

FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN FÍSICA
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO ACADÉMICO [2023-2024]

TÍTULO:

PROPAGACIÓN DE LUZ EN GUÍAS DE ONDA DIELECTRICAS

AUTOR:

HÉCTOR CAMPOLLO CANDELA

Resumen

Este trabajo consiste en la modelización de la propagación de luz visible en diversos tipos de guías de onda ópticas. El objetivo fundamental es aprender a utilizar el programa de software *COMSOL Multiphysics*, basado en el método de los elementos finitos, que es un programa muy potente que permite resolver las ecuaciones de Maxwell en sistemas de diferente complejidad. En primer lugar, se utilizará un programa de simulación de acceso abierto que permite simular sistemas multicapa homogéneos, tales como guías de onda planares, y cuyos resultados pueden compararse con soluciones analíticas. A continuación, se utilizará el programa *COMSOL Multiphysics*, en primer lugar, para reproducir los resultados de estructuras sencillas obtenidos anteriormente; y en segundo lugar, y en la medida de lo posible, para abordar sistemas más complejos, tales como los consistentes en guías de onda con una capa superior que tiene una modulación periódica de su espesor (una red de difracción de relieve). Este tipo de estructura es la que tienen los láseres con realimentación distribuida, que son utilizados en una gran diversidad de aplicaciones. Siguiendo este proceso, se han estudiado diferentes sistemas de guías de onda, variando diversos parámetros (espesores, índices de refracción y longitud de onda) para, de esta forma, estudiar los parámetros necesarios para una propagación óptima de la luz en una guía de ondas. Para contrastar la información, se han comparado los resultados de los dos softwares verificando su similitud y confirmando el correcto uso de ambos programas.

Palabras clave: Guía de ondas, Ecuaciones de Maxwell, Ecuaciones de onda, Modos transversales, *COMSOL Multiphysics*

Abstract

This work consists of modeling the propagation of visible light in various types of optical waveguides. The fundamental objective is to learn how to use the software program *COMSOL Multiphysics*, which is based on the finite element method. This is a very powerful program that allows solving Maxwell's equations in systems of varying complexity. First, an open-access simulation program that allows simulating homogeneous multilayer systems, such as planar waveguides, will be used. The results from this program can be compared with analytical solutions. Next, the *COMSOL Multiphysics* program will be used, first to reproduce the results of simple structures obtained earlier, and second, to the extent possible, to tackle more complex systems, such as those consisting of waveguides with an upper layer that has a periodic modulation of its thickness (a relief diffraction grating). This type of structure is found in distributed feedback lasers, which are used in a wide variety of applications. Following this process, different waveguide systems have been studied, varying various parameters (thicknesses, refractive indices, and wavelength) to study the necessary parameters for optimal light propagation in a waveguide. To verify the information, the results of the two software programs have been compared, confirming their similarity and the correct use of both programs.

Keywords: Waveguide, Maxwell's equations, Wave equations, Transverse modes, *COMSOL Multiphysics*

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 7 |
| 2. Objetivos | 8 |
| 3. Conceptos básicos y fundamento teórico | 10 |
| 3.1. Conceptos Básicos | 10 |
| 3.2. Ecuación de ondas vectorial para medios inhomogéneos | 11 |
| 3.3. Modos de una guía de ondas | 13 |
| 3.4. La ecuación de ondas para guías planas | 14 |
| 3.5. Guía plana asimétrica de índice homogéneo | 15 |
| 3.5.1. Modos TE | 15 |
| 3.5.2. Modos TM | 21 |
| 4. Softwares para la resolución de ecuaciones en guías de onda | 21 |
| 4.1. Solucionador de modos TE/TM 1-D para guías de onda dieléctricas multi- capa (OMS) | 22 |
| 4.2. COMSOL Multiphysics | 23 |
| 4.2.1. Funcionamiento de COMSOL Multiphysics | 23 |
| 4.2.2. Utilidad y Aplicaciones de COMSOL Multiphysics | 24 |
| 4.2.3. Aplicaciones en universidad y trabajos de investigación | 25 |
| 5. Resultados | 26 |
| 5.1. Conceptos a analizar en la propagación de la luz en guías de onda planares | 26 |
| 5.1.1. Materiales | 26 |
| 5.1.2. Factor de confinamiento Γ | 27 |
| 5.1.3. Índice de refracción efectivo N_{eff} | 28 |
| 5.1.4. Espesor de corte $h_{cut-off}$ | 28 |
| 5.2. Simulaciones computacionales | 29 |
| 5.2.1. Influencia del tipo de sustrato | 29 |
| 5.2.2. Influencia del tipo de recubrimiento | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.3. Influencia del espesor de la guía | 40 |
| 5.2.4. Influencia del índice de refracción de la guía | 43 |
| 5.2.5. Influencia de la longitud de onda | 45 |
| 6. Conclusión | 53 |
| 7. Anexo | 58 |
| 7.1. Condiciones de contorno para guía plana asimétrica de índice homogéneo . | 58 |
| Referencias | 60 |

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer a María Ángeles Díaz García por haber confiado en mí para afrontar este trabajo de fin de grado, por haberme enseñado sobre el campo de las guías de ondas, por darme un hueco en el departamento de Física Aplicada para realizar las simulaciones necesarias y por apoyarme durante el curso. A Alex Farrando Pérez, por guiarme en el laboratorio para entender el comportamiento de las guías de ondas durante la primera parte de este trabajo de fin de grado.

Gracias también a las tres generaciones de mi familia que me han acompañado a lo largo de mi vida: a mis abuelos, quienes apenas sabían escribir; a mis padres, que pudieron ir al colegio; y a mi hermana, quien logró ir a la universidad. Vamos por el camino correcto.

Agradecer también a Belén por confiar siempre en mí, por darme la fuerza que muchas veces me falta y por, básicamente, hacerme siempre el camino más fácil. Quién sabe si estaría en este punto de no ser por ti.

Por último, gracias a mis amigos, por hacerme desconectar en los momentos que, sin ellos saberlo, más lo necesitaba. En especial a Sergio, por, a pesar de llevar tiempo lejos, sentirlo todos los días tan cerca. Gracias también a toda la gente que, en algún punto de esta etapa, me mostró su apoyo. Pero, sobre todo, gracias a mí mismo, por surfear la ola.

1. Introducción

La guías de ondas ópticas son dispositivos que transportan la luz de manera controlada a través de un medio material. A pesar de que la luz pueda ser transportada a lo largo de cualquier cilindro de material transparente, el caso de mayor importancia se presenta cuando dicho medio tiene una o dos de sus dimensiones transversales a la dirección de propagación. Las longitudes de estos medios pueden ser comparables a la longitud de onda de la luz ($\lambda \sim 1\mu m$). Es este confinamiento transversal el que provoca que los modos normales de propagación, característicos del sistema, sean pocos, bien separados y accesibles a la medida física o a su utilización práctica.

Desde los primeros experimentos observados, y más allá del interés académico y científico que suscitaban, las guías de onda ópticas fueron consideradas como herramientas potencialmente valiosas para la transmisión de información a larga distancia utilizando las ondas de luz como medio de transporte [1]. Antes de que esta idea pudiera ser llevada a la práctica, era necesario contar con luz altamente monocromática e intensa, además de reducir significativamente las pérdidas de luz en varias órdenes de magnitud a lo largo de distancias de interés práctico, que abarcaran al menos varias decenas de kilómetros.

El interés moderno en la tecnología de guías de onda ópticas para aplicaciones en comunicaciones surgió en la década de 1960, con la creación del primer láser [2]. La intensidad y coherencia elevadas del haz de luz generado por un láser permiten utilizar la parte visible (y el infrarrojo cercano) del espectro electromagnético como medio portador para las comunicaciones. Las frecuencias de esta región del espectro electromagnético superan en cuatro órdenes de magnitud a las disponibles en los mejores sistemas de comunicación por microondas (alrededor de $10^{14}Hz$ en el espectro electromagnético frente a los $10^{10}Hz$ en las ondas de microondas). La capacidad de transmitir información aumenta directamente con la frecuencia, lo cual significa que el láser tiene el potencial de proporcionar un aumento significativo, de hasta cuatro órdenes de magnitud, en la capacidad de ancho de banda disponible. Este descubrimiento impulsó considerablemente la investigación en guías de onda. Las comunicaciones ópticas se hicieron viables una vez que se logró desarrollar guías con pérdidas lo suficientemente bajas [3].

El avance en las guías de onda de alta transmitancia, combinado con el desarrollo de láseres de semiconductores monomodo para la modulación y conmutación de luz láser, ha hecho posible la creación de sistemas de comunicación capaces de transmitir información a velocidades de decenas de gigabits por segundo a distancias de unos 800 km, con errores típicos de 1 en 10^{10} bits. En estas circunstancias, se podría transferir el contenido de una

enciclopedia de 30 tomos entre dos ciudades separadas por esa distancia en una décima de segundo, con un error típico equivalente a una letra incorrecta [4].

La capacidad de lograr una comunicación de alta capacidad a través de guías de onda ha sido un impulso significativo para la investigación y desarrollo de componentes de tamaño similar al de las propias fibras [5]. Componentes como fuentes láser, detectores de luz, moduladores, deflectores, entre otros, del tamaño de la longitud de onda de la luz, han mejorado considerablemente la confiabilidad de los sistemas a la vez que han reducido el tamaño, peso, consumo de energía y costos asociados a la producción a gran escala.

Es por esto que, en este trabajo, se tratará de entender como se propaga la luz dentro de una guía de ondas, los fenómenos que suceden dentro de esta, las ecuaciones que rigen dicha propagación y el como optimizar la difusión de la luz a través de una guía de ondas. Para este análisis se utilizará en primer lugar, un software de acceso libre, que permite simular sistemas multicapa homogéneos como guías de onda planares y, obtener resultados que pueden compararse con soluciones analíticas. A continuación se utilizará el software *COMSOL Multiphysics* [6], el cual es un programa de simulación muy potente y de mayor complejidad que el anterior, el cual permite resolver numéricamente sistemas más complejos.

2. Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal la modelización de la propagación de luz visible en diversos tipos de guías de onda ópticas, utilizando para ello dos softwares de resolución de ecuaciones en guías de onda.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

1. **Simulación de software de acceso abierto:** emplear un programa de simulación de acceso abierto para modelar sistemas multicapa homogéneos, como guías de onda planares, y comparar los resultados obtenidos con soluciones analíticas
2. **Aprender a utilizar *COMSOL Multiphysics*:** Dominar las funcionalidades y el entorno de trabajo de este programa de simulación avanzado, que es esencial para resolver problemas complejos en el ámbito de la óptica y las guías de onda.
3. **Reproducción de resultados con *COMSOL Multiphysics*:** utilizar *COMSOL Multiphysics* para reproducir los resultados de estructuras previamente obtenidos, garantizando así la consistencia y precisión de las simulaciones.

4. **Modelado de sistemas complejos:** abordar la simulación de sistemas más complejos, como aquellos con guías de onda que presentan una capa superior con modulación periódica de su espesor (redes de difracción de relieve), que son características de los láseres con realimentación distribuida.
5. **Estudio de parámetros para una propagación óptima:** Investigar cómo varían los parámetros de la guía de onda (como espesores, índices de refracción y longitudes de onda) para determinar las condiciones óptimas para la propagación de la luz.
6. **Verificación y comparación de resultados:** Contrastar los resultados obtenidos con los dos softwares utilizados para verificar su similitud y confirmar el correcto uso de ambos programas.

Comprender la propagación de la luz en guías de onda ópticas es fundamental para el desarrollo y optimización de láseres basados en estas estructuras. Los láseres con realimentación distribuida, que emplean redes de difracción de relieve, son cruciales en numerosas aplicaciones debido a su capacidad para generar luz altamente coherente y monocromática. Estos láseres son esenciales en las comunicaciones ópticas modernas, donde la capacidad de transmitir información a altas velocidades y con baja tasa de error es primordial.

En particular, los láseres orgánicos de retroalimentación distribuida (DFB) son de gran interés debido a sus propiedades únicas y su potencial en aplicaciones avanzadas [7]. Los láseres orgánicos DFB utilizan materiales orgánicos que permiten una fabricación más sencilla y económica, así como la posibilidad de sintonizar sus propiedades ópticas mediante modificaciones químicas. Estas características hacen que los láseres orgánicos DFB sean atractivos para aplicaciones en sensores, displays y comunicaciones ópticas.

La capacidad de modelar y simular estos sistemas permite mejorar el diseño y la funcionalidad de los componentes ópticos, llevando a avances significativos en la tecnología de comunicación. Esto incluye el desarrollo de sistemas de comunicación que pueden transmitir datos a velocidades de decenas de gigabits por segundo a largas distancias, lo que tiene implicaciones directas en la eficiencia y la expansión de las redes de telecomunicaciones globales. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo no solo tienen relevancia académica, sino también un impacto práctico en la mejora de las tecnologías de transmisión de información.

3. Conceptos básicos y fundamento teórico

3.1. Conceptos Básicos

A continuación se han introducido una serie de conceptos de gran utilidad para entender el estudio a realizar. Cabe resaltar que estos términos simplemente serán introducidos en este apartado para, más adelante, desarrollarlos en profundidad.

- **COMSOL Multiphysics:** es un software que se utiliza como herramienta de modelado y análisis para el prototipaje virtual de fenómenos físicos. Puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un científico o ingeniero pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales (EDP), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos.
- **Espesor efectivo (h_{eff}):** es una medida teórica que describe la distancia óptica efectiva que la luz experimenta al atravesar un material o una estructura ópticamente activa. Este concepto es especialmente relevante en situaciones donde un medio presenta variaciones significativas en sus propiedades ópticas a lo largo de una dimensión espacial, como en capas delgadas, películas o estructuras nanoestructuradas. El espesor efectivo no necesariamente corresponde al grosor físico real del material, sino que se define en función de cómo la luz interactúa con el medio y experimenta cambios en su fase, amplitud u otras características ópticas.
- **Guía de ondas:** consiste típicamente en un material dieléctrico transparente, como vidrio o plástico, que tiene un índice de refracción mayor que el de su entorno. Este contraste de índice de refracción permite que la luz se propague a lo largo de la guía de ondas mediante reflexiones internas totales en las interfaces entre el núcleo de la guía y el revestimiento circundante [8].
- **Índice de refracción efectivo (n_{eff}):** describe el comportamiento de la luz al propagarse a través de medios compuestos o estructuras con propiedades ópticas no uniformes. Representa un valor medio, o promedio del índice de refracción que describe el comportamiento óptico del medio compuesto, como si fuera un medio homogéneo con un índice de refracción único.
- **Espesor de corte ($h_{\text{cut-off}}$):** es el espesor mínimo a partir del cual una guía de ondas o fibra óptica puede soportar la propagación de luz en un modo específico.

Este concepto es relevante especialmente en el contexto de las guías de ondas o fibras ópticas multimodo, donde diferentes modos de propagación pueden tener condiciones de propagación críticas determinadas por el espesor de la guía.

- **Modo TE:** es un modo de propagación de la luz en una guía de onda o en una cavidad resonante donde el campo electromagnético es perpendicular a la dirección de propagación. Dentro de esta guía o cavidad, el campo eléctrico está confinado y oscila perpendicularmente a la dirección de propagación. Esto significa que las líneas de campo están contenidas en un plano transversal a la dirección de propagación.
- **Modo TM:** es un modo de propagación de luz en una guía de ondas o cavidad resonante donde el campo electromagnético es perpendicular a la dirección de propagación. Dentro de la guía de onda o cavidad, el campo magnético oscila perpendicularmente a la dirección de propagación. Esto significa que las líneas de campo están contenidas en un plano transversal a la dirección de propagación.

Para obtener una comprensión detallada del comportamiento físico de las ondas luminosas en guías de onda ópticas, es necesario realizar un análisis exhaustivo de las ecuaciones de Maxwell que rigen el sistema, junto con las condiciones de contorno adecuadas que consideren la geometría y el material de la guía. Además, a continuación, se amplía el concepto de modos de propagación y se obtienen soluciones explícitas, especialmente para el caso sencillo y representativo de la guía de onda plana de índice homogéneo (también conocida como guía en escalón).

3.2. Ecuación de ondas vectorial para medios inhomogéneos

En este primer apartado teórico se obtiene la ecuación de ondas vectorial general para el caso de medios inhomogéneos isótropos en los que el índice de refracción viene dado por $n(\vec{r}) = \sqrt{\varepsilon(\vec{r})}$. Por tanto, el índice de refracción varía de unos puntos a otros del medio. Este es el caso de las guías de ondas con gradiente de índice. Para obtener las ecuaciones de onda pertinentes, se utiliza como base las ecuaciones de Maxwell sin términos fuente:

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \left(\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) \vec{E}_\omega &= 0, \\
 \nabla \cdot \mu \vec{H}_\omega &= 0, \\
 \nabla \times \vec{E}_\omega &= i\omega \mu_0 \vec{H}_\omega, \\
 \nabla \times \vec{H}_\omega &= -i\omega \varepsilon_0 n_c^2 \vec{E}_\omega
 \end{aligned} \tag{1}$$

Para una onda monocromática definida por $\vec{E}(\vec{r})e^{-i\omega t}$ y $\vec{H}(\vec{r})e^{-i\omega t}$, las ecuaciones de Maxwell quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot [\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})] &= 0, \\ \nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}) &= 0, \\ \nabla \times \vec{E}(\vec{r}) &= i\omega\mu_0\vec{H}(\vec{r}) \\ \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) &= -i\omega\varepsilon_0\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})\end{aligned}\tag{2}$$

Se ha eliminado la notación subíndice (ω) en todas las magnitudes y se ha considerado que, al tratarse de una guía de ondas dieléctrica, la conductividad eléctrica es nula ($\sigma = 0$) y la permeabilidad magnética es igual a la unidad ($\mu = 1 \text{ N/m}^2$). Asimismo, se han escrito de forma explícita las dependencias con \vec{r} , con el propósito de dejar en claro que, en términos generales, $\varepsilon(\vec{r})$ varía con la posición.

