

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



TESIS:

**“DISEÑO DE INTERFERÓMETROS MULTIMODALES SEGMENTADOS COMO
DIVISORES DE POTENCIA FOTÓNICOS Y SU POTENCIAL APLICACIÓN EN
AGRICULTURA DE PRECISIÓN”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN TELECOMUNICACIONES**

ELABORADO POR:

JORHDAN JEFFERSON SAAVEDRA PAREDES

ASESORA:

Dra. RUTH ESTHER RUBIO NORIEGA

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A Dios, a la Virgencita de Guadalupe, por haberme acompañado y guiado en el desarrollo a lo largo de todos mis estudios de mi Maestría, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mi papito Jaime y a mi mamita Anita que siempre me han apoyado en todo, con su tiempo, amor y sus consejos, todo es posible con su ayuda incondicional.

A mis hermanitos Jaime y Katherine por ser parte importante de mi vida y representar ese apoyo familiar que siempre estará presente, para mí.

A mis abuelitos Carmen, Rodolfo(QEPD) y Avelino(QEPD) que siempre han sido mi ejemplo a seguir como persona por sus bondades y virtudes que poseen y me ha servido para ser una mejor persona tanto en lo personal como en lo profesional.

A mis mascotas Draco, Brando e Ikita que siempre me brindaron momentos inolvidables en días claves.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a mi asesora la Dra. Ruth Esther Rubio Noriega, por sus consejos y por el apoyo brindado de manera constante, los cuales han sido de mucha ayuda para alcanzar los objetivos y desarrollo de mi tesis. Además, con su guía y conocimiento ha permitido poder concretar la formación de este trabajo.

Un reconocido agradecimiento a CONCYTECPROCIENCIA, proyecto del contrato N° 097-2018-FONDECYT- BM, por su apoyo brindado en el desarrollo de la presente investigación, siendo posible lograr alcanzar los objetivos trazados.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes bibliográficos	3
1.2. Descripción de la Realidad Problemática.....	6
1.3. Formulación del Problema	7
1.4. Justificación e importancia de la investigación	8
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo general.....	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. Hipótesis.....	8
1.7. Variables e indicadores.....	9
1.7.1. Variable independiente	9
1.7.2. Variable dependiente.....	9
1.7.3. Indicadores.....	9
1.8. Unidad de análisis.....	9
1.9. Tipo y nivel de investigación	9
1.9.1. Tipo de investigación	9
1.9.2. Nivel de investigación	9
1.10. Periodo de análisis.....	10
1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados	10
1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos	10
CAPITULO II	11
MARCO TEORICO Y MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.1. Ecuaciones de Maxwell	11
2.1.1. Ecuaciones de Maxwell en la frecuencia	11
2.1.2. Ecuación de onda de la forma de Helmholtz.....	12
2.1.3. Condiciones de frontera.....	13
2.1.4. Materiales.....	14
2.1.4.1. Silicio	14
2.1.4.2. Óxido de silicio	16

2.2.	Análisis modal de guías de onda continuas – CWG.....	17
2.3.	Análisis modal de guías de onda segmentadas - SWG	17
2.3.1.	Cristal periódico en una dimensión	17
2.3.2.	Célula fundamental.....	19
2.3.3.	Campo eléctrico e índice efectivo	21
2.3.4.	Ecuaciones de índice equivalente de Rytov.....	21
2.4.	Factores que influyen en la pérdida de potencia.....	22
CAPITULO III.....		24
DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS		24
3.1.	Configuración de simulación de análisis modal CWG	24
3.2.	Configuración de simulación de análisis modal SWG	27
3.3.	Comparación entre CWG Y SWG	30
3.4.	Configuración de simulación para estudios de propagación.....	33
3.5.	Interferómetro multimodal CWG.....	35
3.6.	Interferómetro multimodal SWG.....	41
3.7.	<i>Design Rule Check</i> para fabricación compatible con CMOS.....	49
CAPITULO IV		51
ANALISIS Y RESULTADOS		51
4.1.	Análisis modal del SWG	51
4.1.1.	Campo Eléctrico	52
4.1.2.	Dispersión	52
4.2.	Interferómetros multimodales segmentados como divisores de potencia....	54
4.2.3.	Análisis modal SWG multimodo.....	59
4.2.4.	Conversión de CWG a SWG	59
4.2.5.	Divisor de potencia 1x2	59
4.2.5.1.	Divisor de potencia 1x2 CWG.....	59
4.2.5.2.	Divisor de potencia 1x2 SWG	62
4.2.6.	Divisor de potencia 1x4	63
4.2.6.1.	Divisor De Potencia 1x4 CWG.....	63
4.3.	Factibilidad de fabricación	67
4.3.1.	<i>Design Rule Check</i> aplicado a los dispositivos SWG.....	67
4.3.2.	Litografía Por Radiación Ultra Violeta Profunda.....	67
4.4.	Aplicación de SWG para el diseño de filtros ópticos	68
4.4.1.	Propuesta del diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (LW) en las plantas de palto.....	70
4.4.2.	Bandas para detección de las enfermedades en imágenes de hojas.....	71

4.4.3.	Análisis modal y bandas de detección	73
4.4.4.	Diseño de filtros segmentados.....	74
4.4.5.	Resultados y aplicación en sistema	78
CONCLUSIONES		83
RECOMENDACIONES.....		85
BIBLIOGRAFÍA.....		87
ANEXOS.....		92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	comparación entre los aportes de los antecedentes seleccionados.....	6
Tabla 3.1	valores que definen el valor máximo y mínimo para iniciar la optimización del ancho del polígono del interferómetro <i>Y-branch</i>	38
Tabla 3.2	relación de los vértices con su posición XY, respecto a su origen de coordenadas.....	40
Tabla 3.3	valor final de los vértices de los 10 polígonos que forman la parte central del interferómetro <i>SWG MMI 1x2</i> respecto a su posición de origen.....	44
Tabla 3.4	valores máximos y mínimos del dutty cycle para iniciar la optimización de los polígonos que forman la parte central del interferómetro <i>SWG MMI 1x2</i>	48
Tabla 3.5	valores máximos y mínimos del ancho de los 10 polígonos que forman la parte central del interferómetro para iniciar la optimización.....	48
Tabla 4.1	comparación de las 03 estructuras de <i>MMI</i> [53].....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1	índice de refracción real del silicio	15
Figura 2.2	índice de refracción real e imaginario del silicio	15
Figura 2.3	coeficiente de absorción del silicio	16
Figura 2.4	índice de refracción del óxido de silicio.....	16
Figura 2.5	condiciones de Bragg [10].	18
Figura 2.6	distribución del campo eléctrico del modo quasi TE	19
Figura 2.7	célula fundamental de la guías de onda segmentadas	20
Figura 2.8	representación gráfica de la variación del índice de refracción, paralela a la dirección de propagación del vector kx de campo.	22
Figura 3.1	sección longitudinal de la plataforma silicio sobre aislante (SOI) con una guía de onda CWG	25
Figura 3.2	análisis modal del CWG	26
Figura 3.3	estructura de un (CWG).....	27
Figura 3.4	guía de onda segmentada SWG , con 01 dipolo eléctrico ubicado de forma de forma paralela al eje y , funcionando como una fuente local en el diseño.....	28
Figura 3.5	modo resonante TE de la componente del campo eléctrico (E_y) en una longitud de onda de $1.0 \mu m$	29
Figura 3.6	guía de onda segmentada SWG , con 01 dipolo magnético ubicado de forma paralela al eje y , funcionando como una fuente local en el diseño.....	29
Figura 3.7	modo resonante TM de la componente del campo eléctrico (E_y) en una longitud de onda de $1.0 \mu m$, con un campo evanescente en el eje Z	30
Figura 3.8	comparación entre la estructura de una guía de onda continua CWG y una guía de onda segmentada SWG , donde la sección a , c y e pertenecen a un guía de onda continua y la sección b , d y f pertenecen a una guía de onda segmentada.....	31

Figura 3.9	intensidad del campo eléctrico normalizado de una guía de onda continua CWG vs el de una guía de onda segmentada SWG	32
Figura 3.10	dispersión de la transmitancia en relación a la frecuencia óptica de una guía de onda continua CWG (a) con una guía de onda segmentada SWG (b).	33
Figura 3.11	dispersión del campo eléctrico a lo largo del diseño y de la potencia guiada.....	35
Figura 3.12	diseño de un interferómetro multimodo continuo CWG de 01 entrada y 02 salidas.....	36
Figura 3.13	diseño de un interferómetro multimodo continuo CWG de 01 entrada y 04 salidas.....	36
Figura 3.14	estructura del diseño del Interferómetro <i>Y-branch</i> con una guía de onda CWG con una (1) entrada con dos (2) salidas.....	37
Figura 3.15	diseño de la optimización del Interferómetro <i>Y-branch</i> basado en un <i>MMI</i> en una guía de onda CWG con una (1) entrada con dos (2) salidas.....	39
Figura 3.16	estructura del diseño del interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda CWG con una (1) entrada con cuatro (4) salidas.	39
Figura 3.17	diseño de la geometría inicial del Interferómetro multimodal de guías de onda CWG con una (1) entrada con cuatro (4) salidas, mostrando los monitores donde se tomaron datos del campo eléctrico resultante del análisis.....	41
Figura 3.18	diseño de un Interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada (E_1) y 02 salidas (S_1 y S_2)	42
Figura 3.19	diseño de un interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas.....	43
Figura 3.20	polígono central descrito en la figura 3.19 del diseño de un interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas, con los anchos respectivos: $w_1, w_3, w_5, w_7, w_9, w_{11}, w_{13}, w_{15}, w_{17}, w_{19}$, la posición de sus vértices y origen respectivos, tal como se describió en la Tabla 3.3.	46
Figura 3.21	curva de Bézier aplicado en los brazos del interferómetro <i>MMI</i> SWG 1X2.....	47
Figura 3.22	diseño de un interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas.....	49
Figura 4.1	análisis del diseño del filtro en un guía de onda SWG	52
Figura 4.2	diagrama esquemático de dispersión.	53
Figura 4.3	variación del número de onda, k , con resultado de los modos TE, TM y orden superior.....	53
Figura 4.4	diseño de un divisor de potencia <i>Y-branch</i>	54

Figura 4.5	configuración esquemática de un <i>MMI</i> [34].	56
Figura 4.6	representación bidimensional de un <i>MMI</i> [34].	57
Figura 4.7	interferómetro <i>Y-branch</i> basado en un <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG</i> con una (1) entrada con dos (2) salidas.	60
Figura 4.8	distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro forma <i>Y-branch</i> basado en un <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG-1x2</i> .	61
Figura 4.9	periodicidad de la parte central del interferómetro forma <i>Y-branch</i> basado en un <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG-1x2</i> .	61
Figura 4.10	transmitancia en la primera salida y segunda salida del interferómetro forma <i>Y-branch</i> basado en un <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG</i> .	62
Figura 4.11	interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>SWG</i> con una (1) entrada con dos (2) salidas.	63
Figura 4.12	interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG</i> con una (1) entrada con dos (4) salidas.	64
Figura 4.13	distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG-1x4</i> .	64
Figura 4.14	periodicidad de la parte central de un interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG-1x4</i> .	65
Figura 4.15	transmitancia en las cuatro (4) salidas del interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>CWG-1x4</i> .	66
Figura 4.16	diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (LW).	70
Figura 4.17	propuesta del diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (LW) en las plantas de palto.	71
Figura 4.18	hojas de la planta de palto en sus diversas fases [1].	72
Figura 4.19	reflectancia de diferentes etapas de la enfermedad del marchitamiento del Laurel y de hojas sanas (control) [1].	72
Figura 4.20	diseño de filtro que selecciona las longitudes de onda infrarrojas de la enfermedad de <i>LW</i> usando <i>SWG</i> .	73
Figura 4.21	integración sobre una plataforma de sensores para la detención de enfermedades.	75
Figura 4.22	campo eléctrico de las longitudes de onda en la etapa conversión <i>SWG</i> a <i>CWG</i> .	77
Figura 4.23	interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>SWG</i> con una (1) entrada con dos (2) salidas.	78

Figura 4.24 distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>SWG-1x2</i>	78
Figura 4.25 acercamiento de la distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro <i>MMI</i> en una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, <i>SWG-1x2</i>	80
Figura 4.26 diseño propuesto y detalle de la parte central del interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>SWG-1x2</i>	81
Figura 4.27 transmitancia en la primera salida y segunda salida del interferómetro <i>MMI</i> en una guía de onda <i>SWG</i>	82

RESUMEN

El interferómetro multimodal es usado ampliamente en las comunicaciones ópticas para el diseño de divisores de potencia. Estos pueden ser usados para el monitoreo de señales o para la alimentación de dispositivos ópticos activos. Su fabricación muchas veces requiere de técnicas avanzadas y de alta precisión, por lo que es necesario un método de diseño simple, usando cristales periódicos en una sola dimensión. Este trabajo de tesis tiene como finalidad mejorar el desempeño de un interferómetro multimodal segmentado para uso en primer lugar en comunicaciones ópticas y potencialmente en la agricultura de precisión. Para lograr este objetivo, se plantea controlar el ancho de banda de los dispositivos estudiando los modos de Floquet-Bloch. Se usará un software de modelado numérico para el diseño de los dispositivos, y se incluirán restricciones para la fabricación en masa por medio de técnicas CMOS.

ABSTRACT

The multimodal interferometer is widely used in optical communications for the design of power dividers. These can be used for signal monitoring or for active optical devices power repartition. Its manufacture often requires advanced techniques and high precision, so a simple design method is still relevant in photonics, for example, using periodic crystals in one dimension. This thesis aims to improve the performance of a segmented multimodal interferometer used mainly in optical communications and potentially in precision agriculture. To achieve this goal, the bandwidth of the periodic devices is controlled by means of the Floquet-Bloch modes. Numerical modeling software is used for the design of the devices, and constraints for mass manufacturing using CMOS techniques are included.

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones van evolucionando rápidamente y cada día es necesario tener alternativas que ayuden a cubrir todas las necesidades de los usuarios, que aumentan con el pasar de los años. Esto conlleva una mayor velocidad y un mayor ancho de banda de los dispositivos de comunicaciones. El uso de fibra óptica permite un aumento significativo en las capacidades de las redes de comunicaciones, debido a su gran capacidad de transmisión y al amplio ancho de banda que ofrece. Sin embargo, la capacidad de la fibra óptica no aumenta directamente la capacidad del enlace; los dispositivos fotónicos, como los láseres y los fotodetectores de alta capacidad, hacen esto factible. Para interconectar transceptores ópticos formados por dispositivos fotónicos de alto rendimiento, se usan muchas guías de onda integradas. Entre los dispositivos formados por guías de onda, el más común y que ocupa más espacio en el chip es el divisor de potencia.

Esta tesis de maestría está basada en el diseño de un interferómetro multimodal con dos (02) salidas y con un gran ancho de banda óptico, que soporta una gran velocidad de transmisión y una baja pérdida de potencia en frecuencias de comunicaciones ópticas. La fotónica integrada se fundamenta en el diseño y fabricación de dispositivos pasivos. La fotónica de silicio ha demostrado ser una plataforma de materiales que permite la integración de varios dispositivos y el uso de procesos de fabricación que posibilitan su producción en masa

El objetivo del trabajo es diseñar un interferómetro multimodal segmentado donde se propaguen modos de Floquet-Bloch de amplio ancho de banda en las frecuencias de comunicaciones ópticas, para la implementación de circuitos fotónicos integrados en una plataforma fotónica de silicio. Para este propósito, se utilizaron técnicas de optimización lineal para apoyar el diseño. El uso de estas técnicas para la optimización de dispositivos basados en modos de Floquet-Bloch tiene muy poca o ninguna popularidad en el estado del arte. Sin embargo, en este trabajo demostramos que es posible mejorar los diseños utilizando este método.

El capítulo I comprende los antecedentes de las diversas investigaciones realizadas a lo largo del comportamiento de la interferometría en las comunicaciones ópticas. Estos trabajos están basados en el comportamiento de un haz de luz, guías de ondas

segmentadas, no segmentadas y divisores de luz, con un avance significativo en su ancho de banda y en su capacidad de transmisión.

El capítulo II comprende nociones teóricas esenciales sobre fotónica, para una mayor comprensión de este trabajo, tales como: ecuaciones de Maxwell, condiciones de frontera, materiales, análisis modal de Guías de Ondas Continuas (CWG), así como también de las Guías de Ondas Segmentadas-SWG en la plataforma de silicio, ecuaciones de dispersión, campo eléctrico e índice efectivo.

El capítulo III comprende la metodología del trabajo de tesis, donde se verá la configuración de simulación del análisis modal CWG, del análisis modal SWG, se hará una comparación de las mismas, se realizará una simulación de propagación, mostrando los resultados esperados para el diseño del interferómetro multimodal segmentado (SWG) en una plataforma fotónica de silicio. Así mismo, se presenta el método Design Rule Check (DRC) para una fabricación compatible con CMOS.

El capítulo IV contiene los resultados del trabajo de investigación, comprende el análisis modal de una guía segmentada como un filtro con la finalidad de ser aplicado en la agricultura de alta precisión. En este capítulo estudiamos el análisis espectral de la enfermedad del Marchitamiento de Laurel sobre las hojas de palto, encontrando que las longitudes de onda relevantes se encuentran dentro del rango del infrarrojo cercano. Posteriormente, proponemos diseñar guías de ondas segmentadas que permitan que la luz pase en la banda deseada donde se analiza el Marchitamiento de Laurel, y sea rechazada en las bandas que no son relevantes. Además, este capítulo comprende el análisis de las mediciones objetivas y subjetivas de la simulación de los interferómetros multimodales segmentados como divisores de potencia. También comprende un análisis modal SWG, donde se revisará la conversión de un CWG a SWG. En este capítulo, se realizará el diseño y se verá el comportamiento del campo eléctrico de un interferómetro continuo y un interferómetro multimodal segmentado, con el fin de desarrollar nuestra metodología y así verificar la hipótesis.

Finalmente, la tesis tendrá conclusiones y recomendaciones que servirán para investigaciones posteriores.

CAPITULO I

ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes bibliográficos

El avance progresivo de las telecomunicaciones hace necesario tener alternativas que ayuden a cubrir todas las necesidades que aumentan con el tiempo, lo que demanda una mayor velocidad y, por tanto, un mayor ancho de banda de los dispositivos que son parte del sistema de comunicaciones por fibra óptica. La integración de una mayor cantidad de dispositivos ópticos con varias funcionalidades conduce a un menor consumo energético y a la producción de subsistemas compactos que puedan suplir estas demandas de ancho de banda. En la búsqueda de dispositivos compactos y con bajo consumo energético para comunicaciones ópticas, se definen los dispositivos pasivos y activos. Dentro de los dispositivos pasivos, el dispositivo más usado en circuitos fotónicos integrados es el divisor de potencia y el segundo es el filtro. En este sentido, varios autores proponen dispositivos que combinan ambas funcionalidades usando guías de onda de geometrías complejas.

Cheben et al. [10] demostraron que para diseñar el índice de refracción en guías de ondas microfotónicas, se debe hacer uso de guías de onda en formato de rejilla con un periodo menor a una longitud de onda (SWG), entre ellos, la utilización de componentes como acopladores de entrada y circuitos multiplexadores. Mencionaron que esta técnica permitiría tener un control directo del confinamiento del modo, simplemente cambiando el índice de refracción equivalente sin necesidad de cambiar la plataforma de los materiales. Dentro de sus aplicaciones, mostraron un acoplador fibra-chip con una pérdida de acoplamiento tan pequeña como -0.9 dB y con una dependencia de longitud de onda mínima. Consiguieron fabricar y medir un ancho de banda de operación de 170nm para un tamaño de dispositivo de solo $\sim 160 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$.

Halir et al. [28] diseñaron un dispositivo divisor de potencia 3 veces más compacto que el presentado en [10]. Este dispositivo presenta un ancho de banda de 500 nm, haciéndolo superior a todas las bandas de comunicaciones ópticas. Esta solución, basada en guías de onda de geometrías complejas, constituye el dispositivo de fotónica de silicio de banda más ancha, haciéndolo candidato para su operación en la fotónica integrada de próxima generación. También mencionan diversas aplicaciones de los divisores de haz nanofotónicos, las cuales son fundamentales para la construcción de bloques de óptica

integrada, que van desde receptores de telecomunicaciones de alta velocidad hasta sensores biológicos y cuánticos. Los autores señalan que, a pesar de que se han desarrollado diversas demostraciones del uso de acopladores de interferencia multimodo, el ancho de banda de operación sigue siendo fundamentalmente limitado. Por lo tanto, aumentar el ancho de banda de los divisores de haz de luz sigue siendo un problema relevante en la fotónica de silicio.

Li et al. [36] propusieron un diseño de divisor de potencia con muy pocas pérdidas para las comunicaciones ópticas, utilizando el tipo de rama "Y". El diseño optimiza el rendimiento tradicional del divisor de potencia. Los autores indican que la mejora del diseño se debe a la selección deliberada de las propiedades físicas, como los modos fundamentales, los cuales son evaluados durante todo el proceso de diseño del dispositivo, logrando así un mejor desempeño. Diseñaron un dispositivo de $6\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$, con una pérdida de 0.4 dB, todo desarrollado con la tecnología de silicio sobre aislante. La tecnología de silicio sobre aislante es una de las más transparentes en frecuencias de comunicaciones ópticas y una de las que permiten realizar dispositivos más compactos.

Wang, J., et al. [61], diseñaron un interferómetro multimodal en guías de ondas plasmónicas híbridas (oscilaciones vinculadas y combinadas con los electrones libres), utilizando silicio y óxido de silicio como materiales en una estructura de rama "Y". En este diseño, los autores hicieron uso del método 3D de dominio de tiempo de diferencias finitas. Este método numérico es adecuado para analizar dispositivos fotónicos de geometrías complejas en coordenadas cartesianas. Los autores presentaron un divisor de potencia multimodal 50:50, logrando diseñar dos modelos: (i) el diseño de un interferómetro multimodal 1×2 con un tamaño a escala nanométrica de solo $650\ \text{nm} \times 530\ \text{nm}$, con un divisor de potencia de rama "Y" de $900\ \text{nm} \times 600\ \text{nm}$ y una pérdida de 0.46 decibelios. (ii) interferómetro multimodal 1×4 con un divisor de potencia de rama "Y" en cascada con dimensiones de $1.9\ \mu\text{m} \times 2.6\ \mu\text{m}$.

Prosopio-Galarza, R., et al. [49], realizaron una comparación de diversas técnicas de optimización para dispositivos "Y". Diseñaron un divisor de potencia con materiales de silicio y óxido de silicio, con un área de $2.56\ \mu\text{m}^2$ y pérdidas de 0.17 dB. Para obtener sus dispositivos, utilizaron técnicas de optimización lineal, que incluyeron Particle Swarm Optimization, el algoritmo Shrinking Box y Steepest Ascent. Lograron demostrar valores de baja pérdida e independencia de la longitud de onda; la transmitancia de su divisor de potencia alcanzó un 49%, mientras que, en el diseño de su combinador, la transmitancia

alcanzó un 96%. Todos los diseños propuestos fueron desarrollados en una plataforma de silicio sobre aislante.

Juan, M., et al. [33], mejoraron el diseño para dispositivos "Y" utilizando el algoritmo Particle Swarm Optimization, todo sobre las fundiciones fotónicas de silicio, diseñando uniones "Y" más factibles para una producción en masa. Los autores lograron obtener transmitancias superiores al 49%, con respuesta de frecuencia dentro de las bandas de comunicaciones SCL. Diseñaron un dispositivo con un tamaño mínimo de 220 nm, con 2 μm de espesor en su sustrato y un núcleo con un espesor de 0.22 μm . Utilizaron los materiales silicio y óxido de silicio, además de 500 nm de ancho para las entradas y salidas de su MMI. La longitud del MMI fue de 2 μm . Mencionan que usaron siete (07) divisores en función del número de segmentos, siendo la medida total del divisor de 2 μm , con un número total de segmentos que variaba de 9 a 15. Comentan que el dispositivo fue desarrollado para ser factible de fabricar utilizando litografía UV de 93 nm, con el estándar de procedimiento Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS).

Luego de haber revisado nuestros antecedentes, en el presente trabajo de tesis nos enfocaremos en diseñar un interferómetro multimodo segmentado, debido a que ha demostrado ser un dispositivo de banda ancha eficiente para aplicaciones de comunicaciones ópticas. La geometría periódica permite una potencial aplicación de filtrado adicional además de la división de potencia.

En el caso de los divisores de potencia, se muestra el estado del arte en función de los parámetros más destacados de los diseños (véase Tabla 1.1): (i) área en chip, (ii) pérdidas, (iii) tipo de fabricación realizada o factibilidad de fabricación. Se observa que los divisores de potencia segmentados actuales [10] se encuentran entre los dispositivos con mayores pérdidas y mayor área. Este trabajo pretende proponer estructuras que utilicen optimización lineal para disminuir el área, aumentar el ancho de banda y reducir las pérdidas totales. Asimismo, se incluye un análisis de la factibilidad de fabricación usando litografía ultravioleta.

Tabla 1.1 Comparación entre los aportes de los antecedentes seleccionados.

Investigaciones	Área en el chip	Pérdidas	Tecnología para su fabricación
Cheben et al. [10]	160 μm \times 10 μm	-0.9 db	Electron-Beam Lithography 1.6
Halir et al. [28]	<1 db	Electron-Beam Lithography
Li et al. [36]	6 μm \times 12.5 μm	0.4 db	SOI
Wang, J., et al. [61]	0.9 μm \times 0.6 μm	0.46 db
Prosopio-Galarza, R., et al. [49]	2.56 μm^2	0.17 db	SOI
Juan, M., et al. [33],	2 μm \times 0.22 μm 500 nm de ancho de entrada y salida – MMI 2 μm – MMI	Electron-Beam Lithography / CMOS

En este trabajo se propone diseñar un interferómetro multimodal [5] de guías de ondas segmentadas [10] con un ancho de banda superior o igual a 100 nm en frecuencias de comunicaciones ópticas, específicamente en las bandas S, C y L de las comunicaciones ópticas, que corresponden aproximadamente a 1460 nm a 1625 nm. Para ello, se utilizarán los modos de Floquet-Bloch y simulaciones de su comportamiento predichos mediante diferencias finitas, todo esto sobre una plataforma fotónica de silicio. Posteriormente, se realizará un análisis sobre la factibilidad de fabricación utilizando procesos de Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) y litografía profunda con rayos ultravioleta (UV). Adicionalmente, se propone el uso de guías SWG como filtros con potenciales aplicaciones en la captura de luz en frecuencias del infrarrojo cercano para la detección de enfermedades en plantas. Para ejemplificar esto, se utiliza el estado del arte obtenido del análisis de enfermedades en el palto.

1.2. Descripción de la Realidad Problemática

La fotónica de silicio surgió en el año 1980 como una tecnología disruptiva, revolucionando una serie de áreas como los centros de datos para computación de alto desempeño. La principal fortaleza de la fotónica de silicio es su capacidad para fabricarse en compatibilidad con los procesos CMOS, lo que permite una producción de alto volumen a bajo costo, llevando así la fotónica a una variedad de áreas tecnológicas [59]. El núcleo de estas estructuras es el silicio, con un índice de refracción de $n_{\text{Si}} = 3.4757$ [27], mientras que el recubrimiento es de óxido de silicio, conocido como cladding (SiO_2), con un índice de refracción de $n_{\text{SiO}_2} = 1.4431$, para una longitud de onda de $\lambda = 1550$ nm. El alto contraste hace que los dispositivos sean más compactos [59].

En una guía de onda continua a lo largo de la dirección de propagación, existe apenas 1 grado de libertad, el cual se restringe al tamaño del núcleo (450 nm x 220 nm) para la transmisión de un solo modo [28]. Los dispositivos periódicamente segmentados con un periodo mucho menor a la longitud de onda nos permiten tener un grado más de libertad: su periodicidad. Este grado de libertad permite realizar una ingeniería del índice de refracción [10]. Sin embargo, actualmente, estos dispositivos [10] necesitan ser fabricados utilizando máquinas de litografía de alta resolución (< 10 nm), como la Litografía de Haz de Electrones [58], lo que hace que estos dispositivos [3, 4, 5] no estén preparados para su producción en masa. Las estructuras SWG ofrecen la posibilidad de diseñar localmente el índice de refracción equivalente y la dispersión en frecuencias de comunicaciones ópticas. Con un modelado adecuado, estas estructuras pueden emplearse para diseñar y fabricar dispositivos ópticos integrados, como los interferómetros multimodo (MMI), que son bloques funcionales para construir divisores de potencia en cualquier etapa de un sistema de comunicaciones ópticas [48].

El objetivo de esta tesis es diseñar y analizar la factibilidad de fabricación de un dispositivo MMI segmentado con al menos dos (02) salidas que sea realizable con tecnologías de fabricación CMOS y litografía UV profunda [4]. Utilizando las restricciones de diseño, se busca demostrar la viabilidad de los dispositivos propuestos en este trabajo. Para este propósito, se utilizará el análisis modal tridimensional y se obtendrá la dispersión en frecuencia en longitudes de onda de comunicaciones ópticas. Posteriormente, se propondrá un divisor de potencia basado en un MMI con suficiente ancho de banda para soportar las ventanas de comunicaciones ópticas. Adicionalmente, se propone un filtro basado en guías de onda SWG para aplicación en el sensoramiento del infrarrojo cercano, con el fin de detectar enfermedades de plantas que muestran variación en la reflexión en dicha ventana de frecuencia.

1.3. Formulación del Problema

En la presente tesis se busca dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿En qué medida los guías de onda segmentados que propagan los modos de Floquet-Bloch permiten mejorar el balance, la pérdida y el ancho de banda de los divisores de potencia basados en interferómetros multimodales, adicionando 01 grado de libertad al diseño de dispositivos pasivos en fotónica de silicio?

1.4. Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justifica desde el punto de vista académico, dado que se propone elevar el diseño de los dispositivos fotónicos pasivos compactos, definidos en la plataforma de silicio sobre aislante, por medio de la inclusión de un grado más de libertad en el diseño, la periodicidad. Por medio de la periodicidad será posible añadir funcionalidades a las guías de onda integradas, tales como la capacidad de filtrar o de dividir la potencia de manera compacta.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar un guía de onda segmentado donde se propaguen modos de Floquet-Bloch de amplio ancho de banda en las frecuencias de comunicaciones ópticas, con aplicaciones de filtraje y división de potencia óptica, para la implementación de circuitos fotónicos integrados en una plataforma fotónica de silicio.

1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar guías de ondas segmentados que propaguen modos de Floquet-Bloch con aplicaciones en división de potencia y filtraje de la luz en frecuencias de comunicaciones ópticas
- Proponer una aplicación de los guías de onda segmentados en la detección de bandas de frecuencia que caracterizan aspectos típicos de daño en las hojas de las plantas de palto.
- Estudiar los dispositivos integrados fotónicos divisores de potencia basados en interferómetros multimodales continuos.
- Proponer dispositivos divisores de potencia segmentados Particle Swarm Optimization (optimización por enjambre de partículas).

1.6. Hipótesis

El uso de los modos de Floquet-Bloch como soluciones de la ecuación de Helmholtz permitirá diseñar dispositivos fotónicos integrados segmentados añadiendo grados de libertad al diseño de dispositivos pasivos en fotónica de silicio.

1.7. Variables e indicadores

1.7.1. Variable independiente

Modos De Floquet-Bloch Como Soluciones De La Ecuación De Helmholtz.

1.7.2. Variable dependiente

Función de dispositivos segmentados.

1.7.3. Indicadores

a) Modos de Floquet-Bloch:

- Geometría.
- Materiales.
- Longitud de onda.

b) Desempeño de los dispositivos segmentados:

- Transmitancia.

1.8. Unidad de análisis

La unidad de análisis es la respuesta en frecuencia en términos de la transmitancia a la salida de los dispositivos fotónicos.

