

## Multifocal intraocular lenses with fractal geometry Lentes intraoculares multifocales de geometría fractal

L. Remón<sup>1,S\*</sup>, W. D. Furlan<sup>2,S</sup> y J. A. Monsoriu<sup>3,S</sup>

1. AJL Ophthalmic S.A., 01510 Miñano (Álava, España).

2- Departamento de Óptica, Universitat de València, 46100 Burjassot Valencia, España.

3. Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, España.

\* Email: [lauraremon@ajlsa.com](mailto:lauraremon@ajlsa.com)

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 16/10/2014

Accepted / Aceptado: 01/01/2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.48.1.1>

### ABSTRACT:

This paper is a summary of the results of the PhD entitled: Design, Fabrication and Quality Control of the Multifocal Intraocular Lenses presented and defended by L. Remón at Universitat Politècnica de València (October 2012) and supervised by Prof. J.A Monsoriu and Prof. W.D. Furlan [1]. Multifocal IOLs (MIOLs) are a promising alternative to presbyopic patients (suffering from cataracts). There exist several commercially available models and designs of MIOLs, each one with its own drawbacks and advantages, evidencing that the optimum MIOL has not yet designed. This work presents the design, and quality control of a new design of MIOL with a fractal profile. This type of lenses provides an extended depth of field and a reduced chromatic aberration compared to other commercially available designs. Additionally, to assess the optical quality of MIOLs, two different experimental setups were designed "ad-hoc"; according to the requirements of the UNE ISO 11979-2 standard.

**Key words:** optical quality, design, intraocular lenses.

### RESUMEN:

Esta publicación resume los resultados de la tesis doctoral: Diseño, Fabricación y Control de Calidad de Lentes Intraoculares Multifocales, presentada por L. Remón en la Universitat Politècnica de València (Octubre de 2012) y dirigida por los profesores J.A Monsoriu y W.D. Furlan [1]. Las lentes multifocales (LIOMs) suponen una alternativa prometedora en pacientes de más de 50 años para la compensación de la presbicia. En el mercado existen gran disparidad de diseños multifocales, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, lo que evidencia que la LIOM que ofrece las mejores prestaciones todavía no ha sido diseñada. En este trabajo se presentan resultados de diseño, fabricación y evaluación de la calidad óptica de un nuevo tipo de LIOMs, con geometría fractal, que presenta una mayor profundidad de foco y una menor aberración cromática con respecto a las que actualmente se encuentran en el mercado. Para la evaluación de la calidad óptica de las LIOMs propuestas se han desarrollado expresamente dos dispositivos experimentales basados en las especificaciones de la Norma UNE ISO 11979-2.

**Palabras clave:** calidad óptica, diseño, lente intraocular

### REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] L. Remón, *Diseño, Fabricación y Control de Calidad de Lentes Intraoculares Multifocales*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València (2012). <http://riunet.upv.es/handle/10251/17703>
- [2] D. A. Atchison, "Design of aspheric intraocular lenses," *Ophthal Physl Opt* **11**(2), 137-146 (1991). <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1313.1991.tb00213.x>
- [3] B. Seitz, A. Langenbucher, "Intraocular lens power calculation in eyes after corneal refractive surgery," *J Refract Surg* **16**, 349-361 (2000).

