

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2025,
Volumen 9, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

SIMULACIÓN EN MATLAB DE LA DIFRACCIÓN DE FRESNEL

MATLAB SIMULATION OF FRESNEL DIFFRACTION

Mauricio Ortíz Gutiérrez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Alberto Martínez Hernández

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Mary Carmen Peña Gomar

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Mario Pérez Cortés

Universidad Autónoma de Yucatán, México

Simulación en Matlab de la Difracción de Fresnel

Mauricio Ortíz Gutiérrez¹

mauricio.ortiz@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7403-3815>

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo
Morelia Michoacán México. C.P. 58060

Alberto Martínez Hernández

1630419k@umich.mx

<https://orcid.org/0009-0006-4323-1206>

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo
Morelia Michoacán México. C.P. 58060

Mary Carmen Peña Gomar

mgomar@umich.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2132-7830>

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo
Morelia Michoacán México. C.P. 58060

Mario Pérez Cortés

mperez.cortez@correo.uady.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0281-4449>

Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Yucatán
México

RESUMEN

La difracción es un fenómeno físico que se presenta cuando un haz de luz monocromática incide en una apertura, o en un obstáculo, de forma y tamaño arbitrarios se desvía de su trayectoria rectilínea hacia direcciones discretas produciendo sobre una pantalla un patrón de difracción. Si la distancia entre la apertura y la pantalla es pequeña, la difracción es de campo cercano o de Fresnel; si la distancia es muy grande, entonces se llama difracción de campo lejano o de Fraunhofer. Para conocer la forma que tiene los patrones de difracción se resuelve la integral que corresponda a cada caso. En este trabajo se presenta un algoritmo para resolver la integral de difracción de Fresnel de manera indirecta haciendo uso de la transformada de Fourier y sus propiedades y la convolución de funciones. Las funciones necesarias para resolver la integral de difracción son la función de transmitancia que define la forma de la apertura u obstáculo que difracta la luz, y la función de respuesta al impulso que caracteriza a la propagación libre de la luz. Se presentan resultados de los patrones de difracción obtenidos con el código desarrollado.

Palabras clave: integral de difracción de fresnel, transformada de Fourier, convolución, función de respuesta al impulso

¹ Autor principal

Correspondencia: m.perez.cortes@correo.uady.mx

Matlab Simulation of Fresnel Diffraction

ABSTRACT

Diffraction is a physical phenomenon that occurs when a beam of monochromatic light incident on an aperture, or an obstacle, of arbitrary shape and size deviates from its rectilinear path towards discrete directions, producing a diffraction pattern on a screen. If the distance between the aperture and the screen is small, the diffraction is near-field or Fresnel; If the distance is considerable, it is called far-field or Fraunhofer diffraction. The integral corresponding to each case is solved to know the shape of the diffraction patterns. This work presents an algorithm to indirectly solve the Fresnel diffraction integral using the Fourier transform and its properties and the convolution of functions. The functions necessary to solve the diffraction integral are the transmittance function that defines the shape of the aperture or obstacle that diffracts the light and the impulse response function that characterizes the free propagation of light. Furthermore, this work presents the results obtained with the developed code.

Keywords: fresnel diffraction integral, fourier transform, convolution, impulse response function

*Artículo recibido 05 enero 2025
Aceptado para publicación: 10 febrero 2025*



INTRODUCCIÓN

El primero en observar el efecto de difracción fue el matemático, físico y astrónomo italiano Francesco Maria Grimaldi (R. Cecchin2i & G. Pelosi., 1990) y es a quien se le atribuye el uso de la palabra difracción que proviene del latín *diffringere* (*dis* y *frangere*) que se puede interpretar como *romper en pedazos* o *romper en diferentes direcciones*. Su trabajo fue publicado en el libro *De Lumine* en Bologna en 1665 dos años después de su muerte. Posterior a los trabajos de Grimaldi, diversos personajes importantes han contribuido al desarrollo de la teoría de la difracción tal como Issac Newton, Thomas Young, Christiaan Huygens, entre otros.