Para obtener la ecuación de ondas, en primer lugar se obtiene el rotacional de las dos últimas expresiones de las ecuaciones 2:

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) &= i\omega\mu_0\nabla \times \vec{H} \\ \nabla \times (\nabla \times \vec{H}) &= -i\omega\varepsilon_0\nabla \times (\varepsilon\vec{E}) = -i\omega\varepsilon_0 [(\nabla\varepsilon) \times \vec{E} + \varepsilon\nabla \times \vec{E}]\end{aligned}\tag{3}$$

Desarrollando el producto vectorial triple y teniendo en cuenta nuevamente la tercera y cuarta ecuaciones de la expresión 2, se obtiene:

$$\begin{aligned}\nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} &= \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\vec{E} \\ \nabla (\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= \omega^2\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\vec{H} + (\nabla \ln \varepsilon) \times (\nabla \times \vec{H})\end{aligned}\tag{4}$$

Donde se ha utilizado la relación:

$$\nabla \ln \varepsilon = \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon}\tag{5}$$

Al desarrollar ahora la primera ecuación de Maxwell 2 y se considerar la relación 5, se obtiene:

$$(\nabla\varepsilon) \cdot \vec{E} + \varepsilon\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \vec{E} = -\vec{E} \cdot \nabla \ln \varepsilon\tag{6}$$

A continuación se sustituye esta última expresión en las ecuaciones 4 y, se llega así a las ecuaciones de onda siguientes:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \vec{E} + \nabla \left(\vec{E} \cdot \nabla \ln \varepsilon \right) + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \vec{E} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + (\nabla \ln \varepsilon) \times (\nabla \times \vec{H}) + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \vec{H} &= 0\end{aligned}\quad (7)$$

Estas son las ecuaciones de onda vectoriales para medios inhomogéneos.

3.3. Modos de una guía de ondas

Las condiciones de frontera para resolver las ecuaciones de onda de la referencia 7 están definidas por los valores de la permitividad eléctrica $\varepsilon(\vec{r}) = n^2(\vec{r})$ tanto dentro de la guía como en los medios que la rodean. En primer lugar, dentro de la guía de ondas, hay una dirección principal en la cual la permitividad, en general, permanece constante. Esta dirección corresponde a la dirección de propagación de la luz, denotada como Z en la figura 1. Por lo tanto, el índice de refracción depende únicamente de dos variables, las coordenadas x e y , que son perpendiculares a la dirección de propagación, es decir:

$$\varepsilon(x, y) = n^2(x, y) \quad (8)$$

La función $n(x, y)$ describe el perfil del índice de refracción; en muchos casos, alcanza sus valores máximos cerca del eje.

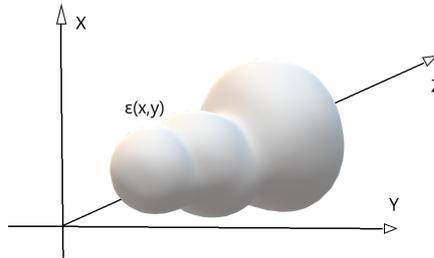


Figura 1: Perfil de índice de refracción en una guía general en la que se ha elegido el eje Z a lo largo de la dirección de propagación de la luz

Las soluciones de las ecuaciones de onda 7 deben reflejar la propagación libre a lo largo del eje Z y el posible confinamiento en el plano XY , de manera que se puede expresar:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, y, z) &= \vec{E}_{mp}(x, y)e^{i\beta_{mp}z} \\ \vec{H}(x, y, z) &= \vec{H}_{mp}(x, y)e^{i\beta_{mp}z}\end{aligned}\quad (9)$$

En estas expresiones, m y p representan los números modales que caracterizan un modo específico, mientras que $\beta_{mp} = kn(x, y) \sin \theta_{mp}$ indica la constante de propagación asociada a ese modo en particular. La solución de la ecuación 7 nos lleva a una situación similar a la que se encuentra al resolver la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica. En consecuencia, se obtienen dos tipos de soluciones: unas que describen estados ligados y otras que describen estados no ligados.

3.4. La ecuación de ondas para guías planas

En el caso de las guías planas, las ecuaciones 7 se simplifican considerablemente. En este tipo de guías, el índice de refracción $n(x)$ solo varía en la dirección perpendicular al plano de la guía, que se tomará como dirección X . En consecuencia, la luz queda confinada solo en esta dirección. Además, al elegir el eje Z paralelo a la dirección de propagación para tener $\frac{\partial}{\partial y} = 0$, los campos modales 9 solo dependen de x o z de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x, z) &= \vec{E}_m(x)e^{i\beta_m z} \\ \vec{H}(x, z) &= \vec{H}_m(x)e^{i\beta_m z}\end{aligned}\tag{10}$$

Por otra parte, el cálculo también se simplifica al introducir dos polarizaciones básicas ortogonales: los modos *transversales eléctricos* (TE) con $\vec{E} = [0, E_y, 0]$, donde la componente longitudinal del campo eléctrico H_z es nula, y $\vec{H} = [0, H_y, 0]$.

$$\text{Modos TE} \longrightarrow \begin{cases} \vec{E}(x) \equiv [0, E_y(x), 0] \\ \vec{H}(x) \equiv [H_x(x), 0, H_z(x)] \end{cases}\tag{11}$$

$$\text{Modos TM} \longrightarrow \begin{cases} \vec{E}(x) \equiv [E_x(x), 0, E_z(x)] \\ \vec{H}(x) \equiv [0, H_y(x), 0] \end{cases}\tag{12}$$

Al sustituir las expresiones 10 para cada una de las polarizaciones anteriores en las ecuaciones de onda 7, estas últimas se transforman en las siguientes:

$$\text{Modos TE} \longrightarrow \frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} = [\beta^2 - k^2 n^2(x)] E_y(x)\tag{13}$$

$$\text{Modos TM} \longrightarrow n^2(x) \frac{\partial}{\partial(x)} \left[\frac{1}{n^2(x)} \frac{\partial H_y(x)}{\partial(x)} \right] = [\beta^2 - k^2 n^2(x)] H_y(x)\tag{14}$$

Se observa que para la polarización TE, el término $\nabla(\vec{E} \cdot \nabla \ln \varepsilon)$ en la primera expresión de la ecuación 7 se anula, y en las ecuaciones 12 y 14 se ha omitido el subíndice modal m para simplificar la notación.

3.5. Guía plana asimétrica de índice homogéneo

Un ejemplo muy simple y adecuado para un análisis detallado es el de una guía plana homogénea, donde el índice de refracción n_f es constante a lo largo de toda la guía, independientemente de la posición x . Además, los índices n_s y n_c del sustrato y del recubrimiento respectivamente, se mantienen constantes. Esto implica que en las interfaces entre la guía y estos medios, se producen cambios abruptos en el índice de refracción 2. Esta configuración es análoga a un pozo de potencial rectangular en el contexto de la mecánica cuántica [9]. En este escenario, es posible obtener expresiones analíticas explícitas para las amplitudes de los campos, así como para la ley de dispersión modal. A continuación, se estudian en detalle los modos *TE* y *TM*.

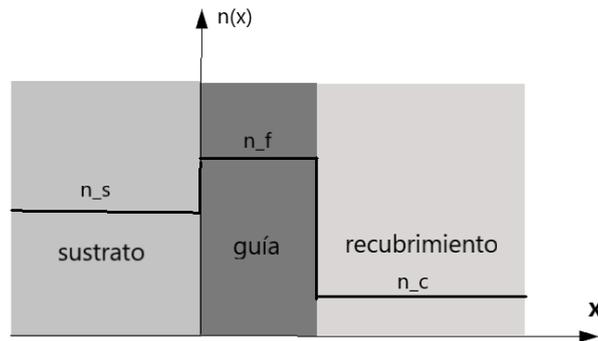


Figura 2: Perfil en escalón del índice de refracción de una guía asimétrica

3.5.1. Modos TE

Para el caso que se procede a estudiar, el campo eléctrico \vec{E} tiene únicamente una componente en la dirección y , es decir, $\vec{E} \equiv [0, E_y, 0]$. La ecuación de ondas 14 correspondiente se puede expresar como sigue:

$$\frac{\partial^2 E_y(x)}{\partial x^2} = -n^2 k_x^2 E_y(x) \quad (15)$$

En esta expresión, se ha considerado que $n^2 k_x^2 = n^2 k^2 - \beta^2$. La diferencia principal con respecto a la ecuación 14 radica en que en este contexto el índice n no varía con respecto a x ; por lo tanto, es constante dentro de cada medio. La forma general de la ecuación 15 tiene la siguiente forma:

$$E_y(x) = Ae^{ink_x x} + Be^{-ink_x x} \quad (16)$$

Esta función exhibe oscilaciones cuando k_x es un número real y muestra una forma exponencial amortiguada (la exponencial de crecimiento no es físicamente viable) cuando k_x es imaginario. El tipo de solución resultante determina si los modos son guiados o de radiación, y la forma de la función varía en cada medio (recubrimiento, guía o sustrato) [10]. La determinación completa de la función descrita por la ecuación 16 se establece mediante las siguientes condiciones de contorno:

$$E_{\omega,1}^{tg} = E_{\omega,2}^{tg}; \quad H_{\omega,1}^{tg} = H_{\omega,2}^{tg} \quad (17)$$

El desarrollo para llegar a estas condiciones de contorno aparece visible en el subapartado 7.1

Como se puede observar, estas condiciones de frontera requieren que E_y y $\partial E_y/\partial x$ sean continuas para $x = 0$ y para $x = h$.

Se desarrollarán a continuación los modos guiados y los modos de radiación al sustrato.

Modos guiados

Para los modos guiados, las expresiones nk_x se utilizan para representar el número de onda dentro de la guía, donde n es el índice de refracción del medio que rodea la guía y k_x es la componente horizontal del vector de onda. Estas expresiones describen las características de propagación de los modos guiados dentro de la guía de onda de la siguiente forma:

$$n_f k_x = n_f k \cos \theta = \sqrt{n_f^2 k^2 - \beta^2} \quad (18)$$

En el interior de la guía, nk_x es una expresión real, por lo que la función 16 será oscilante. En cambio, en el recubrimiento, nk_x es imaginaria porque el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico de reflexión total, es decir, $\theta > \theta_c$, y se tiene:

$$n_c k_x = n_c k \cos \theta_{tc} = n_c k (i \nabla_c) = i \gamma_c \quad (19)$$

donde θ_{tc} es el ángulo (imaginario) en el recubrimiento y $\Delta_c = \sqrt{(N/n_c)^2 - 1}$ es un número real para $\theta > \theta_c$. Por tanto, la función de campo 16 será amortiguada con una constante de amortiguamiento $\gamma_c = n_c k \Delta_c$.

De manera análoga, en el sustrato $n k_x$ también es imaginaria porque $\theta > \theta_s$, y se tiene una onda amortiguada con una constante de amortiguamiento γ_s dada por:

$$n_s k_x = n_s k \cos \theta_{ts} = n_s k (i \Delta_s) = i \gamma_s \quad (20)$$

donde θ_{ts} es el ángulo en el sustrato y $\Delta_s = \sqrt{(N/n_s)^2 - 1}$. Por lo tanto, se puede hacer el siguiente resumen para las constantes de propagación en los tres medios:

$$\begin{aligned} c &\longrightarrow n_c^2 k_x^2 = k_c^2 = n_c^2 k^2 - \beta^2 = -\gamma_c^2 < 0 \\ f &\longrightarrow n_f^2 k_x^2 = k_f^2 = n_f^2 k^2 - \beta^2 > 0 \\ s &\longrightarrow n_s^2 k_x^2 = k_s^2 = n_s^2 k^2 - \beta^2 = -\gamma_s^2 > 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Los parámetros k_c , k_f y k_s se han introducido por conveniencia en la escritura de las fórmulas que siguen. Al sustituirlos en la expresión 16, se obtienen las siguientes expresiones para los campos:

$$\begin{aligned} E_y(x) &= E_c e^{-\gamma_c(x-h)}, \quad \text{para } x > h \\ E_y(x) &= E_f \cos(k_f x - \phi) \quad \text{para } 0 < x < h \\ E_y(x) &= E_s e^{\gamma_s x} \quad \text{para } x < 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Se ha elegido una función real para representar la onda que se propaga en la guía por conveniencia.

A continuación se imponen las condiciones en la frontera sustrato-guía, es decir:

$$\text{en } x = 0 \longrightarrow \begin{cases} E_y(0) = E_f \cos(-\phi) = E_x \\ \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right)_0 = -k_f E_f \sin(-\phi) = \gamma_s E_s \end{cases}$$

de estas expresiones, dividiendo la segunda entre la primera, se llega a:

$$\tan \phi = \frac{\gamma_s}{k_f} \quad (23)$$

Por otra parte, de las expresiones 21 se tiene:

$$\frac{\gamma_s}{k_f} = \frac{\sqrt{\beta^2 - n_s k^2}}{n_f k_x} = \frac{\sqrt{N^2 - n_s^2}}{n_f \cos \theta} = \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_f^2 - N^2}} = -\tan \phi_s^{TE} \quad (24)$$

Considerando la definición del índice efectivo $N = \beta/k = n_f \sin \theta$, y utilizando la relación $\beta = n_f \sin \theta$ para la última igualdad, podemos llegar finalmente a partir de las ecuaciones 23 y 24 a la siguiente expresión:

$$\tan \phi = -\phi_s^{TE} \quad \longrightarrow \quad \phi = m'\pi - \phi_s^{TE} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (25)$$

Por otra parte, para las condiciones de frontera guía-recubrimiento se tienen las siguientes expresiones:

$$\text{en } x = h \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} E_y(h) = E_f \cos(k_f h - \phi) = E_c \\ \left(\frac{\partial E_y}{\partial x}\right)_h = -k_f E_f \sin(k_f h - \phi) = -\gamma_c E_s \end{cases}$$

de manera similar al procedimiento utilizado para derivar la ecuación 24, se obtiene:

$$\tan(k_f h - \phi) = \frac{\gamma_c}{k_f} = -\tan \phi_c^{TE} \quad (26)$$

Considerando ahora 25, se obtiene:

$$k_f h + \phi_s^{TE} = m\pi - \phi_c^{TE} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (27)$$

Por otra parte, se tiene que $k_f h = n_f k_x h = n_f k \cos \theta$, queda finalmente:

$$kn_f h \cos \theta_m + \phi_s^{TE}(\theta_m) = m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (28)$$

Esta última es la *condición de resonancia transversal* o *ley de dispersión de los modos*. También, a partir de las ecuaciones 23 y 26, podemos deducir la siguiente relación entre las amplitudes de los campos E_s , E_f , y E_c :

$$E_f^2(n_f^2 - N^2) = E_s^2(n_f^2 - n_s^2) = E_c^2(n_f^2 - n_c^2) \quad (29)$$

Para obtener la primera de estas relaciones, elevamos al cuadrado y sumamos las expresiones de las ecuaciones 26 de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_f^2 &= E_s^2 + \frac{\gamma_s^2 E_x^2}{k_f^2} \quad \rightarrow \quad E_f^2 k_f^2 = E_s^2 (k_f^2 - \gamma_s^2) \\ E_f^2 (k^2 n_f^2 - \beta^2) &= E_s^2 (k^2 n_f^2 - \beta^2 - k^2 n_s^2) \\ E_f^2 \left(n_f^2 - \frac{\beta^2}{k^2} \right) &= E_s^2 (n_f^2 - n_s^2) \end{aligned} \quad (30)$$

La segunda relación de 29 se obtiene de modo similar a partir de 30.

Con las relaciones obtenidas entre las amplitudes, se puede encontrar una expresión para el transporte de energía a lo largo de la guía. La potencia promedio por unidad de anchura (a lo largo de la dirección y) transportada por un modo está dada por la siguiente expresión:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \langle S_z \rangle dx = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y H_x dx = \frac{N}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2 dx \quad (31)$$

donde \vec{S} es el vector de Poynting. Resolviendo la expresión anterior 31 se obtiene:

$$P = \frac{N}{4} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_f^2 h_{ef} = \frac{1}{4} E_f H_f h_{ef} \quad (32)$$

siendo,

$$h_{ef} = h + \frac{1}{\gamma_s} + \frac{1}{\gamma_c} \quad (33)$$

Es útil normalizar los modos de manera que la potencia transportada por unidad de anchura de la guía sea igual a la unidad.

Modos de radiación al sustrato

Para los modos de radiación hacia el sustrato, se cumple que $\theta > \theta_c$ y $\theta < \theta_s$, lo que implica que nk_x es un número real tanto en la guía como en el sustrato, permitiendo la propagación en ambos medios. Por otro lado, nk_x es imaginario en el recubrimiento, lo

que resulta en ondas evanescentes hacia el mismo. Por lo tanto, los campos adquieren la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} E_y(x) &= E_c e^{-\gamma_c(x-h)}, \quad \text{para } x > h \\ E_y(x) &= E_f \cos(k_f x - \phi_1) \quad \text{para } 0 < x < h \\ E_y(x) &= E_s e \cos(k_s x - \phi_2) \quad \text{para } x < 0 \end{aligned} \quad (34)$$

Ahora impondremos las condiciones en la frontera. Para la interfaz entre la guía y el sustrato en $(x = 0)$, las condiciones se expresan como:

$$\begin{aligned} E_y(0) &= E_f \cos(-\phi_1) = E_s \cos(-\phi_2) \\ \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right)_0 &= -k_f E_f \sin(-\phi_1) = -k_s E_s \sin(-\phi_2) \end{aligned} \quad (35)$$

Dividiendo ambos lados de la expresión, obtenemos:

$$k_f \tan \phi_1 = k_s \tan \phi_2 \quad (36)$$

Por otra parte, para la interfaz entre la guía y el recubrimiento en $x = h$, las condiciones se expresan como:

$$\begin{aligned} E_y(h) &= E_c = E_f \cos(k_f h - \phi_1) \\ \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right)_h &= -\gamma_c E_c = -k_f E_f \sin(k_f h - \phi_1) \end{aligned} \quad (37)$$

Dividiendo ambos lados de la expresión, se obtiene la siguiente relación:

$$\tan(k_f h - \phi_1) = \frac{\gamma_c}{k_f} = -\tan \phi_c^{TE} \quad (38)$$

Por lo tanto, para cualquier valor de θ , la siguiente relación se cumple:

$$\phi_1 = k_f h + \phi_c^{TE} - m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (39)$$

Además, las amplitudes de los campos correspondientes se pueden deducir elevando al cuadrado y sumando las ecuaciones 35 y 37, lo que conduce a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_s^2 &= E_f^2 \left[1 + \frac{n_f^2 - n_s^2}{n_s^2 - N^2} \sin^2(k_f h + \phi_c^{TE}) \right] \\ E_c^2(n_f^2 - n_c^2) &= E_f^2(n_f^2 - N^2) \end{aligned} \quad (40)$$

En esta situación, la ley de dispersión 39 no establece un espectro discreto de constantes de propagación k_f como lo hace la ecuación 27, y k_f puede tomar cualquier valor.