- [4] R. Bellucci, A. Scialdone, L. Buratto, S. Morselli, C. Chierago, A. Criscuoli, G. Moretti, P. Piers, "Visual acuity and contrast sensitivity comparison between Tecnis and AcrySof SA60AT intraocular lenses: A multicenter randomized study," *J Cataract Refr Surg* **31**, 712-717 (2003).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrs.2004.08.049>
- [5] UNE-EN ISO 11979-2: Implantes oftálmicos. Lentes intraoculares. Parte 2: Propiedades ópticas y métodos de ensayo. (ISO 11979-2:1999).
- [6] UNE-EN ISO 11979-9: Implantes oftálmicos. Lentes intraoculares. Parte 9: Lentes intraoculares multifocales. (ISO 11979-9:2006).
- [7] V. Portney, "Optical testing and inspection methodology for modern intraocular lenses," *J Cataract Refr Surg* **18**(6), 607-613 (1992).  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0886-3350\(13\)80453-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-3350(13)80453-1)
- [8] R. Rawer, W. Stork, C. W. Spraul, C. Lingenfelder, "Imaging quality of intraocular lenses," *J Cataract Refr Surg* **31**(8), 1618-1631 (2005).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrs.2005.01.033>
- [9] J. T. Holladay, H. Dijk, A. Lang, V. Portney, T. R. Willis, R. Sun, H.C. Oksman, "Optical performance of multifocal intraocular lenses," *J Cataract Refr Surg* **16**, 413-422 (1990).  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0886-3350\(13\)80793-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-3350(13)80793-6)
- [10] G. Saavedra, W.D. Furlan, J. A. Monsoriu, "Fractal Zone Plate," *Opt Lett* **28**(12), 971-973 (2003).  
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.28.000971>
- [11] J. A. Monsoriu, W.D. Furlan, G. Saavedra, F. Giménez, "Devil's Lenses," *Opt Express* **15**(21), 13858-13864 (2007).  
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.15.013858>
- [12] W. D. Furlan, G. Saavedra, J. A. Monsoriu, "White-light imaging with fractal zone plates," *Opt Lett* **32**(15), 2109-2111 (2007).  
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.32.002109>
- [13] W. D. Furlan, P. Andrés, G. Saavedra, A. Pons, J. A. Monsoriu, A. Calatayud, L. Remón, F. Giménez, J. L. Rojas, E. Larra, P. J. Salazar "Lente oftálmica multifocal y procedimiento para su obtención," PCT/ES2011/070559 (2010).
- [14] A. Calatayud, L. Remón, J. Martos, J. A. Monsoriu, W. D. Furlan, "Imaging quality of multifocal intraocular lenses. Automated assessment setup," *Ophthal Physl Opt* **33**, 320-326 (2013).  
<http://dx.doi.org/10.1111/opo.12063>
- [15] A. Calatayud, J. A. Rodrigo, L. Remón, W. D. Furlan, G. Cristobal, J. A. Monsoriu, "Experimental generation and characterization of Devil's vortex-lenses," *Appl Phys B* **106**(4), 915-919 (2012).  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00340-012-4913-0>
- [16] L. Remón, A. Arias, A. Calatayud, W. D. Furlan, J. A. Monsoriu, "Through-focus response of multifocal intraocular lenses evaluated with a spatial light modulator," *Appl Optics* **36**, 8594-8598 (2012).  
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.51.008594>

---

## 1. Introducción

La cirugía de cataratas es una operación en la que el cristalino opacificado se sustituye por una lente intraocular (LIO) construida con un material biocompatible. Estas lentes pueden ser monofocales útiles para la corrección de la visión de lejos. Aunque es cada vez más frecuente en el mercado la aparición de lentes intraoculares multifocales (LIOMs) que permiten la corrección simultánea de la visión de lejos y de cerca [2-4]. Esta nueva alternativa abre un campo mucho mayor de potenciales beneficiarios ya que podría aplicarse a todos los sujetos presbíteros, que presentan una dificultad en la realización de trabajos en visión de cerca debido a una reducción de la amplitud de acomodación. Actualmente existen en el mercado múltiples diseños de LIOMs, que se caracterizan por ser básicamente bifocales, tienen una reducida profundidad de foco y los modelos difractivos presentan una dependencia cromática, lo que evidencia que la LIOM que ofrece las mejores prestaciones todavía no ha sido diseñada.

