

Metodología para el diseño de filtros ópticos Bragg UV-Vis Methodology for the design of UV-Vis Bragg optical filters

B. Canales-Pacheco ^{a*,b}, B. Reyes-Ramírez ^c, E. Rueda-Soriano ^d, L. A. Ruiz-Aguilar ^{a,b}

^a Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense, 43200, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México.

^b Cuerpo Académico de Tecnología de Información y Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense, 43200, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México.

^c Coordinación de Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 72840, San Andrés Cholula, Puebla, México.

^d Área Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México

Resumen

Este trabajo presenta una metodología computacional integral para el diseño de filtros ópticos multicapa tipo Bragg en la región UV-Visible (UV-Vis). La propuesta combina el modelado espectral de materiales dispersivos mediante ecuaciones de Sellmeier, la simulación óptica con el método de matrices de transferencia (TMM), y un proceso de optimización espectral basado en mínimos cuadrados. Asimismo, se incorpora un análisis de tolerancia estructural utilizando simulaciones Monte Carlo para evaluar la robustez del diseño ante variaciones típicas de fabricación. La metodología se implementó completamente en lenguaje Python, empleando bibliotecas científicas de código abierto que garantizan su reproducibilidad y escalabilidad. Los resultados validan la eficiencia del enfoque, al lograr filtros con alta selectividad espectral en el UV y buena tolerancia a errores de espesor, lo que demuestra su aplicabilidad en el desarrollo de recubrimientos ópticos funcionales y dispositivos selectivos.

Palabras Clave: Filtros ópticos, Estructuras Bragg, Simulación óptica, Materiales dispersivos, UV-Vis.

Abstract

This paper presents a structured methodology for designing UV-Vis Bragg optical filters using computational tools. The method includes the spectral modeling of dispersive materials through Sellmeier equations, simulation via the Transfer Matrix Method (TMM), and layer thickness optimization using a least-squares algorithm. To assess fabrication feasibility, a Monte Carlo-based tolerance analysis was conducted by introducing random variations in layer thicknesses. All simulations were performed in Python using open-source scientific libraries to ensure reproducibility. The proposed methodology led to high UV reflectance, low visible reflectance, and strong structural tolerance, making it suitable for the development of selective optical coatings and photonic devices.

Keywords: Optical filters, Bragg structures, Optical simulation, Dispersive materials, UV-Vis.

1. Introducción

La radiación ultravioleta (UV) induce procesos de fotodegradación en materiales ópticos y polímeros, causando pérdida de transparencia, fragilidad y deterioro funcional en dispositivos expuestos, tales como lentes, sensores y recubrimientos ópticos (Yousif & Haddad, 2014; Al-Syouri et al., 2021). En consecuencia, ha aumentado la demanda de filtros ópticos selectivos en la región UV-Visible (UV-Vis), con aplicaciones en óptica oftálmica, protección ambiental, pantallas electrónicas y tecnologías fotónicas emergentes (Hobson et al., 2025; Lizcano et al., 2024).

Una solución eficaz la ofrecen las estructuras multicapa tipo Bragg, que aprovechan la interferencia constructiva y destructiva entre capas dieléctricas alternadas para controlar selectivamente la reflectancia espectral (Macleod, 2010; Yeh, 1988). Estas estructuras pueden diseñarse para reflejar la radiación UV mientras transmiten luz visible, lo cual es útil en sistemas ópticos donde se requiere protección sin comprometer la visibilidad.

Sin embargo, gran parte de los enfoques actuales presentan limitaciones al omitir tres aspectos fundamentales: (1) la incorporación de modelos ópticos con dispersión realista del índice de refracción; (2) la optimización computacional del

*Autor para la correspondencia: bcanales321@gmail.com

Correo electrónico: bcanales321@gmail.com (Benito Canales-Pacheco), breyes@inaoep.mx (Bartolome Reyes-Ramírez), estebanrs@uaeh.edu.mx (Esteban Rueda-Soriano), alberto.ruiz@utsh.edu.mx (Luis Alberto Ruiz-Aguilar)

Historial del manuscrito: recibido el 03/07/2025, última versión-revisada recibida el 03/09/2025, aceptado el 31/08/2025, publicado el 25/03/2026. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial.15378>



perfil espectral en función de los espesores de capa; y (3) el análisis de tolerancia estructural frente a errores típicos de fabricación (Dai et al., 2016; Hobson et al., 2004).

Este trabajo propone una metodología computacional reproducible para el diseño de filtros ópticos UV-Vis tipo Bragg, integrando el modelado espectral de materiales dispersivos mediante ecuaciones de Sellmeier (Polyanskiy, 2024), simulación óptica a través del método de matrices de transferencia (Born & Wolf, 1999), optimización por mínimos cuadrados y análisis estadístico de tolerancia estructural mediante simulaciones Monte Carlo. La metodología se implementa completamente en Python, permitiendo obtener filtros con alta selectividad espectral y robustez frente a variaciones de espesor, compatibles con técnicas de deposición física como EB-PVD (Singh et al., 2005).

2. Metodología de diseño y simulación de filtros Bragg dispersivos en la región UV-Visible

2.1. Diseño teórico del filtro Bragg

El diseño inicial del filtro óptico se fundamenta en la teoría de estructuras dieléctricas multicapa, también conocidas como *filtros Bragg*. Estas estructuras están compuestas por capas alternadas de materiales con alto (H) y bajo (L) índice de refracción, cuyo espesor se selecciona típicamente como un cuarto de la longitud de onda central de operación λ_0 , de acuerdo con la condición:

$$d = \frac{\lambda_0}{4n}; \quad (1)$$

donde d es el espesor físico de la capa y n su índice de refracción. Este diseño produce *interferencia constructiva* para ciertas longitudes de onda, generando una *banda de alta reflectancia* centrada en λ_0 . Alternativamente, esta condición se expresa como:

$$2n_i d_i = m\lambda; \quad (2)$$

donde n_i y d_i representan el índice y el espesor de la capa i , λ incidente, y m un entero positivo. Cuando esta condición se satisface en múltiples interfaces, se produce un reforzamiento espectral selectivo, permitiendo diseñar filtros que reflejan o transmiten rangos específicos del espectro electromagnético (Macleod, 2010; Yeh, 1988).

En este trabajo, se seleccionó una longitud de onda central de diseño de 700 nm , como punto de partida para un diseño idealizado. Se construyó una pila Bragg de *10 capas* (5 pares HL), generando una estructura del tipo HLHLHL..., depositada sobre un sustrato de vidrio ($n = 1.5$) y expuesta al aire como medio incidente ($n = 1.0$), como se ilustra en la Figura 1.