Por otro lado, los modos que son simultáneamente de radiación al sustrato y al recubrimiento se tratan de manera análoga.

3.5.2. Modos TM

En lo que respecta a los modos transversales magnéticos (*TM*), el procedimiento de cálculo sigue la misma línea que para los modos *TE*. Para completar la información, a continuación se presentarán las fórmulas resultantes solo para los modos guiados, que son de mayor interés en este contexto. En el caso de los modos *TM*, el campo \vec{H} es perpendicular al plano de incidencia, es decir, $\vec{H} \equiv [0, H_y, 0]$, y el campo \vec{E} es $\vec{E} \equiv [E_x, 0, E_z]$. La *condición de resonancia transversal* es similar a la de los modos *TE* (ecuación 28), pero ahora los cambios de fase deben considerarse respecto a la polarización *TM*.

$$kn_f h \cos \theta_m + \phi_s^{TM}(\theta_m) + \phi_c^{TM}(\theta_m) = m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (41)$$

Además, utilizando la misma nomenclatura para el campo \vec{E} (ver ecuación 22), las relaciones entre las amplitudes son las siguientes:

$$H_f^2 \frac{n_f^2 - N^2}{n_f^2} = H_s^2 \frac{(n_f^2 - n_s^2)q_s}{n_s^2} = H_c^2 \frac{(n_f^2 - n_c^2)q_c}{n_c^2} \quad (42)$$

Donde se han empleado los factores:

$$\begin{aligned} q_s &= \frac{N^2}{n_f^2} + \frac{N^2}{n_s^2} - 1 \\ q_c &= \frac{N^2}{n_f^2} + \frac{N^2}{n_c^2} - 1 \end{aligned} \quad (43)$$

4. Softwares para la resolución de ecuaciones en guías de onda

En esta sección se muestran y se analizan los dos softwares utilizados para el estudio de las guías de onda.

4.1. Solucionador de modos TE/TM 1-D para guías de onda dieléctricas multicapa (OMS)

El *Solucionador de modo OMS 1-D para guías de ondas dieléctricas multicapa*[11] es una herramienta computacional de acceso abierto especializada en la resolución de problemas relacionados con la propagación de ondas electromagnéticas en estructuras de guías de ondas multicapa.

Esta web proporciona una plataforma interactiva para el análisis y cálculo de modos de propagación en guías de ondas multicapa, que son estructuras utilizadas en diversas aplicaciones de telecomunicaciones y optoelectrónica. Estas guías de ondas están compuestas por múltiples capas de materiales dieléctricos con diferentes propiedades electromagnéticas.

Se muestran a continuación algunas de las funcionalidades y utilidades de esta web:

- **Cálculo de modos electromagnéticos:** la herramienta permite calcular los modos de propagación (también conocidos como modos OMS, o modos ópticos de superficie) en guías de ondas multicapa. Los modos de propagación son soluciones de las ecuaciones de Maxwell que describen cómo las ondas electromagnéticas se distribuyen y propagan a lo largo de la guía de ondas.
- **Estructura multicapa:** la plataforma admite la definición de múltiples capas dieléctricas, cada una con su respectiva permitividad eléctrica (constante dieléctrica) y espesor. Esta flexibilidad permite modelar una amplia variedad de estructuras de guías de ondas que se encuentran en aplicaciones prácticas.
- **Análisis 1-D:** el solucionador realiza un análisis unidimensional (1-D), lo que simplifica los cálculos al considerar la variación de las propiedades electromagnéticas en una sola dirección, típicamente la dirección transversal a la propagación de la onda. Este enfoque es adecuado para guías de ondas multicapa, donde la variación en otras direcciones puede ser despreciada o tratada como uniforme.
- **Visualización de resultados:** la página web generalmente incluye herramientas para visualizar los resultados del cálculo, como perfiles de campo eléctrico y magnético, diagramas de dispersión y gráficos de distribución de modos. Estas visualizaciones son esenciales para comprender la naturaleza de los modos propagados y su comportamiento en la guía de ondas.

- **Aplicaciones prácticas:** algunas de las aplicaciones son el diseño de componentes de fibras ópticas y circuitos integrados fotónicos, el desarrollo de sensores ópticos basados en guías de ondas y la fabricación de dispositivos optoelectrónicos como láseres de guía de ondas y moduladores ópticos.
- **Educación e investigación:** esta herramienta es particularmente útil también en entornos académicos para la enseñanza de conceptos de óptica integrada y electromagnetismo aplicado, así como en investigaciones que requieren el diseño y análisis de guías de ondas complejas.

Por tanto, esta es una herramienta esencial para ingenieros, físicos y científicos en el campo de las telecomunicaciones y la optoelectrónica. Su capacidad para modelar y analizar modos de propagación en estructuras multicapa lo convierte en un recurso valioso tanto para aplicaciones prácticas como para la investigación y la educación avanzada. Esta es la primera de las herramientas que se utiliza para realizar el estudio de la propagación de la luz en guías de onda dieléctricas, estudios que después se modelarán en *COMSOL Multiphysics*.

4.2. COMSOL Multiphysics

A continuación se introduce y explica el segundo software utilizado en el estudio, *COMSOL Multiphysics*.

4.2.1. Funcionamiento de COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un software de simulación que se utiliza ampliamente en la investigación y en el desarrollo de campos de la física, la ingeniería y otras disciplinas científicas. Está basado en el método de elementos finitos (FEM) [12], una técnica matemática poderosa para resolver ecuaciones diferenciales que modelan fenómenos físicos. En el FEM, un dominio se divide en pequeñas regiones geométricas llamadas elementos finitos. Las ecuaciones diferenciales se discretizan en estos elementos, y después se resuelven numéricamente para obtener soluciones aproximadas a los problemas físicos planteados.

COMSOL va más allá de resolver ecuaciones individuales, permitiendo a los usuarios modelar problemas multifísicos, donde diferentes fenómenos físicos interactúan simultáneamente. Esto es crucial para estudiar sistemas complejos como la transferencia de calor, mecánica de fluidos, electromagnetismo, óptica, acústica y más. La motivación de utilizar *COMSOL Multiphysics* en este trabajo radica en su capacidad para simular sistemas

multifísicos de alta complejidad, incluyendo en algún momento la simulación de redes de retroalimentación distribuida (DFB). Estas redes DFB son esenciales en el diseño de láseres avanzados, como los láseres orgánicos DFB, que son utilizados en aplicaciones de comunicación óptica, sensores y otras tecnologías emergentes. La capacidad de modelar estos sistemas complejos y obtener resultados precisos es fundamental para el desarrollo y optimización de dispositivos ópticos innovadores.

4.2.2. Utilidad y Aplicaciones de COMSOL Multiphysics

La versatilidad de *COMSOL* lo hace aplicable en una amplia variedad de campos científicos y de ingeniería:

- **Investigación científica:** en física, *COMSOL* se utiliza para estudiar fenómenos como la propagación de ondas, la dinámica de fluidos y la transferencia de calor en condiciones complejas. Los investigadores pueden explorar hipótesis y validar modelos teóricos mediante simulaciones numéricas precisas [13].
- **Diseño de dispositivos y sistemas:** en ingeniería, *COMSOL* es esencial para el diseño y optimización de dispositivos y sistemas. Por ejemplo, en microelectrónica, los ingenieros pueden simular el comportamiento eléctrico y térmico de circuitos integrados para mejorar su rendimiento y fiabilidad.
- **Simulaciones ópticas y fotónicas:** *COMSOL* se utiliza en el diseño y análisis de dispositivos ópticos y fotónicos, como moduladores ópticos, láseres y sistemas de imágenes médicas. Los investigadores pueden modelar la interacción de la luz con estructuras complejas, como guías de ondas y redes de difracción, para optimizar su eficiencia y precisión.
- **Educación y formación:** en entornos educativos, *COMSOL* se utiliza para enseñar conceptos avanzados de física e ingeniería de manera práctica. El alumnado puede realizar experimentos virtuales que refuercen su comprensión teórica y les permitan explorar aplicaciones prácticas de los principios aprendidos en el aula. Además, gracias a este software, también pueden observar de mejor forma la versatilidad y utilidad de diferentes softwares de simulación.

4.2.3. Aplicaciones en universidad y trabajos de investigación

En universidades y centros de investigación, *COMSOL* es una herramienta fundamental para abordar una amplia gama de problemas científicos y tecnológicos:

- **Investigación interdisciplinaria:** en el campo de la física teórica y experimental, *COMSOL* se utiliza para estudiar fenómenos multifísicos que involucran interacciones complejas entre diferentes sistemas físicos. Por ejemplo, los investigadores pueden modelar la propagación de ondas electromagnéticas en medios dispersivos o la interacción entre campos magnéticos y materiales superconductores. Estos estudios interdisciplinarios permiten desarrollar nuevos modelos teóricos y comprender mejor los fundamentos de la óptica, de la física cuántica o de la materia condensada [14].
- **Desarrollo de prototipos virtuales:** en física experimental, *COMSOL* se emplea para simular y optimizar diseños experimentales antes de su implementación. Por ejemplo, los físicos pueden modelar la geometría y propiedades térmicas de detectores de partículas o sistemas ópticos para predecir su respuesta bajo condiciones específicas de experimentación. Esto ayuda a optimizar el diseño experimental y a interpretar los resultados obtenidos de manera más precisa.
- **Análisis de datos experimentales:** en investigación aplicada en física, *COMSOL* se utiliza para analizar datos experimentales complejos y validar modelos teóricos. De esta forma, los físicos pueden utilizar el software para ajustar modelos de difusión de partículas en medios porosos a datos obtenidos en experimentos de laboratorio. Esto permite extraer conclusiones significativas sobre fenómenos subyacentes y mejorar la comprensión de sistemas naturales complejos.

Por tanto, *COMSOL Multiphysics* es una herramienta indispensable en entornos universitarios y de investigación para abordar una amplia variedad de problemas físicos complejos. Su capacidad para modelar y resolver ecuaciones multifísicas permite a los investigadores explorar fenómenos interdisciplinarios, optimizar diseños experimentales y analizar datos de manera precisa y eficiente. La versatilidad y flexibilidad de *COMSOL* lo convierten en un recurso muy valioso para avanzar en el conocimiento científico y promover la innovación en áreas como la física teórica, la física aplicada y la investigación experimental. Por último, cabe resaltar que *COMSOL Multiphysics* continúa desempeñando un papel fundamental en la expansión de los límites del conocimiento físico y en

la formación de nuevas investigaciones y descubrimientos en diversos campos de la física moderna.

5. Resultados

5.1. Conceptos a analizar en la propagación de la luz en guías de onda planares

En esta parte del Trabajo Fin de Grado se procede a estudiar la propagación de una onda electromagnética en una guía de onda con perfil de índice de refracción escalón.

Se observa el comportamiento de dicha onda al perturbar diferentes características y se estudia como varía la conducta de la onda así como de sus pertinentes modos guiados. De esta forma, se puede realizar una valoración cualitativa sobre de qué forma, la propagación de esta onda guiada, puede ser óptima.

Para realizar estos análisis se utilizará el software tanto el software *OMS*, como *COMSOL Multiphysics*, ambos introducidos en la sección anterior 4.1, 4.2.

5.1.1. Materiales

En primer lugar, antes de empezar con el estudio de los distintos casos de propagación, se presentan los materiales que se han utilizado. Los índices de refracción de estos materiales están determinados por la siguiente ecuación de dispersión:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (44)$$

Donde A, B, C son constantes distintas que dependen del material que se utilice [15]. Se muestran a continuación ejemplos de índices de refracción de algunos materiales que se utilizarán para el análisis (ver tabla 1):

| Materiales | Longitud de onda (nm) | | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| | 436 | 546 | 578 | 589 |
| Aire | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Agua | 1,3220 | 1,3220 | 1,3220 | 1,3220 |
| Vidrio BK7 | 1,5269 | 1,5188 | 1,5173 | 1,5168 |
| Cuarzo (SiO_2 comercial) | 1,4750 | 1,4618 | 1,4582 | 1,4566 |
| Poliestireno (PS) | 1,6158 | 1,5944 | 1,5909 | 1,5899 |
| Polimetilmetacrilato (PMMA) | 1,5031 | 1,4939 | 1,4919 | 1,4913 |

Tabla 1: Índices de refracción en función de la longitud de onda

5.1.2. Factor de confinamiento Γ

Otro de los aspectos que se estudia para cada uno de los casos presentados es el factor de confinamiento. Este concepto se refiere a la fracción de energía óptica que queda confinada dentro del núcleo de la guía de onda en comparación con la que se dispersa en el revestimiento o en el sustrato circundante [16]. Este valor para el campo eléctrico viene dado por:

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{core}} |E|^2 dA}{\int_{\text{total}} |E|^2 dA} \quad (45)$$

donde $|E|^2$ representa la intensidad del campo eléctrico del modo óptico. La integral en el numerador se realiza sobre la sección transversal del núcleo, y la integral en el denominador se realiza sobre toda la sección transversal de la guía de onda (sustrato, núcleo y revestimiento). En ambos casos, dA es un elemento diferencial de área en la sección transversal correspondiente.

En cuanto al campo magnético, el factor de confinamiento viene dado por:

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{core}} |H|^2 dA}{\int_{\text{total}} |H|^2 dA} \quad (46)$$

Donde $|H|^2$ representa la intensidad del campo eléctrico del modo óptico.

De esta forma, se puede estudiar, para cada simulación, el factor de confinamiento de cada uno de los campos, lo cual permite analizar en qué caso la propagación es más óptima.

5.1.3. Índice de refracción efectivo N_{eff}

El índice de refracción efectivo (N_{eff}) es una medida que caracteriza la velocidad de fase de los modos de luz confinados dentro de la guía de onda. Este índice es una propiedad emergente del sistema y depende tanto de las propiedades del material como de la geometría de la guía de onda [17]. Se puede considerar como un índice de refracción aparente que tiene en cuenta el confinamiento de la luz dentro del núcleo de la guía de onda y la interacción con el revestimiento y el sustrato circundante.

El índice de refracción efectivo está relacionado con la constante de propagación β del modo de luz en la guía de onda y la longitud de onda de operación λ_0 en el vacío mediante la siguiente fórmula:

$$N_{eff} = \frac{\beta \lambda_0}{2\pi} \quad (47)$$

Donde β es la constante de propagación de la onda y λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

5.1.4. Espesor de corte $h_{cut-off}$

Se le denomina espesor de corte ($h_{cut-off}$) al espesor mínimo del núcleo de la guía de onda necesario para que un modo específico (como el fundamental) sea capaz de propagarse. Si el espesor del núcleo es menor que el valor de $h_{cut-off}$, el modo no puede estar confinado y no se propaga a lo largo de la guía de onda. Este valor viene dado según la expresión:

$$h_{cut-off} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{core}^2 - n_{substrate}^2}} \arctan \left(\sqrt{\frac{n_{substrate}^2 - n_{cladding}^2}{n_{core}^2 - n_{substrate}^2}} \right) \quad (48)$$

donde $\frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{core}^2 - n_{substrate}^2}}$ representa la longitud de onda efectiva en el núcleo de la guía de onda y es modulado por la diferencia entre los índices de refracción entre el núcleo y el sustrato. Por otra parte, el término $\arctan \left(\sqrt{\frac{n_{substrate}^2 - n_{cladding}^2}{n_{core}^2 - n_{substrate}^2}} \right)$ representa el factor de corrección que considera la diferencia entre el índice de refracción entre el sustrato y el recubrimiento. La función arcotangente ajusta la contribución relativa de estos índices con el índice de refracción en el corte.

5.2. Simulaciones computacionales

En esta sección se hacen visibles las representaciones obtenidas computacionalmente y se analizan los resultados obtenidos.

5.2.1. Influencia del tipo de sustrato

En esta sección se estudia cómo afecta el material del sustrato de la guía, a la propagación de una onda electromagnética en un guía de ondas plana. Se muestra la figura obtenida para cada uno de los modos (transversal eléctrico y transversal magnético) mediante la web *OMS*. A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones en *COMSOL Multiphysics* y se comparan. Se representa la intensidad el campo eléctrico, del campo magnético y el módulo de ambos campos en el sistema de estudio (ver Figuras 3 4 5).

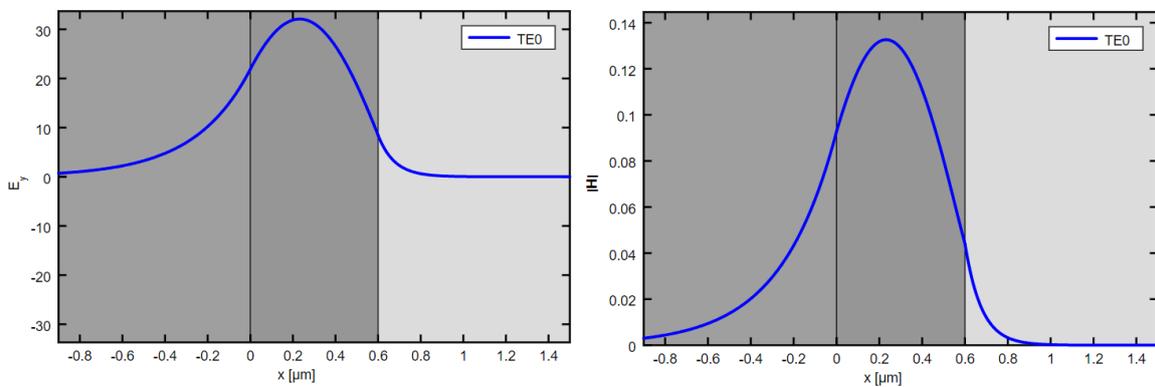
En las siguientes simulaciones, se consideran los siguientes valores de los parámetros pertinentes (ver Tabla 2).

| Parámetro | Valor | Explicación |
|-----------------|---------|---|
| λ | $578nm$ | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| $n_{cladding}$ | 1 | Índice de refracción del material del recubrimiento (aire) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{substrate}$ | 1,5173 | Índice de refracción del material del sustrato (vidrio BK7) |
| w_{slab} | $500nm$ | Longitud de la guía |
| $h_{cladding}$ | $300nm$ | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | $600nm$ | Espesor de la guía |
| $h_{substrate}$ | $300nm$ | Espesor del sustrato |

Tabla 2: *Parámetros introducidos en la simulación*

Las representaciones obtenidas se muestran en las Figuras 3, 4, 5.