1.9. Tipo y nivel de investigación

1.9.1. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo experimental, comparativa y aplicada. Experimental, por el proceso de diseño fotónico con aplicaciones en metamateriales [41]. La investigación es aplicada porque tiene dos campos de aplicación directa, las comunicaciones por fibra óptica, en las frecuencias de 1460nm a 1625 nm, bandas S, C, L [9-11], y aplicación para la propuesta de filtros con geometrías segmentadas para detección de bandas infrarrojas relevantes para aplicaciones en agricultura de precisión.

1.9.2. Nivel de investigación

En este trabajo se emplearon conocimientos avanzados adquiridos en la maestría, tales como las técnicas de diseño, análisis, comportamiento e implementación, del medio utilizado concatenándose para obtener el diseño deseado.

1.10. Periodo de análisis

El resultado de la investigación del diseño del interferómetro multimodal segmentado es independiente del periodo de tiempo en el que se toma de los datos y la realización del experimento.

1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados

Las fuentes de información son artículos publicados en revistas de editoriales indexadas en SCOPUS, web site de fabricantes y libros relacionados a Comunicaciones ópticas. Todas mencionadas en la bibliografía.

Los datos fueron procesados en una computadora personal con sistema operativo Windows 07 Professsional Languaje de 64 bits, procesador Intel ® Core ™ i7-2670QM CPU 2.20 GHz, RAM instalado de 6.00 GB. Así como también en el Servidor MOCHICA de INICTEL-UNI

1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Los datos han sido generados de forma aleatoria mediante el software de comunicaciones ópticas Lumerical: Software de simulación Nanofotónica de alto rendimiento. (High-Performance Nanophotonic Simulation Software).

CAPITULO II

MARCO TEORICO Y MARCO CONCEPTUAL

2.1. Ecuaciones de Maxwell

De manera general, los campos magnéticos y eléctricos son cantidades vectoriales que posee magnitud y dirección. Las variaciones en estos campos están asociadas con las ondas electromagnéticas, las cuales se rigen por las leyes de Maxwell, las cuales pueden expresarse de forma diferencial o integral [5].

2.1.1. Ecuaciones de Maxwell en la frecuencia

La forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell es la más utilizada para resolver problemas electromagnéticos. Esta forma se emplea para describir y relacionar los vectores de campo, las densidades de corriente y las densidades de carga en cualquier punto del espacio y en cualquier momento [5].

En forma diferencial, las ecuaciones de Maxwell se pueden escribir como [5].

$$\nabla \times E = -M_i - \frac{\partial B}{\partial t} = -M_i - M_d = -M_i \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = I_i + I_c + \frac{\partial D}{\partial t} = -I_{ic} - \frac{\partial D}{\partial t} = I_{ic} + I_d \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = q_{ev} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = q_{mv} \quad (2.4)$$

donde:

$$I_{ic} = I_i + I_c \quad ; \quad I_d = \frac{\partial D}{\partial t} \quad ; \quad M_d = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.5)$$

Todas estas variables: E, H, D, B, I, M , varían en el tiempo y cada una representa una función de coordenadas de espacio y tiempo, que es $E = E(x, y, z; t)$. Las definiciones y unidades son:

E = Intensidad de campo eléctrico (V/m).

H = Intensidad de campo magnético (A/m).

D = Densidad de flujo eléctrico (C/ m²).

B = Densidad de flujo Magnético (Wb/ m²).

I_i = Fuente de la densidad de la corriente eléctrica (A/ m²).

I_c = Densidad de la conducción de la corriente eléctrica (A/ m²).

I_d = Densidad de la corriente de desplazamiento (A/ m²).

M_i = Fuente impresa de densidad de corriente magnética (V/ m²).

M_d = Densidad de corriente Magnética de desplazamiento (V/ m²).

q_{ev} = Densidad de Carga Eléctrica (C/ m³).

q_{mv} = Densidad de Carga Magnética (Wb/ m³).

La ecuación (2.1) hace referencia a la Ley de Faraday, en donde la variación del campo magnético es variable en el tiempo, esta ley es primordial para entender el funcionamiento de un generador eléctrico, todo movimiento que tenga un flujo magnético está relacionada a esta ley [58].

Otra ecuación que está relacionada con una de las formas diferenciales es la ecuación (2.2), la cual nos permite analizar la existencia de una corriente, la cual está relacionada con el campo magnético. También podemos observar la corriente de desplazamiento, la cual origina un campo magnético circundante.

2.1.2. Ecuación de onda de la forma de Helmholtz

Las ecuaciones diferenciales descritas en la ecuación (2.1) y la ecuación (2.2) de las ecuaciones de Maxwell son ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden, donde las intensidades del campo eléctrico E y magnético H son aparentemente desconocidas en cada ecuación. Usualmente, esto es beneficioso para las soluciones del campo eléctrico E y magnético H . Para desacoplar estas ecuaciones, lo que se tiene que hacer es incrementar el orden de la ecuación diferencial a segundo orden y, con un vector identidad, podremos reescribirlo en la forma de Helmholtz [26 y 27].

Para la intensidad del campo eléctrico E

$$\left(\nabla^2 E = \nabla \times M_i + \mu \frac{\delta I_i}{\delta t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla q_{ev} + \mu \sigma \frac{\delta E}{\delta t} + \mu \varepsilon \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} \right) \quad (2.6)$$

Para la intensidad del campo magnético H

$$\left(\nabla^2 H = \nabla \times I_i + \sigma M_i + \frac{1}{\mu} \nabla \mu \frac{\delta I_i}{\delta t} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla (q_{mv}) + \varepsilon \frac{M_i}{\partial t} + \mu \sigma \frac{\delta H}{\delta t} + \mu \varepsilon \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} \right) \quad (2.7)$$

El método describe la ecuación de onda electromagnética vectorial de la forma de Helmholtz. Los campos electromagnéticos pueden ser hallados a partir de las ecuaciones de Maxwell (dependientes del tiempo en forma diferencial parcial) [5].

Sí se considera una región libre de carga es decir $I_i = q_{ev} = 0$, y $M_i = q_{mv} = 0$ en un medio sin pérdida $\sigma = 0$ las ecuaciones (2.6) y (2.7) se simplificarían a

$$\left(\nabla^2 E = \mu \varepsilon \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\left(\nabla^2 H = \mu \varepsilon \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} \right) \quad (2.9)$$

donde la ecuación (2.8) y ecuación (2.9) representan la forma simple de la ecuación de onda vectorial, ε es el coeficiente de la permitividad y μ es el coeficiente de la permeabilidad [5].

2.1.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son restricciones que se utilizan para encontrar la solución a un problema de valor de frontera. Es decir, una ecuación diferencial (o sistema de ecuaciones diferenciales) que debe resolverse en un dominio, cuyo límite se describe mediante un conjunto de condiciones [7].

Los problemas de valor de frontera son muy importantes debido a la gran cantidad de fenómenos y aplicaciones. Por ello, se estudian las condiciones que garantizan la existencia y la singularidad de la solución, así como cómo estas se ven afectadas por las condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera relevantes para este trabajo incluyen: Simulación de dominio infinito (PML), Conductor eléctrico perfecto (PEC), Conductor magnético perfecto (PMC), Condición de frontera periódica.

La definición y explicación de estas condiciones de frontera se encuentran en la sección 2.1 del Anexo Teórico.

2.1.4. Materiales

2.1.4.1. Silicio

El silicio es un material dieléctrico altamente dispersivo en las longitudes de onda 1.460 μm a 1.625 μm . Eso significa que varía el índice de refracción con la frecuencia óptica. Cuenta con un elevado índice de refracción (por ejemplo, $n = 3.4757$ [7] para la longitud de onda 1.550 μm (ver Figura 2.1 y 2.2) y con un coeficiente de absorción casi nulo entre 1.11 μm y 7 μm (ver Figura 2.3), por lo que es muy conveniente para las comunicaciones ópticas en el rango de la onda corta, la tercera y cuarta ventana de comunicaciones ópticas.

Debido a algunas de sus propiedades, el silicio presenta una serie de desafíos para la fotónica en el diseño de fuentes de luz y moduladores electro-ópticos. Estos desafíos incluyen pérdidas de propagación debido a la rugosidad de las paredes de su estructura, baja eficiencia de emisión de luz, así como un bajo coeficiente electro-óptico y pérdidas de acoplamiento relevantes hacia la fibra óptica [26].

El avance continuo en las diversas técnicas de micro y nano-fabricación ha logrado que un gran número de componentes fotónicos posean altas prestaciones. Estos avances se han centrado concretamente en el desarrollo de dispositivos ópticos sobre silicio, tales como moduladores [40], amplificadores [24] y emisores de luz, como láseres [29].

Por tal motivo, la fotónica del silicio es una plataforma idónea para el diseño y fabricación de transceptores inteligentes para los enlaces de fibra óptica de alta velocidad. Sin embargo, la escasa disponibilidad de fuentes de luz adecuadas para los chips ópticos es el principal cuello de botella que impide que esta tecnología transforme completamente el panorama de las redes de telecomunicaciones.

No obstante, la demanda de altas velocidades de datos y dispositivos ópticos más compactos y económicos sigue siendo el principal motor del desarrollo de la fotónica integrada de silicio [14].

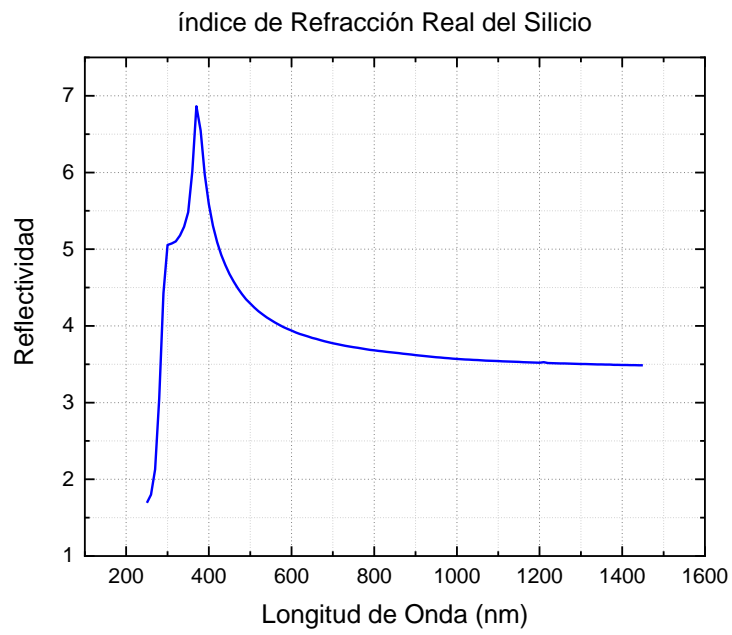


Figura 2.1 índice de refracción real del silicio

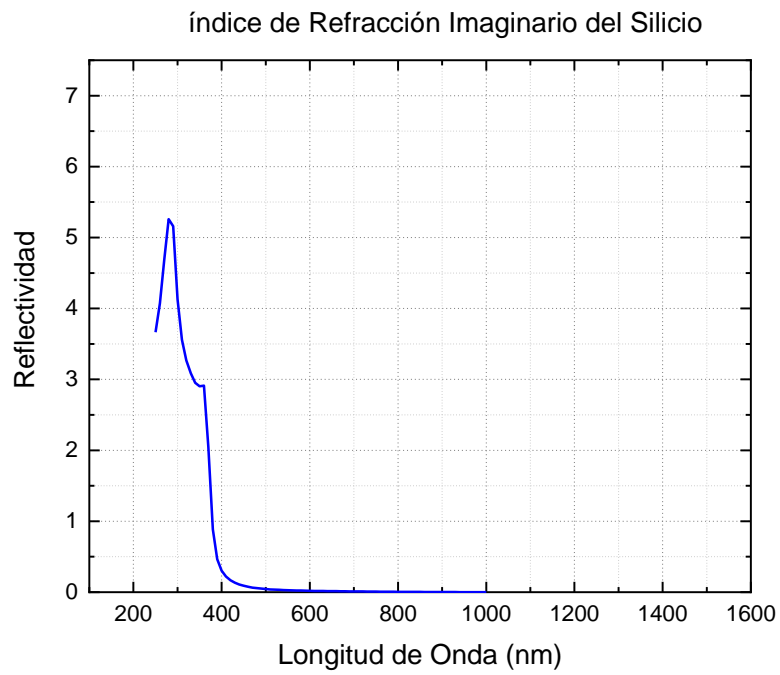


Figura 2.2 índice de refracción real e imaginario del silicio

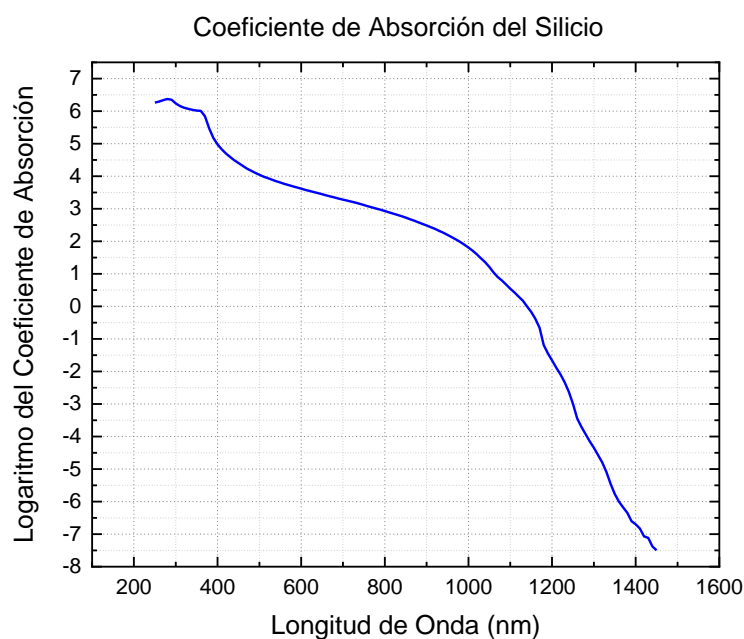


Figura 2.3 coeficiente de absorción del silicio

2.1.4.2. Óxido de silicio

El óxido de Silicio o Dióxido de Silicio o Sílice es un material compuesto básicamente por Silicio y Oxígeno, puede encontrarse en estado amorfo o en estado cristalino, con un índice de refracción de $n = 1.45$ para la longitud de onda $1.550 \mu m$ [26] (ver Figura 2.4.), utilizado en diversas áreas, pero principalmente en la fabricación de fibras ópticas para las comunicaciones de alta velocidad. [34]

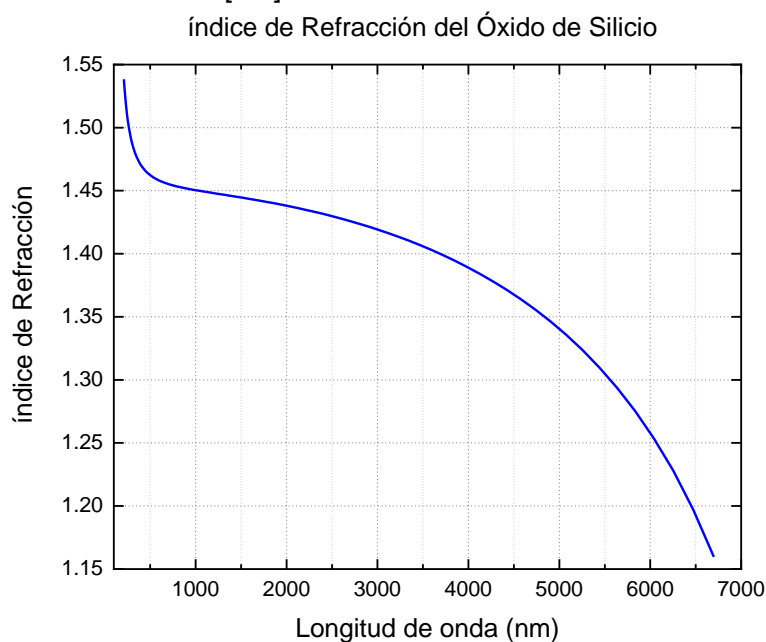


Figura 2.4 índice de refracción del óxido de silicio

2.2. Análisis modal de guías de onda continuas – CWG

Para llevar a cabo el análisis modal de las guías de onda continua-CWG utilizando los materiales dieléctricos descritos en la sección anterior, se examinan las guías de onda unidimensionales, también conocidas como guías de onda planas (slab). Posteriormente, se realiza una extrapolación a las guías de onda rectangulares, que son las más comúnmente utilizadas en las plataformas de fotónica integrada. El análisis de una guía de onda plana (SLAB), las ecuaciones de dispersión de los modos TE y TM, y de una guía de onda rectangular, incluyendo el índice efectivo y la dispersión de la misma, se detallará en las secciones 2.2 y 2.3 del Anexo Teórico.

2.3. Análisis modal de guías de onda segmentadas - SWG

La diferencia principal entre una guía de onda SWG y una guía de onda continua, CWG, radica en que el CWG debe estar asociado con la distribución del volumen del campo, el cual debe permanecer invariable a lo largo de la dirección de propagación. En cambio, en el SWG, la forma del modo varía periódicamente en función de la distancia [62].

Por definición, la estructura de una guía de onda SWG está conformada por dispositivos periódicos, donde el período es muy pequeño en contraste con la longitud de onda. En otras palabras, se considera que una guía de onda es SWG cuando el período de la misma guía es inferior al período más bajo que cumpla la condición de Bragg, que es menor a la mitad de la longitud de onda dividida por el índice efectivo del modo de Floquet-Bloch [60].

2.3.1. Cristal periódico en una dimensión

Un cristal periódico [60] en una dimensión es una generalización de una guía SWG, puede tener dos comportamientos que son dependientes de la longitud eléctrica del periodo, haciendo que el modo fundamental de la guía de onda se encuentre en una zona de una banda prohibida o en una zona de transmisión, para poder determinar en qué régimen o zona se encuentra cada modo estas deben cumplir con los regímenes establecidos en la Figura 2.5.

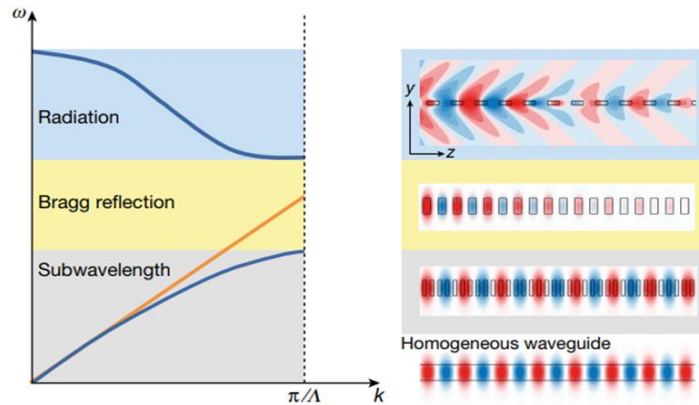


Figura 2.5 condiciones de Bragg [10].

La Figura 2.5 muestra un diagrama de las condiciones de Bragg. En el eje vertical se representa la frecuencia angular, que corresponde a un parámetro dispersivo y en el eje horizontal se encuentra el número de onda k . Además, se puede observar tres regímenes comprendidos en los elementos que son segmentados con un periodo constante. El régimen sub-longitud de onda (*Subwavelength*) es una región que se puede asemejar a la guía de onda continua ejemplificada por la línea de color naranja, el régimen de reflexión de Bragg (*Bragg reflection*) es una región de reflexión hacia atrás y el régimen de radiación (*Radiation*) es una región de cambio de dirección del vector de propagación k . Del mismo modo, en la parte izquierda se observa una dispersión esquemática, estableciendo 03 regímenes para la guía de onda. En cambio, por el lado derecho se observa perfiles de campo eléctrico correspondientes al de una guía de onda de onda periódica [10], en la región subwavelength (plomo), la dispersión de la luz en la región de radiación (azul) y la reflexión hacia atrás en la región de Bragg (amarillo).

Es preciso mencionar que el régimen de radiación (color celeste) hace que la estructura de la guía actúe como una rejilla de difracción, lo que provoca que conduzca la radiación de la potencia de las guías de onda hacia el espacio libre, es decir, fuera del circuito óptico [10].

Por otro lado, el régimen de reflexión de Bragg o Banda Prohibida (color amarillo): en esta zona no existe un modo óptico de propagación, debido a que el modo que ingresa a esta zona decae exponencialmente dentro de la rejilla [10]. En esta zona, el campo es evanescente en la dirección de la periodicidad de la red [60], lo que se debe a la reflexión óptica y a que satisface la condición de Bragg.

$$\Lambda = \frac{\lambda_{eff}}{2} = \frac{\lambda}{2n_{eff}} \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10), nos muestra la condición de Bragg en donde λ_{eff} es la longitud de onda efectiva, n_{eff} es la parte real del índice efectivo del modo Floquet fundamental. Por último, el régimen de sub-longitud de onda o zona de transmisión, en la zona del modo de Floquet satisface la siguiente condición.

$$\Lambda < \frac{\lambda_{eff}}{2} < \frac{\lambda}{2n_{eff}} \quad (2.11)$$

Es decir, si definimos un periodo $\Lambda = 350 \text{ nm}$ y encontramos en nuestra simulación un modo quasi TE en la longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, podemos observar que por la ecuación 2.11 [10] esta se encontrará en la zona de transmisión o Sub-longitud de onda (color plomo en la figura 2.5).

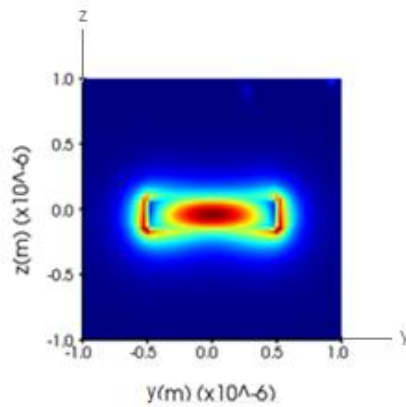


Figura 2.6 distribución del campo eléctrico del modo Quasi Te .

Para una mejor ilustración de la sección transversal (en este caso, definida sobre el plano YZ) de un modo calculado en la región sub-wavelength de los regímenes de Bragg, obsérvese la Figura 2.6. En esta Figura, se muestra el modo quasi- TE , que tiene la propagación de sus lóbulos distribuidas a lo largo del eje Y y un campo evanescente en las cuatro direcciones cartesianas desde el límite del núcleo y hacia el recubrimiento y sustrato de la guía de onda. Este modo fue calculado para un número de onda, $k = 0.5$, con un periodo $\Lambda = 350 \text{ nm}$ y para una la longitud de $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

2.3.2. Célula fundamental

Se denomina célula fundamental al dominio computacional que caracteriza totalmente una estructura periódica. La célula fundamental de una estructura periódica puede contener

periodicidad unidimensional, bidimensional o tridimensional. En este trabajo se usarán células fundamentales con periodicidad unidimensional.

La descripción de la geometría de la célula fundamental inicia con los materiales, el Silicio, que se usará en núcleo, tiene un índice de refracción es $n = 3.4757$ para la longitud de onda $1.550 \mu\text{m}$ [7], el sustrato será de Oxido de Silicio (SiO_2), tiene un índice de refracción de $n = 1.45$ para la longitud de onda $1.550 \mu\text{m}$ [34]. La descripción de las dimensiones es como sigue: (i) el núcleo tiene un ancho que se definirá como w , una altura h y una longitud que varía de acuerdo al ciclo de trabajo (duty cycle) llamada l ; (ii) el sustrato está definido en todo el ancho dominio computacional.

Además, se contará con las condiciones de frontera *PEC* con la finalidad de especificar que los límites actúen como conductor eléctrico.

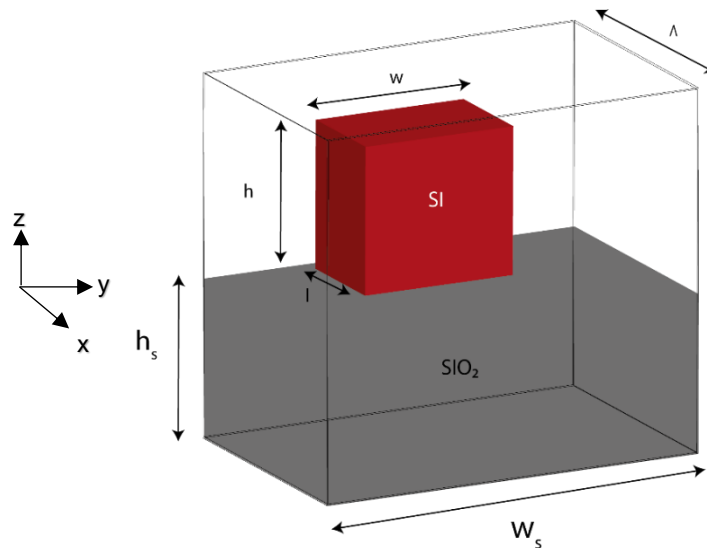


Figura 2.7 célula fundamental de las guías de onda segmentadas

La Figura 2.7. nos muestra la célula fundamental de un *SWG* donde el núcleo es de Si, el sustrato es de SiO_2 , h es la altura del núcleo, l es la largo del núcleo, w es el ancho del núcleo y λ es el periodo. El diseño de la Figura 2.7. tendrá las siguientes condiciones: el eje "x" tiene tendrá las condiciones de frontera de Floquet Bloch lo que me va a permitir que sea periódico y que se repita en todo el eje infinitamente, el eje "y" tendrá las condiciones *PEC* con la finalidad de especificar que los límites actúen como conductor eléctrico, como se está usando para el análisis modal el *EME*, se procederá a colocar un periodo de 500 con 03 celdas de grupo haciendo que sea periódico en el eje x, como la condición de Bloch.

2.3.3. Campo eléctrico e índice efectivo

A partir del teorema de Bloch expresado en el apartado en la sección 2.1.4 del Anexo Teórico, teniendo en cuenta que $\psi(r)$ es una función definida en el punto r y esta satisface la ecuación de onda, el cual permite simplificar el entendimiento del teorema de Achille Floquet, se considera como un campo eléctrico a $E(r)$ el cuál es la solución de la ecuación de onda [62] :

$$\nabla \times \nabla \times E(r) + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon(r)E(r) = 0 \quad (2.12)$$

De la ecuación (2.12) θ es el ángulo de incidencia y en este caso es 90° , el ángulo de incidencia para un segmentado usando los modos de Floquet-Bloch es perpendicular, c es la velocidad de la luz y ω es la frecuencia angular y $\epsilon(r)$ es la permitividad del material. $E(r)$ varía periódicamente en el eje traslacional, por eso el campo eléctrico queda definido por la función

$$E(r) = u(r)e^{jk \cdot r} \quad (2.13)$$

donde, $E(r)$ es una solución periódica de la ecuación de onda, $u(r)$ hace que el campo sea periódico en “ r ”, k es un vector de onda; en nuestro caso vamos a definir “ r ” en una sola dirección, como por ejemplo la dirección de propagación. [62]

Se puede diseñar y construir cristales fotónicos con espacios de banda fotónica evitando que la luz se propague en ciertas direcciones, haciendo que sean periódicos en una sola dirección o dos direcciones, esto se debe a que el vector r se encuentra orientado a una o dos direcciones, lo mismo sucede con el $u(r)$ y $E(r)$ [32]

Por otro lado, el índice efectivo de una guía de onda *SWG* debe satisfacer la condición descrita en la ecuación (2.10), donde el periodo Λ es menor a la mitad de la longitud de onda $\frac{\lambda}{2}$.

2.3.4. Ecuaciones de índice equivalente de Rytov.

Una Guía de onda periódica segmentada (*SWG*) está compuesta por los segmentos dieléctricos dispuestos periódicamente, con período más pequeños que una longitud de onda, de acuerdo a la ecuación (2.10) [11]. Cuando el periodo tiende a cero, el índice efectivo es obtenido por Rytov para medios estratificados de periodos pequeños [60]. Para modelar este comportamiento teórico, consideramos un medio finamente estratificado, como el propuesto por Rytov. Esto permite tener una relación del índice de refracción equivalente del metamaterial [22, 23].

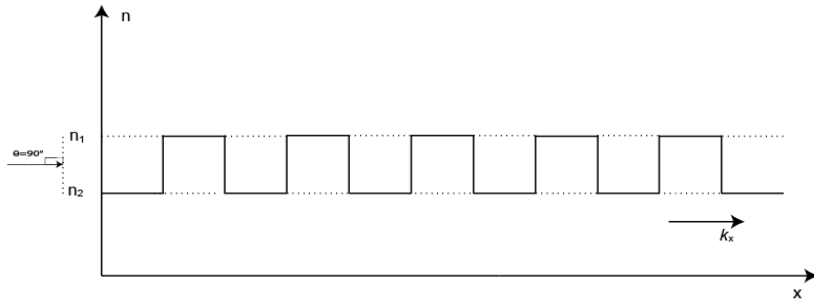


Figura 2.8 representación gráfica de la variación del índice de refracción, paralela a la dirección de propagación del vector k_x de campo.

En el caso de la Figura 2.8, la estructura puede funcionar como una rejilla de difracción Rytov, en donde si el periodo de la rejilla es mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz, el SWG es óptimamente equivalente a un cristal axial cuyo eje óptico es perpendicular a las capas. Esta luz incidente en la red puede tener una polarización del campo eléctrico paralelo o perpendicular a las interfaces periódicas, y el respectivo índice equivalente de los guías periódicamente segmentados son aproximados a [11]

$$n_{\parallel}^2 \simeq \frac{a}{\Lambda} n_1^2 + \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right) n_2^2 + O\left(\frac{\Lambda^2}{\lambda^2}\right) = \frac{a}{\Lambda} n_1^2 + \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right) n_2^2 \quad (2.14a)$$

$$n_{\perp}^{-2} \simeq \frac{a}{\Lambda} n_1^{-2} + \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right) n_2^{-2} + O\left(\frac{\Lambda^2}{\lambda^2}\right) = \frac{a}{\Lambda} n_1^{-2} + \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right) n_2^{-2} \quad (2.14b)$$

De las ecuaciones (2.14a, 2.14b), se tiene que a es el ancho de una losa de material con un índice n_1 , Λ es el período y λ es la longitud de onda del espacio libre. Además n_{\parallel}^2 representa el índice efectivo del modo de Floquet, para campos eléctricos condensados en paralelo a las discontinuidades del entorno estratificado [60]. Debemos saber que, en el límite de longitud de onda, el índice de refracción va ser aproximado a un valor estático con términos de corrección en el orden de Λ^2 / λ^2 . [11].

2.4. Factores que influyen en la pérdida de potencia

Los factores que influyen en las pérdidas de fotones son la presencia de discontinuidades longitudinales en las guías de onda que son mayores que una longitud de onda guiada, lo que ocasiona pérdidas en la propagación. Esto sucede cuando los modos guiados se acoplan a los modos radiados. Cuando aparece una irregularidad en la fibra, el modo propagado se desdobra en varios modos, de los cuales muchos se atenúan rápidamente en comparación con el modo original. Esto nos lleva a considerar que a una

distancia con irregularidad se tendrá un modo estable o quizás una mezcla de varios modos. [62].

CAPITULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS

3.1. Configuración de simulación de análisis modal CWG

Como discutido en el capítulo 2, el análisis modal consiste en resolver un problema de autovalor y autovector, donde se hallan un índice efectivo y un vector de campo eléctrico, respectivamente. Como las geometrías a analizar son complejas, se usó discretización del dominio computacional, haciendo uso de simuladores comerciales específicos para dispositivos fotónicos integrados. En esta primera sección se usó el software ANSYS Lumerical *Mode Solutions* con dos tipos soluciones computacionales: (i) primero para el análisis modal bidimensional de las guías de onda continua, se usará el módulo de cálculo de autovalores, conocido como *Finite Difference Eigenmode (FDE)*. El *FDE* calcula la dependencia de la frecuencia de todos los modos resolviendo las ecuaciones de Maxwell descritas en la sección 2.1; (ii) para el análisis propagación se usará el módulo de cálculo llamado *MODE - EigenMode Expansion (EME)*, que incluye el bloque de análisis modal y añade la funcionalidad de observar la propagación de la luz en el dominio de frecuencia, dando soluciones a las ecuaciones de Maxwell descritas en la sección 2.1. Ambos dominios ayudarán a verificar los indicadores del índice efectivo n_{eff} (auto valor) y el campo eléctrico E^{\rightarrow} (auto vector), modo fundamental de la simulación, análisis de las frecuencias en relación a los modos, dispersión del índice efectivo en función el ancho del núcleo, n_{eff} (auto valor). También permitirán observar la relación de la transmitancia con el ancho del núcleo y por último la relación entre la transmitancia y la frecuencia óptica, tal como se describió en la sección 2.2.