Para maximizar la eficiencia óptica del diseño, se seleccionó dióxido de titanio (TiO_2) como material de alto índice ($n \approx 2.2 - 2.4$) y fluoruro de magnesio (MgF_2) como material de bajo índice ($n \approx 1.38 - 1.45$). Basándose en los siguientes criterios:

- *Alto contraste de índice*, que permite obtener una banda de Bragg ancha y eficiente con pocas capas;
- *Baja absorción en el rango UV-Visible*, lo que minimiza pérdidas ópticas;
- *Compatibilidad con procesos de fabricación* como EB-PVD; y

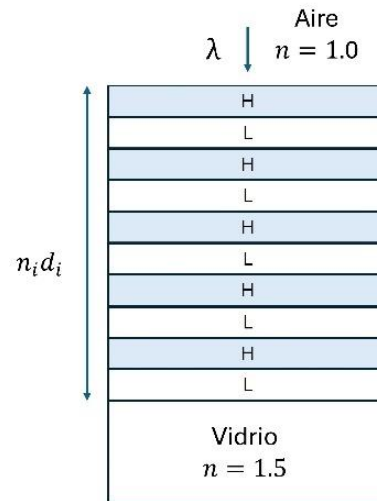


Figura 1. Representación esquemática del filtro Bragg con 10 capas alternadas de alto (H) y bajo (L) índice de refracción, sobre un sustrato de vidrio y con aire como medio incidente.

- *Estabilidad física y óptica* demostrada en la literatura para aplicaciones ópticas exigentes (Macleod, 2010; Liang et al., 2019).

Para calcular los coeficientes de reflexión y transmisión bajo incidencia normal, se emplean las siguientes expresiones, derivadas de los elementos de la matriz total M :

$$r = \frac{M_{11} + M_{12}q_s - q_0(M_{21} + M_{22}q_s)}{M_{11} + M_{12}q_s + q_0(M_{21} + M_{22}q_s)}; \quad (3)$$

$$t = \frac{2q_0}{M_{11} + M_{12}q_s + q_0(M_{21} + M_{22}q_s)}; \quad (4)$$

donde $q_0 = \frac{n_0}{n_s}$ y q_s depende de la polarización: s –polarización

$q_s = 1$, y para la polarización $q_s = \frac{n_s^2}{n_0^2}$.

Las cantidades M_{ij} corresponden a los elementos de la matriz total M , obtenida del producto de matrices individuales de cada capa.

A partir de estos coeficientes, se obtiene la reflectancia y la transmitancia mediante:

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2. \quad (5)$$

Estas expresiones permiten calcular la respuesta espectral del sistema y son fundamentales en la simulación óptica mediante el método de matrices de transferencia (TMM).

La respuesta espectral del diseño fue simulada computacionalmente mediante el método de matrices de transferencia (TMM), ampliamente utilizado en el análisis de estructuras ópticas estratificadas. Este método permite describir la propagación de una onda electromagnética a través de múltiples capas mediante el producto de matrices 2×2 que representan las propiedades ópticas de cada capa y sus interfaces (Born & Wolf, 1999).

Cada capa se caracteriza por una matriz de propagación que depende de su índice de refracción, espesor y la longitud de onda incidente. Bajo incidencia normal, la matriz total del sistema se expresa como:

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{pmatrix}, \quad (6)$$

con

$$M = \prod_{j=1}^N M_j; \quad (7)$$

donde: E_0^+, E_0^- son los campos hacia adelante y hacia atrás en la primera interfaz, E_N^+, E_N^- son los campos al final del sistema,

M_j representa la matriz de la capa j , que depende de su índice de refracción n_j , espesor d_j y la longitud de onda λ_0 . N es el número total de capas.

Cada matriz M_j se define como:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{q_j} \sin \delta_j \\ iq_i \sin \delta_i & \cos \delta_j \end{bmatrix}; \quad (8)$$

donde

$$\delta_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}, \quad q_j = \frac{n_j}{n_0}$$

El producto de todas las matrices representa la respuesta global del sistema. A partir de M , se calculan los coeficientes de reflexión r y transmisión t , así como la *reflectancia* $R = |r|^2$ y la *transmitancia* $T = |t|^2$ (Born & Wolf, 1999).

El método TMM permite simular con alta precisión el efecto de variaciones estructurales sobre la respuesta espectral, por lo que resulta especialmente útil para el diseño y análisis de filtros ópticos Bragg. Su versatilidad permite también el análisis bajo incidencia oblicua, polarización s y p , o incluso materiales anisotrópicos. Además, admite directamente el uso de índices de refracción dispersivos $n(\lambda)$, lo que lo hace compatible con el modelado espectral presentado en secciones posteriores.

2.2. Modelado dispersivo de materiales

Para representar con precisión el comportamiento óptico en la región UV-Visible, se consideró la dispersión espectral del índice de refracción de los materiales, la cual varía con la longitud de onda. En este trabajo, dicha dependencia se modeló mediante las ecuaciones de Sellmeier, ampliamente utilizadas para describir materiales dieléctricos transparentes:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \quad (9)$$

donde n es el índice de refracción como función de la longitud de onda λ , B_i y C_i son constantes características del material, determinadas experimentalmente en estudios previos.

En este trabajo, no se realizó una determinación experimental directa de las constantes B_i y C_i . Estos parámetros se obtuvieron a partir de datos experimentales disponibles en la literatura, compilados por la base de datos RefractiveIndex.info (Polyanskiy, 2024), en el rango espectral de 200 a 1200 nm.

Los datos interpolados corresponden a valores tabulados del índice de refracción $n(\lambda)$ para los materiales TiO_2 y MgF_2 , obtenidos de dicha base de datos. Estos valores, producto de mediciones experimentales publicadas, están disponibles en forma de tablas discretas para un amplio intervalo espectral. Mediante técnicas de interpolación numérica continua, se construyeron funciones dispersivas $n(\lambda)$ compatibles con el modelo TMM, lo que permitió evaluar el índice de refracción a cualquier longitud de onda dentro del dominio de simulación.

Estas propiedades ópticas, incluyendo los valores del índice de refracción y su comportamiento espectral, se resumen en la Tabla 2 junto con otras características físicas relevantes de los materiales seleccionados.

El uso de índices dispersivos resulta especialmente importante en el diseño de filtros para la región UV, donde el índice de refracción de muchos materiales puede variar de forma rápida, desplazando o deformando la banda de Bragg. Por tanto, la incorporación de este comportamiento óptico realista fue esencial para asegurar la validez del diseño bajo condiciones espectrales reales.

La implementación computacional de este modelo se realizó en Python, aplicando los valores de $n(\lambda)$ obtenidos en cada paso del cálculo óptico, dentro del marco general del método de matrices de transferencia (TMM). Esta estrategia permite integrar sin pérdida de precisión tanto la geometría de la estructura multicapa como la variabilidad espectral de los materiales empleados.

2.3. Optimización espectral por mínimos cuadrados

Las simulaciones ópticas correspondientes a esta etapa se realizaron mediante el método de matrices de transferencia (TMM), previamente descrito en la sección de diseño teórico. Este modelo fue adaptado para incorporar índices de refracción dispersivos y capas con espesores variables, lo cual permitió evaluar con precisión el impacto de modificaciones estructurales en la respuesta espectral del filtro.

