

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño e implementación de una herramienta para el modelado
y mejora de la construcción de filtros optoelectrónicos tipo
DBR.**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Armando Gonzalo Pérez Solís

Cartago, 11 de marzo, 2024

This work is licensed under a Creative Commons
“Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International” license.



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Armando Gonzalo Pérez Solís

Cartago, 11 de marzo de 2024

Céd: 1-1785-0100

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica
Proyecto Final de Graduación
Acta de Aprobación

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura

Estudiante: Armando Gonzalo Pérez Solís

Proyecto: *Diseño e implementación de una herramienta para el modelado y mejora de la construcción de filtros optoelectrónicos tipo DBR.*



Dr. -Ing. Juan Luis Crespo Mariño
Profesor Asesor

Cartago, 11 de marzo de 2024

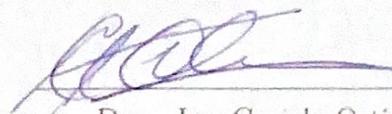
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica
Proyecto Final de Graduación
Acta de Aprobación

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

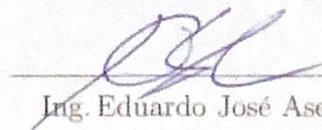
Estudiante: Armando Gonzalo Pérez Solís

Proyecto: *Diseño e implementación de una herramienta para el modelado y mejora de la construcción de filtros optoelectrónicos tipo DBR.*

Miembros del Jurado



Dra. -Ing. Gariela Ortiz León
Jurado



Ing. Eduardo José Asenjo Castillo
Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 11 de marzo de 2024

Resumen

El proyecto desarrollado introduce una herramienta innovadora para la simulación de filtros ópticos Distributed Bragg Reflectors, abordando la necesidad de superar las limitaciones al proceso de fabricación de estos dispositivos. Debido a la falta de una herramienta de simulación, se dificulta la tarea de elegir los componentes ideales para estos filtros. A través de un enfoque teórico sólido en óptica y el uso del método de la matriz de transferencia, se establecen las bases para una simulación exacta. La metodología aplicada, basada en principios de diseño en ingeniería, resulta en la creación de un software intuitivo que permite la simulación y análisis detallado de espectros de transmisión, reflexión y absorción. Los resultados confirman la eficacia y exactitud del software, subrayando su contribución al campo de la óptica mediante la optimización del proceso de diseño. A partir de la aplicación de diferentes métodos de verificación y validación, se obtuvo un software con un tiempo de simulación promedio de 1.2382 segundos para una configuración promedio. Además se obtuvo una exactitud de 82.12% para un set de datos y 68.19% para el segundo. Se destaca el impacto significativo de la herramienta desarrollada y posibles direcciones futuras para expandir sus capacidades y aplicaciones.

Palabras clave: Análisis de espectros, filtros ópticos, matriz de transferencia, reflectores de Bragg distribuidos, reflexión, simulación.

Abstract

The developed project introduces an innovative tool for the simulation of Distributed Bragg Reflectors optical filters, addressing the need to overcome the limitations in the fabrication process of these devices. Due to the lack of a simulation tool, the task of choosing the ideal components for these filters is difficult. Through a solid theoretical approach in optics and the use of the transfer matrix method, the basis for an accurate simulation was established. The applied methodology, based on engineering design principles, results in the creation of an intuitive software that allows the simulation and detailed analysis of transmission, reflection, and absorption spectra. The results confirm the efficiency and accuracy of the software, underlining its contribution to the field of optics by optimizing the design process. Using different verification and validation methods, a software with an average simulation time of 1.2382 seconds for an average configuration was obtained. In addition, an accuracy of 82.12% was obtained for one data set and 68.19% for the second one. It's important to highlight the significant impact of the developed tool and possible future directions to expand its capabilities and applications.

Keywords: Spectral analysis, optical filters, transfer matrix, distributed Bragg reflectors, reflection, simulation.

*a mis queridos padres, Otto y Everlis que han sido mi
mayor motivación a lo largo de mi vida*

Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de mi familia, mi pilar fundamental en este viaje. A mis padres, Otto y Eve, por su amor inquebrantable y apoyo constante, que hacen realidad cada uno de mis sueños. A mi hermano Alejandro, cuya compañía y apoyo me motivan a superar obstáculos y alcanzar mis metas. También, extendiendo mi gratitud a mi abuela Bersaida, cuyas enseñanzas y cariño son mi mayor fuente de inspiración.

También agradezco a mis compañeros de universidad, cuyas risas, debates apasionados y discusiones animadas hicieron que esta travesía académica fuera memorable. A mis amigos Cesar Arguello, Joshua Corvera, Ernesto Pocasangre y Ricardo Luna, cuyas ocurrencias, siempre me recordaron la importancia de la amistad en medio de los desafíos académicos. Quiero destacar el apoyo de mi novia Francella Campos, por su apoyo incondicional, paciencia y perspectiva equilibrada. Su presencia ha sido una constante fuente de fuerza y motivación, fundamentales en la culminación de este proyecto.

Mi agradecimiento se extiende a mis amigos fuera de la universidad, Ignacio Calderón y Cesar García, quienes, aunque no estuvieron directamente involucrados en este proyecto, siempre estuvieron presentes para brindarme su apoyo, ánimo y una pausa bienvenida en momentos de estrés. La amistad de ellos ha sido un faro de luz en mi vida, y estoy agradecido por cada momento compartido.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi asesor, el Profesor Juan Luis Crespo Mariño, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus valiosos consejos y dedicación fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Por último, pero no menos importante, agradezco a todos aquellos cuyos nombres no aparecen aquí, pero cuyo impacto en mi vida y trabajo ha sido inestimable.

Armando Gonzalo Pérez Solís

Cartago, 11 de marzo de 2024

Índice general

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vi
Lista de símbolos y abreviaciones	vii
1 Introducción	1
1.1 Contexto del proyecto	1
1.2 Descripción del problema	2
1.2.1 Justificación	2
1.3 Síntesis del problema	3
1.4 Objetivos del proyecto	3
1.5 Estructura del documento	4
2 Marco teórico	5
2.1 Óptica: conceptos básicos	5
2.1.1 Propagación de la luz	5
2.1.2 Índice de refracción	6
2.1.3 Reflexión y refracción	6
2.1.4 Óptica geométrica	8
2.1.5 Ley de Snell	8
2.1.6 Polarizaciones	9
2.1.7 Ecuaciones de Fresnel	10
2.1.8 Ecuaciones de Maxwell	11
2.1.9 Interferencia de la Luz	12
2.2 Óptica de un medio multicapa	14
2.3 Métodos de simulación y análisis	16
2.3.1 Transfer Matrix Method	16
2.3.2 Finite Difference Time Domain	19
2.3.3 Finite Difference Frequency Domain	19
2.3.4 Plane Wave Method	20
2.3.5 Rigorous Coupled Wave Analysis	20
2.3.6 Otros Métodos	21
2.4 Distributed Bragg Reflector	21

2.4.1	Estructura y funcionamiento	22
2.4.2	Aplicaciones	23
2.4.3	Desafíos en el diseño y fabricación	24
3	Metodología	25
3.1	Descripción general	25
3.2	Relación entre objetivos y metodología	26
3.3	Necesidades y especificaciones	27
3.4	Enfoque de la solución	29
3.5	Investigación	29
3.6	Selección de propuesta de solución	31
4	Propuesta de Diseño	33
4.1	Descripción General del Software	33
4.1.1	Propósito y Alcance	33
4.1.2	Estructura General	34
4.2	Arquitectura y Diseño del Sistema	34
4.2.1	Arquitectura del Software	34
4.2.2	Componentes del Software	35
4.3	Desarrollo y Funcionalidades	40
4.3.1	Lenguaje de Programación	40
4.3.2	Librerías y Herramientas	41
4.3.3	Funcionalidades Principales	44
4.3.4	Implementación TMM	45
5	Resultados y análisis	48
5.1	Verificación y Validación del Diseño	48
5.1.1	Estrategias de Verificación	48
5.1.2	Proceso de Validación	49
5.2	Análisis Experimental y Pruebas	50
5.2.1	Hardware utilizado	50
5.2.2	Verificación del tiempo de simulación promedio	50
5.2.3	Verificación de la confiabilidad de la herramienta	53
5.2.4	Validación con datos experimentales	55
5.2.5	Análisis de los Resultados	59
5.3	Análisis económico	64
5.4	Consideraciones adicionales	67
6	Conclusiones	68
6.1	Recomendaciones y trabajo a futuro	70
	Bibliografía	71
A	Manual de Usuario	77

A.1	Instalación	77
A.2	Guía de Uso	78
A.2.1	Simulación Paso a Paso	78
A.2.2	Implementación de datos experimentales	81
A.2.3	Funciones Adicionales	83

Índice de figuras

2.1	Interacción de un haz de ondas planas en un medio transparente.	7
2.2	Representación de rayo para un haz de ondas planas.	8
2.3	El rayo incidente, reflejado y transmitido en el plano de incidencia.	9
2.4	Representación de rayo para polarizaciones TE y TM.	10
2.5	Representación del experimento de la doble rendija de Young.	13
2.6	Esquemático de un sistema multicapa.	15
2.7	Esquemático de un DBR.	22
2.8	Reflexión y transmisión de luz en una lámina delgada simple y un sistema multicapa DBR.	23
3.1	Metodología de Ulrich y Eppinger.	25
3.2	Adaptación de metodología planteada para el proyecto.	25
3.3	Diagrama de bloques de la relación entre objetivos específicos y metodología.	26
3.4	Diagrama de bloques general del enfoque de la solución del proyecto.	30
4.1	Diagrama de la arquitectura del software.	35
4.2	Pseudocódigo del cálculo de respuesta del sistema.	37
4.3	Captura de la interfaz gráfica con anotaciones.	38
4.4	Esquema de DBR utilizado en la interfaz gráfica.	38
5.1	Espectro de reflexión en polarización TM para el dispositivo DBR descrito.	51
5.2	Resultado de prueba de error en datos de entrada de texto.	53
5.3	Resultado de prueba de error con carga de archivos no compatibles.	54
5.4	Resultado de prueba de error con carga de archivos con contenido no esperado.	54
5.5	Resultado de prueba de error al realizar acción sin tener los cálculos simulados.	54
5.6	Espectro de reflexión para DBR con 75 periodos del primer set de datos.	56
5.7	Espectro de reflexión para DBR con 75 periodos del segundo set de datos.	56
5.8	Ajustes iterativos para el primer set de datos.	57
5.9	Espectro de reflectividad del DBR para primer set de datos con configuración $n_H = 1.475, n_L = 1.23, h_H = 99.322, h_L = 122.7$	57
5.10	Ajustes iterativos para el primer set de datos.	58
5.11	Espectro de reflectividad del DBR para primer set de datos con configuración $n_H = 1.6, n_L = 1.39, h_H = 105, h_L = 117.266$	58

5.12	Espectro de reflectividad del cristal fotónico para ángulo de incidencia de 20° , mostrando dos band gaps en la región visible y dos en la región NIR.	60
5.13	Reflexión vs longitud de onda para 20 periodos.	61
5.14	Reflexión vs longitud de onda para 20 periodos mediante simulación con la herramienta.	61
5.15	Porcentaje de error del dispositivo simulado para el primer set de datos.	62
5.16	Porcentaje de error del dispositivo simulado para el segundo set de datos.	63

Índice de tablas

3.1	Lista de necesidades	27
3.2	Lista de especificaciones y métricas	28
3.3	Lista de métodos	31
3.4	Criterios de selección	31
3.5	Matriz de evaluación para los métodos investigados.	32
5.1	Tiempo de simulación promedio para un número de periodo variable.	52
5.2	Tempo de simulación promedio para un espesor de capa variable.	52
5.3	Tiempo de simulación promedio para un paso variable.	52
5.4	Tiempo de simulación promedio para capas de silicio.	53
5.5	Tabla de costos asociados al desarrollo del proyecto.	64
5.6	Tabla de costos asociados a la manufactura de una muestra DBR.	66

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

BPM	Beam Propagation Method
DBR	Distributed Bragg Reflector
FDFD	Finite Difference Frequency Domain
FDTD	Finite Difference Time Domain
FFT	Transformada Rápida de Fourier
MOL	Method of Lines
PWM	Plane Wave Method
RCWA	Rigorous Coupled Wave Analysis
SMM	Scattering Matrix Method
TMM	Transfer Matrix Method

Notación general □

\mathbb{C}	Conjunto de los números complejos.
$\text{Im}(z)$ o z_{Im}	Parte imaginaria del número complejo z
$\text{Re}(z)$ o z_{Re}	Parte real del número complejo z
y	Escalar.
j	$j = \sqrt{-1}$
\mathbf{A}	Matriz.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

Capítulo 1

Introducción

A modo de introducción, exploraremos el contexto del proyecto, que se desarrolló en el Grupo NePhoS de la Universidad Rovira i Virgili, con un enfoque en filtros ópticos Distributed Bragg Reflectors (DBR). Abordaremos el problema fundamental: la falta de una herramienta de apoyo para los investigadores experimentales en el diseño de estos filtros. Finalmente se describen los objetivos los cuales guiarán el resto del documento y aportará una breve descripción de la estructura del mismo.

1.1 Contexto del proyecto

El proyecto se llevó a cabo en el Grupo NePhoS, que pertenece al departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática de la Universidad Rovira i Virgili, ubicada en Tarragona, España. La Universidad Rovira i Virgili ocupa el tercer puesto de universidades españolas en innovación, docencia y desarrollo tecnológico según U-Ranking [1], lo cual demuestra su destacado compromiso con la excelencia académica y la investigación.

El Grupo NePhoS se enfoca en diversas áreas de estudio, trabajan con dispositivos ópticos, biosensores, células solares orgánicas, materiales porosos, micro-nano tecnología, modelización, nanoelectrónica y nano fotónica. [2] Estas áreas de investigación reflejan el amplio espectro de conocimientos que posee el grupo.

En particular, este proyecto tuvo el enfoque en el área de los filtros ópticos. Específicamente relacionado a los filtros de tipo Distributed Bragg Reflectors (DBR), los cuales son filtros ópticos compuestos por una doble capa de material con diferentes índices de refracción. Estos filtros presentan características de comportamiento óptico altamente interesantes para diversas aplicaciones.

Se tiene una importancia crítica de los filtros DBR y su relevancia en la investigación y el desarrollo de dispositivos ópticos avanzados. Los filtros DBR han sido un área de interés creciente debido a sus aplicaciones en campos como las telecomunicaciones, la

óptica cuántica y la espectroscopia. [3] No obstante, la fabricación y el diseño precisos de estos filtros han presentado desafíos significativos en el grupo NePhoS. La falta de herramientas de simulación y apoyo ha sido un obstáculo importante para los investigadores experimentales en este campo.

1.2 Descripción del problema

Este proyecto abordó la falta de una herramienta de apoyo para los investigadores experimentales en el campo del diseño de filtros Distributed Bragg Reflectors (DBR). Inicialmente, no se tenía una solución que permitiera estimar los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos para diversas configuraciones de componentes de múltiples capas con índices de refracción variables. Esto generó una necesidad urgente de contar con una solución que facilitara el proceso de fabricación de estos filtros ópticos altamente especializados.

La capacidad de analizar configuraciones de filtros se presentó como un componente crítico, ya que se abordó una carencia importante en la comprensión y diseño de filtros DBR para NePhoS. La necesidad de optimizar y ajustar las múltiples capas con índices de refracción variables fue crucial para alcanzar propiedades de reflexión, transmisión o absorción deseadas. Analizar estas configuraciones no solo contribuyó a la eficiencia en la fabricación de filtros ópticos altamente especializados, sino que también desempeñó un papel fundamental en la investigación experimental. La capacidad de evaluar los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos para diversas configuraciones proporcionó una base sólida para la toma de decisiones informadas durante el proceso de diseño, reduciendo la necesidad de iteraciones experimentales costosas y prolongadas.

Otro problema fue la falta de herramientas para almacenar los resultados obtenidos y contar con capacidades gráficas para compararlos con conjuntos de medidas obtenidas experimentalmente. Esta limitación dificultó la validación y el análisis de los resultados, lo que obstaculizó aún más el avance en la investigación y el diseño de filtros DBR. Esto implicó conocimientos más allá de la informática, ya que fue un hito para el desarrollo de sensores, dispositivos de captación y generación de energía, y promovió el aprendizaje continuo y el análisis de problemas.

1.2.1 Justificación

El grupo NePhoS se dedica activamente a la fabricación de dispositivos y buscó asegurar que los filtros DBR fueran los más adecuados para obtener los resultados deseados. Sin embargo, como no existía una herramienta de simulación, se dificultó la tarea de elegir los componentes ideales para estos filtros. Además, la capacidad de determinar con precisión el grosor de cada material que se debía fabricar y el número de capas requeridas era crucial para alcanzar una calidad alta. Esta incertidumbre representaba un riesgo en

el proceso de fabricación, ya que no era posible garantizar que los dispositivos cumplieran con las especificaciones esperadas.

La necesidad de optimizar el rendimiento de dispositivos DBR es evidente, ya que estos tienen un papel fundamental en una variedad de aplicaciones. Debido a esto, la ausencia de esta herramienta no solo afectó la eficiencia en la fabricación, sino que también limita la capacidad de innovación del grupo NePhoS. La justificación para el desarrollo de esta herramienta radica en la demanda creciente de dispositivos ópticos altamente especializados en campos como la telecomunicación, la detección remota, los sensores y la ciencia de los materiales, entre otros.

Los DBR ofrecen la capacidad de controlar selectivamente la reflectividad y transmitancia de las ondas ópticas, esto hace que sean dispositivos que se pueden utilizar en una gran variedad de disciplinas. Esto destaca la naturaleza mecatrónica del proyecto y su impacto que tiene en el desarrollo de diferentes áreas, como son su utilización en láseres para sensores [4] o telecomunicaciones [5], en el desarrollo de celdas solares [6], dispositivos fotovoltaicos [7], antenas fotoconductoras [8], entre otros dispositivos. Basándose en todo esto, el desarrollo de una herramienta de simulación permite a los investigadores explorar configuraciones innovadoras que podrían tener aplicaciones en cualquiera de las áreas mencionadas y más.

1.3 Síntesis del problema

En el grupo NePhoS existía la necesidad de tener una herramienta de apoyo para los investigadores experimentales que permitiera la simulación de los espectros para diversas configuraciones de un filtro DBR. Esta limitación dificultaba el proceso de fabricación de estos filtros, impidiendo la selección óptima de componentes.

1.4 Objetivos del proyecto

El objetivo general que se desarrolló en este proyecto es el diseño de una herramienta computacional para la simulación de filtros ópticos DBR, que permita modelar y comparar los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos.

Para alcanzar el objetivo general mencionado anteriormente, se formularon los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las necesidades de la herramienta de modelado y las especificaciones requeridas por el grupo NePhoS.
2. Programar un sistema computacional que permita el modelado de los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos para diferentes configuraciones de componentes de múltiples capas en los filtros DBR.

3. Desarrollar una interfaz gráfica que permita comparar y analizar los resultados obtenidos a través de la herramienta de simulación con conjuntos de medidas experimentales.
4. Redactar la documentación necesaria que proporcione instrucciones detalladas para que los usuarios puedan comprender fácilmente los pasos necesarios para instalar el software en sus sistemas y utilizar todas sus funcionalidades de manera efectiva.
5. Validar la exactitud y confiabilidad de la herramienta de simulación mediante pruebas y comparaciones exhaustivas con datos experimentales reales.

1.5 Estructura del documento

La estructura del presente documento se divide en 6 capítulos, en los cuales se detalla el diseño e implementación de una herramienta para el modelado y mejora en la construcción de filtros optoelectrónicos tipo DBR. El capítulo 2 constituye el marco teórico, explicando todos los conceptos relevantes y afines al proyecto. El capítulo 3 describe la metodología empleada durante el desarrollo del proyecto, incluyendo los pasos y procedimientos seguidos. En el capítulo 4 se presenta la propuesta de diseño, evidenciando el seguimiento de la metodología propuesta y detallando el diseño y la implementación de la solución. Los resultados del proyecto se analizan en el capítulo 5, donde también se examinan los datos obtenidos con la herramienta. Por último, el capítulo 6 presenta las conclusiones del desarrollo del proyecto, junto con recomendaciones y trabajo futuro.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo, se incorporan todos los conceptos teóricos pertinentes y relacionados con el proyecto. No obstante, se asume que el público objetivo contaba con conocimiento sobre el tema, lo que permitió mantener esta sección de forma concisa. Se describieron aquellos conceptos pertinentes pero no fundamentales que resultaron necesarios para la realización del trabajo.

2.1 Óptica: conceptos básicos

En esta sección se explican los conceptos fundamentales de la óptica que son relevantes para este proyecto. Se abordaron temas esenciales que incluyeron la propagación de la luz, la reflexión, la refracción, el índice de refracción y la ley de Snell. Estos conceptos resultaron cruciales para comprender cómo la luz interactúa con diferentes medios y cómo se comporta en interfaces entre medios con diferentes propiedades ópticas. Un conocimiento sólido de estos principios proporcionó la base teórica necesaria para abordar posteriormente los filtros DBR y los métodos de simulación en profundidad.

2.1.1 Propagación de la luz

La propagación de la luz se refiere a como las ondas electromagnéticas viajan a través de un medio [9]. Este fenómeno puede ocurrir en materiales transparentes como por ejemplo, aire, agua y vidrio. La luz viaja a una velocidad constante en el vacío, esta puede ser derivada de las ecuaciones de Maxwell en términos de las propiedades eléctricas y magnéticas del medio [9]. La ecuación que la describe está dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.1)$$

Donde ϵ_0 y μ_0 son la permitividad eléctrica del vacío y la permeabilidad magnética

del vacío respectivamente. Esta ecuación es fundamental en la teoría electromagnética y establece la velocidad máxima a la que las perturbaciones electromagnéticas, como las ondas de luz, pueden propagarse a través del espacio libre.

Sin embargo, la velocidad de la luz se disminuye comparado con c cuando viaja a través de materia, debido a interacciones a nivel atómico y molecular [10]. Esta reducción en la velocidad depende de la densidad óptica y el índice de refracción del medio [9]. Por ejemplo, la luz viaja más despacio en medios como agua o vidrio que en el aire debido a la diferencia en el índice de refracción. Esta velocidad está dada por

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

En el cual v es la velocidad de la luz en un medio, con índice de refracción n [11].

A medida que la luz se propaga, entran en juego otros efectos electromagnéticos que modifican el recorrido y la distribución espacial de las ondas. Estos efectos incluyen la reflexión y la refracción en las interfaces, la difracción alrededor de obstáculos, la dispersión de diferentes longitudes de onda y la dispersión causada por partículas o fluctuaciones en el medio [10]. Comprender cómo surgen estos efectos de propagación sienta las bases del campo de la óptica. Tecnologías como lentes, comunicación de fibra óptica, holografía y láseres dependen en gran medida del control de la propagación de la luz [9].

2.1.2 Índice de refracción

El índice de refracción de cualquier medio óptico es definido como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el mismo medio [11]. Tal cual se puede observar en la ecuación (2.2) al despejar el valor de índice de refracción. La densidad óptica de un material es una medida de su índice de refracción [11]. Es decir, un valor alto de índice quiere decir una densidad alta y viceversa.

El índice de refracción de un metal suele ser complejo, y la onda incidente sufrirá absorción en una cantidad que depende de la frecuencia [9]. El componente complejo del índice de refracción se suele llamar el coeficiente de extinción y suele variar dependiendo de la longitud de onda [9]. Esto significa que un número complejo en el índice de refracción se refiere a la absorción o atenuación de la luz incidente.

2.1.3 Reflexión y refracción

Cuando la luz incide en la superficie de un material transparente como el vidrio, se encuentra con muchos átomos diminutos que son mucho más pequeños que la longitud de onda de la luz [10]. Cuando la luz atraviesa un material denso, la mayor parte de la luz dispersa se anula excepto en la dirección de avance, lo que da lugar a un haz continuo. Sin embargo, en el límite entre dos materiales transparentes diferentes (por ejemplo, el

aire y el vidrio), parte de la luz siempre se refleja hacia atrás, provocando lo que llamamos reflexión [9].

Si la transición entre estos dos materiales es gradual, con la constante dieléctrica o el índice de refracción cambiando a lo largo de una distancia de una longitud de onda o más, habrá muy poca reflexión. Pero si la transición se produce en una distancia de $1/4$ de longitud de onda o menos, se comporta como un cambio repentino y discontinuo, lo que provoca más reflexión [9].

En la figura 2.1, un haz de luz incide en un ángulo sobre una superficie lisa de vidrio en un entorno de vacío. Cuando la onda atraviesa las moléculas de la superficie, energiza cada molécula, haciendo que emita fotones en todas direcciones [9]. Estos fotones se suman en una sola dirección debido a la longitud de onda mucho mayor de la luz incidente en comparación con las separaciones moleculares, resultando en un único haz reflejado [9]. La dirección de este haz depende del ángulo de incidencia y la diferencia de fase entre los dispersores atómicos.

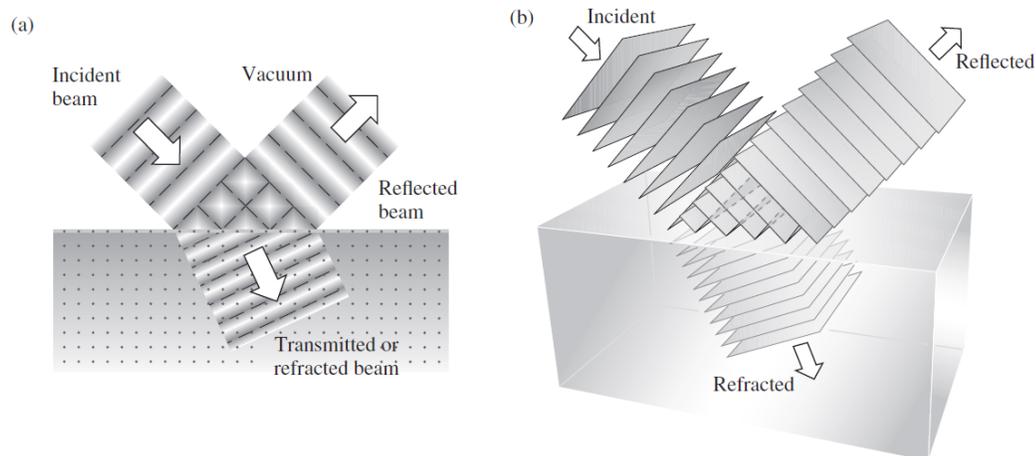


Figura 2.1: Interacción de un haz de ondas planas en un medio transparente [9].

Por otro lado, la refracción se produce cuando la luz pasa de un medio a otro y se curva debido al cambio de velocidad [9]. El ángulo de refracción depende de los índices de refracción de los dos medios y se describe mediante la ley de Snell. La refracción es responsable de efectos ópticos como lentes y prismas [9].

Como se puede observar en la figura 2.1, también se representa la refracción del haz de luz. Se puede observar como los frentes de onda cambian de dirección al cruzar la frontera debido a la diferencia de velocidad [9] descrita por la ecuación (2.2). Cuando un frente de onda viaja a través de dos medios de índice de refracción diferente, la luz se refracta y forman un ángulo con la interfaz del medio.

2.1.4 Óptica geométrica

La óptica geométrica es un modelo de óptica que describe la propagación de la luz en términos de rayos. La luz se modela como rayos que viajan en línea recta y se curvan en las interfaces entre medios según la ley de la reflexión y la ley de Snell [12]. Los rayos se originan en puntos de los frentes de onda y son perpendiculares a éstos.

En este modelo se asume que la longitud de onda es pequeña en comparación con otras distancias, o los objetos en el sistema estudiado [12]. Otra suposición de este modelo es que los rayos viajan de forma independiente sin interferir entre sí. El principio de superposición puede combinar la contribución individual de los rayos [12].

