

## ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA TRANSFERENCIA DE IMÁGENES POR MEDIOS GRIN MEDIANTE LA FUNCIÓN MTF Y LA TRANSMISIÓN ESPECTRAL

María A. Corti<sup>1,2</sup>, Lía M. Zerbino<sup>2,3</sup>, y Mario Garavaglia<sup>1,2</sup>

1. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (UNLP) calle 49 y 115, CP 1900, La Plata, Argentina.
2. Centro de Investigaciones Ópticas (CCT-CONICET La Plata y CIC)
3. Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.  
e-mail: [agustinac@ciop.unlp.edu.ar](mailto:agustinac@ciop.unlp.edu.ar)

Palabras clave: Propagación de imágenes, medio GRIN, Funciones de Transferencia de Modulación (MTF) y Espectral (STF).

### Introducción

Una lente de un material no homogéneo, en el que hay un GRadiente en el Índice de refracción, se conoce como lente GRIN. Los medios ópticos GRIN son una consecuencia del desarrollo de las fibras ópticas de índice de refracción radialmente variable en forma cuadrática inventado por Teiji Uchida, en 1969. Cuando la luz se propaga a través de un medio no homogéneo, los frentes de onda disminuyen su velocidad en zonas ópticamente más densas y la incrementan en zonas de menor densidad, lo cual provoca cambios en su curvatura. Por ello, un rayo que se propaga próximo al eje del medio GRIN recorre un camino geométrico corto a baja velocidad, mientras que aquél que lo hace lejos del eje describe un camino geométrico largo a alta velocidad. Por lo tanto, la variación de camino se puede compensar con la variación de velocidad.

El perfil radial del índice de refracción en esta fibra viene dado, en general, por

$$n(r) = \begin{cases} n_1(r) = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} & \rightarrow r < a (\text{núcleo}) \\ n_2(r) = n_1 [1 - 2\Delta]^{1/2} & \rightarrow r \geq a (\text{revestimiento}) \end{cases}$$

donde  $n(r)$  es el índice a lo largo del eje de la fibra,  $\alpha$  la potencia que determina la forma del perfil, denominada parámetro del perfil, y  $\Delta$  la variación relativa de índice en el eje y en el

$$\text{revestimiento. } \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Para  $\alpha=1$ , el perfil es lineal, para  $\alpha=2$ , el perfil es cuadrático o parabólico, etc.

Cuando  $\alpha \rightarrow \infty$ , el perfil  $n(r)$  tiende a la función escalón la fibra se convierte en homogénea. Estas situaciones se representan en la Fig.1.

El perfil radial de la fibra puede hacer igualar el camino óptico de rayos con diferentes longitudes de trayectorias, ya que la velocidad de la luz es mínima en el centro y crece gradualmente con la distancia radial.

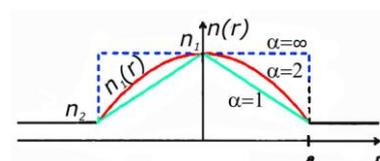


Figura 1. Perfil de índices en función del radio

En consecuencia, con una elección adecuada del perfil

(de  $\alpha$ ), la diferencia de velocidades o de tiempos de vuelo entre rayos se puede reducir. Un perfil óptico que prácticamente anula la diferencia es el parabólico ( $\alpha=2$ ), y es por ello que fue utilizado en el presente trabajo.

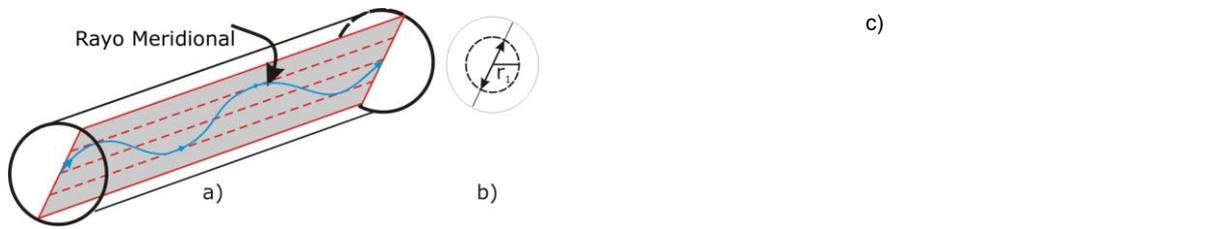


Figura 2. Propagación de un rayo meridional a través de un componente GRIN iluminado con luz monocromática. a) vista lateral, b) Vista frente, c) Propagación de un haz Láser a través de una fibra GRIN.