El objetivo de esta fase fue mejorar el desempeño del filtro en términos de selectividad espectral, mediante la optimización numérica de los espesores de cada capa dieléctrica, manteniendo la secuencia alternada HLHL... y el número total de capas. En particular, se buscó maximizar la reflectancia en la región UV (300–400 nm) y minimizarla en el visible (400–700 nm), obteniendo así un filtro funcionalmente selectivo.

El método de optimización empleado se basó en mínimos cuadrados, minimizando una función objetivo ε que representa la diferencia entre el espectro deseado y el espectro simulado (Zukic et al., 1992). Este enfoque minimiza una función objetivo ε como la diferencia acumulada entre el espectro simulado y el espectro ideal deseado:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [R_{sim}(\lambda_i) - R_{obj}(\lambda_i)]^2 \quad (10)$$

donde: $R_{sim}(\lambda_i)$ es la reflectancia simulada para la longitud de onda λ_i , $R_{obj}(\lambda_i)$ es la reflectancia objetivo (ideal) definida por el diseñador, y N es el número total de puntos espectrales considerados.

Esta función fue minimizada mediante un algoritmo iterativo implementado con la biblioteca SciPy de Python (Virtanen et al., 2020), respetando restricciones físicas y tecnológicas sobre el rango de espesores posibles para cada material. En cada iteración, la función de error fue evaluada usando el modelo TMM con materiales dispersivos, lo cual permitió desplazar y moldear la banda de Bragg hacia la región UV con alta precisión espectral.

2.4. Análisis de tolerancia estructural (Monte Carlo)

Para evaluar la robustez estructural del filtro ante variaciones típicas de fabricación, se implementó un análisis de tolerancia mediante el método Monte Carlo, ampliamente utilizado en óptica de recubrimientos para estimar la variabilidad del desempeño espectral ante desviaciones aleatorias en los parámetros estructurales.

Este método consiste en generar múltiples versiones del filtro mediante la introducción de perturbaciones controladas en los espesores de capa, replicando errores típicos en procesos de deposición como EB-PVD. En este estudio, se simuló 200 configuraciones aleatorias de la estructura Bragg optimizada, aplicando una variación gaussiana del $\pm 5\%$ sobre cada espesor nominal, centrada en su valor optimizado y con desviación estándar proporcional:

$$d_i^{(j)} = d_i \left(1 + \delta_i^{(j)}\right), \quad \delta_i^{(j)} \sim N(0, \sigma^2), \quad \sigma = 0.05 \quad (11)$$

donde $d_i^{(j)}$ representa el espesor de la capa i en la iteración j , y $\delta_i^{(j)}$ es una perturbación aleatoria con distribución normal. Para cada configuración generada, se calculó la reflectancia espectral usando el mismo modelo óptico basado en el TMM con índices dispersivos.

Este análisis permitió evaluar el grado de sensibilidad del filtro frente a errores de fabricación, considerando las tolerancias comunes en técnicas de deposición física como la evaporación por haz de electrones (EB-PVD), donde se reportan desviaciones estructurales del orden de $\pm 5\%$ (Rodríguez-de Marcos et al., 2019; Choi et al., 2005; Mahajan, 2007).

Los resultados del análisis estadístico evidenciaron que el filtro mantiene su funcionalidad deseada incluso bajo estas variaciones, conservando una reflectancia elevada en la región UV (promedios superiores al 80 %) y valores bajos en el visible. Esto validó la estabilidad óptica del diseño y su viabilidad para aplicaciones prácticas en dispositivos multicapa selectivos.

2.5. Implementación computacional

Toda la metodología fue implementada en lenguaje Python 3.10, utilizando bibliotecas científicas de código abierto ampliamente validadas en la comunidad académica. En particular, se emplearon:

- *NumPy* para operaciones matriciales y gestión de arreglos numéricos de alta eficiencia (Contreras et al., 2024),
- *SciPy* para la resolución del problema de optimización por mínimos cuadrados (Virtanen et al., 2020),
- *Matplotlib* para la generación de gráficos espectrales y análisis visual de resultados (Hunter, 2007).

El uso de Python en investigación científica ha crecido significativamente debido a su flexibilidad, reproducibilidad y ecosistema de bibliotecas robustas. Herramientas como NumPy, SciPy y Matplotlib han sido ampliamente validadas para tareas de simulación, modelado numérico y visualización. En el contexto del modelado óptico, su adopción permite una integración fluida entre simulación espectral, optimización y análisis estadístico, asegurando la trazabilidad del flujo computacional.

Para mayor claridad metodológica, la Figura 2 presenta un diagrama único de flujo metodológico y de implementación computacional, que combina las etapas conceptuales y prácticas de la investigación. Este diagrama resume el procedimiento desde la importación de datos dispersivos y la definición de la estructura inicial del filtro, hasta la simulación óptica mediante el método de matrices de transferencia (TMM), la optimización de espesores por mínimos cuadrados, el análisis de tolerancia estructural mediante Monte Carlo, y la comparación de resultados entre configuraciones idealizadas y dispersivas, así como entre diferentes pares de materiales dieléctricos.

Cada etapa del código fue validada individualmente para asegurar la trazabilidad de los resultados. La validación del código se realizó comparando los resultados generados por el modelo TMM con casos de referencia bien documentados en

la literatura (Macleod, 2010; Yeh, 1988), tales como estructuras de cuarto de onda con materiales de índices constantes. Asimismo, se verificó la conservación de energía en todas las simulaciones, cumpliendo la condición $R + T \approx 1$ en cada longitud de onda evaluada.

Este proceso de verificación se repitió para cada módulo del flujo computacional (simulación óptica, interpolación, optimización y análisis de tolerancia), asegurando la trazabilidad de los resultados y la reproducibilidad del enfoque implementado.

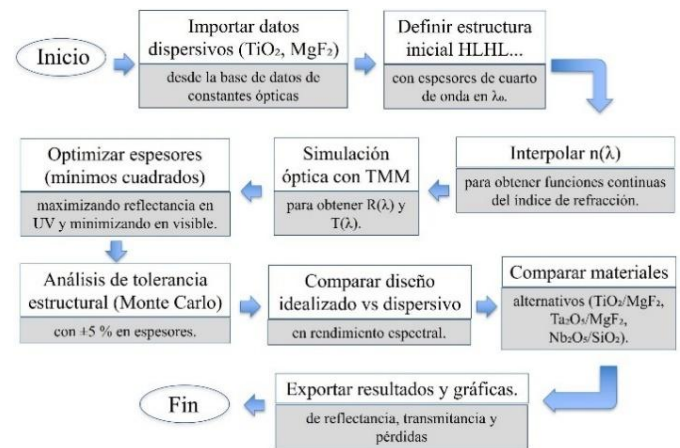


Figura 2. Flujo metodológico y de implementación computacional para el diseño y simulación del filtro Bragg propuesto, integrando las etapas conceptuales y prácticas desde el modelado dispersivo hasta la comparación de configuraciones.

3. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación óptica, la optimización espectral y el análisis de tolerancia permiten evaluar la eficiencia del filtro Bragg propuesto. A continuación, se presenta la evolución del diseño desde una estructura idealizada hasta una versión optimizada y robusta.

Cada etapa del código fue validada individualmente para asegurar la trazabilidad de los resultados.

La validación del código se realizó comparando los resultados generados por el modelo TMM con casos de referencia bien documentados en la literatura, tales como estructuras de cuarto de onda con materiales de índices constantes. Asimismo, se verificó la conservación de energía en todas las simulaciones, cumpliendo la condición $R + T \approx 1$ en cada longitud de onda evaluada.

Este proceso de verificación se repitió para cada módulo del flujo computacional (simulación óptica, interpolación, optimización y análisis de tolerancia), asegurando la trazabilidad de los resultados y la reproducibilidad del enfoque implementado.

3.1. Reflectancia del diseño idealizado

La Figura 3 muestra la reflectancia espectral simulada de una estructura Bragg idealizada compuesta por diez capas alternadas de materiales dieléctricos con alto y bajo índice de refracción (configuración HLHL...), diseñada con una longitud de onda central de 700 nm. Este diseño genera una banda de alta reflectancia centrada en el límite del espectro visible e infrarrojo cercano (650–800 nm). Se observa que la

reflectancia alcanza un valor máximo cercano al 99 %, señalado mediante una línea horizontal de referencia, lo que evidencia una interferencia constructiva altamente eficiente en esa región. Fuera de esta banda, la reflectancia disminuye considerablemente: cae por debajo del 40 % en la región ultravioleta (200–400 nm) y presenta oscilaciones en el infrarrojo medio (800–1200 nm), revelando la selectividad espectral limitada de un diseño idealizado sin dispersión ni optimización.

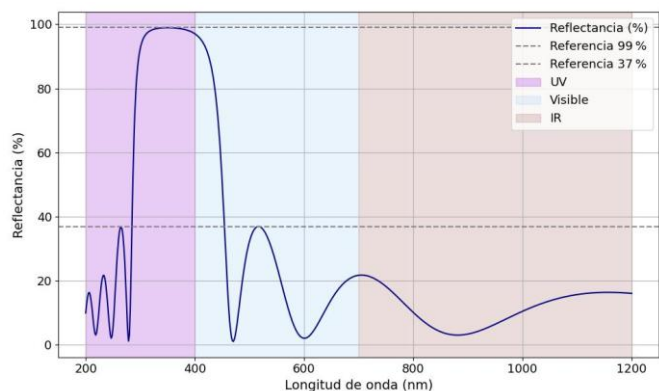


Figura 3. Reflectancia espectral simulada de un filtro Bragg ideal con 10 capas HL y diseño centrado en 700 nm.

La Figura 4 representa una variación estructural donde la longitud de onda central del diseño se trasladó hacia la región UV, específicamente a 350 nm, con el objetivo de incrementar la reflectancia en ese rango. El gráfico evidencia que la banda de alta reflectancia se ha desplazado exitosamente hacia la región ultravioleta (aproximadamente de 300 a 400 nm), alcanzando también un máximo cercano al 99 %, claramente marcado en la figura. Sin embargo, se observa que esta modificación reduce drásticamente la reflectancia en el visible y el infrarrojo, cayendo por debajo del 40 % en la mayor parte del espectro. Esta respuesta es consistente con el comportamiento de los filtros Bragg diseñados de forma ideal, donde la selectividad espectral es elevada en la región objetivo, pero se pierde fuera del rango de diseño debido a la falta de ajuste fino.

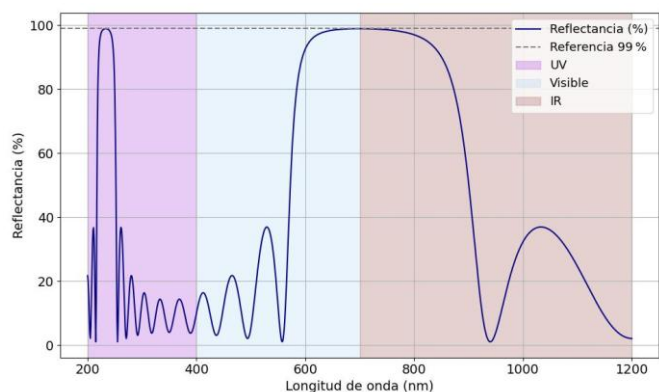


Figura 4. Reflectancia espectral simulada de un filtro Bragg ideal con diseño centrado en 350 nm.

Estas simulaciones establecen una referencia base para evaluar posteriormente el impacto del modelado dispersivo, la optimización espectral y el análisis de tolerancia estructural sobre el desempeño del filtro.

3.2. Optimización espectral por mínimos cuadrado

Con el objetivo de diseñar un filtro óptico Bragg altamente reflectante en la región ultravioleta (UV: 200–400 nm) y con baja reflectancia en el espectro visible (400–700 nm), se llevó a cabo una optimización computacional mediante el método de mínimos cuadrados. En lugar de asumir índices de refracción constantes, se incorporaron modelos ópticos dispersivos realistas para TiO_2 y MgF_2 , definidos mediante ecuaciones de Sellmeier, lo que permitió una simulación más precisa del comportamiento espectral.

La optimización se aplicó a una estructura de 10 capas alternadas (5 pares HL), ajustando individualmente los espesores para maximizar la reflectancia promedio en el rango UV y minimizarla en el visible. La función objetivo penalizó las longitudes de onda visibles, favoreciendo así un perfil altamente selectivo.

La Figura 5 muestra la curva de reflectancia obtenida tras el proceso de optimización. La línea roja representa el espectro simulado del filtro con índices dispersivos. Las regiones sombreadas en violeta (200–400 nm) y azul (400–700 nm) indican, respectivamente, la zona objetivo de alta reflectancia UV y la región visible penalizada. Las líneas punteadas horizontal azul y negra marcan los umbrales de referencia: 91 % como nivel objetivo mínimo de reflectancia UV, y 11 % como máximo aceptable en el visible. Se observa que el filtro optimizado alcanza reflectancias superiores al 90 % en el UV, cumpliendo el objetivo de alta eficiencia, mientras que mantiene niveles por debajo del 15 % en la mayor parte del visible, validando el éxito del enfoque numérico aplicado.

