

Caracterización de lentes multifocales mediante un laboratorio virtual basado en la óptica de Fourier *Characterization of multifocal lenses through a virtual laboratory based on Fourier optics*

Vicente Ferrando, Diego Montagud-Martínez, Juan A. Monsoriu

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.

vifermal@upv.es, diemonma@upvnet.upv.es, jmonsori@fis.upv.es

Laura Remón

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA.

lauremar@unizar.es

Diego Montagud-Martínez, Walter D. Furlan

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA.

diego.montagud@uv.es, walter.furlan@.es

Abstract

En este trabajo presentamos un nuevo laboratorio virtual, desarrollado en Python, que permite la caracterización óptica de una serie de lentes multifocales bajo diferentes parámetros de configuración (esfera, cilindro, eje, diámetro de pupila, aberración esférica, ...) mediante diferentes métricas basadas en la óptica de Fourier, tales como la Función de Transferencia de Modulación (MTF), la Función de Dispersión del Punto (PSF) y la simulación de formación de imágenes de diferentes optotipos.

In this paper we present a new Python developed virtual laboratory that allows the optical characterization of a series of multifocal lenses under different setup parameters (sphere, cylinder, axis, pupil diameter, spherical aberration, ...) by using different metrics based on the Fourier optics, such as the Modulation Transfer Function (MTF), the Point Spread Function (PSF) and the image forming simulation of different optotypes.

Palabras clave: Laboratorio virtual, Python, lentes multifocales, óptica de Fourier, simulación de formación de imagen

Keywords: Virtual laboratory, Python, Multifocal lenses, Fourier optics, Image forming simulation

1. Introducción y objetivos

Desde la introducción de lentes bifocales, el uso de lentes multifocales en general está cada día más extendido. Actualmente se presentan lentes con comportamientos muy variados y con diseños basados en diferentes mecanismos. El estudio preliminar del comportamiento de estas lentes multifocales bajo diferentes parámetros de diseño es interesante desde un punto de vista docente. El objetivo principal de este trabajo consiste en facilitar una herramienta que facilite el estudio del comportamiento y la calidad óptica de estos nuevos modelos de lente desde una perspectiva práctica e intuitiva. En este trabajo presentamos un nuevo laboratorio virtual desarrollado en lenguaje Python que permite caracterizar una serie de lentes a partir de un conjunto de métricas basadas en la óptica de Fourier.

2. Metodología

El presente laboratorio virtual permite al estudiante seleccionar una lente y diferentes parámetros de configuración del sistema, mostrando una previsualización del mapa de fase de la estructura a estudiar y su irradiancia axial en el rango de vergencias de -1 a 4 D. En la Fig. 1 se muestra la interfaz gráfica de usuario, en la que se indican los controles de configuración, las previsualizaciones y una serie de métricas para analizar la lente. Para seleccionar la vergencia para la que queremos estudiar la métrica correspondiente, disponemos de un selector que podemos desplazar y cuyo indicador se muestra sobre la previsualización de la irradiancia axial (línea roja vertical). Una vez seleccionada la vergencia, y configurados los parámetros para el cálculo de algunas métricas, pulsamos su botón y el resultado se abrirá en una ventana emergente.

En esta aplicación el estudiante puede seleccionar lentes estándar con diferentes distribuciones de irradiancia. En particular, se puede elegir entre una lente monofocal, una lente bifocal y una lente trifocal. La lente monofocal se comporta como una esfera perfecta. La lente bifocal presenta una estructura difractiva de tipo kinoform con una adición de 3 D y una distribución de aproximadamente del 50 % de energía entre los focos de lejos y cerca. La lente trifocal presenta una estructura kinoform de doble periodo con una adición de 3 D para el foco de cerca y una adición de 1.5 D para el foco intermedio, siendo los tres focos de intensidades similares. Además, a la lente seleccionada se le pueden modificar diferentes parámetros como el diámetro de la pupila o la potencia base y añadir una esfera, cilindro o aberración esférica. Una vez seleccionado, pulsando el botón VER el laboratorio virtual nos mostrará la previsualización del mapa de fase de la transmitancia con la pupila superpuesta para un muestreado bajo (200 x 200 píxeles) y la irradiancia axial en el rango de -1 a 4 D calculada a partir de esta transmitancia de baja resolución.