La difracción de la luz es un fenómeno que ocurre cuando las ondas de luz encuentran un obstáculo o abertura y se desvían al pasar a través o alrededor de él. Cuando esto sucede, los frentes de onda de las ondas de luz se alteran, lo que hace que la luz se doble y se propague en varias direcciones (E. Hecht, 2012). El tamaño del obstáculo o de la abertura en relación con la longitud de onda de la luz influye en la difracción. Supóngase que el obstáculo o la abertura es mucho mayor que la longitud de onda de la onda que se difracta. En ese caso, los efectos de difracción son mínimos y la luz se comporta más como rayo y la óptica geométrica puede predecir su comportamiento. Sin embargo, la difracción se vuelve significativa cuando el obstáculo o la apertura es del orden de la longitud de onda. Cuando esto sucede el comportamiento ondulatorio se vuelve evidente.

La difracción también es responsable del comportamiento de la luz en diversos instrumentos ópticos como microscopios y telescopios. La difracción puede imponer limitaciones al poder de resolución de los dispositivos ópticos, afectando su capacidad para distinguir entre objetos muy cercanos. Hay dos tipos de difracción: la difracción de campo cercano, conocida como difracción de Fresnel y, la difracción de campo lejano, también llamada difracción de Fraunhofer (J. W. Goodman, 2005; Fred Lytle, 1999; Lytle, Fred, 1999).

Uno de los ejemplos típicos de difracción de Fresnel es el experimento de la doble abertura o experimento de Young. Cuando un haz de luz esférico ilumina la doble abertura, aparece en una pantalla distante un patrón de interferencia modulado por efectos de difracción. Es necesario resolver la integral de difracción de Fresnel para la doble abertura para encontrar la expresión matemática que describa este patrón. Abedin, Islam y Haider (K. Abedin et al, 2007), Abedin y Rahman (K. M. Abedin & S. M. Rahman, 2012) y Dauger



(D. E. Dauger, 1996) resolvieron este problema y demostraron que la solución depende de las conocidas funciones denominadas integrales de Fresnel (K. D. Mielenz, 1997) . Se requiere utilizar software especializado como Mathematica o Matlab, entre otros, para visualizar el patrón generado por la doble abertura (K. M. Abedin & S. M. Rahman, 2015). El problema se complica si existen tres o más aberturas con formas arbitrarias (S. Trester, 1999, Gröber, S., et. al., 2014; Cui, Y., et. al., 2015; Sheppard, C. J. R., 2015) por lo que los métodos propuestos en la literatura no ofrecen una solución adecuada.

Los efectos de la difracción son evidentes en la vida diaria principalmente a través de dispositivos cuyo funcionamiento es regido por difracción. Por ejemplo, los espectrómetros usan una rejilla de difracción para separar las líneas espectrales de un haz de luz; la difracción también se usa para conocer la estructura de materiales a través de los rayos X; entre otros.

Este trabajo resuelve este problema gráficamente utilizando un código escrito en Matlab. El código proporciona la solución gráfica de la integral de difracción de Fresnel utilizando la transformada de Fourier (Goodman, 2005; Trester, 1999). Sólo es necesario introducir la imagen de las aberturas para proporcionar el resultado gráficamente. Este programa es útil en los cursos universitarios de óptica porque ayuda a profesores y estudiantes a visualizar los patrones de difracción generados con las aberturas deseadas.

METODOLOGÍA

Para comprender el comportamiento en la propagación libre de un campo de luz que emite una fuente puntual, conocido como teoría escalar de difracción se parte del teorema de Green y la ecuación de Helmholtz. Usando estas dos herramientas matemáticas y la expresión de una onda esférica se demuestra (J. W. Goodman, 2005) que los valores de un campo propagado dependen de los valores que tenga sobre una superficie arbitraria. Kirchhoff propuso el uso de una pantalla opaca que contenía una pequeña apertura de forma arbitraria y estableció las condiciones de frontera. Con ello, se encontró que los valores del campo propagado una distancia arbitraria que pasa a través de una abertura dependen de la forma geométrica de esta.