A diferencia de otras soluciones ópticas al problema de la presbicia, como son las gafas o las lentes de contacto, la implantación de una LIO no es un procedimiento fácilmente reversible y por lo tanto es de suma importancia que la LIO a implantar cumpla unos requisitos estrictos de calidad para garantizar la correcta función visual del paciente operado. Además, debido a la gran disparidad de diseños de LIOs que actualmente se encuentran en el mercado es necesario identificar las ventajas y desventajas que presentan cada uno de ellos. Para ello se utilizan ciertas funciones de mérito y su medida se realiza en dispositivos experimentales de manera objetiva. Las Normas internacionales UNE EN ISO 11979-2 y 11979-9 [5,6], para LIOs monofocales y multifocales respectivamente, se basan en la medida de la función de transferencia de modulación (MTF, del inglés Modulation Transfer Function) de un ojo artificial con LIO como parámetro de calidad óptica. Existen varios estudios objetivos que caracterizan la calidad de LIOMs, haciendo uso de dicha función en dispositivos experimentales diseñados específicamente [7-9].

Los objetivos de este trabajo son, por una parte, el diseño y fabricación de una nueva LIOM, con geometría fractal, que proporcione mayor profundidad de los focos de lejos y de cerca y una menor aberración cromática que las que actualmente se encuentran en el mercado. Por otra parte, se pretende la evaluación de la calidad óptica de los diseños propuestos con dispositivos experimentales diseñados para tal fin, siguiendo las especificaciones de las Normas ISO. Además se realiza un análisis comparativo con algunos diseños comerciales. La estructura del trabajo es la siguiente: en la sección 2 se explica el nuevo diseño y la fabricación de la LIOM propuesta y se establecen los métodos experimentales que se han usado en el desarrollo para la caracterización óptica. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos.

## 2. Métodos

### 2. a. Diseño y fabricación de la LIOM fractal.

Las LIOMs propuestas están diseñadas a partir de la función *escalera del diablo* definida a partir del conjunto fractal de Cantor [10-12]. En la Fig. 1 se muestra un perfil típico de las LIOMs propuestas. La curva escalonada ( $F_S(x)$ ) muestra la diferencia (aumentada un factor 6) entre la superficie diseñada (curva superior) y la superficie refractiva de base (curva inferior) que corresponde a una lente monofocal de la misma potencia de lejos. Esto es, en las zonas en las que la función aperiódica toma un valor constante las dos superficies comparten los mismos radios de curvatura y por lo tanto la misma potencia, que correspondería a la potencia de lejos ( $P_L$ ). En las zonas crecientes de la función de Cantor, la superficie diseñada presenta un radio de curvatura menor por lo que la lente tendrá una mayor potencia (potencia de cerca  $P_C$ ) para la visión de cerca. La lente así generada se comporta como una lente híbrida de carácter difractivo-refractivo en la que se alternan zonas anulares con dos radios de curvatura diferentes que dan lugar a los focos principales de la lente. La difracción producida por los diferentes anillos distribuidos aperiódicamente proporciona la estructura interna de cada uno de estos focos [13].

Los parámetros libres de diseño de las lentes propuestas son: el número total de zonas que viene fijado por el número de iteraciones empleado para generar la función de Cantor (el número mínimo de zonas viene dado por  $S=2$ ), la distribución del perfil que puede estar localizado en todo el diámetro de la lente o bien en la parte central de la misma y la alternancia para la visión de lejos y de cerca.

Los prototipos de las LIOMs propuestas fueron fabricadas por la empresa AJL Ophthalmic S.A., con el mismo procedimiento que se utiliza para la fabricación de lentes monofocales, es decir, mediante microtornos de precisión que permiten una remoción directa del material óptico de una manera controlada sin el uso de procesos intermedios.