Una lente GRIN cumple la función de “transferir la imagen”, es decir, opera como “repetidora de imagen”, lo que ajustadamente indica su denominación en inglés: “lens relay”.

Los medios GRIN estudiados en el presente trabajo poseen un diámetro de 1,98 mm, y longitudes de 4,9 cm, 9,8 cm, y 14,7 cm y se muestran en la fotografía de la Fig. 3.

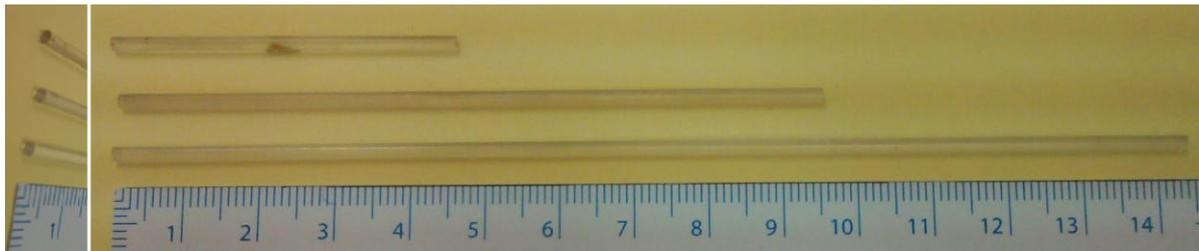


Figura 3. Fotografía de los medios GRIN utilizados en este trabajo.

Como a través de estos novedosos medios se puede transferir una imagen de un lugar a otro del sistema óptico, el objetivo del presente trabajo fue caracterizarlo empleando la función de transferencia de la modulación (MTF).

Para caracterizar la transferencia de imágenes producida en los medios GRIN se midió la función MTF.

La modulación (o el contraste) está definida por la expresión de Michelson:

$$\text{Modulación} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

La MTF describe la función de la modulación según la expresión de Michelson para las diferentes frecuencias espaciales, utilizando objetos de entrada de contraste máximo, como por ejemplo grillas de Ronchi.

Frecuentemente, la curva de la función MTF se utiliza como una descripción teórica y experimental de la calidad de la imagen. La MTF de un sistema óptico formador de imágenes describe su capacidad de transferir los detalles finos del objeto bajo estudio a la imagen producida por tal sistema.

Para realizar las medidas se utilizaron como objetos de estudio tarjetas Edmund Optics que reproducen las tarjetas patrón NBS 1963A, formadas por series de barras rectangulares paralelas transparentes y opacas alternadas, es decir con modulación  $M=1$ , con distintas

frecuencias espaciales. El ancho de las barras es igual al ancho de sus separaciones. En la fotografía de la Fig. 4 puede apreciarse la disposición de las diferentes grillas según su frecuencia espacial utilizadas para medir la MTF.

Por otro lado, el análisis del contenido espectral de la luz que ingresa al medio GRIN y de la que sale de él permite determinar su grado de fidelidad en la reproducción de los colores.

En el presente trabajo se analiza la transferencia de imágenes a través de un medio GRIN, mediante la MTF, como así también los espectros de transmisión a través del mismo. Las determinaciones cuantitativas para el cálculo de la MTF fueron obtenidas mediante un software diseñado especialmente para tal fin en MATLAB. Los espectros fueron registrados con un espectrómetro portátil.

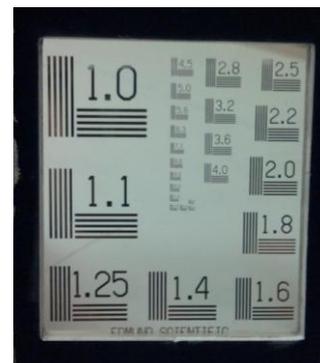


Figura 4. Tarjeta de resolución por transmisión Edmund Optics NBS 1963A utilizada

## Parte experimental

El esquema del dispositivo experimental se muestra en la Fig. 5. Una vez ubicados los planos de entrada y de salida del componente GRIN y habiendo seleccionado la posición de mejor enfoque, se registraron las imágenes de las franjas para los diferentes espaciados o frecuencias espaciales.