Para realizar una comparación directa con el caso que presentará periodicidad unidimensional, más adelante, se define una célula fundamental CWG, que constará de dos materiales, para el núcleo se usará el Silicio, con un índice de refracción $n = 3.4757$ para la longitud de onda $1.550 \mu m$ con las dimensiones: $10\mu m \times 0.45\mu m \times 0.22\mu m$. Para nuestro sustrato se usará el Óxido de Silicio, con un índice de refracción $n = 1.45$ para la longitud de onda $1.550 \mu m$ con las dimensiones: $10\mu m \times 5\mu m \times 2\mu m$ tal como se observa en la Figura 3.1.



Figura 3.1 sección longitudinal de la plataforma silicio sobre aislante (SOI) con una guía de onda CWG

La Figura 3.1 muestra el diseño de una sección longitudinal de la plataforma SOI con una guía de onda CWG, conformada por dos materiales, el núcleo de Silicio y el sustrato de Óxido de Silicio, con las dimensiones indicadas previamente, donde h_s es la altura del sustrato, que deberá ser mayor o igual que 1500 nm , h es la altura del núcleo, y w el ancho del núcleo, $w = 0.45 \mu\text{m}$ y l la longitud del sustrato, que puede ser cualquier longitud de análisis.

Una vez definida las estructuras de nuestro diseño, se realiza el análisis modal, con la finalidad de verificar los modos que se encuentren cerca al índice de refracción $n = 3.4757$ para una longitud de onda 1550 nm . Para este análisis modal, es suficiente con la estructura bidimensional de la guía de onda que corresponde a la sección transversal (véase Figura 3.2b)

En este diseño, se considera como dirección de propagación $+x$. La misma que dependerá de la longitud de onda a estudiar $1.550 \mu\text{m}$ e iniciará el proceso iterativo para resolver el problema de autovalores y autovectores a partir del mayor índice de refracción del diseño, $n = 3.4757$. El mínimo paso de la malla se obtiene a través del cálculo de la vigésima parte de la longitud de onda efectiva mínima, es decir para una malla uniforme en dos dimensiones, $dy_{\mu\text{m}} = dz_{\mu\text{m}} = \frac{1.550}{20} = 0.0222976$. Por último, las condiciones de frontera a ser usadas, en el dominio bidimensional son conductor eléctrico perfecto (PEC o PML), cualquiera de ellas no afectará el resultado final en esta geometría ya que el confinamiento de la onda resultante se encuentra fuertemente en el núcleo.

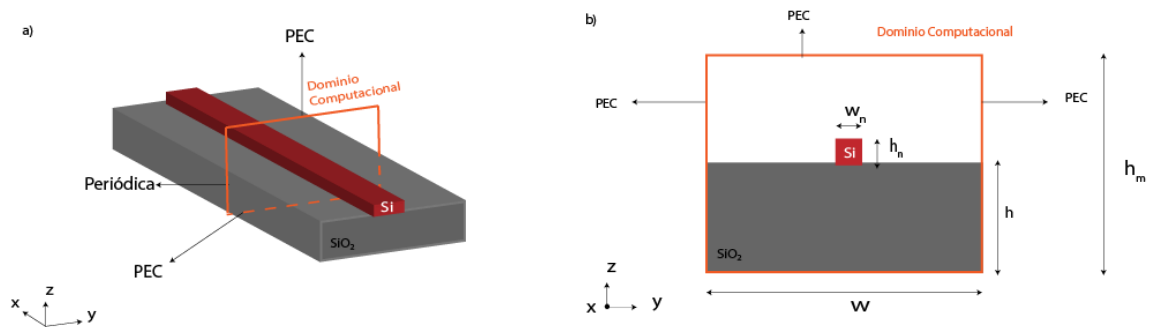


Figura 3.2 análisis modal del CWG

En la Figura 3.2 se observa las diversas vistas, a) es la vista general del diseño, b) vista yz, que se reproducen con ayudas visuales en el presente trabajo y que permitirá al lector tener una mejor referencia al usar el software *LUMERICAL*. Se observa que las dimensiones del núcleo y el sustrato, donde h es la altura del sustrato $h = 2\mu\text{m}$, h_n la altura del núcleo $h_n = 0.22\mu\text{m}$, el ancho del núcleo $w_n = 0.45\mu\text{m}$, w el ancho del sustrato $w = 5\mu\text{m}$, la longitud del sustrato $l = 10\mu\text{m}$ (a lo largo del eje x), y h_m la altura del recubrimiento de aire, $h_m = 4\mu\text{m}$. De color naranja, en toda la Figura 3.2, se observa la definición de las fronteras del dominio computacional bidimensional.

El primer análisis que se realiza sobre el dominio computacional y la malla escogida se observa en la Figura 3.3. En la figura, el índice de refracción se encuentra representado en la escala de colores, se observa que el sustrato tiene índice de refracción coherente con el óxido de silicio, el núcleo con el silicio y el recubrimiento de aire (cercano a índice de refracción de 1).

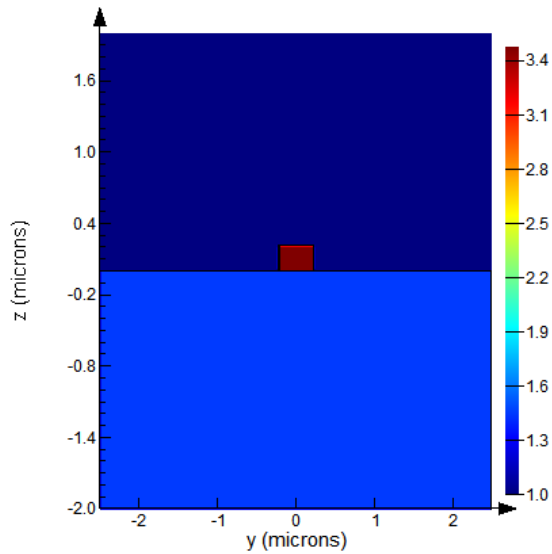


Figura 3.3 estructura de un (CWG)

Los resultados del análisis modal bidimensional, se encuentran descritos en las secciones 2.3.1 y 2.3.2 del Anexo Teórico. Con esta configuración metodológica es posible encontrar la dispersión del índice efectivo en función del ancho del núcleo, por medio de un barrido del ancho del núcleo 300 a 800 nm , los resultados se encuentran descritos en la sección 2.3.4 inciso A del anexo teórico.

3.2. Configuración de simulación de análisis modal SWG

La segunda metodología para la configuración de la simulación numérica incluye la exploración de las soluciones modales para el análisis de guías de onda segmentadas o SWG. Los materiales continúan siendo los mismos y el tamaño de la sección transversal del núcleo continúa manteniéndose para realizar un análisis comparativo; con ancho de $w_n = 450 \text{ nm}$, altura de $h_n = 220 \text{ nm}$ y un ciclo de servicio que se define a partir de l_n / l , donde la longitud del dominio computacional coincide con el período de la célula fundamental analizada, es decir $\Lambda = l$ (véase Figura 3.4).

Las condiciones de frontera de la región de simulación incluyen un ancho total de $w > 2000 \text{ nm}$, una longitud de $l = \Lambda$, una altura total de $H > 2000 \text{ nm}$. Las condiciones de frontera usadas fueron Floquet-Bloch en los lados opuestos del eje X, PEC en los lados opuestos de los ejes Z y Y. Esta geometría del dominio computacional de la célula fundamental es recomendada y podrá usarse con cualquier resultado que implique modos confinados de manera satisfactoria. Sin embargo, si se desea incluir modos radiados en la

solución, las condiciones de frontera en Y y Z deberán ser reemplazadas por *PML* para simular un dominio computacional infinito.

En cuanto a la configuración de la alimentación, se usaron dipolos paralelos al eje Y de dos naturalezas: (i) dipolo eléctrico (véase Figura 3.5) para excitar modos *quasi-TE* (con la componente de campo eléctrico polarizada a lo largo del eje Y), y (ii) dipolo magnético (véase Figura 3.4) para excitar los modos *quasi-TM* (con la componente de campo magnético polarizada a lo largo del eje Y). Como consecuencia, según la geometría estudiada, es posible encontrar los modos de orden superior que son correspondientes a los tipos de polarizaciones antes mencionados separados en dos grupos también, lo que tienen polarización del campo eléctrico en el eje Y, como *TE* y los que tienen polarización del campo eléctrico en el eje Z, como *TM*.

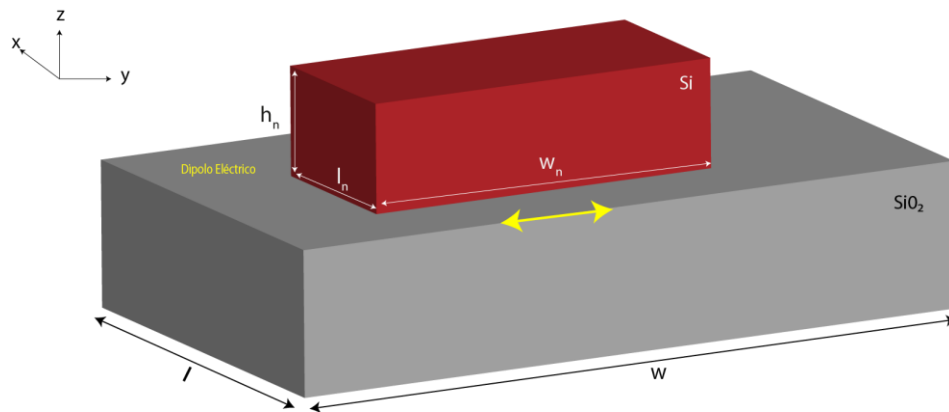


Figura 3.4 guía de onda segmentada *SWG*, con 01 dipolo eléctrico ubicado de forma de forma paralela al eje y, funcionando como una fuente local en el diseño.

A partir de la configuración de la Figura 3.4, se ha evaluado una solución que comprueba la metodología descrita líneas arriba. Se asignó $h_n = 0.22 \mu\text{m}$, $l_n = 0.175 \mu\text{m}$ y un ancho de núcleo $w_n = 0.45 \mu\text{m}$. Con un sustrato con dimensiones donde h es la altura del sustrato $h = 1.85 \mu\text{m}$, y $w = 2 \mu\text{m}$. Para una evaluación de modo resonante *TE* (con la configuración de la Figura 3.4, se encontró la solución modal de la Figura 3.5.) Se observa que el estado del arte y la teoría se comprueba, pues el modo *TE* se encuentra deslocalizado del núcleo, con mayor campo evanescente hacia los lados del eje Y. Incluso el máximo de la distribución del campo eléctrico se encuentra fuera del núcleo.

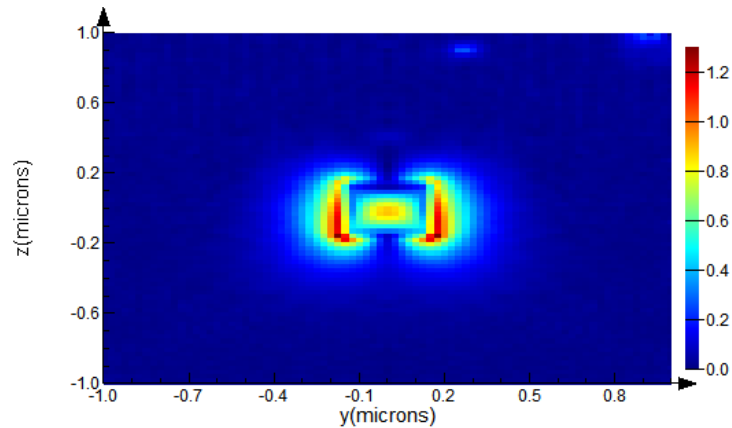


Figura 3.5 modo resonante TE de la componente del campo eléctrico (E_y) en una longitud de onda de $1.0 \mu m$.

En configuración dual, es posible analizar los modos perpendiculares a los anteriores (quasi- TM) por medio del uso de dipolos magnéticos, como se observa en la Figura 3.6. Usando las mismas dimensiones tanto de la geometría como del dominio computacional, la respuesta del análisis modal se encuentra descrita en la Figura 3.7. En este caso, el campo evanescente aumenta, pero en la dirección de Z , que es perpendicular al caso anterior. Tanto la Figura 3.5 como la Figura 3.7 se evalúan en la misma longitud de onda de $1.0 \mu m$ para comparación. Ambos modos se encuentran deslocalizados del núcleo, pero en direcciones perpendiculares.

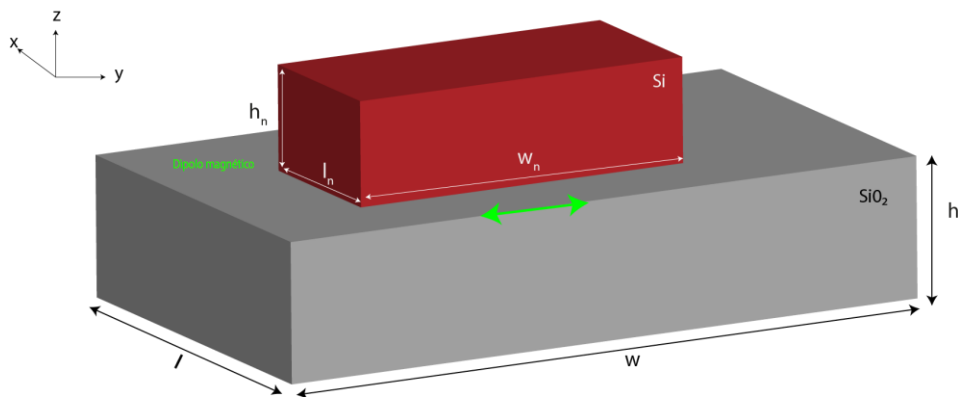


Figura 3.6 guía de onda segmentada SWG, con 01 dipolo magnético ubicado de forma paralela al eje y , funcionando como una fuente local en el diseño.

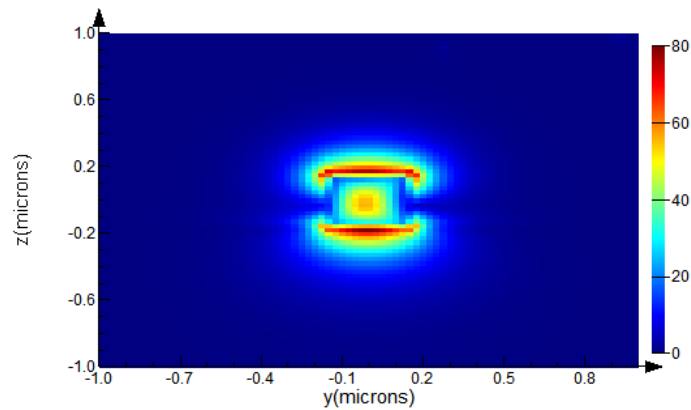


Figura 3.7 modo resonante *TM* de la componente del campo eléctrico (E_y) en una longitud de onda de $1.0 \mu\text{m}$, con un campo evanescente en el eje Z .

3.3. Comparación entre *CWG* Y *SWG*

La comparación entre los análisis de guías continuos *CWG* y segmentados, *SWG* pasa primero por la geometría. La Figura 3.8 muestra la configuración de geométrica de las secciones 3.1 y 3.2 del presente capítulo. La Figura 3.8a muestra la distribución de índices de refracción de la sección transversal (plano YZ) de la guía de onda *CWG*, el núcleo se observa en el centro de la estructura y el revestimiento de aire. De forma paralela, la Figura 3.8b muestra la sección transversal de un corte (pasando por el núcleo) del dominio computacional de análisis modal de una guía *SWG*. Ambos tienen la misma geometría y materiales, diferenciándose apenas en los límites del dominio computacional.

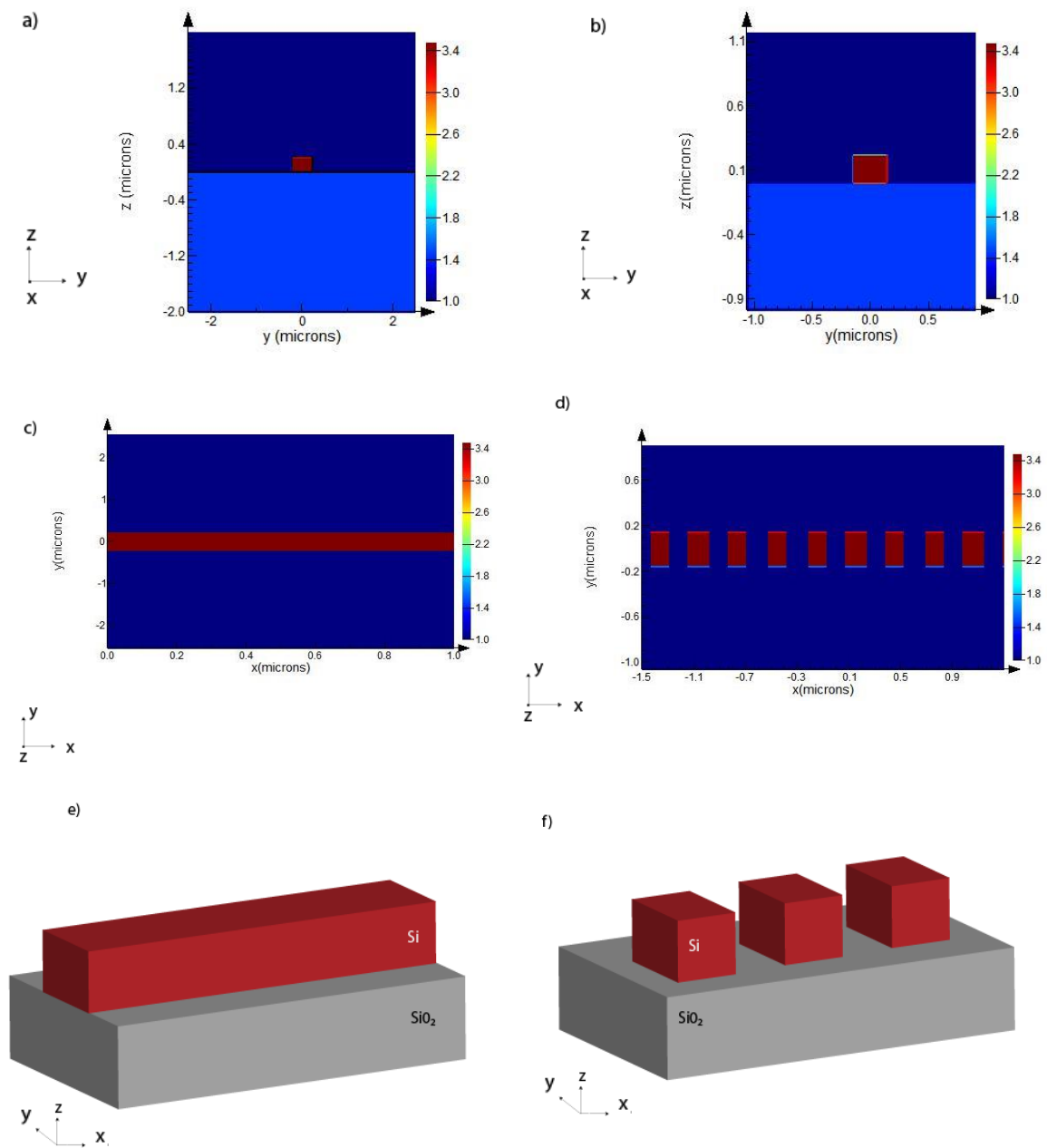


Figura 3.8 comparación entre la estructura de una guía de onda continua CWG y una guía de onda segmentada SWG, donde la sección a, c y e pertenecen a un guía de onda continua y la sección b, d y f pertenecen a una guía de onda segmentada

La comparación de la sección longitudinal (plano XY) incluye la dirección de propagación, X, donde puede observarse la discretización en la Figura 3.8d y la continuidad del núcleo en la Figura 3.8c. El corte longitudinal pasa por el centro de la altura del núcleo, por tanto, el índice de refracción del recubrimiento ($n=1$) se muestra en las Figuras. Por último, la Figura 3.8d y 3.8e muestran vistas esquemáticas tridimensionales de las guías de onda CWG y SWG, respectivamente.

En segundo punto de comparación se analizan los autovectores, en este caso la distribución del campo Eléctrico. La distribución del campo eléctrico en la sección transversal (plano ZY) de una guía de onda continua CWG (Figura 3.9a) muestra un modo localizado en el centro del núcleo, en cambio para la guía de onda SWG (Figura 3.9b) muestra un modo deslocalizado hacia las direcciones de $\pm Y$. La sección longitudinal del campo eléctrico se puede observar a través de una comparación de una longitud de 1000 nm a lo largo del eje X. La Figura 3.9c muestra el campo eléctrico en corte longitudinal de la guía de onda CWG con el máximo en el centro del núcleo, para una propagación monomodo, y campo evanescente hacia los lados; por otro lado, en la Figura 3.9d se muestra que, para una longitud de onda adecuada, la discontinuidad del núcleo puede ser superada, pudiendo observarse campo eléctrico no nulo cerca de 0 y cerca de los 1000 nm de longitud.

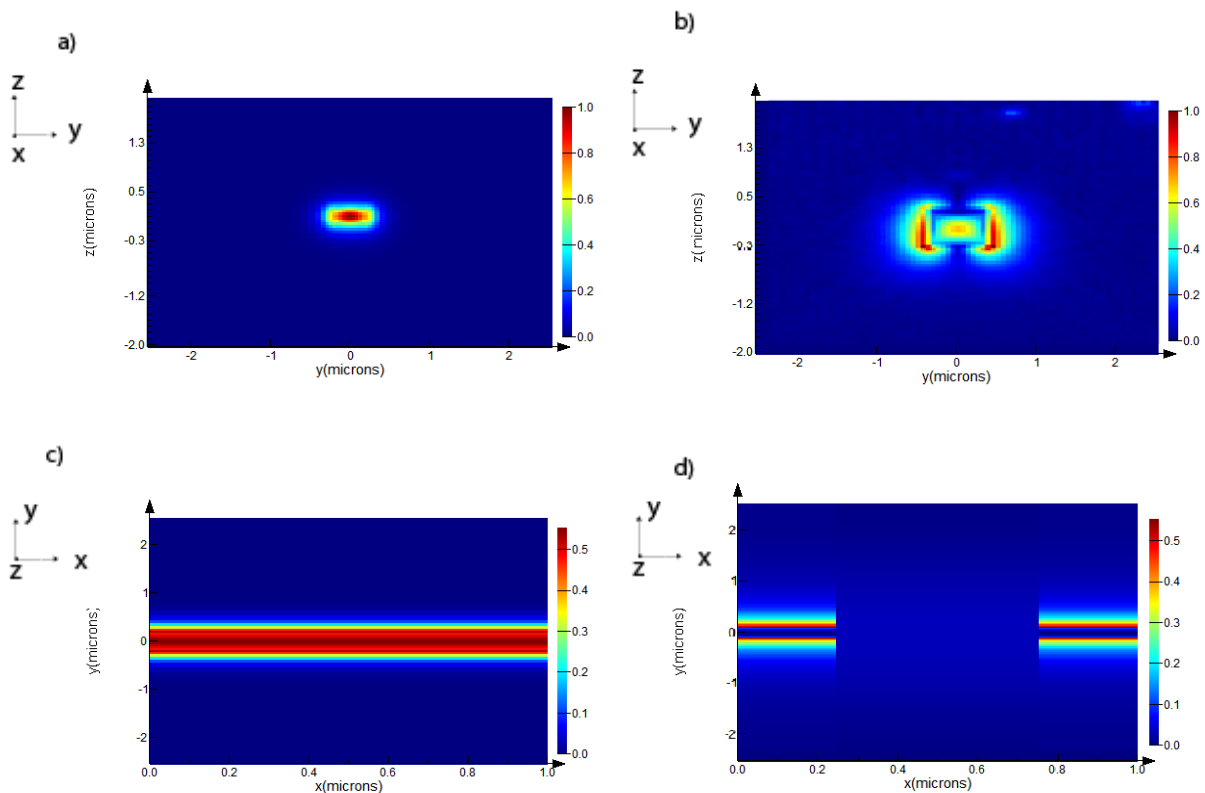


Figura 3.9 intensidad del campo eléctrico normalizado de una guía de onda continua CWG vs el de una guía de onda segmentada SWG

Finalmente, la dispersión en función de la frecuencia es evaluada. La guía CWG (Figura 3.10a) muestra un comportamiento invariante con la longitud de onda, incluso durante la evaluación de las bandas SCL de comunicaciones ópticas. Como Silicio y óxido de silicio son materiales transparentes en estas frecuencias, se observa una transmitancia

normalizada de 1. En el caso de la guía de onda SWG, la Figura 3.10b muestra una transmitancia de luz lenta desde 1400 nm hasta 1600 nm y una transmitancia de guía de onda sub longitud de onda desde 1700 nm en adelante, esto para un período cercano a 350 nm. Por último, en las longitudes de onda inferiores a 1400 nm, se observan las condiciones de Bragg de radiación, pues la transmitancia disminuye a cero, eventualmente.

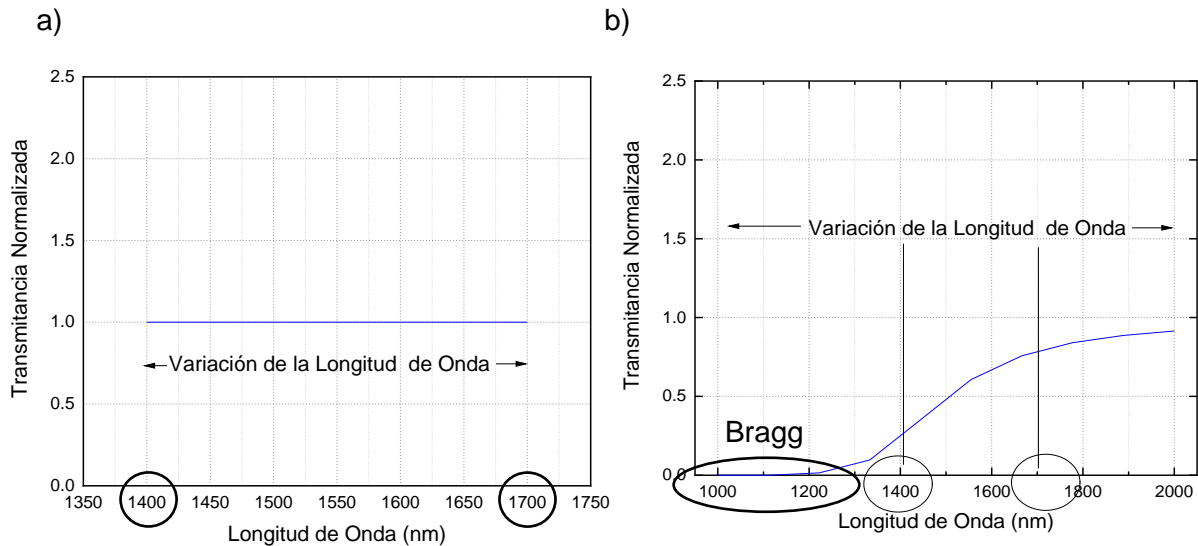


Figura 3.10 dispersión de la transmitancia en relación a la frecuencia óptica de una guía de onda continua CWG (a) con una guía de onda segmentada SWG (b).

3.4. Configuración de simulación para estudios de propagación

En esta sección vamos a analizar cómo es el dominio computacional para un estudio de propagación. Aquí el objetivo es calcular la potencia pérdida en comparación a una potencia incidente guiada a través de un dispositivo fotónico, en sus versiones continua o segmentada.

Para evaluar el divisor de potencia basado en interferómetro, se usa la configuración descrita en esta sección. El modelo se basa en dos tipos de puertos: (1) puerto de entrada y (2) dos o más puertos de salida. Los puertos son análisis modal transversales de dos dimensiones. En cada uno de estos puertos se resuelve el problema de autovalor y autovector, adicionalmente en todo el dominio computacional tridimensional se resuelven las ecuaciones de Maxwell, de esta manera es posible obtener la distribución del campo eléctrico en cortes de planos longitudinales o cortes de planos transversales. La herramienta computacional usada fue *FDTD* de *Lumerical*. El mismo que funciona como un solucionador, que permite la evaluación de una geometría, siendo ideal para verificar

como la luz viaja a lo largo del plano del dispositivo en un rango de frecuencias determinado.

Para poder analizar la potencia guiada una vez ya configurado el diseño, se debe proceder a configurar el dominio computacional. En nuestro análisis el dominio computacional se delimita con condiciones de frontera de tipo *PML* en las direcciones de Y y Z, y los mismos puertos son condiciones de frontera de entrada y salida al dominio computacional (en las direcciones de $\pm Z$), por lo que los modos confinados pueden ser perfectamente guiados desde una puerta de entrada hasta una o más puertas de salida. El tamaño de la malla es uniforme a lo largo del dominio computacional, teniendo en cuenta las dimensiones del sustrato y del núcleo del diseño.

Adicionalmente, se implementó un algoritmo de *Particle Swarm Optimization* reportado previamente por el grupo de investigación [49] para optimizar los divisores de potencia basados en interferómetros multimodales CWG. Siguiendo la metodología propuesta por los autores, para un ancho de banda que incluya las bandas de comunicaciones ópticas SCL, se espera que el valor máximo de la figura de mérito, $FOM = 10.04$. En la configuración de este algoritmo, se usó un número máximo de generaciones de 60 y el tamaño de cada generación de 40 individuos.