También contribuyeron al desarrollo de la teoría escalar de difracción científicos como Jonh William Strutt conocido como Lord Rayleigh (1842-1919) y Arnold Sommerfeld (1868-1951), sin embargo, es a Augustin Fresnel a quien se le atribuye el análisis de un campo de luz difractado por una abertura en distancias



cercanas al plano que contiene la abertura. Los resultados obtenidos por Fresnel se concentran en la conocida integral de difracción de Fresnel o de campo cercano. Finalmente, Joseph von Fraunhofer analizó el campo de luz en distancias lejanas al plano de la abertura encontrando que el campo difractado está dado por la transformada de Fourier de la función de la abertura, y es a quien se le atribuye la integral de difracción de Fraunhofer o de campo lejano. Esta última no es analizada en este trabajo.

La Figura 1 muestra el esquema que representa la difracción de campo cercano. El campo de luz pasa a través de la abertura (colocada en el plano xy) y produce un patrón de difracción en el plano (x_1, y_1) . La integral de difracción de Fresnel está representada en la ec. (1)

$$u(x_1, y_1) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(x, y) \exp\left\{i \frac{k}{2z} [(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2]\right\} dx dy \quad , \quad (1)$$

donde $k=2\pi/\lambda$, $u_0(x, y)$ es la función de transmitancia de la abertura y z es la distancia de propagación que existe entre el plano de la abertura y el plano de observación (ver Fig.1).

Otra forma de expresar la ec. (1) es mediante la convolución de dos funciones, es decir

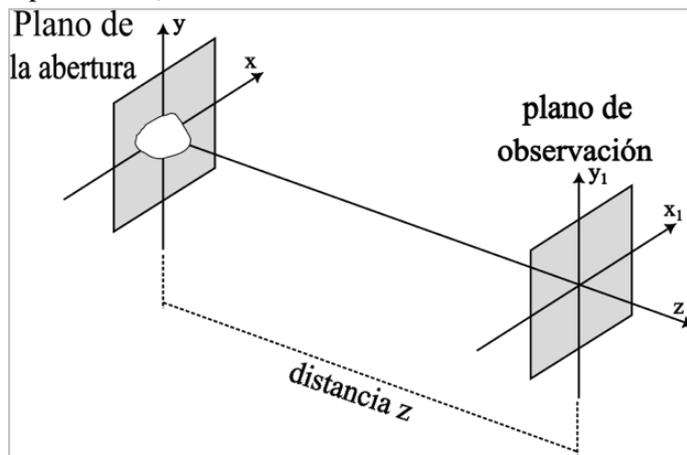
$$u(x_1, y_1) = u_0(x_1, y_1) * h(x_1, y_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(x, y) h(x_1 - x, y_1 - y) dx dy \quad , \quad (2)$$

donde el símbolo $*$ representa la convolución de las funciones $u_0(x_1, y_1)$ y $h(x_1, y_1)$, siendo h la función de respuesta al impulso (FRI) dada por

$$h(x_1, y_1) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z} (x_1^2 + y_1^2)\right] \quad . \quad (3)$$



Figura 1. Esquema de la difracción de Fresnel. El haz de luz incide desde la izquierda de la figura (no representado).