Aunque se han diseñado y fabricado diferentes LIOMs con distintos parámetros de diseño, en este trabajo sólo se presentan los resultados de un modelo concreto de LIOM fractal. Este modelo fue fabricado en Polimetilmetacrilato (PMMA) de índice de refracción ( $n=1.4930$ ), con una  $P_L=19.5$  D y una  $P_C$  23 D (Adición=3.5 D). La multifocalidad se genera en la superficie anterior y la zona central se destina a la visión de cerca (véase perfil de la Fig. 1). Para el cálculo de los radios de curvatura se consideró un factor de forma ( $X=+0.2966$ ) que corresponde con una lente biconvexa con la superficie más curvada hacia la córnea. Los radios de curvatura de la superficie anterior y posterior son respectivamente 12.42 mm y 22.89 mm respectivamente. En la superficie anterior es necesario definir un nuevo radio que proporciona la  $P_C$ . El radio es de 9.73 mm que se alterna con el de 12.42 mm. La nomenclatura que se ha utilizado para denominarla es: 6FD, donde el 6 representa el diámetro donde se distribuye el perfil, F indica que la lente diseñada tiene geometría fractal y la D representa que el centro está destinado a la visión de cerca.

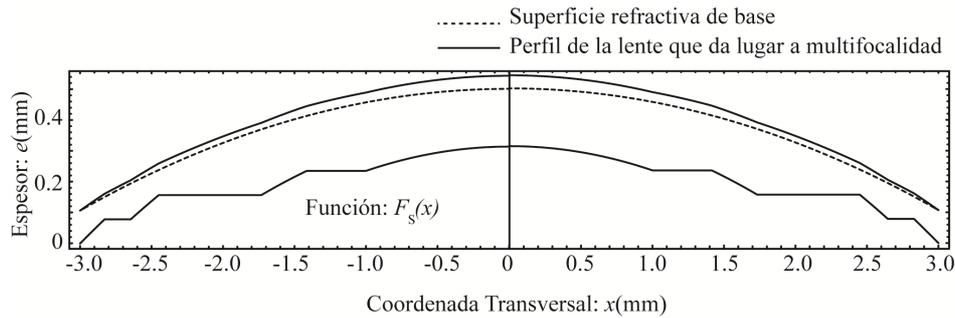


Fig. 1. Gráfica que representa el perfil de la lente de acuerdo a la función de Cantor.

## 2. b.- Dispositivos experimentales.

Para la valoración de la calidad óptica de LIOMs se han desarrollado expresamente dos dispositivos experimentales.

El primer dispositivo permite la medida de la MTF proporcionada por un ojo modelo (descrito en la Norma UNE EN ISO 11979-2) compuesto por una córnea artificial y la LIOM a medir [14]. Esta medida se realiza de manera directa a partir del cálculo de la pérdida de contraste de la imagen que proporciona el sistema óptico (ojo modelo) de una red de binaria. En la Fig. 2a, se muestra el dispositivo experimental usado para la caracterización de la MTF para diferentes posiciones axiales a partir de la generación de diferentes desenfoques en el espacio objeto mientras el plano imagen permanece fijo. El sistema de iluminación consiste en un LED de luz blanca (Luxeon™ V Portable) y filtros interferenciales de ancho de banda:  $\pm 10$  nm (Edmund Optics) centrados en distintas longitudes de onda. El LED se encuentra situado en el plano focal de la lente L1 ( $f_1=50$ mm). El objeto test se encuentra situado en un soporte colocado en un motor paso a paso (LTS 300 de recorrido: 65 mm y precisión de movimiento  $5\mu\text{m}$ ). La lente L2 (doblete acromático de  $f_2=160$  mm) permite generar los diferentes desenfoques sobre el plano de la córnea artificial. Una cámara CMOS (8-bits,  $2560 \times 1920$  píxeles; tamaño del píxel de  $2.2\mu\text{m}$ ) acoplada a un objetivo de microscopio (5X) se utiliza para capturar la imagen formada por el ojo, con la LIOM a medir. Este sistema de detección de imagen se encuentra situado en el plano focal de lejos proporcionado por el ojo modelo. Para la caracterización de la MTF para diferentes posiciones axiales, el plano objeto se desplaza axialmente para generar las distintas vergencias [desde -1D hasta 6D en pasos de 0.04D]. Para cada posición del objeto, la imagen es capturada y analizada. El desplazamiento del objeto, la captura y el procesamiento de las imágenes se automatizaron con un programa propio desarrollado en LabVIEW®.