El último concepto a ser definido en esta etapa de la metodología es el de los monitores de campo eléctrico. Estos se utilizan para presentar una distribución del campo eléctrico en el espacio, en cortes bidimensionales. En la Figura 3.11 se observa la geometría de un divisor de potencia basado en interferómetro modal CWG. Los monitores de color amarillo toman capturas del campo eléctrico en las secciones transversales. Un corte unidimensional a lo largo del eje Y muestra la distribución del campo eléctrico unidimensional. Específicamente, se ve que el campo eléctrico en una guía de onda, luego de pasar por una curvatura se encuentra ligeramente afectado hacia la dirección externa del radio de curvatura. Comprobándose que con un adecuado estudio de propagación se podrá analizar la potencia obtenida en las dos salidas, de acuerdo al diseño mencionado previamente sería la mitad de la potencia de la potencia de la entrada. Este análisis se verá a detalle en el capítulo 4 en la sección 4.2.4

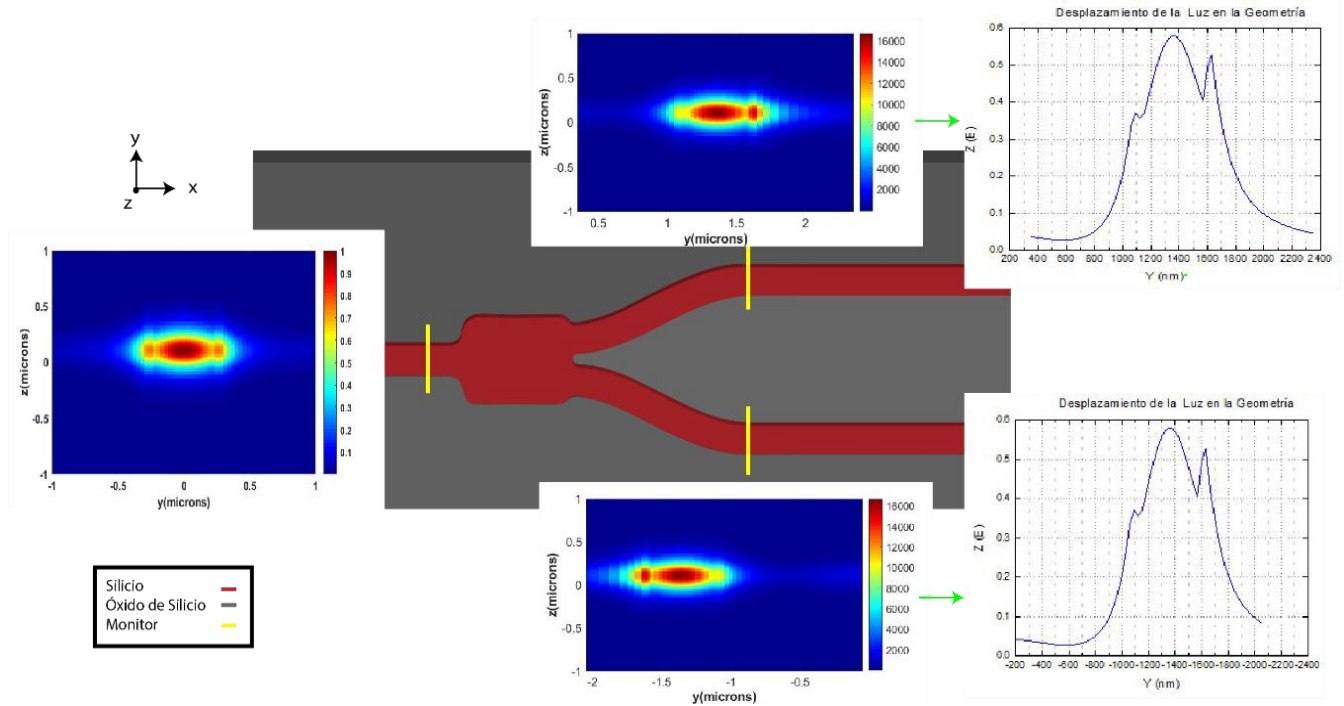


Figura 3.11 dispersión del campo eléctrico a lo largo del diseño y de la potencia guiada.

3.5. Interferómetro multimodal CWG

Para la simulación de un interferómetro multimodal CWG, se hará uso del software *Mode Solutions*, de propiedad *LUMERICAL*. En donde se va a verificar los indicadores del índice de refracción efectivo n_{eff} (auto valor), intensidad del campo eléctrico $E \rightarrow$ (auto vector) normalizado. Se proponen dos diseños de interferómetros multimodales CWG, uno de una (1) entrada y dos (2) salidas, otro de una (1) entrada y cuatro (4) salidas, con los materiales de Silicio para el núcleo y el Óxido de Silicio para el substrato, tal como se observa en la Figura 3.12 y la Figura 3.13, respectivamente.



Figura 3.12 diseño de un interferómetro multimodo continuo CWG de 01 entrada y 02 salidas.



Figura 3.13 diseño de un interferómetro multimodo continuo CWG de 01 entrada y 04 salidas.

En la Figura 3.12 se presenta una estructura divisora de potencia basado en *MMI* con una (1) entrada con campo incidente E_1 y dos (2) salidas: S_1 y S_2 , con un núcleo de Silicio y un sustrato de Oxido de Silicio, además nos indica en flechas amarillas el ingreso de la luz y la salida de la misma. Por otro lado, la Figura 3.13 muestra un diseño de una (1) entrada: E_1 con cuatro (4) salidas: S_1 , S_2 , S_3 y S_4 , también con un núcleo de Silicio y un sustrato de Oxido de Silicio. La finalidad de estos diseños es observar la propagación de la luz y evaluar el comportamiento de un interferómetro como un divisor de potencia.

Posteriormente, cuando se aplique el algoritmo de optimización lineal *Particle Swarm Optimization*, se usará la parametrización descrita en la Figura 3.14. Se define un polígono central con 24 vértices, en lugar de un rectángulo. Cada uno de estos vértices sirve como parámetro de entrada en la optimización lineal y permite optimizar la geometría de manera topológica con el objetivo de maximizar la potencia de salida en los brazos S1 y S2. El análisis de la figura de mérito se calcula a partir de una integral de la transmitancia calculada en uno de los brazos de salida a lo largo de las bandas SCL, es decir de 1460 a 1625 nm.

Los vértices móviles del polígono central, de acuerdo con la Figura 3.14, son los 20 que pertenecen al MMI de silicio, excluyendo los vértices 1, 24, 12 y 13. Estos vértices definirán 10 anchos diferentes que representarán los parámetros de optimización del polígono, desde w_2 hasta w_{11} , con un valor inicial de $1.5 \mu\text{m}$ y espaciados equitativamente a lo largo del eje x que es la dirección de propagación. La programación referente a la asignación de los segmentos y la geometría se encuentra en el Anexo a- Diseño del interferómetro multimodo continuo CWG 1X2.

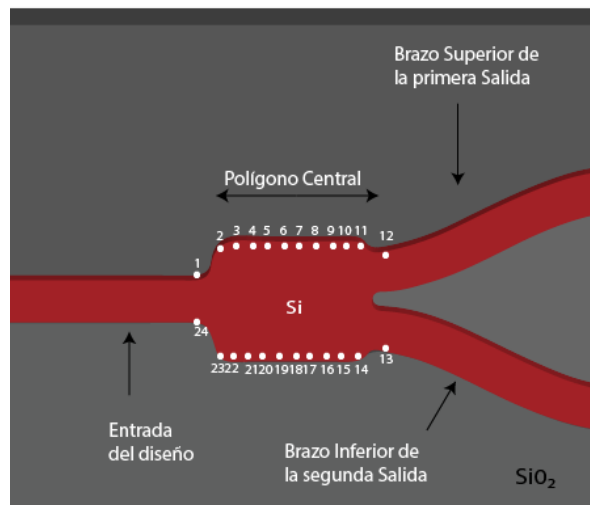


Figura 3.14 estructura del diseño del Interferómetro *Y-branch* con una guía de onda CWG con una (1) entrada con dos (2) salidas.

De acuerdo al script descrito en el Anexo a -Diseño del interferómetro multimodo continuo CWG 1X2, se configura el polígono central del diseño, donde w_2 estará dado por el segmento 2-23, w_3 estará dado por el segmento 3-22, w_4 estará dado por el segmento 4-22, w_5 estará dado por el segmento 5-21, w_6 estará dado por el segmento 6-20, w_7 estará dado por el segmento 7-19, w_8 estará dado por el segmento 8-18, w_9 estará dado por el segmento 9-17, w_{10} estará dado por el segmento 10-15, w_{11} estará dado por el segmento 11-14.

Luego de ejecutada la configuración se optimizó usando el algoritmo de *Particle Swarm Optimization*, y una vez compiladas todas las iteraciones, se calcula la Figura de Mérito del divisor de potencia basado en MMI con guía de onda continua *CWG* con una (1) entrada con dos (2) salidas. El script usado para calcular la Figura de Mérito se encuentra en el Anexo a - Script del *FOM*.

Los resultados de la optimización son una lista de parámetros de los anchos, w definidos previamente en la fase de configuración. Sin embargo, para tener resultados de parametrización final, se usaron entradas con máximos y mínimos valores que dichos parámetros podían tomar. Estos valores se encuentran descritos en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1 Valores que definen el valor máximo y mínimo para iniciar la optimización del ancho del polígono del interferómetro *Y-BRANCH*

Parámetro	Mínimo	Máximo
W1	0.5	0.6
W2	0.5	0.7
W3	0.6	0.8
W4	0.8	1.0
W5	1.0	1.5
W6	1.3	1.5
W7	1.3	1.5
W8	1.3	1.5
W9	1.2	1.5
W10	1.2	1.3

En la Figura 3.15 se muestra la configuración del dominio computacional para el análisis de potencia. Se usan las condiciones de frontera PML para simular un dominio infinito en todas las direcciones, se usan monitores de potencia para calcular la transmitancia o la potencia normalizada con respecto a la entrada. Por último, cada puerto se define a partir del análisis modal bidimensional *CWG*. En azul se observa la fuente, que es un puerto por donde se inyecta potencia en forma del modo calculado, y en los monitores 1 y 2 se realiza la lectura de las potencias de salida. Para observar y analizar el campo eléctrico dentro y alrededor del polígono de estudio de optimización se coloca un monitor central.

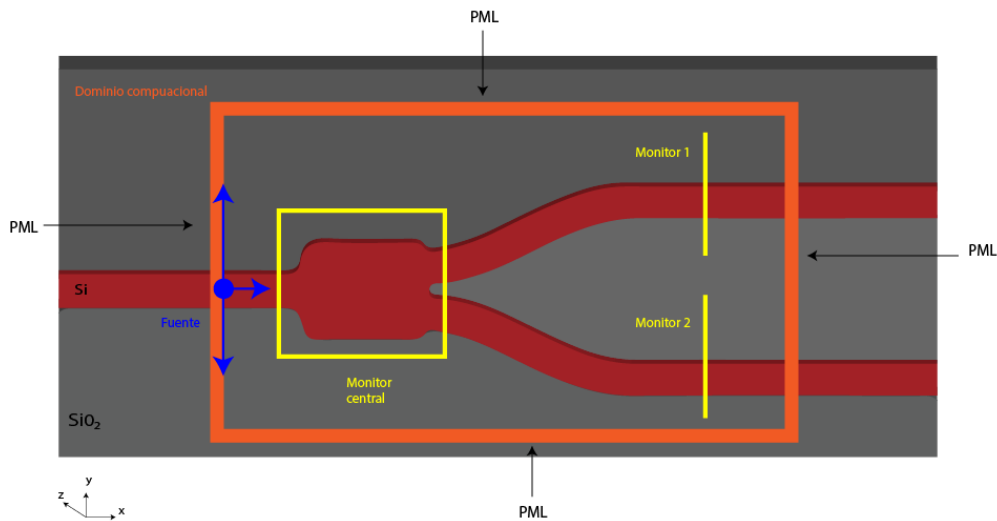


Figura 3.15 diseño de la optimización del Interferómetro *Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG* con una (1) entrada con dos (2) salidas.

Se propone también un divisor de potencia basado en interferómetro multimodal con cuatro salidas y una sola entrada. El polígono central tiene ahora un formato de 8 vértices y dimensiones tales como: $W_{\text{mmi}} = 4.856 \mu\text{m}$ definido por los vértices 2 y 7 y 3 a 6, y el largo $L_{\text{mmi}} = 28.432 \mu\text{m}$ de los vértices 2 a 3 y de 7 a 6, de acuerdo a la Figura 3.17. El script de la geometría del interferómetro para divisor de 1x4 se encuentra en el Anexo b- Diseño del interferómetro multimodo continuo CWG 1X4.

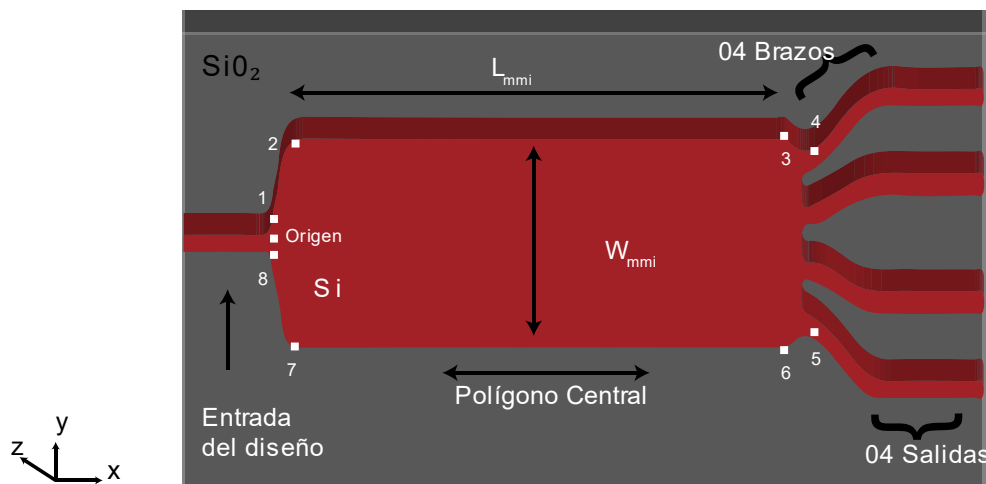


Figura 3.16 estructura del diseño del Interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG* con una (1) entrada con cuatro (4) salidas.

Los 08 vértices definidos en la Figura 3.16 se configuran en el Anexo b y se ubican de acuerdo a las coordenadas descritas en la Tabla 3.2, donde las coordenadas X y Y de los 8 vértices del MMI denotan las ubicaciones en micrómetros del interferómetro de la Figura 3.17 respecto al origen de coordenadas

Tabla 3.2 Relación de los vértices con su posición XY, respecto a su origen de coordenadas.

Origen de coordenadas	Vértice	X (μm)	Y (μm)
X= 0 μm ; Y = 0 μm	1	0	0.225
	2	1	2.42804
	3	29.4327	2.42804
	4	30.4327	2.04603
	5	30.4327	-2.04603
	6	29.4327	-2.42804
	7	1	-2.42804
	8	0	-0.225

Para evaluar la potencia de salida en un modo determinado, nuevamente se propone un script de Figura de mérito, detallado en el Anexo b-Script del *FOM*.

La Figura de mérito se obtiene nuevamente en cada evaluación de las iteraciones de la optimización por *Particle of swarm*. La configuración de esta optimización es como sigue: 60 generaciones y un tamaño de cada generación de 30 individuos. Los rangos de valores que el algoritmo podrá explorar son: W_{mmi} con un mínimo de 4.5 μm y un máximo de 5.5 μm , y un largo L_{mmi} con un mínimo de 26.5 μm y un máximo de 29.5 μm . Estos valores se irán optimizando gracias al algoritmo seleccionado. Llegando así a tener el mejor valor de optimización el $W_{\text{mmi}} = 4.85608 \mu\text{m}$ y el $L_{\text{mmi}} = 28.4327 \mu\text{m}$. La configuración del Script del *FOM* muestra que esta vez se optó por usar la minimización de las pérdidas, maximizando así la potencia de salida. Al final de la optimización se obtuvo un $FOM = 0.0142593$.

La configuración de monitores se encuentra descrita en la Figura 3.17. Las salidas tienen cuatro monitores y se usa una entrada de potencia en el brazo izquierdo de entrada. Se define también un monitor de propagación del campo eléctrico, de color amarillo llamado monitor central, que hace un corte longitudinal, es decir un plano que corta la estructura del núcleo en la mitad de la altura.

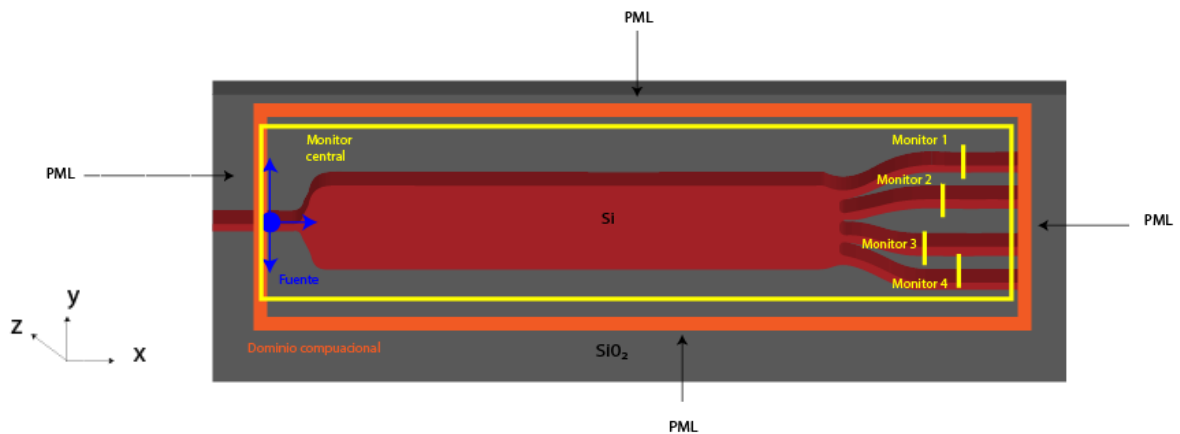


Figura 3.17 diseño de la geometría inicial del interferómetro multimodal de guías de onda CWG con una (1) entrada con cuatro (4) salidas, mostrando los monitores donde se tomaron datos del campo eléctrico resultante del análisis.

La geometría computacional total usada en las simulaciones es de (largo, ancho, altura): $42\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$. Por último, las condiciones de fronteras usadas fueron: en el eje x: *PML*, en el eje y: *PML*, mientras el eje z: *PEC*, obteniendo el diseño de la Figura 3.18.

3.6. Interferómetro multimodal *SWG*

Para la simulación de un Interferómetro Multimodal *SWG* se usa el simulador *3D-FDTD* de propiedad *Lumerical*, que permite resolver las ecuaciones de Maxwell descritas en el capítulo 2 de esta tesis. De esta forma vamos a verificar los indicadores del índice de refracción efectivo n_{eff} (auto-valor), el n_{eff}^* (índice equivalente), campo eléctrico E (auto-vector), normalizado, y la dispersión de la transmitancia en función al modelo de las salidas del diseño. Luego de analizar esta geometría, se espera que los diseños cuenten con un grado más de libertad, de acuerdo a la teoría mostrada en el capítulo 2. Se propone un diseño de interferómetro multimodal segmentados de una (1) entrada y dos (2) salidas, usando optimización lineal por primera vez en la literatura. Con la finalidad de observar la propagación de la luz y evaluar como es el comportamiento de este interferómetro como un divisor de potencia. Los materiales y configuraciones se encuentran descrita en la Figura 3.18.

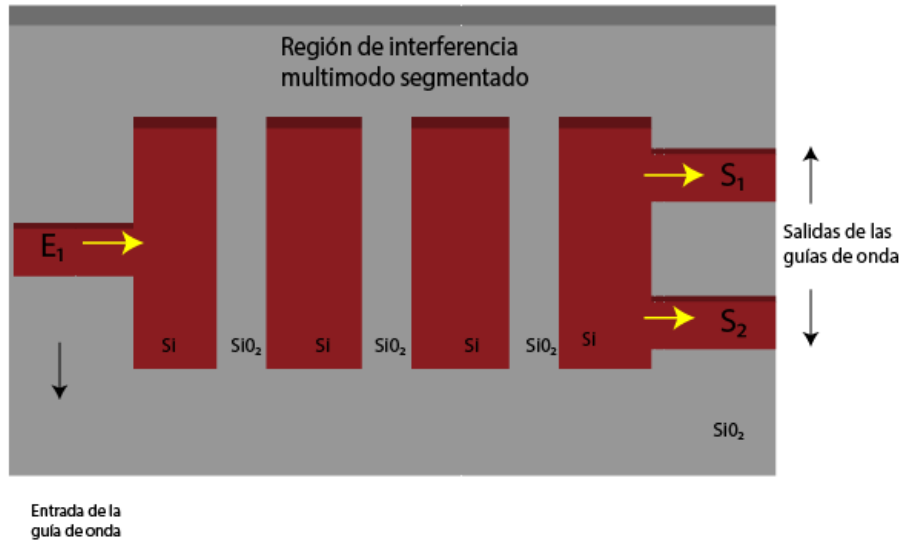


Figura 3.18 diseño de un Interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada (E_1) y 02 salidas (S_1 y S_2)

Como en el caso del divisor de potencia CWG, el divisor SWG también considera una entrada E_1 y dos Salidas S_1 y S_2 . El análisis que se describe en esta sección incluye el cálculo de la potencia en los brazos, relativo a la potencia de entrada y la representación del campo eléctrico en los brazos y en el interferómetro.

Hasta donde se ha explorado en la literatura actual, es la primera vez que se propone un diseño donde se utilice optimización lineal para el diseño de divisores de potencia MMI segmentados sobre las bandas de comunicaciones por fibra óptica SCL [53].

Se debe tener en cuenta las condiciones de guiamento en una guía SWG, garantizando que el campo eléctrico se transmita de forma cíclica y permanente con la misma intensidad, tal como se definió en el punto 2.3.1.

El diseño usa la plataforma de materiales propuesta desde el inicio de esta tesis. El dominio computacional tiene las dimensiones $30\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ de longitud, ancho y alto, respectivamente. La guía de onda de entrada al diseño tiene una longitud, ancho y alto de $5\mu\text{m} \times 0.45\mu\text{m} \times 0.22\mu\text{m}$. Permitiendo la transmisión monomodo en la plataforma de materiales. De acuerdo a las secciones definidas en la Figura 3.19, se definen polígonos que representan los segmentos de la estructura SWG, así como también un *duty cycle* variable, es preciso mencionar definir al *duty cycle* (ciclo de trabajo) como la división entre el ancho de guía de onda segmentada y el periodo , $n = \frac{a}{\lambda} = \text{duty cycle}$. Cada uno de los polígonos pueden ser cuadriláteros o trapecios dependiendo de la

optimización. Los scripts que se usaron para el diseño se encuentran en el Anexo d- Diseño del interferómetro MMI SWG 1X2.

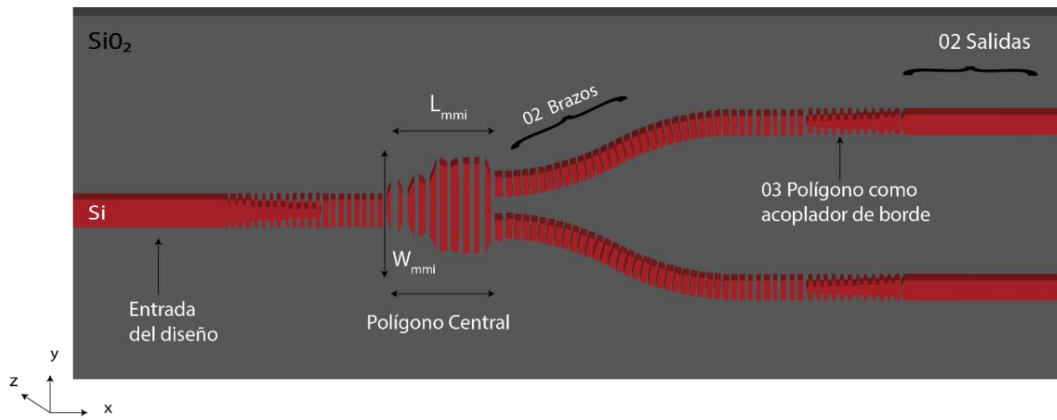


Figura 3.19 diseño de un interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas.

Los segmentos que conforman el polígono central hacen el total de longitud del MMI, L_{mmi} y el ancho total de w_{mmi} representados en la Figura 3.19. El polígono central del MMI, w_{mmi} , esta formado por anchos variables obtenidos de la optimización, estos anchos variables son los 10 polígonos pequeños que se encuentran espaciados equitativamente a lo largo del eje x con un periodo de $0.25 \mu\text{m}$, los anchos de estos 10 polígonos de acuerdo al script del Anexo d están representados por: $w_1, w_3, w_5, w_7, w_9, w_{11}, w_{13}, w_{15}, w_{17}, w_{19}$ y el ancho, w_{21} se usará para el inicio de los dos brazos del diseño, con un valor inicial de $0.45 \mu\text{m}$. Estos anchos son parte de la solución parametrizadora que resulta de optimizar usando el código script del Anexo d- Diseño del interferómetro MMI SWG 1X2. Los polígonos que forman el polígono central se definen por vértices cuya posición de origen se obtiene luego de las optimizaciones realizadas, por otro lado, el valor de estos vértices se obtiene al ejecutar la optimización descrita en el script en el Anexo d. Cuyo valores de los vértices luego de realizar la optimización se encuentra descrito en la Tabla 3.3, así como en la Figura 3.20.

Tabla 3.3 valor final de los vértices de los 10 polígonos que forman la parte central del interferómetro *SWG MMI 1x2* respecto a su posición de origen.

Polígono, con ancho w	Posición de origen del polígono	Vértices tomados a distancia de la posición de origen del polígono	X: Posición del eje x al finalizar la optimización	Y: Posición del eje y al finalizar la optimización
1, con ancho w_1	X(μm)= -4.845; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.057	0.225
		2	0.057	0.547
		3	0.057	-0.547
		4	-0.057	-0.225
2, con ancho w_3	X(μm)= -4.595; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.057	0.547
		2	0.057	0.3
		3	0.057	-0.3
		4	-0.057	-0.547
3, con ancho w_5	X(μm)= -4.345; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.067	0.3
		2	0.067	0.627
		3	0.067	-0.627
		4	-0.067	-0.3
4, con ancho w_7	X(μm)= -4.095; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.075	0.627
		2	0.075	0.516
		3	0.075	-0.516
		4	-0.075	-0.627
5, con ancho w_9	X(μm)= -3.845; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.085	0.516
		2	0.085	0.95
		3	0.085	-0.95
		4	-0.085	-0.516
6, con ancho w_{11}	X(μm)= -3.595; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.092	0.95
		2	0.092	0.892
		3	0.092	-0.892
		4	-0.092	-0.95

Tabla 3.3 -continuación

7, con ancho w_{13}	X(μm)= -3.345; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.095	0.892
		2	0.095	0.975
		3	0.095	-0.975
		4	-0.095	-0.892
8, con ancho w_{15}	X(μm)= -3.095; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.0775	0.975
		2	0.0775	0.97461
		3	0.0775	-0.97461
		4	-0.0775	-0.975
9, con ancho w_{17}	X(μm)= -2.845; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.0625	0.97461
		2	0.0625	0.975
		3	0.0625	-0.975
		4	-0.0625	-0.97461
10, con ancho w_{19}	X(μm)= -2.595; Y(μm)=0; Z(μm)=0;	1	-0.05	0.975
		2	0.05	0.7
		3	0.05	-0.7
		4	-0.05	-0.975

La Tabla 3.3 nos muestra las posiciones finales de sus vértices en las coordenadas X y Y respecto a su posición de origen de los 10 polígonos que forman el polígono central del interferómetro *MMI SWG* de acuerdo a la optimización del script descrito en el Anexo d- Diseño del interferómetro *MMI SWG 1X2*.

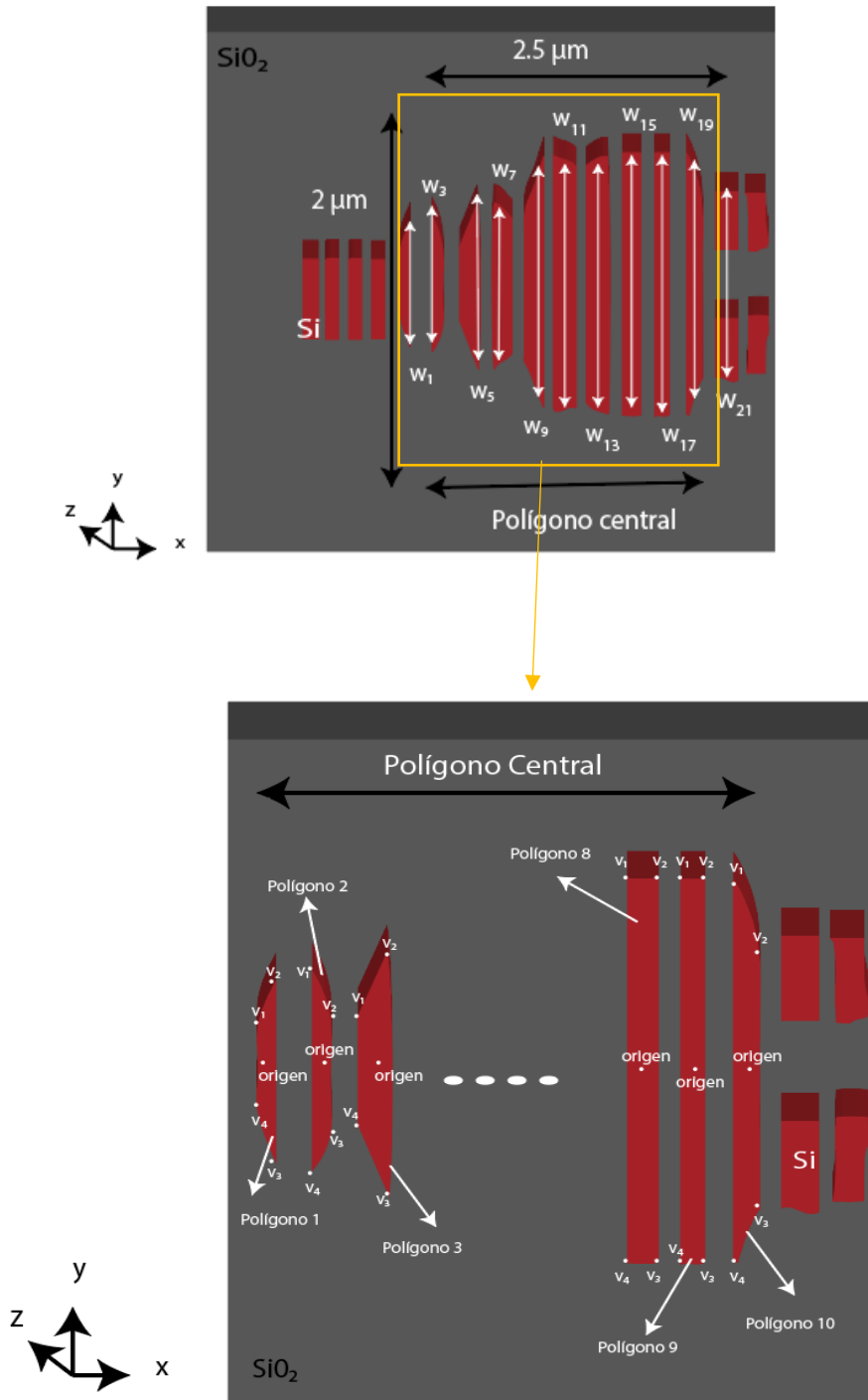


Figura 3.20 polígono central descrito en la figura 3.19 del diseño de un interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas, con los anchos respectivos: $w_1, w_3, w_5, w_7, w_9, w_{11}, w_{13}, w_{15}, w_{17}, w_{19}$, la posición de sus vértices y origen respectivos, tal como se describió en la Tabla 3.3.

La Figura 3.20 nos muestra la ubicación XY de los vértices de los 10 polígonos que forman el polígono central del interferómetro SWG MMI 1x2 respecto a su origen, tomando en cuenta los valores obtenidos de la optimización del script del Anexo d, descritos en la Tabla 3.3

Otra parte importante del diseño es una curva de Bézier de los brazos del interferómetro *MMI SWG 1X2*. Para este diseño se consideró un radio grande de $r = 10 \mu\text{m}$, con la finalidad de evitar pérdidas por curvatura. Los cuadriláteros mencionados en el diseño podrán mantener una posición casi recta a lo largo de la región de los brazos. Logrando que haya una deslocalización menor, manteniendo así el modo dentro del núcleo, tal como se observa en la Figura 3.21.

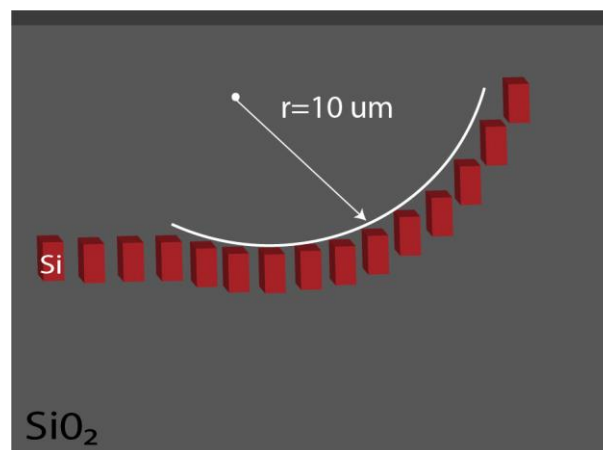


Figura 3.21 curva de bézier aplicado en los brazos del interferómetro *MMI SWG 1X2*.