La ventaja de utilizar esta forma de la integral de difracción de Fresnel radica en que se puede usar el teorema de la transformada de Fourier de la convolución de dos funciones. Este teorema establece que la transformada de Fourier de la convolución de dos funciones es el producto de la transformada de Fourier de cada función (P. Hsu Hwei, 1976). Por tanto, la transformada de Fourier, $U(v, \mu)$, de la ec. (2) está dada por

$$U(v, \mu) = F\{u(x_1, y_1)\} = F\{u_0(x, y)\}F\{h(x_1, y_1)\} \quad , \quad (4)$$

donde F representa la transformada de Fourier y se tienen las relaciones siguientes

$$F\{u_0(x, y)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, y) \exp\{-i2\pi[(v - x)^2 + (\mu - y)^2]\} dx dy \quad , \quad (5)$$

$$F\{h(x_1, y_1)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x_1, y_1) \exp\{-i2\pi[(v - x)^2 + (\mu - y)^2]\} dx dy. \quad (6)$$

Por tanto, el campo difractado se obtiene por la transformada inversa de Fourier de la ec. (4) y se representa en la ec. (7)

$$u(x_1, y_1) = F^{-1}\{U(v, \mu)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} U_0(v, \mu) H(v, \mu) \exp\{i2\pi[(v - x)^2 + (\mu - y)^2]\} dv d\mu \quad . \quad (7)$$

La ec. (7) es el campo difractado y es analizado en un plano cercano a la abertura. Sin embargo, lo que es posible observar mediante una cámara, sensor electrónico o con el ojo humano es la irradiancia, que se relaciona con la energía contenida en el campo de luz y se puede calcular según la ec. (8).

$$I(x_1, y_1) = |u(x_1, y_1)|^2 = u(x_1, y_1)u^*(x_1, y_1) \quad . \quad (8)$$

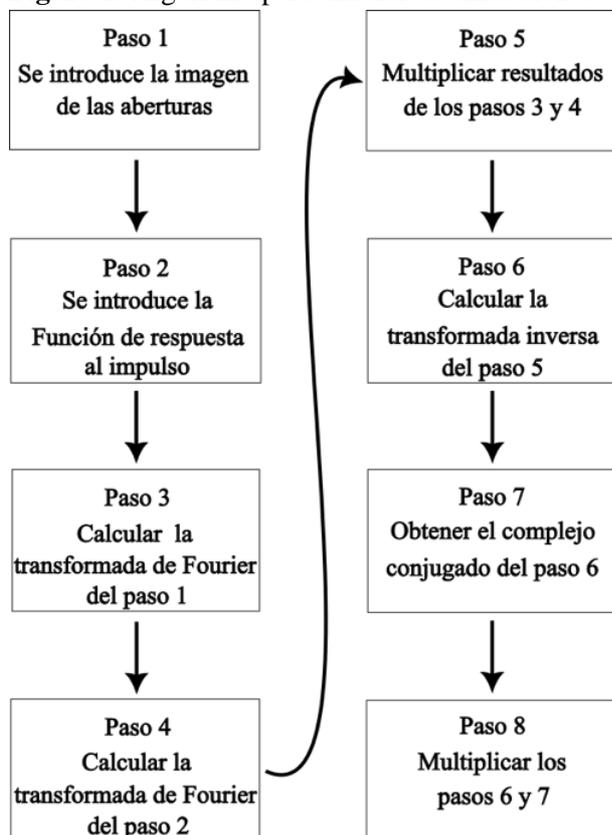
Como puede verse, la ec. (8) está dada por el producto del campo difractado y el complejo conjugado del mismo. De esta manera cualquier cámara o sensor registra la energía del campo difractado dada por la irradiancia.

La forma de resolver la integral de difracción de campo cercano (ec. 1) fue propuesta por Goodman (J. W. Goodman, 2005) y es un procedimiento que puede ser simulado en una computadora.

Simulación y resultados

En este trabajo se creó un algoritmo para resolver la integral de difracción de Fresnel siguiendo el método detallado en la sección anterior. En la Figura 2 se presenta el algoritmo para generar el código en Matlab que resuelve gráficamente la integral de Fresnel.

Figura 2. Algoritmo para simular de difracción de Fresnel.