Para estudiar la lente con la configuración seleccionada disponemos de diferentes métricas como la irradiandia axial, la Función de Transferencia de Modulación o “Modulation Transfer Function” (MTF) en las direcciones X e Y, la Función de Dispersión del Punto o “Point Spread Function” (PSF) y la simulación de imágenes a partir de una lista de objetos seleccionables. Mediante el cálculo de estas métricas en la vergencia seleccionada por el estudiante se puede analizar la calidad óptica de los diferentes focos, así como los efectos de diferentes aberraciones, como la división de los focos que provoca el astigmatismo o la extensión de foco producida por la aberración esférica. Para aplicar todas estas métricas partimos del cálculo de la transmitancia de las lentes teniendo en cuenta el efecto de los parámetros de configuración con un muestreado de 1000 x 1000 píxeles. A partir de la transmitancia, obtenemos la i^ocia axial calculando la difracción de Fresnel en el rango de vergencias de -1 a 4 D.

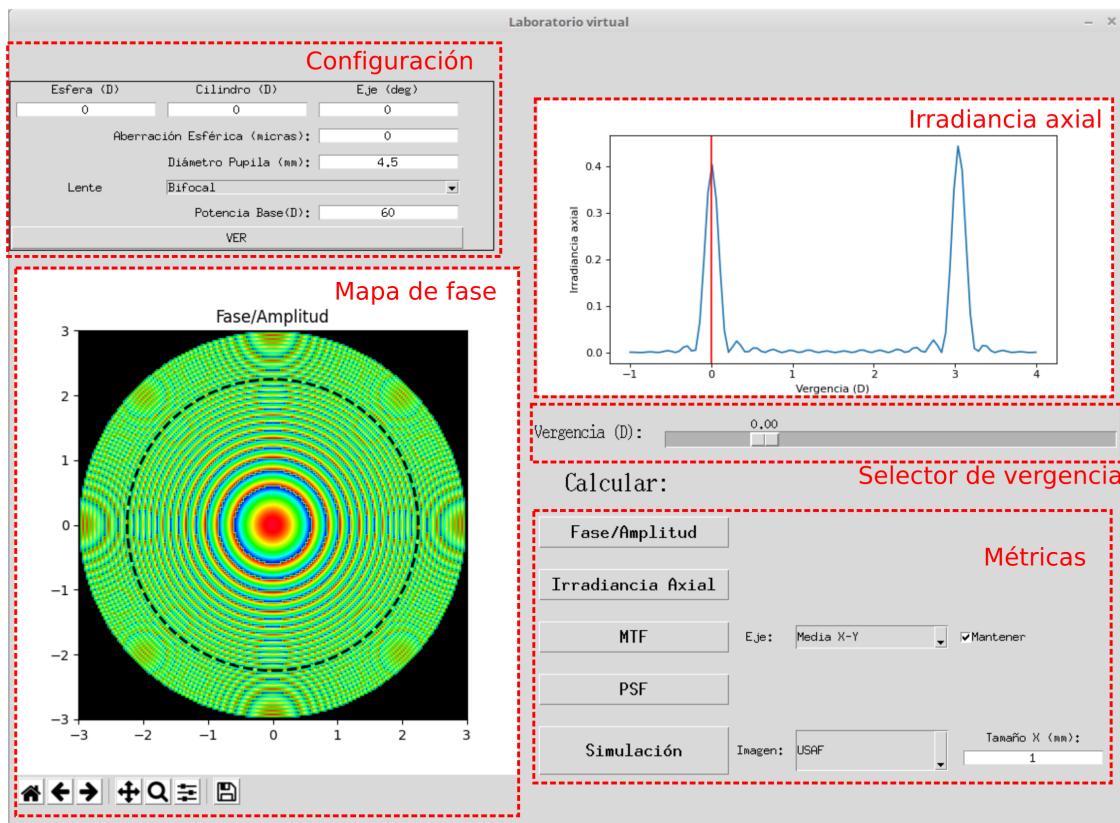


Figura 1: Interfaz gráfica del laboratorio virtual en la que se indican las diferentes secciones.

La PSF es el patrón de difracción proporcionado por el sistema en el punto focal paraxial, es decir, la imagen que forma de un objeto puntual. Esta se puede obtener como el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la transmitancia del sistema. Nótese que con este cálculo obtendríamos solamente el plano focal de la lente, por lo que para obtener la PSF en otro plano de vergencia combinamos la transmitancia del sistema con una esfera de la vergencia a estudiar.

