

Modelado y análisis numérico de biosensores tipo Taper usando propagación cuántica y efecto Faraday

Jonathan Alberto Rodríguez Ovares
Universidad Fidélitas
jrodriguezo@ufidelitas.ac.cr

Resumen— Este trabajo presenta un análisis teórico y numérico de biosensores basados en fibras ópticas tipo taper, utilizando modelos de propagación cuántica y fenómenos electromagnéticos asociados a campos evanescentes. La ecuación de Schrödinger unidimensional se resolvió mediante los métodos RK4 y Crank–Nicholson para estudiar la propagación de paquetes de onda gaussianos. Además, se evaluó la influencia de la longitud de onda en la distribución energética y en la generación de campos magnéticos evanescentes mediante el efecto Faraday. Los resultados muestran variaciones en el confinamiento electromagnético y en la amplitud de los frentes de onda según la frecuencia del láser incidente, evidenciando la relación entre la geometría del taper y la respuesta del biosensor. El estudio proporciona una base computacional para el desarrollo de biosensores fotónicos de alta sensibilidad aplicados en biomedicina y metrología óptica.

Abstract— This work presents a theoretical and numerical analysis of taper-based optical fiber biosensors using quantum propagation models and electromagnetic phenomena associated with evanescent fields. The one-dimensional Schrödinger equation was solved using the RK4 and Crank–Nicholson methods to investigate the propagation of Gaussian wave packets. In addition, the influence of wavelength on energy distribution and evanescent magnetic field generation was evaluated through the Faraday effect. The results show variations in electromagnetic confinement and wavefront amplitude as a function of the incident laser frequency, highlighting the relationship between taper geometry and biosensor response. The study provides a computational foundation for the development of high-sensitivity photonic biosensors for biomedical and optical metrology applications.

Palabras clave:

Biosensor, fibra óptica estrechada, ecuación de Schrödinger, campo evanescente, efecto Faraday.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los biosensores basados en fibras ópticas estrechadas tipo taper han adquirido relevancia en aplicaciones biomédicas, fotónicas y de metrología óptica debido a su capacidad para generar campos evanescentes altamente sensibles ante variaciones del medio circundante [1], [2]. Estos dispositivos permiten el desarrollo de sistemas de detección de alta sensibilidad para aplicaciones en biomedicina, caracterización de materiales y monitoreo de parámetros físicos y químicos.

El funcionamiento de un biosensor tipo taper depende directamente de la propagación electromagnética en regiones ópticas estrechadas, donde fenómenos asociados a la interacción onda-materia modifican el confinamiento del campo guiado y la distribución energética del sistema. En este contexto, la mecánica cuántica y los métodos numéricos constituyen herramientas fundamentales para modelar el comportamiento de paquetes de onda y analizar estados ligados y no ligados en estructuras ópticas [3], [4].

Diversos estudios han empleado la ecuación de Schrödinger para describir sistemas cuánticos asociados a propagación ondulatoria y confinamiento energético en medios materiales [5]. Asimismo, métodos numéricos como RK4 y Crank–Nicholson han demostrado estabilidad y precisión en la resolución de ecuaciones diferenciales aplicadas a sistemas físicos y fenómenos de propagación [6]. De igual manera, el efecto Faraday ha sido utilizado para el análisis de campos magnéticos evanescentes en materiales dieléctricos y estructuras ópticas basadas en sílice [7].

El problema de investigación abordado en este trabajo consiste en analizar el comportamiento de frentes de onda cuánticos y campos electromagnéticos evanescentes en biosensores tipo taper mediante modelos numéricos y físicos aplicados a estructuras ópticas estrechadas. El objetivo principal es resolver la ecuación de Schrödinger unidimensional utilizando los métodos RK4 y Crank–Nicholson para estudiar la propagación de paquetes gaussianos y evaluar la influencia de la longitud de onda sobre el confinamiento electromagnético y la respuesta del biosensor.