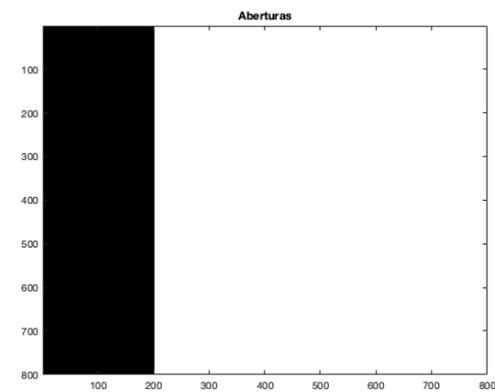


Como se aprecia en el algoritmo mostrado en la Figura 2, el primer paso es la introducción de la imagen de las aberturas. El formato del archivo puede ser jpg, png, bmp, etc., de cualquier tamaño. La forma de las aberturas también puede ser arbitrario. En el paso 2 se introduce la función de respuesta al impulso (FRI) mostrada en la ec. (3). En los pasos 3 y 4 se calcula la transformada de Fourier de la imagen de la abertura y de la FRI. Una vez que se tengan calculadas las transformadas se multiplican ambos resultados en el paso

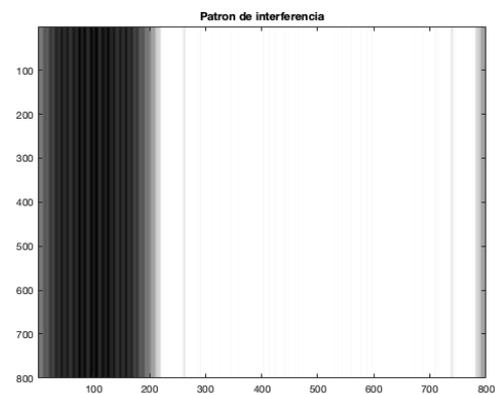
5. Posteriormente, se calcula la transformada inversa de Fourier (paso 6) y se obtiene el conjugado del campo (paso 7), y finalmente, en el paso 8 se calcula la irradiancia del campo dada por el producto de los pasos 6 y 7. En el apéndice A se presenta el código completo en Matlab.

Como ejemplo del funcionamiento del código en Matlab, en la Figura 3 se muestra su uso para un caso típico que se presenta al estudiar la difracción de Fresnel que corresponde a una abertura con borde recto (Fig. 3(a)). El patrón que se obtiene corresponde a lo reportado en la literatura (S. George, 1972).

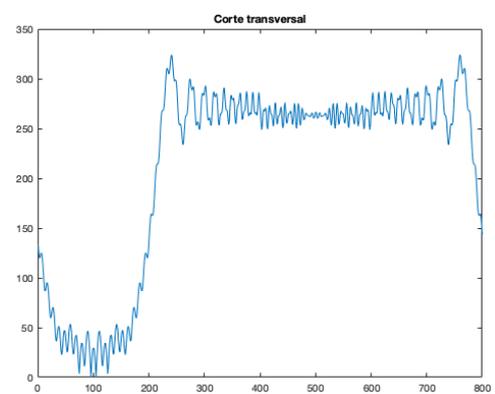
Figura 3. Patrón de difracción de Fresnel simulado de una abertura con borde recto. (a) abertura utilizada, (b) patrón difractado y (c) perfil del patrón. La difracción se analiza a la distancia $z=0.6$ u. a.



(a)