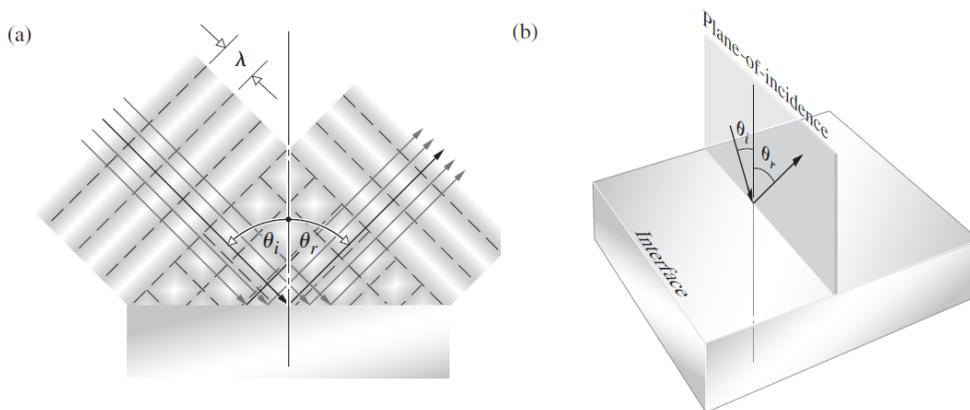


Figura 2.2: Representación de rayo para un haz de ondas planas [9].

En la figura 2.2 se puede observar como se transforma de la representación de frentes de onda a rayo. En medios isotrópicos los rayos son perpendiculares al frente de onda [9], por lo que para la representación se selecciona un rayo para representar el haz de luz.

2.1.5 Ley de Snell

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia y refracción en la reflexión. Cuando un rayo de luz incide en la frontera que separa dos medios diferentes, parte del rayo se refleja de nuevo en el primer medio y el resto se refracta [11]. En representación de rayos al rayo incidente se le dibuja una línea normal perpendicular a la superficie de incidencia. La ley de reflexión indica que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión [11].

Por otro lado, la ley de Snell describe el ángulo de refracción también es conocida como la ley de la refracción y está dado por

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.3)$$

Como se muestra en la figura 2.3 el subíndice i se refiere al lado incidente y t en el medio transmitido. A partir de la ecuación (2.3) se entiende que el rayo que entra en

un medio de mayor índice se curva hacia la normal y al entrar en un medio que tiene un índice más bajo, el rayo refractado se aleja de la normal [9].

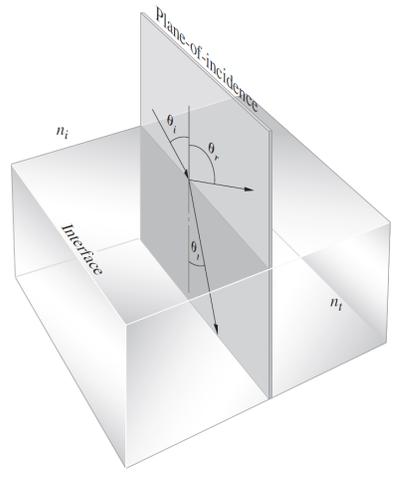


Figura 2.3: El rayo incidente, reflejado y transmitido en el plano de incidencia. [9].

2.1.6 Polarizaciones

Las polarizaciones es la dirección de oscilación de los campos eléctricos en una electromagnética. Es importante comprender la polarización, ya que la interacción de la luz con medios y estructuras cambian según la polarización. Para esto se emplea el vector de Jones y los dos modos principales de polarización que se van a describir son TE (s) y TM (p).

Vector de Jones

Introducido por el físico R. Clark Jones, el vector de Jones es una manera concisa y aplicable a haces coherentes que representa el haz polarizado en términos del vector eléctrico, donde $E_x(t)$ y $E_y(t)$ son componentes escalares instantáneos [9]. En este contexto, el vector de Jones se usa para que a partir del haz de luz medida se pueda analizar y manipular para entender como interactúa con diferentes elementos. El vector de Jones se escribe de manera compleja para preservar la información de fase como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} E_{0x}e^{i\varphi_x} \\ E_{0y}e^{i\varphi_y} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Transversal Eléctrica

La polarización transversal eléctrica (TE o s) se caracteriza porque el vector de campo eléctrico E en la onda electromagnética es perpendicular a la dirección de propagación y el

vector de campo magnético está en el plano definido por la dirección de propagación [13]. Es decir, la polarización TE se caracteriza por una dirección de oscilación puramente transversal. En la figura 2.4 se puede observar un diagrama de rayo para como se ve esta polarización.

Transversal Magnética

Esta polarización transversal magnética (TM o p) es un complemento a la polarización TE. En este caso, el vector de campo magnético es el que se encuentra perpendicular a la dirección de propagación [13]. De manera similar, el vector de campo eléctrico en este caso está en el plano definido por la dirección de propagación. Esta polarización también se muestra en la figura 2.4.

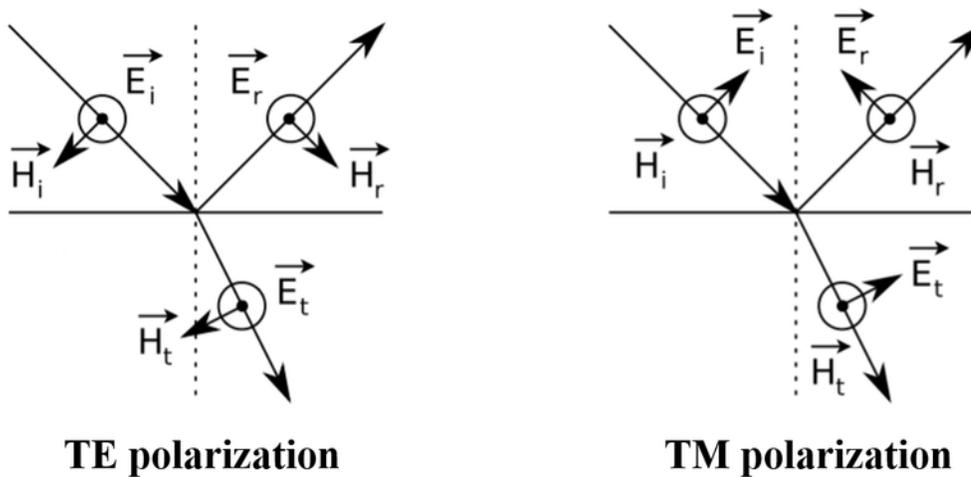


Figura 2.4: Representación de rayo para polarizaciones TE y TM [14].

2.1.7 Ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de Fresnel son utilizadas para obtener el coeficiente de amplitud de transmisión y reflexión en una interfaz plana de dos medios transparentes homogéneos [15]. Estas ecuaciones fueron desarrolladas por el físico francés Augustin-Jean Fresnel en el siglo XIX y son esenciales para comprender cómo se comporta la luz cuando pasa de un medio a otro [9]. Las ecuaciones de Fresnel se muestran a continuación.

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.5)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2.6)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1} \quad (2.7)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos\theta_2 - n_2 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_2 \cos\theta_1} \quad (2.8)$$

Como se puede observar, las ecuaciones de Fresnel son diferentes para la polarización s y p , y su utilidad es de gran relevancia en la óptica. En estas ecuaciones, los subíndices 1 y 2 representan los dos medios entre los cuales ocurre la interacción de la luz. El subíndice 1 generalmente se refiere al medio de origen desde donde incide la luz, y el subíndice 2 representa el medio al que la luz se está transmitiendo o reflejando. Estos subíndices son esenciales para calcular con precisión los coeficientes de amplitud de reflexión (r) y transmisión (t) en una interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción. En otras palabras, las ecuaciones (2.5) y (2.7) describen la reflexión de la luz al incidir en la interfaz entre dos medios. Del mismo modo, las ecuaciones (2.6) y (2.8) explican la refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

2.1.8 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto fundamental de cuatro ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en función del tiempo y la posición en el espacio. Estas ecuaciones son la base teórica para comprender fenómenos ópticos y electromagnéticos [9]. A continuación, se presentan las cuatro ecuaciones de Maxwell relevantes.

La primera es la ley de Gauss para el campo eléctrico, esta ecuación describe cómo el campo eléctrico \mathbf{E} se relaciona con la densidad de carga eléctrica ρ .

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

Como en óptica se utilizan materiales dieléctricos $\rho = 0$, ya que estos materiales tienen una conducción baja, por lo tanto, en óptica la ley de Gauss eléctrica suele simplificarse a [16]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.10)$$

A continuación se muestra la ley de Gauss para el campo magnético y esta indica que las líneas del campo magnético son cerradas y no hay mono polos magnéticos.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.11)$$

La siguiente es la Ley de Faraday que describe cómo un cambio en el campo magnético induce un campo eléctrico.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.12)$$

Por último, la ley de Ampère-Maxwell establece que la circulación del campo magnético alrededor de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente total que atraviesa la superficie delimitada por dicha trayectoria. A continuación se muestra la ecuación en la cual \mathbf{J} es la densidad de corriente y ε_0 y μ_0 son la permitividad y permeabilidad del vacío, respectivamente [12].

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (2.13)$$

Estas ecuaciones son fundamentales para la óptica, ya que proporcionan el marco teórico básico que describe el comportamiento de las ondas electromagnéticas, esto incluye a las ondas ópticas. Específicamente establece los fundamentos matemáticos y leyes que rigen la propagación de la luz, interacción con medios y los efectos que experimenta, como polarización, interferencia y difracción [12]. Las formas simplificadas de las ecuaciones de Maxwell son ampliamente aplicables a situaciones prácticas de la óptica en las que intervienen ondas monocromáticas.

2.1.9 Interferencia de la Luz

La interferencia de la luz es un fenómeno fundamental en la óptica que ocurre cuando dos o más ondas de luz se superponen, resultando en un patrón de intensidad de luz que varía en el espacio. Este fenómeno es el resultado de la naturaleza ondulatoria de la luz y puede producir patrones de luz y oscuridad, o colores cambiantes, dependiendo de las fases relativas de las ondas que interfieren.

La interferencia puede ser constructiva o destructiva. Una interferencia totalmente constructiva es cuando las ondas tienen un desfase que es un múltiplo de 2π . Por el lado contrario, cuando se tiene un desfase que es un múltiplo impar de π se tiene una interferencia totalmente destructiva [9]. Es decir, cuando las crestas coinciden resulta en una amplitud mayor combinada, $I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ y cuando las crestas coinciden con los valles, estas se cancelan y reducen la amplitud, $I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$. En este caso, la letra "I" representa la intensidad de la luz, y $\sqrt{I_1 I_2}$ representa la contribución de la interferencia.

Además de la interferencia totalmente constructiva y destructiva, existen puntos medios donde el impacto es menor. En estos casos, cuando $0 < \cos\delta < 1$, con δ siendo el ángulo de desfase, esto resulta en una interferencia constructiva con resultado $I_1 + I_2 < I < I_{max}$. Por otro lado, cuando $0 > \cos\delta > -1$ entonces se tiene una interferencia destructiva en la cual $I_1 + I_2 > I > I_{min}$ [9].

En el contexto de la óptica y la física de la luz, la coherencia se refiere a la previsibilidad y uniformidad en la fase y frecuencia de las ondas de luz. Esta propiedad es crucial para entender cómo las distintas ondas de luz interactúan entre sí, especialmente

en fenómenos como la interferencia y la difracción. La coherencia temporal está relacionada con la estabilidad de la fase de una onda de luz a lo largo del tiempo. La coherencia espacial se refiere a la correlación de fase a lo largo de diferentes puntos en el espacio a través de los cuales pasa la onda de luz [11].

En términos prácticos, la coherencia temporal se mide como el tiempo durante el cual la onda mantiene una forma predecible antes de cambiar aleatoriamente de fase y la coherencia espacial, la distancia espacial sobre la cual la onda de luz mantiene un patrón regular y predecible antes de experimentar cambios abruptos de fase [9]. En síntesis, la coherencia da una medida de que tan predecible es la onda de luz.

Un ejemplo de la interferencia es el experimento de doble rendija. Thomas Young, en 1801, dirigió un haz de luz a través de dos rendijas cercanas, observando que en lugar de formar dos líneas separadas de luz, como se esperaría si la luz fuera puramente una partícula, se formaba un patrón de franjas brillantes y oscuras en una pantalla detrás de las rendijas [13]. En la figura 2.5, se puede observar una representación de como se ve este experimento.

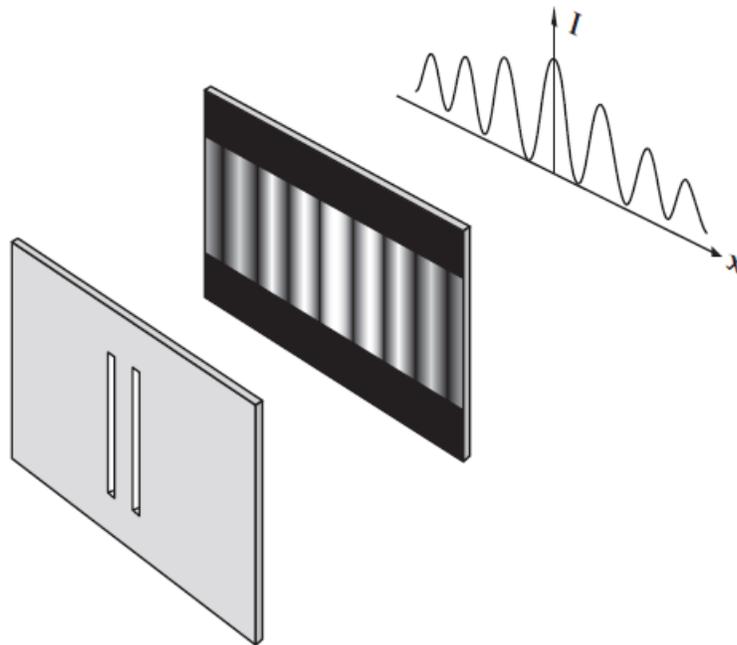


Figura 2.5: Representación del experimento de la doble rendija de Young [9].

Se observa una fuente de luz que proyecta un haz hacia un panel con dos rendijas paralelas. Cuando la luz pasa a través de estas rendijas, funciona como dos fuentes coherentes de ondas de luz que se expanden y se superponen en el espacio detrás de las rendijas. Las franjas con más intensidad ocurren donde existe interferencia constructiva y las franjas oscuras cuando se cancelan por interferencia destructiva. En el lado derecho de la imagen se puede observar un gráfico que representa la amplitud de la intensidad de la luz en función de la posición. Este experimento es fundamental en la óptica física,

ya que ilustra la naturaleza ondulatoria de la luz y demuestra cómo las ondas luminosas pueden experimentar interferencia.

2.2 Óptica de un medio multicapa

Dentro de esta sección, se exploró a fondo el fenómeno de la óptica en medios multicapa, compuestos por varias capas con propiedades ópticas diferentes. Se examinaron los efectos resultantes de la interacción de la luz con estas estructuras, como la reflexión, la refracción y la interferencia. La comprensión de la óptica en medios multicapa se estableció como un componente esencial para el diseño de diversos dispositivos ópticos, proporcionando una base sólida para investigaciones posteriores.

En este contexto, el proyecto se enfocará específicamente en los medios multicapa periódicos, ya que son los que están relacionados con dispositivos DBR. En la figura 2.6 se presenta un sistema multicapa periódico formado por dos materiales alternados denominados capa 1 y capa 2. En este sistema, $A(x)$ representa la amplitud de la onda electromagnética que se propaga hacia la derecha, mientras que $B(x)$ representa la amplitud de la onda que se desplaza, en sentido contrario, hacia la izquierda. Estas funciones $A(x)$ y $B(x)$ son discontinuas en las interfaces entre las dos capas debido a las reflexiones y refracciones que ocurren en los límites [17].

Cada capa tiene un espesor hm y está caracterizada por un índice de refracción nm distinto. La estructura tiene un período de repetición dado por Λ . Todo el sistema multicapa se encuentra entre dos medios externos: por un lado, está acoplado a un medio inicial homogéneo definido mediante su índice de refracción n_0 y del otro lado se acopla a un medio final homogéneo descrito por su índice n_s .

El campo eléctrico $E(x)$ consiste en una onda que viaja hacia la izquierda y una que viaja hacia la derecha, por lo que puede ser descrito como se muestra a continuación:

$$E(x) = Re^{-ik_x x} + Le^{ik_x x} = A(x) + B(x) \quad (2.14)$$

Donde R y L son las constantes en cada capa homogénea y k_x el componente en x del vector de onda.

A partir de lo que se puede observar en la figura 2.6, la estructura del dieléctrico se puede describir por:

$$n(x) = \begin{cases} n_0, & x < x_0, \\ n_1, & x_0 < x < x_1, \\ n_2, & x_1 < x < x_2, \\ \vdots & \vdots \\ n_{2N}, & x_{2N-1} < x < x_{2N}, \\ n_s & x > x_{2N} \end{cases} \quad (2.15)$$

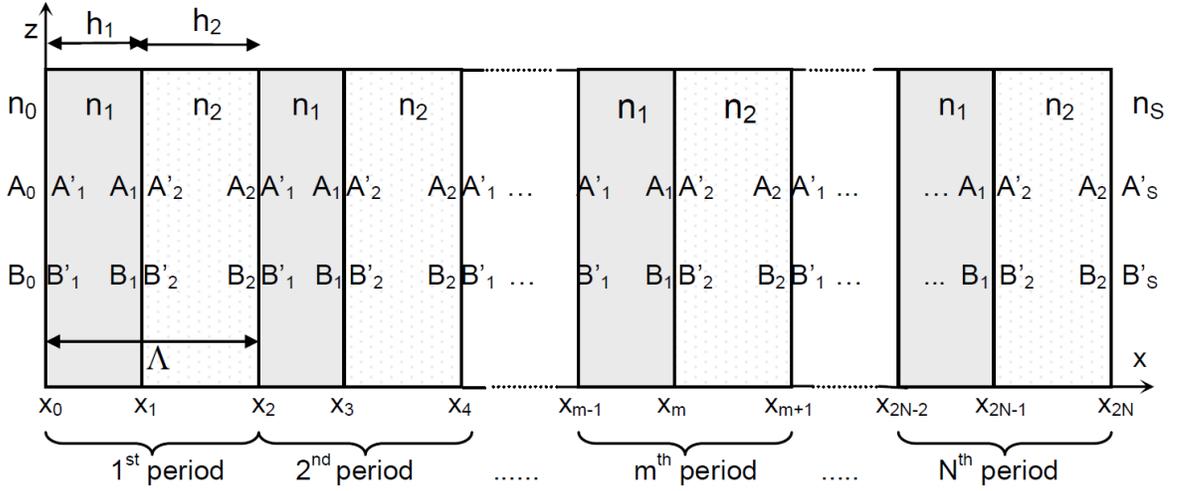


Figura 2.6: Esquemático de un sistema multicapa [17].

Además, se tiene que $n(x) = n(x + \Lambda)$ y donde n_m es el índice de refracción de la m -ésima capa, x_m , es la posición de la entre la capa m y la capa $(m+1)$ [18]. Los espesores de capa, se relacionan con las x_m y el periodo de repetición, mediante

$$x_m = \begin{cases} x_1 = x_0 + h_1 \\ x_2 = x_0 + \Lambda = x_1 + h_2 \\ \vdots \\ x_{2N} = x_0 + N\Lambda = x_{2N-1} + h_2 \end{cases} \quad (2.16)$$

La expresión para el campo eléctrico de una solución general de onda plana en la ecuación de onda puede ser formulada como [9]:

$$E = E(x)e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (2.17)$$

Por lo tanto, en una estructura multicapa como se describe y con la nomenclatura de la figura 2.6 se puede escribir de la siguiente forma:

$$E(x) = \begin{cases} A_0 e^{-ik_{0x}(x-x_0)} + B_0 e^{ik_{0x}(x-x_0)} & x < x_0 \\ A_m e^{-ik_{mx}(x-x_m)} + B_m e^{ik_{mx}(x-x_m)} & x_{m-1} < x < x_m \\ A'_s e^{-ik_{sx}(x-x_{2N})} + B'_s e^{ik_{sx}(x-x_{2N})} & x > x_{2N} \end{cases} \quad (2.18)$$

Donde k_{mx} es el componente x de los vectores de onda, descritos por:

$$k_{mx} = \left[\left(n_m \frac{\omega}{c} \right)^2 - \beta^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, 2N, s \quad (2.19)$$

En el cual c es la constante de velocidad de la luz, A_m y B_m representan la amplitud de la onda en la interfaz $x = x_m$. Además, está relacionado con el ángulo de incidencia del haz de luz para poder simplificarlo de la siguiente manera [18]:

$$k_{mx} = \left[\left(n_m \frac{\omega}{c} \right)^2 \cos^2(\theta_m) \right] \quad (2.20)$$

2.3 Métodos de simulación y análisis

En esta sección, se adentró en los métodos y herramientas utilizados para simular y analizar dispositivos ópticos. Se exploraron las técnicas computacionales y matemáticas que se pueden utilizar para modelar el comportamiento de estos dispositivos, incluyendo métodos numéricos y algoritmos de simulación. Además, se identificarán cuáles son las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos. El método seleccionado para la solución de este proyecto fue el *Transfer Matrix Method* por lo que este fue explicado más ampliamente en el capítulo 4.

2.3.1 Transfer Matrix Method

El método de la matriz de transferencia (TMM de sus siglas en inglés) es un método matemático de análisis utilizado en electromagnetismo y óptica. Este se usa para analizar las características de reflexión y transmisión de ondas planas a través de una losa infinitamente extendida de material [9]. Este fue formulado inicialmente para el análisis de materiales dieléctricos uniaxiales y homogéneos en 1960, pero ha evolucionado para poder analizar estructuras más complejas, como son medios multicapa [19]. Este método representa una herramienta efectiva y conveniente para investigar el comportamiento electromagnético de diferentes disposiciones de materiales y como se va a mencionar más adelante fue el método seleccionado, por lo tanto, se va a profundizar más que otros métodos.

Antes de adentrarnos en una explicación detallada del Método de la Matriz de Transferencia, resulta crucial reconocer que este método se sustenta en los fundamentos previamente abordados acerca de los conceptos esenciales de óptica, así como en otros principios básicos de física. En otras palabras, se apoya en la comprensión de la propagación de ondas electromagnéticas, cuyo comportamiento está regido por las ecuaciones de Maxwell, así como en las propiedades fundamentales tales como la permitividad y permeabilidad, y las propiedades ópticas inherentes a los materiales.

En el TMM, las condiciones de interfaz desempeñan un papel crucial, ya que se refieren a las relaciones entre los campos eléctricos y magnéticos en cada interfaz entre capas de material. La ecuación de la onda electromagnética se deriva directamente de la ley de Faraday (2.12) y la ley de Ampere (2.13) en un medio homogéneo e isotrópico [20]. Además, a partir de las cuatro ecuaciones de Maxwell, se obtienen las ecuaciones de Fresnel, las cuales son fundamentales para el cálculo de reflexión y transmisión [20].

Formulación para un sistema multicapa

La formulación del transfer matrix 2×2 se va a hacer a partir de la figura 2.6 descrita en la sección 2.2. Inicialmente para ilustrar este método se definen las condiciones de interfaz que se muestran a continuación

$$\begin{aligned}
A_{m-1} &= A(x_m^-) \\
B_{m-1} &= B(x_m^-) \\
A'_m &= A(x_m^+) \\
B'_m &= B(x_m^+)
\end{aligned} \tag{2.21}$$

A partir de las ecuaciones (2.18) y (2.21), A_m y B_m representan la amplitud de la onda electromagnética en la interfaz $x = x_m$, por lo tanto, se puede escribir la siguiente relación para obtener la diferencia cuando pasa de capa:

$$\begin{pmatrix} A_{m-1} \\ B_{m-1} \end{pmatrix} = D_{m-1}^{-1} D_m \begin{pmatrix} A'_m \\ B'_m \end{pmatrix} \tag{2.22}$$

Además de esto, es necesario obtener una relación de la onda electromagnética cuando viaja del extremo izquierdo de la capa hasta el derecho y este está dado por:

$$\begin{pmatrix} A'_m \\ B'_m \end{pmatrix} = P_m \begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} \tag{2.23}$$

Como se pueden observar de las ecuaciones (2.22) y (2.23) hay unas matrices que relacionan las condiciones en diferentes posiciones de la onda electromagnética. Estas son llamadas la matriz dinámica D_m que describe el cambio en una interfaz y la matriz de propagación P_m que describe el cambio de la onda dentro de la misma capa. La matriz dinámica se obtiene a partir del desarrollo matemático de las ecuaciones de Fresnel (2.5, 2.6, 2.7 y 2.8) y la de propagación a partir del desplazamiento lineal de la onda, como está descrito por la ecuación (2.17), ya que esta se mantiene en el mismo material, es una operación simple donde se despeja $E(x + h_m)$. Ambas se muestran a continuación.

$$D_m = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_m \cos(\theta_m) & -n_m \cos(\theta_m) \end{bmatrix} & \text{Para polarización } s \text{ (TE)} \\ \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m) \\ n_m & -n_m \end{bmatrix} & \text{Para polarización } p \text{ (TM)} \end{cases} \tag{2.24}$$

$$P_m = \begin{bmatrix} e^{jk_m x h_m} & 0 \\ 0 & e^{-jk_m x h_m} \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

La ecuación (2.25) de la matriz de propagación aplica para ambas polarizaciones y k se refiere al vector de la onda es decir la dirección en la que viaja y esta descrita por

$$k_m = k_0 n_m \cos(\theta_m); \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.26}$$

Con el valor de longitud de onda (λ) en nanómetros.

A partir de estos ya se puede construir la matriz de transferencia del sistema multicapa. En aplicaciones de la vida real, las pruebas en dispositivos multicapas solo van a tener una luz emitida desde un extremo, por lo que el valor de B'_s va a ser 0. En términos generales, el sistema multicapa puede ser descrito por la siguiente relación mediante la matriz de transferencia:

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} A'_s \\ B'_s \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Para obtener la matriz de transferencia \mathbf{M} completa es necesario hacer una multiplicación de las matrices dinámicas y de propagación de todo el sistema. Tomando en cuenta lo siguiente: la matriz de propagación es solo necesario por dentro del dispositivo, ya que es cuando las ondas electromagnéticas se desplazan. Por lo tanto, se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = D_0^{-1} \left[\prod_{m=1}^N D_m P_m D_m^{-1} \right] D_s \quad (2.28)$$

Como resumen, N es el número total de capas, A_0 y B_0 son las amplitudes de de las las planos de onda en el medio 0 o ambiente en $x = x_0$ y A_s y B_s son las amplitudes de de las las planos de onda en el medio s o sustrato en $x = x_s$ [18].

Transmisión y Reflexión

La ecuación (2.27) permite tener una relación entre la luz emitida, reflejada y transmitida del sistema multicapa dependiendo de las características físicas de este. A partir de esta matriz se pueden obtener los coeficientes de transmisión y reflexión del sistema. Asumiendo que $B_s = 0$ y la luz incide desde el medio 0, entonces se tiene que [18]:

$$r = \frac{B_0}{A_0} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (2.29)$$

$$t = \frac{A_s}{A_0} = \frac{1}{M_{11}} \quad (2.30)$$

Finalmente, a partir de estos coeficientes se puede obtener el porcentaje de reflexión y transmisión del sistema. Asumiendo que el medio 0 o ambiente no tiene pérdida, y que los medios delimitadores (0 y s) ambos son dieléctricos puros con índice de refracción real, entonces:

$$R = |r|^2 \quad (2.31)$$

$$T = \frac{n_s \cos(\theta_s)}{n_0 \cos(\theta_0)} |t|^2 \quad (2.32)$$

Ventajas y desventajas

El método de TMM permite un enfoque analítico eficiente para estudiar la propagación de ondas en dispositivos ópticos. Entre sus principales ventajas es la eficiencia computacional en comparación con otras técnicas numéricas, la capacidad de manejar las condiciones de interfaz [21]. Otra de las ventajas principales es su compatibilidad con sistemas multicapa y sobre todo con sistemas periódicos y que se pueden utilizar índices de refracción complejos [20]. Las desventajas de este método son que no puede manejar materiales anisotrópicos y que para estructuras con capas muy gruesas puede tener pérdida de precisión [18]. Por otro lado, la necesidad de conocer de manera precisa las constantes ópticas y los grosores de capa pueden ser problemas.