Cuando se realiza una curvatura en una guía de onda se cambia de dirección del vector de propagación, este vector de propagación tiene cierta inercia hacia la misma dirección, por lo que al cambiar la dirección siempre tiende a mantener su dirección anterior que es la recta, al darle un radio grande permite curvar lentamente. Con esta curva se calcula el ángulo de rotación y el tamaño de cada cuadrilátero, tal como se definió en el Anexo d- Diseño del interferómetro *MMI SWG 1X2*.

Una vez obtenido el diseño de nuestro interferómetro modelo *MMI* en una guía de onda segmentada *SWG* con una (1) entrada con dos (2) salidas, se procede a definir el script del modelo mediante la *figure of merit (FOM)*, tal como se observa en el Anexo d- Script del *FOM*.

La optimización por *Particle of swarm* se realizó con un máximo de generaciones en 50 y el tamaño de cada generación de 20 individuos.

Finalmente, otros parámetros relevantes para la optimización son los ciclos de servicio o duty cycle ($dc2_i$, donde $i = 1, 2, \dots, 10$) tal como se observa en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4 valores máximos y mínimos del dutty cycle para iniciar la optimización de los polígonos que forman la parte central del interferómetro *SWG MMI 1X2*.

Parámetro	Mínimo	Máximo
dc2_1	0.2	0.75
dc2_2	0.2	0.75
dc2_3	0.2	0.75
dc2_4	0.2	0.75
dc2_5	0.2	0.75
dc2_6	0.2	0.75
dc2_7	0.2	0.75
dc2_8	0.2	0.75
dc2_9	0.2	0.75
dc2_10	0.2	0.75

De igual forma se definirá los anchos de los 10 polígonos que forman la parte central ($w_1, w_3, w_5, w_7, w_9, w_{11}, w_{13}, w_{15}, w_{17}, w_{19}$) del interferómetro *SWG MMI 1X2*, y el ancho w_{21} que se usará para el inicio de los dos brazos del diseño, tal como observamos en la Tabla 3.5.

TABLA 3.5 valores máximos y mínimos del ancho de los 10 polígonos que forman la parte central del interferómetro para iniciar la optimización

Parámetro	Mínimo	Máximo
w1	0.45	1
w3	0.5	1.2
w5	0.6	1.4
w7	0.6	1.6
w9	1	1.8
w11	1	1.9
w13	1	1.9
w15	1.2	1.95
w17	1.2	1.95
w19	1.2	1.95
w21	1.4	1.95

Estos valores iniciales ingresarán al algoritmo de optimización y luego de realizar las iteraciones, se hallarán los mejores parámetros por medio del cálculo de una figura de mérito, en este diseño se espera tener el valor cercano a 0.5; luego de realizar la optimización se obtuvo un valor de 0.427415.

El monitoreo de campo eléctrico incluyen dos monitores transversales en cada uno de los brazos de salida del divisor de potencia y un monitor longitudinal denominado monitor central en la Figura 3.22.

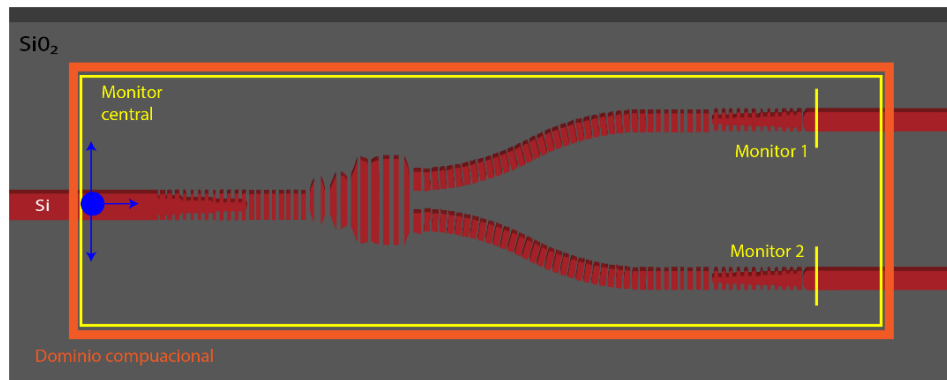


Figura 3.22 diseño de un Interferómetro multimodo segmentado SWG de 01 entrada y 02 salidas

Las condiciones de frontera usadas fueron *PML*, en el eje x: *PML*, el eje y: *PML*, y el eje z: *PML*.

3.7. Design Rule Check para fabricación compatible con CMOS

Hacer uso de un *Design rule check (DRC)* nos permite verificar si un diseño específico logra cumplir con las restricciones impuestas por la tecnología del proceso que se utilizará para su fabricación, esta verificación viene hacer una parte clave del flujo de diseño físico logrando que el diseño logre con los requisitos de fabricación y así no resulte en una falla del chip [57].

Este diseño estará alineado para la fabricación de CMOS cumpliendo con [25].

- Substrato: SOI con 220 nm Si, 2 μ m de óxido enterrado
- Módulo WG (*WaveGuide*): grabado completo de Si de 220 nm para guías de onda, cristales fotónicos, etc.
- Módulo FC (*FiberCoupler*): grabado parcial de Si de 70 nm para acopladores de fibra, guías de ondas de costillas, etc.
- Módulo SK (*Socket*): 150 nm parcial Si etch
- Substrato de elección: óxido depositado o resistencia protectora

Los dos últimos tipos de etching (o corrosión) son usados para posibles acopladores entre fibra y chip, que no se describen en este trabajo de tesis, pero que son usados en

todos los dispositivos fotónicos integrados de Silicio sobre aislante. Por último, los diseños son compatibles con tecnología de fabricación *Multi-Project Wafer* [25]. Esta tecnología permite abaratar los costos del mercado para la producción de obleas de Silicio, reduciendo el precio para cada uno de los participantes y dividiendo obleas entre varias instituciones participantes.

- Los prototipos se producen en la fabricación de obleas de 220 *nm* de IMEC o cualquier otro proveedor de servicios SOI (Silicon on Insulator), utilizando:
 - Tecnología de máscara 0.13 μ m (WG, FC, SK)
 - Litografía *DUV* de 193 *nm*, optimizada para aplicaciones fotónicas genéricas
 - Grabado en seco *ICP-RIE*, optimizado para aplicaciones fotónicas genéricas
 - Deposición de óxido y herramientas *CMP*.
 - Control estadístico del proceso de todas las herramientas / cámaras.

CAPITULO IV

ANALISIS Y RESULTADOS

Los resultados de aplicar las metodologías descritas en el capítulo 3, se muestran de manera sistemática en el presente capítulo.

Este capítulo está organizado en cuatro secciones principales: (1) Resultados del análisis modal periódico de los SWG, (2) resultados de la optimización de divisores de potencia SWG y comparación con divisores de potencia CWG, (3) un análisis de la factibilidad de fabricación, (4) y resultados de una nota de aplicación sobre el uso de los SWG como filtros para la detección de enfermedades del palto.

4.1. Análisis modal del SWG

Los materiales utilizados son: silicio con índice de refracción de $n_{Si}=3.4757$ [27], y un sustrato de óxido silicio con un índice de refracción de ($n_{SiO_2}=1.4431$) [27]. Se utiliza la metodología de simulación de célula fundamental presentada en capítulo 3.

La malla es del tipo uniforme con un ajuste de $s \quad dx = dy = dz = 0.025 \mu m$, con condiciones de frontera en el eje X: *Bloch* y en el eje Y y Z : *PEC*; además se usó una fuente local de 03 dipolos eléctricos.

Se analizaron los resultados para las longitudes de onda se configuró la lectura desde $0.8 \mu m$ a $2 \mu m$ de acuerdo al rango de longitudes establecidas en las diferentes etapas de la enfermedad del marchitamiento del Laurel, ver Figura 4.19. También se consideró un monitor de frecuencia con la finalidad de identificar las longitudes de onda con el valor de onda elegida (k), en este monitor se estable el rango de longitudes de onda indicados líneas arriba, además con 150 puntos de frecuencia, obteniendo lo mostrado en la Figura 4.2 y 4.3.

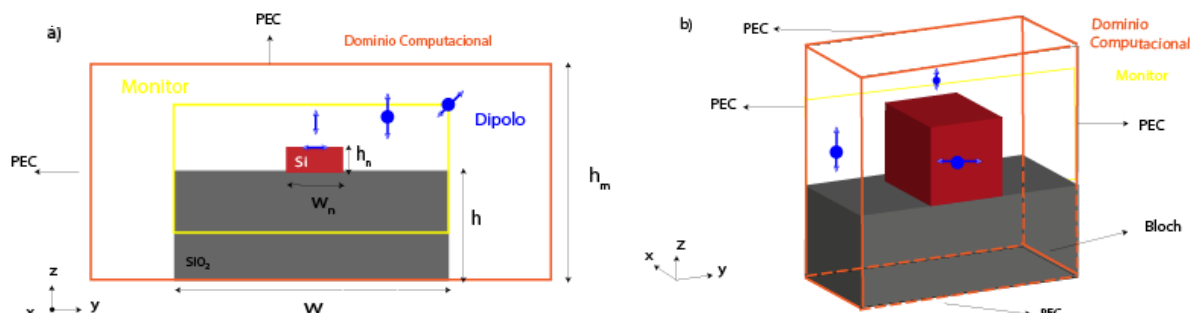


Figura 4.1 análisis del diseño del filtro en un guía de onda SWG

En la Figura 4.1 se observa las diversas vistas, a) es la vista yz y b) es la vista general del diseño, que se obtendrá al momento de realizar el análisis modal en el software *LUMERICAL*. Se puede observar las dimensiones del núcleo y el substrato, donde h es la altura del substrato $h = 2 \mu\text{m}$, h_n la altura del núcleo $h_n = 0.22 \mu\text{m}$, w_n el ancho del núcleo $w_n = 0.45 \mu\text{m}$, w el ancho del substrato $w = 1.85 \mu\text{m}$, l la longitud del substrato a lo largo del eje x , $l = 0.10 \mu\text{m}$, l_n la longitud del núcleo $l_n = 0.175 \mu\text{m}$ y w_m el ancho de la malla $w_m = 2 \mu\text{m}$. Además, también se puede observar las condiciones de frontera y malla del dominio computacional.

Para el análisis modal segmentado, se usan como entradas los valores de onda de $k = 0.1$ hasta 0.8 , y el cálculo deberá aumentar las frecuencias o longitudes de onda correspondientes con estos números de onda. El par resultante de este análisis modal SWG da como resultado 15 modos con dos polarizaciones fundamentales, modos, *TE*, *TM* y algunos otros modos de orden superior tal como se observa en el Anexo Teórico en la Figura 4.1.

4.1.1. Campo Eléctrico

El resultado del campo eléctrico de los 15 modos encontrados con dos polarizaciones fundamentales, modos, *TE*, *TM* se encuentra descritos en el Anexo Teórico en la Figura 4.1. Cada una de las dispersiones de los campos eléctricos representados allí, se encuentran asociados a una solución de autovalores y autovectores. Los autovalores corresponden al índice efectivo. El índice efectivo calculado numéricamente se encuentra descrito en la siguiente subsección.

4.1.2. Dispersión

Las longitudes de onda obtenidas al variar el valor de la onda k nos permite determinar que longitudes se encuentran en que segmento del diagrama esquemático de dispersión de una guía de onda segmentada, véase Figura 4.2 y Figura 4.3

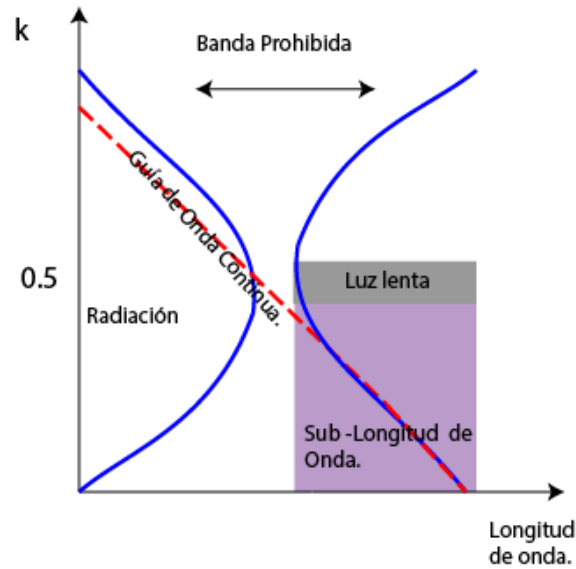


Figura 4.2 diagrama esquemático de dispersión.

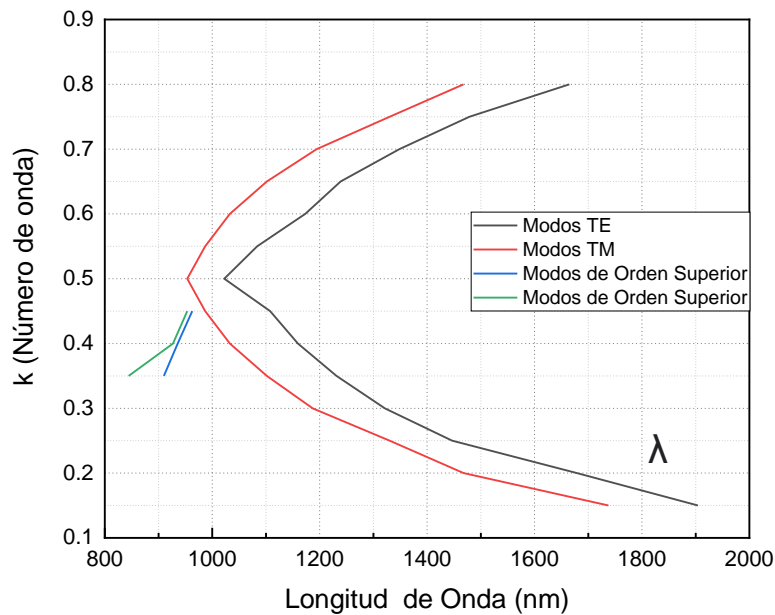


Figura 4.3 variación del número de onda, k , con resultado de los modos TE , TM y orden superior.

De la Figura 4.2 y la Figura 4.3 podemos observar que las longitudes de onda que se encuentren más cerca al valor de onda $k = 0.5$, tanto para los modos TE y TM se encontrarán en la región de la banda prohibida (Bandgap), es decir las longitudes que van desde los 800 a 1000 nm. Por otro lado, las longitudes que van desde 1000 a 1400 nm se encontrarán dentro de la región de la luz lenta, no encontrándose ninguna sub-longitud de onda dentro de estas longitudes para ser usada en nuestro diseño. En cambio, las longitudes que van desde los 1400 nm para adelante, estarán dentro de la región sub-longitud de onda. Además, estos resultados nos confirman que la consideración del periodo

tomado en el diseño, es la correcta. El valor del periodo 240 nm , cumple con la ecuación 2.10 de la sección 2.3.1.

4.2. Interferómetros multimodales segmentados como divisores de potencia

Un divisor de potencia tiene la función de dividir el haz de luz que ingrese en uno o más entradas que posea. Dividiéndolas en N guías de ondas, de manera equilibrada. Los modelos de divisores de potencia esenciales, considerados en la presente tesis son el divisor de potencia de ramificación en forma de Y (*Y-branch*) y el interferómetro multimodal (*MMI*).

4.2.1. Divisor de potencia de ramificación en forma de Y (*Y-branch*)

El diseño *Y-branch* tiene una característica de dividir el haz de luz de una guía de onda en dos guías de onda iguales, cumpliendo así la función de divisor. Por otro lado, este diseño también puede funcionar como un combinador, haciendo que dos guías de onda se conviertan en una sola [51].

Un divisor de potencia, llamado también *Y-branch* por su formato mostrado en la Figura 4.4, es un dispositivo que divide la intensidad de entrada en dos iguales a la salida. Con una intensidad entrante I , las guías de onda de salida por definición serán divididas equitativamente, teniendo así en cada salida tiene una intensidad de $\frac{I}{2} = I_1 = I_2$



Figura 4.4 diseño de un divisor de potencia *Y-branch*

Una consideración en el diseño *Y-branch* sería que no puede ser catalogado como un dispositivo de tres puertos, debido a que su función es dividir el haz de luz en 50/50% en sus salidas. Es decir, si la luz está presente en un puerto de entrada, la salida sería reducida a la mitad de la luz incidida en la entrada [51].

La principal diferencia entre un divisor de potencia de ramificación en forma de *Y-branch* y el interferómetro multimodal. Radica en que los *MMI* son más macizos en relación a la ramificación en forma de *Y-branch*. Por otro lado, la ramificación en forma de *Y-branch* poseen una baja pérdida en contraste de los *MMI*. Esto se debe a la rugosidad que poseen

las caras laterales y a los ángulos entre los brazos de salida del *Y-branch* [33]. En este trabajo de tesis se usarán divisores de potencia basados en MMI, como ya se describió previamente en el capítulo 3.

4.2.2. Interferómetro multimodal (MMI)

En la actualidad hay diversos diseños de interferómetros, siendo el más conocido el interferómetro de Michelson, o el de Mach-Zehnder. Estos generalmente son bastante grandes y son utilizados en guías de onda monomodo [13]. Por otro lado, existen interferómetros que generan una interferencia dentro del mismo dispositivo (interferencia intermodal), llamados los interferómetros multimodales (MMI) [33] [37].

Los MMI son dispositivos que se encuentran basados en el efecto llamado auto-imagen de una guía de onda multimodo [21]. El efecto resulta de la interferencia constructiva entre los modos estimulados en la guía de onda. Donde el efecto provoca que el campo óptico genera uno o varias imágenes del campo de entrada, haciéndolo periódico a lo largo de la dirección de trasmisión o propagación de la guía [56].

Existen tres diferentes estructuras de MMI, entre ellas están el interferómetro multimodo general (GMMI), interferómetro multimodo emparejado (PMMI) y el interferómetro multimodo simétrico (SMMI) [52], en estas estructuras la posición de entrada de guía de onda y la longitud de las guías de onda multimodo se encuentran definidas por lo indicado en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 comparación de las 03 estructuras de MMI [53].

Estructura del MMI	GMMI	PMMI	SMMI
Posición de la guía de onda de entrada.	$w_e/(N + 1)$	$w_e/(3)$ y $2w_e/(3)$	Al centro de la guía de onda multimodo.
Longitud de la guía de onda multimodo	$3L_\pi/(N)$	$L_\pi/(N)$	$3L_\pi/(4N)$

La Tabla 4.1 nos muestra una comparación entre las diversas estructuras de un MMI. Donde w_e viene hacer al ancho efectivo de la guía de onda multimodo la misma que es un poco más grande que el ancho geométrico del W_{mmi} de la guía de onda [52], N es el número de puertos o salidas del diseño, L_π viene hacer la longitud de pulso de los modos, el mismo que está definido por

$$L_\pi = \frac{4n_r w_e^2}{(3\lambda_0)} \quad (4.1)$$

Por otro lado, el

$$L_{\text{mmi}} = \frac{3L\pi}{(4N)} = \frac{n_r \left[w_{\text{mmi}} + \left(\frac{n_c}{n_r}\right)^{2\Omega} \times \frac{\lambda_0}{\pi(n_r^2 - n_c^2)^{\frac{1}{2}}} \right]^2}{N\lambda_0} \quad (4.2)$$

donde n_r es el índice de refracción del núcleo y n_c es el índice de refracción del revestimiento, λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre y $\Omega = 0$ cuando los modos de transmisión son TE y $\Omega = 1$ cuando los modos sean TM [52].

Las posiciones de las salidas de los MMI se encuentran influenciadas por la uniformidad de la potencia de transmisión y para calcular la posición de sus salidas se basa en el principio de simetría, para ello se usa la ecuación (4.3) [52].

$$y_i = \pm \frac{[2i-(N+1)]}{2N} w_{\text{mmi}} , i = 1 \dots \dots N , \text{ es el número de puertos.} \quad (4.3)$$

Los *MMI* son dispositivos que permiten reubicar la energía de una manera predecible, debido al cambio de la dimensión de la guía de onda en donde se propague la señal [33]. Lo importante en la estructura de estos dispositivos es que un guía de onda tiene la capacidad de albergar un gran número de modos [27 y 31]. En un diseño esquemático de un *MMI* podremos observar como una guía de onda monomodo de ancho $2a$ y alto $2d$ se conecta a la guía de onda multimodo (ver Figura 4.5).

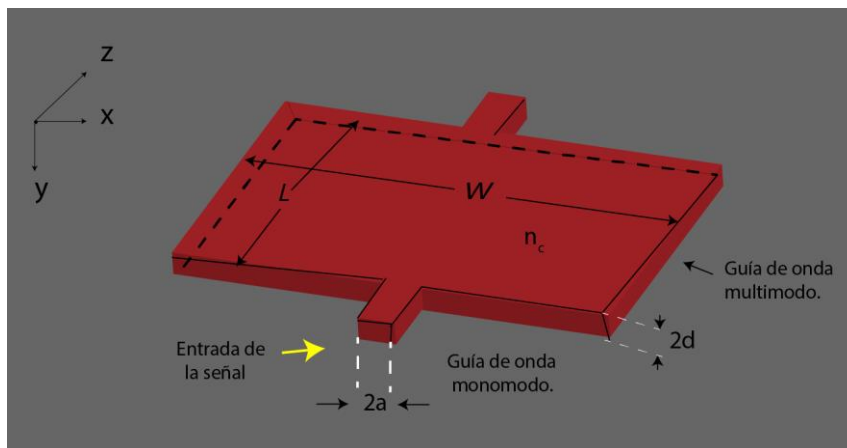


Figura 4.5 configuración esquemática de un *MMI* [34].

La Figura 4.5 muestra la configuración esquemática tridimensional de un *MMI* con ancho, largo y alto de la región multimodal son W , L y $2d$ respectivamente. La alimentación de la región multimodal se da a través de una guía de onda monomodo (con ancho $2a$ y

alto 2d). Los índices de refracción del núcleo (ya sea de una guía monomodo y multimodo) y del sustrato están representados por n_c y n_0 correspondientemente.

La estructura tridimensional de un MMI puede ser llevado a una estructura bidimensional, mediante el método del índice efectivo. El índice efectivo n_{eff} del núcleo es obtenido mediante el análisis de Marcatili a lo largo del eje y , obteniendo así la Figura 4.6 [34].

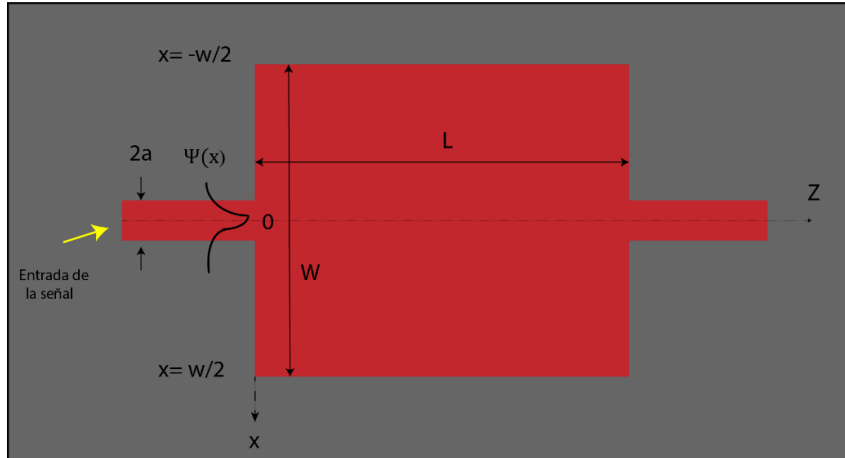


Figura 4.6 representación bidimensional de un *MMI* [34].

La Figura 4.6 nos muestra la representación bidimensional de un *MMI* con un índice efectivo n_{eff} y un índice de refracción del sustrato n_0 .

El campo eléctrico en la región de un *MMI* se calcula mediante las ecuaciones de dispersión. Para el modo TE_m , $E_m^y(x, y)$, en la guía de onda multimodal se representa por la ecuación (4.4) [34].

$$E_m^y(x, y) \begin{cases} A_m \cos\left(u_m + \frac{m\pi}{2}\right) \exp\left[\frac{2w_m}{W}\left(x + \frac{W}{2}\right) - i\beta_m z\right] & (x < -\frac{W}{2}) \\ A_m \cos\left(\frac{2u_m}{W} x - \frac{m\pi}{2}\right) \exp(-i\beta_m z) & (|x| \leq \frac{W}{2}) \\ A_m \cos\left(u_m - \frac{m\pi}{2}\right) \exp\left[-\frac{2w_m}{W}\left(x - \frac{W}{2}\right) - i\beta_m z\right] & (x > \frac{W}{2}) \end{cases} \quad (4.4)$$

Donde u_m y w_m son los números de onda transversales del modo m -ésimo en el núcleo y sustrato, mientras que A_m es una constante y β_m es la constante de propagación para el modo m .

Si el ancho del núcleo W de un *MMI* es grande, su frecuencia normalizada v también será grande. Provocando así que u_m se aproxime a $u_m \cong (m + 1)\pi/2$. Entonces la

constante de propagación para el modo m , β_m estará representado por la ecuación (4.5) [34].

$$\beta_m = \sqrt{k^2 n_{\text{eff}} - \left(\frac{2u_m}{W}\right)^2} \cong k n_{\text{eff}} - \frac{(m+1)^2 \lambda}{4 n_{\text{eff}} W^2} \pi \quad (4.5)$$

La ecuación (4.3) representa el principio de autoimagen, que es una característica de las guías de onda multimodales, en donde la onda entrante se repite en una o varias imágenes en intervalos periódicos a lo largo de su dirección de propagación $k n_{\text{eff}} = \beta_0$ [34].

El campo eléctrico total en el interior de una región MMI se obtiene mediante una sumatoria de todos los campos eléctricos de todos los modos que posea (asumiendo M modos), el mismo que se encuentra representado por la ecuación (4.6) [34].

$$\Psi(x, z) = \sum_{m=0}^M E_y^m(x, z) \quad (4.6)$$

En este trabajo se considerará la estructura del *MMI* simétrica, por tal motivo, la guía de onda entrante estará en el centro de la región. En esta estructura los modos son simétricos por lo que el valor de m es un número par $m=2p$ y p es un número entero. En el punto $z=L_{\text{mmi}}$ la ecuación (4.6) puede ser rescrita como la ecuación (4.7) [34].

$$\Psi(x, L_{\text{mmi}}) = e^{-i k n_{\text{eff}} L_{\text{mmi}} + i \frac{\pi}{4}} \sum_{m=0}^M A_m \cos\left(\frac{(m+1)\pi}{W} x - \frac{m\pi}{2}\right) \quad (4.7)$$

La característica de la longitud de un *MMI* está definida por la ecuación (4.8) [34].

$$L_{\text{mmi}} = \frac{n_{\text{eff}} W^2}{\lambda} \quad (4.8)$$

para encontrar la longitud de un *MMI* que servirá como divisor de potencia, es necesario escoger primero la cantidad de salidas requeridas, N , por lo que el *MMI* debe tener una longitud de $L = \frac{L_{\text{mmi}}}{N}$ [34].

Teniendo en cuenta que el campo eléctrico de la guía de onda de entrada (x), la ecuación (4.5), puede reescribirse como la ecuación (4.9), donde ($x; 0$) [34].

$$\Psi(x, L_{\text{mmi}}) = \Psi(x) e^{-i k n_{\text{eff}} L_{\text{mmi}} + i \frac{\pi}{4}} \quad (4.9)$$

La ecuación (4.9) permite comprobar que el campo eléctrico saliente toma el formato del campo eléctrico entrante a una longitud determinada L_{mmi} con una fase distinta [34].

4.2.3. Análisis modal SWG multimodo

En relación a la verificación de la componente del campo eléctrico de una guía de onda segmentada del modo TM y del modo TE , se encuentra descrito en el Anexo teórico en la sección 4.2.

4.2.4. Conversión de CWG a SWG

Un bloque fundamental de un circuito que usa guías de onda SWG es la conversión de guías de onda tradicionales continuas a guías de onda segmentadas. Una conversión abrupta podría causar pérdidas por dispersión, y una conversión muy adiabática podría ahorrarnos las pérdidas, pero ocupar un área demasiado grande en el chip. A esto se debe la importancia de realizar diseños de optimización para estos dispositivos, este diseño se encuentra descrito en el Anexo teórico en la sección 4.3.

4.2.5. Divisor de potencia 1x2

En esta sección vamos a analizar los resultados obtenidos de la geometría descrita en la sección 3.5 referente al diseño *Y-branch* basado en *MMI* con una (1) entrada y dos (2) salidas 1x2 en una guía de onda CWG, y en la sección 3.6 referente a nuestro diseño de un interferómetro multimodal SWG con una (1) entrada y dos (2) salidas 1x2.

4.2.5.1. Divisor de potencia 1x2 CWG

La geometría y las dimensiones de este diseño fueron señaladas en la sección 3.5 permitiendo así obtener la Figura 4.7. El ancho de la guía es de $0.5 \mu m$ y el largo del diseño es de $0.22 \mu m$, dimensiones recomendadas en el *SOI*, además nos permite tener que solo un modo se propague a través de cada guía de onda [33], [43].

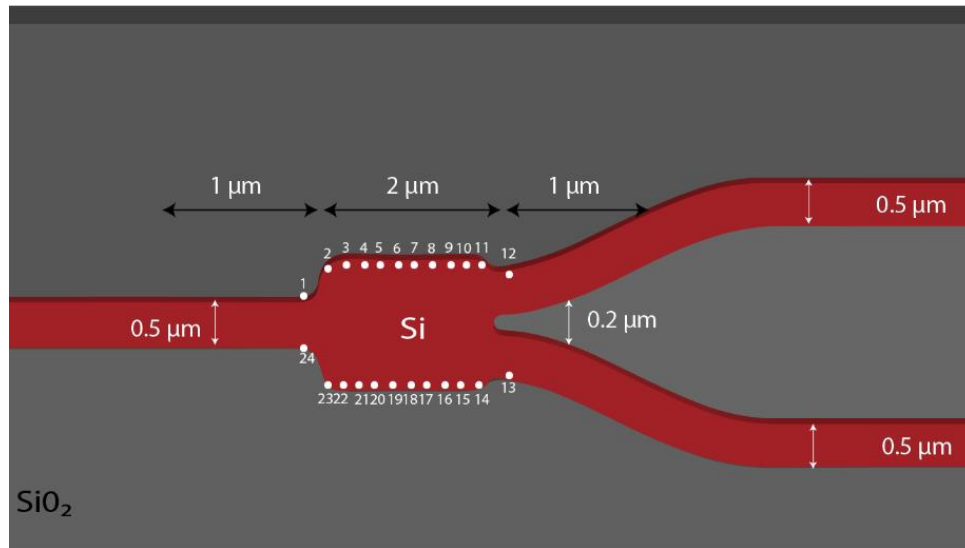
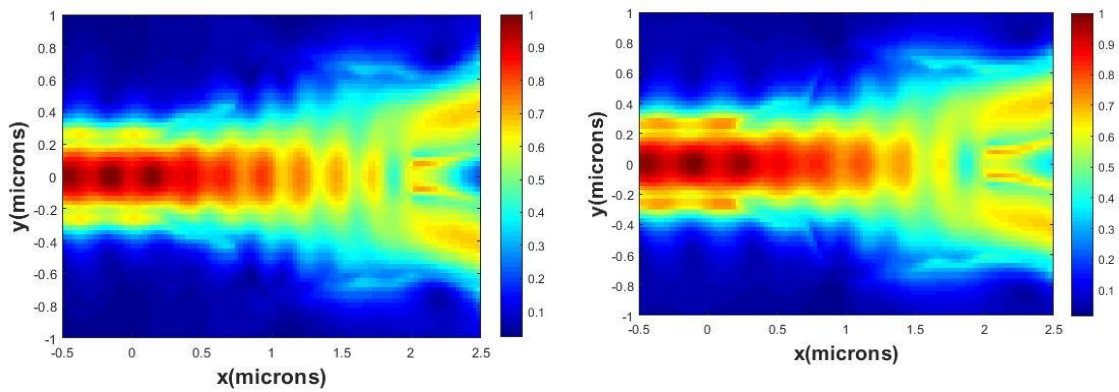


Figura 4.7 interferómetro *Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda CWG con una (1) entrada con dos (2) salidas.