Cabe resaltar que, en todas las figuras con gráficas que se mostrarán en esta sección, aparecen ejes horizontales diferentes para cada uno de los softwares utilizados. En *OMS* aparecerá en el eje horizontal la coordenada x , mientras que en *COMSOL Multiphysics*, aparecerá la coordenada y . Esto es debido a que el primero de los softwares únicamente realiza modelados en $1D$ y $2D$, en el plano XY . Por otra parte, la dimensión del modelado empleado en *COMSOL Multiphysics* puede ser hasta en $3D$, determinando y como la componente horizontal por donde se transmite la luz. De esta forma, a pesar de que en las gráficas de *OMS* y *COMSOL Multiphysics* aparezcan ejes horizontales diferentes, estos hacen referencia a la misma coordenada.



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 3: Modos transversales obtenidos con *OMS*

También es importante tener en cuenta que, para las simulaciones obtenidas con *OMS* (Figura 3), las unidades del campo eléctrico son $V/\mu m$ y las del campo magnéticos serán $A/\mu m$.

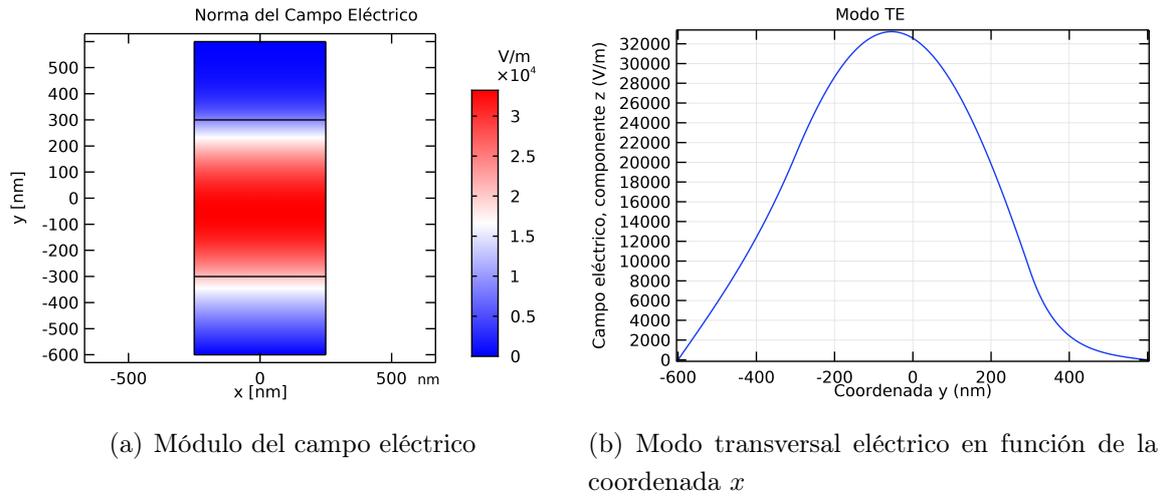


Figura 4: Estudio del campo eléctrico en *COMSOL Multiphysics*

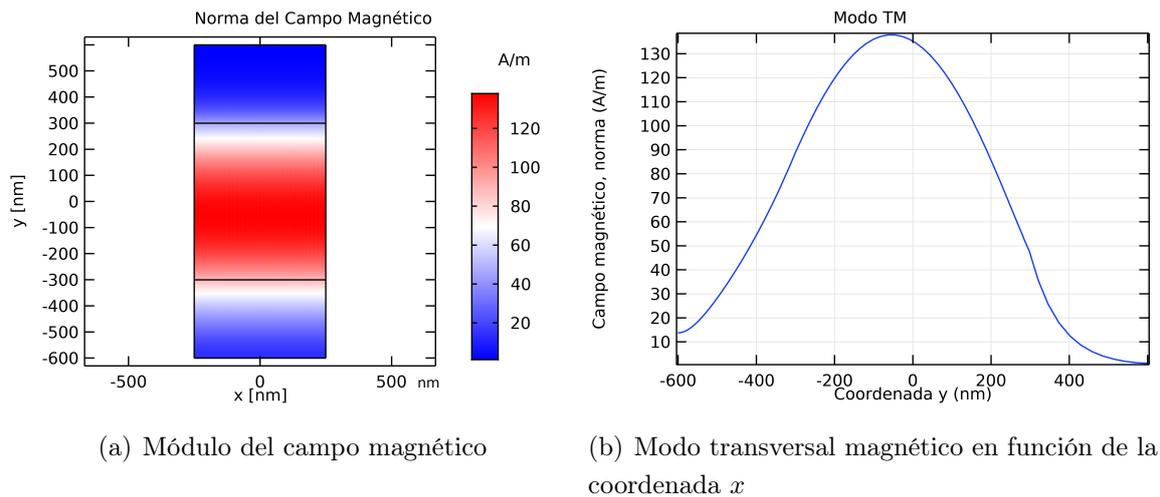


Figura 5: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

En este caso 3, 4, 5, se observa que el único modo que se propaga es el modo TE_0 y TM_0 . Además, al observar los módulos de los campos graficados en todo el sistema, se puede ver como la intensidad alcanza los valores máximos en la guía de ondas, por tanto, se puede confirmar que la luz se encuentra guiada y confinada dentro del núcleo. Las constantes de propagación son $\beta_{E_0} = 16,93\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 16,88\mu m^{-1}$.

Por otra parte, los índices de refracción efectivos, obtenidos mediante la ecuación 47 son los siguientes: $N_{eff}^{E_0} = 1,5572$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5526$. Como se puede observar, tanto la

constante de propagación como el índice de refracción efectivo difieren ligeramente cuando, en una situación ideal, ambos valores de las variables deberían ser iguales para los dos campos. Esta desviación en los valores se debe principalmente al método de cálculo, el cual está basado en aproximaciones y hace que dichos parámetros difieran ligeramente. Cabe resaltar que estos valores han sido obtenidos mediante el software *COMSOL Multiphysics*.

Por último, para el factor de confinamiento Γ , expresado en la ecuación 46 se obtienen los siguientes valores: $\Gamma_{E_0} = 0,864$ y $\Gamma_{H_0} = 0,859$. Por tanto, el 86,4% de la intensidad del campo eléctrico y el 85,9% del campo magnético queda confinado dentro de la guía. Así, en este caso, se tendrá una pérdida del 13,64% del campo eléctrico y de un 14,10% del campo magnético.

De nuevo, las ligeras diferencias que se observan en este confinamiento se debe a errores numéricos a la hora de iterar el cálculo mediante diferencias finitas, sistema el cual, como se ha explicado en la sección 4.2, es el que utiliza *COMSOL Multiphysics*. Este error puede ser minimizado al dividir el sistema en subsistemas más pequeños. Los inconvenientes de este hecho serían el coste computacional de la simulación y el tiempo de espera a que la simulación se realizara.

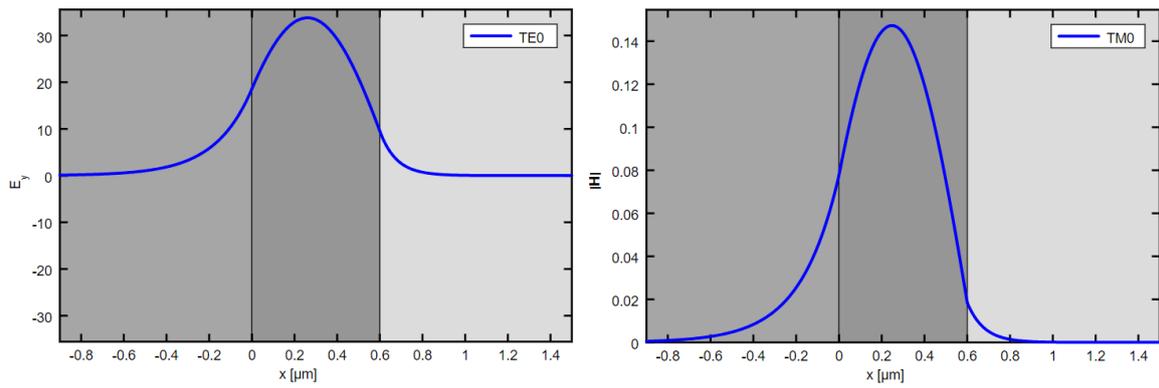
A continuación se observa qué ocurre al cambiar el material del sustrato.

Los valores de los parámetros se muestran en la tabla 3:

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1 | Índice de refracción del material del recubrimiento (aire) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4582 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 300nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

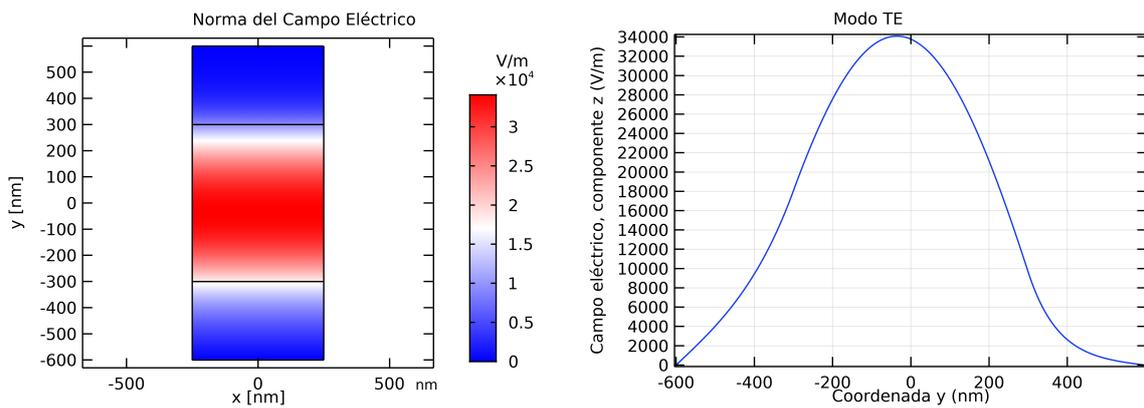
Tabla 3: Parámetros introducidos en la simulación

Las representaciones obtenidas para estos datos, son las mostradas en las Figuras 6, 7, 8



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 6: Modos transversales obtenidos con OMS



(a) Módulo del campo eléctrico (b) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x

Figura 7: Estudio del campo eléctrico en COMSOL Multiphysics

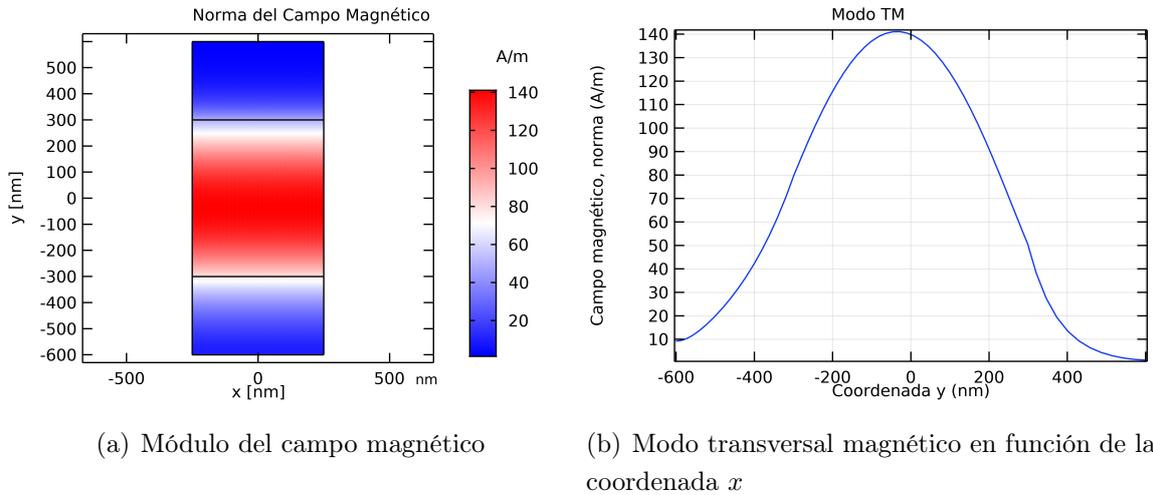


Figura 8: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

De nuevo, se observa que únicamente se presenta un modo guiado, el modo fundamental. Por otra parte, se observa que los valores tanto del campo eléctrico como del magnético, alcanzan un valor superior, debido a que el índice de refracción del sustrato es menor en este segundo caso.

Para este sistema las constantes de propagación son $\beta_{E_0} = 16,87\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 16,80\mu m^{-1}$, valores ligeramente inferiores a los obtenidos en la simulación anterior.

Los valores obtenidos para el índice de refracción efectivo son: $N_{eff}^{E_0} = 1,5521$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5454$. Valores que, difieren de la simulación anterior por el cambio del índice del sustrato.

Por último, el factor de confinamiento para cada uno de los campos será el siguiente: $\Gamma_{E_0} = 0,932$ y $\Gamma_{H_0} = 0,936$. Por tanto, el 93,20 % de la intensidad del campo eléctrico y el 93,60 % del campo magnético queda confinado dentro de la guía. Así, en este caso, se tendrá una pérdida del 6,80 % del campo eléctrico y de un 6,40 % del campo magnético.

Nuevamente, todos estos valores han sido obtenidos mediante el software *COMSOL Multiphysics*.

De esta forma se observa que, al disminuir el índice de refracción del sustrato del sistema a estudiar, manteniendo los otros parámetros constantes, se consigue un aumento de la energía confinada dentro del núcleo.

5.2.2. Influencia del tipo de recubrimiento

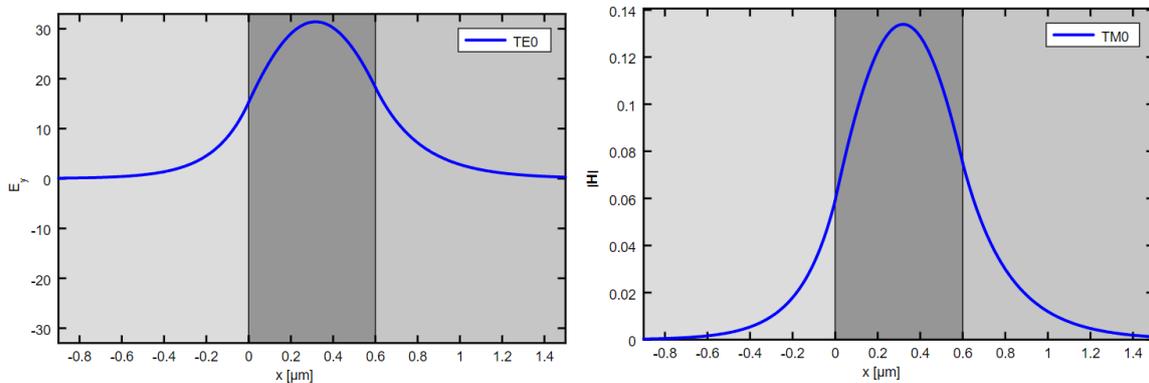
En esta segunda parte se estudia como varía el comportamiento de la luz dentro de la guía al modificar el material del recubrimiento.

Los valores de los parámetros escogidos para esta simulación se muestran en la tabla 4.