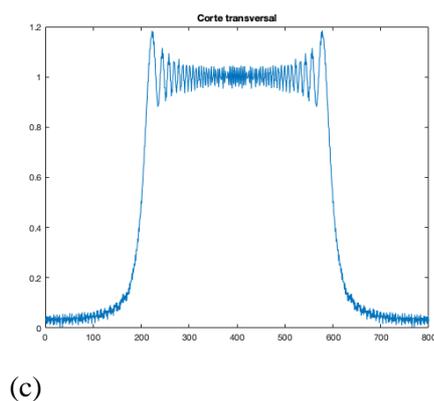
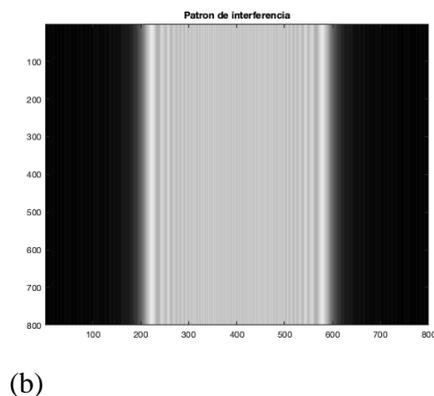
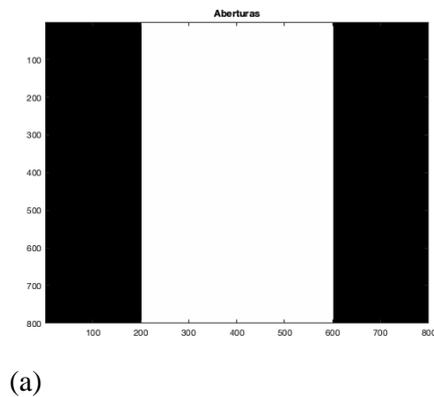
(b)



(c)

En la Figura 4 se muestra otro caso de difracción de Fresnel de una abertura con dos bordes rectos. La abertura utilizada es similar a la mostrada en la Figura 3, y también se puede interpretar como una función rectángulo (J. W. Goodman, 2005) unidimensional.

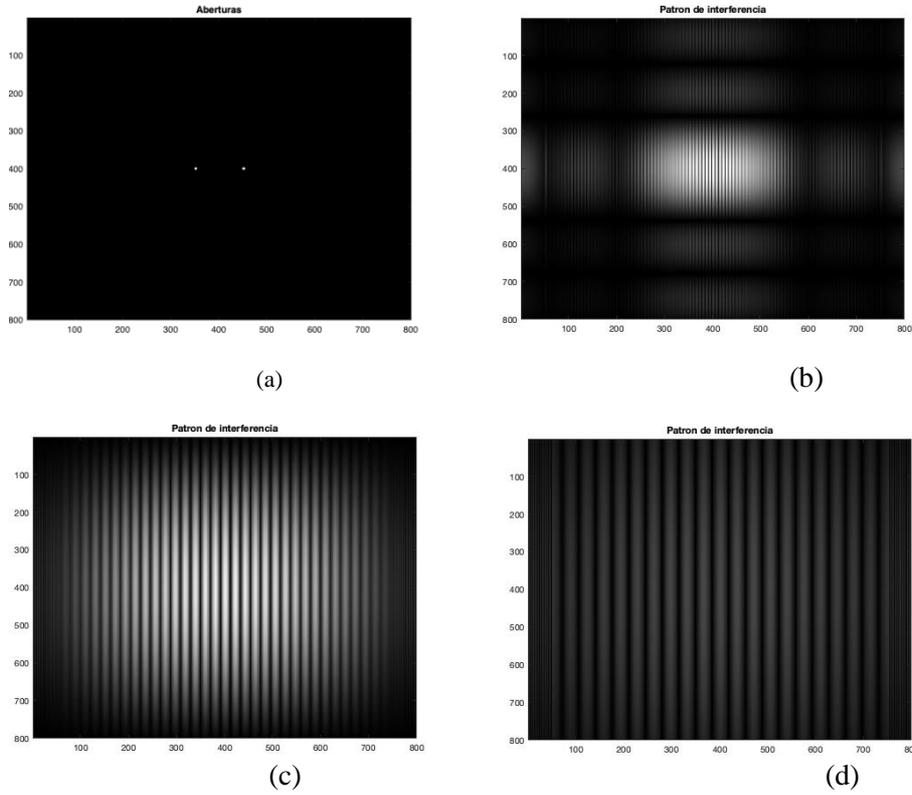
Figura 4. Patrón de difracción de Fresnel simulado de una abertura con dos bordes rectos. (a) imagen de la abertura (b) patrón difractado y (c) perfil del patrón. La distancia de observación es $z=0.6$ u. a.