A partir de esos registros, se midieron los contrastes para cada imagen: el contraste del 100% se asignó a las barras perfectamente transparentes y opacas de los mayores anchos y separaciones. A medida de que las barras están más juntas, el contraste en la imagen disminuye y la distinción entre las barras se comienza a desdibujar. Una gráfica de la MTF muestra el porcentaje de contraste perdido a medida que el espaciado entre las barras disminuye. El espaciamiento entre las barras en el objeto es usualmente representado como la frecuencia espacial dada en ciclos/mm, donde cada par de barras brillantes y oscuras constituyen un ciclo.

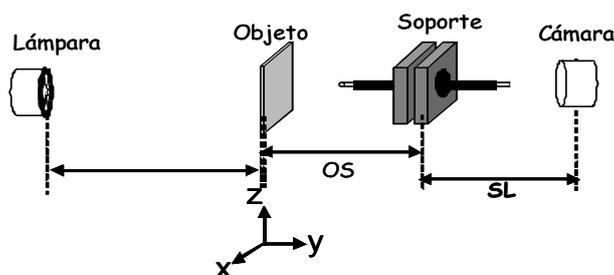


Figura 5. Esquema del montaje experimental utilizado.

El objeto (tarjeta de resolución), fue montado sobre un soporte que permite desplazamientos en el plano vertical según las direcciones perpendiculares x-z, sin modificar la posición del plano objeto ( $y = \text{constante}$ ), con el fin de variar las frecuencias a observar a través del componente GRIN.

Las imágenes fueron capturadas en formato jpg por una cámara color sin objetivo Genius Eface 2025. Se tuvo especial cuidado en regular la iluminación para que la respuesta de la cámara siempre se mantuviera en la zona de respuesta lineal. Para cada tarjeta de resolución se tomaron 27 imágenes, una para el fondo (sin franjas) y 26 frecuencias espaciales diferentes, entre 1 y 18 ciclos/mm, como se muestran en los resultados.

Para corregir el efecto de la inhomogeneidad de la fuente de luz, se procedió a la deconvolución del fondo con cada una de las imágenes durante el procesamiento de los datos obtenidos (ver figura 6). Para cada una de las imágenes corregidas se analizaron los

perfiles de densidad sobre una línea perpendicular a las franjas, en la misma posición de la imagen y de la misma longitud, y a partir del promedio de los valores de niveles de gris sobre ella y sus vecinos se encontraron las  $I_{máx}$  e  $I_{mín}$  para calcular el contraste o modulación de la transferencia correspondiente a cada frecuencia espacial.

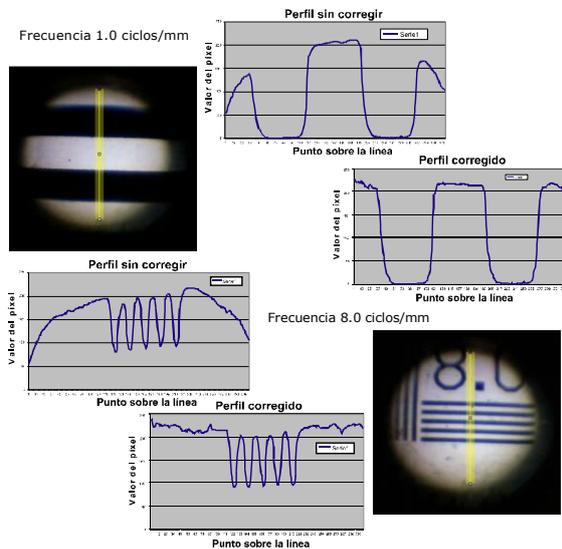


Figura 6. Ejemplos de perfiles sin corregir y corregidos para calcular la MTF

Por otro lado, con el fin de analizar la transmitancia espectral de los medios GRIN, se tomó el espectro de transmisión a través de los tres componentes GRIN, utilizando un Espectrómetro Ocean Optics USB 2000 2048 pixels A/D resolution: 12 bit range: 200-1100 nm, con la ayuda del Dr. Fausto Bredice<sup>1</sup>. Un esquema del sencillo diseño experimental usado se muestra en la figura 7. Esta medición se repitió tras invertir los extremos de las fibras, y también se tomaron tres lecturas del espectro de la lámpara de iluminación (fondo), quitando los medios GRIN.