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1,55 | Índice de refracción del material del recubrimiento (ámbar) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,5173 | Índice de refracción del material del sustrato (vidrio BK7) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 300nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 4: Parámetros introducidos en la simulación

Las representaciones obtenidas para estos datos son las mostradas en las Figuras 9, 10, 11:



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 9: Modos transversales obtenidos con OMS

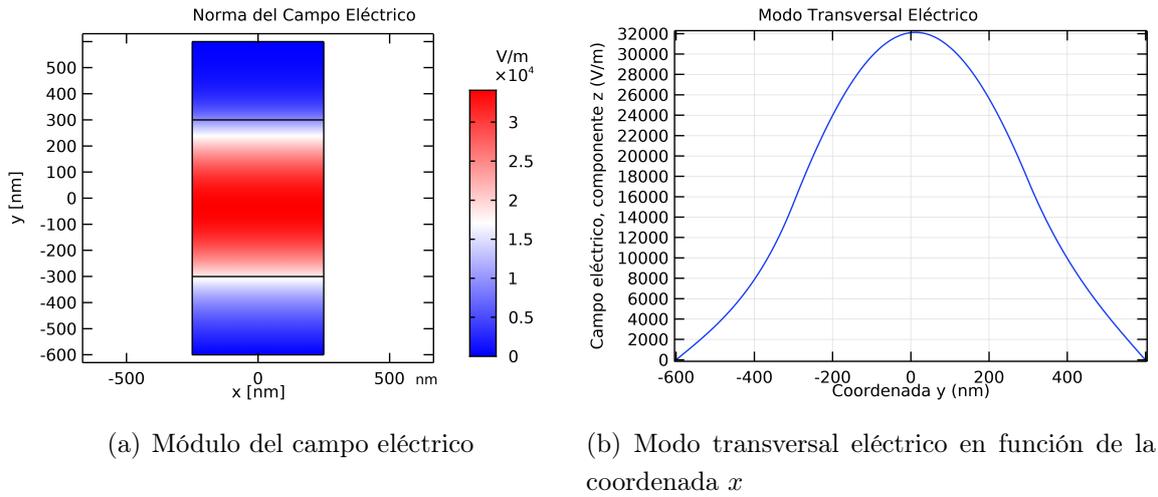


Figura 10: Estudio del campo eléctrico en *COMSOL Multiphysics*

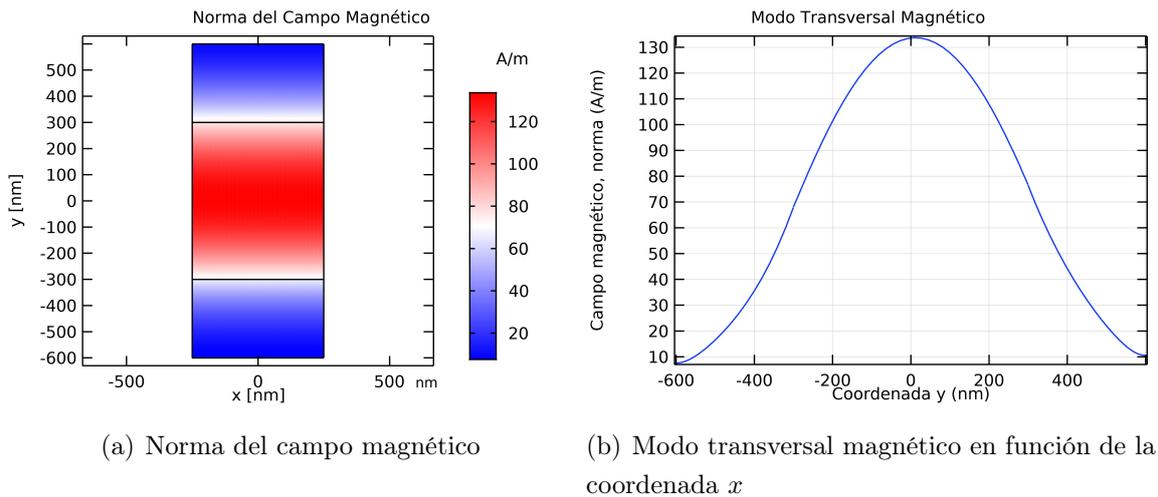


Figura 11: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

En este caso, de nuevo se observa que el único modo que se propaga es el fundamental. Ahora con constantes de propagación $\beta_{E_0} = 16,97\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 16,94\mu m^{-1}$, valores superiores a los obtenidos cuando el índice de refracción del recubrimiento es menor (aire).

En cuanto a los índices de refracción efectivos, se obtienen los siguientes valores $N_{eff}^{E_0} = 1,5607$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5582$, que también serán mayores que en el apartado anterior por ser el índice de refracción del ámbar mayor que el del vidrio.

Por último, se analiza que valores toma el factor de confinamiento. En cuanto al campo

eléctrico se obtiene: $\Gamma_{E_0} = 0,886$ y, para el campo magnético $\Gamma_{H_0} = 0,894$. Por tanto, el 88,60% de la intensidad del campo eléctrico y el 89,40% del campo magnético queda confinado dentro de la guía. Así, se tendrá una pérdida del 11,40% del campo eléctrico y de un 10,60% del campo magnético.

Se observa que en este caso en el que el recubrimiento tiene un índice de refracción mayor a uno, se produce una pérdida de la intensidad de los campos mayor.

Para la siguiente simulación en cuanto a la influencia del tipo de recubrimiento se realiza el estudio de un caso específico, el cual consistirá en simular y adaptar lo mejor posible una de las redes de difracción fabricadas en el laboratorio de ciencia de materiales de la Universidad de Alicante [18].

Esta red consiste en un sistema de capas el cual consta de una primera capa (sustrato), una capa intermedia (núcleo) y, una capa superior (recubrimiento). Esta capa superior presenta una particularidad y es que no es homogénea (ver Figura 12). Es decir, está formada por una serie de crestas y valles, derivando así en un índice de refracción no homogéneo ya que, en función de la posición en la guía en la que se encuentre la onda se tendrá una cantidad de material y de aire específica, la cual no será constante [19].

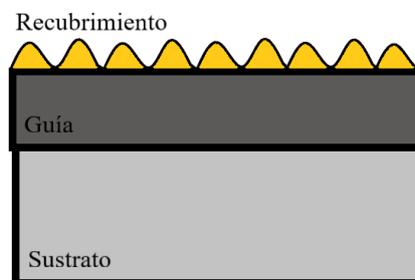


Figura 12: Esquema del dispositivo con recubrimiento de índice no constante

Este estudio es el más interesante por el contexto de los láseres orgánicos [20].

Los parámetros utilizados para esta simulación, que han sido corroborados con personal investigador del laboratorio son los que aparecen en la tabla 5.

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1,4432 | Índice de refracción del material del recubrimiento (gelatina y aire) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4582 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 110nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 5: *Parámetros introducidos en la simulación*

Al tener un recubrimiento no constante y querer adaptarlo a un recubrimiento constante, el índice de refracción ha sido calculado siguiendo una media ponderada, en la que se ha supuesto que esta capa de recubrimiento tiene un 75% de gelatina dicromatada y un 25% de aire. Así el índice de refracción vendrá dado por:

$$n_{\text{cladding}} = 0,75 \cdot n_{\text{gelatina}} + 0,25 \cdot n_{\text{aire}} \quad (49)$$

Al estar considerando una guía de poliestireno y tener la gelatina dicromatada un índice de refracción muy similar al del poliestireno ($n_{\text{gelatina}} \approx n_{\text{poliestireno}}$), la expresión se simplifica de la siguiente forma:

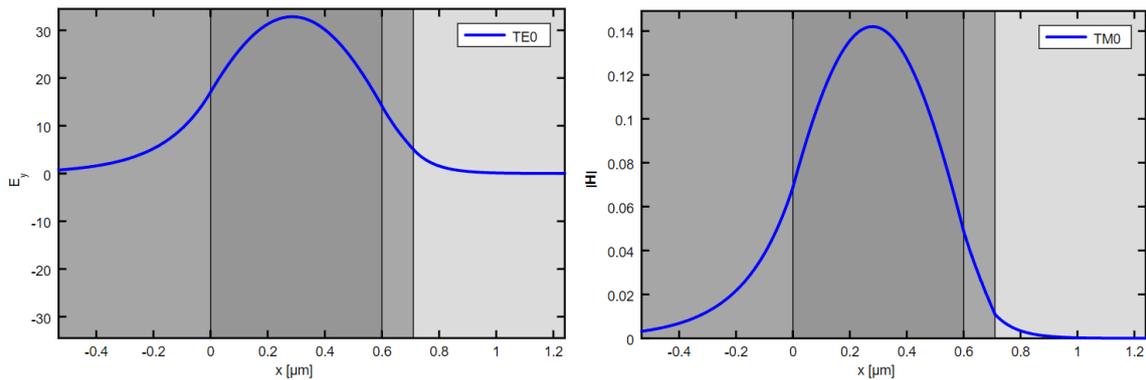
$$n_{\text{cladding}} = 0,75 \cdot n_{\text{poliestireno}} + 0,25 \cdot n_{\text{aire}} \quad (50)$$

De esta forma se tendrá un índice de refracción que simule (en promedio), las crestas y valles del recubrimiento de la red de difracción fabricada en el laboratorio.

Así, las representaciones obtenidas para este caso, son las se muestran en las Figuras 13, 14, 15:

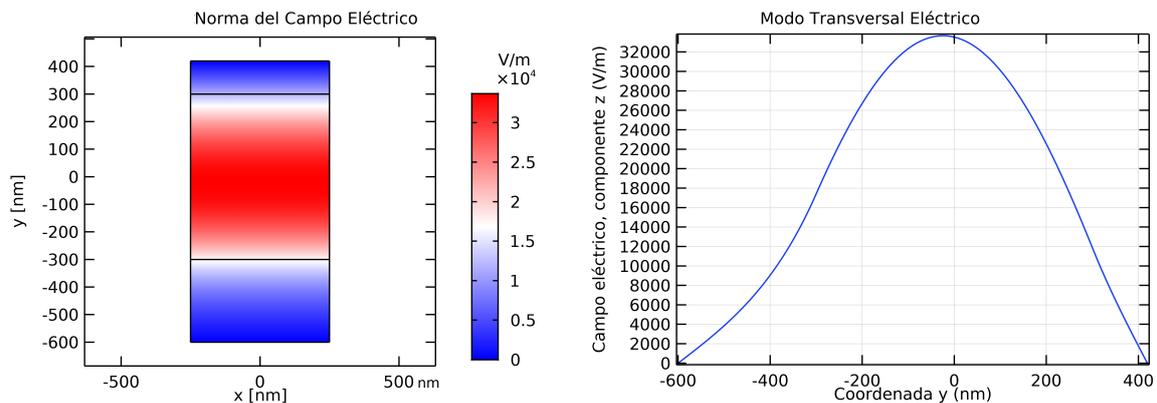
De nuevo, se observa la propagación del modo fundamental. Además, en las figuras pertenecientes a la representación de la norma de los campos, se observa que en el recubrimiento, la intensidad disminuye, en parte por tener un espesor muy reducido.

En este caso, las constantes de propagación son $\beta_{E_0} = 16,92\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 16,87\mu m^{-1}$, que son valores ligeramente inferiores al caso anterior. Esto es debido a que, aunque el índice de refracción del recubrimiento sea menor (lo que favorecería al confinamiento de



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 13: Modos transversales obtenidos con OMS



(a) Módulo del campo eléctrico (b) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x

Figura 14: Estudio del campo eléctrico en COMSOL Multiphysics

la intensidad), el espesor del recubrimiento es significativamente inferior, lo que hace que disipe cierta intensidad.

Los índices de refracción efectivos obtenidos son: $N_{eff}^{E_0} = 1,5633$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5519$.

Por último, se obtienen los siguientes valores para el factor de confinamiento: $\Gamma_{E_0} = 0,928$ y, para el campo magnético $\Gamma_{H_0} = 0,939$, lo que implica que se tenga un confinamiento del 92,80 % en el caso del campo eléctrico y un 93,90 %. Por tanto, para este caso, se tienen unas pérdidas del 6,10 % para el campo eléctrico y de un 7,20 % para el magnético. Por tanto, se puede afirmar que, al tener un índice de refracción en menor en

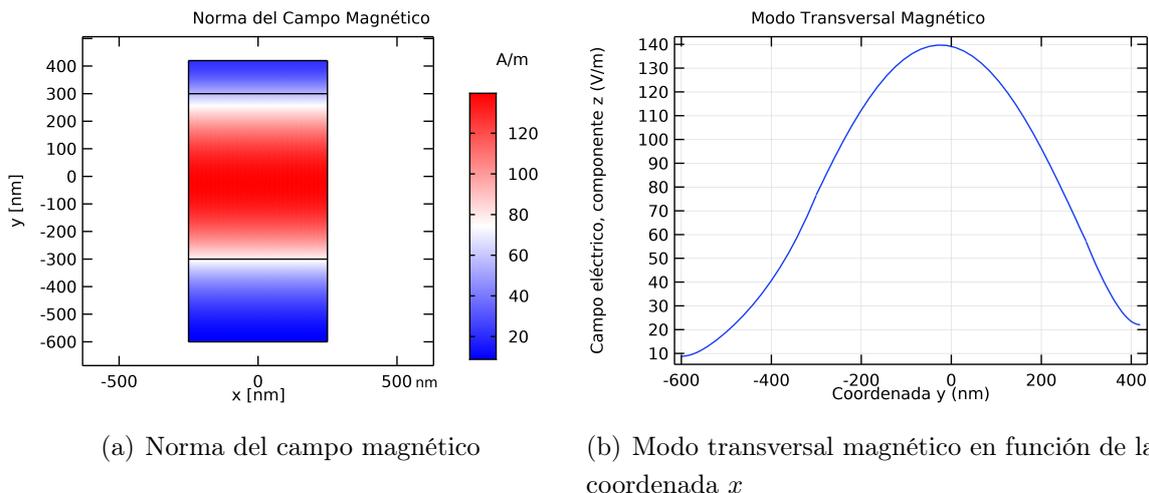


Figura 15: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

el recubrimiento, se confina más energía en el núcleo del sistema.

5.2.3. Influencia del espesor de la guía

En este subapartado se estudia como varía la intensidad de la onda confinada en función del espesor de la guía. Los parámetros se muestran en la tabla 6 para un espesor delgado, de 100 nm .

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|----------------|---|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1 | Índice de refracción del material del recubrimiento (aire) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4582 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 300nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 100nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 6: Parámetros introducidos en la simulación

Los resultados se muestran en la Figura 17.

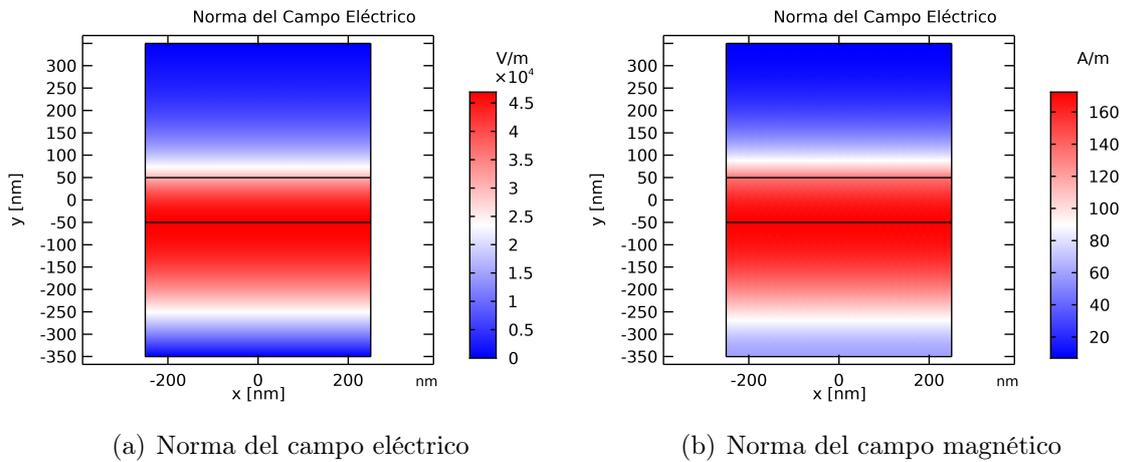


Figura 16: Estudio de la norma de los campos en COMSOL Multiphysics

Con esta figura, se observa que la onda no está guiada dentro del núcleo del sistema si no que esta penetrará en el sustrato y transmitirá a este gran parte de las intensidades de campo. Por tanto, al buscar modos guiados en este sistema no se obtienen resultados, debido a que no se propaga ningún modo, incluido el modo fundamental.

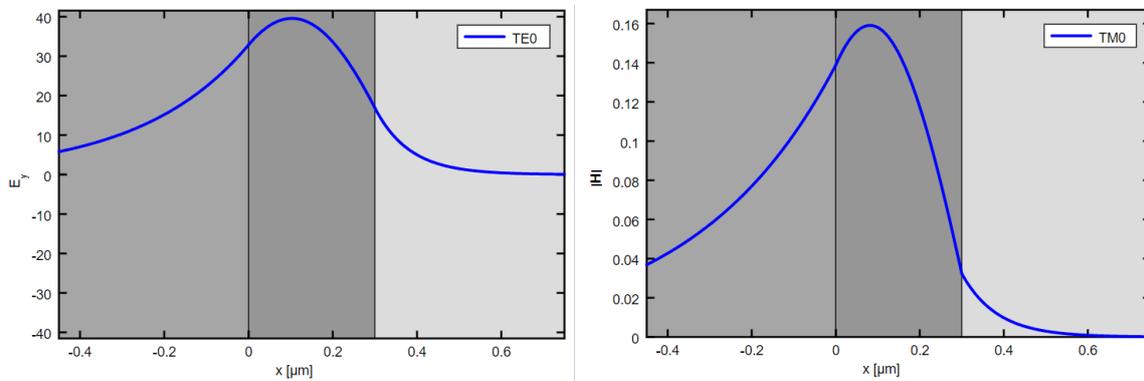
Este hecho es debido a que el núcleo del sistema no posee el espesor suficiente como para abarcar la propagación de ningún modo (ver ecuación 48). Es decir, $h_{core} < h_{cut-off}$, siendo $h_{cut-off}$ el espesor mínimo de la guía para que se propague el modo fundamental [21].

Se estudia a continuación el mismo sistema con un espesor de la guía mayor. Los datos de los parámetros utilizados son visibles en la tabla 7

Los resultados obtenidos aparecen representados en las Figuras 17,18,19.

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1 | Índice de refracción del material del recubrimiento (aire) |
| n_{core} | 1,5909 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4582 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 500nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 300nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 500nm | Espesor del sustrato |

Tabla 7: Parámetros introducidos en la simulación



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

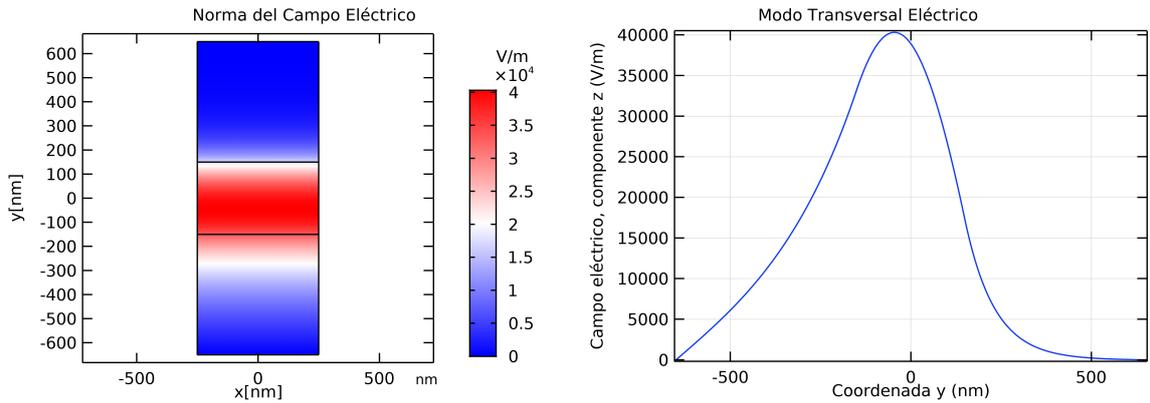
Figura 17: Modos transversales obtenidos con OMS

Para este sistema se observa como, al tener un espesor mayor al espesor $h_{\text{cut-off}}$, el modo fundamental se propaga por la guía.