En cuanto a la MTF, esta representa el contraste que obtendremos para redes sinusoidales de diferentes frecuencias utilizadas como objeto. Esta puede obtenerse como el módulo de la transformada de Fourier de la PSF del plano focal a analizar. Cabe destacar que, para lentes sin simetría de revolución, la MTF dependerá de la orientación de la red objeto. Por esta razón distinguimos entre la MTF en el eje X, en el eje Y y la media de ambas medidas.

Finalmente, podemos simular la formación de imágenes mediante la convolución del objeto original con la PSF. Para ello, seleccionamos una imagen como objeto original e introducimos sus dimensiones. El programa realiza un remuestreado de la PSF para que el tamaño de sus puntos de muestreo coincida con el de los píxeles de la imagen. De esta forma, la imagen simulada se obtiene como la convolución del objeto con la PSF.

3. Resultados

En primer lugar, estudiamos las diferentes lentes del laboratorio virtual. En la Fig. 2(a-f) se muestran las previsualizaciones del mapa de fase de la transmitancia y la irradiancia axial para las tres lentes seleccionables, manteniendo el resto de parámetros con sus valores por defecto,

es decir, con un diámetro de pupila de 4.5 mm y sin añadir ninguna aberración al sistema. Analizando los mapas de fase podemos ver que disponemos de tres lentes con características diferentes. La lente monofocal consiste en una pupila circular de potencia nula (la potencia base no se muestra en los mapas de fase), mientras que las lentes bifocal y trifocal presentan estructuras difractivas con dientes kinoform. En la previsualización de la irradiancia axial (Fig. 2(d-f)) se distinguen claramente los comportamientos monofocal, bifocal y trifocal de las tres lentes propuestas.