La principal ventaja que presenta el sistema propuesto, frente al que se propone en la Norma, es que el plano principal objeto del ojo modelo se sitúa en el plano focal imagen de la L2 (véase Fig. 2b) y este hecho permite que para cualquier posición axial del objeto las imágenes virtuales producidas por la lente L2 ( $y'$ ) subtendan siempre el mismo ángulo desde el ojo modelo, independientemente de la posición axial del objeto test. Este hecho es de suma importancia porque permite comparar directamente las imágenes de lejos y de cerca proporcionadas por una determinada LIOM ya que la imagen final  $y''$  es constante para las diferentes posiciones objeto.

Para calcular la MTF monocromática para diferentes posiciones axiales, se utilizó un objeto test consistente en una red binaria de frecuencia  $\nu_0=5$  lp/mm. Con el sistema propuesto, también se puede realizar un análisis cualitativo del comportamiento de las LIOMs bajo iluminación policromática (sin filtros interferenciales en el sistema de iluminación) con el fin de obtener imágenes que se aproximen a las condiciones reales de visión. En este caso, como objeto se utilizó un test de resolución (USAF, Air Force 1951) que presenta múltiples frecuencias discretas.

El segundo dispositivo propuesto permite estudiar las propiedades de focalización de diferentes lentes utilizando un modulador espacial de luz (SLM). El SLM puede ser utilizado para implementar en él diferentes lentes y medir su respuesta axial de manera rápida sin necesidad de fabricarlas [15]. Además, el SLM también puede ser utilizado para generar diferentes vergencias objeto y descentramientos pupilares sobre una determinada lente colocada *in situ* en el dispositivo experimental [16]. De esta manera, la PSF axial de la lente se obtiene sin necesidad de ningún elemento móvil en el montaje, sólo cambiando las vergencias objeto en el SLM mientras el plano imagen permanece fijo.

### 3. Resultados

El primer objetivo fue la medida de los parámetros ópticos (curvaturas y tamaños de los anillos) de la LIOM fabricada para verificar que corresponden con los previamente diseñados. Para ello, se utilizó un perfilómetro óptico que permite una medida local de la superficie de la lente (PL $\mu$  2300, SENSOFAR). En la Tabla 1 se muestran los radios de curvatura y el tamaño de las zonas obtenidas a partir de los datos que proporcionan el perfilómetro. Para comprobar la repetitividad del proceso de fabricación se midieron las MTFs para diferentes posiciones axiales para dos tamaños de pupila y dos LIOMs diferentes del mismo modelo 6FD. La calidad óptica obtenida para los dos modelos fue muy similar detectándose únicamente un pequeño desplazamiento axial entre las MTFs de cada modelo, debido a la posición de la lente en la cubeta.

La evaluación de la MTF para diferentes posiciones axiales se realizó haciendo uso del sistema descrito en la sección 2.b. Los resultados obtenidos para la MTF monocromática ( $\lambda=560$  nm) para diferentes posiciones axiales y dos diámetros pupilares diferentes (2.7 mm y 4.2 mm), con la córnea artificial insertada en el ojo modelo, se muestran en la Fig. 3a) para el modelo 6FD y para dos lentes comerciales, ReZoomNXG1 (www.amo-inc.com) y Tecnis ZM900 (www.amo-inc.com). La lente ReZoom es una LIOM refractiva formada por cinco anillos concéntricos que alternan la visión para lejos y para cerca. La  $P_L$  y la adición de la LIO usada en este trabajo fueron de 19.5 D y 3.5 D respectivamente. La lente Tecnis es una LIOM refractiva-difractiva, formada por 32 anillos, proporcionando una adición de 4,0 D. La altura de los anillos es la misma en toda la superficie de la lente, proporcionando una distribución de energía entre el foco de lejos y de cerca de 50/50.