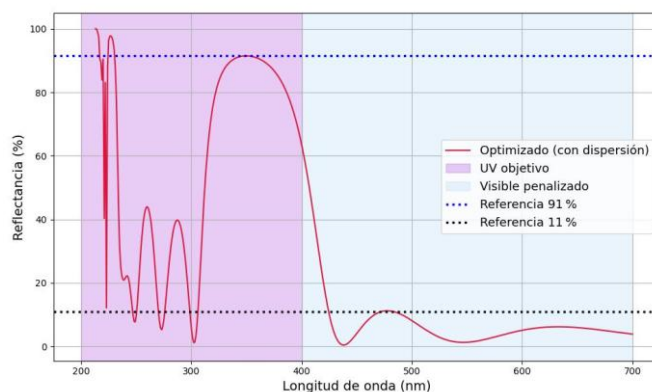


Figura 5. Reflectancia espectral del filtro Bragg con índices dispersivos

Además del perfil espectral, el modelo computacional desarrollado ofrece como resultado un conjunto de espesores optimizados para cada capa de la estructura Bragg, obtenidos tras el ajuste por mínimos cuadrados. Estos valores constituyen la propuesta estructural del filtro y fueron empleados tanto en las simulaciones espectrales con modelos dispersivos como en el análisis estadístico de tolerancia estructural.

La Tabla 1 muestra los espesores finales sugeridos para las diez capas dieléctricas del filtro, organizadas en pares alternados de materiales de alto (H, TiO_2) y bajo índice de refracción (L, MgF_2). Esta configuración mantiene la secuencia HLHL... sobre un sustrato de vidrio. Los valores específicos de espesor permiten generar interferencia óptica constructiva en el UV y destructiva en el visible, cumpliendo con los objetivos de alta selectividad espectral y viabilidad física para su fabricación mediante técnicas como EB-PVD.

Tabla 1: Espesores de capas optimizadas mediante mínimos cuadrados

Capa	Tipo	Espesor (nm)
1	H (TiO ₂)	38.21
2	L (MgF ₂)	65.77
3	H	47.73
4	L	66.8
5	H	43.59
6	L	65.58
7	H	46.45
8	L	64.68
9	H	41.74
10	L	62.4

3.3. Efecto del modelado dispersivo

Para evaluar la robustez del diseño optimizado del filtro Bragg, se analizó el impacto de incorporar modelos ópticos dispersivos en la simulación de la reflectancia espectral. A diferencia del enfoque idealizado en el que se emplearon índices de refracción constantes ($n_H = 2.4$ para TiO₂ y $n_L = 1.38$ para MgF₂), en esta etapa se utilizaron modelos más realistas basados en la dependencia espectral de los materiales: el modelo de Sellmeier para el MgF₂ y un modelo empírico ampliamente validado para el TiO₂. Ambos describen cómo los índices de refracción varían con la longitud de onda, particularmente en el rango UV-visible, reflejando con mayor fidelidad el comportamiento óptico real de los materiales.

La Figura 6 compara la respuesta espectral obtenida con el modelo ideal frente al modelo dispersivo, manteniendo los mismos espesores optimizados por cuarto de onda. Si bien ambas curvas conservan una estructura general similar, se observan diferencias significativas en la magnitud y la localización de los picos de reflectancia. En el caso ideal, la reflectancia máxima en la región UV alcanza un valor cercano al 99 %, con una banda bien centrada y simétrica. Sin embargo, al incorporar la dispersión óptica, esta banda se ensancha ligeramente y su forma se vuelve asimétrica, desplazando el máximo y reduciendo la reflectancia máxima a aproximadamente 91 %.

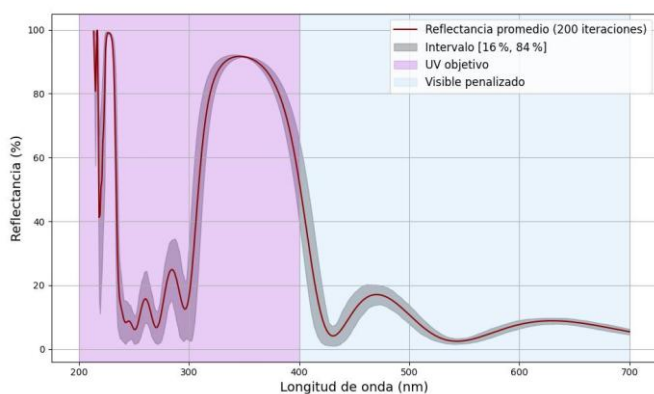


Figura 6. Comparación de la reflectancia espectral de un filtro Bragg optimizado utilizando índices constantes (línea azul) frente a un modelo con índices dispersivos (línea roja continua).

Por otro lado, en la región visible, donde se desea minimizar la reflectancia para favorecer la selectividad espectral del filtro, el diseño idealizado presenta una reflectancia residual de aproximadamente 37 %. Con el modelo dispersivo, esta reflectancia se reduce significativamente hasta cerca del 11 %, evidenciando que el efecto de dispersión puede, en ciertos

rangos, mejorar el rechazo espectral no deseado. Esto se debe a que la variación de los índices de refracción con la longitud de onda provoca una redistribución espectral de la interferencia constructiva y destructiva en la pila multicapa. En conjunto, estos resultados muestran que el modelado dispersivo no solo modifica la intensidad y ubicación de los picos de reflectancia, sino que también puede impactar favorablemente la eficiencia espectral del diseño al mejorar la selectividad fuera de banda. No obstante, la pérdida de reflectancia máxima en el UV también sugiere la necesidad de realizar una nueva optimización adaptada al comportamiento dispersivo para restaurar o incluso superar el rendimiento del modelo ideal.

3.4. Evaluación de tolerancia estructural

Con el objetivo de evaluar la robustez estructural del diseño optimizado del filtro Bragg, se realizó un análisis de tolerancia mediante el método de Monte Carlo. Este enfoque permite simular el impacto de variaciones aleatorias en los espesores de capa, representando errores típicos de fabricación como los que ocurren en técnicas de deposición física, por ejemplo, la evaporación por haz de electrones (EB-PVD), donde se reportan desviaciones del orden de ± 5 %.

Se generaron 200 configuraciones aleatorias a partir del diseño nominal, aplicando perturbaciones gaussianas independientes a cada capa del filtro con una desviación estándar del 5 % respecto a su espesor optimizado. Cada configuración fue evaluada espectralmente utilizando el método de matrices de transferencia (TMM), considerando la dispersión óptica de los materiales a través de los modelos de Sellmeier para MgF₂ y TiO₂.

La Figura 7 presenta la curva de reflectancia promedio obtenida sobre el conjunto de simulaciones, junto con el intervalo estadístico correspondiente al 68 % central de las muestras (percentiles 16 y 84). Se observa que, a pesar de la introducción de variabilidad estructural, el diseño mantiene su comportamiento funcional característico: alta reflectancia en la región ultravioleta (UV) y baja reflectancia en el espectro visible.