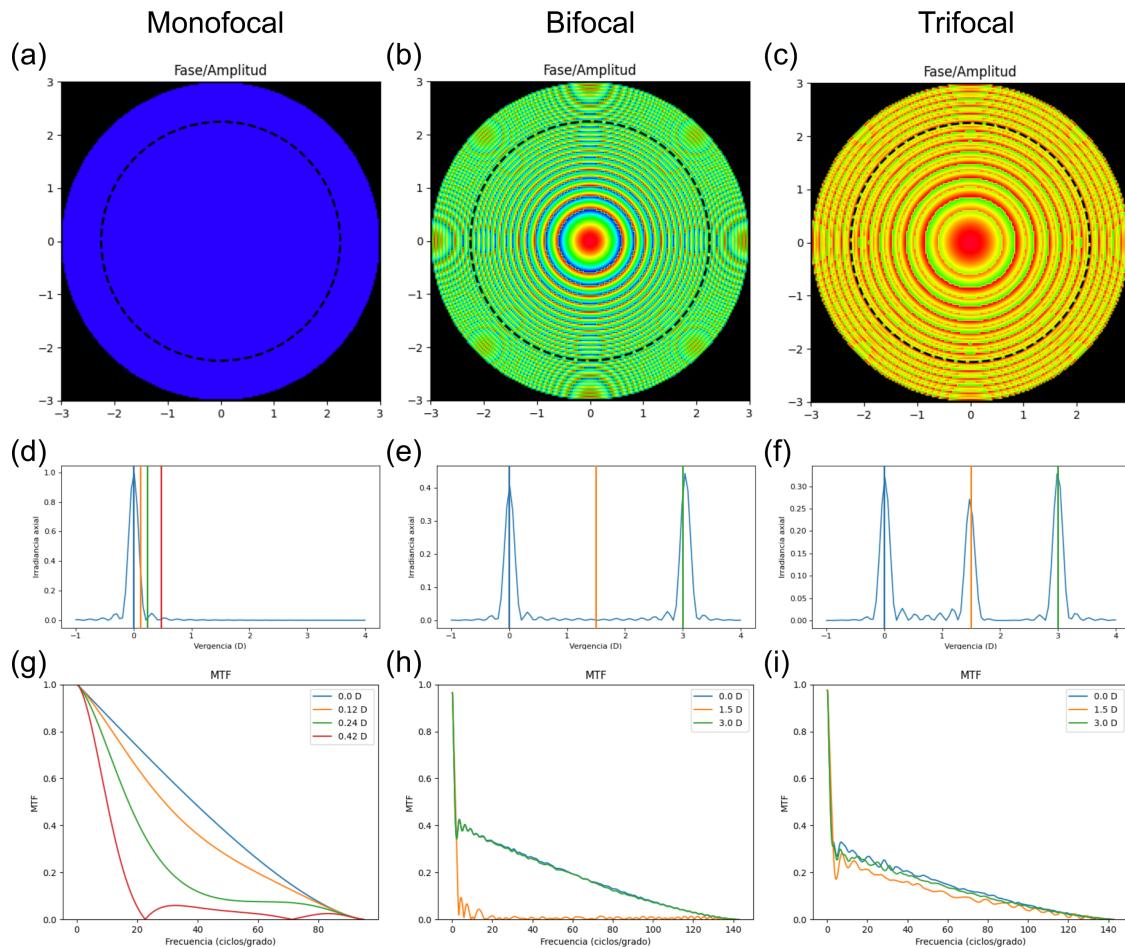


Figura 2: Para las tres lentes seleccionables se muestra la previsualización del mapa de fase (arriba), la irradiancia axial normalizada (centro) y las MTFs correspondientes a diferentes planos focales de interés (abajo) indicados sobre la irradiancia axial correspondiente con una línea vertical.

En la Fig. 2(g-i) se muestran las MTFs correspondientes a diferentes planos focales (indicados sobre la irradiancia axial con líneas verticales del mismo color) de las lentes estudiadas obtenidas como la media de las MTF en los ejes X e Y. En particular, para la lente monofocal (Fig. 2g) se puede observar la disminución del área bajo la MTF cuando nos alejamos de la vergencia de 0 D, lo que nos indica que las imágenes tendrán peor contraste en general. Para la lente bifocal (Fig. 2h) vemos que en los planos donde tenemos los focos (0 y 3 D) la MTF tiene unas curvas similares, mientras que para la vergencia de 1.5 D la MTF es muy baja. EN cuanto a la lente trifocal (Fig. 2i) en los tres planos focales tenemos MTFs con curvas similares, siendo más baja la MTF en el plano de vergencia 1.5 D para todas las frecuencias.

A continuación, estudiamos la lente bifocal con diferentes modificaciones en los parámetros de configuración. En particular, en la Fig. 3 se muestran los efectos de reducir la pupila a 3 mm de diámetro, añadir un cilindro de 0.5 D y añadir una aberración esférica de 0.28 micras.