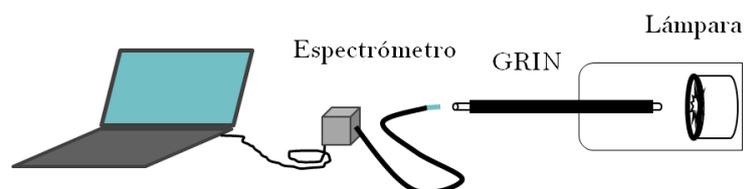


Figura 7. Esquema del diseño experimental usado.

Para cuantificar la diferencia entre el promedio de los espectros del fondo y el promedio de las medidas hechas con el componente GRIN, se integraron las cuentas en el espectro visible (380 a 780 nm) bajo ambas curvas, y se calculó el cociente.

## Resultados y discusión

En la Fig. 8 se muestran las excelentes respuestas obtenidas en cuanto a la resolución de los espaciados contenidos en la tarjeta utilizada para los tres componentes GRIN.

Estas respuestas son absolutamente compatibles con la observación humana de alta calidad [Ref. 9]. De todos modos, se registraron además las respuestas para otras tres grillas, con el objeto de sondear los límites de resolución de los componentes GRIN analizados. Así, se registraron en cada caso las respuestas a grillas de Ronchi de 20, 40 y 80 líneas por mm. En las Fig. 9 se muestran imágenes típicas obtenidas para las diferentes frecuencias espaciales de las grillas.

<sup>1</sup> Dr. Fausto Bredice (CIOP), a quien estamos muy agradecidos.

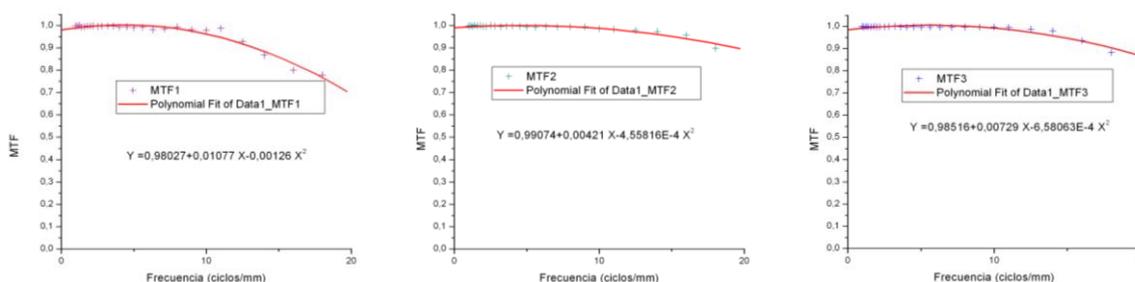


Figura 8. Resolución de los tres medios GRIN para las frecuencias contenidas en la Edmund Optics NBS 1963 utilizada



Figura 9. Registros típicos de las imágenes obtenidas para las diferentes frecuencias espaciales.

Los resultados para la función MTF de los componentes GRIN estudiados se muestran en las gráficas de la Fig. 10.