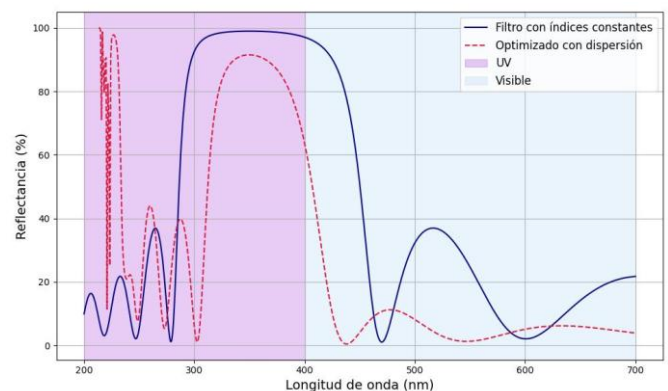


Figura 7. Análisis de tolerancia por Monte Carlo (± 5 %) del filtro TiO₂/MgF₂

Sin embargo, la curva promedio muestra una reducción en la magnitud del pico de reflectancia en el UV, acompañado de un ligero ensanchamiento de la banda. Esta distorsión sugiere una pérdida parcial de la coherencia constructiva óptima debido a las perturbaciones aleatorias en el espesor de las capas. En el visible, si bien también se presenta dispersión, la

Tabla 2: Propiedades ópticas y físicas de los materiales dieléctricos

Material	Índice n a 550 nm	Banda prohibida (eV)	Estabilidad térmica	Compatible EB-PVD	Absorción UV	Aplicaciones comunes	Fuente
TiO ₂	2.40	3.2	Media	Sí	Baja	Filtros UV, recubrimientos protectores	(Macleod., 2010)
MgF ₂	1.38	>10	Alta	Sí	Muy baja	Óptica UV, antirreflectante	(Li., 1980)
Ta ₂ O ₅	2.10	4.0	Alta	Sí	Muy baja	Electrónica, óptica de precisión	(RYU et al., 2000)
Nb ₂ O ₅	2.25	3.5	Media	Parcialmente	Baja	Revestimientos oftálmicos	(Wan et al., 2023)
SiO ₂	1.45	>9	Muy alta	Sí	Muy baja	Multicapas, óptica láser	(Dai et al., 2010)

reflectancia media permanece dentro de niveles bajos, lo que indica que el filtro conserva su capacidad de supresión fuera de banda.

Estos resultados confirman que el diseño optimizado posee una tolerancia estructural adecuada, capaz de mantener su desempeño espectral incluso ante desviaciones típicas de fabricación. La incorporación de este tipo de análisis resulta crucial para validar la viabilidad del diseño en contextos de implementación práctica y producción en serie.

3.5. Comparación con otras configuraciones

Además del sistema TiO₂ / MgF₂, ampliamente reportado por su alto contraste de índice de refracción y baja absorción óptica, se evaluaron otras dos configuraciones relevantes en la literatura: Ta₂O₅ / MgF₂ y Nb₂O₅ / SiO₂, con el objetivo de valorar su desempeño espectral dentro de la misma arquitectura multicapa optimizada.

Para contextualizar la selección de materiales, la Tabla 2 resume las propiedades ópticas y físicas más relevantes de los dieléctricos considerados. Estas propiedades han sido ampliamente caracterizadas en la literatura técnica especializada y se mantienen vigentes por su estabilidad fisicoquímica, por lo que las fuentes clásicas empleadas (Li, 1980; Macleod, 2010; Palik, 1997) siguen siendo de referencia en el diseño óptico. Además, se ha verificado que estos materiales continúan siendo utilizados en investigaciones recientes, lo que refuerza su relevancia en aplicaciones contemporáneas.

La Figura 8 muestra la reflectancia espectral simulada de tres configuraciones multicapa con materiales dispersivos en el rango de 200 a 700 nm. La estructura TiO₂ / MgF₂ exhibe una reflectancia superior al 90 % en la región UV (300–400 nm) y una reflectancia inferior al 20 % en el visible (400–700 nm), validando su efectividad como filtro selectivo. Este comportamiento coincide con lo reportado en recubrimientos ópticos de alta eficiencia para protección UV (Zou et al., 2020).

La configuración Ta₂O₅ / MgF₂ también mostró una alta reflectancia en UV, aunque acompañada de picos adicionales en la región visible, atribuibles a una mayor dispersión espectral del sistema. A pesar de estas oscilaciones, este sistema es reconocido por su excelente estabilidad térmica y baja pérdida dieléctrica, lo que lo hace atractivo para entornos de alta exigencia térmica (Chen et al., 1986).

En contraste, la combinación Nb₂O₅ / SiO₂ presentó una reflectancia más irregular en todo el espectro, con múltiples oscilaciones tanto en el UV como en el visible. Aunque su comportamiento espectral fue menos favorable, destaca por su alta transmisividad global y buena compatibilidad con recubrimientos flexibles, cualidades relevantes en aplicaciones oftálmicas y dispositivos electrónicos portátiles (Wan, 2023).

En conjunto, estas comparaciones permiten concluir que TiO₂ / MgF₂ sigue siendo la configuración más equilibrada en cuanto a eficiencia espectral, tolerancia estructural y viabilidad de fabricación mediante técnicas como EB-PVD. No obstante, otras combinaciones como Ta₂O₅ / MgF₂ podrían ser optimizadas para aplicaciones específicas, especialmente aquellas que priorizan resistencia térmica o durabilidad ambiental.

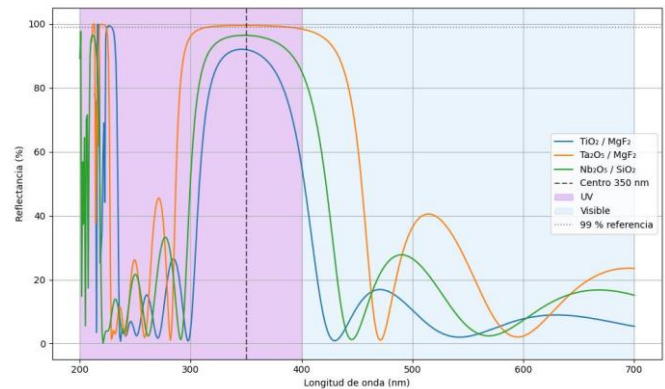


Figura 8. Comparación espectral de reflectancia para filtros Bragg con materiales dispersivos: TiO₂/MgF₂, Ta₂O₅/MgF₂ y Nb₂O₅/SiO₂

3.6. Evaluación de la flexibilidad espectral del diseño

Con el objetivo de validar la adaptabilidad de la metodología propuesta, se exploró la posibilidad de ajustar el diseño optimizado del filtro Bragg a una longitud de onda central distinta. En particular, se consideró un nuevo centro espectral en 300 nm, dentro de la región UV-C, manteniendo la misma arquitectura de cinco pares dieléctricos y utilizando modelos dispersivos realistas para todos los materiales involucrados.