En relación a los resultados obtenidos referente al modo fundamental en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas SCL 1460 – 1625 nm , se observa que la distribución del campo eléctrico en la longitud de onda $\lambda = 1460$ nm y $\lambda = 1625$ nm en la entrada del diseño , en la primera salida superior y en la segunda salida inferior del diseño, tal como se observa la sección 4.4. en las Figura 4.13 y Figura 4.14 del Anexo Teórico.

En cuanto al resultado del confinamiento de la potencia en el núcleo se realizó dos mediciones, tanto para la longitud de onda $\lambda = 1460$ nm. y $\lambda = 1625$ nm lo que nos permitió tener la Figura 4.8.



a) Distribución del campo eléctrico en una guía de onda $\lambda = 1460 \text{ nm}$

b) Distribución del campo eléctrico en una guía de onda $\lambda = 1625 \text{ nm}$

Figura 4.8 distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro forma *Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG-1x2*.

La Figura 4.8 a) muestra la distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1460 \text{ nm}$ donde la mayor intensidad se encuentra en el núcleo y esta disminuye conforme se acerca al sustrato. Por otro lado, la Figura 4.8 b) muestra una distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1625 \text{ nm}$ con una mayor intensidad en el recorrido en contraste con la Figura 4.8 a), de igual forma la mayor concentración de la energía se encuentra en el núcleo y disminuye también al acercarse al sustrato.

La geometría resultante luego de la optimización se presenta en la Figura 4.9, en donde el mayor valor se encuentra confinado dentro del núcleo, llegando a tener un valor de 3.48 y el sustrato de 1.44.

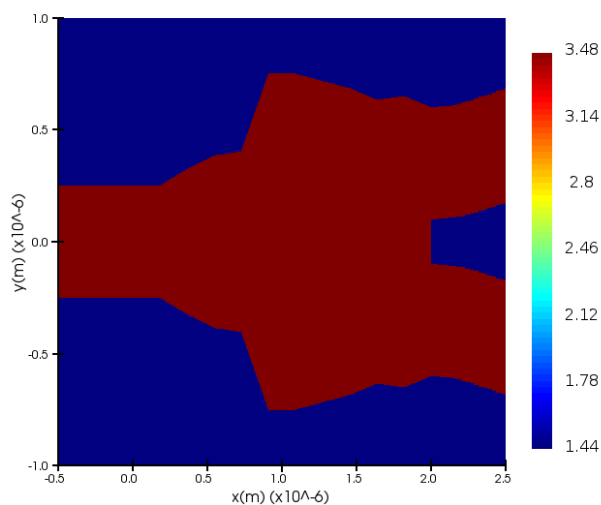


Figura 4.9 periodicidad de la parte central del interferómetro forma *Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG-1x2*.

Referente a la transmitancia obtenida en cada brazo de un interferómetro *forma Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG-1x2*, en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas *SCL* 1460 – 1625 *nm*, el valor obtenido fue cerca del 50% tal como se observa en la Figura 4.10.

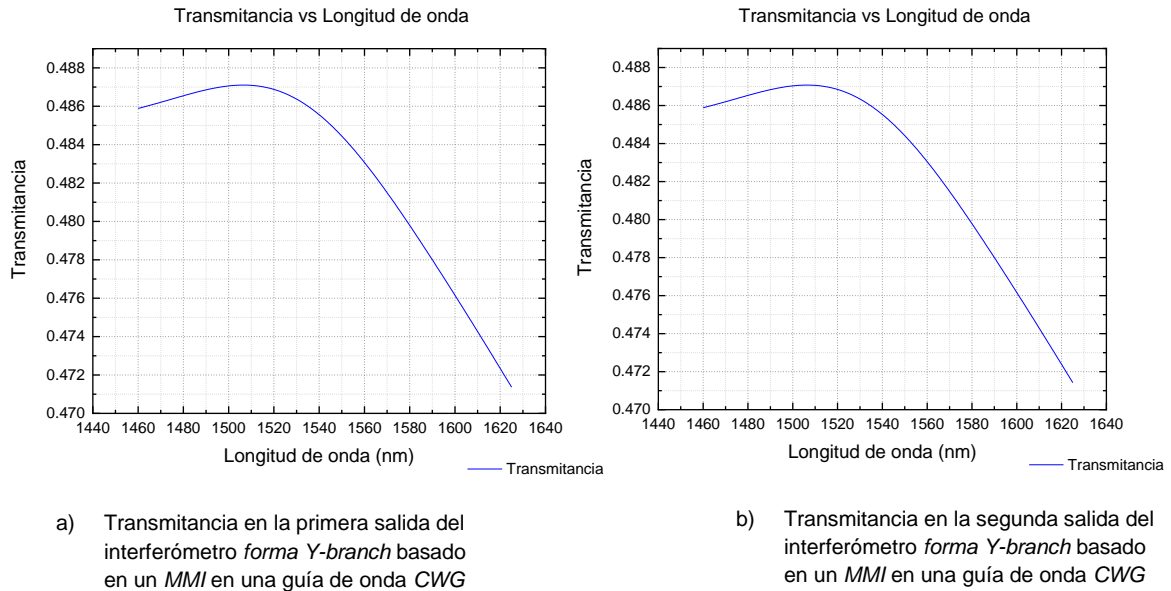


Figura 4.10 transmitancia en la primera salida y segunda salida del interferómetro *forma Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG*.

La Figura 4.10 muestra la transmitancia obtenida en las dos (2) salidas del interferómetro *forma Y-branch* basado en un *MMI* en una guía de onda *CWG* del modo fundamental en un ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas *SCL* 1460 – 1625 *nm*. En la Figura 4.10 a), la transmitancia en el rango de las frecuencias ópticas se encuentra por encima de los 47.2% teniendo como un máximo de 48.7% de la potencia de entrada. Por otro lado, en la Figura 4.10 b) también la transmitancia se encuentra sobre 47.2% alcanzando de igual forma un máximo 48.7% de la potencia de entrada. En la Figura 4.10 se puede comprobar lo mencionado en la sección 4.2.1 parte a), referente a que cada salida tiene una intensidad de $\frac{I}{2} = I_1 = I_2$, con respecto a la intensidad de la entrada *I*.

4.2.5.2. Divisor de potencia 1x2 *SWG*

La geometría, con la optimización y las dimensiones de este diseño fueron señaladas en la sección 3.6 permitiendo así obtener la Figura 4.16. En la Figura 4.11 se observa la geometría de nuestro interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG* con una (1) entrada con dos (2) salidas con las dimensiones establecidas en la sección 3.6. El ancho de la guía

es de $0.45 \mu m$ y el largo de nuestro diseño es de $0.22 \mu m$, dimensiones recomendadas en el SOI [43].

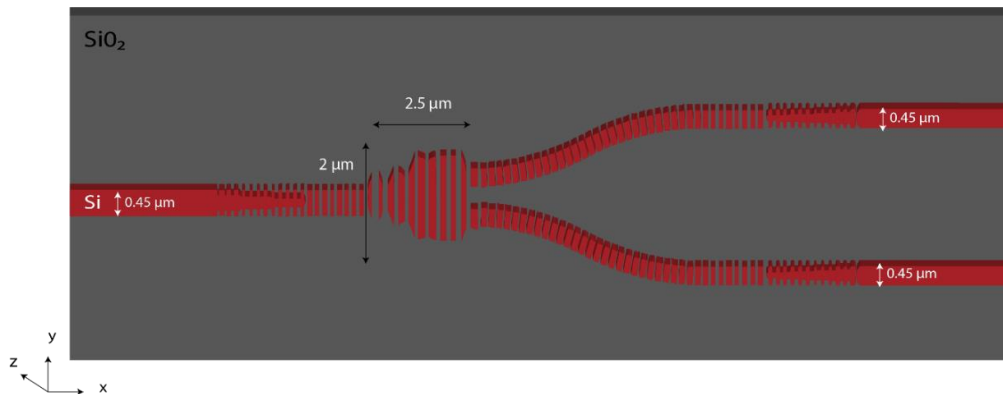


Figura 4.11 interferómetro *MMI* en una guía de onda SWG con una (1) entrada con dos (2) salidas.

En relación a los resultados obtenidos referente al modo fundamental en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas SCL $1460 - 1625 \text{ nm}$, se puede concluir que la distribución del campo eléctrico en la longitud de onda $\lambda = 1460 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y $\lambda = 1625 \text{ nm}$ en la entrada del diseño, en la primera salida superior y en la segunda salida inferior del diseño, tal como se observa la sección 4.5 en las Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 del Anexo Teórico.

4.2.6. Divisor de potencia 1x4

En esta sección vamos a analizar los resultados obtenidos de nuestra geometría descrita en la sección 3.5. referente a nuestro diseño de un MMI con una (1) entrada y cuatro (4) salidas 1x4 en una guía de onda CWG.

4.2.6.1. Divisor De Potencia 1x4 CWG

La geometría y las dimensiones de este diseño fueron señaladas en la sección 3.5 permitiendo así obtener la Figura 4.12. En la Figura 4.12 se observa la geometría de nuestro interferómetro *MMI* en una guía de onda CWG con una (1) entrada con cuatro (4) salidas con las dimensiones establecidas en la sección 3.5. El ancho de nuestra guía es de $0.45 \mu m$ y el largo de nuestro diseño es de $0.22 \mu m$, dimensiones recomendadas en el SOI. [43].

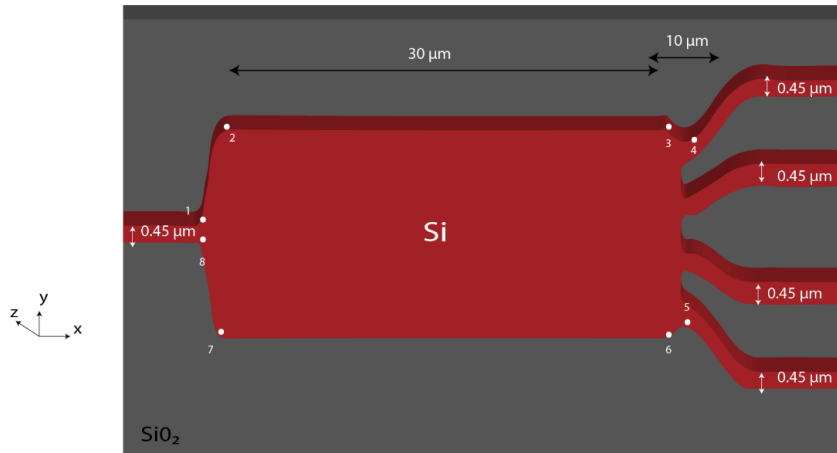


Figura 4.12 interferómetro *MMI* en una guía de onda CWG con una (1) entrada con dos (4) salidas.

En relación a los resultados obtenidos referente al modo fundamental en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas SCL 1460 – 1625 nm , se observa que, la distribución del campo eléctrico en la longitud de onda, $\lambda = 1550$ nm en la entrada del diseño, en la primera salida superior, en la segunda salida superior, en la primera salida inferior y en la segunda salida inferior del diseño, tal como se observa en la sección 4.6 en la Figura 4.18 del Anexo Teórico

En cuanto al resultado del confinamiento de la potencia en el núcleo se realizaron tres mediciones, tanto para la longitud de onda $\lambda = 1460$ nm , $\lambda = 1625$ nm y $\lambda = 1550$ nm donde se obtiene la Figura 4.13.

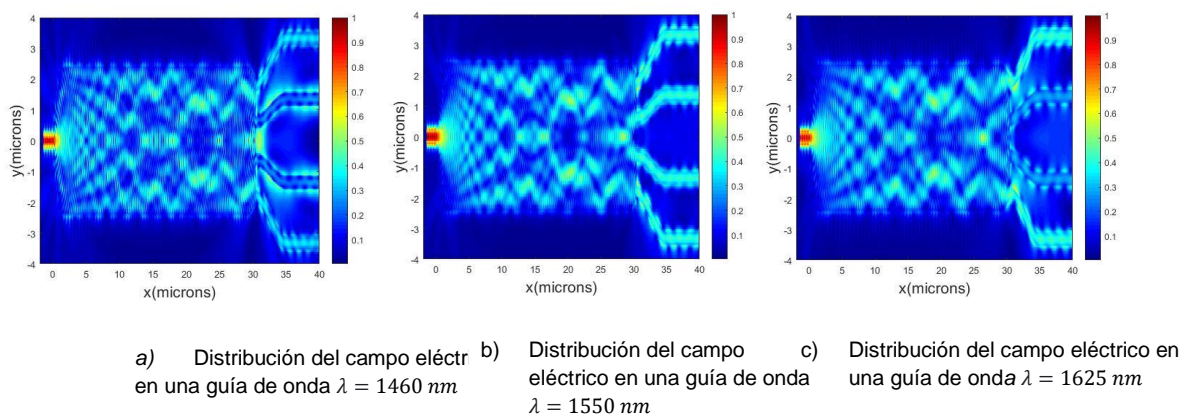


Figura 4.13 distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro *MMI* en una guía de onda CWG-1x4.

No existe una diferencia significativa entre las tres distribuciones del campo eléctrico, pero observa un mayor confinamiento de las longitudes de onda inferiores y un máximo confinamiento en el núcleo en la longitud de onda de 1550 nm , frecuencia para la cual se realizó el trabajo de optimización. El resultado geométrico de la optimización se encuentra en la Figura 4.14.

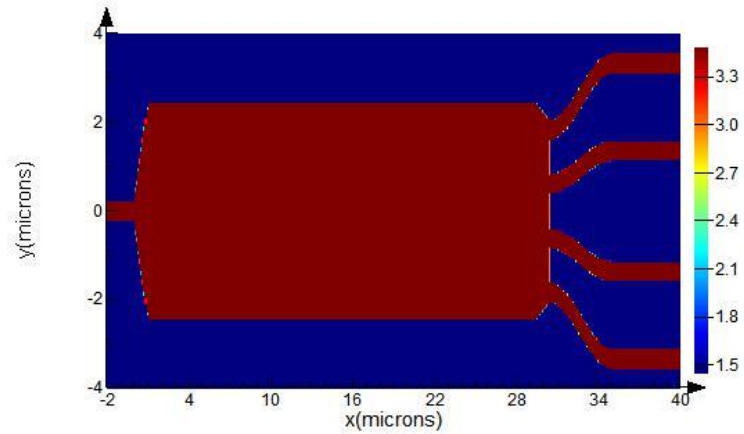
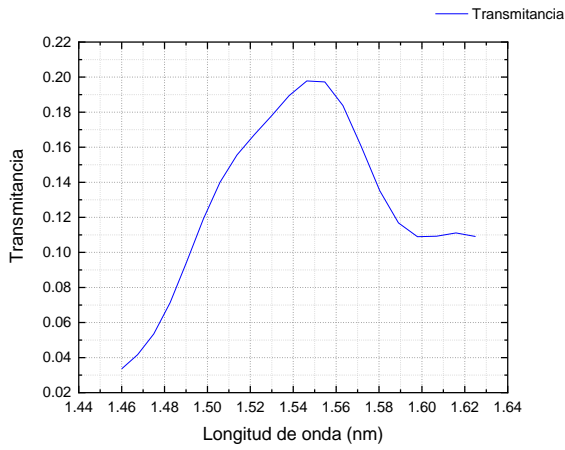
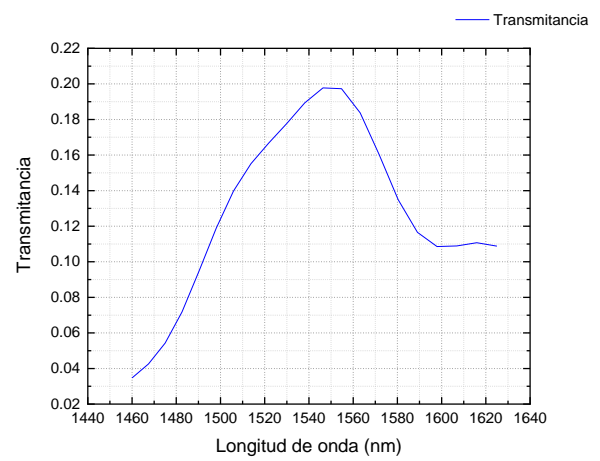


Figura 4.14 periodicidad de la parte central de un interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG-1x4*.

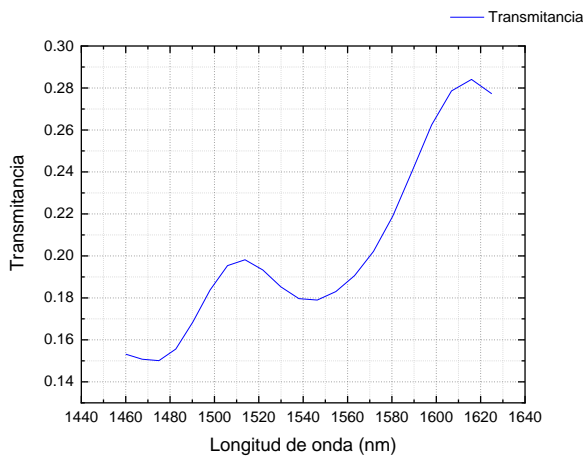
Referente a la transmitancia obtenida en cada brazo de un interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG-1x4*, en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas *SCL* $1460 - 1625\text{ nm}$, el valor obtenido fue mayor que 0.15 tal como se observa en la Figura 4.15.



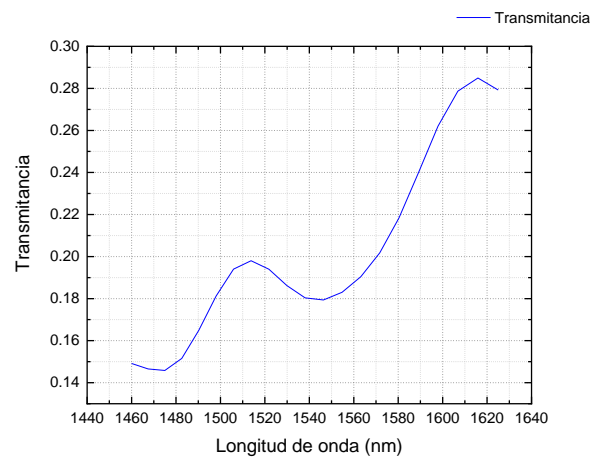
a) Transmitancia en la primera salida superior del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG*



b) Transmitancia en la segunda salida superior del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG*



c) Transmitancia en la tercera salida inferior del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG*



d) Transmitancia en la cuarta salida inferior del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG*

Figura 4.15 transmitancia en las cuatro (4) salidas del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG-1x4*.

La Figura 4.15 muestra la transmitancia obtenida en los cuatros (4) salidas del interferómetro *MMI* en una guía de onda *CWG* del modo fundamental en un ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas *SCL* 1460 *nm* – 1625 *nm*.

En la Figura 4.15 a) se observa que la transmitancia en el rango de las frecuencias ópticas se encuentra por encima de los 15 % teniendo como un máximo de 28.5 % de la potencia de entrada. Por otro lado, la Figura 4.15 b) se observa que la transmitancia se encuentra sobre 3.5 % alcanzando un máximo 19.5 % de la potencia de entrada, se observa además que en el rango de 1590 *nm* – 1625 *nm* , la transmitancia coge un valor de 11%.

De igual forma en la Figura 4.15 c) se observa que la transmitancia se encuentra sobre 3.5% alcanzando un máximo 19.5 % de la potencia de entrada, se observa además que en el rango de $1590\text{ nm} - 1625\text{ nm}$, la transmitancia coge un valor de 11%.

La Figura 4.15 d) se observa que la transmitancia se encuentra sobre 15 % alcanzando un máximo 28.5 % de la potencia de entrada. Finalmente, en la Figura 4.15 se puede comprobar lo esperado en la sección 3.5, referente a que cada salida del interferómetro MMI 1X4 tiene una intensidad aproximada a 25 %.

4.3. Factibilidad de fabricación

4.3.1. *Design Rule Check* aplicado a los dispositivos SWG

El avance de las investigaciones en los últimos años sobre el uso del Silicio ha permitido que sea considerado para integrar funciones ópticas [51]. La capacidad que ofrece de tener funciones ópticas económicas junto al hecho de que la fabricación CMOS permite fabricar los circuitos ópticos, como si fueran circuitos integrados electrónicos, los hace económicamente viables. Las funciones ópticas se pueden hacer compactas debido a su alto índice de refracción, logrando que a partir de una oblea SOI de $200\text{nm}/300\text{nm}$ se pueda obtener más circuitos fotónicos integrados. La oblea SOI consta de una capa de guía de onda de 220 nm .

Para una impresión en masa, la litografía óptica siempre ha sido la mejor opción. Esta técnica realiza copias de un patrón sobre una base sólida, como la oblea de SOI. Pero tiene como límite la difracción óptica, el mismo que ha sido superado por las nuevas técnicas de impresión como la Litografía por radiación ultra violeta profunda (*deep UV lithography*), que contiene una apertura numérica mayor. [6]

4.3.2. Litografía Por Radiación Ultra Violeta Profunda

La litografía por radiación ultra violeta profunda es la más utilizada en la microelectrónica, para la producción en masa compatible con CMOS, para ello se utiliza longitudes de onda menores a 250 nm [38], además el tamaño mínimo del diseño es de 100 nm , para compatibilidad con la litografía ultravioleta profunda. [12] o mínima de 50 nm para 193 nm deep-UV lithography technology [40]. Por otro lado la Litografía UV junto con el grabado establecen limitaciones al tamaño del diseño, donde el enterrado de óxido (BOX) es $2\mu\text{m}$ de espesor y una altura de silicio de 220nm , siendo valores usuales para una guía de onda de silicio sobre aislante, el ancho de la guía se considera menor de

500 nm [23]. Además, se establece un ciclo de trabajo en 50% siendo compatible con CMOS, donde el tamaño mínimo real del diseño es igual o superior a la mitad del período [55].

Luego de haber recopilado la información sobre este tipo de fabricación, se concluye que los dispositivos propuestos en esta tesis son factibles de fabricación usando litografía de UV, y por tanto, podrían escalar rápidamente para su producción en masa. Esta factibilidad de fabricación permite que más investigaciones de desarrollo tecnológico y otras de investigación aplicada puedan seguir al presente trabajo, donde se proponga integrar los divisores de potencia o los filtros propuestos en otras plataformas para diferentes aplicaciones que requieran de dispositivos reconfigurables, compactos y de bajo consumo energético que usen frecuencias ópticas del infrarrojo cercano o medio.

4.4. Aplicación de SWG para el diseño de filtros ópticos

Actualmente las demandas por alimentos de calidad han aumentado considerablemente. Por tal motivo los agricultores necesitan de herramientas amigables con las cosechas que sean precisas, rápidas y fáciles de utilizar, además de que sean capaces de brindar la información necesaria de las propiedades físicas y químicas de los cultivos en todas las etapas [19]. La palta es un fruto que actualmente posee una alta demanda en los mercados internacionales, de acuerdo a ProHass (asociación que agrupa a productores y empresas exportadoras de palta Hass) el Perú es el segundo y mayor productor de este insumo en lo que va el año, los importantes beneficios y propiedades para la salud hacen que su cultivo se encuentre en una alta expansión. Las características agrícolas y ecológicas de la costa peruana hacen que sean escenarios idóneos, logrando tener una producción continua durante todo el año, teniendo así una ventaja competitiva a nivel global [45].

Esta ventaja acompañada de técnicas y tecnológicas amigables y fáciles de implementar lograrán que se obtengan una fruta de muy buena calidad. Entre las técnicas de directa aplicación en el área agrícola, se puede mencionar el análisis espectral. Con este tipo de análisis en la planta de palto se podrá tener un mayor control en el producto (palta), consiguiendo identificar, por ejemplo, deficiencias nutricionales que puede presentar la plantación analizada como Nitrógeno (N) alrededor de la longitud de onda 409 nm – 671 nm , Fósforo (P) alrededor de la longitud de onda 545 nm – 671 nm , Potasio (K) alrededor de la longitud de onda 404 nm – 690 nm , Calcio (Ca) alrededor de la longitud de onda 375 nm – 656 nm Manganeseo (Mn) alrededor de la longitud de onda 379 nm –

601 nm , entre otros. Donde cada nutriente mencionado produce un espectro de emisión único que permite ser identificado al ser sometido a altas temperaturas [17 y 30].

No solo la deficiencia de nutrientes puede ser identificadas, sino que diversas enfermedades pueden ser detectadas mediante técnicas de análisis espectral, como la pudrición de la raíz por *Phytophthora*, daños por salinidad y la enfermedad del marchitamiento del Laurel, siendo la última la más mortal para la planta de palto [47].

La enfermedad del marchitamiento del Laurel (*LW*), es una enfermedad letal para la palta, que es provocada por un vector el escarabajo de ambrosía, cuya secreción salival provoca un hongo que mata la planta de palto al bloquear el flujo del agua hacia el dosel.

Esta secreción facilita un contagio rápido de planta en planta, siendo imposible controlar la enfermedad, una vez que las plantas lo padezcan generando grandes pérdidas en la producción y calidad de la fruta.

Un método rápido para la detención del *LW* permitirá de manera oportuna reducir el contagio. Existen varios métodos de detección de esta enfermedad, como la exploración y reacción en cadena de la polimerasa; sin embargo, su elevado costo y elevado tiempo de implementación ha llevado a que la reflectancia espectral sea la opción más idónea por ser más rápida y no destructiva [1].

La literatura muestra que el análisis espectral en el rango infrarrojo cercano (*NIR*) de 760 nm a 2500 nm, ayudaría a detectar de manera oportuna la enfermedad *LW* [1]. Las guías de onda segmentadas, presentadas en este trabajo, pueden ser diseñadas para funcionar como rechazadores de ciertas bandas de frecuencia, mientras dejan pasar otras. Esta dispersión dependería del período entre los segmentos, el duty cycle y el ancho y alto del núcleo segmentado. Los filtros resultantes permitirán dejar pasar únicamente las frecuencias relevantes que luego serán detectadas para tomar decisiones oportunas que potencialmente beneficien las plantaciones de palto.

4.4.1. Propuesta del diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (*LW*) en las plantas de palto

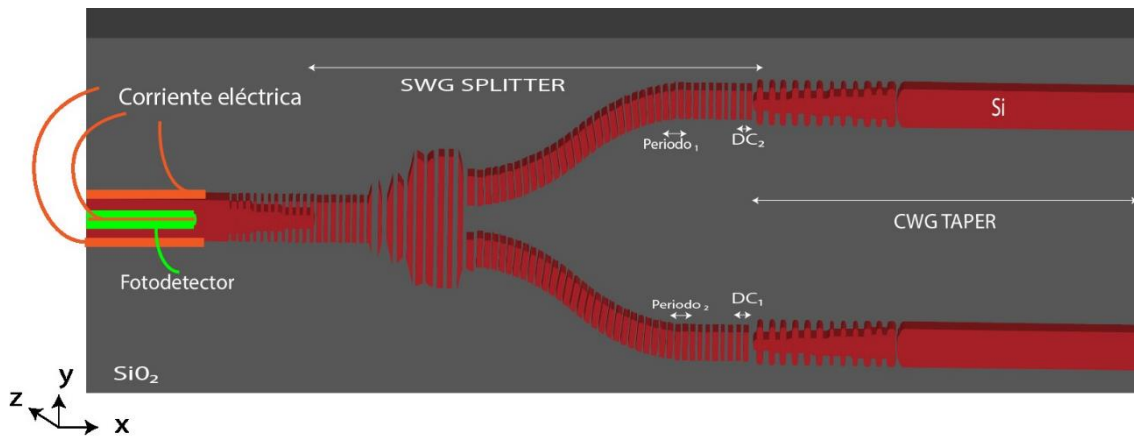


Figura 4.16 diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (*LW*).

En la Figura 4.16 se propone el diseño de un sistema a ser implementado para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (*LW*). Este diseño consta de una fuente de corriente eléctrica que será el alimentador, un fotodetector que permitirá sintonizar la luz que incide sobre la hoja a analizar, el fotodetector da señales de corriente de acuerdo a la amplitud detectada [50]. Además; el diseño del interferómetro segmentado propuesto en nuestra investigación de 1 entrada y dos salidas. En la entrada se propone el uso de un taper o una estructura cónica, que permitirá un mayor enfoque en la transmisión de la guía de onda hacia las salidas del diseño, con la finalidad de poder pasar de un diseño CWG a un SWG.

Con la estructura propuesta en nuestra investigación, tal como se observa en la Figura 4.17, será factible que este sistema funcione como un filtro de frecuencias, por el grado de libertad que posee, permitiendo así no solo configurar el ciclo de trabajo, sino también el periodo en cada brazo del sistema. En este diseño se detectará las guías de onda de un SWG que se encuentran conduciendo luz en las longitudes de onda de 1400 nm para adelante, siendo significativamente en el estudio de la enfermedad *LW*, pudiendo discriminarse entre la etapa inicial o etapa tardía de la enfermedad, e incluso verificar si la plantación de palto se encuentra saludable. tal como se aprecia en la Figura 4.18

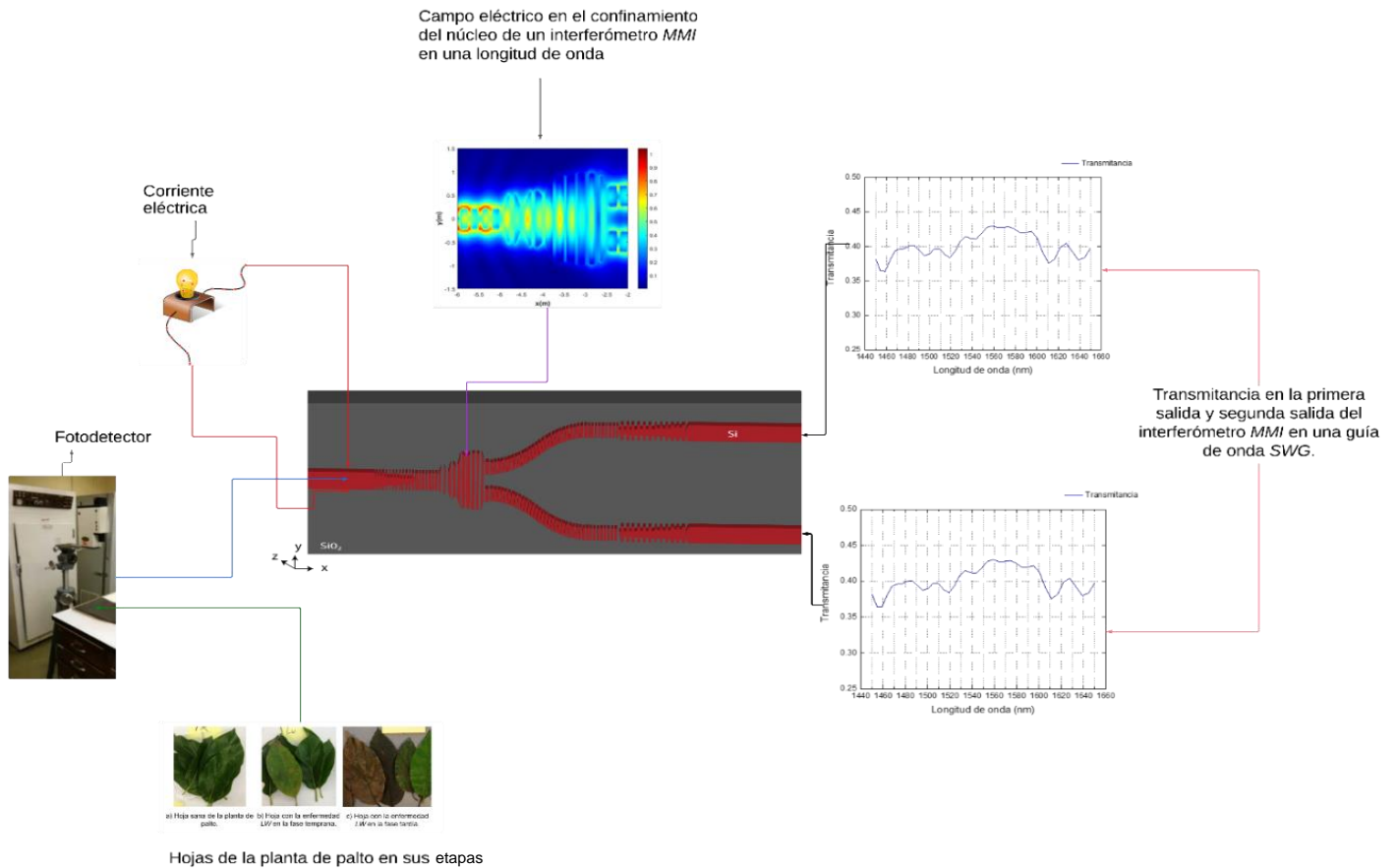


Figura 4.17 propuesta del diseño de un sistema para la detención de la enfermedad del marchitamiento del Laurel (LW) en las plantas de palto

4.4.2. Bandas para detección de las enfermedades en imágenes de hojas

La enfermedad *LW* puede ser identificada analizada en el rango del infrarrojo cercano. La reflectancia de la luz variará de acuerdo al estado de la enfermedad [1]. El primer objetivo de esta sección es elegir las bandas que permitan identificar cuando la hoja de la planta de palto se encuentra en la fase temprana o tardía de la enfermedad tal como se aprecia en la Figura 4.18 y la Figura 4.19.



a) Hoja sana de la planta de palto. b) Hoja con la enfermedad *LW* en la fase temprana. c) Hoja con la enfermedad *LW* en la fase tardía.