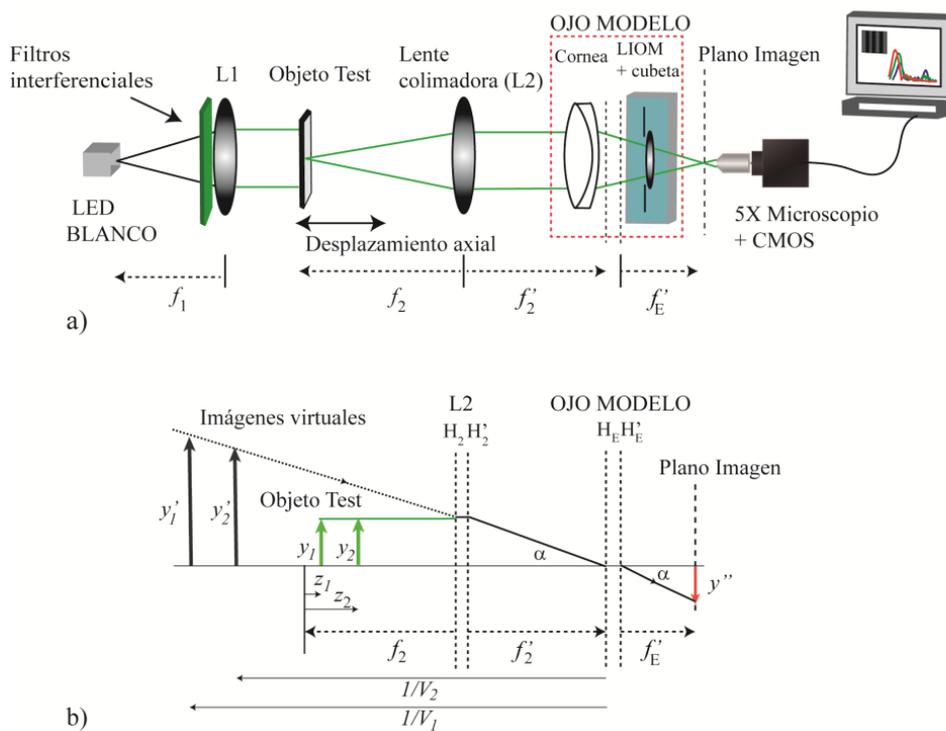


Fig. 2. a) Dispositivo experimental para la medida de la MTF en función del desenfoque. b) Trazado de rayos correspondientes al sistema representado en a). Se observa que para diferentes posiciones axiales del objeto el ángulo subtendido por las imágenes es constante.

Tabla 1. Radios de curvatura de ambas caras de la 6FD y tamaño de las zonas de la Cara 1 medidos con el perfilómetro. Entre paréntesis se muestra el error relativo.

Cara 1				Cara 2
R zona1 (mm)	R zona2 (mm)	R zona3 (mm)	R zona4 (mm)	
9.65 (0.82 %)	12.43 (0.08 %)	9.83 (1.02 %)	12.62 (1.61 %)	22.74 (0.65 %)
Zona 1 (mm)	Zona 2 (mm)	Zona 3 (mm)	Zona 4 (mm)	-----
1.00±0.10 (3.09 %)	1.39±0.10 (2.18 %)	1.74±0.12(3.57 %)	2.3±0.10(2.38 %)	-----

Para pupila de 4.2 mm la lente ReZoom proporciona una mayor distribución de luz al foco de lejos que al de cerca, la lente Tecnis divide equitativamente la energía entre los dos focos y la lente 6FD da preferencia al foco destinado a la visión cercana. Para pupila de 2.7 mm la lente ReZoom presenta una clara dominancia para el foco de lejos, comportándose casi como una lente monofocal, la lente Tecnis presenta el mismo comportamiento que para pupila grande y la lente 6FD le sigue dando mayor preferencia al foco para visión cercana, mientras que el foco para visión lejana presenta el mismo comportamiento que para pupila de 4.2 mm.