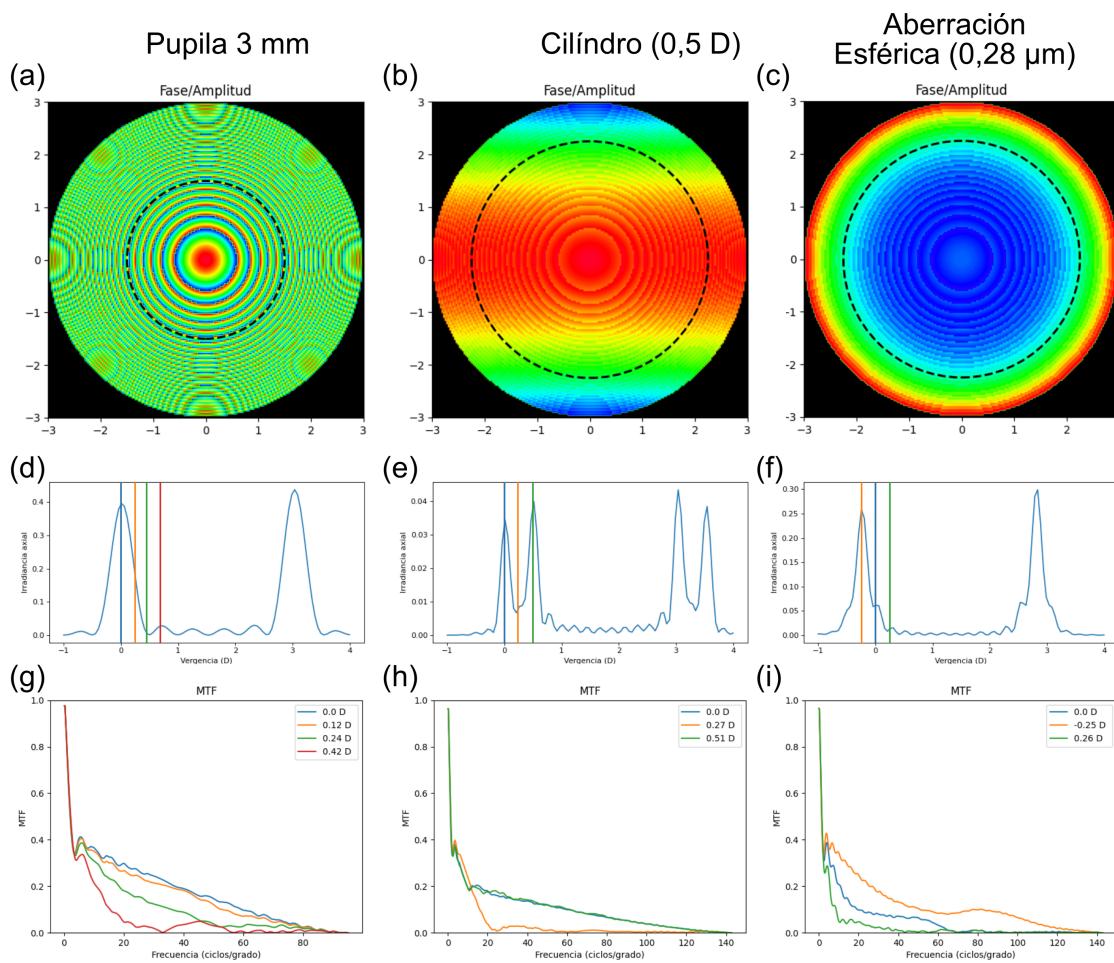


Figura 3: Se muestran los mapas de fase (arriba), la irradiancia axial (centro) y las MTFs en algunos planos de interés (abajo) para la lente bifocal con pupila de 3 mm de diámetro (izquierda), cilindro de 0.5 D (centro) y aberración esférica de 0.28 micras (derecha).