En el contexto de este proyecto, las estructuras DBR no utilizan materiales anisotrópicos, por lo que no es necesario hacer ninguna modificación del método, y además estos no tienen capas con grosor mucho mayor a las longitudes de onda para los cuales son usados. También, para el grupo NePhoS las constantes ópticas y grosores se pueden aproximar en el proceso de fabricación, de manera que sea manejable el uso de este método. En síntesis, la selección del método TMM para este proyecto se basa en su eficaz capacidad para analizar las propiedades de las estructuras DBR, resaltando su eficiencia computacional y su compatibilidad con sistemas multicapa y periódicos.

2.3.2 Finite Difference Time Domain

La FDTD es una técnica de modelado numérico directo en el dominio del tiempo que se utiliza para resolver las ecuaciones de Maxwell. Aproxima las derivadas espaciales y temporales en las ecuaciones de Maxwell utilizando aproximaciones de diferencias finitas centradas [22]. El cálculo se discretiza en una malla con pasos espaciales y temporales, resolviendo las componentes de los campos E y H en pasos alternos de medio tiempo y aplicando las ecuaciones de Maxwell de manera diferencial en cada punto de la malla para avanzar los campos en el tiempo de manera iterativa [22].

Las ventajas que presenta es que es conceptualmente sencillo y fácil de implementar. También permite el uso de materiales y geometrías complejas. Por otro lado, las desventajas es que es computacionalmente complejo debido a su carácter iterativo. Además de esto, requiere un nivel alto de memoria para problemas tridimensionales.

2.3.3 Finite Difference Frequency Domain

El FDFD es un método numérico utilizado para analizar estructuras de cristales fotónicos y calcular sus diagramas de bandas. Al igual que el FDTD se basa en la solución de las ecuaciones de Maxwell, pero en este caso discretiza las ecuaciones de Maxwell utilizando diferencias finitas en el dominio de la frecuencia en lugar del dominio del tiempo [23].

Al igual que en el método FDTD, en FDFD se tienen las ventajas que es conceptualmente simple y fácil de entender [23], la implementación de la aproximación de diferencia finita es directa y estándar [24]. Las desventajas de este método es que se generan problemas para superficies curvas y que tiene menor exactitud que otros métodos como el *Plane Wave Method* [24]. Al igual que FDTD, por su carácter iterativo, este llega a ser computacionalmente complejo.

2.3.4 Plane Wave Method

El método de onda plana (PWM de sus siglas en inglés) es una técnica utilizada en óptica para describir la propagación de la luz, especialmente en situaciones donde las ondas de luz son casi perfectamente planas. El método PWM es una técnica numérica utilizada para calcular la estructura de bandas de los cristales fotónicos, esta consiste en expandir el campo electromagnético en el cristal como una superposición de ondas planas [25].

Entre las ventajas de este método está que es simple de entender y computacionalmente fácil de implementar. También es ideal para problemas periódicos. Entre las desventajas que tiene este método es que por sus cálculos, si la constante dieléctrica es a su vez una función de la frecuencia tiene problemas. El paso crucial del método es la diagonalización de la matriz, lo que hace que el tiempo de cálculo aumente de manera cúbica con el número de ondas planas utilizadas en la expansión [26]. Esta escala de tiempo es ineficiente y se vuelve problemática cuando se necesitan muchas ondas planas para analizar estructuras complejas, ya que los cálculos se vuelven muy lentos [26].

2.3.5 Rigorous Coupled Wave Analysis

El análisis riguroso de ondas acopladas (RCWA) es un método para analizar la propagación y difracción de ondas electromagnéticas en estructuras periódicas, como redes de difracción, nanoestructuras y otros dispositivos ópticos [27]. RCWA representa los campos electromagnéticos en la estructura como una suma de ondas armónicas espaciales y las sustituye en las ecuaciones de Maxwell para obtener un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas para las amplitudes armónicas [28]. La RCWA formula las ecuaciones de Maxwell en forma matricial que pueden resolverse numéricamente. Los campos se expanden en términos de series de Fourier, y RCWA calcula esencialmente el acoplamiento entre estos armónicos espaciales a medida que la luz se propaga a través de la estructura [29].

Entre las desventajas que tiene este método es que solo funciona para estructuras periódicas [30], también la convergencia tiene problemas cuando se tienen estructuras metálicas o con constantes dieléctricas altas [29], por último, este método tiene una complejidad de recursos computacionales altos al igual que su implementación [31]. En términos de ventajas, este método tiene una exactitud muy alta [27], otra ventaja es que se

obtiene la transmisión, reflexión y otros datos directamente con este método [31].

2.3.6 Otros Métodos

A pesar de su potencial aplicabilidad en la simulación y análisis de estructuras ópticas, varios métodos adicionales fueron considerados inicialmente en el proceso de investigación. Estos métodos, aunque interesantes, fueron posteriormente descartados en favor de un enfoque más eficaz y adecuado para los objetivos de ese proyecto. A continuación, se describen brevemente estos métodos que no fueron seleccionados para su implementación:

- **Beam Propagation Method (BPM):** Este aproxima la ecuación de onda para modelar la propagación de haces ópticos en guías de onda, usa un enfoque basado en cuadrículas utilizando diferencias finitas o FFT [32]. La desventaja principal y clave es que este método no puede manejar ondas que se propagan en dirección contraria, por lo que en una estructura donde hay ondas de reflexión no tiene un uso efectivo [31].
- **Method of Lines (MOL):** Este método fue desarrollado para resolver ecuaciones diferenciales parciales, en este caso, para las ecuaciones de Maxwell. MOL es RCWA, pero utilizando diferencias finitas en vez de transformadas de Fourier [31]. RCWA es más adecuado que MOL para modelar la difracción, la dispersión y los efectos ópticos periódicos debido a su formulación en el dominio de la frecuencia y a su base de ondas acopladas, por lo tanto, MOL fue descartado.
- **Scattering Matrices Method:** SMM analiza simultáneamente las direcciones transversales y de propagación de la luz. Emplea la técnica de descomposición del campo eléctrico utilizando funciones de ondas planas como base, y luego utiliza condiciones de coincidencia de modos en las interfaces entre las diferentes secciones [33]. Este método fue descartado, ya que es una modificación de TMM para estructuras que tienen efectos de dispersión, el cual no es caso del presente proyecto.

2.4 Distributed Bragg Reflector

En esta sección, se exploró el concepto de los filtros Distributed Bragg Reflectors (DBR) en detalle. Se profundizó en su estructura, propiedades y aplicaciones en diversos campos, como las telecomunicaciones y la óptica cuántica. Se buscó comprender por qué los DBR eran de gran interés y cómo su diseño y fabricación precisos eran fundamentales para su rendimiento. La sección sirvió como una introducción sólida antes de abordar la implementación y simulación de los DBR en secciones posteriores del trabajo.

2.4.1 Estructura y funcionamiento

El principio de funcionamiento de un DBR se basa en la reflexión Bragg de ondas de luz. Cuando una onda de luz incide en la interfaz entre dos materiales con diferentes índices de refracción, una parte de la onda se refleja y otra se transmite. En un DBR, cada interfaz de capa contribuye a la reflexión general, y cuando las condiciones de la interferencia constructiva son cumplidas, se produce una reflexión muy alta para ciertas longitudes de onda [18].

Los DBR son estructuras ópticas multicapa diseñadas para reflejar selectivamente ciertas longitudes de onda de la luz, basándose en el principio de la interferencia constructiva y destructiva. Cada capa de un DBR tiene un grosor de un cuarto de la longitud de onda ($\frac{\lambda}{4}$) de la luz que se desea reflejar. Esto permite que las ondas reflejadas por cada interfaz se sumen constructivamente, creando una banda de alta reflectividad conocida como "banda de parada" o "banda ancha de reflexión". La eficacia de los DBR depende de la precisión del grosor de la capa y del contraste en el índice de refracción entre las capas adyacentes [12].

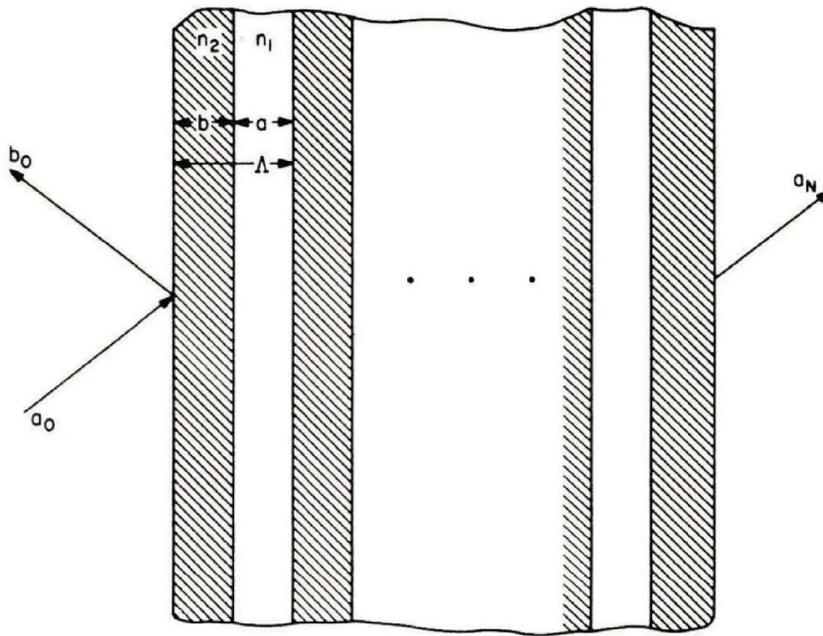


Figura 2.7: Esquemático de un DBR [18].

A partir de la figura 2.7, se considera como un medio de capas periódica que se forma por N celdas unitarias (N pares de capas) y está delimitado por medio homogéneo [18]. A partir de los rayos que se muestran en la figura 2.7, se puede obtener el coeficiente de reflexión mediante la división del rayo reflejado b_0 y el incidente a_0 .

Para un DBR uno de los puntos más importantes para su funcionamiento es la selección de los materiales. Se utilizan materiales con diferentes índices de refracción, alternando entre un índice bajo y uno alto [18]. Esto genera una diferencia de fase en las

ondas reflejadas para generar interferencia constructiva. A continuación, en la figura 2.8, se puede observar una representación de este fenómeno.

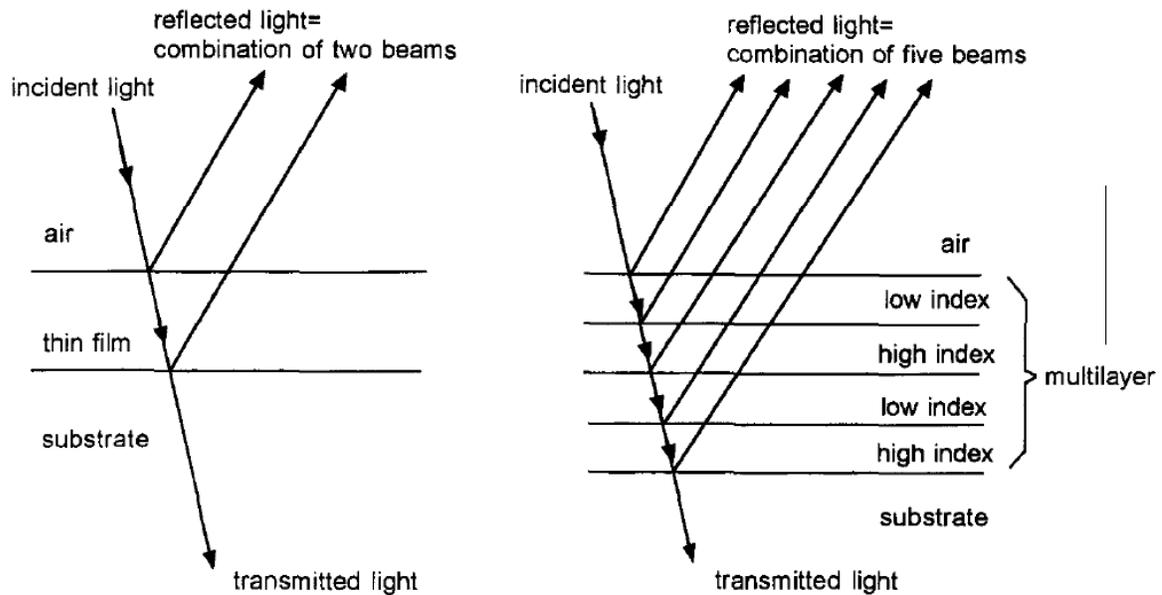


Figura 2.8: Reflexión y transmisión de luz en una lámina delgada simple y un sistema multicapa DBR [34].

En la industria, los DBR se diseñan para funcionar en longitudes de onda específicas. Es decir, tener una banda ancha de reflexión específica, ajustando el grosor de las capas y sus materiales para interferir constructivamente en dichas longitudes de onda. Este ajuste permite utilizar DBR en una variedad de aplicaciones, lo cual se va a explicar en la siguiente subsección.

2.4.2 Aplicaciones

Los Distributed Bragg Reflectors son una piedra angular en la tecnología fotónica moderna, encontrando aplicaciones en diversas áreas que van desde la comunicación hasta la medicina. Su habilidad única para manipular y controlar la luz les otorga un papel crucial en la evolución de los dispositivos ópticos. A continuación, se detallan algunas de las aplicaciones más destacadas de los DBR en diversos campos.

- **Láseres de Semiconductor:** Se utilizan como espejos en láseres VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers), proporcionando una cavidad láser eficiente y compacta [35].
- **Filtros Ópticos:** En telecomunicaciones, los DBR son cruciales como filtros ópticos, seleccionando o bloqueando ciertas longitudes de onda [12].

- **Sensores Ópticos:** En aplicaciones biomédicas y ambientales, los DBR se emplean en sensores ópticos para detectar cambios en el índice de refracción [36].
- **Fotónica Cuántica:** Se utilizan en cavidades de alta calidad para la generación de fotones individuales [37].

2.4.3 Desafíos en el diseño y fabricación

A pesar de su amplia aplicabilidad y eficiencia, el diseño y la fabricación de los Distributed Bragg Reflectors presentan desafíos significativos. Estos desafíos son tanto técnicos como prácticos y juegan un papel crucial en la eficacia y la viabilidad de los DBR en aplicaciones reales. Los siguientes puntos resumen los principales retos que los investigadores y fabricantes enfrentan al trabajar con DBR.

- **Precisión en el Grosor de la Capa:** La eficiencia del DBR depende de la precisión en el grosor de cada capa [12].
- **Selección de Materiales:** Es fundamental elegir materiales valores adecuados en el índice de refracción y compatibilidad en propiedades térmicas y mecánicas.
- **Integración en Dispositivos:** La integración de DBR en dispositivos más complejos requiere un diseño y alineación precisos [37] [36].

Capítulo 3

Metodología

En el capítulo de Metodología, se describe la metodología utilizada en este proyecto de ingeniería, basada en el método de diseño en ingeniería. Se exponen los pasos seguidos, los procedimientos empleados y la conexión con los objetivos del proyecto. Además, se analizan diversas alternativas de solución y se recurre a diagramas de flujo para una representación visual de la metodología.

3.1 Descripción general

Este proyecto, se basó en la metodología de Ulrich y Eppinger del libro "Diseño y desarrollo de productos" [38], pero con una adaptación para este proyecto, ya que no es para un producto comercial. Esta adaptación se muestra en las figuras 3.1 y 3.2. Para la investigación, el principal sujeto de información que se consultó fue: la asesora de empresa y literatura relacionada con el tema del proyecto. Como primera etapa para el proyecto, se tuvo una reunión con la asesora de empresa para obtener las necesidades y las características deseadas para la solución de este problema. A partir de esto también se estableció una cierta cantidad de especificaciones para la solución.

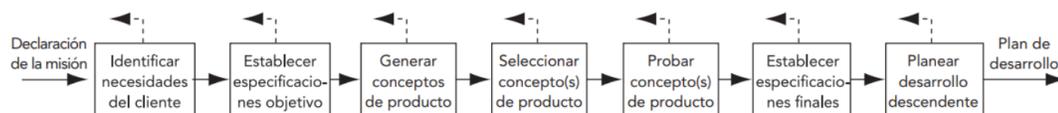


Figura 3.1: Metodología de Ulrich y Eppinger [38].

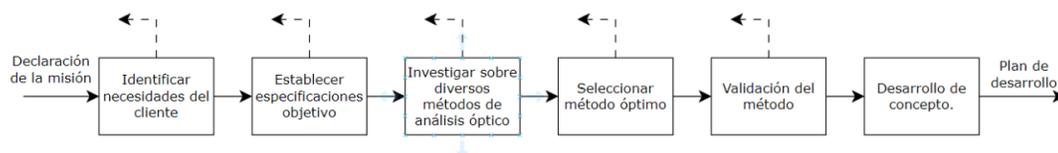


Figura 3.2: Adaptación de metodología planteada para el proyecto.

La segunda etapa se basó profundamente en investigación, esto tomó en cuenta recursos internos tanto como externos sobre temas de óptica, los filtros que se trabajan en NePhoS y métodos de simulación. Con base en esta investigación se obtuvo un conocimiento completo que permitió facilitar la comprensión sobre la situación actual y maneras correctas de implementar el proyecto.

La tercera fase del proyecto consistió en generar diversas maneras de solucionar la problemática planteada. A partir de todas las opciones que se tenía para solucionar el problema se generó una lista. Se discutió con la asesora de empresa para poder obtener un conocimiento completo de cuáles eran más viables que otra. Antes de poder a iniciar con esto es necesario tener un entendimiento sobre que se tiene disponible y cuál es el alcance de la institución para este problema.

Con base en los resultados de la tercera fase, se llevó a cabo un estudio exhaustivo de las opciones y se verificaron para en la cuarta fase seleccionar una única solución final. Esto se hizo mediante una etapa de evaluación mediante el uso de criterios de selección para obtener la solución más concorde con las especificaciones y necesidades del cliente.

El quinto y último paso del proyecto fue la implementación de la solución mediante un software funcional. Utilizando este software, se generaron varias pruebas para verificar su funcionalidad mediante pruebas de validación. Hay que tomar en cuenta que al seguir la metodología de Ulrich y Eppinger, el proceso del proyecto va a ser de carácter iterativo, por lo que cada etapa se va a reflexionar y preguntar si hay algo que se pueda mejorar.

3.2 Relación entre objetivos y metodología

En este capítulo, se establece la relación entre los objetivos específicos del proyecto descrito en la sección 1.4 y las etapas de la metodología aplicada. Los objetivos se han definido con el propósito de diseñar una herramienta que permita el modelado y mejora de la construcción de filtros optoelectrónicos tipo DBR. A continuación, se detalla cómo cada objetivo específico se alinea con una fase particular de la metodología:

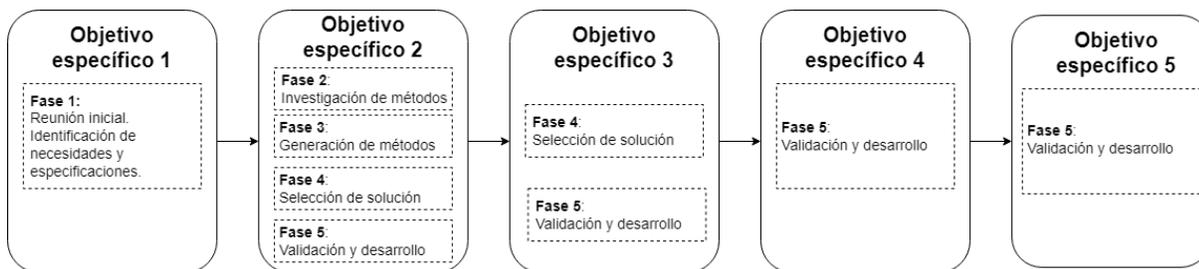


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la relación entre objetivos específicos y metodología.

El objetivo específico 1 estuvo relacionado principalmente con la fase inicial de la metodología, donde se llevó a cabo una reunión con la asesora de la empresa para recopilar las necesidades y características deseadas para la solución del problema. La identificación

de dichas necesidades y especificaciones se consideró un paso crucial para definir el alcance del proyecto y establecer los requisitos fundamentales de la herramienta.

En cuanto al objetivo específico 2, se encontraba presente en la mayoría de las fases del proyecto. Para iniciar el desarrollo del sistema computacional, se consideró necesario completar las primeras cuatro fases, que incluyeron la investigación en profundidad sobre el tema, la generación de una lista de métodos y la selección final. Además, la fase 5, ya que es parte principal del desarrollo conceptual.

El objetivo específico 3 siguió un proceso similar, ya que la selección del método se consideró un paso necesario para generar desarrollar una interfaz gráfica. Además, formó parte de la fase 5, ya que permite a los usuarios comparar y analizar los resultados de manera visual, componente de validación.

En relación a los objetivos específicos 4 y 5, estos estuvieron vinculados a la fase final de desarrollo y documentación de la metodología. La documentación se consideró un componente fundamental para que los usuarios comprendieran cómo instalar y utilizar la herramienta de simulación de manera efectiva, garantizando así que pudieran aprovechar al máximo el software. La validación de la herramienta se llevó a cabo en la etapa final de la metodología. Después de la implementación del software, se consideró esencial verificar su exactitud y confiabilidad.

3.3 Necesidades y especificaciones

Para iniciar el proceso de la metodología, se realizó la identificación de las necesidades del cliente, como se detalla en la metodología de diseño mencionada previamente. Con el propósito de comprender a fondo las necesidades y expectativas del cliente, se llevaron a cabo dos entrevistas. Durante estas entrevistas, se realizaron una serie de preguntas que posteriormente fueron analizadas. La segunda reunión se llevó a cabo con el fin de obtener aún más aclaraciones. Estas interacciones proporcionaron una visión clara de las necesidades del cliente, las cuales se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Lista de necesidades

Número	Necesidad
1	La herramienta debe permitir la personalización de parámetros.
2	La herramienta se debe poder usar de manera intuitiva.
3	La herramienta tiene que poder importar y comparar datos experimentales con los resultados simulados.
4	La herramienta debe ser eficiente en términos de uso de recursos computacionales.
5	La herramienta debe ser capaz de simular con exactitud.
6	La solución debe incluir una documentación completa que incluya manuales de usuario, guías de instalación y descripciones técnicas.
7	La herramienta debe poder manejar estructuras DBR de diferentes tamaños y complejidades.
8	La herramienta debe funcionar de manera confiable.
9	La herramienta debe ser capaz de guardar los datos simulados.

En lo que respecta a las especificaciones del producto, se utilizan para expresar de manera más clara las necesidades del cliente, describiéndolas como 'características

ingenieriles'. En este sentido, las especificaciones consisten en una métrica y un valor que mejor describen las necesidades expresadas hasta ahora en 'lenguaje del cliente' [38].

Para establecer las especificaciones, primero se elaboró una lista de métricas relacionadas directamente con cada una de las necesidades, es decir, hay al menos una métrica por cada necesidad. Una vez definidas estas métricas, se procedió a recabar información del cliente para averiguar qué valores consideraba óptimos para estas métricas. Finalmente, se establecieron los valores objetivo (ideales) y los valores marginalmente aceptables para cada una de las métricas. Estos se muestran a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Lista de especificaciones y métricas

Num.	Métrica	Unidades	Valor Marginal	Valor ideal
1	Exactitud de simulación	% Error	$\pm 15\%$	$\pm 10\%$
2	Tiempo de simulación promedio	segundos	$< 150s$	$\leq 35 s$
3	Capacidad para importar y comparar datos experimentales	Binario	Cumple	Cumple
4	Confiabilidad de herramienta	Tasa de error	$< 5\%$	$< 3\%$
5	Facilidad de uso	Escala 1-10	> 5	> 8
6	Disponibilidad documentación detallada	Binario	Cumple	Cumple
7	Personalización de parámetros de estructura	Lista	Índices de refracción, grosores, longitudes de onda	Índices de refracción, grosores, longitudes de onda, ángulo de incidencia.
8	Capacidad de almacenamiento	Binario	Cumple	Cumple
9	Escalabilidad	Número máximo de capas	≤ 100	> 100

La métrica número 1 evalúa la exactitud de la simulación en términos de error porcentual. El valor marginal permite un margen de error del 15%, lo que significa que la simulación puede desviarse un 15% de los resultados experimentales en el rango de longitud de onda de luz visible y onda corta de luz infrarroja. Este valor fue requerimiento de la asesora de empresa, por lo que el valor marginal es de cumplimiento obligatorio para la solución.

La métrica de tiempo de simulación se enfoca en la eficiencia temporal. El valor marginal, propuesto por la asesora de la empresa, establece un límite de 150 segundos para completar una simulación, mientras que el valor ideal busca una mayor eficiencia con un límite de 35 segundos. Esta diferencia refleja la importancia de mantener simulaciones rápidas y eficientes, especialmente dado el propósito de la herramienta para probar múltiples configuraciones de filtros. El objetivo es minimizar el tiempo de simulación para permitir pruebas ágiles y eficaces de dichas configuraciones.

Las métricas 3, 6, 7, 8 y 9 se centran en la capacidad y el cumplimiento de la herramienta de simulación. La métrica 3 y 8 verifica la capacidad de exportar, importar y comparar datos experimentales, la métrica 6 evalúa la disponibilidad de documentación detallada, la métrica 7 se relaciona con la personalización de parámetros de estructura, y la métrica 9 evalúa la escalabilidad. Todas estas métricas buscan garantizar la versatilidad y la adaptabilidad de la herramienta basado en requisitos propuestos por la asesora de empresa.

Por ultimo, las métricas 4 y 5 evalúan la calidad y la facilidad de uso de la herramienta. La métrica 4 se enfoca en la confiabilidad de la herramienta la cual busca cumplir con el objetivo específico 5, en el cual se quiere validar la exactitud y confiabilidad de la herramienta. La facilidad de usa es una metrica subjetiva en la cual se espera que

cualquier persona del laboratorio de NePhoS pueda utilizarla.

3.4 Enfoque de la solución

En primer lugar, en la elaboración de este proyecto, se llevó a cabo una investigación sobre los componentes empleados en el proceso de fabricación de filtros DBR, los métodos utilizados para el cálculo de los espectros de transmisión, reflexión y absorción de multicapas a partir de los índices de refracción y grosores de las capas, y la revisión de bibliografía relacionada con óptica. Esta investigación posibilitó el establecimiento de las bases para el diseño de la solución.

A partir de la información recopilada, se ejecutó la solución siguiendo la metodología descrita en el presente informe, alineada con las necesidades y requisitos establecidos por parte de el grupo NePhoS. Para ello, se consideraron los componentes y la metodología que ellos utilizaban en ese momento para la fabricación de estos filtros.

Posteriormente, se diseñó un programa computacional capaz de ejecutar un algoritmo que simulase los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos para diversas configuraciones de componentes. Esto requirió el análisis y la comparación de los métodos descubiertos a través de la investigación inicial.

Tras este paso, se desarrolló una interfaz gráfica que permitía la visualización más sencilla de los resultados. Esto también facilitó la comparación de los datos simulados con conjuntos de medidas obtenidas experimentalmente. Además, se incorporó la funcionalidad de almacenar todos los resultados para su posterior visualización.