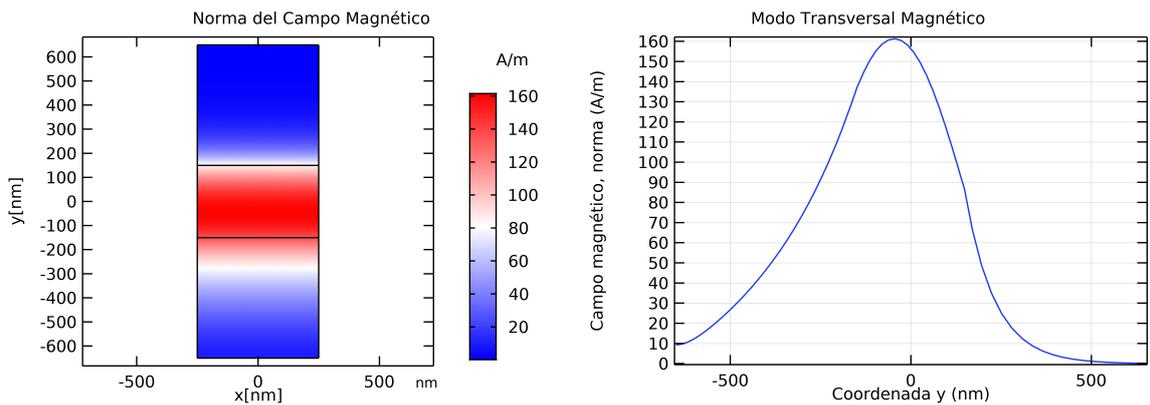
Así, se tendrán unas constantes de propagación $\beta_{E_0} = 16,31\mu\text{m}^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 16,12\mu\text{m}^{-1}$.

Por otra parte, se tienen los siguientes índices de refracción efectivos: $N_{\text{eff}}^{E_0} = 1,5007$ y $N_{\text{eff}}^{H_0} = 1,4831$.

Por último, se obtienen los siguientes valores para el factor de confinamiento: $\Gamma_{E_0} = 0,699$ y, para el campo magnético $\Gamma_{H_0} = 0,688$, lo que implica un confinamiento dentro del núcleo del sistema del 69,90 % en el caso del campo eléctrico y de un 68,80 % para el campo magnético. Así, se tienen unas pérdidas del 30,10 % y del 31,20 % respectivamente, una pérdida de la intensidad considerablemente más grande que en los casos anteriores.



(a) Norma del campo eléctrico

(b) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x **Figura 18:** Estudio del campo eléctrico en COMSOL Multiphysics(a) Norma del campo magnético en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x **Figura 19:** Estudio del campo magnético en COMSOL Multiphysics

5.2.4. Influencia del índice de refracción de la guía

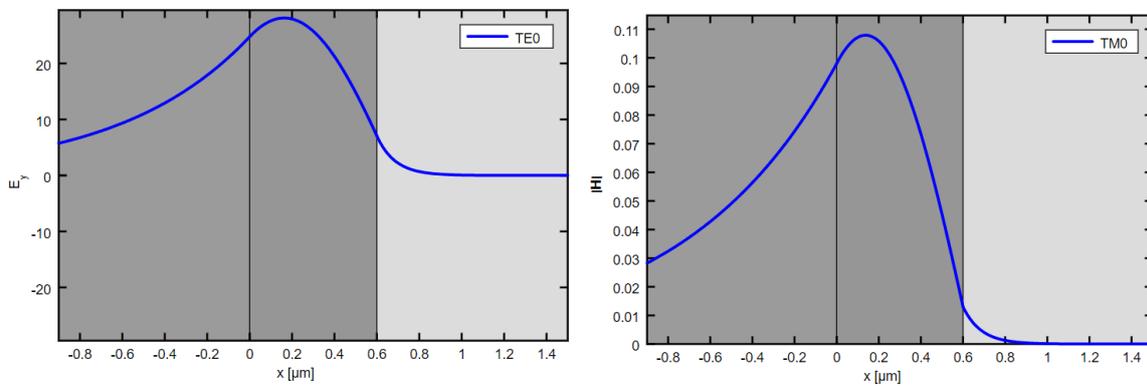
A continuación se estudia el sistema al variar el índice de refracción de la guía. Los valores utilizados para los parámetros pertinentes aparecen visibles en la tabla 8

Las representaciones obtenidas son las que aparecen en las Figuras 20, 21, 22.

En este caso, de nuevo se observa que únicamente se propaga el modo fundamental, con constantes de propagación $\beta_{E_0} = 15,93\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 15,91\mu m^{-1}$, valores que son bastante reducidos en comparación con los obtenidos anteriormente.

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|--|
| λ | 578nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1 | Índice de refracción del material del recubrimiento (aire) |
| n_{core} | 4919 | Índice de refracción del material de la guía (polimetacrilato) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4582 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 900nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 900nm | Espesor del sustrato |

Tabla 8: Parámetros introducidos en la simulación



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 20: Modos transversales obtenidos con OMS

En cuanto al índice de refracción efectivo, se obtienen los siguientes valores: $N_{eff}^{E_0} = 1,4658$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,4637$. También se obtienen valores reducidos en este caso, debido a que se está tomando un valor del índice del núcleo inferior al de los casos anteriores.

Por tanto, esto deriva en una pérdida en la propagación de la intensidad de los campos. Veamos el factor de confinamiento: $\Gamma_{E_0} = 0,628$ y, para el campo magnético $\Gamma_{H_0} = 0,659$. Por tanto, los porcentajes de intensidad de campo que quedan dentro de la guía serán del 65,90 % y del 62,80 %. Teniendo así unas pérdidas del 34,10 % y del 37,20 %. Por tanto, se concluye en esta sección que si el índice de refracción del núcleo disminuye, el contraste de índice de refracción entre el núcleo y el recubrimiento también disminuye. Esto provoca un menor confinamiento de la luz, permitiendo que una mayor parte de la luz se extienda en el recubrimiento o incluso escape fuera de la guía.

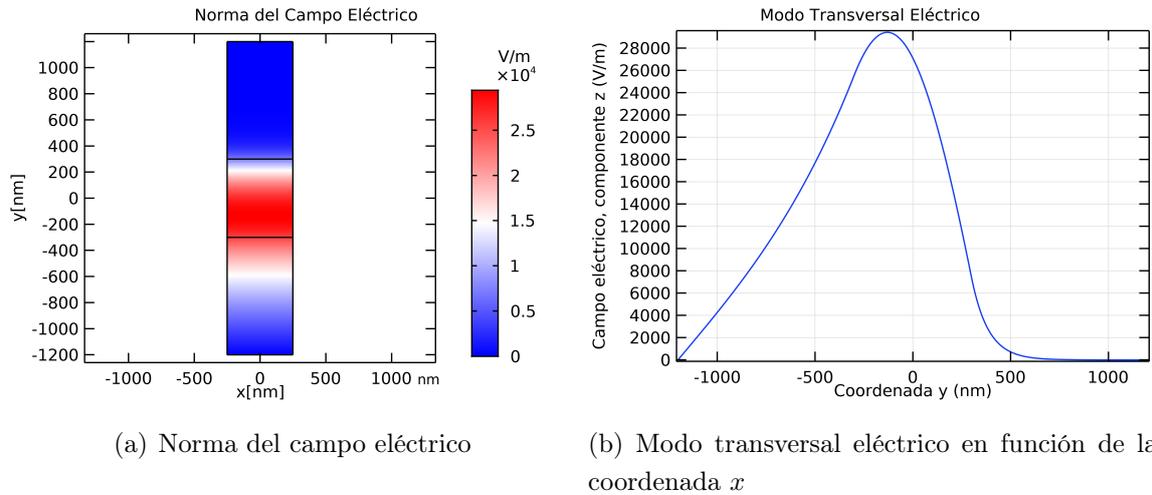


Figura 21: Estudio del campo eléctrico en *COMSOL Multiphysics*

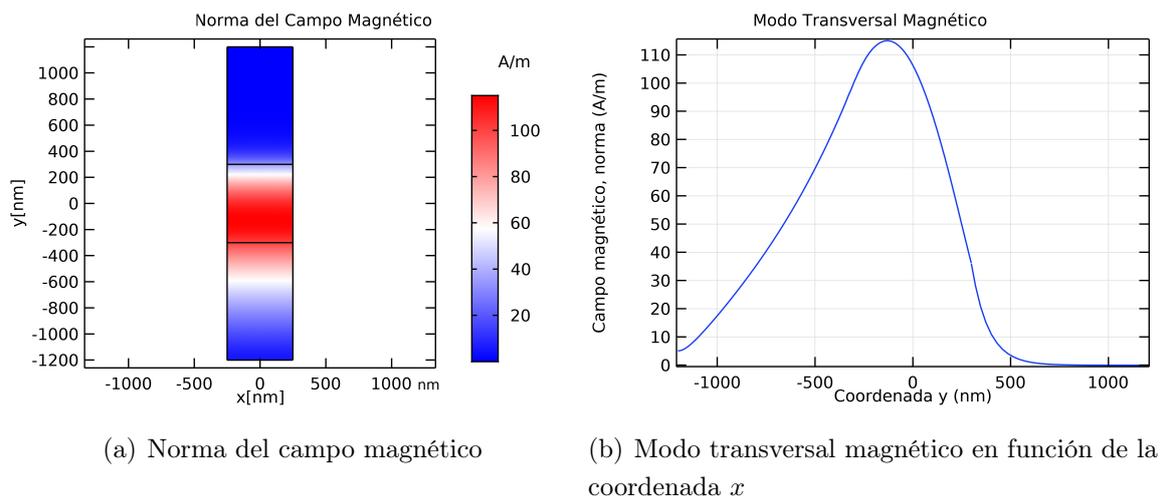


Figura 22: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

5.2.5. Influencia de la longitud de onda

En esta sección se estudia como varía el comportamiento del sistema al incidir con luz a diferentes longitudes de onda. Para ello, se mantienen todos los parámetros constantes y se varía únicamente la longitud de onda de la luz.

Al tratarse de un sistema de gran interés dentro del laboratorio y del grupo de ciencia de materiales dentro de la Universidad de Alicante, se estudia el caso explicado anteriormente (ver Figura 12) en el que el recubrimiento del sistema es un conjunto de crestas

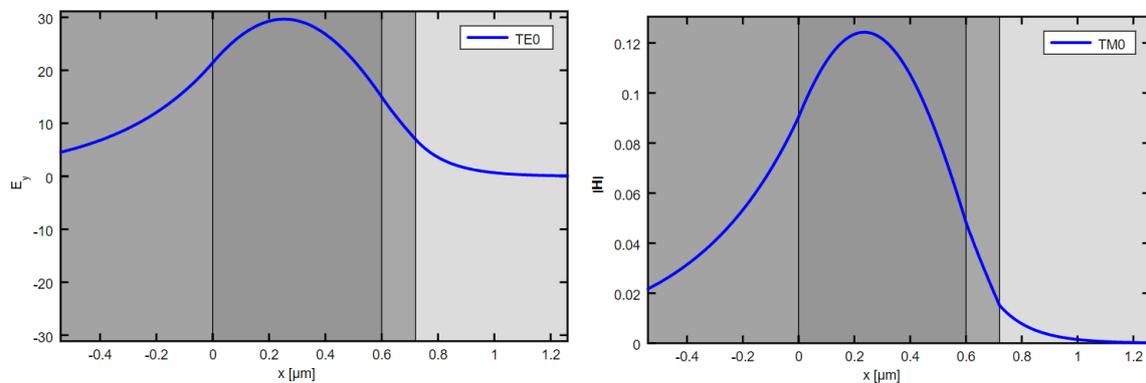
y valles de gelatina dicromatada. Así, se estudia este sistema variando únicamente la longitud de onda de la luz incidente.

Para el primer caso se tienen los siguientes valores de los parámetros (ver tabla 9), donde se considera una longitud de onda en el rango de infrarrojo cercano:

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 850nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1,4252 | Índice de refracción del material del recubrimiento (gelatina y aire) |
| n_{core} | 1,5669 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4623 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 120nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 9: Parámetros introducidos en la simulación

Las representaciones obtenidas en este caso son las que aparecen en las Figuras 23, 24, 25.



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 23: Modos transversales obtenidos con OMS

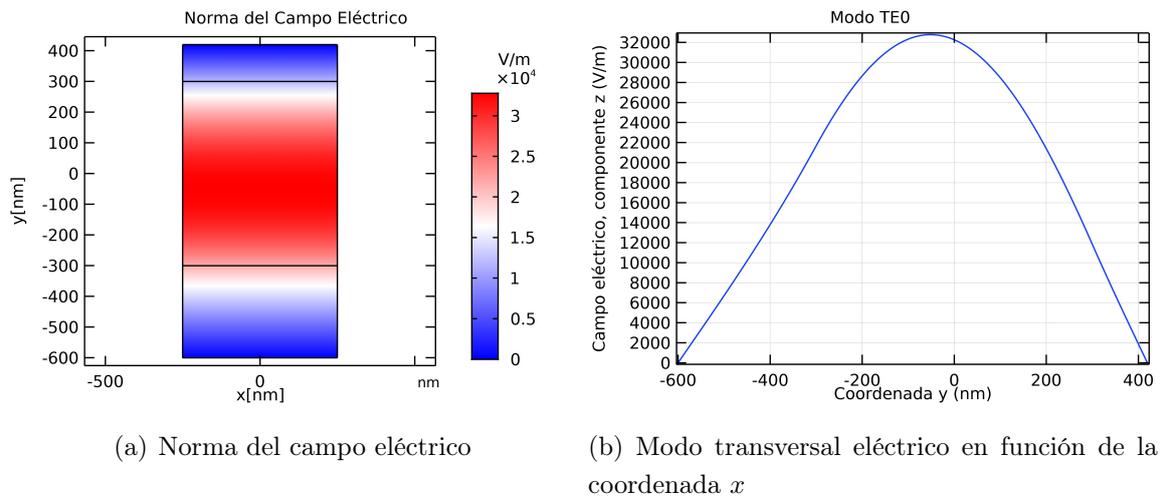


Figura 24: Estudio del campo eléctrico en *COMSOL Multiphysics*

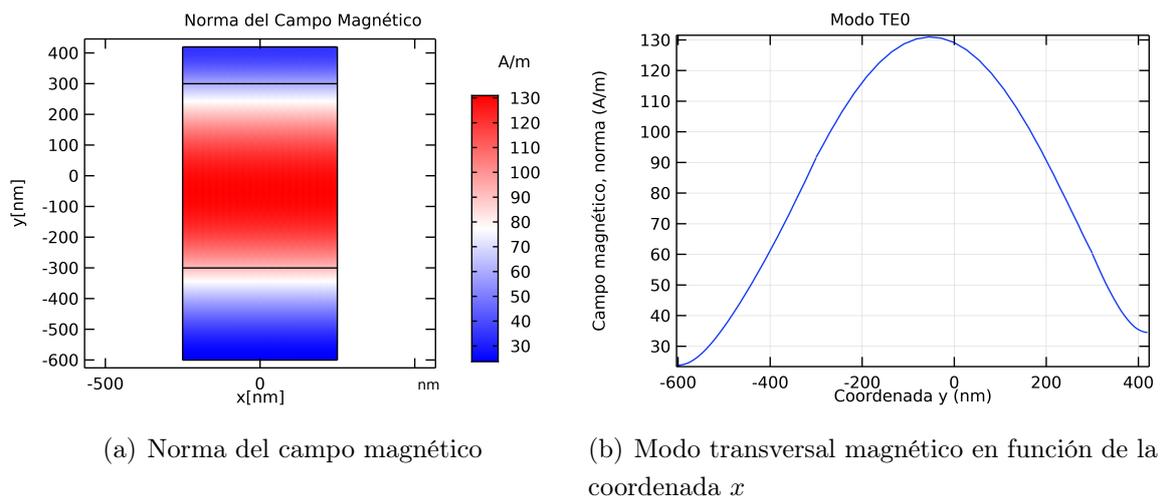


Figura 25: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

En este caso, en el que la longitud de onda se encuentra en el rango del infrarrojo cercano, se observa que únicamente se propaga el modo fundamental electromagnético.

La constante de propagación en este caso alcanza los valores: $\beta_{E_0} = 11,19\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 11,13\mu m^{-1}$.

El índice de refracción efectivo obtiene los siguientes valores: $N_{eff}^{E_0} = 1,5132$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5054$.

Y por último, el factor de confinamiento obtiene los valores: $\Gamma_{E_0} = 0,805$ y $\Gamma_{H_0} = 0,798$.

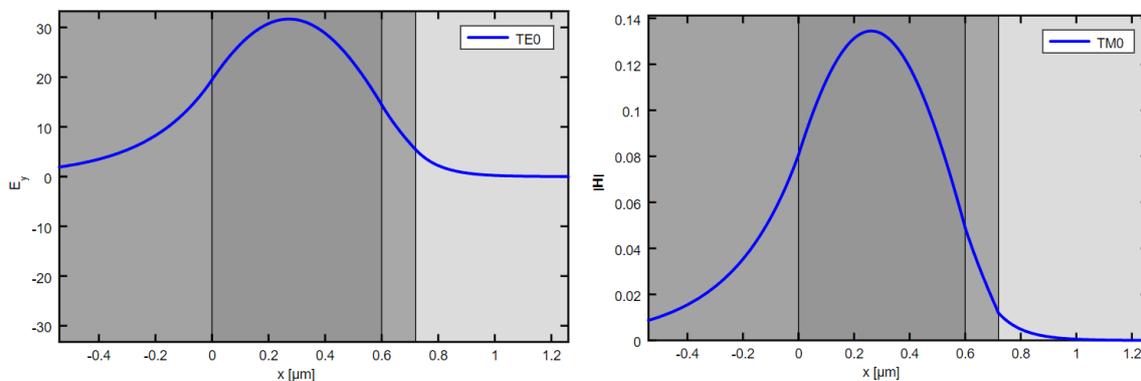
Es decir, un 80,50 % y 79,80 % de confinamiento, y por tanto, un 19,50 % y un 20,20 % de pérdidas respectivamente. Lo que implica que, al aumentar la longitud de onda, aumentan las pérdidas de intensidad confinada.