Para ello, se desarrolló un modelo computacional en Matlab orientado al análisis de estados ligados y no ligados, considerando parámetros ópticos asociados a fibras de sílice y el efecto Faraday para la estimación de campos magnéticos evanescentes. Los resultados obtenidos permiten establecer una relación entre la geometría del taper, la longitud de onda incidente y la distribución energética del sistema, proporcionando una base teórica para futuras aplicaciones en biosensores fotónicos y dispositivos biomédicos de alta sensibilidad.

II. RESULTADOS

A. Solución métodos numéricos Crank Nichols

Con el propósito de analizar la propagación de frentes de onda cuánticos en estructuras ópticas tipo Taper, se resolvió numéricamente la ecuación de Schrödinger unidimensional empleando el método de Runge–Kutta de cuarto orden (RK4). El modelo fue implementado en Matlab AppDesigner con visualización tridimensional de la función de onda en espacio libre. La ecuación diferencial utilizada para el análisis numérico se muestra en (1):

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= u_n + \Delta x \\ \frac{d\psi}{du} &= \frac{d\psi}{du_0} + C \frac{\Delta u}{2} \\ \frac{d\psi}{du} &= \frac{d\psi}{du} + C \frac{\Delta u}{2} \\ \psi_{n+1} &= \psi_n + \frac{d\psi}{du} \Delta u \end{aligned} \quad (1)$$

Para la simulación se consideró un ancho espacial de 0.05, una condición inicial $\psi_0 = 0$ y niveles energéticos asociados a la energía de un fotón definidos mediante (2):

$$E = \frac{8.6hf}{1eV} \quad (2)$$

donde h corresponde a la constante de Planck, c representa la velocidad de la luz y λ la longitud de onda del láser incidente. El sistema computacional permitió seleccionar diferentes longitudes de onda asociadas a láseres rojo, verde y azul mediante un menú desplegable. Posteriormente, se generaron representaciones tridimensionales de los frentes de onda propagándose en espacio libre, correspondientes a estados no ligados del sistema cuántico.

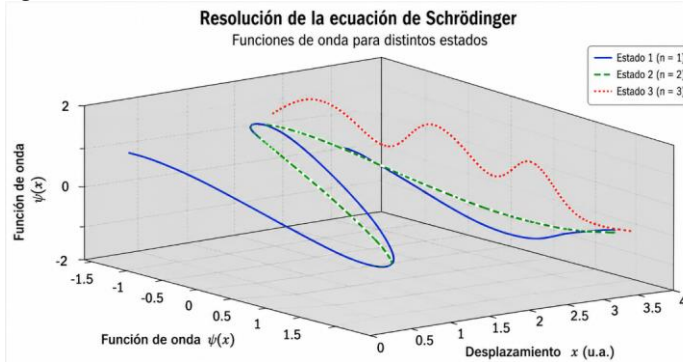


Fig 1. Representación tridimensional de las funciones de onda obtenidas mediante la solución numérica de la ecuación de Schrödinger para tres longitudes de onda diferentes. Fuente propia.

Los resultados obtenidos muestran un desplazamiento espacial y variaciones en amplitud conforme cambia la frecuencia del frente de onda incidente. Este comportamiento se encuentra directamente relacionado con la dependencia energética

respecto a la longitud de onda, donde frecuencias mayores producen modificaciones en la distribución espacial de la función de onda y en el confinamiento energético del sistema. Con el fin de analizar la dispersión de los datos asociados a las diferentes longitudes de onda, se empleó la información de Fisher como parámetro estadístico de sensibilidad. Para ello, se utilizaron archivos de datos exportados desde Matlab y se calculó la desviación estándar mediante la función $\text{std}(A)$. Posteriormente, se estimó la información de Fisher utilizando (3):

$$F = \frac{1}{\sigma} \quad (3)$$

donde σ representa la desviación estándar asociada al conjunto de mediciones. Los valores bajos de información de Fisher indican una mayor dispersión de los datos y una reducción en la sensibilidad del sistema de medición. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo poseen carácter exploratorio debido a la cantidad limitada de muestras empleadas durante el proceso de simulación. Adicionalmente, se analizó el comportamiento del campo magnético evanescente generado alrededor de la región estrechada del Taper mediante el efecto Faraday. Para ello, se consideraron constantes de Verdet asociadas a fibras ópticas de sílice y diferentes frecuencias de operación del láser incidente.