Para valorar el comportamiento policromático se midió la MTF para diferentes posiciones axiales y 3 longitudes de onda (490 nm, 560 nm y 630 nm) para un diámetro pupilar de 4.2 mm. En este caso para obtener una mayor resolución axial se utilizó el dispositivo sin córnea artificial. En la Fig. 3b) se muestran los resultados obtenidos para la lente 6FD y las lentes comerciales (ReZoom y Tecnis). Se evaluaron dos parámetros en función de la longitud de onda: por una parte, la diferencia en la posición axial de los focos y por otra la relación de intensidad para cada foco. La diferencia en la posición axial se calculó como la diferencia en dioptrías entre la posición para el foco rojo ( $\lambda=630$  nm) y el azul ( $\lambda=490$  nm), (el valor aparece en la figura y la flecha indica la dirección de la misma). Se observa que el foco de lejos para las tres LIOMs tiene un comportamiento refractivo ya que la distancia focal para el azul es más corta que para el rojo. Sin embargo, en el foco de cerca la lente Tecnis muestra una aberración cromática mayor y de signo opuesto a la que presenta el foco de lejos de la misma lente. En el foco de cerca, las lentes 6FD y ReZoom presentan el mismo comportamiento que en el foco de lejos. Por otra parte, para la lente Tecnis se observa que la distribución de energía en cada foco es altamente dependiente de la longitud de onda y que la distribución de energía entre los focos de cerca y de lejos pierde progresivamente la relación de 50/50, al alejarse de la longitud de onda de diseño. Así, mientras que con la longitud de onda 630 nm el foco de cerca muestra una intensidad máxima un 30% inferior que la del foco de lejos, con una longitud de onda de 490 nm ocurre lo contrario y el foco de cerca es más intenso que el correspondiente foco de lejos. Por el contrario, para la lente 6FD y ReZoom, el máximo de la MTF para los dos focos apenas se modifica al cambiar la longitud de onda. Para la lente 6FD existe una superposición parcial entre los focos secundarios para las diferentes longitudes de onda. Es decir, el foco para el rojo y el foco para el azul se solapan en determinadas posiciones axiales junto a los focos de las longitudes de onda intermedias.