Finalmente, se comprobó el funcionamiento de la herramienta comparando los valores simulados con un conjunto de valores experimentales. Se verificó que el sistema cumplía con los objetivos planteados y proporcionaba resultados exactos y confiables. Asimismo, se redactó un manual de usuario que permitía al cliente tener instrucciones sobre cómo instalar y utilizar el software.

En la figura 3.4 se muestran los bloques principales desarrollados durante el proyecto.

3.5 Investigación

La fase de investigación de este proyecto se dividió en tres componentes fundamentales. En primer lugar, se dedicó tiempo a explorar y comprender los principios fundamentales de la óptica. A continuación, se profundizó en el estudio de los filtros de Bragg distribuidos (DBR), analizando su funcionamiento y aplicaciones. Finalmente, se se enfocó en investigar métodos para simular los dispositivos DBR y sus características físicas. Estos tres aspectos clave se detallan y explican exhaustivamente en el capítulo 2, que constituye el marco teórico del proyecto.

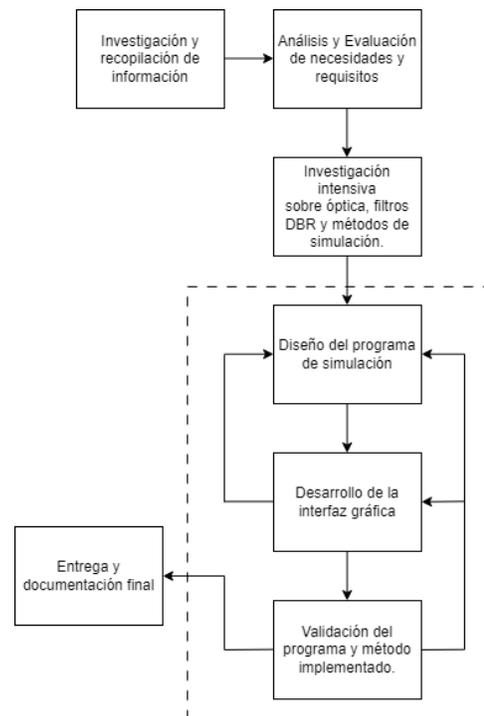


Figura 3.4: Diagrama de bloques general del enfoque de la solución del proyecto.

En el ámbito de la óptica, los principios fundamentales desempeñan un papel esencial, ya que proporcionan la base teórica para comprender cómo la luz interactúa con los materiales y dispositivos ópticos. Estos conceptos básicos abarcan desde la reflexión y la refracción hasta la propagación de la luz, lo que resulta crucial para comprender cómo los dispositivos ópticos funcionan y cómo se pueden diseñar y simular de manera efectiva. Además, la comprensión de la óptica es esencial para abordar los desafíos que surgen en la fabricación y aplicación de dispositivos ópticos en diversas industrias, como la comunicación, la medicina y la ciencia de los materiales.

En lo que respecta a los filtros DBR, estos son componentes ópticos de gran importancia en aplicaciones como la detección de señales, la modulación de luz y la creación de fuentes de luz coherente. La investigación en profundidad de los DBR permite no solo entender su funcionamiento sino también identificar sus ventajas y limitaciones, lo que resulta esencial para su implementación efectiva en diversas aplicaciones. Además, el estudio de estos dispositivos proporciona una base sólida para el desarrollo y la optimización de técnicas de simulación, lo que contribuye al diseño de dispositivos ópticos avanzados y a la resolución de problemas relacionados con la óptica moderna.

Una vez se adquirió una comprensión más sólida de los conceptos ópticos y de los dispositivos DBR, se pudo realizar un análisis en profundidad para determinar qué herramientas eran necesarias para llevar a cabo el proyecto de manera efectiva. Esta información permitió, después de una investigación exhaustiva, compilar una lista de métodos y técnicas para simular con exactitud las características físicas de los dispositivos DBR. Esta lista se muestra en la tabla 3.3 a continuación.

Tabla 3.3: Lista de métodos

Núm.	Nombre del método
1	Transfer Matrix Method
2	Finite Difference Frequency Domain
3	Finite Difference Time Domain
4	Beam Propagation Method
5	Plane Wave Method
6	Rigorous Coupled Wave Analysis
7	Method of Lines
8	Scattering Matrices

3.6 Selección de propuesta de solución

Para poder hacer una selección entre los métodos descritos anteriormente es necesario aplicar los criterios de selección. Estos son estándares o factores específicos utilizados para evaluar y comparar opciones o candidatos en diversas situaciones. Su propósito es tomar decisiones informadas y objetivas al clasificar y priorizar las alternativas en función de las especificaciones [38]. A partir de las especificaciones de la tabla 3.2 se generó una lista de criterios y se les asignó pesos a cada uno, indicando su nivel de importancia.

Tabla 3.4: Criterios de selección

Criterio	Peso
Exactitud	25%
Tiempo de simulación	25%
Confiabilidad	20%
Escalabilidad	15%
Facilidad de uso	15%

Como se explicó de manera más extensa en el capítulo 2, los métodos BPM, SMM y MOL fueron descartados completamente debido a sus características. A partir de los métodos restantes, se aplicaron los criterios seleccionados en la tabla 3.4 y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.5. Como se mencionó en la sección 3.1, se generó una adaptación de la metodología de Ulrich y Eppinger. Por lo tanto, en el caso del presente proyecto, no fue necesario generar una etapa de filtrado y selección por separado, ya que estos métodos no pueden ser reestructurados ni combinados. Se generó únicamente una etapa de selección.

Tabla 3.5: Matriz de evaluación para los métodos investigados.

Criterio	Peso	Métodos									
		TMM		FDFD		FDTD (Referencia)		PWM		RCA	
		Nota	Evaluación	Nota	Evaluación	Nota	Evaluación	Nota	Evaluación	Nota	Evaluación
Exactitud de simulación	25%	4	1	4	1	3	0.75	2	0.5	5	1.25
Tiempo de simulación	25%	5	1.25	3	0.75	3	0.75	2	0.5	2	0.5
Confiabilidad	20%	3	0.6	3	0.6	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Escalabilidad	15%	5	0.75	3	0.45	3	0.45	4	0.6	4	0.6
Facilidad de uso	15%	5	0.75	2	0.3	3	0.45	5	0.75	1	0.15
Total Puntos		4.35		3.1		3		2.75		2.9	
Lugar		1		2		3		5		4	
¿Continuar?		Desarrollar		No		No		No		No	

Finalmente, como resultado de este proceso, se pudo constatar que el método elegido fue el denominado *Transfer Matrix Method*, que obtuvo la calificación más alta, de 4.35. En el siguiente capítulo, se llevará a cabo una explicación más exhaustiva acerca de cómo opera este método, sus principios fundamentales y cómo se emplea para abordar la solución del problema que se ha planteado. Durante esta exposición detallada, se profundizará en su funcionamiento y se expondrán los conceptos clave que respaldan su aplicación en el contexto de la resolución de la cuestión en cuestión.

Capítulo 4

Propuesta de Diseño

En este capítulo se presentó la "Propuesta de Diseño" de nuestro software, un aspecto crucial en el desarrollo de esta tesis. Se delineó la arquitectura del software, detallando cómo cada elemento de diseño contribuyó a la funcionalidad y objetivos del proyecto. Esta sección fue esencial para comprender la alineación de las decisiones técnicas y de diseño con los requerimientos y metas establecidos inicialmente. A través del capítulo, se demostró la aplicación práctica de los conceptos teóricos previamente discutidos, proporcionando una visión estructurada del desarrollo del software desde su concepción hasta su implementación final.

4.1 Descripción General del Software

4.1.1 Propósito y Alcance

El software diseñado tiene como propósito ser una herramienta integral para la simulación y el análisis de dispositivos ópticos complejos, en específico de DBRs. Utiliza principios fundamentales de la física y la óptica para simular el comportamiento de distintas capas y estructuras en tales dispositivos mediante la implementación del Transfer Matrix Method. Diseñado específicamente para abordar desafíos en el campo de la óptica y la fotónica, este software facilita la simulación de espectros transmitidos, reflejados y absorbidos en configuraciones de múltiples capas con índices de refracción variables.

El alcance del software es desde la simulación básica de capas individuales hasta el análisis de dispositivos multicapas. Este permite facilitar la investigación y el desarrollo en el campo de la óptica y fotónica, específicamente para el grupo NePhoS en la fabricación de filtros DBR. Esta herramienta se destaca por su interfaz gráfica intuitiva, diseñada para mejorar la experiencia del usuario y facilitar la experimentación y el análisis, incluso para aquellos menos familiarizados con la programación compleja.

A pesar de sus capacidades, el software presenta ciertas limitaciones inherentes a

su diseño y metodología. Principalmente, el uso del TMM restringe su aplicación a sistemas que pueden ser idealmente modelados como capas planas y homogéneas, como se menciona en la sección 2.3. Además, el enfoque en dispositivos ópticos DBR, puede no ser directamente transferible a sistemas ópticos de mayor complejidad o con características distintas. Aunque la interfaz gráfica facilita la interacción para usuarios sin experiencia en programación, también puede significar menos flexibilidad para usuarios avanzados que buscan personalizar o extender las capacidades del software más allá de su configuración predeterminada.

4.1.2 Estructura General

- **Modelado de Filtros Ópticos:** Facilita la simulación de filtros DBR, permitiendo al usuario configurar capas, seleccionar materiales, ajustar longitudes de onda y definir el ángulo de incidencia de la luz, lo que proporciona un modelo detallado y adaptable de dispositivos ópticos.
- **Análisis de Espectros Ópticos:** Proporciona el cálculo y la visualización de los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos en ambas polarizaciones.
- **Interfaz Gráfica Intuitiva:** Incluye una interfaz gráfica basada en la librería Tkinter, ofreciendo una interacción fácil y visual para el usuario.
- **Gestor de Datos Experimentales:** Permite la importación y visualización de archivos de datos experimentales y hacer comparaciones con los resultados simulados.

4.2 Arquitectura y Diseño del Sistema

4.2.1 Arquitectura del Software

La arquitectura del software diseñado es una combinación de un script, el cual contiene todas las funciones necesarias para realizar la simulación de los filtros optoelectrónicos DBR y un script, el cual contiene la interfaz gráfica de usuario, que hace uso de estas funciones. Se eligió hacerlo de esta manera para tener un código más limpio y legible, facilitando así su comprensión y mantenimiento. La separación clara entre la lógica de simulación y la interacción del usuario permite una integración eficiente y una experiencia de usuario mejorada.

Además, la estructura del software final se entregó como un solo programa ejecutable. Esto se debe a que al compilar el software en un ejecutable único se evita la necesidad de instalación de paquetes extras y el uso de terminales de comando. Esto resulta en una herramienta más accesible y amigable para los investigadores, aunque no tengan conocimientos previos de programación o uso de terminales.

Hay cuatro principales módulos en el software que definen su funcionalidad y operación: el modelado del filtro, el cálculo mediante el TMM, el gestor de datos experimentales y la interfaz gráfica de usuario. Todos estos interactúan entre ellos para permitir una experiencia de usuario fluida y evitar errores. A continuación en la figura 4.1 se muestra un diagrama de alto nivel de la arquitectura del software, mostrando la interconexión entre la interfaz gráfica de usuario y los módulos de simulación y análisis.

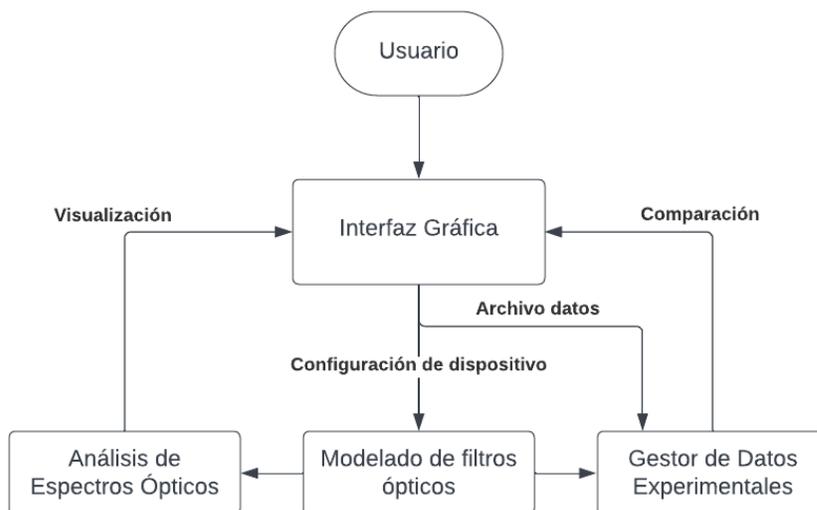


Figura 4.1: Diagrama de la arquitectura del software.

4.2.2 Componentes del Software

Modelado de filtros ópticos

El módulo de modelado de filtros ópticos está orientado hacia la construcción de un dispositivo de distributed Bragg Reflectors con las características deseadas por el usuario. Este módulo se centra en la creación de un dispositivo óptico estructurado, esencial para la realización de análisis más detallados en módulos posteriores. En este componente es donde se pueden detallar las siguientes características: número de capas, grosor de cada capa y el índice de refracción del ambiente, sustrato y cada capa.

En el código se tiene una clase fundamental 'Layer' que representa una capa individual dentro del dispositivo DBR. Cada una de estas se caracteriza por su índice de refracción y grosor, elementos cruciales para poder definir las propiedades ópticas de este dispositivo. Por ejemplo, para crear una capa con un índice de refracción de 1.5 y un grosor de 100 nm, se instanciaría la clase 'Layer' pasando estos valores como parámetros. De esta manera, el usuario tiene control individual de las características de las capas.

Posteriormente, se define una función para crear el dispositivo utilizando el número de capas deseadas, las capas creadas anteriormente, el ambiente y sustrato. Como se explicó

anteriormente en la sección 2.4 un DBR posee dos capas que se repiten N veces, por lo tanto, esta función toma la información del índice de refracción del ambiente y sustrato, solamente dos capas y la variable N que desee el usuario. Esta función, por lo tanto, crea una lista que modela la estructura del dispositivo. Esta metodología de modelado ofrece una ventaja significativa, ya que permite futuras adaptaciones del software para implementar diferentes estructuras de dispositivos ópticos que no necesariamente tienen que ser periódicos mediante unos pequeños cambios o agregando al código.

Análisis de Espectros Ópticos

El análisis de espectros ópticos se realiza a través del Método de la Matriz de Transferencia (TMM) como se decidió en el capítulo anterior. Este módulo se encarga de calcular y analizar las propiedades ópticas de los dispositivos DBR, utilizando conceptos avanzados de física y matemáticas, los cuales son explicados a mayor profundidad en la sección 2.3.

Las principales funciones utilizadas en este módulo son los cálculos necesarios para el desarrollo del TMM. Las entradas de este módulo son: el modelo de dispositivo DBR, el rango de longitudes de onda, el paso y el ángulo de incidencia de la luz. En síntesis, en este módulo se tienen funciones que calculan la matriz dinámica y matriz de propagación que se utilizan inicialmente y se puede calcular la matriz de transferencia con otra función.

Debido a que es necesario analizar el dispositivo en un rango de longitudes de onda, se hace una función en bucle para iterar a través del rango determinado. La función continuará ejecutando los cálculos dentro del bucle hasta que se calculen todas las matrices de transferencia para cada longitud de onda. La función retorna un array que tiene almacenado cada una de estas matrices para utilizar posteriormente.

Finalmente, hay una función que, utilizando esta lista de matrices de transferencia, hace los cálculos para obtener los coeficientes de transmisión y reflexión con los cuales se pueden calcular la reflexión y transmisión del sistema en función de la longitud de onda. Estos valores son posteriormente utilizados en el módulo de interfaz gráfica en el cual se grafica el valor de espectro en función de la longitud de onda para obtener una mejor visualización de la respuesta del sistema.

En la figura 4.2 se muestra un pseudocódigo en diagrama de bloques de cómo se estructura este módulo. En el cual se tiene que inicia iterando por cada longitud de onda (wavelength) en el rango, para el cual se generan dos listas M_{st} y M_{pt} en las cuales se almacena la matriz de transferencia total para cada una de las polarizaciones. Cuando se tienen todas, es decir, que se han calculado para cada longitud de onda, se generan cuatro variables en las cuales se almacenan los valores de transmisión (T) y reflexión (R) para cada polarización y matriz de transferencia.

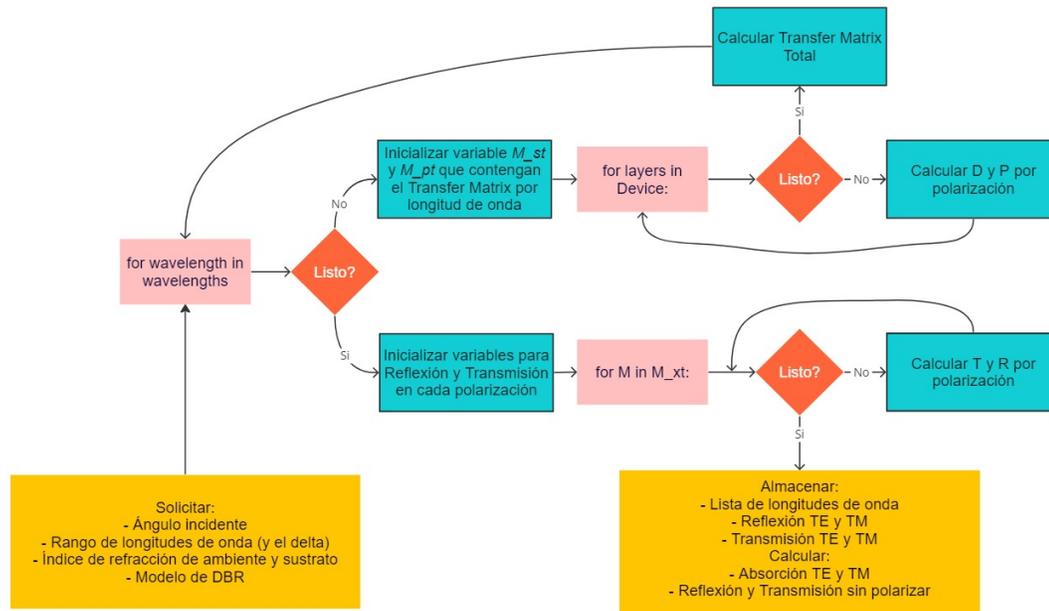


Figura 4.2: Pseudocódigo del cálculo de respuesta del sistema.

Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica de usuario (GUI) del software es una componente crítica que facilita la interacción entre el usuario y las funcionalidades del programa. Utilizando librerías como Tkinter y Matplotlib, esta interfaz ofrece una plataforma intuitiva y amigable para los usuarios.

La GUI está estructurada de manera que ofrece una navegación sencilla y directa. Incluye campos de entrada de texto, botones y áreas de visualización gráfica. Estos elementos están organizados de manera lógica y estética, permitiendo a los usuarios interactuar fácilmente con el software. A continuación se muestra una captura de cómo se ve la interfaz y sus principales secciones.

En la figura 4.3 se muestra una captura de la interfaz gráfica con anotaciones mostradas en recuadros de colores de las secciones principales. El recuadro verde muestra la sección de campos de entrada para características del DBR, luz incidente y longitudes de onda permiten al usuario especificar los parámetros ópticos y dimensionales del DBR. Los índices de refracción pueden ajustarse para el ambiente, el sustrato y las capas individuales del DBR, mientras que el rango de longitudes de onda y el paso se especifican para el análisis espectral.

Además de los campos de entrada de texto, también se tienen dos menús desplegables que permiten al usuario seleccionar materiales, los cuales tienen un índice de refracción variable en función de la longitud de onda. En esta versión del software, los materiales incluidos son: silicio, alúmina (Al_2O_3), aluminio, oro y plata. Por último, esta sección también tiene dos botones, la "i" el cual despliega una imagen informativa de cómo es el

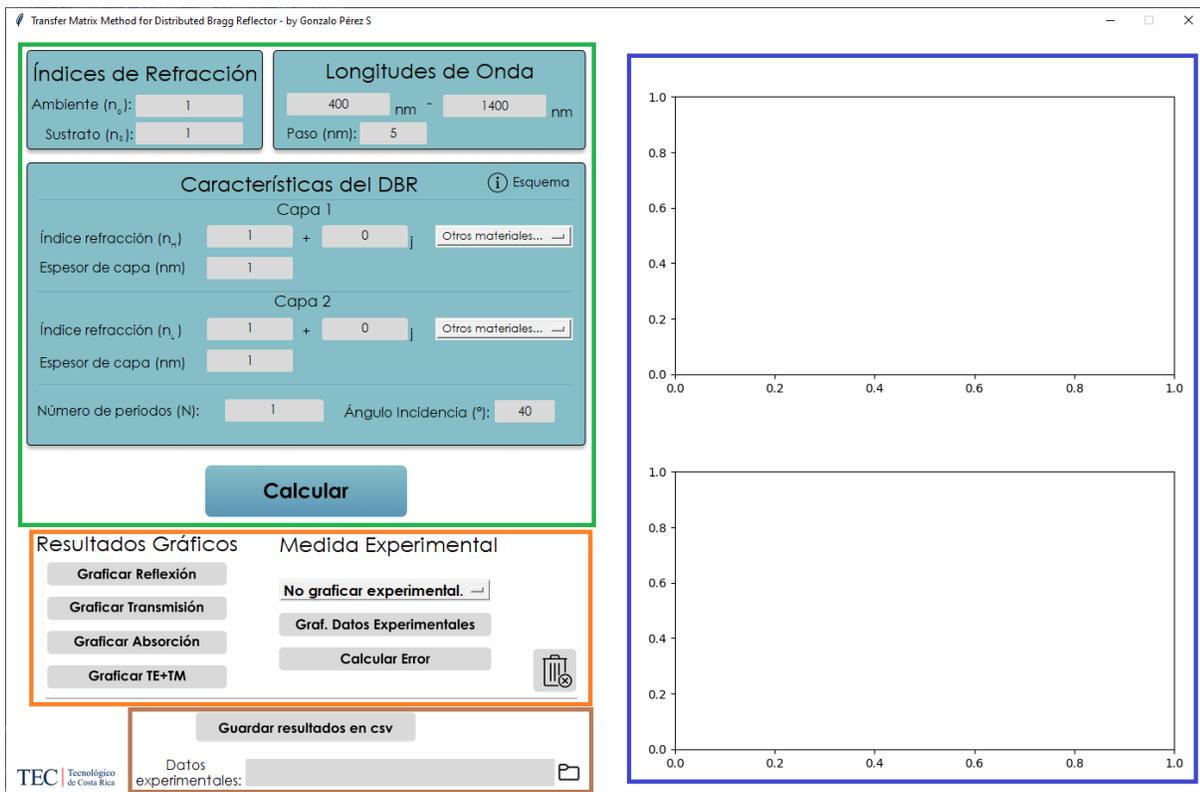


Figura 4.3: Captura de la interfaz gráfica con anotaciones.

esquema de estructura del DBR para que el usuario tenga claridad al respecto, esta imagen se muestra en la figura 4.4. El botón de "calcular", el cual suministra todas las variables al módulo de análisis de espectros ópticos para el cálculo explicado anteriormente.

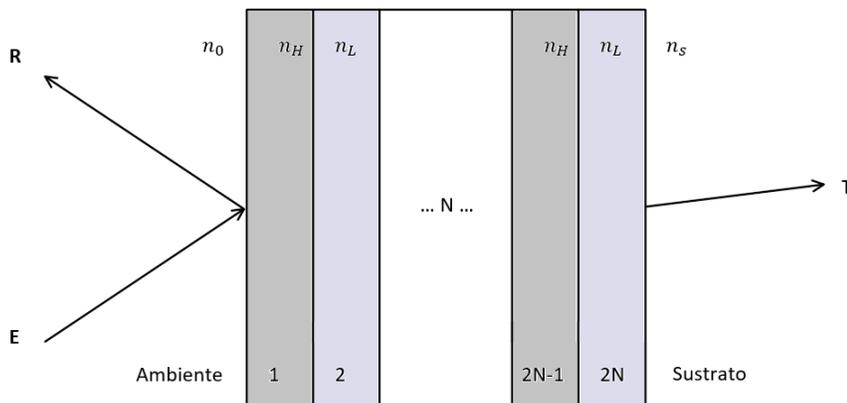


Figura 4.4: Esquema de DBR utilizado en la interfaz gráfica.

Continuando con la figura 4.3, el recuadro azul muestra la sección de visualización de análisis. Se tienen dos planos cartesianos y estos son utilizados para graficar los resultados obtenidos. En la sección enmarcada por el cuadro naranja se tienen botones utilizados para determinar qué datos se van a visualizar en estos dos planos. En el caso

de los botones de graficar, reflexión, transmisión o absorción, se mostrarán los datos simulados en los dos planos, cada uno mostrando una polarización diferente. El botón de graficar TE+TM se refiere a los datos sin polarización; en este caso, se grafica reflexión y transmisión simultáneamente.

En la columna de la derecha del recuadro naranja se muestra todo lo relacionado con validar los datos experimentales. El botón de graficar datos experimentales permite visualizar los datos experimentales en ambos planos cartesianos. El menú desplegable tiene dos opciones "no graficar experimental" y "si graficar experimental", esto permite al usuario tener dos opciones al graficar los resultados simulados, si desea que los datos experimentales se grafiquen automáticamente en el plano cartesiano. Por último, el botón de calcular error genera una ventana emergente, la cual solicita al usuario el rango de banda ancha en nanómetros y calcula el porcentaje de error entre los datos simulados y experimentales.

La última sección mostrada en el cuadro café tiene el botón de guardar resultados en CSV, esto permite guardar todos los datos simulados calculados en un archivo. Los usuarios tienen la opción de guardar los resultados en formato CSV para un análisis más profundo o para la documentación. Esta función subraya la utilidad práctica de la GUI en contextos de investigación y desarrollo. Este va a contener las longitudes de onda, la transmisión, reflexión y absorción en ambas polarizaciones. En la parte baja también se tiene una parte para ingresar los datos experimentales mediante el explorador de archivos.

Gestor de Datos Experimentales

El gestor de datos experimentales es una parte integral del software que maneja la entrada, procesamiento y almacenamiento de datos experimentales. Este componente permite a los usuarios cargar, manipular y analizar datos experimentales. La carga de datos se hace mediante la interfaz de usuario como se mencionó anteriormente y admite el uso de archivos CSV, un formato ampliamente compatible y fácil de usar. Esto se eligió de esta manera debido a que es el tipo de archivo que utilizan en el grupo NePhoS para hacer el desarrollo de los dispositivos DBR.

Los datos experimentales que obtienen los investigadores de NePhoS se guardan en un archivo CSV de dos columnas: la primera es la longitud de onda y la segunda es la variable medida, como la intensidad de la reflexión o transmisión. Por lo tanto, en este módulo se tiene una función que lee el archivo y lo convierte en dos arrays, asegurando que los datos estén alineados y sean comparables con los resultados de las simulaciones.

Además de la carga y el procesamiento de datos, el módulo también es el encargado de calcular el error porcentual promedio entre datos simulados y experimentales dentro de un rango de longitudes de onda. Este rango es el llamado la banda ancha de reflexión o transmisión. Este rango de longitudes de onda es indicado por el usuario y se solicita en nanómetros. La exactitud de la comparación entre los datos simulados y experimentales es fundamental para validar el modelo de simulación y asegurar su aplicabilidad en

investigaciones reales.

La forma en la que se calcula el error es utilizando la fórmula de error porcentual absoluto medio, descrito por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sum w_{l_1} \frac{|v_s - v_e|}{v_s}}{n} * 100 \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.1) se tiene que w_{l_1} y w_{l_2} es el valor inferior y superior de las longitudes de onda de la banda ancha, v_s el valor simulado, v_e el valor experimental y n el número de valores medidos. Esta metodología proporciona una medida robusta y confiable del desempeño del modelo simulado en comparación con observaciones empíricas.