Tabla I. Resultados experimentales del campo magnético evanescente calculados a partir de mediciones basadas en el efecto Faraday. Fuente propia

Campos Magnéticos (uT)	Constante de Verdet (rad/T*m)	Frecuencia (THz)
9378	3.35	480 (Rojo)
5995	5.24	670 (Azul)
8246	3.81	580 (Verde)

Los resultados obtenidos muestran variaciones en el campo magnético evanescente conforme cambia la longitud de onda del láser incidente. Se observa que las longitudes de onda mayores producen una disminución relativa en la intensidad del campo magnético calculado, lo cual evidencia la dependencia existente entre frecuencia óptica, constante de Verdet y respuesta electromagnética del Biosensor. Para el análisis realizado se consideró un ángulo de polarización de 90° y una longitud efectiva del Taper de $50 \mu\text{m}$

B. Pozos cuánticos y paquetes Gaussianos

Con el objetivo de analizar la propagación de paquetes de onda en sistemas confinados y no confinados, se implementó un modelo numérico basado en el método de Crank–Nicholson aplicado a la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. El dominio espacial fue discretizado utilizando 200 muestras igualmente espaciadas entre un punto inicial y final definidos para la simulación. El modelo matemático parte de funciones de onda normalizadas definidas en un espacio de Hilbert,

siguiendo el procedimiento descrito en [10]. Posteriormente, se construyeron las matrices globales asociadas al sistema discretizado, mostrados en (4):

$$\phi_c^e = \begin{pmatrix} \phi_1^e = \frac{x_2 - x}{le} \\ \phi_2^e = \frac{x - x_1}{le} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\phi_d^e = \begin{pmatrix} \phi_2^{e-1} \forall x \in [x_1^{e-1}, x_2^{e-1}] \\ \phi_2^e \forall x \in [x_1^e, x_2^e] \end{pmatrix}$$

Se procede a encontrar las matrices globales:

$$A = \int_{x_1}^{x_2} \phi_c \phi_d dx$$

$$B = i \int_{x_1}^{x_2} \phi_c \phi_d dx \quad (5)$$

$$C = \frac{i\mu_e}{h} \int_{x_1}^{x_2} \phi_c \phi_d dx$$

Estas matrices permiten transformar la ecuación diferencial parcial de Schrödinger en un sistema algebraico discretizado, facilitando la implementación computacional del método de Crank–Nicholson. La formulación matricial obtenida permite calcular la evolución temporal de paquetes de onda gaussianos y analizar fenómenos de confinamiento cuántico asociados a pozos de potencial y estructuras ópticas tipo Taper. Este enfoque numérico permite calcular la evolución espaciotemporal de paquetes de onda gaussianos, así como analizar fenómenos de confinamiento cuántico y propagación óptica en estructuras tipo Taper. Además, posibilita el estudio de la interacción entre el campo evanescente, los perfiles de índice de refracción y los potenciales efectivos presentes en fibras ópticas estrechadas, modelando de forma precisa la dinámica de modos guiados y los efectos asociados a sensores magnetoópticos y biosensores híbridos.

