



Lentes Intraoculares y de contacto multifocales.

Nuevos diseños basados en geometrías aperiódicas.

Amparo Pons Martí ⁽¹⁾, Walter Furlan ⁽¹⁾ y Juan Antonio Monsoriu Serra ⁽²⁾

(1) Universidad de Valencia, (2) Universidad Politécnica de Valencia

1.- Resumen

Las lentes con geometrías aperiódicas, y como caso particular las de tipo fractal, pueden entenderse como una generalización de las lentes convencionales refractivas y difractivas. Este nuevo concepto de lentes, propuesto en 2003 por nuestro grupo de investigación (DiOG <http://diog.webs.upv.es/>), exhibe una distribución de irradiancia axial con múltiples focos cuya estructura interna presenta características fractales, reproduciendo las propiedades de autosimilitud de la propia lente. Así, variando ciertos parámetros de diseño, es posible generar, por ejemplo, un incremento en la profundidad de enfoque de la lente y/o una disminución de la aberración cromática en relación con la de una placa zonal convencional.

Dadas las nuevas propiedades de focalización y formación de imágenes que exhiben estos elementos aperiódicos multifocales, sus aplicaciones son potencialmente de gran interés en el ámbito de la Óptica Oftálmica. De hecho, actualmente estamos desarrollando, en colaboración con la industria oftalmológica, nuevas propuestas tanto de lentes intraoculares, como de lentes de contacto, multifocales. Los primeros prototipos de estas lentes ya se han fabricado y se están caracterizando ópticamente en nuestros laboratorios.

En este seminario se discuten las características generales de las lentes con geometrías aperiódicas, sus propiedades y su adaptación al diseño de lentes intraoculares y de contacto multifocales. Se muestran los resultados de los primeros prototipos y se comparan con algunas lentes ya existentes en el mercado. Los resultados obtenidos están de acuerdo con las predicciones teóricas y constatan el buen comportamiento óptico de estas nuevas geometrías.

2.- Lentes con geometrías fractales.

Las placas zonales fractales (PZFs) son un nuevo tipo de PZs desarrollado por nuestro equipo de investigación [1]. Éstas se caracterizan porque en su diseño la estructura periódica de las placas zonales convencionales (PZs) es sustituida por una estructura fractal, como por ejemplo, *el conjunto de Cantor triádico* cuya generación se muestra en la Fig. 1a. La estructura se genera a partir de una barra de longitud unidad llamada: *iniciador* ($S=0$). En la primera etapa de generación del fractal ($S=1$), el segmento inicial ($S=0$) se divide en tres partes iguales de longitud $d=1/3$ y se elimina la parte central. En las etapas sucesivas $S=2,3$, etc. el proceso se repite en cada una de las

partes resultantes. El sistema resultante se puede entender como una estructura cuasi periódica de periodo equivalente $\Lambda = 2 * 3^{-S}$ en el que algunos segmentos han sido eliminados. Esta estructura fractal representa la transmitancia de la lente en la variable radial cuadrática, r^2 , donde los segmentos blancos representan zonas transparentes y los huecos zonas opacas. La PZF se obtiene rotando la estructura fractal alrededor de uno de sus extremos. En la Fig. 1b se muestra una PZF construida a partir del *conjunto de Cantor triádico* para $S=3$ y en la Fig. 1c se muestra la irradiancia axial proporcionada por la PZF anterior (considerado la teoría escalar de la difracción dentro de la aproximación de Fresnel). Se observa que una PZF se puede entender como una placa zonal convencional donde algunas zonas han sido eliminadas. Se observa además que esta lente presenta múltiples focos a lo largo del eje óptico cuya estructura interna posee un perfil fractal. La irradiancia axial reproduce la autosimilitud de la propia lente [1, 2] y la posición del foco principal coincide con el que proporciona una PZ convencional.

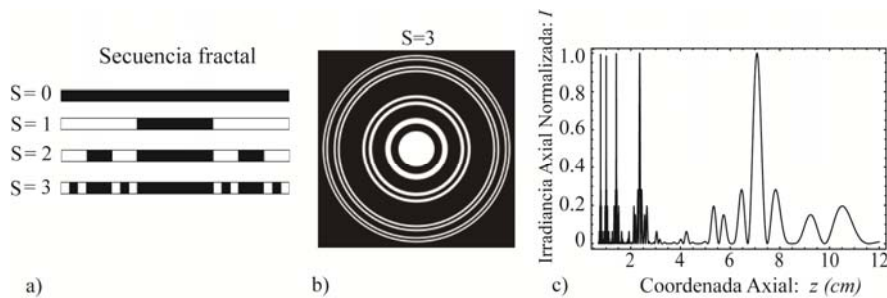


Figura 1. a) Esquema de generación del Conjunto de Cantor para $S=1, 2$ y 3 . b) Placa zonal Fractal para $S=3$. c) Irradiancia axial normalizada vs. coordenada axial obtenida para PZF de orden $S=2$. Para el cálculo de la irradiancia se utiliza: $\lambda=633$ nm y $a=2.2$ mm (extensión máxima de la pupila).