Figura 4.18 hojas de la planta de palto en sus diversas fases [1].

En la Figura 4.18 se observan las diferencias entre una hoja de la planta de palto sana contra las hojas de la planta de palto con la enfermedad del *LW*. La Figura 4.18a muestra una foto de hojas de palto sana [1], en cambio la Figura 4.18b y la Figura 4.18c muestran fotos de hojas de palto con la enfermedad *LW*, en las fases temprana y tardía, respectivamente. Las hojas que presentan la enfermedad *LW* poseen un verde más débil tendiendo al color marrón con contrastes rojos y púrpuras en la fase tardía. Como resultado de la falta de atención de esta enfermedad en su fase tardía se pueden generar pérdidas, en la calidad y cantidad de los frutos [22].

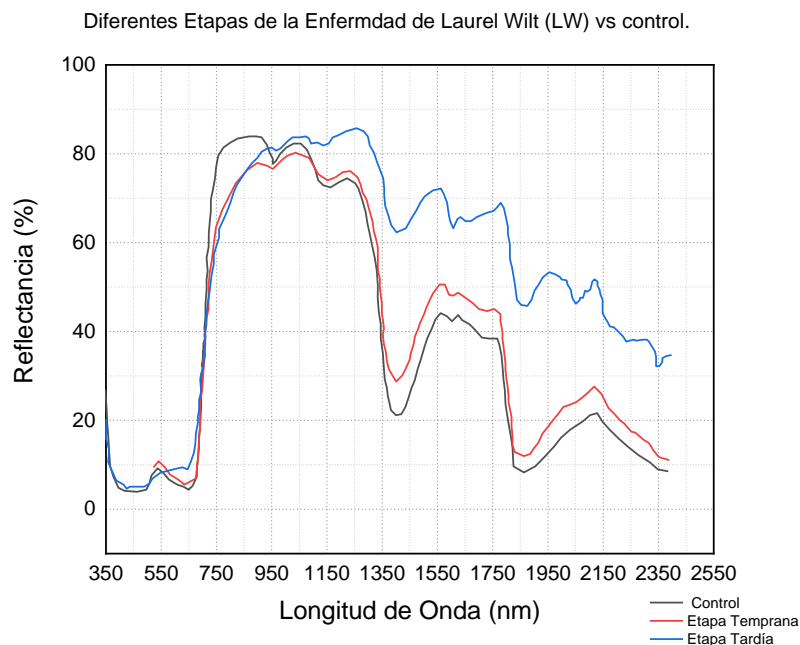


Figura 4.19 reflectancia de diferentes etapas de la enfermedad del marchitamiento del Laurel y de hojas sanas (control) [1].

4.4.3. Análisis modal y bandas de detección

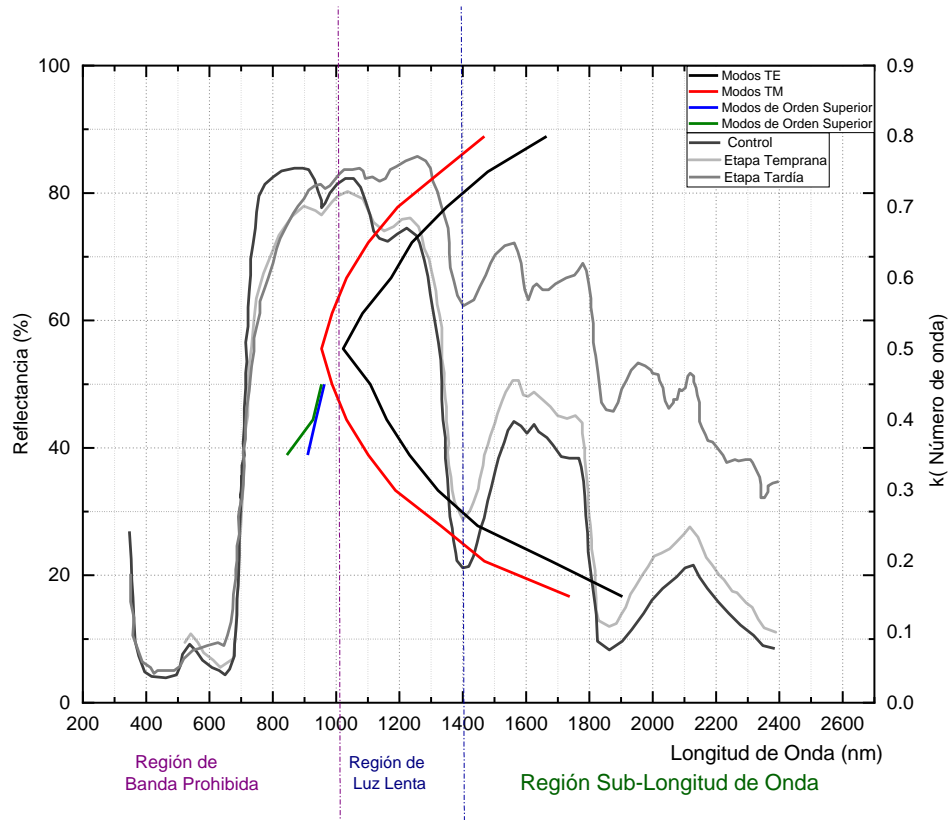


Figura 4.20 diseño de filtro que selecciona las longitudes de onda infrarrojas de la enfermedad de *LW* usando *SWG*

En la Figura 4.20 se observa una relación de los resultados obtenidos del análisis modal (lo obtenido en la Figura 4.3 que se obtiene de la Figura 4.1 del Anexo teórico) y lo obtenido del estado del arte (lo mostrado en la Figura 4.19). Donde se puede determinar que el diseño estará enfocado a la región de interés de análisis 1400 nm a 2000 nm por ser la región de sub-longitud de onda. Diseñar una guía de onda segmentada como un filtro pasa bajo, permite poder filtrar las frecuencias relevantes en las que se detecten un cambio significativo de la enfermedad *LW* verificando si se encuentra en la etapa tardía, temprana o sana, con el fin de poder tomar las medidas que sean necesarias en la planta de palto, tal como se observa en la Figura 4.19

Se resume de la Figura 4.20 que la región de la Banda prohibida para nuestro diseño se encuentra dentro de las longitudes 800 a 1000 nm, la región de luz lenta se encuentra dentro de las 1000 a 1400 nm y la región de sub-longitud de onda van desde los 1400 nm para adelante.

En la Figura 4.20 se observa la reflectancia tomada por medio del equipo espectro radiómetro portátil (SVC HR-1024i™) (Spectra Vista Cooperation, Poughkeepsie, NY, EE. UU.) que realizaron los autores [1] para caracterizar los diferentes estadios de la enfermedad LW y compararlo con las respuestas de hojas sanas. Las longitudes de onda 600 nm a 1400 nm muestran un primer lóbulo caracterizado donde el estadio temprano de la enfermedad LW (color rojo) se asemeja mucho a la amplitud recibida con las hojas de control u hojas sanas (color negro); sin embargo, en las longitudes de onda del infrarrojo cercano mayores que 1400 nm se observa una mayor diferencia de la amplitud de la reflectancia ente los estadios tempranos y tardíos de esta enfermedad. Por esta razón la propuesta de este trabajo incluye realizar un filtro dirigido a estas longitudes de onda que se encuentran en un rango mayor a 1400 nm y excluyen las longitudes de ondas inferiores.

Para realizar los filtros que van a permitir el paso de la luz a mayores longitudes de onda (es decir mayor a 1400 nm), los candidatos por excelencia son los guías de onda segmentados, que se están presentando en este trabajo de tesis. Los regímenes SWG permiten que se diseñe filtros pasa bajo donde las frecuencias inferiores a un corte determinado no van a ser propagadas hacia adelante, y sí las que son mayores a cierta longitud de onda.

Los SWG de Silicio no puede ser usado para detectar en el rango de las longitudes de onda cercanos a 760 nm debido a que tiene un comportamiento absorbente. En cambio, sí puede ser utilizado para detectar algún problema en el rango 1400 nm a 2500 nm ,debido a que el silicio tiene un comportamiento a ser transparente tal como se observó en la sección 2.3.4 parte A) del Anexo Teórico.

En este capítulo, se propone hacer un análisis modal para filtrar las frecuencias relevantes en las que se detecten un cambio significativo de la enfermedad LW en la planta del palto, tal como se observa en la Figura 4.20. [1] , siendo el rango de longitudes de onda a estudiar, 1400nm a 2000 nm.

4.4.4. Diseño de filtros segmentados

Considérese una guía de onda segmentada con periodicidad unidimensional funcionando como filtro, debido a que permite realizar la detención de la reflectancia de las hojas que podrían contener el LW y posteriormente, con la ayuda posterior de un fotodetector, puede ser capaz de discriminar las amplitudes de las hojas de control de hojas enfermas.

El primer desafío, es conseguir un periodo determinado usando los materiales estudiados hasta ahora y una geometría determinada para poder filtrar a partir de los 1400 nm . Luego de realizar estudios se propone usar *FDTD* para resolver las ecuaciones de Maxwell descritas en la sección 2.1. El tipo de malla usado es cartesiano rectangular.

Luego de evaluar que las guías de onda de un *SWG* se encuentran conduciendo luz en las longitudes de onda de 1400 nm para adelante, nos permite determinar que una posible aplicación del diseño propuesto ayudaría significativamente en el estudio de la enfermedad *LW*. Además, se puede detectar la amplitud del campo eléctrico o estimación de la potencia por medio de un fotodetector. El fotodetector da señales de corriente de acuerdo a la amplitud detectada [50], pudiendo discriminarse entre la etapa inicial o etapa tardía de la enfermedad, e incluso verificar si la plantación de palto se encuentra saludable. Por tal motivo si se lograra a completar la integración presentada en la Figura 4.8, se obtendrá una aplicación de una integración sobre una plataforma de sensores para un control adecuado de una enfermedad a estudiar. Debido a que el diseño del filtro pasa bajo realizado en una guía de onda *SWG* trabaja en longitudes de onda mayores a 1400 nm, le permite situarse en la región del mayor cambio significativo de la enfermedad de *LW* (ver Figura 4.20), y con la ayuda del fotodetector la identificación del estado de la enfermedad ya sea temprana o tardía será más precisa.

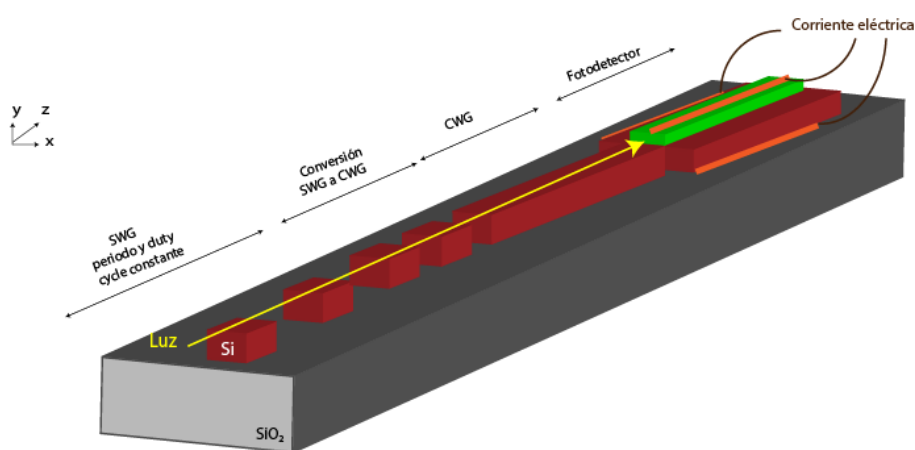


Figura 4.21 integración sobre una plataforma de sensores para la detención de enfermedades.

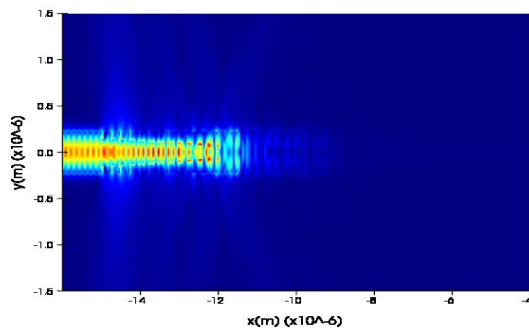
La Figura 4.21, muestra la integración de una posible aplicación del diseño del filtro propuesto en la sección 4.4.1 el mismo que puede estar integrado en la etapa llamado “SWG periodo y *duty cycle* constante”, las demás secciones son una recomendación que

permitirá obtener una aplicación integrada sobre una plataforma de sensores para la detención de enfermedades.

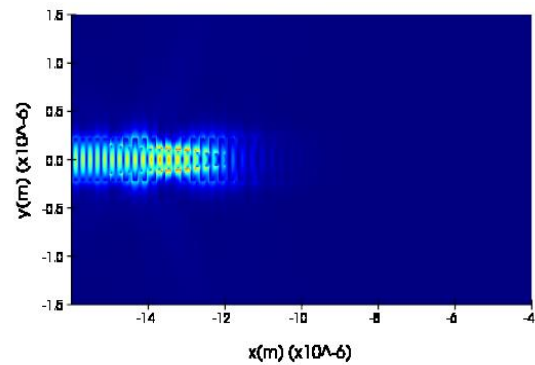
La geometría obtenida para nuestro filtro tiene un diseño de una guía de onda segmentada. Con un núcleo de silicio con índice de refracción de $n_{Si}=3.4757$ [27], y un sustrato de óxido silicio con un índice de refracción de $n_{SiO_2}=1.4431$ [27]. En donde el tamaño del núcleo es $0.175 \mu m \times 0.45 \mu m \times 0.22 \mu m$, el tamaño del sustrato es $0.10 \mu m \times 2 \mu m \times 1.85 \mu m$ con un 73% de duty cycle, el periodo determinado es $0.240 \mu m$ y un dominio computacional con una geometría $0.35 \mu m \times 2 \mu m \times 2 \mu m$. Procediéndose así a obtener un filtro pasa bajo, permitiendo filtrar las frecuencias relevantes de la enfermedad LW en la planta del palto, siendo el rango de longitudes de onda a estudiar el 1400 nm a 2000 nm, el mismo que será integrado dentro del diseño de la Figura 4.21

La Figura 4.21 muestra un diseño final de un filtro con un fotodetector que usa los materiales en el núcleo silicio y en el sustrato óxido silicio. Este diseño involucra varias etapas para la aplicación de la misma. La primera etapa está conformada por una guía de onda SWG con periodo y duty cycle constante, esta etapa tiene la geometría del diseño descrito líneas arriba. Como segunda etapa se describe una conversión de una guía de onda SWG a una guía de onda CWG, en donde el duty cycle va ir variando. En la tercera etapa se observa una guía de onda CWG que servirá para ingresar a un acondicionamiento para poder obtener la corriente eléctrica equivalente por medio de un fotodetector que vendría hacer la a cuarta etapa. El fotodetector podría ser de Germanio sobre silicio [15].

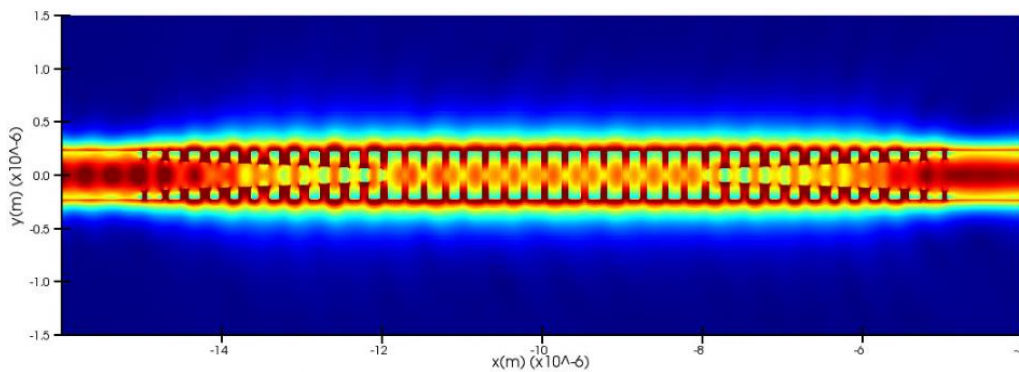
En relación al Campo Eléctrico en el diseño mostrado en la Figura 4.21, la primera etapa se va a encargar de filtrar las longitudes de onda correspondiente a este estudio comportándose como un filtro pasa bajo, el funcionamiento a detalle se describirá en la sección 4.1.2. En la segunda etapa del diseño de la Figura 4.21 se va a seleccionar la longitud de onda a ser utilizada por el fotodetector, la finalidad es poder observar el comportamiento del campo eléctrico, tal como se observa en la Figura 4.22.



a) Campo eléctrico para la longitud de onda de 800 nm



b) Campo eléctrico para la longitud de onda de 1100 nm



c) Campo eléctrico para la longitud de onda de 1550 nm

Figura 4.22 campo eléctrico de las longitudes de onda en la etapa conversión SWG a CWG.

En la Figura 4.22 se observan los diferentes campos eléctricos de las guías de onda seleccionadas. La Figura 4.22 a) muestra un campo eléctrico de la guía de onda 800 nm, en donde podemos observar que este campo se encuentra esparcido y reflejado, este campo pertenece a la zona de campo radiado y esto se puede evidenciar en los campos eléctricos que se ven hacia las zonas de $\pm y$. En cambio, la Figura 4.22 b) muestra un campo eléctrico de la guía de onda 1100 nm, en donde podemos observar un campo eléctrico perteneciente a la sección de luz lenta donde existe reflexión, porque la longitud de onda tanto la de 800 nm y 1100 nm pertenecen a una zona de Bragg donde existe difracción y reflexión hacia atrás, por tal motivo se observa un patrón de interferencia en el campo eléctrico de la Figura 4.22 b). Y en la Figura 4.22 c) muestra un campo eléctrico de la guía de onda 1550 nm en donde podemos observar que este campo se encuentra más compacto y va hacia adelante, esto se debe a que la longitud de onda seleccionada 1550 nm, pertenece a la zona sub-longitud de onda, en donde se puede hacer la equivalencia de los guías de onda segmentados con las continuas. Es preciso señalar que esta longitud de onda se encuentra dentro de la zona de estudio de la enfermedad.

4.4.5. Resultados y aplicación en sistema

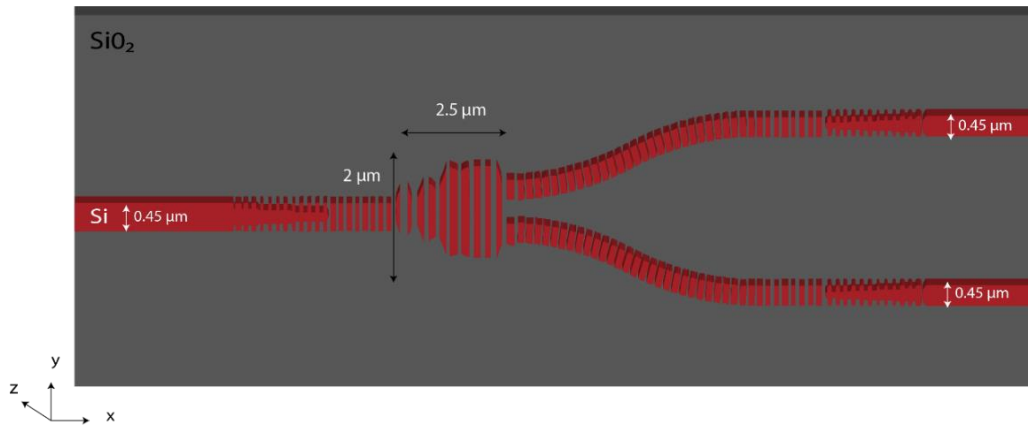


Figura 4.23 interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG* con una (1) entrada con dos (2) salidas.

En cuanto al resultado del confinamiento de la potencia en el núcleo se realizó tres mediciones en la Figura 4.23, tanto para la longitud de onda $\lambda = 1460 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y $\lambda = 1625 \text{ nm}$ para obtener la Figura 4.24.

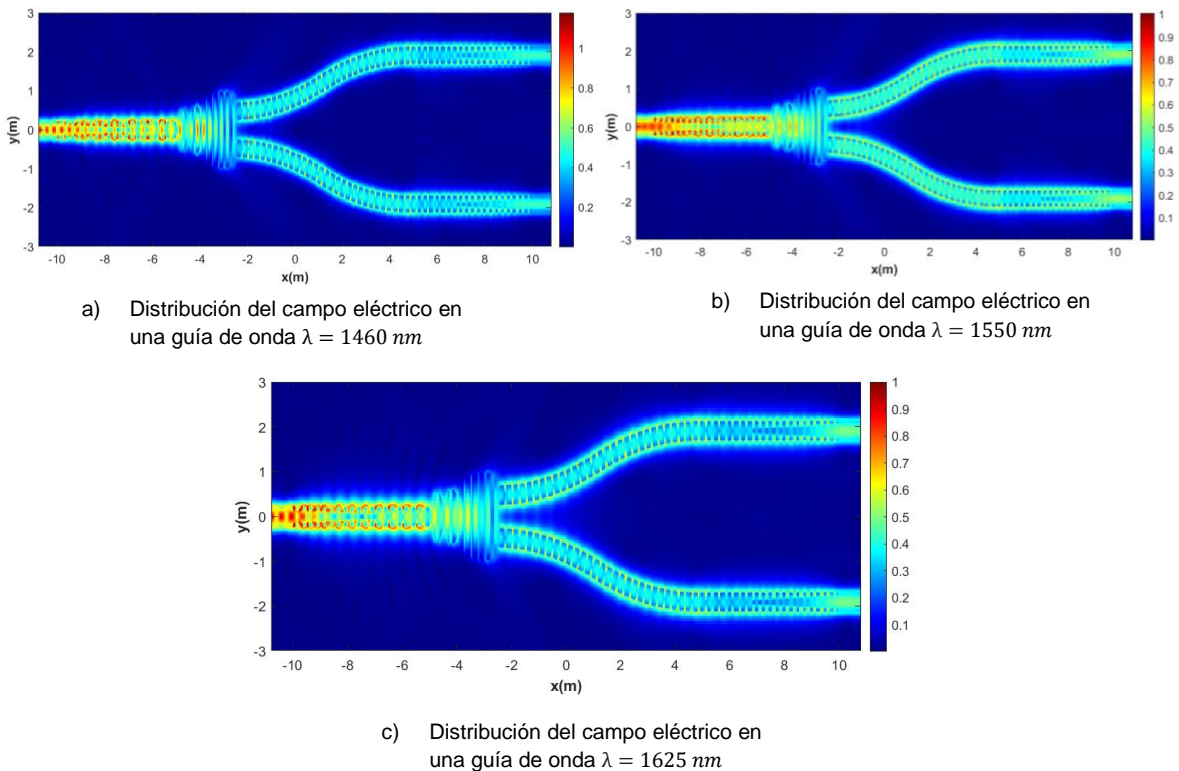


Figura 4.24 distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG-1x2*.

La Figura 4.24. es el resultado de la optimización del diseño, donde la mayor intensidad de la potencia de la señal electromagnética se encuentra confinado en el núcleo, conforme se va acercando a los brazos esta intensidad se va dividiendo, tal como se mostró en la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 de la sección 4.5 del Anexo Teórico. Además, se observa que hay una deslocalización del modo, existiendo más campos evanescentes que en el diseño del interferómetro de forma *Y-branch* basado en un *MMI* 1x2 descrito en la sección 4.2.4.2 Por otro lado, las ondas evanescentes fuera del diseño son de poca amplitud, indicando que hay una baja pérdida de la energía del modo fundamental en el diseño propuesto.

La Figura 4.24 a) muestra la distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1460 \text{ nm}$ observando que la intensidad del campo eléctrico se distribuye a lo largo del diseño, se observa que la mayor intensidad se encuentra en el núcleo y esta disminuye conforme se acerca al sustrato.

Por otro lado, la Figura 4.24 b) muestra una distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$ con una mayor intensidad en el recorrido en contraste con la Figura 4.24 a), de igual forma la mayor concentración de la energía se encuentra en el núcleo y disminuye también al acercarse al sustrato.

Y la Figura 4.24 c) muestra una distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1625 \text{ nm}$ con una mayor intensidad en el recorrido en contraste con la Figura 4.24 a), y menor intensidad que la Figura 4.24 b). Además, la mayor concentración de la energía se encuentra en el núcleo y disminuye también al acercarse al sustrato.

Si hacemos un acercamiento al confinamiento para ver la distribución del campo eléctrico de una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, se obtiene la Figura 4.25.

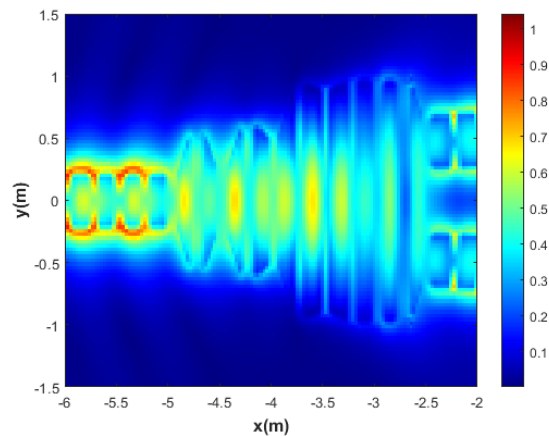


Figura 4.25 acercamiento de la distribución del campo eléctrico en el confinamiento del núcleo de un interferómetro *MMI* en una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, *SWG-1x2*.

La Figura 4.25 muestra como es la distribución del campo eléctrico en el centro de del diseño del interferómetro *MMI* en una longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, *SWG-1x2*, observando claramente una deslocalización del modo fundamental. Conforme la energía va avanzando esta se va dividiendo hacia las salidas. Se observa un mayor campo evanescente en el centro que en la entrada y salida del confinamiento, además la intensidad de la energía va decreciendo conforme se acerca al substrato.

Por otro lado, la periodicidad del diseño se encuentra representado por la Figura 4.26, en donde podemos el mayor valor se encuentra confinado dentro del núcleo llegando a tener un valor de 3.4 y el substrato de 1.6.

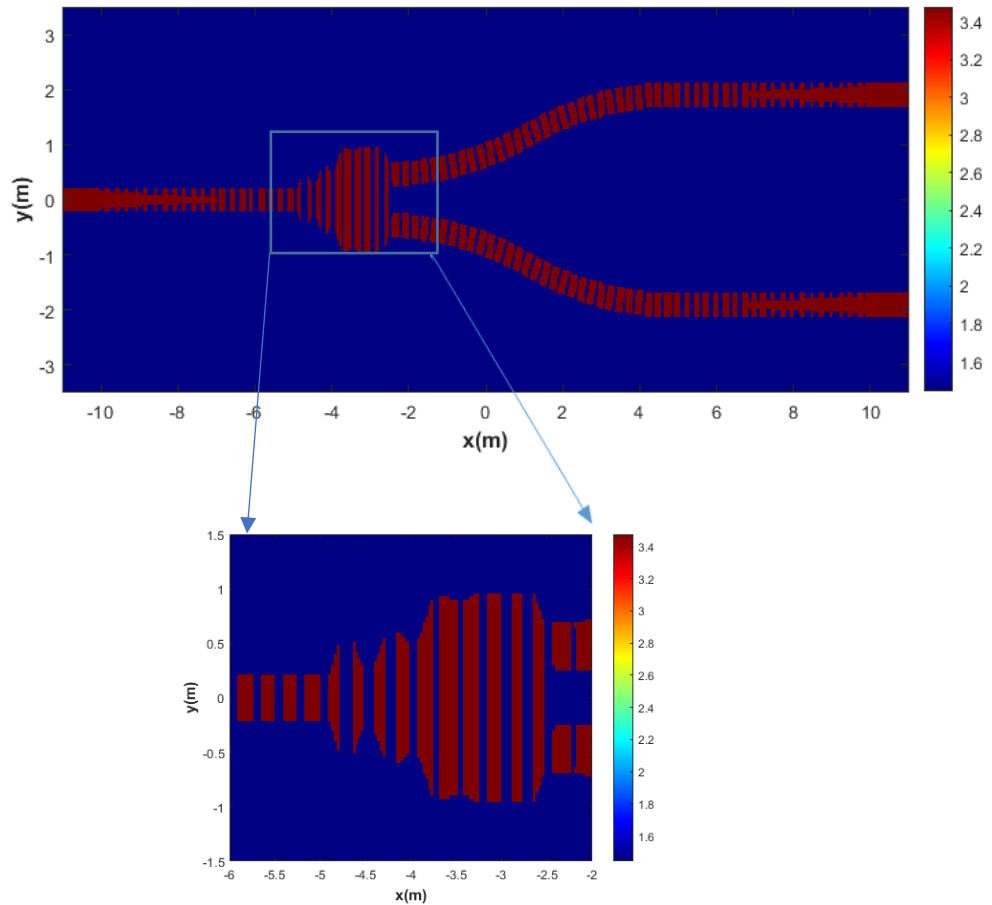
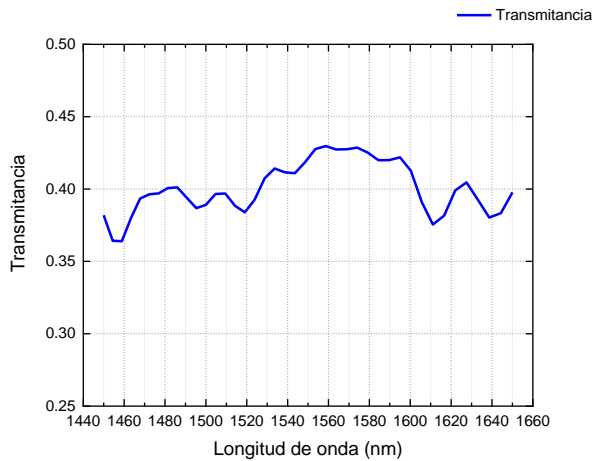
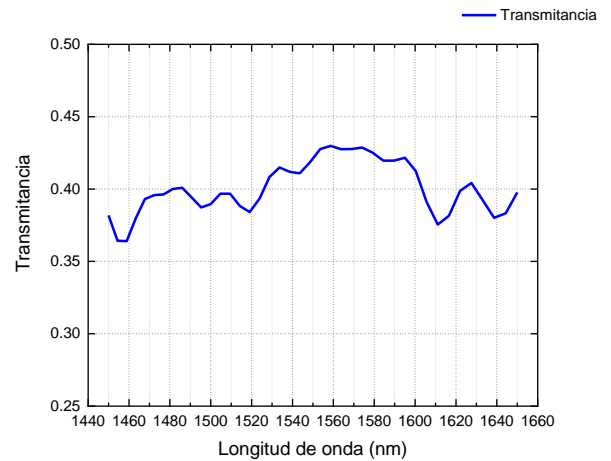


Figura 4.26 diseño propuesto y detalle de la parte central del interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG-1x2*.