El método de Crank–Nicholson fue seleccionado debido a su estabilidad numérica y conservación de energía durante la evolución temporal del sistema, evitando divergencias en la amplitud de la función de onda y proporcionando soluciones físicamente consistentes para estados ligados y no ligados. Para un sistema compuesto por cuatro elementos discretos se obtuvieron las matrices globales A, B y C utilizadas en la resolución numérica del sistema dinámico cuántico, primero se analizará para el caso de un sistema no ligado o en espacio libre, según (6):

$$A_{real} = \frac{le}{2} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$B_{real} = \frac{1}{le} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_{real} = \frac{\mu_e le}{6h} \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

El método de Crank–Nicholson fue seleccionado debido a su estabilidad numérica y a su capacidad para reducir problemas de divergencia durante la evolución temporal de la función de onda [10]. La formulación empleada puede expresarse como:

$$R_+ = A + \frac{h\tau}{4m} B + \frac{\tau}{2} C$$

$$R_- = A - \frac{h\tau}{4m} B - \frac{\tau}{2} C \quad (7)$$

Se aplica métodos numéricos para resolver la siguiente expresión:

$$\psi^{n+1} = R_+^{-1} R_- \psi^n \quad (8)$$

De acuerdo con Noguera (2010) se emplea el método numérico llamado Crank Nicolson, el cual es más estable en las soluciones y no tiende a divergir.

$$R_+ \psi^{n+1} = R_- \psi^n \quad (9)$$

Se muestra a continuación un paquete Gaussiano no ligado o libre, usando las matrices reales globales, se observa que un paquete tiene un patrón tipo Gaussiano con lóbulos propios de transformada de Fourier o bien óptica de Fourier.

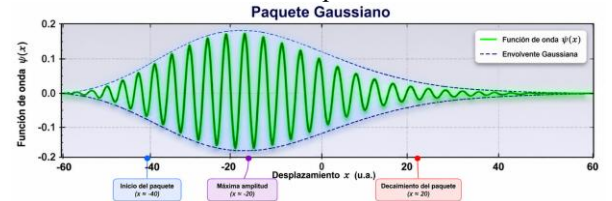


Figura 2. Representación de un paquete de onda gaussiano correspondiente a un estado cuántico no ligado. Fuente propia

En el caso de sistemas confinados, el comportamiento de la función de onda presenta características senoidales asociadas a pozos cuánticos rectangulares. Bajo estas condiciones, la geometría del Taper puede modelarse como una región de confinamiento energético donde el ancho efectivo del pozo depende directamente de la topología de la fibra óptica estrechada y de la longitud de transición del Biosensor. Los resultados obtenidos muestran que la variación geométrica del pozo modifica la distribución espacial de los nodos, máximos y mínimos de la función de onda, afectando el confinamiento energético y la propagación electromagnética dentro de la estructura óptica.

C. Uso de las expresiones de Fisher, Ley magnetóptica de Faraday y método numérico de Crank-Nichols en fibra óptica estrechada Taper

Antes de iniciar los detalles matemáticos, primero se debe analizar el concepto de un Biosensor o fibra óptica estrechada, considere la siguiente imagen tomado de M. Á. Ramírez Hernández, “Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechado de micro-fibra óptica (2010), donde muestra una fibra óptica estrechada y sus dimensiones geométricas. Obsérvese la estrechadura en la fibra óptica, en dicha sección se genera el campo magnético evanescente, propio de un frente de onda cuántico LASER.

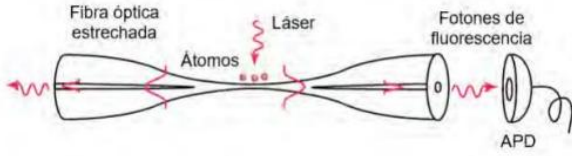


Fig 3. Configuración de una fibra óptica tipo taper acoplada a un foto detector de avalancha (APD) para la detección de señales ópticas. Tomado de [2]. Según lo denotado en la figura 12, se requiere de sensores de avalancha para determinar el comportamiento del biosensor, la información de Fisher, considere el índice de refracción del medio el cual contiene la variable estocástica y la potencia transmitida P , la información de Fisher está dada por (10):

$$I(\theta) = \frac{1}{\sigma^2} \left[T_0 L \frac{d\alpha}{d\theta} e^{-\alpha L} \right]^2 \quad (10)$$