Mediante estas simulaciones los estudiantes pueden observar el efecto producido en las métricas la modificación de estos parámetros. En la Fig. 3d podemos apreciar el aumento en la profundidad de foco de los focos de la lente bifocal cuando reducimos la pupila (efecto producido por la difracción a través de una abertura). Además, el estudiante podría analizar de forma cuantitativa el efecto sobre la MTF a lo largo del foco (Fig. 3g).

Añadiendo una aberración esférica de 0.28 micras a la lente bifocal, se puede observar en la Fig. 3f que presenta una extensión de los focos y un desplazamiento de estos. Sin embargo, tendremos una disminución de la irradiancia axial (comparar con la Fig. 2e). De la misma forma, el estudiante podría analizar de forma cuantitativa el efecto sobre la MTF a lo largo del foco (Fig. 3i).

En cuanto al efecto de añadir un cilindro, en la Fig. 3e se muestra que produce un desdoblamiento de los focos en la irradiancia axial, pero con una disminución muy alta de la irradiancia. En la Fig. 3h se confirma que ambos focos muestran buenas MTFs, mientras que en el plano intermedio se formará una imagen con baja resolución (la MTF solo se mantiene para bajas frecuencias). Para estudiar con mayor detalle el efecto de aplicar un cilindro, lo estudiaremos sobre la lente monofocal, mostrando la MTF en las direcciones X e Y.

En la Fig. 4 se muestran la MTF en las direcciones X e Y, la PSF y la simulación de imagen del test USAF para la lente monofocal con un cilindro de 0.5 D en los planos focales de 0, 0.25 y

0.5 D. Se puede observar que en el plano focal de 0 D las frecuencias horizontales tienen buena resolución, mientras que las frecuencias verticales prácticamente no se resuelven. Por otra parte, en el plano de vergencia 0.5 D observamos justo lo contrario. En el plano intermedio podemos ver que en ninguna de las dos direcciones la MTF es buena, pero la combinación de ambas genera una imagen que, aunque presenta una imagen desenfocada, tiene un comportamiento similar en ambas direcciones.