4.3 Desarrollo y Funcionalidades

4.3.1 Lenguaje de Programación

El lenguaje de programación seleccionado para este proyecto es Python, un lenguaje de alto nivel y de propósito general. Su naturaleza interpretada lo hace ideal para una amplia gama de plataformas y sistemas operativos, ya que permite la ejecución del código sin una compilación previa [39]. Esta versatilidad y la independencia de plataforma de Python lo han posicionado como una herramienta preferida en desarrollos que van desde aplicaciones web hasta soluciones empresariales complejas [40].

Otra de las razones por las que se decidió utilizar Python fue por su sintaxis clara y concisa, que reduce las horas de trabajo y permite un rápido prototipado. Su enfoque en la reutilización y la legibilidad del código, así como en el uso eficiente del espacio blanco, lo convierte en una opción ideal para aplicaciones tanto simples como complejas [41]. Esto permite que en el futuro se pueda iterar sobre el código existente para agregar funcionalidades de manera más sencilla y eficiente.

Una de las necesidades del cliente era que la herramienta fuera capaz de personalizar parámetros y comparar datos experimentales con simuldaos, para esto era necesaria la integración de una interfaz gráfica. Por lo tanto, Python proporciona las herramientas necesarias para diseñar soluciones personalizadas y su facilidad para crear prototipos confiables y rápidos [41]. Esto permite el desarrollo de una interfaz gráfica amigable con el usuario en el tiempo de desarrollo del proyecto.

La extensa biblioteca de Python es una de sus mayores ventajas, ya que permite a los programadores realizar tareas comunes con mayor facilidad y eficiencia [42]. Esto fue clave para el desarrollo de este proyecto porque se utilizaron librerías externas para el cálculo de matrices, la interfaz gráfica, entre otros. Además, Python tiene una comunidad de desarrolladores activa que constantemente agrega recursos de aprendizaje, bibliotecas adicionales y plugins al ecosistema [42].

Python es un lenguaje de programación ideal para la automatización de tareas, especialmente útil para aquellas que se realizan repetidamente [43]. El caso del cálculo de reflexión y transmisión pueden ser calculados manualmente, pero es un procedimiento largo y repetitivo, lo que hace que la elección de Python como un lenguaje de scripting sea ideal. La escritura de scripts en Python permite construir procesos automatizados que pueden abarcar desde la verificación de errores en múltiples archivos, ejecución de cálculos simples y eliminación de duplicados en los datos [43].

4.3.2 Librerías y Herramientas

En este proyecto, se han seleccionado diversas librerías de Python, cada una aportando funcionalidades clave que mejoran el rendimiento y la usabilidad del software. A continuación se presentan las librerías utilizadas y su uso en la propuesta de diseño.

NumPy

NumPy es una librería esencial para la computación científica en Python, proporcionando un objeto de array multidimensional y rutinas para operaciones rápidas en arrays, incluyendo matemáticas, lógica, y transformaciones de forma. El elemento central de NumPy es el objeto `ndarray`, que representa arrays n-dimensionales de datos homogéneos, con muchas operaciones realizadas en código compilado para mejorar el rendimiento [44].

NumPy fue un módulo clave para el diseño de esta solución, debido a que permitió implementar cálculos matemáticos más avanzados y precisos que permite la librería estándar de matemáticas de Python. El uso extensivo de la estructura de datos `numpy.array` de NumPy permitió una solución eficiente. Estos arrays permiten almacenar y manipular grandes conjuntos de datos de manera eficiente. Un punto clave de su implementación es que se puede especificar el tipo de los datos en los arrays. Un tipo utilizado ampliamente en el software es `dtype=numpy.complex128`, que representa un número flotante complejo de 128 bits. Está compuesto por dos números de punto flotante de 64 bits, uno para la parte real y otro para la parte imaginaria. Este tipo de dato es compatible con el tipo `complex` de Python, permitiendo almacenar y manipular números complejos en cálculos científicos y de ingeniería con alta precisión [45].

Los arrays se utilizaron para representar y operar sobre conjuntos numéricos, aprovechando su capacidad de realizar operaciones vectorizadas y matriciales. Además de la manipulación de arrays, se utilizaron diversas funciones de NumPy para realizar cálculos matemáticos y operaciones de álgebra lineal. Las funciones trigonométricas `numpy.sin`, `numpy.cos` y `numpy.arcsin` utilizadas en el análisis de ondas y cálculos relacionados con ángulos. Para operaciones de álgebra lineal se utilizó `numpy.linalg.inv` para calcular la inversa de matrices, algo fundamental para los cálculos de TMM.

Tkinter

Tkinter es el paquete estándar de facto para la creación de interfaces gráficas de usuario en Python. Se trata de una capa orientada a objetos y sencilla sobre Tcl/Tk. Aunque no es el único toolkit para programación GUI en Python, Tkinter es el más utilizado, debido a su simplicidad y eficacia para desarrollar interfaces gráficas. [46].

En general, esta librería fue utilizada para el desarrollo de toda la interfaz gráfica de la solución. Se utilizaron las funciones básicas para la presentación de texto y/o imágenes en la GUI. Además la manera de ubicarlas en la pantalla fue mediante coordenadas en la función *tkinter.place* para tener una mayor precisión de cómo se ubican los elementos y tener una mayor estética en el diseño final.

El código también utiliza *tk.filedialog.askopenfilename* y *tk.filedialog.askdirectory* para mejorar la interactividad de la interfaz gráfica. Estas funciones permiten a los usuarios seleccionar fácilmente archivos y directorios, una característica esencial para aplicaciones que requieren acceso y manipulación de archivos o carpetas dentro del sistema del usuario.

Pandas

Pandas es una librería en Python que ofrece un objeto DataFrame eficiente para la manipulación de datos con indexación integrada. Es muy útil en el manejo de la lectura y escritura de datos en formatos como CSV, Excel entre otros. Uno de sus puntos fuertes es su alineación inteligente de datos y la manera en que facilita la organización de datos desordenados [47].

La función *pandas.read_csv* se emplea para leer datos de archivos en formato CSV y cargarlos en un objeto DataFrame de Pandas. Esta capacidad es crucial para el procesamiento de datos, ya que permite a los usuarios importar fácilmente grandes conjuntos de datos para su análisis y manipulación en Python. Los DataFrames ofrecen una estructura tabular con indexación integrada, lo que facilita la organización, manipulación y análisis de los datos [47]. Esto permite que se tenga una manera más fácil de manipular los datos y reordenarlos.

Matplotlib

La librería Matplotlib es utilizada para crear visualizaciones estáticas, animadas e interactivas en Python. Facilita la creación de gráficos y ofrece personalización en estilo visual y disposición, admite exportación a múltiples formatos de archivo e interfaces gráficas de usuario. También tiene una amplia gama de paquetes de terceros construidos sobre él [48].

En el desarrollo de este proyecto, se utilizó el módulo de backends de Matplotlib, específicamente para la integración con la biblioteca Tkinter de Python. En particular, se utilizó el backend *backend_tkagg* de Matplotlib, que proporciona clases esenciales para

la integración con Tkinter. Un ejemplo clave de esta integración es el uso de *FigureCanvasTkAgg*, este actúa como un puente entre Matplotlib y Tkinter, permitiendo que los gráficos creados con Matplotlib se incrusten y se muestren de manera interactiva en aplicaciones de Tkinter. Esta integración es fundamental para proyectos que requieren una interfaz gráfica de usuario robusta y personalizable, combinada con la capacidad de visualización de datos avanzada que ofrece Matplotlib [49]. La habilidad para integrar estas dos herramientas mejora la interacción del usuario con los análisis de datos y los resultados presentados.

SciPy

SciPy es una biblioteca de Python para la computación científica, que proporciona algoritmos de optimización, integración, interpolación, problemas de valores propios, ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales, estadística y mucho más [50]. Esta además es compatible con NumPy, ofreciendo herramientas adicionales y facilitando funciones avanzadas para el manejo de matrices y arrays de datos. Esta biblioteca posee una gran variedad de funciones; por lo tanto, específicamente se utilizó el sub-paquete *scipy.interpolate*.

El subpaquete *scipy.interpolate* ofrece herramientas avanzadas para la interpolación, incluyendo funciones y clases para splines, así como soporte para interpolación tanto unidimensional como multidimensional [51]. En el caso del software, esto se utilizó para los materiales dispersivos, es decir, los materiales que varían su índice de refracción según la longitud de onda. Ya que estos se tienen para puntos discretos de longitudes de onda, pero no continuos, por lo tanto, a veces se necesita interpolar. En el caso específico de esta implementación, se utilizó una interpolación uni variada del tipo cúbico.

CSV

El módulo CSV en Python es necesario para poder trabajar con el formato CSV, utilizado para los datos experimentales cargados en el software. Este módulo facilita la importación y exportación de datos en este formato, manejando diferencias sutiles entre los datos producidos por distintas aplicaciones. Ofrece funcionalidades para leer y escribir datos tabulares, simplificando la interacción con archivos CSV [52].

Para poder guardar los datos simulados al disco, se utilizó esta librería con la función *writer* para generar los NumPy arrays de datos en un archivo CSV de múltiples columnas. También es utilizado para leer los archivos de datos experimentales cargados en la interfaz.

OS

Por último, OS es un módulo que permite utilizar funciones dependientes del sistema operativo en Python. Es usado para manipular rutas de archivos, crear archivos y directorios temporales, y manejar archivos y directorios de alto nivel [53]. En la solución

diseñada se utilizó esta librería para el manejo de archivos. En ambos casos, de cargar y salvar los CSV se utiliza para poder tener una interacción con los directorios del sistema operativo.

4.3.3 Funcionalidades Principales

La herramienta permite configurar de manera detallada un DBR. Entre las configuraciones principales se encuentran:

1. **Selección de Índices de Refracción:** El usuario puede establecer los índices de refracción tanto para el sustrato como para el ambiente.
2. **Configuración de Longitudes de Onda:** Es posible definir un rango específico de longitudes de onda para el análisis, incluyendo la definición del paso entre cada longitud de onda evaluada.
3. **Definición de las Capas:** Se configuran los índices de refracción y los grosores de las dos capas principales del DBR.
4. **Número de Repetición de Capas:** El usuario puede especificar el número de repeticiones de las capas para formar la estructura del DBR.
5. **Ángulo de Luz Incidente:** Se permite ajustar el ángulo de incidencia de la luz sobre el dispositivo, lo cual es crucial para la simulación de diferentes condiciones experimentales.

La herramienta realiza cálculos matemáticos complejos para obtener los siguientes parámetros: coeficientes de transmisión (t_s, t_p), coeficientes de reflexión (r_s, r_p), absorción (a_s, a_p) transmisión y reflexión total (t, r). Es decir, se calcula para ambas polarizaciones y para el promedio en cada longitud de onda.

Dentro de la configuración del dispositivo DBR simulado, se pueden variar las características individuales de las capas. Entre las opciones del índice de refracción, se puede seleccionar la utilización de materiales dispersivos. Cuando se selecciona un material específico, este sobrescribe el valor del campo de texto de entrada y utiliza los valores de índices de refracción, variando el valor dependiendo de la longitud de onda.

En la primera versión del software, se entregó con los siguientes materiales incluidos: Silicio, alúmina, aluminio, oro, níquel, plata. Estas se seleccionaron debido a la solicitud del cliente, ya que son materiales que se utilizan comúnmente. Existe la posibilidad de implementar más materiales simplemente mediante dos pasos directamente en el código. Primero, es necesario agregar el nombre del material a la lista de materiales, y el segundo paso es agregar un string que contenga los valores del material en tres columnas en el siguiente orden: longitud de onda (ángstrom), índice de refracción y coeficiente de extinción.

El software ofrece opciones flexibles para la visualización de resultado. Los usuarios pueden elegir qué parámetros ($t_s, t_p, r_s, r_p, a_s, a_p, t, r$) desean visualizar en las gráficas. Se facilita la comparación entre las respuestas para las polarizaciones transversales eléctrica (TE) y magnética (TM), una práctica común en el grupo de investigación NePhoS.

La herramienta permite cargar archivos de datos experimentales para su comparación directa con los resultados simulados. Al recalcular, se actualizan los datos simulados y se vuelven a graficar junto con los datos experimentales, proporcionando una herramienta poderosa para la investigación y el análisis. Esto es porque los investigadores pueden ajustar las características del DBR y simultáneamente ven los cambios en la gráfica. La comparación de los datos se hace mediante el cálculo de error porcentual medio en el rango de banda ancha del dispositivo.

Al finalizar, los usuarios pueden guardar los datos simulados en formato CSV. Este archivo incluye no solo los resultados de la simulación, sino también los detalles de configuración del DBR, facilitando la reproducción y revisión de los experimentos. Esta amplia gama de funcionalidades hace de la herramienta una solución integral para la configuración, simulación, análisis y comparación de los DBR en contextos de investigación y desarrollo.

4.3.4 Implementación TMM

Inicialmente, para esta implementación se calculan los ángulos del rayo de luz a través de todo el dispositivo a partir de la Ley de Snell descrita en la ecuación (2.3). Esta lista de ángulos se guarda en un array de NumPy, permitiendo que el ángulo esté indexado de manera que coincida con el número de capas. Para iniciar el algoritmo, se obtiene la matriz dinámica del ambiente y del sustrato en ambas polarizaciones, las cuales se pueden calcular desde el inicio.

El cálculo de la matriz dinámica se detalla en la ecuación (2.24), es una fórmula diferente para las polarización s y polarización p. El código funciona de tal manera que se crea un array de 2 dimensiones, generando así una matriz 2x2. Los valores para la matriz se obtienen mediante el uso de multiplicaciones simples y cálculo de senos y cosenos.

El siguiente paso para el algoritmo es iterar por cada longitud de onda e iniciar un array de matrices 2x2 del tamaño del dispositivo, es decir, un array 2x2x2N, con N siendo el número de repetición de pares de capa del DBR, para las matrices de propagación y matrices dinámicas. En el caso de la matriz de propagación, esta no varía con la polarización, por lo que se necesita una sola. Seguidamente, se cicla por cada capa del DBR excluyendo el medio incidente (ambiente y el sustrato).

En cada una de estas capas se extraen las características de ancho, índice de refracción y ángulo asociado. Se calcula la matriz de propagación como se indica en la ecuación (2.25) y la matriz dinámica y se guarda en el array 2x2x2N asociado. Por lo tanto, por cada capa de todo el dispositivo se obtiene: la matriz dinámica en TE y TM y la matriz de

propagación.

Seguidamente, se realiza el cálculo de matriz de transferencia de esa longitud de onda. Se utilizan las funciones de NumPy para hacer el cálculo de la inversa de la matriz dinámica del ambiente. De esta manera se puede calcular la matriz de transferencia como se muestra en la ecuación (2.28). Este proceso se repite por cada longitud de onda en el rango ingresado por el usuario y finalmente cada matriz de transferencia por longitud de onda es guardada en un array M_{sTotal} y M_{pTotal} , respectivamente para cada polarización.

Ya con estas matrices se puede calcular la respuesta total del sistema. Esto se hace iterando por cada longitud de onda, primero calcular los coeficientes de transmisión y reflexión. Estos se obtienen se muestra en las ecuaciones (2.29) y (2.30) siendo operaciones sencillas que se hacen a partir de la extracción de los valores de la matriz de transferencia. Una vez obtenidos estos valores, se procede a calcular los valores de reflexión y transmisión del sistema basado en las ecuaciones (2.31) y (2.32). De esta manera, el algoritmo obtiene un valor entre 0 y 1 para transmisión y reflexión en función de la polarización y la longitud de onda.

Es importante mencionar que para todos los arrays utilizados en esta solución se configuraron de manera que utilizaran el tipo de dato `numpy.complex128`, lo que permite que las matrices puedan almacenar números complejos y manejen alrededor de 15 a 17 dígitos decimales de precisión [54]. Por otro lado, mediante otras funciones se hacen los cálculos de absorción, transmisión promedio y reflexión promedio.

Se puede inferir a partir de la figura 2.6, en el caso de que B'_s sea igual a cero, entonces toda la luz incidente (A_0) será la suma de la luz reflejada y transmitida. Esto ocurre en el caso de que el dispositivo no tenga un componente de absorción, lo que implica que en un sistema ideal, sin pérdidas por absorción, la energía total de la luz incidente se conserva a través de la reflexión y transmisión. Es decir, que el 100% de la luz correspondería la suma de los tres componentes: reflexión, transmisión y absorción. A partir de esto se obtiene la ecuación (4.2) para calcular la absorción del sistema.

$$A = 1 - (R + T) \quad (4.2)$$

Así, se calcula la absorción (A) a partir de los valores de reflexión (R) y transmisión (T), obteniendo así, un valor entre 0 y 1 para la magnitud de la absorción del dispositivo.

Por último, para obtener la medida sin polarizar, o el valor promedio, esto se logra mediante el cálculo del valor promedio entre las polarizaciones TE y TM de la reflexión y transmisión, una estrategia que permite analizar el rendimiento del dispositivo en condiciones de iluminación no polarizada, representando situaciones más comunes en aplicaciones prácticas.

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (4.3)$$

$$T = \frac{T_s + T_p}{2} \quad (4.4)$$

Como se puede observar en las anteriores dos ecuaciones (4.3) y (4.4), el cálculo de la reflexión y transmisión sin polarizar se realiza sumando el valor de cada una en polarizaciones TE y TM y posteriormente dividiéndolo entre 2. Este proceso simplifica el análisis del dispositivo al proporcionar una única medida que resume su comportamiento frente a una amplia gama de condiciones de iluminación, lo cual es especialmente útil para diseñadores y usuarios de dispositivos ópticos que buscan entender y predecir su rendimiento en entornos reales.

Además, el estudio de la interacción de la luz no polarizada con materiales y dispositivos ópticos permite una mejor comprensión de sus propiedades ópticas intrínsecas, facilitando el desarrollo de tecnologías más eficientes y versátiles. Al considerar ambos componentes de polarización (TE y TM) en el análisis, los investigadores y diseñadores pueden asegurar que los dispositivos ópticos funcionen de manera óptima bajo una variedad más amplia de condiciones de uso, mejorando así su aplicabilidad en el mundo real.

Capítulo 5

Resultados y análisis

Este capítulo presenta los resultados y análisis de la verificación, validación y pruebas experimentales del software desarrollado para la simulación de filtros DBR, así como el análisis económico y consideraciones adicionales relevantes al proyecto. Se describieron las estrategias y procesos empleados para verificar que el software cumpliera con los requisitos técnicos, seguido de un proceso de validación que midió su efectividad mediante pruebas de exactitud. Además, se detallaron los tipos de pruebas realizadas, los resultados obtenidos y su interpretación para validar la funcionalidad y el rendimiento del software. Se evaluó el impacto económico del proyecto, incluyendo un análisis de costos y gestión de recursos, y se discutieron aspectos adicionales como el impacto ambiental y social del uso de filtros DBR, y el cumplimiento con normativas legales y técnicas.

5.1 Verificación y Validación del Diseño

5.1.1 Estrategias de Verificación

La verificación del software es un componente crítico en el desarrollo de un software, permite que el producto final cumpla con los requisitos especificados, y que también proporcione una experiencia de usuario confiable y eficiente. A continuación se va a hacer una breve descripción de las técnicas y procesos utilizados para verificar que el software cumple con los requisitos y especificaciones técnicas. Estas fueron descritas en la sección 3.3, específicamente en la tabla 3.2.

Las especificaciones que se van a verificar son las siguientes: tiempo de simulación promedio y confiabilidad de herramienta. Las métricas de: capacidad para importar datos experimentales, capacidad de almacenamiento, personalización de parámetros de estructura y escalabilidad son especificaciones las cuales, a partir de la propuesta de diseño, se confirmó que cumplen su valor ideal. Por otro lado, la facilidad de uso fue confirmada mediante una serie de reuniones que se tuvo con el cliente para obtener toda la retroalimentación necesaria y la documentación detallada sobre su uso e instalación se

va a encontrar en los anexos.

Para la verificación del tiempo de simulación promedio, se realizará inicialmente con configuraciones promedio de DBR, variando el número de capas y los índices de refracción de manera controlada. En función de los resultados iniciales y asegurando que el software cumple con los tiempos de simulación esperados, se procederá a incrementar gradualmente la complejidad de las configuraciones de DBR. Este enfoque escalonado permite evaluar el rendimiento del software bajo distintos grados de complejidad, ya que no se conoce las diferentes condiciones de hardware en el grupo NePhoS, y asegura que el software es capaz de manejar simulaciones más exigentes dentro de los tiempos de ejecución aceptables.

En el caso de la verificación de la confiabilidad de la herramienta, se centrará específicamente en pruebas de manejo de errores. Esto incluye poner errores en los datos de entrada para evaluar cómo el software detecta, informa y maneja estos errores. Se simularán también condiciones de operación anómalas para asegurar que el software puede gestionar fallos inesperados sin comprometer la integridad de los resultados de simulación. Esto permite que se confirme si el software es confiable, incluso en la situación de que, debido a error humano o falta de conocimiento, los datos de entrada no son lo esperado.

5.1.2 Proceso de Validación

Para validar la efectividad del software en alcanzar los objetivos planteados, se realizaron pruebas de exactitud de simulación mediante el cálculo de error en el rango del ancho de banda de reflexión en los datos obtenidos en la computadora con respecto a resultados experimentales. Como se indica en la sección 4.1 y específicamente en la ecuación (4.1) se va a medir esta exactitud mediante el porcentaje de error absoluto medio.

Durante el proceso de validación, se enfrentó el desafío de tener un número limitado de sets de datos experimentales. A pesar de las expectativas iniciales de obtener una amplia variedad de datos experimentales a partir de los comentarios del cliente en las primeras entrevistas solo se lograron obtener dos sets de datos. Otra dificultad es que de los datos no se conocen los siguientes datos: el valor de índice de refracción exacto, el ángulo de incidencia de la luz y el espesor exacto de cada capa.

Para superar estas limitaciones, se adoptó un enfoque minucioso en el análisis de los datos disponibles. Se procedió a reconstruir el espectro experimental utilizando la información accesible, tales como el número de periodos de la estructura DBR, el rango de longitudes de onda medido, la suma total de los grosores de las capas, y una estimación aproximada del índice de refracción. Este método permitió realizar inferencias y estimaciones precisas sobre los valores desconocidos, facilitando una aproximación razonable a las condiciones experimentales reales.

Este enfoque no solo demostró la flexibilidad y adaptabilidad del software ante la falta de datos completos, sino que también subrayó la capacidad del método implementado para generar resultados confiables y precisos bajo restricciones de información. La

validación, por tanto, no solo se centró en comparar los resultados de simulación con los datos experimentales limitados, sino también en evaluar la robustez del software para deducir parámetros desconocidos y predecir con eficacia el comportamiento óptico de los filtros DBR.

5.2 Análisis Experimental y Pruebas

En esta sección, se detallan los experimentos y pruebas llevadas a cabo para evaluar la efectividad y fiabilidad del software desarrollado. A continuación, se describe el hardware utilizado, las pruebas realizadas para verificar el tiempo de simulación promedio, la confiabilidad de la herramienta, y cómo se validaron estos resultados con datos experimentales. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos para determinar la efectividad del software.

5.2.1 Hardware utilizado

Las pruebas del software de simulación se realizaron en un entorno controlado para asegurar la exactitud de los resultados. El hardware utilizado fue constante y consta del siguiente:

- **Procesador:** AMD Ryzen 5 5600X a 3.7 GHz
- **Memoria RAM:** 32 GB a 3600 MHz
- **Sistema Operativo:** Windows 10 Home Version 22H2
- **Tarjeta Gráfica:** NVIDIA RTX 3070
- **Almacenamiento:** SSD de 512GB

Es importante notar lo siguiente: el peso del software es de 78.9MB, por lo tanto, no se trata de un espacio alto. Este funciona de manera single thread sin uso del procesador gráfico, por lo tanto, eso no debería tener impacto. Por otro lado, las computadoras utilizadas en el laboratorio del grupo NePhoS poseen Windows 10, debido a esto no fue necesario hacer pruebas en otros sistemas operativos.

5.2.2 Verificación del tiempo de simulación promedio

Para evaluar el rendimiento del software, se realizaron una serie de pruebas enfocadas en medir el tiempo de simulación promedio. Para cada una de las configuraciones de DBR se hizo un total de 10 pruebas y se calculó el valor de tiempo de simulación promedio. Se inició con una configuración bastante estándar y utilizada en el grupo NePhoS: la

estructura con un índice de refracción bajo n_L de 1.55 y uno alto n_H de 2.5, ajustando el grosor de un período a 440 nm, con capas de grosor 176 nm para n_H y 264 nm para n_L , estudiando los espectros de reflexión para un DBR de 25 períodos [55]. Además, el rango de longitudes de onda validado es de 400 a 3000 nm (con delta entre longitudes de 5 nm) y un ángulo de incidencia de 20° .

Se presenta a continuación el espectro de reflexión del dispositivo simulado, que registró un tiempo total de cálculo de 2.76977 segundos, en la primera simulación:

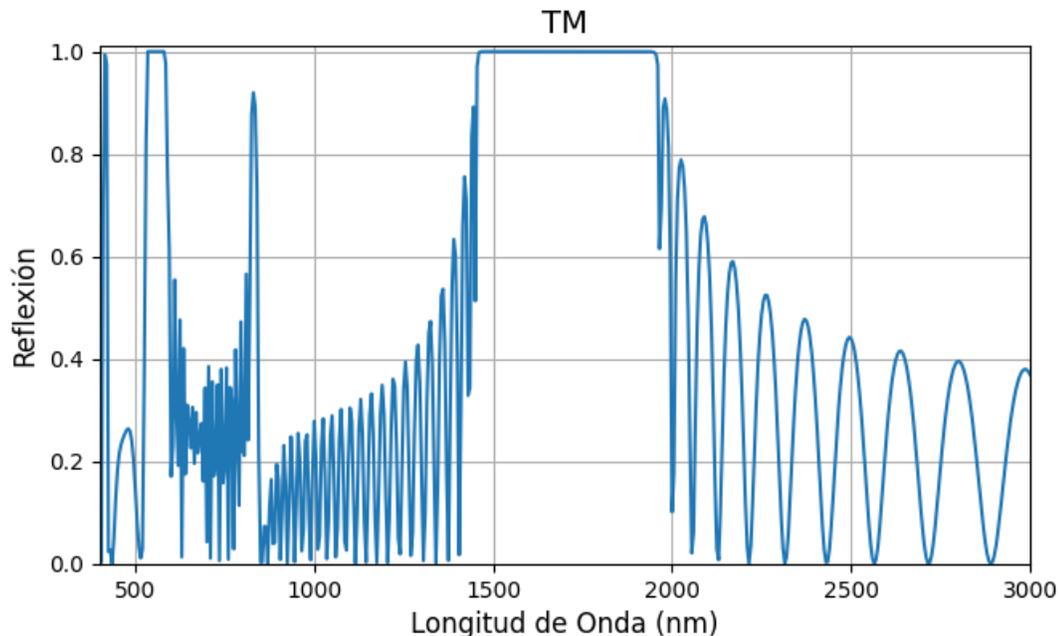


Figura 5.1: Espectro de reflexión en polarización TM para el dispositivo DBR descrito.

El tiempo de simulación de este dispositivo cumple con el valor de tiempo ideal establecido en las especificaciones y métricas de la tabla 3.2. Por lo tanto, a continuación se va a generar una tabla con configuraciones que van a ir incrementando en complejidad hasta que se llegue a un punto en que no se cumpla el valor de tiempo de simulación ideal. Estas pruebas se hicieron de manera que se modificaron diferentes variables independientes para obtener cuál es la que causa mayor impacto. Las variables a modificar son: número de períodos, ancho de las capas, delta entre longitudes de onda, y, por último, el uso de índices de refracción variables por longitud de onda. Es decir, el rango de longitudes de onda y el ángulo de incidencia se van a mantener constantes.