Ahora se procede a realizar cálculos para obtener los parámetros óptimos del biosensor usando la información de Fisher, usando los siguientes datos del biosensor:

1. Potencia normalizada $T_0 = 1$
2. $n_{\text{revestimiento}} = 1.444$
3. Varianza de ruido $\sigma^2 = 10^{-5}$
4. Coeficiente de atenuación $a_0 = 4 \times 10^{33}$

penetración, la profundidad del campo magnético evanescente está dado por (11):

$$\delta(n) = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{\text{revestimiento}}^2 - n^2}} \quad (11)$$

Para obtener la transmisión de potencia óptica en el biosensor se recurre a (12):

$$T(n) = T_0 e^{(-a_0(n - n_{\text{reves}})^2 L)} e^{\frac{-r}{\delta(n)}} \quad (12)$$

Para la información de Fisher se recurren a métodos numéricos dados por (13):

$$F = \sum_i^n \left[\frac{dT}{dn} \right]^2 \Delta n \quad (13)$$

Los valores máximos para Fisher $F=1$, se obtienen cuando el campo evanescente es fuerte, las pérdidas no son excesivas y la derivada óptica respecto al índice externo es máxima.

Longitud óptima = 30.00 mm

Radio óptimo = 24.33 μm

Fisher máxima = 1.0000

Se muestra a continuación una imagen realizada en OPENAI de un Biosensor con las características optimas de Fisher



Fig 4. Diseño conceptual de un biosensor basado en fibra óptica tipo taper optimizado mediante el criterio de Fisher para maximizar la sensibilidad y la capacidad de discriminación. Fuente: Elaboración propia con asistencia de IA generativa (OpenAI)

Una vez que obtenemos los parámetros de Fisher, se procede a entrelazar el método de Crank Nichols para un biosensor, considere la matriz identidad I y el campo H evanescente, el método de Crank Nichols establece que:

$$\left(I + \frac{i\Delta z}{2} H \right) \psi^{n+1} = \left(I - \frac{i\Delta z}{2} H \right) \psi^n \quad (14)$$

Se muestra a continuación una propagación de un frente de onda en un biosensor, denótese la función probabilista del frente de onda, el potencial del Taper y el campo magnético evanescente, obsérvese que este último aparece el máximo en la zona de estrechadura y como el potencial del taper causa un efecto de pozo cuántico, en la sección de anexos aparece el programa realizado en Matlab.

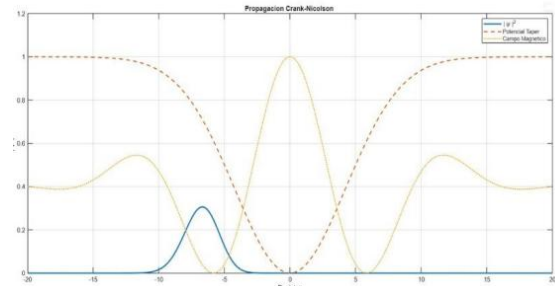


Figura 5. Representación numérica de un paquete de onda utilizado en la modelación de un biosensor basado en fibra óptica, obtenida mediante MATLAB. Fuente propia.

Se muestra también el campo magnético evanescente en el Taper, el potencial en el biosensor y la función de densidad de probabilidad del biosensor:

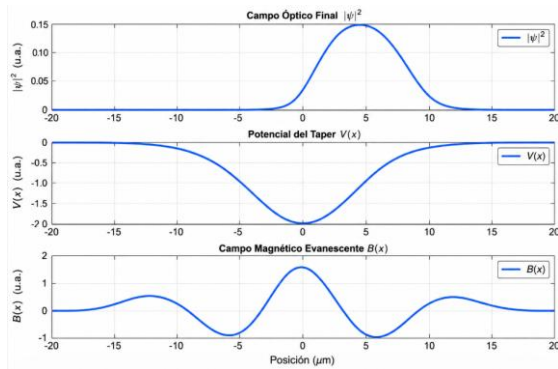


Figura 6. Simulación del comportamiento cuántico en un biosensor basado en fibra óptica tipo taper, mostrando la distribución del campo óptico, el potencial efectivo y el campo magnético evanescente obtenidos mediante MATLAB. Fuente propia

