5 + 0.25 .* sin(2.*pi.*z./(20*535e-9)).*sin(2.*pi.*z./535e-9)';
Lper = 10*535e-9;      % Longitud de la perturbación

% Otros parametros que necesitamos son:
c=2.99793e8; % Velocidad de la luz
n_med=1.5; % Indice de refraccion medio
t_end=Lper/(c/n_med); % Tiempo de transito hasta el final del dispositivo

% Muestreo de la perturbación
z_muestreo = 535e-9/23;
t_muestreo = 2.*z_muestreo/(c/n_med);

% Muestreo de la perturbación mediante el programa "Capper.m"
[capas] = Capper(Lper,perturbacion,z_muestreo);

% Creación de las muestras que originan la FG
n_z = [n_med; capas; n_med]; % Vector columna
% Borramos variables intermedias
clear capas;

% Definimos la frecuencia de muestreo y el numero de puntos
f_max = 1/(2*t_muestreo);
N_frec = (7*(2*t_end))/t_muestreo;
f_min = 0;
f_muestreo = (f_max-f_min)/N_frec;

```

ESPECIFICACIONES DE RED CORTA APODIZADA PARA PRUEBAS	P09-CPUA
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de corta   | %
% |   longitud para pruebas del algoritmo de sintesis       | %
% |                                                         | %
% |   Red uniforme cuadrada apodizada                       | %
% |                                                         | %
% |   Pedro Sanz Marcos. 2003-2004                          | %
% |----- %

% ----- %
% |   1. Definicion y muestreo de la perturbacion           | %
% |----- %

% Expresión analítica de la perturbación del índice de refracción
perturbacion= '1.5 + 0.25 .* sin(2.*pi.*z./(20*535e-9)).*
sign(sin(2.*pi.*z./535e-9))';
Lper = 10*535e-9; % Longitud de la perturbación

% Otros parametros que necesitamos son:
c=2.99793e8; % Velocidad de la luz
n_med=1.5; % Indice de refraccion medio
t_end=Lper/(c/n_med); % Tiempo de transito hasta el final del dispositivo

% Muestreo de la perturbación
z_muestreo = 535e-9/23;
t_muestreo = 2.*z_muestreo/(c/n_med);

% Muestreo de la perturbación mediante el programa "Capper.m"
[capas] = Capper(Lper,perturbacion,z_muestreo);

% Creación de las muestras que originan la FG
n_z = [n_med; capas; n_med]; % Vector columna
% Borrarnos variables intermedias
clear capas;

% Definimos la frecuencia de muestreo y el numero de puntos
f_max = 1/(2*t_muestreo);
N_frec = (7*(2*t_end))/t_muestreo;
f_min = 0;
f_muestreo = (f_max-f_min)/N_frec;

```

ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CUADRADA APODIZADA PARA PRUEBAS	P10-CPCA
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

% ----- %
% |                                     | %
% |   Especificaciones para una red de difraccion de corta   | %
% |   longitud para pruebas del algoritmo de sintesis       | %
% |                                                         | %
% |               Red chirpeada                             | %
% |                                                         | %
% |               Pedro Sanz Marcos. 2003-2004               | %
% |----- %

% ----- %
% |               1. Definicion y muestreo de la perturbacion | %
% |----- %

% Expresión analítica de la perturbación del índice de refracción
perturbacion= '1.5 + 0.25 .* sin(((2.*pi)+(3.*pi.*z.*1e5)).*z./535e-9)';
Lper = 10*535e-9;          % Longitud de la perturbación

% Otros parametros que necesitamos son:
c=2.99793e8; % Velocidad de la luz
n_med=1.5; % Indice de refraccion medio
t_end=Lper/(c/n_med); % Tiempo de transito hasta el final del dispositivo

% Muestreo de la perturbación
z_muestreo = 535e-9/46;
t_muestreo = 2.*z_muestreo/(c/n_med);

% Muestreo de la perturbación mediante el programa "Capper.m"
[capas] = Capper(Lper,perturbacion,z_muestreo);

% Creación de las muestras que originan la FG
n_z = [n_med; capas; n_med]; % Vector columna
% Borramos variables intermedias
clear capas;

% Definimos la frecuencia de muestreo y el numero de puntos
f_max = 1/(2*t_muestreo);
N_frec = (7*(2*t_end))/t_muestreo;
f_min = 0;
f_muestreo = (f_max-f_min)/N_frec;

```

ESPECIFICACIONES DE RED CORTA CHIRPEADA PARA PRUEBAS	P11-CPCH
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
Proyecto: Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
Realizado: PEDRO SANZ MARCOS	
Revisado: ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

```

function [capas]=capper(Ld,perfil,zm);
%CAPPER      Función para conseguir un medio multicapa periodico
%
% Parámetros de entrada:
%   Ld      Longitud del dispositivo
%   perfil   Función que representa la perturbación periodica del dispositivo
%   zm      Periodo de muestreo para conseguir el medio multicapa
% Parámetros de salida
%   capas Vector que representa el medio multicapa
%
% Alejandro Carballar Rincon, 1999

% PROGRAMA PRINCIPAL
% =====

% 1.- Inicializamos las variables
% -----
N=fix(Ld/zm)+1;          % Número de capas para la perturbación
capas=zeros(N,1); % Vector columna

% 2.- Calculamos las z de interpolación de la perturbación
% -----
z=linspace(0,Ld,N).';   % Las abcisas están equiespaciadas

% 3.- Calculamos el medio multicapa
% -----
capas=eval(perfil,z);

```

FUNCION CAPPER	P12-CCAP
	Pág. 1 de 1
	11-05-2004
<i>Proyecto:</i> Síntesis exacta de redes de difracción de Bragg basada en algoritmos de medios multicapa	
<i>Realizado:</i> PEDRO SANZ MARCOS	
<i>Revisado:</i> ALEJANDRO CARBALLAR RINCÓN	

PRESUPUESTOS

El presente proyecto se ha realizado bajo la supervisión y los medios disponibles del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

Por este motivo, los equipos informáticos y el software necesario, así como el entorno ofimático apropiado para el trabajo, han sido proporcionados por dicho departamento, por lo que no se incluyen en estos presupuestos.

En este presupuesto se incluye:

- Honorarios estipulados para un Ingeniero de Telecomunicación en la realización de proyectos por horas, según el documento *Baremos de Honorarios Orientativos para Trabajos Profesionales en 2004 (apartado 15)*, del *Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación*. Dichos honorarios se calculan según la formula:

$$H = 70 * HN + 90 * HE$$

donde HN son horas dentro del horario de trabajo normal, y HE son horas especiales fuera de dicho horario. El precio se indica en euros.

- Honorarios estipulados para la redacción de informes (refiriéndonos a la redacción de este proyecto), por Ingenieros de Telecomunicación, según el mismo documento anterior. Dichos honorarios se calculan según la fórmula:

$$I = 0,5 * 32,45 + 0,1H$$

Presupuestos para este proyecto	
Número de horas empleadas, excluyendo el tiempo invertido en simulaciones y cálculos del ordenador, desde el 15 de Septiembre de 2003, hasta el 15 de Junio de 2004	450 horas
Honorarios detrabajo, según fórmula anterior, suponiendo que todas las horas invertidas están dentro de un horario de trabajo normal,	31500 euros
Honorarios por redacción del proyecto	3166,225 euros
TOTAL:	34666,225 euros

El presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de **TREINTA Y CUATRO MIL SEISCIENTOS SESENTA Y SEIS EUROS CON DOSCIENTOS VEINTICINCO CÉNTIMOS.**

Sevilla, de de 2004

Fdo. Pedro Sanz Marcos