Referente a la transmitancia obtenida en cada brazo de un interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG-1x2*, en el ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas SCL 1460 – 1625 *nm*, el valor obtenido fue mayor que 0.4 tal como se observa en la Figura 4.27.



a) Transmitancia en la primera salida del interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG*



b) Transmitancia en la segunda salida del interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG*

Figura 4.27 transmitancia en la primera salida y segunda salida del interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG*.

La Figura 4.27 muestra la transmitancia obtenida en las dos (2) salidas del interferómetro *MMI* en una guía de onda *SWG* del modo fundamental en un ancho de banda del rango de las frecuencias ópticas *SCL* 1460 – 1625 *nm*. En la Figura 4.27 a), la transmitancia en el rango de las frecuencias ópticas se encuentra por encima de los 37.5 % teniendo como un máximo de 42.9% de la potencia de entrada. Por otro lado, en la Figura 4.27 b) también la transmitancia se encuentra sobre 36.4% alcanzando de igual forma un máximo 42.9% de la potencia de entrada. En la Figura 4.27 se puede comprobar lo mencionado en la sección 4.2.1 parte a), referente a que cada salida tiene una intensidad de $\frac{I}{2} = I_1 = I_2$, con respecto a la intensidad de la entrada *I*.

Al ser optimizado para una longitud de onda de 1550 *nm*, se puede observar que el diseño alcanzó su pico más alto de la transmitancia en esta longitud. Por lo general los dispositivos periódicos suelen ser dimensionados para una longitud de onda determinada, sin embargo, nuestro diseño ha respondido idóneamente que en toda la banda *SCL* 1460 – 1625 *nm* tiene un ancho de banda ancha, logrando así superar lo esperado de una transmitancia del 0.25 al ser un diseño *SWG* cumpliéndose de esta manera con el objetivo general de la tesis.

CONCLUSIONES

1. Se propuso una metodología de modelado numérico donde es posible simular modos tridimensionales de Floquet-Bloch que permiten analizar el comportamiento de la dispersión de la luz en la frecuencia de las estructuras periódicas unidimensionales, que cumplen las condiciones de Bragg para luz SWG, luz lenta y bandgap. Todo este análisis se planteó sobre una plataforma de silicio sobre aislante.
2. Se propuso un divisor de potencia para una guía continua de 1 entrada y 2 salidas, obteniendo más del 45% de transmitancia en cada brazo sobre las bandas SCL de comunicaciones ópticas. Se usó una técnica de optimización lineal llamada *Particle Swarm Optimization* como ayuda en la parametrización de diseño final.
3. Se propuso un divisor de potencia basado en interferómetro multimodal continuo en una plataforma fotónica de silicio, de 1 entrada y 4 salidas, obteniendo más del 20% de transmitancia en cada brazo sobre las bandas SCL de comunicaciones ópticas.
4. Se propuso un divisor de potencia basado en interferómetro multimodal segmentado en una plataforma fotónica de silicio, de 1 entrada y 2 salidas, obteniendo más del 40% de transmitancia en cada brazo y usando técnicas de optimización lineal por primera vez en la literatura, hasta la publicación de esta tesis.
5. Se propuso y se observó una aplicación de las guías de onda segmentados en la detección de bandas de frecuencia que caracterizan aspectos típicos de daño en las hojas de las plantas de palto por primera vez en la literatura.
6. Se demostró que es posible parametrizar los diseños de divisores de potencia propuestos para el uso adecuado de optimización lineal por medio de *Particle Swarm Optimization* para la maximización de la potencia de salida.
7. Aunque los divisores de potencia optimizados SWG mostraron un desempeño relativamente menor al de los divisores de potencia CWG, todavía la metodología es

válida para próximos trabajos, que puedan usar el grado de libertad adicional proporcionado al diseño (el período de la grilla) para realizar varias funciones al mismo tiempo, como filtrado y división de potencia. En esta tesis se presentan aplicaciones separadas.

RECOMENDACIONES

1. Una vez lograda la demostración, se recomienda utilizar las guías de onda segmentados como filtros para determinar las longitudes de onda dentro de las regiones sub-longitud de onda, haciéndolos útiles en la agricultura de precisión para la detención de enfermedades como el LW, haciendo esta metodología factible de uso para cualquier enfermedad que afecte las plantas en las longitudes de onda del IR de manera selectiva.
2. Se recomienda utilizar un periodo determinado y un *duty cycle* constante para la utilización de una guía de onda segmenta como un filtro pasa bajo en las longitudes de onda de 1400 nm en adelante, logrando analizar la región de mayor interés para identificar las etapas de la enfermedad LW de la planta de palto.
3. Se recomienda variar el valor del número de onda k , en el diseño de una guía de onda segmentada para determinar las longitudes de onda que permitirán el paso de la luz, pudiendo encontrar modos TE , TM y de orden superior. Estas longitudes de onda ayudan a identificar las regiones de la banda prohibida, de la luz lenta y del sub-longitud de onda. Este análisis modal, basado en conceptos básicos de cristales fotónicos, puede ser usado no sólo para determinar bandas prohibidas sino también para determinar regiones sub-longitud de onda, donde la luz pasa directamente como si se tratase de una guía de onda continúa.
4. Se recomienda la integración de un fotodetector dentro de un circuito junto con otros sensores para la aplicación en la agricultura de precisión, en donde permitirá realizar un monitoreo más adecuado y preciso para estudiar no solo la enfermedad LW sino algunas otras enfermedades que aquejen a la planta de palto que se encuentren en el espectro infrarrojo, posibilitando una herramienta más para posibles aplicaciones en la industria de sensores para la producción de palta.
5. Se recomienda analizar la dispersión de los materiales y de las guías de onda SWG antes de determinar aplicaciones como las presentadas en este trabajo de tesis. Para ello, se recomienda el uso de la metodología presentada en este trabajo de tesis

usando célula fundamental y condiciones de periodicidad unidimensional de Bloch-Flouquet.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Abdulridha, J., Ehsani, R., & De Castro, A.** (2016). Detection and differentiation between laurel wilt disease, phytophthora disease, and salinity damage using a hyperspectral sensing technique. *Agriculture*, 6(4), 56.
- [2] **AcMax/** (s.f). transmitancia-optica-y-camaras-termograficas [Última fecha de acceso 14 de marzo del 2022]. URL disponible en: <https://acmax.mx/transmitancia-optica-y-camaras-termograficas#:~:text=La%20transmitancia%20%C3%B3ptica%20se%20refiere,el%20cuerpo%20seg%C3%BAAn%20su%20transmitancia.>
- [3] **Albizu Ciaurriz, E.** (2016). Diseño de filtros en guía de onda rectangular de alta selectividad.
- [4] **Arnold, W. H.,** (1999). CMOS device fabrication and the evolution of optical lithographic exposure tools. *Microelectronic engineering*, 46(1-4), 7-9.
- [5] **Balanis, Constantine A., John Wiley & Sons,** (1999). *Advanced engineering electromagnetics*
- [6] **Bogaerts, W., Wiaux, V., Taillaert, D., Beckx, S., Luysaert, B., Bienstman, P., & Baets, R. (2002).** Fabrication of photonic crystals in silicon-on-insulator using 248-nm deep UV lithography. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 8(4), 928-934.
- [7] **Brebbia, C. A.,** (2017). The birth of the boundary element method from conception to application.
- [8] **Carlos Ariola,** (2011). Diseño de Estudio de las Ecuaciones de Maxwell con ayuda de la herramienta MATLAB.
- [9] **Catarina.udlap.mx** (s.f). capitulo3.pdf [Última fecha de acceso 12 de febrero del 2022]. URL disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/loranca_r_ya/capitulo3.pdf
- [10] **Cheben, P., Bock, P. J., Schmid, J. H., Lapointe, J., Janz, S., Xu, D. X., & Hall, T. J.** (2010). Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers. *Optics letters*, 35(15), 2526-2528
- [11] **Cheben, P., Halir, R., Schmid, J. H., Atwater, H. A., & Smith, D. R.,** (2018). Subwavelength integrated photonics. *Nature*, 560(7720), 565.
- [12] **Cheben, Pavel, et al.** Subwavelength structures in SOI waveguides. En *8th IEEE International Conference on Group IV Photonics*. IEEE, 2011. p. 42-44.
- [13] **Chrostowski, L., & Hochberg, M.** (2015). *Silicon photonics design: from devices to systems*. Cambridge University Press.

- [14] **Cordis Resultados de investigaciones de la UE**, (s.f). Nuevas fuentes de luz en chip para la fotónica del silicio, Comisión Europea [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/107677/brief/es>
- [15] **De Celis, M. R., & Rubio-Noriega, R. E.** (2021, March). Non-linear spot-size converter coupler for germanium/Si photodetectors. In Silicon Photonics XVI (Vol. 11691, p. 1169112). International Society for Optics and Photonics.
- [16] **Ebeam**, (s.f). Ebeam Engines Modules for inline electron beam processing, Europe Unido. [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: https://www.ebeamtechnologies.com/EbeamTechnologies/media/Resources/Brochure_EBengine_English.pdf
- [17] **EducaPlus** (s.f). luz/espectro [Última fecha de acceso 25 de marzo del 2022]. URL disponible en: <https://www.educaplus.org/luz/espectros.html>
- [18] **EUROPRACTICE IC SERVICE**, (s.f). SiPhotonics_technology_imec_passives, United Kingdom. [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: http://www.europractice-ic.com/SiPhotonics_technology_imec_passives.php
- [19] **Felix Instruments/** (s.f). nir-applications-in-agriculture-everything-you-need-to-know-for-2020 [Última fecha de acceso 25 de marzo del 2022]. URL disponible en: <https://felixinstruments.com/blog/nir-applications-in-agriculture-everything-you-need-to-know-for-2020/>
- [20] **Fernández Gavela, A.**, (2014). Desarrollo y optimización de técnicas de micrograbado para su aplicación en óptica integrada y en microfluidica bioanalítica.
- [21] **FL FiberLabs Inc**, (s.f). Glossary about Optical Communication Banda, U.S. and Canada. [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: <https://www.fiberlabs.com>
- [22] **Fraedrich, S. W., Harrington, T. C., Bates, C. A., Johnson, J., Reid, L. S., Best, G. S., ... & Hawkins, T. S.** (2011). Susceptibility to laurel wilt and disease incidence in two rare plant species, pondberry and pondspice. *Plant Disease*, 95(9), 1056-1062.
- [23] **Gervais, A., Jean, P., Shi, W., & LaRochelle, S.** (2018). Design of slow-light subwavelength grating waveguides for enhanced on-chip methane sensing by absorption spectroscopy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3), 1-8.
- [24] **Giofrè, R., Colantonio, P., & Cabria, L.**, (s.f). Amplificador MMIC en tecnología 100 nm GaN-Si para la próxima generación de satélites vHTS en banda Ka.
- [25] **Gomez, S. M. M.**, (2013). Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas.
- [26] **Gutiérrez Campo, A. M.**, (2013). Análisis y caracterización de guías corrugadas de onda lenta para aplicaciones de modulación electro-óptica en silicio.

- [27] **H. H. Li.** (1993). Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 9, 561-658 (1993).
- [28] **Halir, R., Cheben, P., Luque-González, J. M., Sarmiento-Merenguel, J. D., Schmid, J. H., Wangüemert-Pérez, G., & Molina-Fernández, Í.** (2016). Ultra-broadband nanophotonic beamsplitter using an anisotropic sub-wavelength metamaterial. *Laser & Photonics Reviews*, 10(6), 1039-1046.
- [29] **Her, T. H., Finlay, R. J., Wu, C., Deliwala, S., & Mazur, E.** (1998). Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses. *Applied Physics Letters*, 73(12), 1673-1675.
- [30] **Instituto Colombiano Agropecuario** (s.f.) Manejo fitosanitario del cultivo del aguacate Hass [Última fecha de acceso 25 de marzo del 2022]. URL disponible en: <https://www.ica.gov.co/getattachment/4b5b9b6f-ecfc-46e1-b9ca-b35cc1cefee2/->
- [31] **Jackson, J. D.** (2007). *Electrodynamics. The Optics Encyclopedia: Basic Foundations and Practical Applications.*
- [32] **Joannopoulos, J. D., Meade, R. D., & Winn, J. N.** (1995). *Photonic crystals. Molding the flow of light.*
- [33] **Juan, M., Prosopio-Galarza, R., & Rubio-Noriega, R. E.** (2020, September). Silicon Photonics Foundry-oriented Y-junction Optimization. In 2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) (pp. 1-4). IEEE
- [34] **Katsunari Okamoto,** (2021). *Fundamentals of Optical Waveguides (Optics & Photonics Series)*
- [35] **Kittel, Charles,** (1996). *Introduction to Solid State Physics.* New York: Wiley.
- [36] **Li, Y. P., & Wang, Y.** (1998). U.S. Patent No. 5,745,619. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [37] **Liao, L., Samara-Rubio, D., Morse, M., Liu, A., Hodge, D., Rubin, D., ... & Franck, T.** (2005). High speed silicon Mach-Zehnder modulator. *Optics express*, 13(8), 3129-3135.
- [38] **Library-proceso-nanofabricacion** (s.f.) [Última fecha de acceso 11 de junio del 2022]. URL disponible en: <https://1library.co/article/proceso-nanofabricaci%C3%B3n-an%C3%A1lisis-caracterizaci%C3%B3n-gu%C3%ADas-corrugadas-onda-lenta.znxo4nq>
- [39] **Llamas, I. F.,** (2007). Síntesis de las rejillas de periodo largo en fibra óptica por medio de un algoritmo genético (Doctoral dissertation, Tesis de Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM).
- [40] **Luan, E., Donzella, V., Cheung, K., & Chrostowski, L.** (2019, July). Advances in silicon photonic sensors using sub-wavelength gratings. In 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC) (pp. 1-3). IEEE.
- [41] **Lumerical Inc. [CA],** (s.f) .Applications of Lumerical, Canada [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: <https://www.lumerical.com>

[42] **Lumerical Inc. [CA]**, (s.f). Boundaries conditions, Canada.. [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: https://kb.lumerical.com/ref_sim_obj_boundary_conditions_tab.html.

[43] **M. Bass, V. N. Mahajan**, (2010), Handbook of Optics Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments. Third Edition, McGraw-Hill, 2010, Chapter 21.

[44] **Magnus, W; Winkler, S**, (2004). Hill's Equation. Courier Dover. p. 11.

[45] **Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego- Perú** (s.f). herramientas/boletines/estudio_palta.pdf [Última fecha de acceso 25 de marzo del 2022]. URL disponible en: https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/estudio_palta.pdf

[46] **Montero, W. W. H.**, (2011). Diseño y fabricación de guías de onda ópticas con películas de silicio-germanio amorfo (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría, Tonantzintla, Puebla: INAOE).

[47] **Mu, X., Wu, S., Cheng, L., & Fu, H. Y.** (2020). Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: A review. Applied Sciences, 10(4), 1538.

[48] **Ortega-Moñux, A., Wanguemert-Perez, J. G., Halir, R., Cheben, P., Godoy-Rubio, R., Oliva-Rubio, J., & Nedeljkovic, M.** (2016). Estructuras sub-longitud de onda para el diseño de dispositivos en guía dieléctrica.

[49] **Prosopio-Galarza, R., De la Cruz-Coronado, J., Hernandez-Figueroa, H. E., & Rubio-Noriega, R.** (2019, August). Comparison between optimization techniques for Y-junction devices in SOI substrates. In 2019 IEEE XXVI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON) (pp. 1-4). IEEE.

[50] **RENISHAW apply innovation**, (s.f). Explicación-de-la-interferometría, España. [Última fecha de acceso 30 de julio del 2019]. URL disponible en: <https://www.renishaw.es/es/explicacion-de-la-interferometria--7854>

[51] **Roelkens, G., Bogaerts, W., Taillaert, D., Dumon, P., Liu, L., Selvaraja, S., ... & Baets, R.** (2008, August). Silicon nanophotonics: towards VLSI photonic integrated circuits. In *XXIX General Assembly of URSI*. Union Radio Scientifique Internationale/International Union of Radio Science.

[52] **Rosa Escutia, Á.**, (2011). Modelado, diseño y análisis de estructuras nanofotónicas basadas en el interferómetro modal (Doctoral dissertation).

[53] **Rubio Noriega, R. E.** (2012). Estudio de guías periódicamente segmentados usando o método dos elementos finitos.

[54] **Saavedra, J** (2022). Webblog personal para publicar trabajos de investigación [Última fecha de acceso 12 octubre del 2022]. URL disponible en: <https://jorhdansaavedraparedes.blogspot.com/>.

- [55] **Sheng, Z., Wang, Z., Qiu, C., Li, L., Pang, A., Wu, A., ... & Gan, F.** (2012). A compact and low-loss MMI coupler fabricated with CMOS technology. *IEEE Photonics Journal*, 4(6), 2272-2277.
- [56] **Song, W., & Xie, K.** (2008). Optimal design of a multi-mode interference splitter based on SOI. *Optoelectronics Letters*, 4(2), 92-95.
- [57] **Synopsys** (s.f). Design Rule Checking [Última fecha de acceso 08 de noviembre del 2021]. URL disponible en: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-design-rule-checking.html>
- [58] Tejerina, M. R., (2014). Caracterización de guías de onda ópticas generadas con láser de femtosegundos en niobato de litio (Doctoral dissertation, Facultad de Ingeniería).
- [59] **Thomson, D., Zilkie, A., Bowers, J. E., Komljenovic, T., Reed, G. T., Vivien, L., & Hartmann, J. M.** (2016). Roadmap on silicon photonics. *Journal of Optics*, 18(7), 073003.
- [60] **Universidad de Málaga** (s.f). Repository [Última fecha de acceso 13 de febrero del 2022]. URL disponible en: <http://www.ic.uma.es/repository/fileDownloader?rfname=007e3492-cf4c-42ee-bb05-aa6891394318.pdf>
- [61] **Wang, J., Guan, X., He, Y., Shi, Y., Wang, Z., He, S., ... & Dai, D.** (2011). Sub- μm 2 power splitters by using silicon hybrid plasmonic waveguides. *Optics express*, 19(2), 838-847.
- [62] **Yu, J., Wei, H., Zhang, X., Yan, Q., & Xia, J.** (2001, October). Integrated MMI optical couplers and optical switches in silicon-on-insulator technology. In *Optical Switching and Optical Interconnection* (Vol. 4582, pp. 57-62). International Society for Optics and Photonics.

ANEXOS

Anexo Teórico:

El Anexo teórico es una extensión digital de la presente tesis que contiene conceptos y resultados para el desarrollo de la investigación, las citas bibliográficas citadas en el Anexo Teórico se encuentran mencionadas en la sección de la Bibliografía de la presente tesis. Este Anexo Teórico se encuentra en el blog personal del autor [54].

Anexo a:

Diseño del interferómetro multimodo continuo CWG 1X2

```
select("polygon"); %elegimos el polígono
ver=get("vertices"); %obtenemos los valores de vértices
s=size(ver,1); % selección de la posición
w=[w2,w3,w4,w5,w6,w7,w8,w9,w10,w11]; %números de anchos del polígono
k=s/2-1; %posición superior de los vértices
for(i=2:k)
{
    ver(i,2)=w(i-1)/2; %tamaño del vértice
}
m=s/2+2;
for(j=m:s-1) %posición inferior de los vértices
{
    ver(j,2)=-w(s-j)/2; %tamaño del vértice
}
set("vertices",ver);
```

- Script del FOM

```
Exp = getresult('::model::exp_t1', "expansion for exp_t1");
?Exp;
Tfwd = Exp.T_forward;
#Convert to vectors and transform
wl = Exp.f*1e-12;
FOM = integrate(Tfwd,1,wl);
```

Anexo b:

Diseño del interferómetro multimodo continuo CWG 1X4

```
y=[0,0,0,0];

for(i=1:4)
{
    y(i)=((2*i-5)*W_mmi)/8;%posición "y" de las salidas
}
}
```

```

select('MMI');
ver=get("vertices");
#?ver;
ver(2,2)=W_mmi/2;
ver(3,1)=ver(2,1)+L_mmi;
ver(3,2)=W_mmi/2;
ver(4,1)=ver(3,1)+1e-6;
ver(4,2)=y(4)+0.225e-6;
ver(5,1)=ver(4,1);
ver(5,2)=y(1)-0.225e-6;
ver(6,1)=ver(3,1);
ver(6,2)=-W_mmi/2;
ver(7,2)=-W_mmi/2;
set("vertices",ver);

select('wg_bezier_1'); %primer brazo
set("x",L_mmi+2e-6); %posición en el eje x
set("y",y(4)); %posición en el eje y

select('wg_bezier_2'); %segundo brazo
set("x",L_mmi+2e-6); %posición en el eje x
set("y",y(3)); %posición en el eje y

select('wg_bezier_3'); %tercer brazo
set("x",L_mmi+2e-6); %posición en el eje x
set("y",y(2)); %posición en el eje y

select('wg_bezier_4'); %cuarto brazo
set("x",L_mmi+2e-6); %posición en el eje x
set("y",y(1)); %posición en el eje y

select('w_out_1'); %primera salida superior
set("y",y(4)+1.5e-6); %posición en el eje y
set("x min",L_mmi+6.5e-6); %posición en el eje x

select('w_out_2'); %segunda salida superior
set("y",y(3)+0.75e-6); %posición en el eje y
set("x min",L_mmi+6.5e-6); %posición en el eje x

select('w_out_3'); %primera salida inferior
set("y",y(2)-0.75e-6); %posición en el eje y
set("x min",L_mmi+6.5e-6); %posición en el eje x

select('w_out_4'); %segunda salida inferior
set("y",y(1)-1.5e-6); %posición en el eje y
set("x min",L_mmi+6.5e-6); %posición en el eje x

```

Script del FOM

```

Exp1=getresult('::model::monitor_5',"expansion for mon1");
T1=Exp1.T_forward;

Exp2=getresult('::model::monitor_6',"expansion for mon2");
T2=Exp2.T_forward;

Exp3=getresult('::model::monitor_7',"expansion for mon3");
T3=Exp3.T_forward;

```

```

Exp4=getresult('::model::monitor_8',"expansion for mon4");
T4=Exp4.T_forward;

FOM=(T1-0.25)^2+(T2-0.25)^2+(T3-0.25)^2+(T4-0.25)^2;
?FOM;

```

Anexo c:

```

for(i=1:40) % Eliminamos los valores iniciales, luego de la primera ejecución del PSO, con la
finalidad que no se sobrepongan
{
    select("cell_"+num2str(i)); %las celdas que representan al SWG.
    delete;
}

select("CW_out");
delete;

dc=[dc1,dc2,dc3,dc4,dc5,dc6,dc7,dc8,dc9,dc10,dc11,dc12,dc13,dc14,dc15,dc16,dc17,dc18,dc19,dc
20]; %duty cycle
a=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
a_div=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
x_vec=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

for(i=1:20)
{
    a(i)=per*dc(i); %definición de un dut cycle
}
x0=-15e-6;
?a;
for(t=1:20)
{
    a_div(t)=round(a(t)/(5e-9));
    a(t)=a_div(t)*(5e-9);
}
?a;
for(j=1:40)
{
    if(j<21)
    {
        x=x0+per;
    }
    if(j==1)
    {
        x=x0+per-a(1)/2;
    }
}
x0=x;
addressct;
set("name","cell_"+num2str(j));
set("x",x);
set("x span",a(j));
set("y",0);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");
}

```

```

else
{
x1=x0+per;
x0=x1;
address;
set("name","cell_"+num2str(j));
set("x",x1);
set("x span",a(41-j));
set("y",0);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");
}
}

address;
set("name","CW_out");
set("x min", x1+per-a(1)/2);
set("x max", 5e-6);
set("y",0);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");

```

Anexo d:

Diseño del interferómetro multimodo continuo SWG 1X2

```

for(i=1:20)
{
select("cell_"+num2str(i));
delete;
}

for(i=1:10)
{
b=i*2;
select("MMI_"+num2str(b));
delete;
}

for(i=1:15)
{
select("cell_out_1_1_"+num2str(i));
delete;
}

for(i=1:15)
{
select("cell_out_1_2_"+num2str(i));
delete;
}

for(i=1:15)

```

```

{
  select("cell_out_2_1_"+num2str(i));
  delete;
}

for(i=1:15)
{
  select("cell_out_2_2_"+num2str(i));
  delete;
}

for(i=1:20)
{
  select("cell_up_"+num2str(i));
  delete;
  select("cell_down_"+num2str(i));
  delete;
}

select("out_up");
delete;

select("out_down");
delete;

#####CWG_in#####
#####

dc=[dc1,dc2,dc3,dc4,dc5,dc6,dc7,dc8,dc9,dc10,dc11,dc12,dc13,dc14,dc15,dc16,dc17,dc18,dc19,dc
20];
ac=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
a_div=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
x_vec=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

#####MMI_seg#####
#####

dc2=[dc2_1,dc2_2,dc2_3,dc2_4,dc2_5,dc2_6,dc2_7,dc2_8,dc2_9,dc2_10];
ac2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
w=[w1,w3,w5,w7,w9,w11,w13,w15,w17,w19,w21];

for(i=1:20)
{
  ac(i)=per*dc(i);
}

x0=-10e-6;

for(t=1:20)
{
  a_div(t)=round(ac(t)/(5e-9));
  ac(t)=a_div(t)*(5e-9);
}

for(j=1:20)
{
  x=x0+per;
}

```

```

if(j==1){
    x=x0+per-ac(1)/2;
}
x0=x;
addressct;
set("name","cell_"+num2str(j));
set("x",x);
set("x span",ac(j));
set("y",0);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");
}

for(k=1:10)
{
    ac2(k)=round(dc2(k)*per/(5e-9));
    ac2(k)=ac2(k)*(5e-9);
}

for(j=1:10)
{
    b=j*2;
    addpoly;
    set("name","MMI_"+num2str(b));
    x1=x0+j*per;
    set("x",x1);
    vt=[-ac2(j)/2,w(j)/2;ac2(j)/2,w(j+1)/2;ac2(j)/2,-w(j+1)/2;-ac2(j)/2,-w(j)/2];
    set("vertices",vt);
    set("y",0);
    set("z",0);
    set("z span",0.22e-6);
    set("material","Si (Silicon) - Palik");
}

#####Bezier_top#####

dc3=[dc3_1,dc3_2,dc3_3,dc3_4,dc3_5,dc3_6,dc3_7,dc3_8,dc3_9,dc3_10,dc3_11,dc3_12,dc3_13,dc
3_14,dc3_15];
a=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
b=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

for(k=1:15){
    b(k)=dc3(k)*per;
    a(k)=round(b(k)/(5e-9))*5e-9;
}

r=10e-6;
y1_bez=w21/2-0.225e-6;
theta=asin(per/(20e-6));
x0_bez=x1;

for(i=1:15)
{
    addressct;
    set("name","cell_out_1_1_"+num2str(i));
}

```

```

set("x",x0_bez+2*r*sin(theta*i)*cos(theta*i));
set("x span",a(i));
set("y",y1_bez+2*r*sin(theta*i)*sin(theta*i));
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");
set("first axis",'z');
the=theta*i*360/pi;
set("rotation 1",the);
}
x1=x0_bez+2*r*sin(theta*15)*cos(theta*15);
y1=2*r*sin(theta*15)*sin(theta*15)+y1_bez;

#out_1_2: final de la superior

for(i=1:15)
{
  addrect;
  set("name","cell_out_1_2_"+num2str(i));
  x2=x1+per*cos(2*theta*(16-i));
  x1=x2;
  set("x",x1);
  set("x span",a(16-i));
  y2=y1+per*sin(theta*(16-i)*2);
  y1=y2;
  set("y",y1);
  set("y span",0.45e-6);
  set("z",0);
  set("z span",0.22e-6);
  set("material","Si (Silicon) - Palik");
  set("first axis",'z');
  the=theta*(16-i)*360/pi;
  set("rotation 1",the);
}

#####Bezier_bottom#####

dc3=[dc3_1,dc3_2,dc3_3,dc3_4,dc3_5,dc3_6,dc3_7,dc3_8,dc3_9,dc3_10,dc3_11,dc3_12,dc3_13,dc
3_14,dc3_15];
a=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
b=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

for(k=1:15){
  b(k)=dc3(k)*per;
  a(k)=round(b(k)/(5e-9))*5e-9;
}

r=10e-6;
y1_bez=(w21/2-0.225e-6);
theta=asin(per/(20e-6));
x0=x0_bez;

for(i=1:15)
{
  addrect;
  set("name","cell_out_2_1_"+num2str(i));

```

```

set("x",x0+2*r*sin(theta*i)*cos(theta*i));
set("x span",a(i));
set("y",-(y1_bez+2*r*sin(theta*i)*sin(theta*i)));
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");
set("first axis",'z');
the=theta*i*360/pi;
set("rotation 1",-the);
}
x1=x0+2*r*sin(theta*15)*cos(theta*15);
y1=-2*r*sin(theta*15)*sin(theta*15)-y1_bez;

#out_2_2: final de la inferior

for(i=1:15)
{
  addrect;
  set("name","cell_out_2_2_"+num2str(i));
  x2=x1+per*cos(2*theta*(16-i));
  x1=x2;
  set("x",x1);
  set("x span",a(16-i));
  y2=y1-per*sin(theta*(16-i)*2);
  y1=y2;
  set("y",y1);
  set("y span",0.45e-6);
  set("z",0);
  set("z span",0.22e-6);
  set("material","Si (Silicon) - Palik");
  set("first axis",'z');
  the=theta*(16-i)*360/pi;
  set("rotation 1",-the);
}

x0_new=x1;
y_up=y1;
y_down=-y1;

#####out_CWG#####

ac4=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
a_div4=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];

m=length(dc);
?m;
?dc;

for(i=1:20)
{
  ac4(i)=per*dc(i);
  a_div4(i)=round(ac4(i)/(5e-9));
  ac4(i)=a_div4(i)*(5e-9);
}
x_min=x0_new+per;
for(i=1:20)

```



```

{
  addrect;
  set("name","cell_up_"+num2str(i));
  set("x min",x_min+(i-1)*per);
  set("x span",ac4(21-i));
  set("y",y_up);
  set("y span",0.45e-6);
  set("z",0);
  set("z span",0.22e-6);
  set("material","Si (Silicon) - Palik");

  addrect;
  set("name","cell_down_"+num2str(i));
  set("x min",x_min+(i-1)*per);
  set("x span",ac4(21-i));
  set("y",y_down);
  set("y span",0.45e-6);
  set("z",0);
  set("z span",0.22e-6);
  set("material","Si (Silicon) - Palik");
}

```

```
x_rec_out=x_min+19.5*per;
```

```

addrect;
set("name","out_up");
set("x min",x_rec_out);
set("x max",15e-6);
set("y",y_up);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");

```

```

addrect;
set("name","out_down");
set("x min",x_rec_out);
set("x max",15e-6);
set("y",y_down);
set("y span",0.45e-6);
set("z",0);
set("z span",0.22e-6);
set("material","Si (Silicon) - Palik");

```

```

select("pol_out_up");
set("y",y_up);

```

```

select("pol_out_down");
set("y",y_down);

```

Script del *FOM*

```

Exp=getresult('::model::monitor_1',"expansion for mon1");
FOM=Exp.T_forward;

```