Una característica es el potencial en el biosensor, dicho potencial eléctrico causa un pozo cuántico de un frente de onda LASER aplicado al biosensor, el cual depende la longitud del biosensor, está dado por:

$$V = k_0 \frac{(n_{reves} + (n_n - n_{reves})e^{\frac{-x^2}{a(x)} - n_0^2})}{2n_0} \quad (15)$$

Estos análisis pretenden dar a conocer el comportamiento de frentes de onda en una fibra óptica estrechada y sus aplicaciones en biomedicina, como una fibra óptica o Taper de bajo costo, puede funcionar para medir el coeficiente de refracción de medio y la Detección de patógenos en fluidos contaminados, se pretende dar a conocer los aspectos teóricos para el diseño de sensores ópticos, circuitos integrados fotonicos y sensores aplicados a la medicina.

III. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la ecuación de Schrödinger unidimensional puede resolverse de manera estable mediante métodos numéricos como RK4 y Crank–Nicholson, permitiendo analizar la propagación de funciones de onda asociadas a estructuras ópticas tipo Taper. El método RK4 mostró un comportamiento adecuado para el análisis de estados estacionarios y estados ligados, mientras que el método de Crank–Nicholson presentó estabilidad numérica en la simulación temporal de paquetes de onda gaussianos propagándose en espacio libre y medios confinados.

El análisis de paquetes gaussianos evidenció que la distribución espacial de la función de onda depende directamente de la longitud de onda y de las condiciones geométricas del sistema óptico. En los estados no ligados se observó una envolvente de comportamiento gaussiano con propagación libre, mientras que en sistemas confinados la función de onda presentó patrones senoidales asociados a pozos cuánticos rectangulares, permitiendo controlar nodos, máximos y niveles energéticos del sistema.

Asimismo, los resultados obtenidos muestran que la geometría del Taper modifica el confinamiento electromagnético y la distribución energética de los frentes de onda propagados en la fibra óptica. La región estrechada del Biosensor genera campos

evanescentes cuya intensidad depende de la frecuencia del láser incidente, de la constante de Verdet y de las propiedades ópticas del material dieléctrico utilizado.

Por otra parte, la información de Fisher permitió evaluar la dispersión estadística asociada a los datos simulados y analizar la sensibilidad del sistema de medición. Se observó que una mayor desviación estándar produce una disminución en la cantidad de información disponible para la estimación de parámetros físicos, afectando la precisión del sistema óptico.