La prueba de verificación inicial fue realizada incrementando el número de períodos. Se hicieron 10 repeticiones de simulación para cada una de las configuraciones de DBR y se calculó el promedio. La incertidumbre del promedio se calculó dividiendo la desviación estándar de la muestra por la raíz cuadrada del número de medidas. Los resultados de la prueba se pueden ver en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Tiempo de simulación promedio para un número de periodo variable.

Paso (nm)	Espesor1 (nm)	Espesor2 (nm)	N	Promedio (s)
5	176	264	25	1.2382 ± 0.0012
5	176	264	50	2.4302 ± 0.0013
5	176	264	100	4.8281 ± 0.0040
5	176	264	250	11.9613 ± 0.0061
5	176	264	500	24.1279 ± 0.0350

La siguiente verificación de tiempo se hizo incrementando los valores de ancho de ambas capas. Esto se hizo simultáneamente en el espesor de la capa 1 y 2, manteniendo los otros valores de la configuración constantes, los resultados se pueden observar en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Tempo de simulación promedio para un espesor de capa variable.

Paso (nm)	Espesor1 (nm)	Espesor2 (nm)	N	Promedio (s)
5	250	500	25	1.2357 ± 0.0013
5	1 000	2 000	25	1.2378 ± 0.0008
5	10 000	20 000	25	1.2328 ± 0.0009

La tercera prueba se varió el paso (o delta) entre cada una de las longitudes de ondas simuladas. Se cambió de un muestreo de cada 5 nm a uno de alta resolución, esto mejora la resolución de la simulación. Este proceso permite una exploración más detallada y exacta del comportamiento del sistema y se pueden observar los resultados en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Tiempo de simulación promedio para un paso variable.

Paso (nm)	N	Promedio (s)
5	25	1.2361 ± 0.0015
2.5	25	2.4668 ± 0.0043
1	25	6.1607 ± 0.0038
0.5	25	12.3997 ± 0.0514
0.2	25	31.7799 ± 0.2613

Por último, se variaron los índices de refracción de las capas, alternando entre un valor constante y un material que varía el índice de refracción en función de la longitud de onda. En el caso de esta prueba se utilizó el Silicio y para esto se probó el efecto en cada una de las capas y, seguidamente, utilizando ambas capas con un material variable, esto se puede observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Tiempo de simulación promedio para capas de silicio.

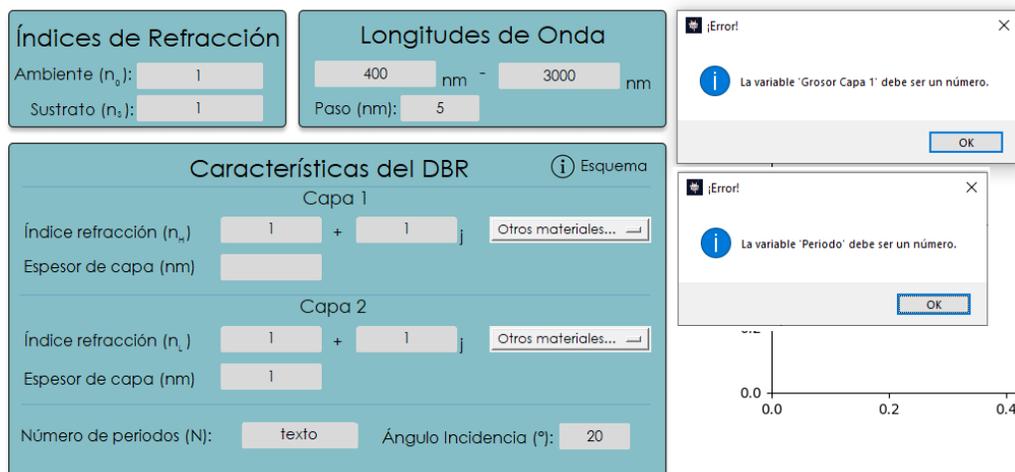
Paso (nm)	n_h	n_l	N	Promedio (s)
2	Si (variable)	1.55	25	14.6430 \pm 0.0446
2	2.5	Si (variable)	25	14.5104 \pm 0.0221
2	Si (variable)	Si (variable)	25	27.8991 \pm 0.2499

5.2.3 Verificación de la confiabilidad de la herramienta

La confiabilidad de la herramienta de simulación desarrollada para filtros DBR constituye una parte crítica de la investigación para poder cumplir con el valor objetivo de tasas de error. Para ello, en la solución diseñada se implementó una variedad de manejos de error y condiciones de operación, anomalías. Así verificando la robustez y fiabilidad del software.

La prueba realizada fue mediante la introducción deliberada de errores en los datos de entrada. Esta estrategia permitió evaluar la capacidad del software para detectar y notificar errores de manera efectiva, un aspecto crucial para evitar la propagación de resultados incorrectos. La interfaz gráfica posee un total de 13 espacios de entrada de texto, para estos espacios todos los valores esperados son números, por lo que los posibles casos en el que pueda tener error sería en los siguientes casos: dejar el espacio en blanco, introducir textos que se conviertan a *strings*, y el caso de que exista alguna división por 0.

Por lo tanto, se hizo la verificación de estos casos en cada una de las entradas de texto y lo que se obtiene es el siguiente mensaje de error mostrado en la figura 5.2:

**Figura 5.2:** Resultado de prueba de error en datos de entrada de texto.

La siguiente prueba fue el introducir en el campo de datos experimentales archivos no compatibles y archivos erróneos. Lo que se esperaba en estos casos era que el soft-

ware identificara los formatos de archivo incorrectos o el contenido no esperado y evitara cualquier procesamiento posterior que pudiera llevar a resultados de simulación erróneos. Efectivamente, el software respondió mostrando un mensaje de error claro y conciso que indicaba el tipo de incompatibilidad o error en el archivo, como se ilustra en las figuras 5.3 y 5.4, asegurando así que el usuario esté informado del problema y pueda tomar las medidas correctivas necesarias.

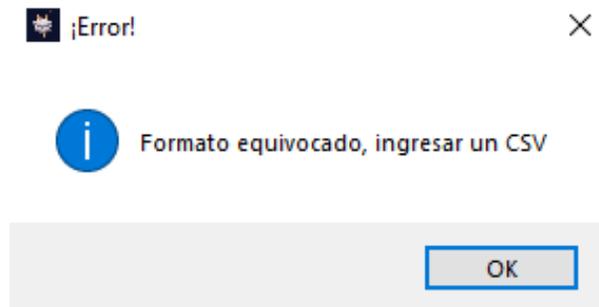


Figura 5.3: Resultado de prueba de error con carga de archivos no compatibles.

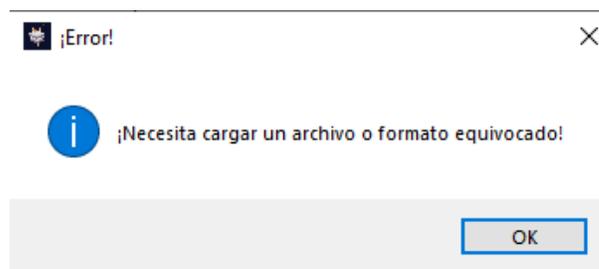


Figura 5.4: Resultado de prueba de error con carga de archivos con contenido no esperado.

Por último, se probó el caso de presionar los botones de la interfaz gráfica sin haber calculado los espectros anteriormente. En esta situación, se anticipaba que el software no permitiría la ejecución de funciones dependientes de resultados previos sin los cálculos correspondientes. La verificación confirmó que al intentar realizar acciones sin los cálculos necesarios, se presentaba un mensaje de error preventivo, como se muestra en la figura 5.5, instruyendo al usuario a completar los pasos necesarios antes de proceder. Esta medida preventiva garantiza la secuencia correcta de operaciones y mantiene la integridad del flujo de trabajo de simulación.

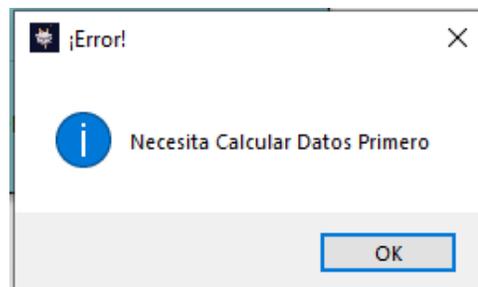


Figura 5.5: Resultado de prueba de error al realizar acción sin tener los cálculos simulados.

5.2.4 Validación con datos experimentales

La validación de la efectividad del software desarrollado para la simulación de filtros DBR se llevó a cabo mediante la comparación directa de los resultados de simulación con mediciones experimentales. Se obtuvieron dos sets de datos experimentales correspondientes a filtros DBR fabricados en alúmina porosa. Esta característica implica que los índices de refracción de las capas son inferiores al índice de refracción de la alúmina sólida, debido a la porosidad del material que resulta en una mezcla de alúmina y aire.

Los filtros experimentales compartidos tienen 75 periodos en total y un grosor total promedio entre 300 nm y 600 nm, ya que estos suelen ser tamaños que se utilizan para la fabricación de DBRs. Sin embargo, los valores exactos de los índices de refracción y el grosor de las capas no están disponibles, por lo que debemos estimar estos parámetros para lograr un ajuste preciso entre los datos experimentales y los resultados simulados. La capa que está en contacto con el aire tiene un índice de refracción mayor y un grosor menor en comparación con la otra capa. Sin embargo, los valores específicos de estos parámetros son desconocidos y necesitan ajustarse.

Dado el desafío presentado por la falta de información detallada, el proceso de validación se centró en ajustar los valores de índice de refracción y grosor de las capas para alinear los resultados de simulación con los espectros de reflexión observados en TE+TM de los datos experimentales proporcionados. Este enfoque permitió evaluar la capacidad del software para inferir parámetros desconocidos y predecir con exactitud el comportamiento óptico de los filtros DBR bajo estudio.

A continuación, en las figuras 5.6 y 5.7 se muestran las gráficas del espectro de reflexión de los datos experimentales, como se mencionó anteriormente en TE+TM, es decir, sin polarizar. Inicialmente, en la figura 5.6 se puede observar cómo los datos experimentales tienen un rango de 350 nm a 800 nm para las longitudes de onda y el ancho de banda de reflexión se encuentra entre 555 nm y 625 nm obteniendo una reflexión máxima de 97.15%.

El segundo set de datos presenta un rango entre 250 nm y 900 nm, y este posee dos picos de reflexión, los cuales se pueden observar en la figura 5.7: el principal, con una reflexión máxima del 81.98% entre 625 nm y 700 nm, y el segundo entre 320 nm y 360 nm. Se priorizará el análisis del primer ancho de banda de reflexión, dado su predominancia en el espectro observado.

Para realizar una comparación exhaustiva entre los resultados simulados y los datos experimentales, se emplearon ajustes iterativos en los parámetros de simulación, incluyendo los índices de refracción y los grosores de las capas. Estos ajustes iterativos se basaron en un proceso de optimización enfocado en minimizar la diferencia entre los espectros de reflexión medidos y los generados por la simulación. Este enfoque permitió afinar los valores de los parámetros de los filtros DBR, buscando una correlación precisa entre los datos experimentales y las simulaciones.

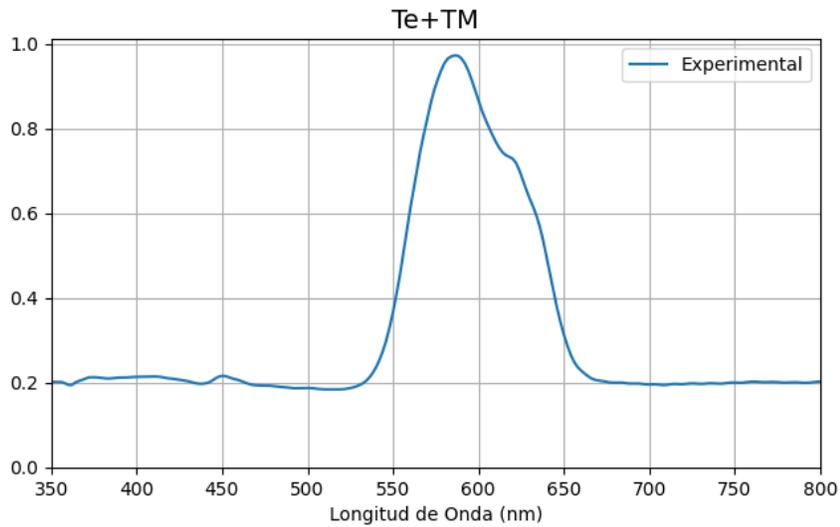


Figura 5.6: Espectro de reflexión para DBR con 75 periodos del primer set de datos.

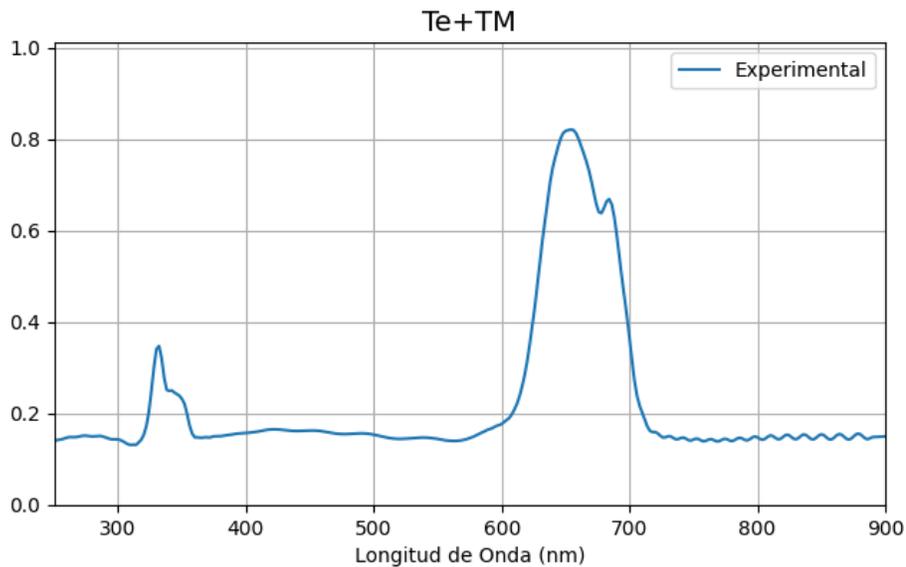


Figura 5.7: Espectro de reflexión para DBR con 75 periodos del segundo set de datos.

Inicialmente, para la validación, se empezó configurando el software de simulación con una aproximación inicial basada en la información provista por el laboratorio. Es decir, un índice de refracción por debajo de 1.77 [56], ya que es poroso y, por tanto, será la mezcla de alúmina y aire, rango de longitudes de onda entre 350 y 800 nanómetros, que tiene un número de periodos de 75 y que el ángulo de incidencia es de 20° . Posteriormente, se realizaron ajustes iterativos centrados en el porcentaje de error del ancho de banda de reflexión para optimizar la exactitud de los modelos simulados. Los ajustes y los correspondientes resultados se detallan en las figuras 5.8 y 5.10, ofreciendo una visión de la efectividad del proceso de ajuste y la exactitud alcanzada en la simulación en comparación con los datos experimentales.

El cálculo de los espesores de capa se basó en que $n \cdot h = \frac{\lambda_0}{4}$, con λ_c siendo la longitud

de onda, donde el mayor valor de reflexión es también llamado la posición del extremo de reflectancia [57]. En el caso del primer set de datos, el λ_0 es de 586 nm.

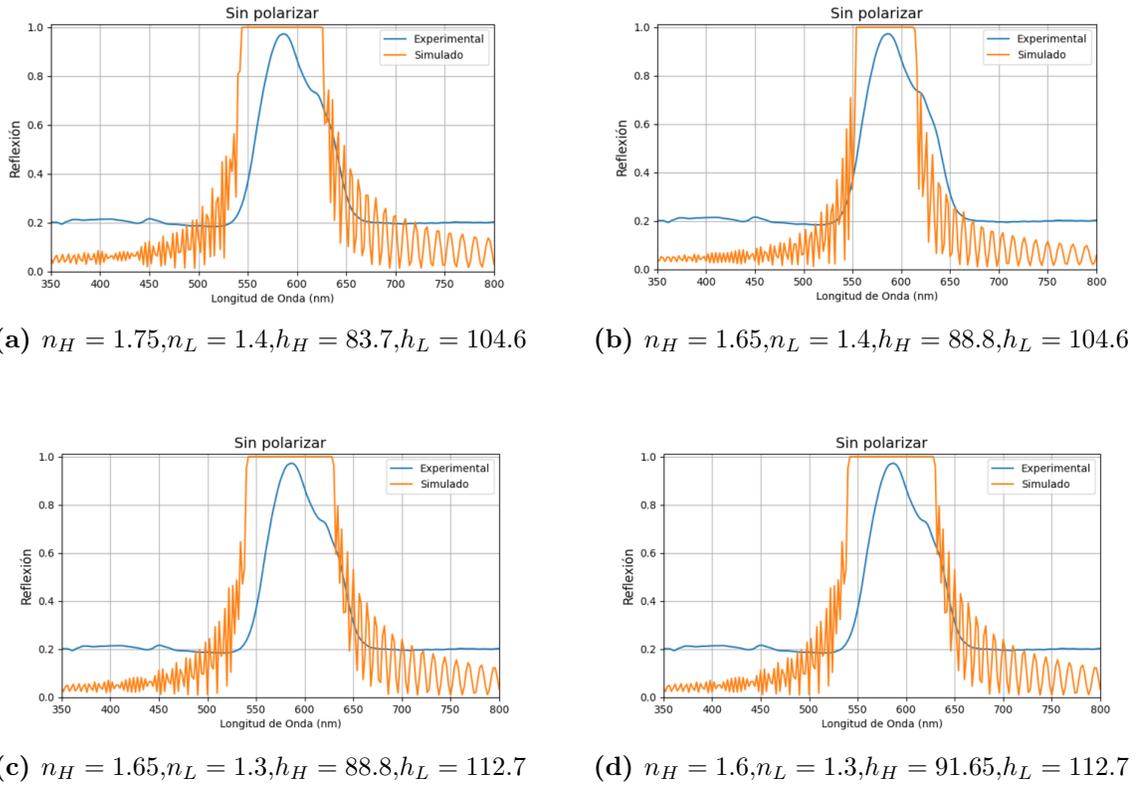


Figura 5.8: Ajustes iterativos para el primer set de datos.

En la figura 5.8 se muestran cuatro gráficas de los espectros de reflexión que se obtuvieron durante el proceso de aproximación. Esto no muestra una totalidad de todos los casos probados, pero muestran un proceso de ajuste para obtener la curva más similar. Finalmente, a partir de todo el proceso se obtuvo la siguiente configuración que se muestra en la figura 5.9, lo cual fue el resultado más similar obtenido.

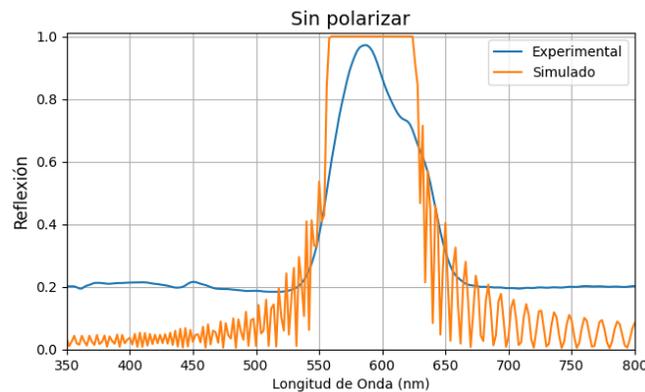
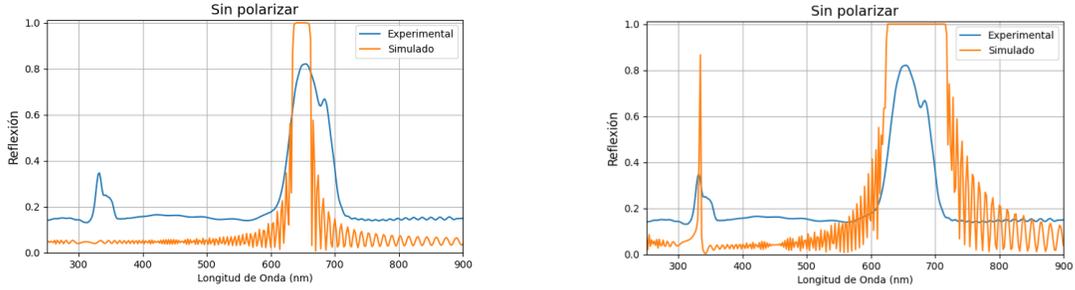
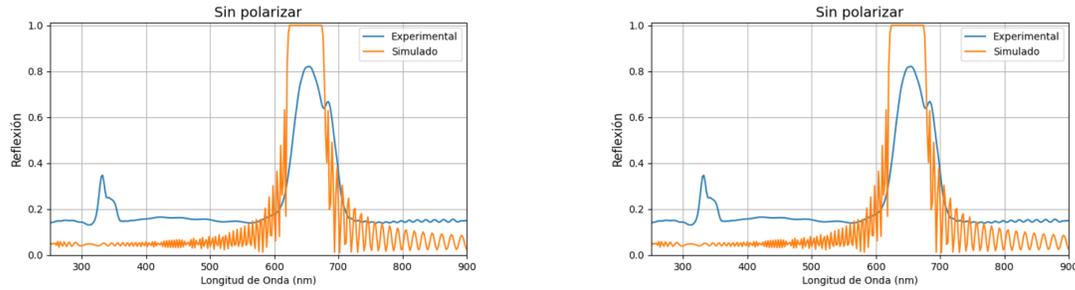


Figura 5.9: Espectro de reflectividad del DBR para primer set de datos con configuración $n_H = 1.475, n_L = 1.23, h_H = 99.322, h_L = 122.7$.

De manera similar al caso anterior, en la figura 5.10 se muestran cuatro configuraciones que se obtuvieron durante el proceso de ajuste. Igualmente, no muestra todos los índices de refracción probados, solamente cuatro de los puntos durante el procedimiento. En este segundo set de datos el λ_0 es de 652 nm, con un porcentaje de reflexión de 81.93%.



(a) $n_H = 1.6, n_L = 1.5, h_H = 101.875, h_L = 108.67$ (b) $n_H = 1.65, n_L = 1.33, h_H = 105, h_L = 122.56$



(c) $n_H = 1.65, n_L = 1.45, h_H = 98.79, h_L = 112.41$ (d) $n_H = 1.75, n_L = 1.5, h_H = 93.14, h_L = 108.67$

Figura 5.10: Ajustes iterativos para el primer set de datos.

Como se puede observar en la gráfica presentada en la figura 5.10b, el valor de h_H no concuerda con el cálculo previamente mencionado. Esta discrepancia fue intencional, ya que se buscó aproximarse al primer pico de reflexión observado en el conjunto de datos. A través de este proceso, se logró obtener una curva que se aproxima de manera significativa a los datos experimentales, como se muestra en la figura 5.11.

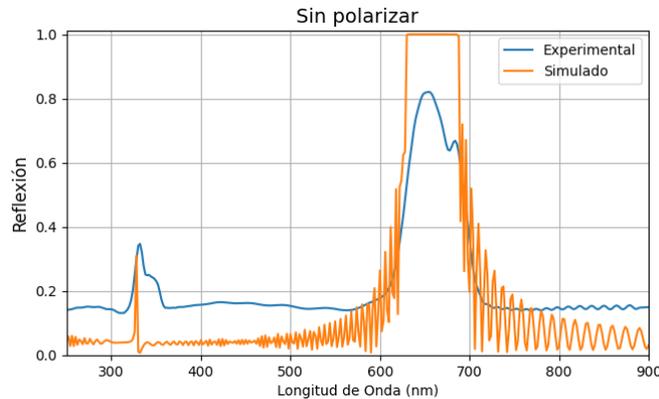


Figura 5.11: Espectro de reflectividad del DBR para primer set de datos con configuración $n_H = 1.6, n_L = 1.39, h_H = 105, h_L = 117.266$.

5.2.5 Análisis de los Resultados

El análisis de los resultados obtenidos a partir de la verificación, validación y pruebas experimentales del software de simulación de filtros DBR revela una serie de hallazgos importantes que muestran la efectividad, confiabilidad y aplicabilidad del software en contextos de investigación y desarrollo.

Iniciando por la verificación del tiempo de simulación promedio de la herramienta, se demostró que el software cumple con las especificaciones técnicas y expectativas de rendimiento a partir de los valores objetivos. Tomando como caso la configuración base que tiene unas características promedio utilizadas en la construcción de DBRs en el laboratorio NePhoS, como se mencionó el tiempo de simulación fue menor a 3 s siendo menos de una décima parte del valor objetivo establecida en la metodología y mostrada en la tabla 3.2.

Seguidamente, como se observó en la tabla 5.1, al variar el número de periodos, se incrementó considerablemente el tiempo promedio de simulación, llegando hasta 24 segundos en el caso de 50 periodos. En el caso de la tabla 5.2, el espesor de las capas no muestra una variabilidad del tiempo de simulación, manteniendo siempre el tiempo promedio de 1.23 segundos. La tabla 5.3 muestra el efecto de aumentar la resolución de longitudes de onda. La mayor resolución que se obtuvo que cumplió la métrica fue de 0.2 nm con un tiempo de simulación promedio de 31.78 segundos. Por último, en la tabla 5.4 se puede observar cómo el uso de un índice de refracción variable y con componente imaginario si aumenta el tiempo de simulación aumentando aproximadamente 12 segundos. Otra cosa que se puede observar es que la incertidumbre del tiempo de simulación no genera un impacto, ya que este no superó los 300 ms.

Para el caso del paso entre longitudes de onda, las medidas experimentales realizadas por el laboratorio son de 2 nm, por lo que se puede observar que este no va a ser un aspecto a considerar en el tiempo de simulación. En el caso de todas las pruebas, se hicieron de 400 a 3000 nm, lo cual incluye la luz visible hasta luz infrarroja de onda corta, lo cual es el 99% de los casos analizados por el laboratorio. Es decir, posiblemente en casos de simulación de dispositivos se pueden utilizar rangos más pequeños de este, lo que significaría un tiempo de simulación menor al que se obtuvo en las pruebas de verificación.

Por lo tanto, el mayor impacto se vería en el caso del número total de capas, y si se utiliza algún material con índice de refracción variable. La mayoría de los dispositivos que manufacturan en el laboratorio son de un material de alúmina porosa, es decir, Al₂O₃ mezclado con aire. Este material no tiene coeficiente de extinción (índice de refracción imaginario) y se puede aproximar a un valor de índice de refracción real constante.

Entonces, el principal desafío es el de dispositivos DBR con una cantidad total de capas muy elevada. Esto se consideraría un caso más extremo, ya que para no cumplir el valor marginal especificado en la métrica de 150 segundos se necesitaría de un dispositivo con una cantidad de más de 3000 capas. Como se observa en la tabla 5.1, el aumento de tiempo de simulación aumenta proporcionalmente y aproximadamente lineal con el

número de periodos; de esta manera, se puede aproximar el número de capas que no cumplen con la condición.

La confiabilidad del software fue evaluada a través de pruebas rigurosas enfocadas en el manejo de errores y la estabilidad ante condiciones de operación anómalas. Al introducir deliberadamente errores en los datos de entrada y simular escenarios de fallo, se pudo verificar que el software cuenta con un robusto sistema de detección y notificación de errores. Esta característica es crucial para evitar la propagación de resultados incorrectos y asegura que los usuarios puedan corregir los errores de forma eficaz.