En la figura 5 se muestra el ejemplo típico de la difracción de dos fuentes puntuales equidistantes del centro de la imagen. Dos aberturas cuadradas separadas una distancia producen un patrón de interferencia modulado por difracción que depende de la forma geométrica de las aberturas. En el centro de la Figura 3(a) se observa una zona de interferencia rodeada de otras zonas de interferencia de menor intensidad. Esto

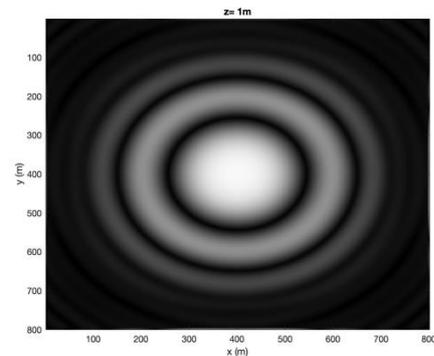
es debido a la modulación provocada por la forma de las aberturas, esta imagen se capturó a la distancia $z=0.2$ unidades arbitrarias (u.a.). En las Figuras 3(c) y 3(d) se muestran los patrones difractados 0.6 y 1 u.a. respectivamente.

Figura 5. Imágenes para mostrar el funcionamiento del código propuesto (a) un par de aberturas cuadradas y el campo difractado (b) 0.2, (c) 0.6 y (d) 1 unidades arbitrarias.



Finalmente, en la Figura 6 se muestra un ejemplo de la difracción de Fresnel de dos fuentes puntuales colocadas una detrás de la otra separadas una distancia z arbitraria. Es conocido que esta forma de la disposición de las fuentes es similar al interferómetro de Michelson (E. Hecht, 2012) que produce franjas circulares, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Patrón de interferencia modulado por difracción de dos fuentes puntuales colocadas una detrás de la otra.



CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló y presentó un código computacional escrito en Matlab, diseñado específicamente para simular el patrón de difracción de Fresnel. Este fenómeno es un caso particular de la difracción, y su análisis es fundamental en el estudio de la óptica ondulatoria. El código implementado utiliza herramientas matemáticas, como la convolución y la transformada de Fourier, para abordar la solución de la integral de difracción de Fresnel, que describe la propagación de ondas electromagnéticas bajo ciertas condiciones. Estas técnicas permiten obtener resultados precisos y eficientes, facilitando el estudio y análisis de diferentes configuraciones experimentales.

Como parte del análisis y validación del código, se seleccionó como caso de estudio el fenómeno de difracción en una doble rendija, también conocido como el experimento de Young. Este experimento es un hito histórico en la física, ya que demuestra de manera evidente la naturaleza ondulatoria de la luz. En la simulación, se reprodujeron las condiciones típicas del experimento, y los resultados obtenidos fueron comparados con los patrones de interferencia esperados teóricamente.

Los resultados mostraron que el código es capaz de reproducir adecuadamente los patrones de interferencia característicos del experimento de Young, validando así su efectividad y precisión. Esto confirma que las herramientas computacionales utilizadas son apropiadas para resolver problemas de óptica basados en el enfoque de Fresnel. Además, el uso de Matlab proporcionó un entorno versátil y eficiente para realizar simulaciones, lo que abre la posibilidad de extender este trabajo a otros casos más complejos. En conclusión, el código desarrollado no solo es una herramienta útil para entender y estudiar el patrón de difracción de Fresnel, sino que también contribuye a la enseñanza y la investigación en el campo de la óptica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cui, Y., Zhang, W., Wang, J., Zhang, M., & Teng, S. (2015). Fresnel diffraction of aperture with rough edge. *Journal of Optics*, 17(6), 065607. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/6/065607>.
- D. E. Dauger, (1996). "Simulation and study of Fresnel diffraction for arbitrary two-dimensional apertures", *Computers in physics*, 10(6), 591-604. <https://doi.org/10.1063/1.168584>.
- E. Hecht, (2012). "Optics", Pearson Education India.