A la hora de la implementación práctica de las FPZs en dispositivos ópticos realistas, es necesario un diseño que mejore su eficiencia en difracción y, en este contexto, nuestro grupo ha propuesto un nuevo diseño: la *Lente del Diablo* (DL) [3], que es un elemento difractivo del tipo Kinoform donde su distribución de fase viene caracterizada por la función *escalera del diablo* o *función de Cantor triádica*.

En la Fig. 2a se representa el conjunto de Cantor para $S=3$ y la correspondiente *función de Cantor* $F_3(x)$. Se observa que la escalera del diablo es monótonamente creciente en los N segmentos y constante entre dichos segmentos. De modo análogo al caso de las PZFs, a partir de la *función de Cantor* $F_S(x)$ se puede obtener la LD como un elemento óptico difractivo con simetría circular, tal como se esquematiza en la Fig. 2b. En la parte superior de la Fig. 2b se muestra el perfil de una LD para $S=3$ y, por comparación, en la inferior de la misma figura se muestra el perfil correspondiente a una lente Kinoform de la misma distancia focal. Las LDs pueden ser entendidas como lentes Kinoform donde se han eliminado determinadas zonas. Finalmente, en la Fig. 2c se muestra la irradiancia axial producida por la LD. Se observa un único foco principal y múltiples focos subsidiarios que generan una estructura fractal que reproduce la

autosimilitud de la propia lente. Además se pone de manifiesto que la LD mejora la eficiencia de difracción con respecto a la PZF, ya que consigue una apodización de los órdenes superiores.

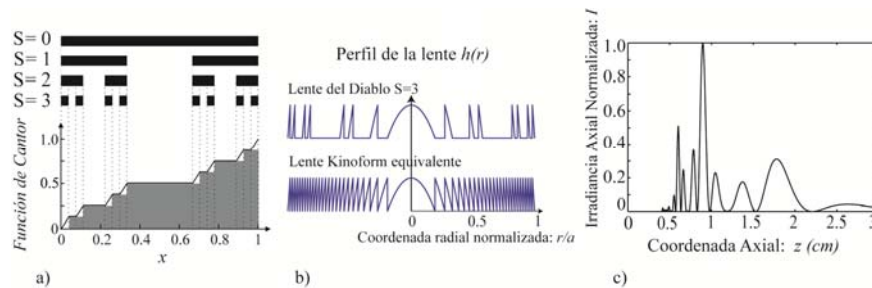


Figura 2. a) Esquema de generación del Conjunto de Cantor para $S=3$ y la correspondiente función de cantor $F_3(x)$. b) Perfil de la LD para $S=3$. En la parte inferior se muestra la lente kinoform equivalente. c) Irradiancia axial obtenida para la LD de orden $S=2$. Para el cálculo de la irradiancia se utiliza una $\lambda=555$ nm y $a=3$ mm (extensión máxima de la pupila).

Adicionalmente, se ha introducido un nuevo parámetro de diseño τ que permite una generalización de la LD conocidas como *Lentes del Diablo Generalizadas (LDG)* [4]. El factor de generalización τ se define como la proporción entre el periodo equivalente y el segmento d del conjunto de Cantor, siendo $\tau = \Lambda/d$ un número entero positivo. En la Fig.3 se resume el proceso de generación y el comportamiento axial de este nuevo tipo de lentes. Se observa que presentan un foco principal y focos subsidiarios con perfiles autosimilares. El número de focos subsidiarios es más alto que el de la LD triádica, lo que se traduce en un aumento de la profundidad de foco.