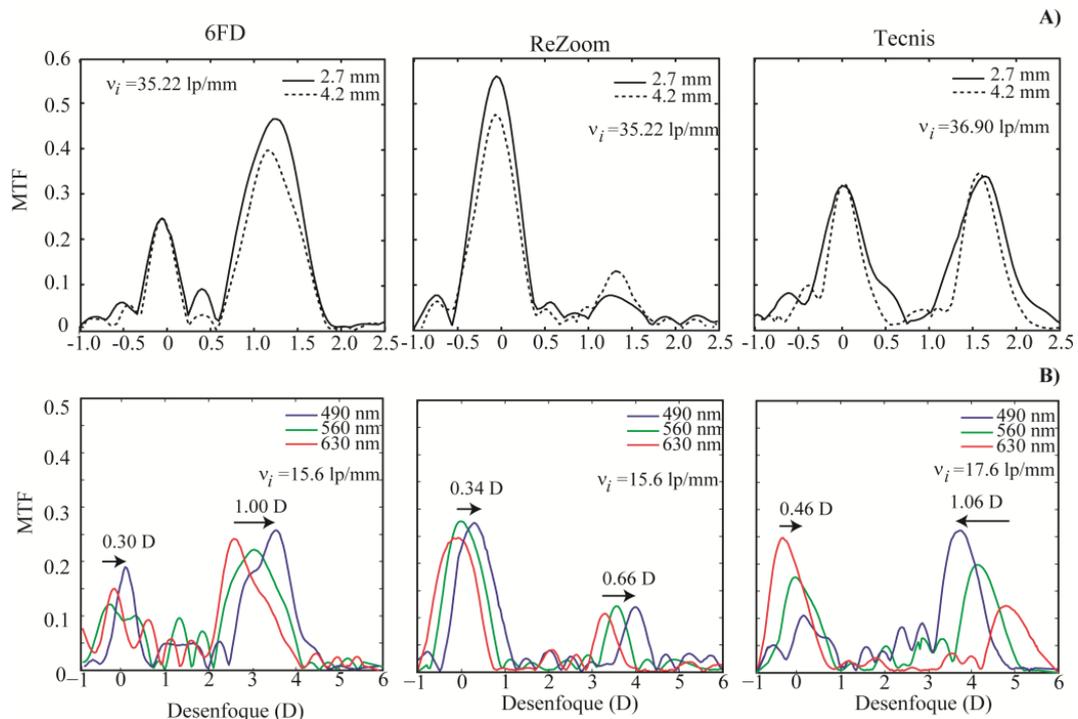


Fig. 3. a) MTFs monocromáticas para diferentes posiciones axiales y dos diámetros pupilares con córnea artificial. El desenfoque cero corresponde a la medida del foco de lejos. b) MTFs policromáticas para diferentes posiciones axiales y un diámetro pupilar de 4.2 mm sin córnea artificial. Las flechas indican la dirección de la aberración cromática y su valor. Donde  $v_i$  representa la frecuencia imagen para una determinada frecuencia objeto  $v_o$  y depende del aumento del sistema y por lo tanto de la potencia de la LIOM a medir.

Por último, se realizó un análisis policromático cualitativo para valorar como las diferentes LIOMs se comportan con luz blanca con el fin de obtener imágenes que se aproximan a las condiciones visuales reales. En este caso se utilizó como objeto test el USAF que presenta múltiples frecuencias discretas. En la Fig. 4 se muestran las imágenes para el foco de lejos y de cerca obtenidas con el ojo modelo para un diámetro de 2.7 mm. En la misma figura se muestran dos planos desenfocados  $\pm 0.25$  D alrededor del foco para estudiar la profundidad de foco de las mismas. Los resultados obtenidos están en concordancia con los resultados cuantitativos presentados anteriormente.

#### 4. Conclusiones

Se han propuesto nuevos diseños de LIOMs fractales y se han estudiado los diferentes parámetros libres de diseño que condicionan las propiedades de focalización. Los primeros prototipos de las LIOMs fueron fabricados por la empresa AJL Ophthalmic S.A. con las mismas técnicas de fabricación que las que utilizan para LIOs monofocales. Por otra parte, se realizó el control de calidad de las mismas atendiendo a las especificaciones que vienen determinadas en las Norma ISO. Para ello, se han diseñado y construido dos sistemas experimentales que permiten obtener la MTF para diferentes posiciones axiales y la PSF para distintos diámetros pupilares y longitudes de onda.

	6FD	ReZoom	Tecnis
<b>FOCO DE LEJOS DIÁMETRO 2.7 mm</b>			
<b>-0.25 D</b>			
<b>0 D</b>			
<b>+0.25 D</b>			
<b>FOCO DE CERCA DIÁMETRO 2.7 mm</b>			
<b>-0.25 D</b>			
<b>0 D</b>			
<b>+0.25 D</b>			

Fig. 4. Imágenes del USAF obtenidos con luz blanca para los dos focos y un diámetro pupilar de 2.7 mm.

En este trabajo se presentan los resultados de calidad óptica obtenidos con un modelo concreto de LIOM fractal denominada 6FD. Los resultados obtenidos fueron comparados con dos LIOMs comerciales. La lente propuesta presenta una menor aberración cromática que la lente difractiva y la eficiencia de difracción en cada foco es independiente de la longitud de onda. La aberración cromática de la lente 6FD es menor debido a que cada foco principal exhibe una mayor extensión axial gracias a la presencia de los focos secundarios, dando lugar a una superposición parcial entre los mismos para las diferentes longitudes de onda. Este modelo de LIOM 6FD podría utilizarse en sujetos con un alta demanda para visión de cerca.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del Proyecto FIS2011-23175 y por la Generalitat Valenciana a través de los Proyectos PROMETEOII/2014/072 y ACOMP/2014/180. L. Remón agradece el apoyo de todos los miembros del grupo DiOG (UV-UPV), a la empresa AJL Ophthalmic S.A. por la fabricación de las lentes intraoculares que se han caracterizado en este trabajo y a la Fundación CajaMurcia por la concesión de una beca pre-doctoral.