- Fred Lytle (1999). An Introduction to Diffraction. Part I: The Near Field. Applied Spectroscopy, Vol. 53, No. 6, pp. 212A–227A. Available at [Applied Spectroscopy journal](#).
- Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B., & Jodl, H.-J. (2014). Diffraction and interference—a standard teaching topic using non-standard diffracting objects. European Journal of Physics, 35(1), 015003. DOI: [10.1088/0143-0807/35/1/015003](#).
- J. W. Goodman, (2005). “Introduction to Fourier optics”, Roberts and Company publishers.
- K. D. Mielenz, (1997). “Computation of Fresnel integrals”, J. Research of the National Institute of Standard and Technology, 102(3), 363.
- K. M. Abedin, S. M. Rahman, (2015). “Fresnel diffraction from N-apertures: computer simulation by iterative Fresnel integrals method,” Optik, 123(23), 3743-3751.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.08.178>.
- K. M. Abedin, M. R. Islam, A. F. M. Haider. (2007). “Computer simulation of Fresnel diffraction from rectangular apertures and obstacles using the Fresnel integral approach.” Opt. and Laser Tech, 39(2), 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2005.08.011>.
- K. M. Abedin, S. M. Rahman, (2012). “Computer simulation of Fresnel diffraction from double rectangular apertures in one and two dimensions using the iterative Fresnel integrals method”, Opt and Laser Tech., 44(2), 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.08.001>.
- Lytle, Fred. (1999). An Introduction to Diffraction. Part II: The Far Field. Applied Spectroscopy, 53(6), 228A–243A. This article explores diffraction in the far-field regime, focusing on the Fraunhofer approximation and its applications in optical systems.
- P. Hsu Hwei, (1976). ”Análisis de Fourier”, Fondo de Cultura Económica.
- R. Cecchinzi, G. Pelosi, (1990). “Diffraction: the first recorded observation”, IEEE Antennas and propagation Mag., 32(2), 27-30. <https://doi.org/10.1109/74.80496>.
- Sheppard, C. J. R. (2015). Diffraction of a focused wave by an aperture: a new perspective. Journal of the Optical Society of America A, 32(4), 623–629. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.32.000623>.
- S. George, (1972). “Straight edge diffraction using a laser”, Phys. Educ. 7, 349- 351.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/7/6/004>.



S. Trester, (1999). "Computer-simulated Fresnel diffraction using the Fourier transform", Computing in Science and Engineering, 1(15), 77-83. <https://doi.org/10.1109/5992.790591>.



Apéndice A

```
clc; close all; clear;

L1=0.01;

M=250;

dx1=L1/800;

lambda=0.543*10^-6;

k=2*pi/lambda;

z=1;

x1=-L1/2:dx1:L1/2-dx1;

y1=x1;

[X1,Y1]= meshgrid(x1,y1);

u1=imread ('ubicacion de la imagen.bmp', 'bmp');

I1=abs(u1);

image(255*I1);

colormap('gray'); xlabel('x (m)'); ylabel('y (m)');

title('z=0 m');

h=1/(j*lambda*z)*exp(j*k/(2*z)*(X1.^2+Y1.^2));

H=fftshift(fft2(h))*dx1^2;

U1=fftshift(fft2(u1));

U2=H.*U1;

u2=fftshift(iff2(U2));

I2=abs(u2);

minI2=min(min(I2));

maxI2=max(max(I2));

I3=(I2-minI2)/(maxI2-minI2);

figure

image(250*(I3));

colormap('gray'); xlabel('x (m)'); ylabel('y (m)');

title(['z= ',num2str(z), 'm'])
```