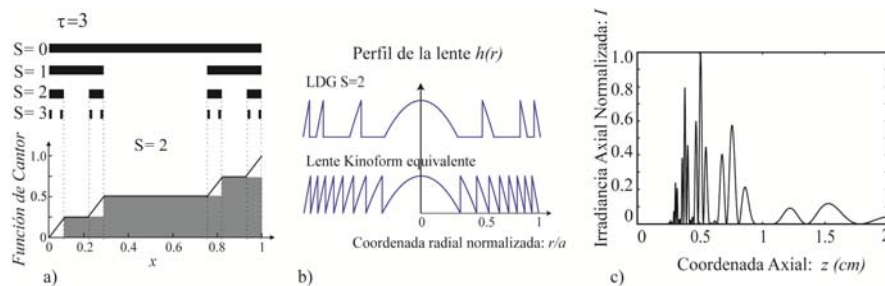


Figura 3. a) Esquema de generación del Conjunto de Cantor Generalizado para $\tau=3$ y distintos valores de S . En la parte inferior se muestra la función de Cantor Generalizada. b) Perfil de la LDG para $S=2$. En la parte inferior se muestra la Kinoform equivalente. c) Irradiancia axial normalizada vs. coordenada axial obtenida para una LDG ($S=2$ y $\tau=3$). Para el cálculo de la irradiancia axial se utiliza $\lambda=555$ nm y $a=3$ mm (extensión máxima de la pupila).

3.- Nuevos diseños de lentes Intraoculares y de contacto multifocales.

Las interesantes propiedades de focalización y formación de imágenes que exhiben las lentes de geometría fractal antes descritas pueden ser explotadas para el diseño de Lentes Intraoculares Multifocales (LIOMs). De hecho, las LIOMs fractales propuestas por nuestro grupo están basadas en la *escalera del diablo*.

Para la implementación de real de estas lentes, los diseños teóricos se han modificado atendiendo a las características del proceso de fabricación. En concreto, a partir de una lente base refractiva se ha modificado su superficie incrementalmente utilizando la función construida a partir de una secuencia aperiódica, consiguiendo de esta manera, un perfil continuo de fase. 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. En la Fig. 4 se muestra la gráfica que representa el perfil de la LIOM de acuerdo a la función de Cantor. La curva escalonada 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. 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 .

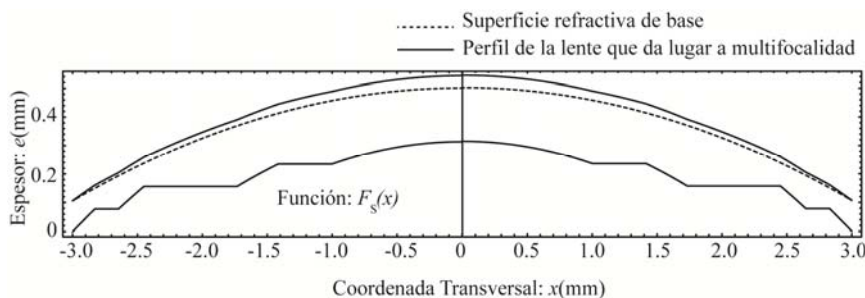


Figura 4. Gráfica que representa el perfil de la lente de acuerdo a la función de Cantor ($S=2$).

Los parámetros libres de diseño de las lentes propuestas son: el número total de zonas, N , que viene fijado por el número de iteraciones, S , empleado para generar la función ordenada aperiódicamente, la distribución del perfil que puede estar localizado en todo el diámetro de la zona óptica de la lente, o bien únicamente en la zona central de la misma, b , la alternancia entre las zonas de lejos y cerca (que pueden invertirse) y el valor de K que puede ser cualquier número entero. Es importante destacar que existe una limitación para el valor máximo de adición $Ad = P_C - P_L$ que se puede implementar en la LIOM y que depende de K . La relación entre estos parámetros es la siguiente: $Ad = 2\lambda / pK$ donde $p = b^2 / N$.

En la Fig. 5 se muestra la irradiancia axial normalizada de una de estas lentes calculada para iluminación monocromática ($\lambda=555$ nm) y diferentes tamaños de pupila. Se observa una dependencia con el diámetro pupilar que, sin embargo, se puede minimizar considerando diferentes valores de la Adición Ad y K . Se observa también que los focos principales se encuentran rodeados de múltiples focos secundarios, proporcionando una mayor profundidad de foco, que permite corregir pequeños astigmatismos y lograr una menor dependencia del tamaño pupilar. Además, gracias a la presencia de los focos secundarios se obtiene una lente con menores aberraciones cromáticas, ya que al utilizar luz policromática se produce una superposición parcial entre los mismos 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 proporcionando un foco “cuasi blanco” y en consecuencia con una aberración cromática menor.