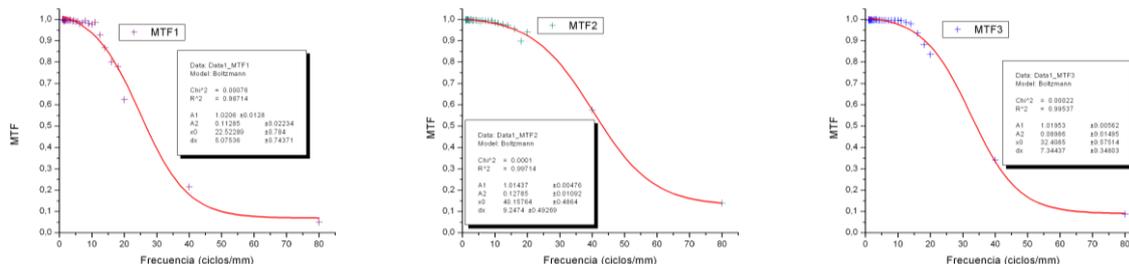


Figura 10. MTF calculadas automáticamente a partir del software específico elaborado en MATLAB.

En cuanto a la transmitancia espectral, la figura 11 muestra los resultados obtenidos para el componente GRIN de mayor longitud, promediando las medidas al invertir los extremos del mismo y también la de sus fondos asociados, con sus respectivas desviaciones estándar.

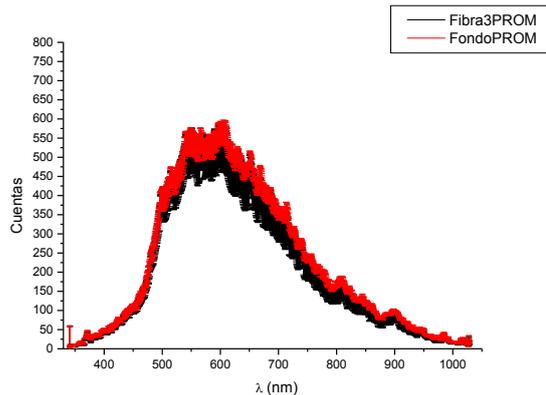


Figura 11.

A partir del cociente de la integración de los espectros en el rango visible (380 a 780 nm), la transmitancia da un valor de 94,5%.

### Conclusiones y Prospectiva

Las mediciones realizadas a través de los componentes GRIN para trazar sus respectivas curvas MTF muestran que son compatibles con la observación humana de altísima calidad.

Por otro lado, las imágenes observadas son suficientemente brillantes, y se verifica que reproducen adecuadamente el espectro de la lámpara utilizada.

Quedará para otros trabajos futuros el análisis de imágenes obtenidas de la observación de objetos de amplia paleta de colores y conteniendo elevadas frecuencias espaciales transferidas a través de los componentes GRIN.

### Bibliografía

- 1 - Hetch, Eugene in "Óptica" Tercera edición. Ed. Pearson, Addison Wesley. 2003. Capítulo 6, Sección 6.4: Sistemas GRIN.
- 2 - Ajoy Ghatak and K. Thyagarajan in "Graded Index Optical Waveguides: A Review". Editor: Wolf, Emil. "Progress In Optics", volumen XVIII. University of Rochester, NY, U.S.A.. North-Holland Publishing Company. 1980.
- 3 - Midwinter in "Optical Fibers For Transmission". John E. Ed. Wiley-Interscience. U.S.A., 1979.
- 4 - K. Iga, Y. Kokubun, M. Oikawa in "Fundamentals Of Microoptics. Distributed-Index, Microlens, and Stacked Planar Optics". Academic Press, Inc. 1984.
- 5 - Carlos Gómez-Reino, María V. Pérez and Carmen Bao in "Gradient-Index Optics". Springer, 2002. Capítulo 5: Óptica guiada.
- 6 - E. G. Rawson, D. R. Herriott, J. McKenna in "Analysis Of Refractive Index Distributions In Cylindrical Graded-Index Glass Rods (Grin Rods) Used As Image Relays". Applied Optics, Vol. 9, n°3, 753-759. March 1970.
- 7 - Teiji Uchida, Moatoaki Furukawa, Ichiro Kitano, Ken Koizumi and Hiroyoshi Matsumura in "Optical Characteristics of a Light-Focusing Fiber Guide and Its Applications". IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-6, n°10, 606-612. October 1970.
- 8 - James D. Rees in "Non-Gaussian imaging properties of GRIN fiber lens arrays". Applied Optics, Vol. 21, n°6, 1009-1012. March 1982.
- 9 - Pablo Artal and Antonio Girao in "Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye". Optics letters, Vol. 23, No. 21. November 1998.