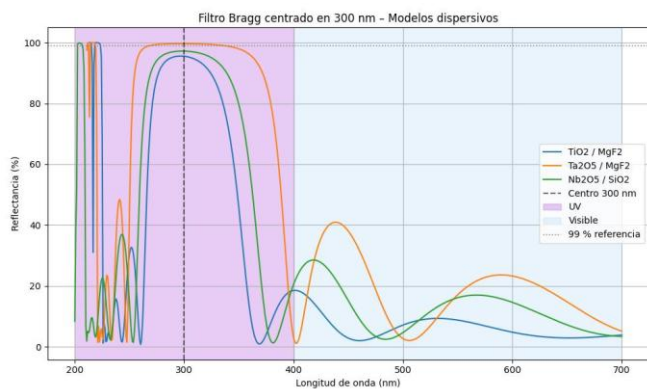


Figura 9. Respuesta espectral simulada de tres configuraciones dieléctricas ($\text{TiO}_2 / \text{MgF}_2$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{MgF}_2$ y $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$) bajo un diseño multicapa tipo Bragg centrado en 300 nm.

La Figura 9 muestra la respuesta espectral simulada para las tres configuraciones evaluadas: $\text{TiO}_2 / \text{MgF}_2$, $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{MgF}_2$ y $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$, ahora rediseñadas con espesores ópticos acordes a un diseño centrado en 300 nm. Como se aprecia, el máximo de reflectancia se desplaza efectivamente hacia la nueva longitud objetivo, conservando una forma espectral adecuada para aplicaciones de alta reflectancia en el UV profundo. En particular, la combinación $\text{TiO}_2 / \text{MgF}_2$ mantiene un desempeño superior, con una banda estrecha, de alta intensidad, y bien centrada. Las configuraciones con Ta_2O_5 y Nb_2O_5 presentan perfiles más amplios y de menor intensidad, pero siguen mostrando un comportamiento funcional.

Estos resultados confirman que la estrategia de diseño no se limita a un único punto espectral, sino que puede adaptarse eficazmente a otras regiones del UV. Esto refuerza la utilidad práctica del método propuesto en aplicaciones donde se requieren filtros personalizados, tales como esterilización UV-Vis, protección ocular, imagenología biomédica o sensores ópticos específicos.

Estos resultados permiten concluir que $\text{TiO}_2 / \text{MgF}_2$ no solo proporciona la mejor eficiencia espectral, sino que también mantiene una estabilidad funcional frente a variaciones de fabricación, posicionándose como la opción más equilibrada para aplicaciones prácticas en filtros UV-Vis multicapa.

4. Discusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el filtro Bragg diseñado para aplicaciones en el rango UV-Visible posee una respuesta espectral altamente funcional y estructuralmente robusta. En primer lugar, la implementación de una optimización espectral basada en el método de mínimos cuadrados permitió redefinir los espesores de las capas dieléctricas para alcanzar simultáneamente una alta reflectancia en la región UV (300–400 nm) y una baja reflectancia en el visible (400–700 nm), superando los resultados esperados de los diseños Bragg tradicionales centradas en una única longitud de onda (Hecht, 2017; Macleod, 2010).

El diseño idealizado (HLHL...) exhibe un máximo de reflectancia centrado en 700 nm, característico de estructuras ópticas con simetría espectral en torno a la longitud central, como se ha reportado en (Yeh, 1988). No obstante, la optimización multivariable aplicada permite romper esta simetría y desplazar el perfil de reflectancia hacia el UV,

validando estrategias similares como las propuestas por (Wang, 2023).

La incorporación de modelos dispersivos mediante las ecuaciones de Sellmeier para TiO_2 y MgF_2 permitió simular con mayor fidelidad el comportamiento espectral, una práctica recomendada en la literatura para el diseño de recubrimientos ópticos realistas (Polyanskiy, 2024; Palik, 1997). En particular, se observó que la inclusión de la dispersión modifica la intensidad y posición de los picos de reflectancia, pero también contribuye a mejorar el rechazo fuera de banda, como ha sido discutido por (Gao et al., 2020). Este efecto, lejos de ser disruptivo, puede ser aprovechado para aumentar la selectividad espectral mediante una nueva etapa de optimización adaptada al modelo dispersivo.

En lo que respecta a la robustez estructural, el análisis de tolerancia realizado mediante simulaciones Monte Carlo con variaciones de $\pm 5\%$ en los espesores confirma una alta estabilidad espectral. Este tipo de evaluaciones es indispensable para validar la viabilidad de fabricación mediante técnicas como EB-PVD (Tajima et al., 2023). En nuestro caso, la reflectancia promedio en el UV se mantuvo por encima del 80 %, con una desviación aceptable, lo que evidencia la compatibilidad del diseño con la realidad tecnológica de producción.

La comparación con otros sistemas dieléctricos, como $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{MgF}_2$ y $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, resalta la superioridad del sistema $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ en términos de eficiencia espectral y simplicidad de fabricación. Aunque las configuraciones alternativas ofrecen ventajas específicas (estabilidad térmica, transmisividad global, compatibilidad con sustratos flexibles), sus desempeños en UV fueron inferiores, en línea con lo discutido por (Ryu et al., 2000; Hathal et al., 2024; Woo et al. (2004). Esta comparación subraya la relevancia de elegir materiales según la aplicación objetivo.

Si bien este estudio se enfoca en simulaciones computacionales, existen resultados experimentales previos que validan configuraciones similares. En particular, se han reportado la fabricación de filtros ópticos multicapa basados en $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ con alta eficiencia espectral en la región UV, cuya respuesta presenta curvas de reflectancia comparables a las obtenidas en este trabajo. Aunque no se dispone aún de una validación experimental directa de nuestra propuesta optimizada, esta coincidencia con resultados publicados refuerza la validez del modelo y justifica su potencial aplicación práctica. Esta comparación también respalda la línea futura sugerida de realizar deposición física por EB-PVD para consolidar el diseño.

Finalmente, la adaptabilidad espectral demostrada mediante el rediseño centrado en 300 nm confirma la flexibilidad del método propuesto. Esta capacidad de personalización es crucial para aplicaciones emergentes como la esterilización UV-C, sensores biomédicos y protección UV en dispositivos inteligentes, como ha sido mencionado por (Jang et al., 2022; Lizcano et al., 2024).

En conjunto, este trabajo no solo valida una estrategia robusta para el diseño de filtros Bragg UV-Vis, sino que también establece una base metodológica replicable y extensible para futuras aplicaciones.

5. Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad de diseñar filtros ópticos multicapa tipo Bragg para aplicaciones UV-Visible, utilizando materiales con comportamiento dispersivo realista modelado mediante ecuaciones de Sellmeier. La configuración alternada $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$, optimizada espectralmente mediante el método de mínimos cuadrados, permitió alcanzar una alta reflectancia en la región ultravioleta (300–400 nm) y una baja reflectancia en el visible (400–700 nm), cumpliendo con los objetivos funcionales planteados.

Las simulaciones mostraron que la inclusión de propiedades ópticas dispersivas modifica la forma del espectro, pero no compromete el desempeño del filtro, validando así la relevancia de utilizar modelos ópticos realistas en el diseño computacional. Asimismo, el análisis de tolerancia mediante el método de Monte Carlo evidenció que el filtro mantiene su eficiencia espectral ante variaciones estructurales de $\pm 5\%$ en los espesores de capa, lo cual resulta compatible con tolerancias típicas de fabricación por EB-PVD.