REFERENCIAS

- [1] J. Cascante Vindas, *Generación de supercontinuo en fibras microestructuradas con bombeos cuascontinuos*, Tesis doctoral, Universidad de Valencia, 2010.
- [2] M. Á. Ramírez Hernández, *Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechador de micro-fibra óptica*, Tesis de Ingeniería Física, Centro de Investigaciones en Óptica, 2022.
- [3] E. Martínez Vargas, *Parámetros aleatorios e inferencia bayesiana en metrología cuántica*, Tesis universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [4] *Mecánica Cuántica Blog*, “Solución numérica de la ecuación de Schrödinger,” 2019. Disponible en: <https://la-mecanicaquantica.blogspot.com/2010/11/solucion-numericade-la-ecuacion-de.html>
- [5] Universidad de Sonora, “Caracterización de pozos cuánticos múltiples asimétricos.” Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/21946/capitulo3.pdf>
- [6] N. E. González Sierra, *Análisis de la propagación de la radiación en guías de onda ópticas con dimensiones menores a la longitud de onda de operación*, Tesis de Maestría, 2015.
- [7] N. Santisteban, N. De la Rosa, G. Arenas y F. Fajardo, “Medida de la constante de Verdet en el efecto Faraday con un equipo de bajo costo,” Universidad de Colombia.
- [8] M. Henri, “Efecto Faraday,” 2016. Disponible en: <http://marchenry.org/2014/03/17/effet-faraday/>
- [9] D. Noguera, *Método de elementos finitos aplicado a la ecuación de Schrödinger en una dimensión*, Tesis universitaria, Universidad Nacional de Asunción, 2010.
- [10] J. Navajas Alba, *Control electrónico de un sistema de estiramiento de fibra óptica*, Tesis universitaria, Universidad de Valencia, 2011.
- [11] S. Marrujo García, *Adelgazamiento de una fibra monomodo de sílice y su caracterización espectral*, Tesis universitaria, Instituto Politécnico Nacional, 2015.
- [12] M. Planillo Carrera, *Estudio experimental de fibras estrechadas para su uso como sensores de fibra óptica*, Tesis universitaria, Universidad de Navarra, 2017.
- [13] T. Guo, “Fiber-optic evanescent field absorption sensors: A review,” *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 17583–17600, 2012.
- [14] L. Tong and X. Guo, “Optical microfibers and nanofibers,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 1, no. 1, pp. 1–22, 2007.
- [15] J. C. Knight, G. Cheung, F. Jacques and T. A. Birks, “Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper,” *Optics Letters*, vol. 22, no. 15, pp. 1129–1131, 1997.
- [16] J. Crank and P. Nicolson, “A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type,” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 43, no. 1, pp. 50–67, 1947.
- [17] A. K. Zvezdin and V. A. Kotov, *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1997.

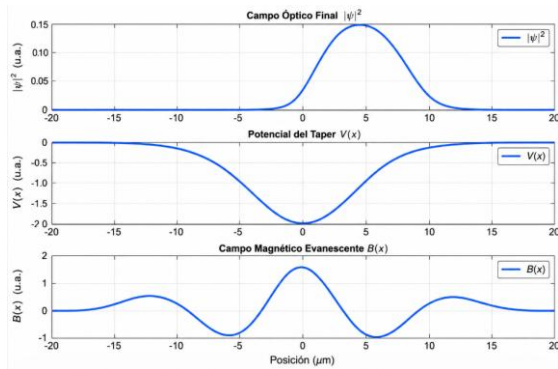


Figura 6. Simulación del comportamiento cuántico en un biosensor basado en fibra óptica tipo taper, mostrando la distribución del campo óptico, el potencial efectivo y el campo magnético evanescente obtenidos mediante MATLAB. Fuente propia

Una característica es el potencial en el biosensor, dicho potencial eléctrico causa un pozo cuántico de un frente de onda LASER aplicado al biosensor, el cual depende la longitud del biosensor, está dado por:

$$V = k_0 \frac{(n_{reves} + (n_n - n_{reves})e^{\frac{-x^2}{a(x)} - n_0^2})}{2n_0} \quad (15)$$

Estos análisis pretenden dar a conocer el comportamiento de frentes de onda en una fibra óptica estrechada y sus aplicaciones en biomedicina, como una fibra óptica o Taper de bajo costo, puede funcionar para medir el coeficiente de refracción de medio y la Detección de patógenos en fluidos contaminados, se pretende dar a conocer los aspectos teóricos para el diseño de sensores ópticos, circuitos integrados fotonicos y sensores aplicados a la medicina.

III. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la ecuación de Schrödinger unidimensional puede resolverse de manera estable mediante métodos numéricos como RK4 y Crank–Nicholson, permitiendo analizar la propagación de funciones de onda asociadas a estructuras ópticas tipo Taper. El método RK4 mostró un comportamiento adecuado para el análisis de estados estacionarios y estados ligados, mientras que el método de Crank–Nicholson presentó estabilidad numérica en la simulación temporal de paquetes de onda gaussianos propagándose en espacio libre y medios confinados.