Como se puede observar en la verificación de confiabilidad, se hizo basándonos en los principales componentes de la solución diseñada, como se describe en la subsección 4.1.2. Para el módulo de modelado de filtros, se hicieron los casos de ingresar valores incorrectos o inesperados a los campos de texto que esperan números. Esto confirmó que la solución puede manejar estos tipos de errores y no va a tener algún problema este módulo. De manera similar, se ingresó el valor de 0 individualmente en cada uno de los campos para verificar que el software no tuviera algún error por división por 0. El caso de ingresar un string, y el valor 0 en un campo que pueda causar división por 0 genera el mismo mensaje de error, por lo que se puede entender cuál es el valor que es necesario cambiar.

Por otro lado, en el módulo de análisis de espectros ópticos e interfaz gráfica se verificó que existieran valores antes de poder graficarlos, y que el diseño no tuviera ningún error, o crash al intentarlo. Como se observa en la figura 5.5, la solución muestra un mensaje al usuario para recordar que es necesario el tener el cálculo antes de poder hacer alguna visualización. En el caso del bloque de gestor de datos experimentales se analizó que no tuviera ningún crash en caso de tener algún formato incorrecto o datos equivocados, como se muestra en los mensajes de error mostrado al usuario que se puede observar en las figuras 5.3 y 5.4.

Antes de proceder al análisis de los datos experimentales, es crucial destacar las limitaciones impuestas por el cliente respecto a la provisión de datos completos, lo cual complicó la validación del diseño. No obstante, para aproximarnos a una validación, se presenta una gráfica de un dispositivo diseñado por el laboratorio NePhoS (ver Figura 5.12), esta es la misma que se utilizó para la configuración inicial de la verificación de tiempo. Como se puede observar en la figura 5.1, los resultados obtenidos muestran una notable similitud con esta referencia.

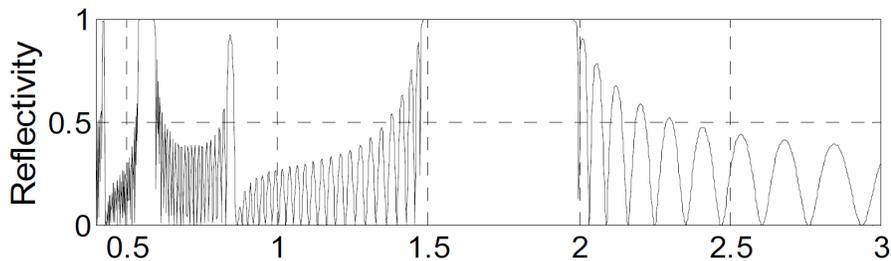


Figura 5.12: Espectro de reflectividad del cristal fotónico para ángulo de incidencia de 20° , mostrando dos band gaps en la región visible y dos en la región NIR. [55]

En otro estudio sobre el diseño de un DBR, se detalla la construcción de un dispositivo con un índice de refracción alto (n_H) de 3.063, un índice de refracción bajo (n_L) de 2.6123, y un índice de refracción del sustrato de vidrio de 1.5; esto para un dispositivo compuesto por 20 periodos. El espectro de reflexión obtenido se ilustra en la Figura 5.13, mostrando un ancho de banda de reflexión entre 500 y 600 nm.

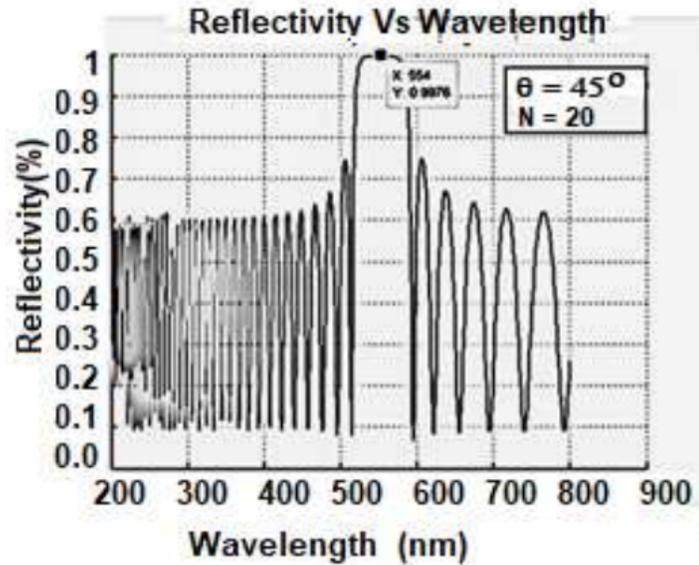


Figura 5.13: Reflexión vs longitud de onda para 20 periodos [58].

La simulación de esta estructura, ajustando los grosores de las capas a 45 y 55 nanómetros para la primera y segunda capa respectivamente (dado que el artículo original no especifica estos valores de manera exacta), revela los espectros en la Figura 5.14. De forma similar al caso previamente mencionado, se observa que los resultados son notablemente parecidos, especialmente en lo que respecta al punto de máxima reflexión.

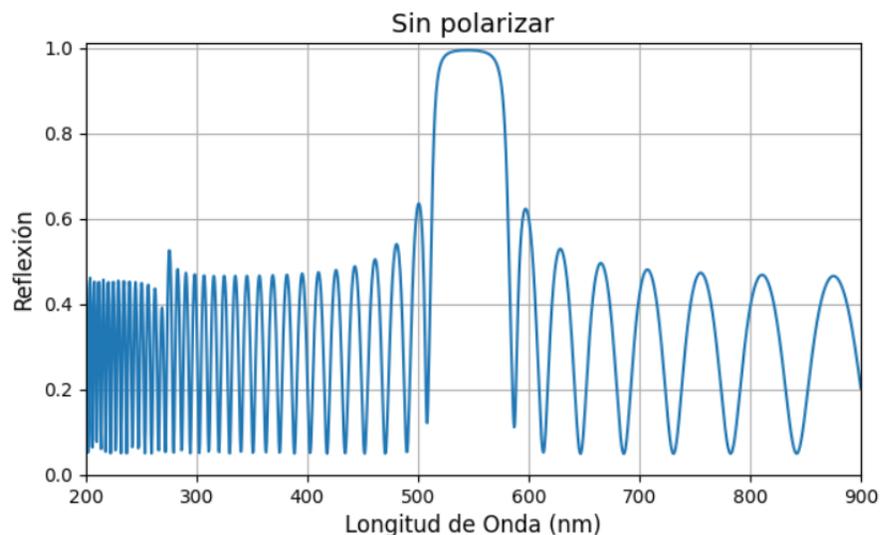


Figura 5.14: Reflexión vs longitud de onda para 20 periodos mediante simulación con la herramienta.

A partir de los casos presentados, se comprende que al contar con información detallada y exacta (como índices de refracción exactos, número de periodos, y una aproximación del grosor de las capas) facilita significativamente la simulación de dispositivos ópticos y la obtención de resultados esperados. Esta observación se evidencia claramente al comparar las simulaciones llevadas a cabo con datos completos y específicos, frente a aquellas realizadas bajo condiciones de información limitada o aproximada. En los ejemplos detallados, la capacidad para replicar con alta fidelidad los espectros de reflexión y otros parámetros críticos del diseño de los dispositivos DBR, subraya la importancia de una caracterización exhaustiva de los materiales y estructuras implicadas. La precisión en la definición de cada parámetro no solo mejora la eficacia de las simulaciones sino que también optimiza el tiempo de ejecución, alineándose con los objetivos de rendimiento establecidos para el software de simulación.

No obstante, la ausencia de datos completos y específicos no constituye un obstáculo insuperable, gracias a la flexibilidad y capacidades avanzadas del software de simulación. La herramienta está diseñada para permitir a los usuarios emplear métodos de aproximación mediante prueba y error, facilitando la identificación de características óptimas de los dispositivos incluso en condiciones de información limitada. Este enfoque iterativo posibilita la exploración de un amplio rango de configuraciones, ajustando los parámetros de diseño hasta alcanzar resultados que se alineen con los objetivos esperados o las características observadas en dispositivos reales.

Esta fue la característica que se observó en la validación con datos experimentales, en la cual el objetivo fue reconstruir los datos experimentales a partir de solamente que los filtros experimentales tienen 75 periodos en total y un grosor total promedio entre 300 nm y 600 nm. Los valores precisos de los índices de refracción y el grosor de las capas no están disponibles, pero se saben que eran valores menores a los de la alúmina. Aunque no se logró obtener una réplica exacta, se pudo obtener un ancho de banda de reflexión similar a los valores experimentales.

Inicialmente, para el primer set de datos se puede observar en la figura 5.9, que se obtuvo un resultado, el cual tiene el ancho de banda en el mismo rango que los datos experimentales. Se puede observar que fuera del ancho de banda de reflexión, los datos experimentales poseen un valor de reflexión de aproximadamente 20% mientras que en la simulación se acerca más al 0. Utilizando las funcionalidades del software, se calculó el porcentaje de error en el ancho de banda de reflexión. Estos resultados se pueden observar en la figura 5.15.

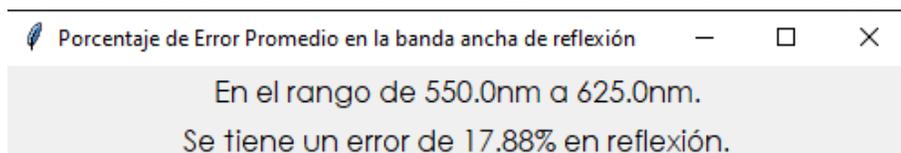


Figura 5.15: Porcentaje de error del dispositivo simulado para el primer set de datos.

Como se observa en la imagen anterior, se identificó un error del 17.88% en com-

paración con los datos experimentales. Este resultado está ligeramente por encima de la métrica de exactitud inicialmente establecida del 15% en la metodología. Aunque el error excede el valor marginal previsto, la diferencia de 2.88% sobre el objetivo inicial no se considera significativamente alta, teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos modelados y las limitaciones inherentes al proceso de simulación y de los datos. Este margen de error, aunque mayor al deseado, sigue siendo un indicativo de que las simulaciones pueden ofrecer una aproximación razonablemente exacta para el análisis en cuestión, sugiriendo que, con más información de los dispositivos experimentales, es posible acercarse aún más a los valores experimentales.

Para el segundo set de datos, analizando la figura 5.11, se evidencia que los resultados obtenidos coinciden en términos del ancho de banda de reflexión con los valores experimentales, lo que indica una alineación fundamental en el comportamiento de reflexión. Sin embargo, al observar los valores de reflexión fuera del ancho de banda específico, como sucede con el set de datos anterior, también se encuentra una diferencia en el valor mínimo de reflexión. Algo importante a mencionar, es que mediante la simulación se logró simular también el pequeño pico de reflectividad que se observa en el rango de longitud de onda entre 300 y 350 nanómetros. Igualmente que el caso anterior, se calculó el porcentaje de error, para el caso del ancho de banda de reflexión más importante, el cual posee el mayor nivel de reflexión.

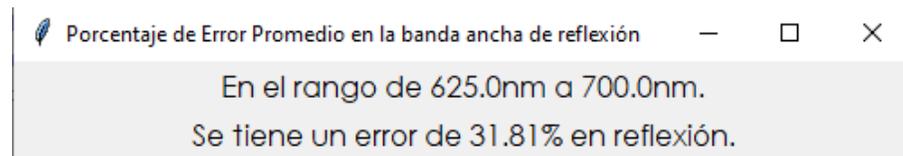


Figura 5.16: Porcentaje de error del dispositivo simulado para el segundo set de datos.

En el caso del segundo set de datos, donde se identificó un error del 31.81%, como se observa en la figura 5.16, es importante reconocer que este valor es considerablemente más alto que el observado anteriormente. Sin embargo, esta mayor diferencia se puede atribuir a las limitaciones específicas asociadas con este conjunto de datos, y la falta de información. En este caso, las limitaciones pueden incluir variaciones en las condiciones experimentales, inexactitudes en las mediciones de los parámetros físicos o la presencia de factores no modelados que afectan el comportamiento del sistema estudiado.

Además, es crucial considerar que la simulación de sistemas complejos y la predicción de su comportamiento bajo diversas condiciones pueden enfrentarse a desafíos inherentes. Estos desafíos incluyen la necesidad de simplificaciones y suposiciones en los modelos matemáticos, lo que puede llevar a diferencias entre los resultados simulados y los experimentales. En el caso de la manufactura de los DBRs no se puede asegurar la homogeneidad de cada capa, y que todas tengan el mismo grosor exacto. Además de esto, al material ser una alúmina porosa, dependiendo del proceso, puede ser que no todas las capas tengan un valor de índice de refracción igual, e incluso en la misma capa que exista variación de manera longitudinal.

A pesar de estas diferencias, los resultados obtenidos proveen insights valiosos y una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el modelo de simulación. La identificación de un error mayor en este segundo set de datos subraya la importancia de continuar refinando los métodos de simulación y explorar formas de superar las limitaciones de los datos para mejorar la exactitud y la fiabilidad de las predicciones. Aunque, como se observó en el caso de los artículos analizados y el primer set de datos, se observa que se obtiene un valor de error bajo.

5.3 Análisis económico

El desarrollo de esta herramienta de simulación representa una inversión en recursos, tanto materiales como humanos, con el objetivo de optimizar el proceso de investigación y desarrollo de dispositivos DBR en el laboratorio NePhoS. Este análisis económico abordó los costos del desarrollo del proyecto, el impacto económico esperado de la implementación y la viabilidad a largo plazo de esta innovación.

Aunque el propósito del proyecto no es la comercialización de la solución diseñada, es importante hacer un análisis económico detallado. Este permite tener una idea clara de cómo se han desglosado y gestionado los recursos, además de que también demuestra el impacto económico del proyecto. La inversión en la herramienta ofrece beneficios importantes en términos de ahorro de tiempo y recursos, además permite una mejor calidad y exactitud durante las investigaciones que se realicen en el grupo NePhoS.

Inicialmente, en la tabla 5.5 se puede ver el desglose de los costos asociados al desarrollo del proyecto. Estos gastos incluyen el costo de la computadora que se utilizó para el desarrollo de la herramienta diseñada, requerida para poder trabajar en la programación de esta. Por otro lado, también se incluyeron costos asociados con el uso de horas para el trabajo realizado. Los servicios generales se refieren al costo de alquiler, donde se trabajó junto con servicios básicos como internet y electricidad junto con otros imprevistos. La mano de obra, se calculó basándose en 16 semanas de trabajo y el salario mínimo establecido por el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA) [59]. Brindando un total para el desarrollo del proyecto de 7 200 €, aproximadamente 4.02 millones de colones al tipo de cambio de febrero del 2024 [60].

Tabla 5.5: Tabla de costos asociados al desarrollo del proyecto.

Recurso	Descripción	Costo (€)	Cantidad	Subtotal (CRC)
Computadora	Alto rendimiento	900	1	900
Python y librerías asociadas	Software de programación	0	N/A	0
Mano de obra	Ingeniero, mensual	1 125	4	4500
Servicios generales	Mensual	450	4	1 800
Total				7 200

Aparte del costo de desarrollo del proyecto, es importante cuantificar cuánto cuesta

hacer los dispositivos DBR por parte del laboratorio NePhoS. Para esto se analizó el costo de las herramientas principales que utilizan para manufacturar las muestras y las horas de técnico asociadas para hacer un DBR. De esta manera se puede calcular el costo asociado a una sola muestra, esto se puede observar en la tabla 5.6. El costo total para manufacturar una muestra es de 329.66€.

El cálculo del costo mensual (C) de las herramientas y maquinas se hizo mediante el método de amortización lineal consiste en distribuir el costo total de un activo de manera uniforme a lo largo de su vida útil. Para hacerlo, se resta el valor residual (R ; el valor estimado que tendrá el activo al final de su vida útil) del valor inicial (I ; el costo de adquisición del activo), y luego se divide ese resultado por el número total de meses durante los cuales se espera utilizar el activo [61]. De esta manera, se obtiene un costo fijo mensual que refleja la depreciación del activo a lo largo del tiempo, esto se muestra en la ecuación (5.1). En el caso de las herramientas utilizadas se va a aproximar a un valor residual de 0.

$$C_m = \frac{I - R}{12} \quad (5.1)$$

La vida útil de un ordenador HP en promedio es entre 5 a 8 años, dependiendo la gama del dispositivo [62], debido a que el que se utiliza en el laboratorio NePhoS se puede considerar gama media-baja, se va a tomar el valor mínimo de 5 años. El cooler, en específico utilizado por el laboratorio, no indica la vida útil, pero otros coolers similares para uso de laboratorio con costo similar tienen una vida útil aproximada de 15- 20 años [63]. Por otro lado, una fuente de alimentación similar más moderna indica una vida útil de 2 años de uso continuo [64], en aproximado se utiliza la mitad del día, por lo que la vida útil se va a evaluar como 4 años. Por último, los multímetros Agilent tienen un aproximado de 40 años [65], a partir de toda esta información se pudo calcular el costo amortizado de las herramientas y máquinas utilizadas para el desarrollo de una muestra DBR, en base a 22 horas de técnico por cada muestra, como se muestra en la ecuación (5.2).

$$C_h = C_m * \frac{22}{720} \approx 3\% * C_m \quad (5.2)$$

En la cual el 22 se refiere a la cantidad de horas promedio por muestra, y el 720 la cantidad de horas en un mes.

Tabla 5.6: Tabla de costos asociados a la manufactura de una muestra DBR.

Costo de una muestra DBR				
Recurso	Descripción	Costo (€)	Cantidad	Valor amortizado (€)
Cooler Thermo Scientific	Vida útil: 17.5 años	5 000	1	0.72
Fuente de alimentación Keithley	Vida útil: 4 años	5 300	1	3.31
Multímetros Agilent	Vida útil: 40 años	5 000	2	0.63
Ordenador HP	Vida útil: 5 años	800	1	0.40
Placa de aluminio	Precio fijo por muestra	2.6	1	2.6
Materiales adicionales	Costo aproximado por muestra	10	N/A	10
Horas de técnico	Horas promedio por muestra	14.2	22	312
Total				329.66

La implementación del software de simulación promete un impacto económico considerable al reducir el número de muestras físicas necesarias durante la fase de investigación. Según lo informado por el laboratorio, cada dispositivo requeriría de 8 a 12 muestras para su evaluación dependiendo de la precisión que tenga el investigador sin el uso de una herramienta de simulación. Con la herramienta de simulación, se estima un ahorro significativo al reducir este número considerablemente, ya que no necesitarían múltiples muestras para manufacturar un solo dispositivo. Dado que anualmente se producen aproximadamente 50 muestras por investigador, con 3-4 investigadores activos, esto genera un mayor ahorro en proporción a la cantidad de investigadores activos. Este ahorro se traduce no solo en términos de costos de materiales y tiempo de técnico, sino también en un menor desgaste de equipos y optimización del tiempo de investigación.

A partir de esta información proporcionada significa que por cada dispositivo manufacturado se ahorrarían aproximadamente 7 muestras. Por lo tanto, de cada investigador que hace 50 muestras, esto se puede reducir considerablemente a aproximadamente 7 muestras. Esto indica que se ahorrarían 43 muestras en promedio por investigador, y esto se incrementa por la cantidad de investigadores activos. Un total de 14 175€ ahorrados por la reducción de muestras manufacturadas por año, en el caso de tener un solo investigador activo.

El retorno de inversión (ROI) se calcula considerando el ahorro en horas de investigación y la reducción en la producción de muestras. La inversión inicial y los costos operativos se compensan rápidamente con los ahorros generados por la eficiencia mejorada y la reducción de costos directos en el desarrollo de muestras. El tiempo necesario para recuperar la inversión inicial, de 7 200 €, se recuperaría en aproximadamente 6.2 meses, ya que el ahorro mensual sería de aproximadamente 1 150 €. La herramienta no solo ofrece beneficios económicos directos, sino que también facilita una mayor productividad y contribuciones científicas significativas al campo de los filtros ópticos DBR.

5.4 Consideraciones adicionales

Aunque el software en sí no tiene un impacto directo, la implementación de filtros Distributed Bragg Reflector en diversas aplicaciones tecnológicas tiene un impacto ambiental y social notable. Este avance en términos de eficiencia y rendimiento en dispositivos ópticos es algo necesario de considerar. Por otro lado también es importante mencionar las consideraciones necesarias para el cumplimiento de normativas legales y técnicas para softwares. A continuación, se detallan algunos de estos aspectos clave.

Los filtros DBR se destacan por su capacidad para reflejar selectivamente ciertas longitudes de onda, mientras permiten el paso de otras, como se mencionó en la sección 2.4. Esta propiedad lo hace un componente importante para mejorar la eficiencia energética en dispositivos como sensores, láseres y sistemas de telecomunicaciones. Los filtros DBR pueden contribuir significativamente a la creación de dispositivos fotónicos más eficientes y menos demandantes en términos de energía, [66]. Esta optimización del consumo energético tiene un impacto directo en la reducción de la huella de carbono asociada a la tecnología.

El desarrollo y la implementación de tecnologías basadas en filtros DBR deben considerar el cumplimiento de normativas legales y técnicas relevantes a nivel nacional e internacional. Ya que este proyecto se basa en un software diseñado para el uso exclusivo de un laboratorio de investigación, no es necesario el cumplimiento de normas relacionadas con la comercialización de software. Esto incluye la protección de datos personales y el respeto a los derechos de autor, aspectos fundamentales para garantizar la seguridad de la información y la integridad de la propiedad intelectual, incluso en entornos no comerciales.

La norma ISO/IEC 27001 se destaca como una guía internacional para la gestión de la seguridad de la información. Esta norma puede ayudar a proteger los datos personales manipulados durante la investigación, asegurando la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información [67]. En el caso de la solución diseñada, esta funciona de manera totalmente local, es decir, no está conectada al internet. Por lo tanto, todos los datos utilizados y generados se almacenan directamente en la computadora utilizada y no son compartidos de ninguna manera.

En el contexto del desarrollo de software fue para el Tecnológico de Costa Rica (TEC) y el grupo NePhoS, que no posee derechos de autor y no será distribuido fuera de estas entidades, la gestión de los derechos de autor se orienta hacia la protección de la propiedad intelectual generada sin la intención de ejercer restricciones comerciales. La adopción de principios de licenciamiento flexibles, como los propuestos por Creative Commons (CC), permite un manejo ético de la propiedad intelectual sin restringir el flujo de conocimiento y colaboración [68]. El contenido propio del software no incluye ninguna propiedad intelectual, todas las imágenes y visuales fueron desarrolladas manualmente y las librerías utilizadas son open source.

Capítulo 6

Conclusiones

La realización de este proyecto ha permitido el diseño y la implementación de una herramienta computacional para la simulación de filtros ópticos de Distributed Bragg Reflector, alcanzando el objetivo general de modelar y comparar los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos. Esta herramienta se ha convertido en un recurso para el análisis profundo y la mejora de los filtros ópticos DBR, ofreciendo a los investigadores y diseñadores la capacidad de evaluar de manera efectiva sus propiedades y eficacia en diversas condiciones. La base de la simulación se apoyó en el método de Transfer Matrix Method, garantizando modelos computacionales de alta exactitud y fiabilidad. A través de la estrategia metodológica empleada, se facilitó una validación rigurosa de los resultados simulados.

A través de un meticuloso proceso de entrevistas y análisis junto al cliente, se logró identificar las necesidades de la herramienta de modelado, y su posterior traducción a especificaciones y métricas cuantificables, resumidas en la tabla de especificaciones y métricas 3.2. La obtención correcta de estas y su análisis fueron fundamental para el desarrollo exitoso de este proyecto, ya que permitieron diseñar una solución que no solo cumple, sino que supera las expectativas del grupo NePhoS.

La solución desarrollada permite el modelado de los espectros transmitidos, reflejados y absorbidos para diferentes configuraciones de filtros DBR. Mediante el uso de Transfer Matrix Method se logró hacer la simulación y análisis de espectros ópticos que funcionan para diferentes construcciones de dispositivos ópticos. Permitiendo al usuario configurar capas, seleccionar materiales, ajustar longitudes de onda y definir el ángulo de incidencia de la luz, lo que proporciona un modelo detallado y adaptable de dispositivos ópticos.

Se logró desarrollar una interfaz gráfica que permitió mejorar la experiencia del usuario y facilitar el análisis comparativo de resultados simulados frente a conjuntos de medidas experimentales. Implementada con el uso de librerías como Tkinter y Matplotlib, esta GUI permite a los usuarios especificar parámetros, y visualizar de manera gráfica los resultados de simulaciones, así como comparar estos con datos experimentales. Esta permite una comparación y análisis eficaces de los resultados obtenidos a través de la

herramienta.

Con el objetivo de asegurar una transición suave y eficiente hacia la adopción del nuevo software por parte del laboratorio NePhoS, se desarrolló y entregó una documentación comprensiva, la cual incluye instrucciones detalladas que guían a los usuarios a través del proceso de instalación y configuración del software en sus sistemas. Este conjunto de documentos se complementa con un manual exhaustivo que no solo facilita la comprensión y el uso efectivo de todas las funcionalidades de la herramienta, sino que también detalla las limitaciones inherentes al software, proporcionando así una visión completa de sus capacidades. El manual de usuario también posee descripciones claras de la función de cada botón en la interfaz gráfica, asegurando que los usuarios puedan aprovechar al máximo las capacidades del software sin necesidad de asistencia adicional.

Se validó la exactitud y confiabilidad de la herramienta de simulación mediante tres pruebas principales. A partir de la verificación del tiempo de simulación promedio de la herramienta, se cumplió con las especificaciones de rendimiento, ya que en los casos más extremos, se obtuvo un tiempo de 31.8 segundos. Este tiempo fue en el caso de una simulación con parámetros más extremos que los que se van a utilizar en su uso promedio. Por otro lado, en la verificación de confiabilidad se confirmaron a través de pruebas exhaustivas, demostrando un robusto sistema de detección y notificación de errores. Estas características aseguran la prevención de la propagación de resultados incorrectos y facilitan que los usuarios corrijan eficazmente los errores, subrayando la fortaleza del software en el manejo de situaciones anómalas.

En el caso de la validación con datos experimentales se tenía un número limitado de sets de datos experimentales el cual tenía el problema de que de estos no se conocían las siguientes características: el valor de índice de refracción exacto, el ángulo de incidencia de la luz y el espesor exacto de cada capa. Se intentó reconstruir el espectro a partir de los datos disponibles, y se logró un resultado de un porcentaje de error del 17.88% para el primer set de datos, ligeramente por encima del 15% de la métrica. Este resultado destaca la utilidad práctica del software en la aproximación de características ópticas bajo condiciones de información limitada. Sin embargo, en el caso del segundo set de datos, donde se identificó un error del 31.81%, es importante reconocer que este valor es considerablemente más alto que el observado anteriormente. Aunque es un error más alto, y no cumple con las métricas, se necesita una muestra más grande de datos experimentales para confirmar si la herramienta posee una falta de exactitud.

El análisis económico del desarrollo de la herramienta de simulación para el laboratorio NePhoS revela una inversión inicial de 7 790 USD, que se justifica por el considerable ahorro anual de aproximadamente 14 175 euros, incluso con un solo investigador activo. Este ahorro surge de la reducción en la producción de muestras físicas necesarias para la investigación de dispositivos DBR, pasando de un promedio de 50 a solo 7 muestras por investigador al año. La eficiencia mejorada y la optimización de recursos se traducen en un retorno de inversión (ROI) que se estima recuperar en solo 6.2 meses, considerando el ahorro mensual de 1 275 USD. Este resultado cuantitativo subraya no solo la viabili-

dad económica de la herramienta, sino también su impacto positivo en la eficiencia de la investigación y el desarrollo dentro del laboratorio NePhoS.