Finalmente, la comparación con otras configuraciones materiales como $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{MgF}_2$ y $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, reforzó que el sistema $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ ofrece un equilibrio superior entre contraste de índice, eficiencia espectral y robustez estructural, lo que lo posiciona como una opción competitiva para aplicaciones funcionales en óptica oftálmica, recubrimientos antirreflectantes, dispositivos portátiles y protección frente a radiación UV.

Este estudio ofrece una metodología accesible, replicable y adaptable para diseñar filtros ópticos multicapa con precisión espectral y tolerancia realista, sentando las bases para futuras investigaciones experimentales y aplicaciones industriales. En particular, el enfoque propuesto puede extenderse a otros rangos espectrales mediante la selección de materiales alternativos o estructuras híbridas.

Como línea futura, se propone explorar la incorporación de capas metálicas o materiales dieléctricos de alta estabilidad térmica, lo cual podría ampliar la funcionalidad del filtro hacia el infrarrojo cercano (NIR) y entornos de alta exigencia térmica o ambiental. Además, validar experimentalmente el diseño mediante técnicas de deposición física como EB-PVD o ALD permitirá consolidar su implementación en dispositivos ópticos avanzados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense (UTSH) y al Cuerpo Académico de Tecnología de Información y Telecomunicaciones por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se reconoce la colaboración de la Coordinación de Óptica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y del Área Académica de Computación y Electrónica de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), cuyo acompañamiento académico y científico fue fundamental para la consolidación de este trabajo.

Este proyecto se benefició de las discusiones y retroalimentación recibidas de colegas investigadores en el área de óptica y fotónica, así como del acceso a bibliografía especializada que enriqueció la metodología propuesta. Finalmente, los autores expresan su gratitud a las instancias

editoriales por la revisión crítica y constructiva que permitió mejorar la calidad del manuscrito.

Referencias

- Al-Syouri, H. T., Saad, M. F., & Lateef, M. (2021). The effects of UV light on the chemical and mechanical properties of polymers. *Materials*, 10(2), 180. <https://doi.org/10.3390/ma10020180>
- Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of optics* (7th ed.). Cambridge University Press.
- Chen, X., Bai, R., & Huang, M. (2019). Optical properties of amorphous Ta_2O_5 thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Optical Materials*, 97, 109404. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109404>
- Contreras Bravo, L. E., & Padilla Beltrán, J. E. (2024). *Ciencia de datos con Python: Transformación y selección de variables* (1ª ed.). Ediciones de la U. ISBN: 978-958-792-762-7
- Dai, J., Gao, W., Liu, B., Cao, X., Tao, T., Xie, Z., ... Zhang, R. (2016). Design and fabrication of UV band-pass filters based on $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ dielectric distributed Bragg reflectors. *Applied Surface Science*, 364, 886–891. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.222>
- Gao, B., George, J. P., Beeckman, J., & Neyts, K. (2020). Design, fabrication and characterization of a distributed Bragg reflector for reducing the étendue of a wavelength-converting system. *Optics Express*, 28(9), 12837–12846. <https://doi.org/10.1364/OE.391080>
- Hathal, Y. R., Ibrahim, I. M., & Khalaf, M. K. (2024). Photosensitivity of $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Si}$ thin films produced via dc reactive sputtering at different substrate temperatures. *Iraqi Journal of Applied Physics*, 20(2B), 349–356. <https://ijap-iq.com/index.php/ijap/article/view/45>
- Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson Education.
- Hobson, M. P., & Baldwin, J. E. (2004). Markov-chain Monte Carlo approach to the design of multilayer thin-film optical coatings. *Applied Optics*, 43(13), 2651–2660. <https://doi.org/10.1364/AO.43.002651>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Liang, H., Han, H., Wang, F., Cheng, Z., Lin, B., Pan, Y., & Tan, J. (2019). Experimental investigation on spectral splitting of photovoltaic/thermal hybrid system with two-axis sun tracking based on $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ interference thin film. *Energy Conversion and Management*, 188, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.060>
- Li, H. H. (1980). Refractive index of alkaline earth halides and its wavelength and temperature derivatives. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 9(1), 161–290. <https://doi.org/10.1063/1.555616>
- Lizcano, Y., et al. (2024). Practical design of an optical filter for thermal management of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*, Vol. 32, No. 11, pp. 753 (2024). <https://doi.org/10.1002/pp.3813>
- MacLeod, H. A. (2010). *Thin-film optical filters* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420073034>
- Palik, E. D. (Ed.). (1997). *Handbook of optical constants of solids*. Academic Press.
- Polyanskiy, M. N. (2024). RefractiveIndex.info: Database of optical constants. *Scientific Data*, 11, 94. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02898-2>
- Ryu, T. U., Hahn, S. H., Kim, S. W., & Kim, E. J. (2000). Optical, mechanical and thermal properties of $\text{MgF}_2\text{-ZnS}$ and $\text{MgF}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ composite thin films deposited by coevaporation. *Optical Engineering*, 39(12), 3207–3213. <https://doi.org/10.1117/1.1320978>
- Singh, J., & Wolfe, D. E. (2005). Review: Nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD). *Journal of Materials Science*, 40(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-5682-5>
- Tajima, N., Murotani, H., & Matsudaira, T. (2023). Optical multicoating using low-refractive-index SiO_2 optical thin films deposited by sputtering and electron beam evaporation. *Thin Solid Films*, 776, 139824. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2023.139824>
- Tsai, R. Y., & Hua, M. Y. (1995, June). Comparative study of $\text{TiO}_2\text{-MgF}_2$ composite films prepared by electron-beam coevaporation and reactive ion-assisted coevaporation. In *Optical Interference Coatings* (p. ThB11). Optica Publishing Group.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & van der Walt, S. J. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wan Harrum, W. M. (2023). Synthesis and characterization of zinc oxide/graphene (ZnO/Gn) on titanium dioxide/niobium pentoxide

- (TiO₂/Nb₂O₅) thin film for methylene blue removal (Tesis de maestría). Universiti Teknologi MARA (UiTM). Recuperado de <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/106832/>
- Wang, X., et al. (2023). Photonic structures in radiative cooling. *Light: Science & Applications*, 12, 134. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01119-0>
- Woo, S. H., Kim, S. H., & Hwangbo, C. K. (2004). Optical and Structural Properties of TiO₂ and MgF₂ Thin Films by Plasma Ion-Assisted Deposition. *Journal of the Korean Physical Society*, 45(1), 99–107..
- Yeh, P. (1988). *Optical waves in layered media*. Wiley-Interscience.
- Yousif, E., & Haddad, R. (2014). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review. *SpringerPlus*, 3, 398. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>
- Zou, W., Sastry, M., Gooding, J. J., Ramanathan, R., & Bansal, V. (2020). Recent advances and a roadmap to wearable UV sensor technologies. *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1901036. <https://doi.org/10.1002/admt.201901036>