Para el siguiente caso se estudia la longitud de onda roja, en el ultravioleta cercano. Los parámetros utilizados se hacen visibles en la tabla 10.

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 650nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1,4276 | Índice de refracción del material del recubrimiento (gelatina y aire) |
| n_{core} | 1,5701 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4659 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 120nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 10: Parámetros introducidos en la simulación

Las representaciones obtenidas mediante las simulaciones pertinentes son las que aparecen en las Figuras 26,27,28.



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 26: Modos transversales obtenidos con OMS

De nuevo se observa que se propaga únicamente el modo fundamental. A continuación se estudian sus características.

Las constante de propagación en este caso toma los siguientes valores para cada uno

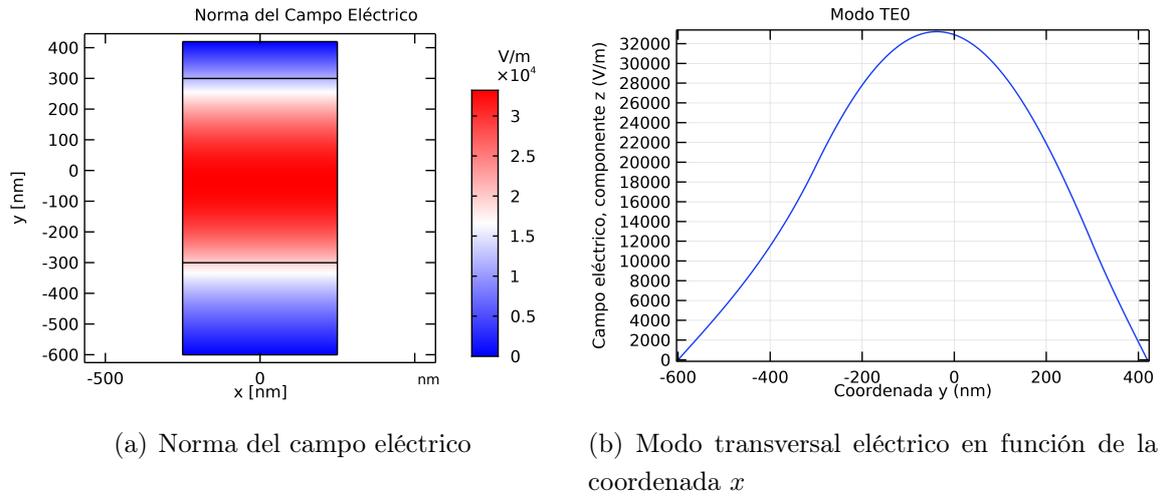


Figura 27: Estudio del campo eléctrico en *COMSOL Multiphysics*

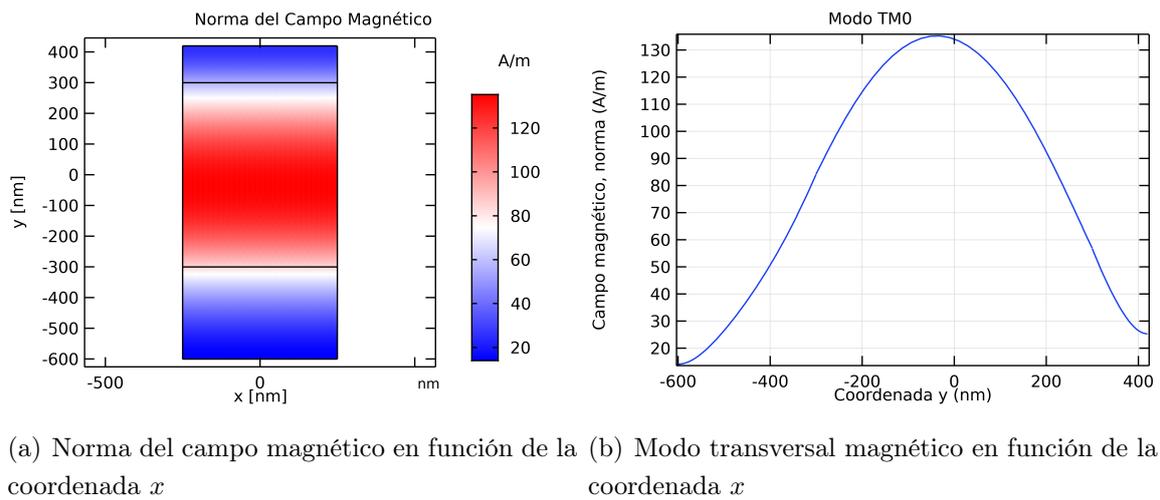


Figura 28: Estudio del campo magnético en *COMSOL Multiphysics*

de los campos: $\beta_{E_0} = 14,80\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 14,76\mu m^{-1}$. Se observa como, a medida que disminuye la longitud de onda, aumenta el valor de la constante de propagación.

En cuanto al índice de refracción objetivo, se obtienen los siguientes valores: $N_{eff}^{E_0} = 1,5316$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5267$. Valores que aumentan al disminuir la longitud de onda de la luz incidente.

Por último, los valores obtenidos para el factor de confinamiento son: $\Gamma_{E_0} = 0,884$ y $\Gamma_{H_0} = 0,892$. Que corresponden a un 88,40 % y a un 89,20 % respectivamente. Por tanto,

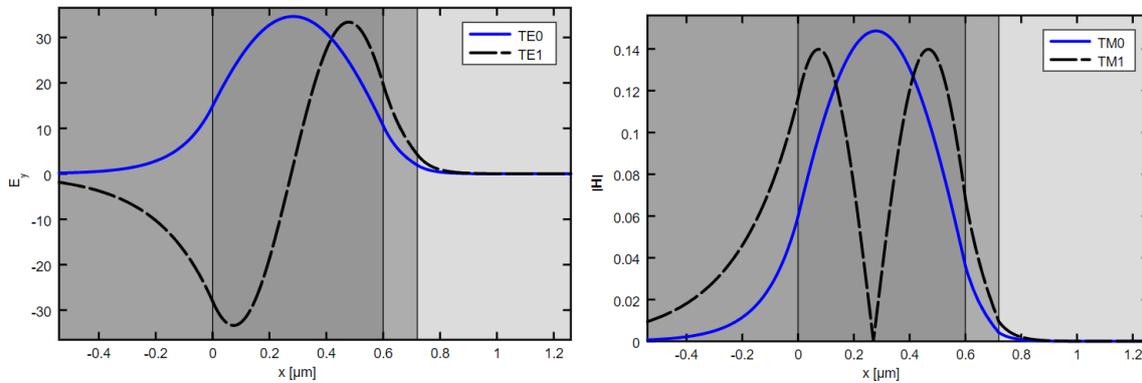
para este sistema, se consideran unas pérdidas del 11,60 % para la intensidad eléctrica y del 10,8 % para el campo magnético. Valores de pérdidas inferiores al caso en el que la longitud de onda de la luz es mayor.

Para el siguiente caso, se estudia la longitud de onda en el borde del visible. Los valores de los parámetros empleados aparecen en la tabla 11

| Parámetro | Valor | Explicación |
|------------------------|--------|---|
| λ | 380nm | Longitud de onda de la luz que se transmitirá en la guía |
| n_{cladding} | 1,3922 | Índice de refracción del material del recubrimiento (gelatina y aire) |
| n_{core} | 1,5890 | Índice de refracción del material de la guía (poliestireno) |
| $n_{\text{substrate}}$ | 1,4875 | Índice de refracción del material del sustrato (cuarzo) |
| w_{slab} | 500nm | Longitud de la guía |
| h_{cladding} | 120nm | Espesor del recubrimiento |
| h_{core} | 600nm | Espesor de la guía |
| $h_{\text{substrate}}$ | 300nm | Espesor del sustrato |

Tabla 11: Parámetros introducidos en la simulación

Las representaciones obtenidas en este caso se hacen visibles en las Figuras 29, 30,31,32,33.



(a) Modo transversal eléctrico en función de la coordenada x (b) Modo transversal magnético en función de la coordenada x

Figura 29: Modos transversales obtenidos con OMS

En este caso, en el que se está considerando una longitud de onda cercana al borde del visible, se observa que se propagan en la guía tanto el modo fundamental como el primer modo excitado. Esto se puede apreciar en las figuras anteriores donde, además de observar los modos transversales, también se puede observar en la simulación de las

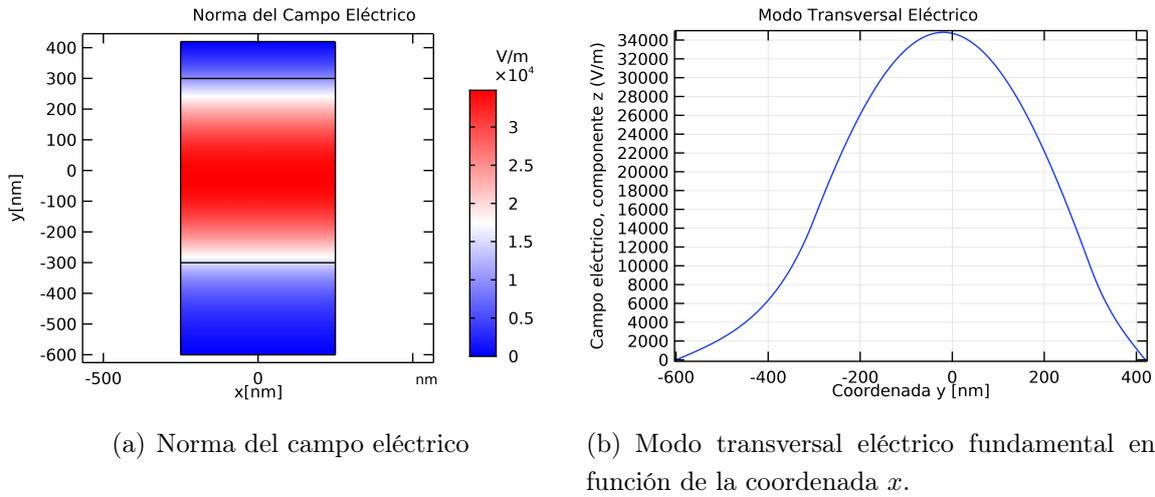


Figura 30: Estudio del campo eléctrico para el modo fundamental en COMSOL Multiphysics

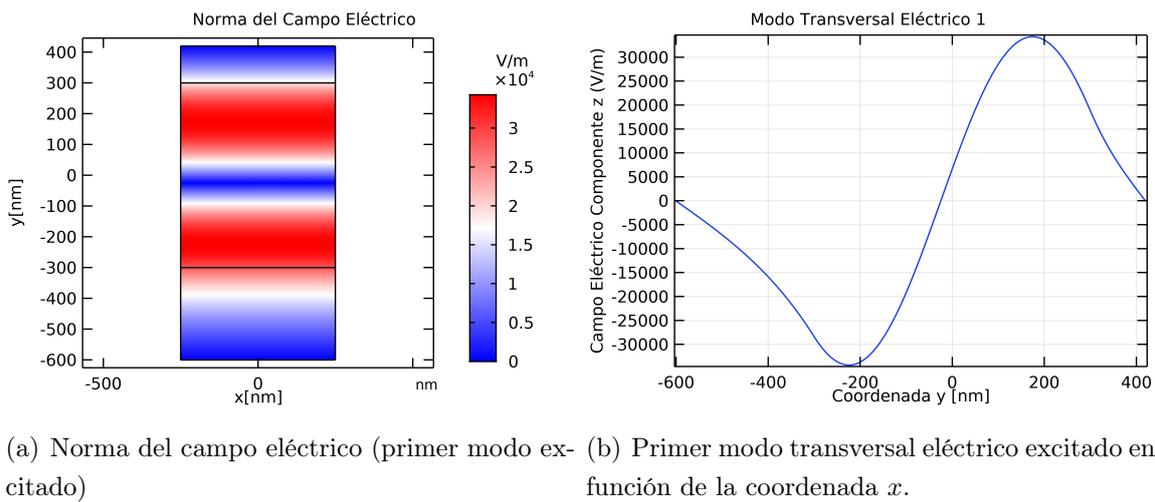
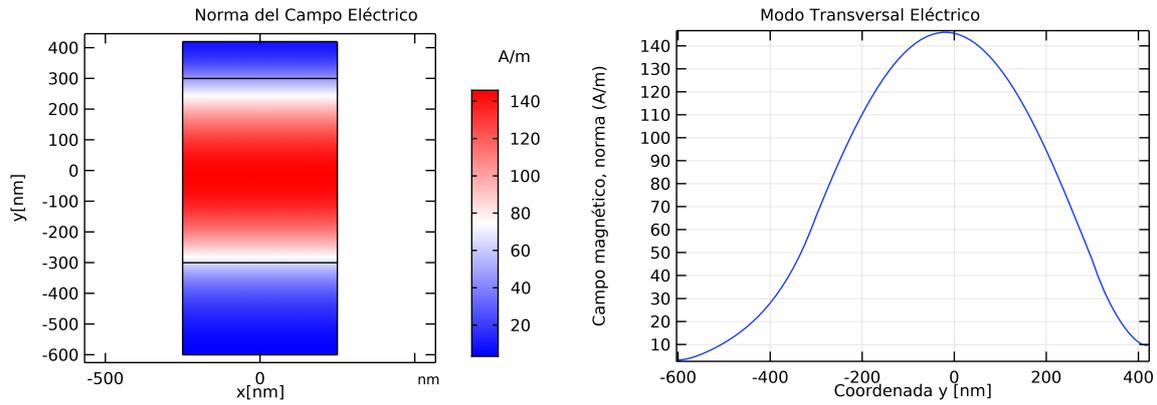


Figura 31: Estudio del campo eléctrico para el primer modo excitado en COMSOL Multiphysics

normas como, para el modo fundamental, se tiene la forma que también era visible en los casos anteriores, donde la cantidad más grande tanto de campo eléctrico como de campo magnético, se encuentra confinada en el núcleo del sistema. Por otra parte, para el primer modo excitado, observamos que este módulo está formado por una alternancia en cuanto a la intensidad de los campos, definida a franjas horizontales.

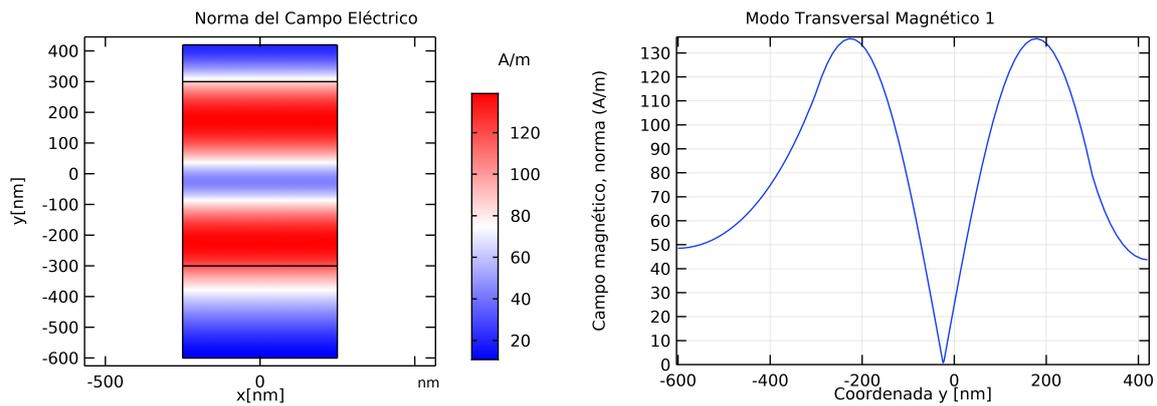
Se analizarán ahora los parámetros que definen estos modos transversales.

En cuanto al modo fundamental, las constantes de propagación tienen los siguientes



(a) Norma del campo magnético (modo fundamental) (b) Modo transversal magnético fundamental en función de la coordenada x .

Figura 32: Estudio del campo magnético para el modo fundamental en *COMSOL Multiphysics*



(a) Norma del campo magnético (primer modo excitado). (b) Primer modo transversal magnético excitado en función de la coordenada x .

Figura 33: Estudio del campo magnético para el primer modo excitado en *COMSOL Multiphysics*

valores: $\beta_{E_0} = 25,97\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_0} = 25,94\mu m^{-1}$. En este caso, estas constantes de propagación serán mayores que en los casos anteriores ya que, recordando la ecuación 47, y despejando β , es fácil observar que esta aumenta de valor al disminuir la longitud de onda λ_0 .

Los valores para el índice de refracción efectivo en este caso tomarán los valores: $N_{eff}^{E_0} = 1,5707$ y $N_{eff}^{H_0} = 1,5691$, valores similares aunque mayores a los obtenidos en el

caso anterior estudiado para este mismo sistema con una longitud de onda mayor (578nm) 15.

Por último, para el modo fundamental, los valores obtenidos para el factor de confinamiento son: $\Gamma_{E_0} = 0,963$ en cuanto al campo eléctrico y, para el campo magnético $\Gamma_{H_0} = 0,969$, es decir un 96,30% para el campo eléctrico y un 96,90% para el campo magnético, con unas pérdidas del 3,60% y el 3,10% respectivamente. Esto es consistente con los resultados obtenidos anteriormente y se vuelve a observar que, a menor longitud de onda, hay mayor intensidad de campo confinada en el núcleo de la guía. Por otra parte, para el primer modo excitado, las constantes de propagación obtendrán los siguientes valores: $\beta_{E_1} = 25,10\mu m^{-1}$ y $\beta_{H_1} = 25,03\mu m^{-1}$, valores que son menores que para el modo fundamental.

El índice de refracción efectivo para estos modos tiene el siguiente valor: $N_{eff}^{E_1} = 1,5181$ y $N_{eff}^{H_1} = 1,5138$, valores que son significativamente menores a los obtenidos para el modo fundamental.