El análisis de paquetes gaussianos evidenció que la distribución espacial de la función de onda depende directamente de la longitud de onda y de las condiciones geométricas del sistema óptico. En los estados no ligados se observó una envolvente de comportamiento gaussiano con propagación libre, mientras que en sistemas confinados la función de onda presentó patrones senoidales asociados a pozos cuánticos rectangulares, permitiendo controlar nodos, máximos y niveles energéticos del sistema.

Asimismo, los resultados obtenidos muestran que la geometría del Taper modifica el confinamiento electromagnético y la distribución energética de los frentes de onda propagados en la fibra óptica. La región estrechada del Biosensor genera campos

evanescentes cuya intensidad depende de la frecuencia del láser incidente, de la constante de Verdet y de las propiedades ópticas del material dieléctrico utilizado.

Por otra parte, la información de Fisher permitió evaluar la dispersión estadística asociada a los datos simulados y analizar la sensibilidad del sistema de medición. Se observó que una mayor desviación estándar produce una disminución en la cantidad de información disponible para la estimación de parámetros físicos, afectando la precisión del sistema óptico.

REFERENCIAS

- [1] J. Cascante Vindas, *Generación de supercontinuo en fibras microestructuradas con bombeos cuasicontinuos*, Tesis doctoral, Universidad de Valencia, 2010.
- [2] M. Á. Ramírez Hernández, *Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechador de micro-fibra óptica*, Tesis de Ingeniería Física, Centro de Investigaciones en Óptica, 2022.
- [3] E. Martínez Vargas, *Parámetros aleatorios e inferencia bayesiana en metrología cuántica*, Tesis universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [4] *Mecánica Cuántica Blog*, “Solución numérica de la ecuación de Schrödinger,” 2019. Disponible en: <https://la-mecanicaquantica.blogspot.com/2010/11/solucion-numericade-la-ecuacion-de.html>
- [5] Universidad de Sonora, “Caracterización de pozos cuánticos múltiples asimétricos.” Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/21946/capitulo3.pdf>
- [6] N. E. González Sierra, *Análisis de la propagación de la radiación en guías de onda ópticas con dimensiones menores a la longitud de onda de operación*, Tesis de Maestría, 2015.
- [7] N. Santisteban, N. De la Rosa, G. Arenas y F. Fajardo, “Medida de la constante de Verdet en el efecto Faraday con un equipo de bajo costo,” Universidad de Colombia.
- [8] M. Henri, “Efecto Faraday,” 2016. Disponible en: <https://marchenry.org/2014/03/17/effet-faraday/>
- [9] D. Noguera, *Método de elementos finitos aplicado a la ecuación de Schrödinger en una dimensión*, Tesis universitaria, Universidad Nacional de Asunción, 2010.
- [10] J. Navajas Alba, *Control electrónico de un sistema de estiramiento de fibra óptica*, Tesis universitaria, Universidad de Valencia, 2011.
- [11] S. Marrujo García, *Adelgazamiento de una fibra monomodo de sílice y su caracterización espectral*, Tesis universitaria, Instituto Politécnico Nacional, 2015.
- [12] M. Planillo Carrera, *Estudio experimental de fibras estrechadas para su uso como sensores de fibra óptica*, Tesis universitaria, Universidad de Navarra, 2017.
- [13] T. Guo, “Fiber-optic evanescent field absorption sensors: A review,” *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 17583–17600, 2012.
- [14] L. Tong and X. Guo, “Optical microfibers and nanofibers,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 1, no. 1, pp. 1–22, 2007.
- [15] J. C. Knight, G. Cheung, F. Jacques and T. A. Birks, “Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper,” *Optics Letters*, vol. 22, no. 15, pp. 1129–1131, 1997.
- [16] J. Crank and P. Nicolson, “A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type,” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 43, no. 1, pp. 50–67, 1947.
- [17] A. K. Zvezdin and V. A. Kotov, *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1997.