6.1 Recomendaciones y trabajo a futuro

La principal recomendación del proyecto sería tener una mayor cantidad de set de datos experimentales para realizar más pruebas de exactitud. En conjunto con esto, es importante tener información completa de los dispositivos experimentales, para obtener una comparación más correcta entre datos simulados y experimentales. Este enfoque no solo mejorará la validación de la herramienta de simulación, sino que también facilitará ajustes más precisos en la modelización, permitiendo así optimizaciones significativas en el diseño.

Para el trabajo a futuro se recomienda lo siguiente:

- Ampliación de la base de datos de índices de refracción para incluir más materiales.
- Algoritmos de optimización para automatizar la selección de parámetros óptimos.
- Simular una gama más amplia de estructuras ópticas.

Las mejoras propuestas en los tres puntos anteriores permitirían enriquecer las simulaciones, aumentarían la exactitud de los modelos y facilitarían la tarea de diseño y experimentación. Por último, ampliar la capacidad del software ayudaría a abordar desafíos de investigación más complejos, abriendo nuevas vías de exploración en el campo de la óptica y fotónica.

Bibliografía

- [1] F. BBVA. (2023) Informe u-ranking. [Online]. Available: <https://www.u-ranking.es/informe>
- [2] L. Marsal, “Nanoelectronic and photonic systems (nepfos),” 2017. [Online]. Available: <https://www.urv.cat/html/grupsrecerca/reconeguts/equip-G763.php>
- [3] R. Paschotta. (2020) Bragg mirrors. [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html
- [4] H. Yoshinaga, J.-i. Hashimoto, H. Mori, Y. Tsuji, M. Shiozaki, M. Murata, M. Ekawa, Y. Iguchi, and T. Katsuyama, “Mid-infrared quantum cascade laser integrated with $\lambda/4$ -thick distributed bragg reflector (dbr),” *ISLC*, pp. 1–2, 2016.
- [5] S. O’Connor, M. A. Bernacil, and D. Derickson, “Generation of high speed, linear wavelength sweeps using sampled grating distributed bragg reflector lasers,” *LEOS*, pp. 147–148, 2008.
- [6] Z. P. Ling, T. Mueller, A. G. Aberle, and R. Stangl, “Development of a conductive distributed bragg reflector for heterojunction solar cells using n -doped microcrystalline silicon and aluminum-doped zinc oxide films,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1320–1325, 2014.
- [7] X. Sheng, J. Liu, N. Coronel, A. M. Agarwal, J. Michel, and L. C. Kimerling, “Integration of self-assembled porous alumina and distributed bragg reflector for light trapping in si photovoltaic devices,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 18, pp. 1394–1396, 2010.
- [8] R. Faulks, M. Evans, H. Page, S. Malik, I. Gregory, I. Farrer, D. Ritchie, and M. Pepper, “Enhanced terahertz receiver using a distributed bragg reflector coupled to a photoconductive antenna,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 21, pp. 1603–1605, 2009.
- [9] E. Hecht, *Optics*. Pearson Education, 2017.
- [10] F. Smith, T. King, and D. Wilkins, *Optics and Photonics: An Introduction*. Wiley, 2007.
- [11] F. Jenkins and H. White, *Fundamentals of Optics*. McGraw-Hill Science, 2001.

- [12] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. Wiley-Blackwell, 2019.
- [13] E. W. Max Born, *Principles of Optics: 60th Anniversary Edition*, 7th ed. Cambridge University Press, 2019. [Online]. Available: libgen.li/file.php?md5=8460834d8d0613114c1e5b8649d5ec87
- [14] H. Mohamad, “Development of the differential method associated with the fast fourier factorization for the modelization of photonic device : from complex optical diffraction grating to guided integrated optic structure,” -, 10 2020.
- [15] R. Paschotta, “Fresnel equations,” *RP Photonics Encyclopedia*, 2008. [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/fresnel_equations.html
- [16] G. Lifante, *Integrated photonics: Fundamentals*. John Wiley & Sons, 2003.
- [17] E. X. Pérez, M. G. L. F., and P. J. Marzal, *Design, fabrication and characterization of porous silicon multilayer optical devices*. URV, 2007.
- [18] P. Yeh, *Optical waves in layered media*. Wiley, 2005.
- [19] A. Lakhtakia and T. G. Mackay, *The transfer-matrix method in electromagnetics and Optics*. Morgan & Claypool Publishers, 2020.
- [20] R. B. BALILI, “Transfer matrix method in nanophotonics,” *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 17, p. 159–168, Jan. 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1142/S2010194512008057>
- [21] T. Zhan, X. Shi, Y. Dai, X. Liu, and J. Zi, “Transfer matrix method for optics in graphene layers,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 25, no. 21, p. 215301, apr 2013. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/25/21/215301>
- [22] A. Taflove and S. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House, 2005.
- [23] Y.-C. Chiang, Y.-P. Chiou, and H.-C. Chang, “Improved finite-difference frequency-domain scheme for the analysis of 2-d photonic crystals,” *MTT-S*, pp. 1951–1954, 2007.
- [24] —, “Finite-difference frequency-domain analysis of 2-d photonic crystals with curved dielectric interfaces,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 8, pp. 971–976, 2008.
- [25] K. Inoue and K. Ohtaka, *Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications*, ser. Springer Series in Optical Sciences. Springer Berlin Heidelberg, 2004. [Online]. Available: <https://books.google.co.cr/books?id=GIa3HRgPYhAC>
- [26] S. Guo and S. Albin, “Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations,” *Opt. Express*, vol. 11, no. 2, pp. 167–175, Jan 2003. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-11-2-167>

- [27] Y.-C. Lee, Y.-Y. Chou, and C.-C. Chang, “Performance analysis of reflection reduction in submicrometer structures using rigorous coupled wave analysis,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1–6, 2013.
- [28] J. Jarem, “A rigorous coupled-wave analysis and crossed-diffraction grating analysis of radiation and scattering from three-dimensional inhomogeneous objects,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 5, pp. 740–741, 1998.
- [29] J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, and R. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light - Second Edition*. Princeton University Press, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.co.cr/books?id=owhE36qiTP8C>
- [30] C. Alleyne and A. Kirk, “Transmission uniformity of diffractive parallel optical interconnect relays: a numerical analysis based on rigorous coupled wave theory,” in *The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, vol. 2, 2002, pp. 901–902 vol.2.
- [31] R. Rumpf, “Computational electromagnetics,” Lecture Notes, 2019. [Online]. Available: <https://empossible.net/academics/emp5337/>
- [32] W. Huang, C. Xu, S. Chu, and S. Chaudhuri, “A vector beam propagation method for guided-wave optics,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 10, pp. 910–913, 1991.
- [33] Q. Y. Lu, W. H. Guo, R. Phelan, D. Byrne, J. F. Donegan, P. Lambkin, and B. Corbett, “Analysis of slot characteristics in slotted single-mode semiconductor lasers using the 2-d scattering matrix method,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 24, pp. 2605–2607, 2006.
- [34] L. Pavesi, “Porous silicon dielectric multilayers and microcavities,” *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 20, no. 10, p. 1–76, 1997.
- [35] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mašanović, *Diode lasers and photonic integrated circuits*. Wiley, 2012.
- [36] A. Chaudhary and I. S. M. N., *Computational Health Informatics for Biomedical Applications*. Apple Academic Press, 2023.
- [37] P. Michler, *Single Quantum Dots: Fundamentals, applications and New Concepts*. Springer, 2011.
- [38] K. T. U. y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 5th ed. Mc Graw-Hill, 2013.
- [39] Python. (2021) What is python? executive summary. [Online]. Available: <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>
- [40] FullStack. (2022) Companies using python. [Online]. Available: <https://www.fullstackpython.com/companies-using-python.html>

- [41] BairesDev. (2022) Software development with python, how good is it? [Online]. Available: <https://www.bairesdev.com/blog/is-python-good-for-software-development/>
- [42] P. P. Authority. (2023) Pypa goals. [Online]. Available: <https://www.pypa.io/en/latest/future/>
- [43] Coursera. (2023) What is python used for? a beginner's guide. [Online]. Available: <https://www.coursera.org/articles/what-is-python-used-for-a-beginners-guide-to-using-python>
- [44] NumPy. (2022) What is numpy? [Online]. Available: <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>
- [45] ——. (2022) Scalars. [Online]. Available: <https://numpy.org/doc/stable/reference/arrays.scalars.html>
- [46] Python. (2022) Tkinter wiki. [Online]. Available: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>
- [47] pandas. (2024) About pandas. [Online]. Available: <https://pandas.pydata.org/about/>
- [48] Matplotlib. (2024) Matplotlib: Visualization with python. [Online]. Available: <https://matplotlib.org/>
- [49] CodersLegacy. (2022) Figurecanvastkagg with matplotlib and tkinter. [Online]. Available: <https://coderslegacy.com/figurecanvastkagg-matplotlib-tkinter/>
- [50] SciPy. (2024) Scipy: Fundamental algorithms for scientific computing in python. [Online]. Available: <https://scipy.org/>
- [51] SciPyManual. (2024) Scipy: Interpolation (scipy.interpolate). [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/interpolate.html>
- [52] Python. (2024) csv — csv file reading and writing. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/csv.html>
- [53] PythonStandardLibrary. (2024) os — miscellaneous operating system interfaces. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/os.html>
- [54] IEEE, “Ieee standard for floating-point arithmetic,” *IEEE Std 754-2019 (Revision of IEEE 754-2008)*, pp. 1–84, 2019.
- [55] E. Xifré Pérez, T. Trifonov, J. Pallarès, and L. F. Marsal, “One-dimensional porous silicon photonic crystals for visible and nir applications,” *physica status solidi (c)*, vol. 2, no. 9, p. 3466–3470, Jun. 2005. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200461222>
- [56] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*. Acad. Press, 2003.

- [57] I. Ivanov, V. Skryshevsky, and A. Belarouci, “Engineering porous silicon-based microcavity for chemical sensing,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 23, p. 21265–21276, Jun. 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.3c02526>
- [58] D. Keskar, S. Survase, and M. Thakurdesai, “Designing of distributed bragg reflector (dbr) by transfer matrix method,” in *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2021, pp. 1–3.
- [59] C. F. de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2024) Hora profesional y salarios mínimos. [Online]. Available: <https://cfia.or.cr/descargas/2020/dep/hora-profesional.pdf>
- [60] B. C. de Costa Rica. (2024) Tipo cambio de compra y de venta del dólar de los estados unidos de américa. [Online]. Available: <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20400>
- [61] S. B. One. (2014) Método lineal. [Online]. Available: https://help.sap.com/docs/SAP_BUSINESS_ONE/68a2e87fb29941b5bf959a184d9c6727/45ff591fe19134dde1000000a1553f7.html?locale=es-CO
- [62] HP. (2022) What is the average lifespan of a computer? [Online]. Available: <https://www.hp.com/in-en/shop/tech-takes/post/average-computer-lifespan#:~:text=Every%20situation%20is%20different%2C%20but,life%20out%20of%20their%20machine.>
- [63] FacilitiesNet. (2019) Properly diagnosing chiller life cycles. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/2ed4beb5d485230264c3e150e7240f91/34450-90004.pdf>
- [64] Keithley. (2023) Keithley 2306-pj datasheet. [Online]. Available: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/KEITHLEY-2306-PJ-Datasheet.pdf>
- [65] Agilent. (2012) Agilent 34450a multímetro de 5 $\frac{1}{2}$ dígitos. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/2ed4beb5d485230264c3e150e7240f91/34450-90004.pdf>
- [66] B. Liu, Y.-F. Liu, S.-J. Li, and X.-D. He, “High efficiency all-optical diode based on photonic crystal waveguide,” *Optics Communications*, vol. 368, pp. 7–11, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401816300803>
- [67] ISO Central Secretary, “Information security, cybersecurity and privacy protection,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, Standard ISO/IEC 27001:2022, 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/27001>
- [68] CreativeCommons. (2024) Cc by-sa 4.0 deed. [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

-
- [69] Python. (2022) Configuración y uso de python. [Online]. Available: <https://docs.python.org/es/3/using/windows.html>
- [70] ——. (2024) Instalando módulos de python. [Online]. Available: <https://docs.python.org/es/3/installing/index.html>

Apéndice A

Manual de Usuario

A.1 Instalación

Esta guía está diseñada para ayudarlo a instalar la herramienta de simulación de DBR en su computadora de manera rápida y eficiente. El software fue analizado y probado en computadoras con sistema operativo Windows 10 y Windows 11, por lo tanto, no se asegura su funcionalidad en Linux y/o MacOS.

Para descargar el software, haga clic en el siguiente link:

[Descargar DBR_TMM.exe](#)

Acá se le permitirá descargar el ejecutable del software. Para abrir el software, solo es necesario hacerle doble clic al ejecutable. La primera vez que se abre el ejecutable, va a proceder a instalar todas las librerías de Python necesarias para el uso de este software. Seguidamente, cuando se termine la instalación inicial, se va a abrir la interfaz gráfica.

También se provee la alternativa de tener el código fuente directamente en Python a continuación:

[Descargar código fuente DBR_TMM](#)

En el caso de solo usar el código, es necesario hacer la instalación de Python y todas las librerías utilizadas en ambos códigos. Para esto es recomendado el uso de un usuario experimentado en programación en Python. A continuación se pueden observar dos guías directamente de la documentación de Python que permiten hacer lo mencionado anteriormente:

<https://docs.python.org/es/3/using/windows.html> [69]

<https://docs.python.org/es/3/installing/index.html> [70]

En el caso de cualquier error o para asistencia adicional, se puede poner en contacto por e-mail a: gonzalo.perez12@outlook.com

A.2 Guía de Uso

A.2.1 Simulación Paso a Paso

Para la simulación inicial:

1. Rellenar datos de rango y resolución de longitudes de onda para la simulación (números racionales positivos):

Longitudes de Onda

400 nm - 3000 nm

Paso (nm): 2.5

2. Rellenar datos de las capas exteriores al dispositivo DBR (números racionales positivos):

Índices de Refracción

Ambiente (n_0) 1

Sustrato (n_s) 1

3. Rellenar datos de la caracterización del dispositivo DBR (números racionales positivos):

Características del DBR (i) Esquema

Capa 1

Índice refracción (n_r) 2.5 + 0 j Otros materiales... ▾

Espesor de capa (nm) 176

Capa 2

Índice refracción (n_l) 1.55 + 0 j Otros materiales... ▾

Espesor de capa (nm) 264

Número de periodos (N): 25 Ángulo Incidencia (°): 20

- 3.1. En el caso de que quiera utilizar materiales con valores de índice de refracción variable, se puede seleccionar en la siguiente sección:



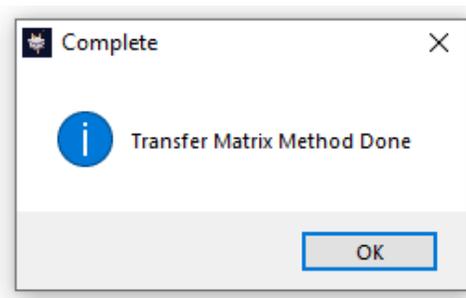
4. Finalmente, para hacer el cálculo de espectros, hacer clic en el botón de "Calcular":

A screenshot of the DBR configuration interface. It consists of several panels:

- Índices de Refracción:** Ambiente (n_o): 1, Sustrato (n_s): 1.
- Longitudes de Onda:** 400 nm - 3000 nm, Paso (nm): 2.5.
- Características del DBR:** Includes an "Esquema" icon and settings for two layers:
 - Capa 1:** Índice refracción (n_{1r}): 2.5 + 0j, Espesor de capa (nm): 176.
 - Capa 2:** Índice refracción (n_{2r}): 1.55 + 0j, Espesor de capa (nm): 264.
- Other parameters:** Número de periodos (N): 25, Ángulo Incidencia ($^\circ$): 20.

At the bottom, a large blue button labeled "Calcular" is highlighted with a red rectangular border.

5. Este cálculo puede tardar más tiempo dependiendo de la configuración de la simulación. El software informa cuando se terminó el cálculo mediante este mensaje:



Después de haber hecho el cálculo, ya será posible graficar los resultados. Estos van a ser mostrados en la sección derecha de la interfaz gráfica. La zona donde se puede seleccionar qué resultados desea graficar es la siguiente:

Resultados Gráficos

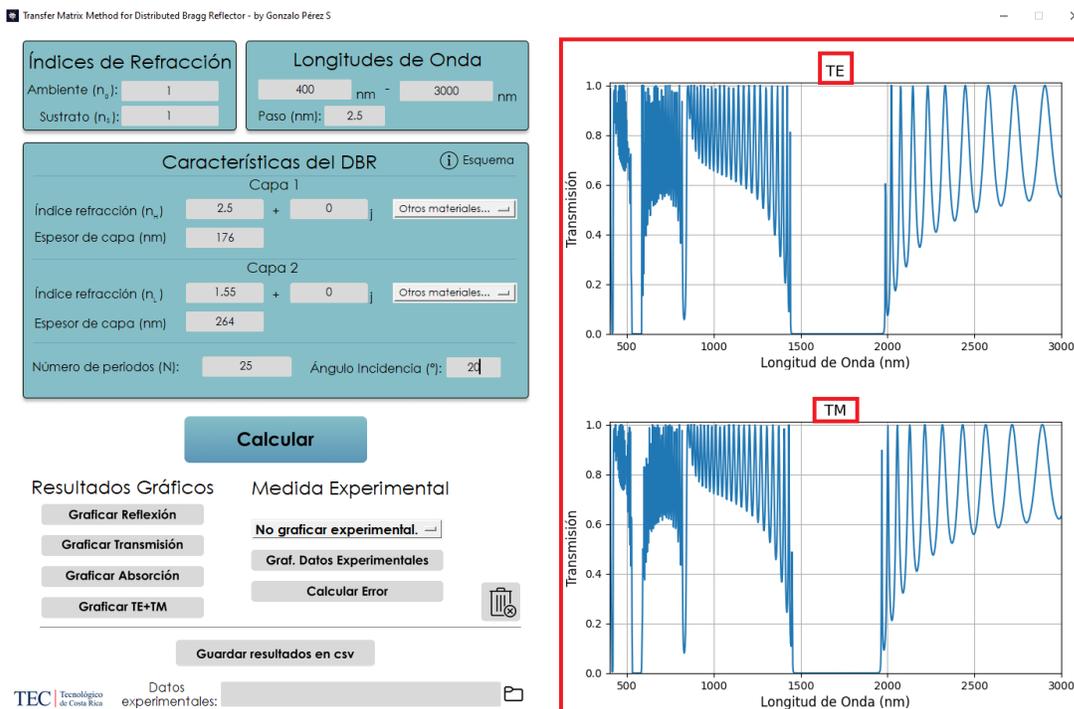
Graficar Reflexión

Graficar Transmisión

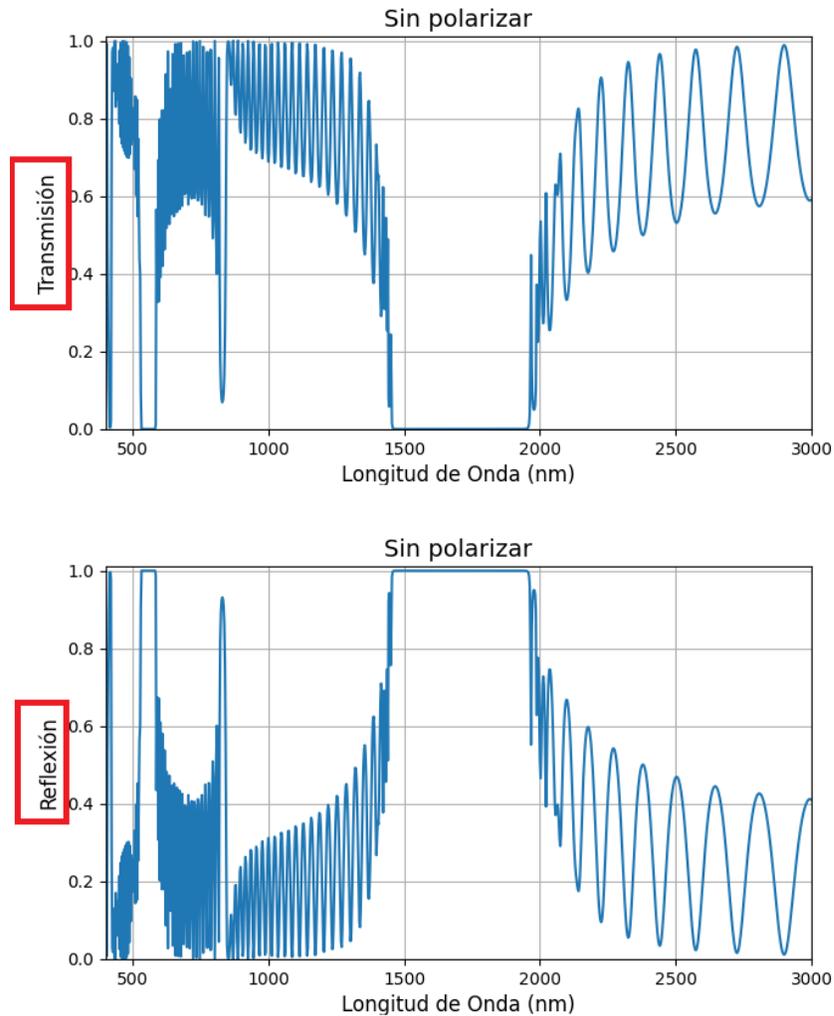
Graficar Absorción

Graficar TE+TM

Al hacer clic en cualquiera de los espectros que desee graficar, se van a mostrar cómo se muestra a continuación:

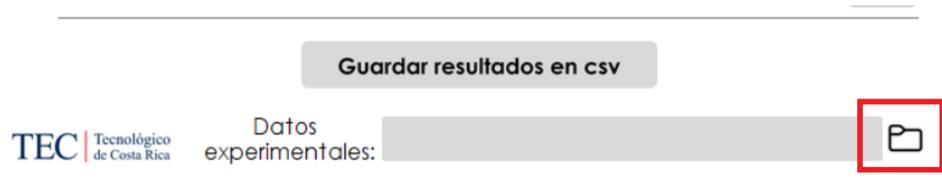


Como se puede observar, siempre se va a tener la gráfica TE encima de la TM para poder hacer un análisis directo. En el caso del espectro TE+TM se van a graficar ambos, reflexión y transmisión a la vez:



A.2.2 Implementación de datos experimentales

Inicialmente, para utilizar datos experimentales es necesario importar los datos. En la sección inferior de la interfaz gráfica se puede hacer clic en el botón de la carpeta para abrir el explorador de archivos y poder seleccionar los datos experimentales. Se muestra a continuación:



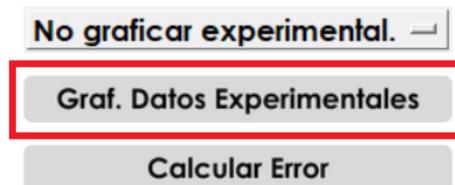
Es de alta importancia denotar que los datos experimentales que se pueden importar solo es permitido que tengan formato CSV. Además el contenido tiene que ser de forma "nm,%E" con *E* siendo el espectro a graficar, siendo un valor entre 0 y 100%. Cuando se carga un archivo experimental, el software abrirá una ventana con información de este,

como por ejemplo:



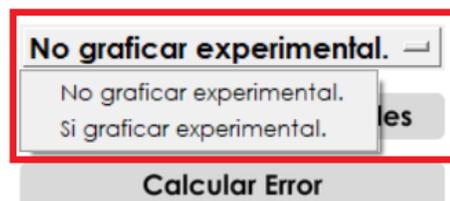
Para poder graficar estos datos, en la sección de medida experimental se puede hacer clic en el botón de "Graf. Datos Experimentales":

Medida Experimental



Por otro lado, hay un menú desplegable con dos opciones encima del botón de graficar, con las opciones "No graficar experimental" y "Si graficar experimental". Este menú permite seleccionar si se quiere graficar los datos experimentales y actualizar la gráfica simulada cada vez que se hace clic en el botón de simular. Es decir, en el caso de querer hacer ajustes y poder observar de manera rápida el cambio.

Medida Experimental



Es muy importante mencionar que la única manera de que grafique los datos simulados y experimentales de manera simultánea es utilizando el mismo rango de longitudes de onda y paso o resolución. La última función para datos experimentales es el botón para calcular el error, el cual es el siguiente:

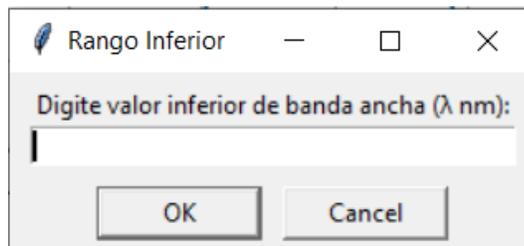
Medida Experimental

No graficar experimental. ↩

Graf. Datos Experimentales

Calcular Error

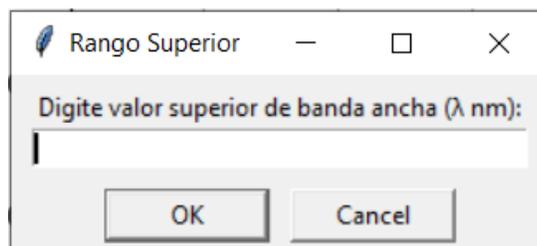
Este solicita al usuario el ancho de banda que se esté estudiando en este caso mediante dos ventanas emergentes, como se muestra a continuación:



Rango Inferior

Digite valor inferior de banda ancha (λ nm):

OK Cancel

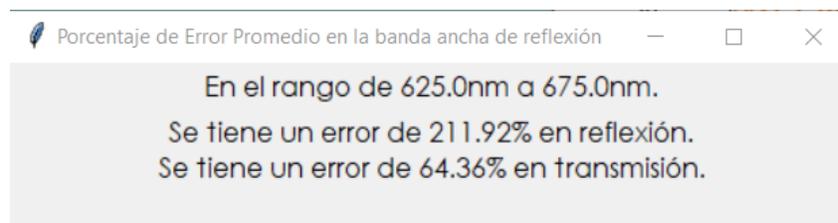


Rango Superior

Digite valor superior de banda ancha (λ nm):

OK Cancel

Finalmente, la interfaz gráfica muestra el ancho de banda digitado y el error que se tiene para el caso de reflexión y transmisión, como se muestra en el siguiente ejemplo:



Porcentaje de Error Promedio en la banda ancha de reflexión

En el rango de 625.0nm a 675.0nm.
Se tiene un error de 211.92% en reflexión.
Se tiene un error de 64.36% en transmisión.

A.2.3 Funciones Adicionales

Además de todo lo anterior existen un par de funciones que tienen como intención mejorar la experiencia del usuario las cuales son un botón de información el cual permite ver una imagen informativa de como se organiza la estructura o esquema del DBR de

acuerdo con la nomenclatura utilizada, y este botón se encuentra donde indica la siguiente imagen:

Por otro lado, también se tiene un botón para limpiar la zona de las gráficas en caso de querer tener esa zona sin mostrar datos. Para poder usar esta función es necesario hacer clic en el botón:

Por último, también está la opción de guardar los datos simulados a un archivo CSV, esto se puede hacer dándole clic al botón de "Guardar resultados en csv".

Esta función guarda los archivos simulados, calculados mediante Transfer Matrix Method en formato CSV. El archivo de salida tiene las siguientes columnas: Longitud de Onda, Reflexión TM, Transmisión TM, Absorción TM, Reflexión TE, Transmisión TE y Absorción TE.

Si se utiliza el código fuente, es posible implementar más materiales simplemente mediante dos pasos directamente en el código. Primero, es necesario agregar el nombre del material a la lista de materiales, y el segundo paso es agregar un string que contenga los valores del material en tres columnas en el siguiente orden: longitud de onda (ángstrom), índice de refracción y coeficiente de extinción. Esto sería en la sección final del script de funciones de TMM.