Por último el factor de confinamiento tendrá obtendrá los siguientes valores: $\Gamma_{E_1} = 0,808$, $\Gamma_{H_1} = 0,809$, es decir, un confinamiento del 80,80% para el caso del campo eléctrico, y de un 80,90% para el campo magnético. Lo que se traduce en unas pérdidas del 19,20% y del 19,10% respectivamente. Por tanto, se observa que para modos excitados se tiene una mayor pérdida de intensidad de campo en el interior de la guía. En la conclusión de este informe se discute a qué se debe este fenómeno.

6. Conclusión

En este informe se ha llevado a cabo un análisis detallado sobre el comportamiento de la luz en guías de onda con material dieléctrico. Para ello se ha introducido el fundamento teórico entendiendo así de forma concisa la física que existe detrás del fenómeno de onda guiada, se han explicado y obtenido las ecuaciones de onda que rigen el comportamiento de la luz, tanto para medios inhomogéneos como para guías planas y se han obtenido los modos guiados y los modos de radiación tanto para los modos transversales eléctricos como magnéticos.

En cuanto a los softwares computacionales, se ha hecho incapié en la importancia de estos para realizar estudios y comprender fenómenos físicos que quizá observandolos de forma teórica y experimental no son triviales, pero, con la ayuda de una simulación se facilita mucho más su entendimiento.

Para estudiar de forma mejor el comportamiento de las guías se han estudiado los

resultados obtenidos al variar diferentes parámetros. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- **Influencia del tipo de sustrato:** el tipo de sustrato juega un papel crucial en la propagación de la luz. Variar el material del sustrato puede modificar tanto la constante de propagación β como el índice de refracción efectivo (N_{eff}) de los modos guiados. Así, sustratos con un índice de refracción más alto permiten un mayor acoplamiento de luz en la guía y, por lo tanto, promueven un mayor factor de confinamiento. Esto se debe a que un sustrato con un alto índice de refracción reduce la diferencia de índices de refracción entre la guía y el medio circundante, lo que reduce las pérdidas por reflexión y aumenta la eficiencia de acoplamiento.

Además, el tipo de sustrato también puede afectar la distribución espacial de los modos guiados. Por ejemplo, sustratos con una alta permitividad pueden aumentar el campo eléctrico en la región de la guía, lo que resulta en una mayor concentración de energía y, por lo tanto, un factor de confinamiento más alto.

- **Influencia del tipo de recubrimiento:** el tipo de recubrimiento aplicado a la guía de onda también influye significativamente en su comportamiento óptico. Los recubrimientos pueden alterar la distribución del campo eléctrico y magnético alrededor de la guía, lo que impacta directamente en la constante de propagación β , el índice de refracción efectivo (N_{eff}) y el factor de confinamiento de los modos guiados.

Así, como se ha visto anteriormente, un recubrimiento con un alto índice de refracción puede aumentar la diferencia de índices entre la guía y el medio circundante, lo que resulta en una mayor confinamiento de la luz en la guía. Esto se traduce en un aumento del factor de confinamiento de los modos guiados. Por otro lado, un recubrimiento con un índice de refracción más bajo puede disminuir la eficiencia de acoplamiento de luz en la guía y reducir el factor de confinamiento. El espesor y la composición del recubrimiento también afecta a la distribución espacial del campo eléctrico y magnético, lo que influye en la forma y la intensidad de los modos guiados.

- **Influencia del espesor de la guía:** el espesor de la guía de onda es un parámetro crítico que determina el número y tipo de modos guiados que pueden propagarse en la estructura. Variar el espesor de la guía afecta tanto la constante de propagación β como el índice de refracción efectivo (N_{eff}) de los modos guiados.

Guías más delgadas favorecen la propagación monomodal, donde solo el modo fundamental se propaga de manera eficiente. Esto se debe a que un espesor reducido

reduce la propagación de modos superiores y minimiza la dispersión modal. Como resultado, el factor de confinamiento puede ser más alto en guías más delgadas debido a una menor pérdida de energía por modos no deseados.

Por otro lado, guías más gruesas pueden soportar múltiples modos guiados, lo que puede ser beneficioso para aplicaciones que requieren una mayor capacidad de transmisión de información. Sin embargo, la presencia de múltiples modos puede complicar el diseño y la caracterización de la guía, y puede resultar en una menor eficiencia de acoplamiento y un factor de confinamiento más bajo para el modo fundamental.

- **Influencia del índice de refracción de la guía:** el índice de refracción del material que constituye la guía de onda tiene un impacto significativo en su comportamiento óptico. Un material con un alto índice de refracción permite un mayor confinamiento de la luz en la guía, lo que resulta en un factor de confinamiento más alto para los modos guiados. Esto se debe a que una mayor diferencia de índices de refracción entre la guía y el medio circundante reduce las pérdidas por reflexión y aumenta la eficiencia de acoplamiento de luz en la guía.

Por otro lado, un material con un índice de refracción más bajo puede resultar en una menor eficiencia de acoplamiento de luz en la guía y un factor de confinamiento más bajo para los modos guiados. Esto se traduce en una mayor dispersión y pérdida de energía por modos no deseados, lo que puede afectar negativamente el rendimiento de la guía en aplicaciones prácticas.

- **Influencia de la longitud de onda:** la longitud de onda de la luz impacta directamente en la influencia de la propagación y el confinamiento de los modos guiados en la guía de onda. Las guías de onda pueden exhibir diferentes comportamientos ópticos según la longitud de onda de la luz incidente.

Longitudes de onda más cortas tienden a ser mejor confinadas, lo que resulta en un mayor factor de confinamiento para los modos guiados. Sin embargo, estas longitudes de onda más cortas también pueden sufrir mayores pérdidas por absorción y dispersión en el material de la guía. Por otro lado, longitudes de onda más largas pueden resultar en un menor confinamiento y, por lo tanto, en un factor de confinamiento más bajo para los modos guiados.

- **Influencia de los modos guiados:** en las guías de onda dieléctricas, la constante de propagación β varía según el modo de propagación de la luz. El modo fundamental, que es el modo de menor orden, presenta el valor más alto de β debido a su mayor

confinamiento del campo electromagnético en el núcleo de la guía de onda. Este mayor confinamiento se traduce en un índice de refracción efectivo N_{eff} más alto, ya que la mayoría de la energía del campo se encuentra en una región con un índice de refracción mayor. Por tanto, la relación 47 implica que β será mayor para el modo fundamental.

Por otro lado, los modos excitados (de orden superior) tienen un confinamiento menor en el núcleo y una mayor extensión en el revestimiento y en el sustrato, lo que resulta en un índice de refracción efectivo más bajo. En consecuencia, la constante de propagación β es menor para estos modos. Esta diferencia en los valores de β refleja cómo los diferentes modos interactúan con la estructura y los materiales de la guía de onda [5].

El factor de confinamiento es mayor para el modo fundamental que para los modos excitados. Para el primer modo excitado, parte del campo se extiende más en el revestimiento y sustrato, reduciendo el factor de confinamiento. Esto significa que una fracción menor de la energía del campo se encuentra en el núcleo, lo que resulta en un índice de refracción efectivo menor y, por ende, una constante de propagación β menor en comparación con el modo fundamental.

Por otra parte, en cuanto a los softwares utilizados para el análisis de este Trabajo Fin de Grado, se pueden obtener varias conclusiones. La primera de ellas es que tanto *OMS* como *COMSOL Multiphysics* son herramientas computacionales muy útiles y precisas sobre el estudio de las guías de onda en sistemas multicapa. Como ya se ha detallado en apartados anteriores (ver secciones 4.1y 4.2), el software *OMS* es bastante más limitado que *COMSOL Multiphysics* aunque mucho más sencillo de utilizar y con una interfaz más intuitiva. A pesar de esto, gracias a *OMS* se obtienen conclusiones bastante precisas y muy interesantes sobre el estudio de los modos en guías de onda.

En cuanto a *COMSOL Multiphysics*, es una herramienta mucho más potente y, por tanto, que presenta mayor dificultad a la hora de realizar una simulación. Cabe resaltar que este programa, a diferencia de *OMS*, puede trabajar con muchas otras físicas diferentes y no necesariamente con la óptica. Es así como, este Trabajo Fin de Grado, puede servir como introducción a cualquier ingeniero o científico para intentar modelar, en *COMSOL Multiphysics* la red mostrada en la Figura 13, un proyecto bastante ambicioso pero de gran interés, que ayudaría a la comunidad científica de la *Universidad de Alicante* a entender mejor el comportamiento de este tipo de dispositivo y de esta forma, poder relacionarlo con el interesante contexto de los láseres orgánicos, tanto en el ámbito teórico como en el experimental.

También es importante resaltar la relación de la investigación llevada a cabo en este Trabajo Fin de Grado con algunas asignaturas del Grado en Física, como son *electromagnetismo I*, *electromagnetismo II*, *óptica I*, *óptica II* y *fotónica* entre otras, que han aportado los conocimientos necesarios para poder abarcar el estudio realizado.

El último aspecto a tener en cuenta es la importancia de la rama computacional de la física como herramienta poderosa para explorar, validar y entender una amplia gama de fenómenos físicos, fundamental para avanzar en el conocimiento del universo que nos rodea.

7. Anexo

7.1. Condiciones de contorno para guía plana asimétrica de índice homogéneo

Para utilizar las ecuaciones macroscópicas de Maxwell en el análisis de los fenómenos de reflexión y transmisión en una superficie de separación entre dos medios materiales, el enfoque natural consiste en determinar las condiciones que estas ecuaciones imponen a los campos en la frontera entre ambos medios. Como es habitual, se trabaja en el dominio de frecuencias, es decir, con ondas monocromáticas; para tratar las ondas policromáticas, se deben aplicar los resultados a cada componente de Fourier. Por lo tanto, se considera una onda incidente de la forma siguiente:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_\omega(\vec{r})e^{-i\omega t} \quad (51)$$

y será suficiente emplear el vector complejo $\vec{E}_\omega(\vec{r})$. Dado que $\mu \approx 1$, el índice de refracción complejo [22] se expresa como:

$$n_c^2 = \epsilon + \frac{i\sigma}{\epsilon_0\omega} = (n + ik)^2 \quad (52)$$

y las ecuaciones macroscópicas de Maxwell para una componente de Fourier, aplicables en la frontera (tomando $\mu = 1$), son:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (n_c^2 \vec{E}_\omega) &= 0, \\ \nabla \cdot \vec{H}_\omega &= 0, \\ \nabla \times \vec{E}_\omega &= i\omega\mu_0 \vec{H}_\omega, \\ \nabla \times \vec{H}_\omega &= -i\omega\epsilon_0 \left(\epsilon + i\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \right) \vec{E}_\omega, \end{aligned} \quad (53)$$

Considerando dos medios homogéneos, 1 y 2, cuya superficie de separación o frontera es plana. Sea Σ una pequeña superficie auxiliar con forma de rodaja cilíndrica, que encierra un volumen V en la frontera, se asume que el espesor de Σ es mucho menor que su diámetro, y que V es lo suficientemente pequeño como para que el campo varíe muy poco en su interior si no se cambia de medio. Al integrar la primera y segunda expresión de 53 en el volumen V y aplicando el teorema de Gauss, se observa que el flujo a través de Σ de los vectores $n_c^2 \vec{E}_\omega$ y \vec{H}_ω debe ser nulo. Sin embargo, este flujo es esencialmente

el que atraviesa las caras circulares "grandes" de Σ , dado que se asume una frontera lo suficientemente abrupta como para que la cara cilíndrica lateral pueda tender a cero más rápidamente que las bases. Haciendo $\Sigma \rightarrow 0$ y utilizando la segunda expresión de 53, por ejemplo, se puede escribir para \vec{H}_ω :

$$\begin{aligned} \Phi_H = \vec{H}_{\omega,1} \cdot d\vec{S}_1 + \vec{H}_{\omega,2} \cdot d\vec{S}_2 = 0 &\longrightarrow -\vec{H}_{\omega,1} \cdot \vec{u} dS + \vec{H}_{\omega,2} \cdot \vec{u} dS = 0 \\ \vec{H}_{\omega,1} \cdot \vec{u} &= \vec{H}_{\omega,2} \cdot \vec{u}, \end{aligned} \quad (54)$$

donde \vec{u} es el vector unitario perpendicular a la superficie de separación entre los medios, orientado desde el medio 1 hacia el medio 2. Una relación similar a 54 se obtiene para el vector $n_c^2 \vec{H}_\omega$ utilizando la primera expresión de 53. Por lo tanto, las componentes normales a la frontera se mantienen constantes para ambos vectores (son continuas). Así, se puede escribir:

$$H_{\omega,1}^n = H_{\omega,2}^n; \quad n_{1c}^2 E_{\omega,1}^n = n_{2c}^2 E_{\omega,2}^n \quad (55)$$

Al integrar ahora la tercera expresión de 53 alrededor del volumen V y aplicando el teorema de Stokes en su forma gaussiana, se obtiene:

$$\int_V \nabla \times \vec{E}_\omega dV = \int_\Sigma d\vec{S} \times \vec{E}_\omega = i\omega\mu_0 \int_V \vec{H}_\omega dV \quad (56)$$

Esta integral para $V \rightarrow 0$ también tiende a cero. Por tanto:

$$-dS\vec{u} \times \vec{E}_{\omega,1} + dS\vec{u} \times \vec{E}_{\omega,2} = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{E}_{\omega,1} \times \vec{u} = \vec{E}_{\omega,2} \times \vec{u} \quad (57)$$

Y el resultado análogo se adquiriría jntegrando la última expresión de 53. Es decir, se obtiene que las componentes tangenciales de \vec{E}_ω y \vec{H}_ω son iguales a ambos lados de la frontera:

$$E_{\omega,1}^{tg} = E_{\omega,2}^{tg}; \quad H_{\omega,1}^{tg} = H_{\omega,2}^{tg} \quad (58)$$

Las relaciones 55 y 58 representan las condiciones de frontera que deben satisfacer los campos cuando una onda electromagnética se propaga de un medio a otro. Estas relaciones son, por consiguiente, las utilizadas en la sección 3.5.1.

Referencias

- [1] John Wiley Sons. Electromagnetic principles of integrated optics. *New York*, 1986.
- [2] Sigrist M.W. Kneubühl, F.K. Laser. *Springer-Verlag*, 2008.
- [3] Juan José Scala Estalella. El láser: instrumento clave en la ciencia y la tecnología modernas. 2000.
- [4] José Manuel Cabrera, Fernando Agulló-López, and Fernando Jesús López. *Óptica electromagnética: Materiales y aplicaciones*. Addison-Wesley, 2000.
- [5] M. F. Cordero. Análisis de pérdidas en guías de onda ópticas curvas. *Ingeniería y Tecnología*, 23(1):12–18, 2008.
- [6] COMSOL Multiphysics. Introduction to comsol multiphysics®. *COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb*, 9(2018):32, 1998.
- [7] María Ángeles Quintela Incera, Francisco Javier Madruga Saavedra, Mauro Matías Lomer Barboza, José Miguel López Higuera, et al. Estudio de la estabilidad en láseres dfb de fibra monofrecuencia con perfiles no uniformes. 2001.
- [8] J. Sánchez de Rojas and P. Andrés de Llano. *Guías de onda ópticas*. Editorial Reverté, 1997.
- [9] Alejandro Alberto Romero Osnaya. Optical waveguides: quantum-classical analogies= guías ópticas: analogías clásico-cuánticas. 2021.
- [10] L. J. Rivero. Propagación de modos en guías de onda ópticas. *Revista Española de Electrónica*, 34(2):45–50, 2005.
- [11] M. Hammer. 1-D Mode Solver for Dielectric Multilayer Slab Waveguides. <https://www.computational-photonics.eu/oms.html>. Programa de acceso Abierto. Disponible en línea: <https://www.computational-photonics.eu/oms.html>.
- [12] Olgierd Cecil Zienkiewicz. *El método de los elementos finitos*. Reverté, 2010.
- [13] Antonio García and María López. Modeling and simulation of optical waveguides using comsol multiphysics. *Revista de Simulación Computacional*, 9:35–48, 2021.
- [14] Javier Martín and Laura Gómez. Simulation of optical waveguides using optiftd. *Revista Iberoamericana de Óptica*, 12:56–64, 2019.

-
- [15] G. Ghosh. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. *Optics Communications*, 163(1-3):95–102, 1999.
- [16] Eder Germán Lizarraga Medina. Estudio de guías de onda ópticas de siox. 2016.
- [17] Antonio Quintela Incera, Daniel Aquilino González Fernández, Olga María Conde Portilla, SW James, José Miguel López Higuera, et al. Medida del índice de refracción de un medio externo mediante redes de difracción de periodo largo en fibra óptica. 2003.
- [18] Víctor Bonal Díaz. *Thin film organic lasers with polymeric resonators*. PhD thesis, Universitat d’Alacant/Universidad de Alicante, 2022.
- [19] Jose C Mira-Martínez. Endurecimiento de resonadores difractivos de gelatina dicromatada. 2022.
- [20] Azzedine Boudrioua, Mahmoud Chakaroun, and Alexis Fischer. *Una introducción a los láseres orgánicos*. ISTE Group, 2020.
- [21] Manuel G Ramírez, Justin P Jahnke, Matthias JN Junk, José M Villalvilla, Pedro G Boj, José A Quintana, Eva M Calzado, Bradley F Chmelka, and María A Díaz-García. Improved amplified spontaneous emission of dye-doped functionalized mesostructured silica waveguide films. *Advanced Optical Materials*, 3(10):1454–1461, 2015.
- [22] Juan Carlos Gonzalez Gonzalez, César Augusto Chung Chang, and Carlos León. Medida del índice de refracción complejo y de la banda de energía prohibida del semiconductor cdse. *Revista de Investigación de Física*, 3(01-02):17–23.
- [23] Juan Diego Serna and otros. *Guías de onda ópticas y dispositivos fotónicos*. Editorial Universidad de Granada, 2004.
- [24] Jesús M. Corres. *Tecnologías fotónicas y óptica integrada*. Editorial Universidad Pública de Navarra, 2008.