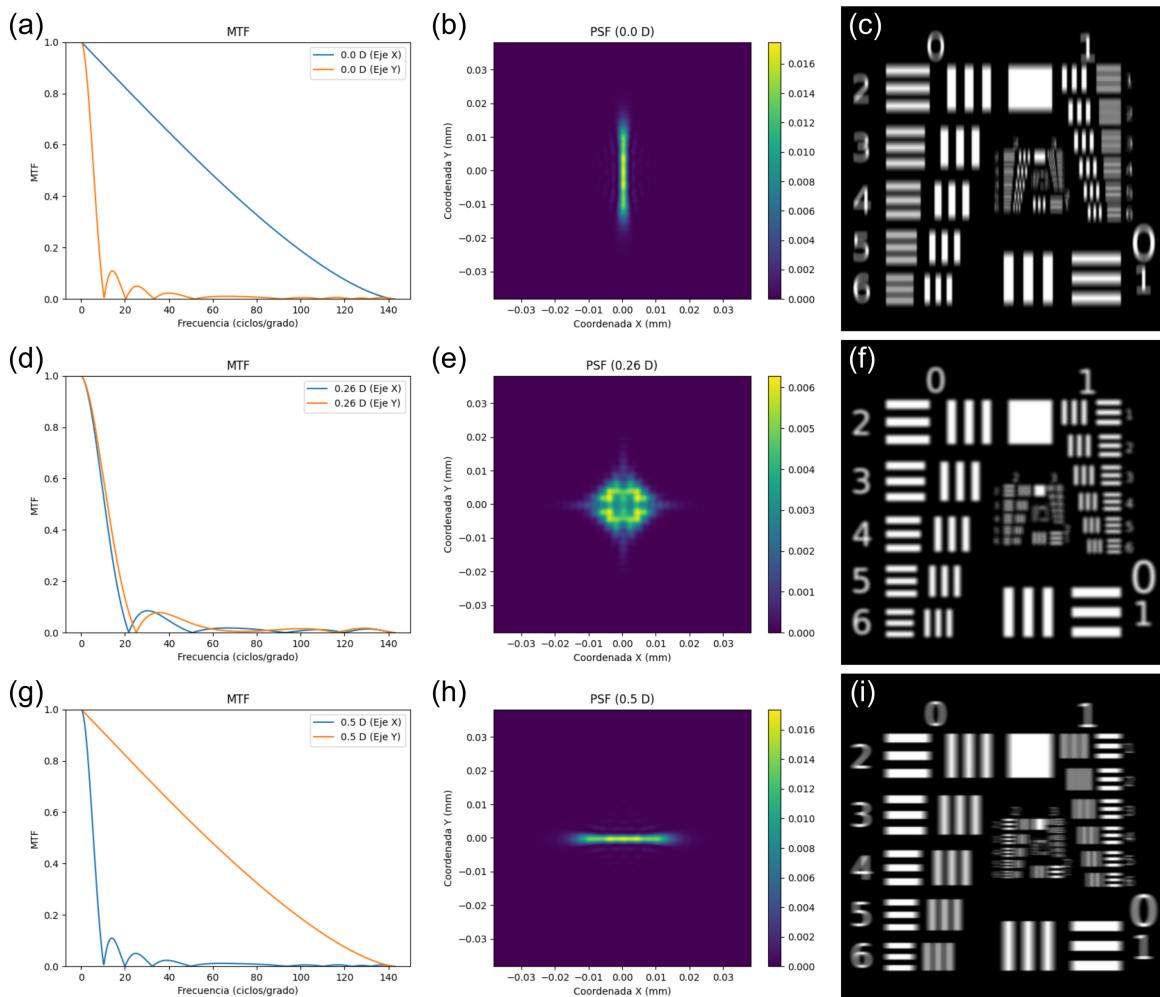


Figura 4: Para la lente monofocal con un cilindro de 0.5 D se muestra la MTF en dirección X e Y (izquierda), la PSF (centro) y la simulación de imagen del test USAF (derecha) para los planos focales de 0D (arriba), 0.25 D (centro) y 0.5 D (abajo).

4. Conclusiones

La MTF y la PSF son conceptos esenciales para entender las propiedades de formación de imágenes de los sistemas ópticos que se introducen teóricamente en las asignaturas de óptica de diferentes grados. En este trabajo presentamos un laboratorio virtual que requiere un conocimiento básico y permite desarrollar un análisis del comportamiento de varias lentes multifocales bajo diferentes aberraciones y efectos de configuración del sistema. De esta forma, el presente laboratorio virtual puede ayudar a los estudiantes a comprender los principios básicos de la óptica de Fourier y el procesamiento digital de imágenes, así como sus aplicaciones en algunas áreas científicas y tecnológicas mediante la introducción al estudiante en el uso de conceptos

que, siendo complejos matemáticamente, pueden interpretar de forma intuitiva a partir de la simulación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España [PID2019-107391RB-I00] y por la Generalitat Valenciana (España) [PROMETEO/2019/048]. D. M.-M. también agradece la financiación otorgada por la beca Margarita Salas del Ministerio de Universidades de España financiado por the European Union-Next Generation EU. Este trabajo ha sido desarrollado por el Equipo de Innovación y Calidad Educativa MSEL de la Universitat Politècnica de València.

Referencias

-  Born, M., Wolf, E., (1999).
Principles of Optics.
Cambridge University Press.
-  Carme Ferran, Salvador Bosch, and Artur Carnicer (2012).
Design of optical systems with extended depth of field: An educational approach to wavefront coding techniques.
IEEE Transactions on Education, 55 (2), 271–278.
-  Gaskill, J. D. (1978).
Linear systems, Fourier transforms, and optics.
Wiley.
-  Goodman, Joseph W. (1968).
Introduction to Fourier optics.
McGraw-Hill.