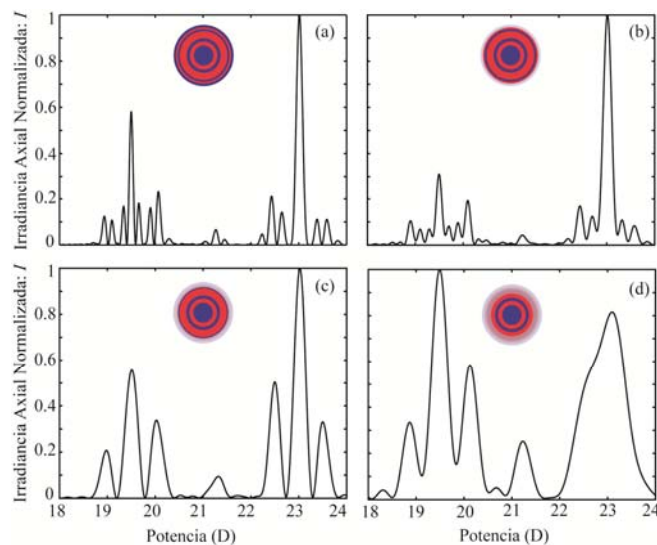


Figura 5. Irradiancia axial normalizada para diferentes radios pupilares a) 3 mm, b) 2.5 mm, c) 2.00 mm, d) 1.5 mm para la lente multifocal ($P_L=19.5D$, $Ad=3.5 D$, $k=3$, $b=2.92$ mm y zona central destinada a la visión de lejos). Se muestra un esquema de las zonas presentes para cada tamaño de pupila.

Desde hace algún tiempo, la empresa *AJL Ophthalmic S.A.* (www.ajlsa.com) ha mostrado su interés en fabricar algunos de estos novedosos diseños con geometría fractal y, fruto de dicha colaboración, se ha presentado conjuntamente una patente internacional [5].

Los conceptos anteriores también pueden extenderse al diseño de lentes de contacto y por ello, recientemente, hemos comenzado a trabajar en un proyecto en esa línea. Las primeras lentes ya han sido fabricadas por la empresa *Lenticon* y los resultados obtenidos hasta el momento muestran un comportamiento satisfactorio. En la conferencia se presentarán algunos de ellos.

4.- Calidad óptica de los nuevos diseños. Algunos resultados.

Las Normas internacionales para la caracterización de las propiedades ópticas de las lentes se basan en la medida de la *MTF* de un ojo artificial con LIO. En el caso de las LIOMs, se debe valorar la *MTF* monocromática ($\lambda=560\text{ nm}$) para una frecuencia espacial determinada (5 líneas/mm) en función del desenfoque. De este modo, se describe el comportamiento de la LIOM para visión lejana, intermedia y cercana de manera simultánea y se estudia la profundidad de foco. Los resultados que se muestran en esta contribución han sido obtenidos con un sistema Sensor de Frente de Onda basado en una nueva técnica interferométrica. El dispositivo utilizado, KALEO (PHASICS), permite no sólo la caracterización de la calidad óptica y el cálculo de la(s) potencia(s) de LIOs monofocales o multifocales siguiendo las especificaciones de dichas Normas internacionales, sino la obtención del perfil de fase de las lentes y el cálculo de la *MTF* 1D.

El estudio del comportamiento óptico de las LIOMs, se ha completado con el dispositivo de formación de imágenes de objetos extensos, diseñado por nuestro grupo nuestro grupo, cuyo esquema se muestra en la Fig.6.

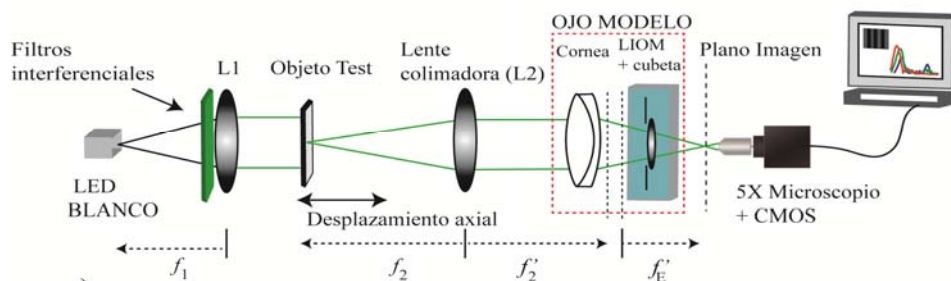


Figura 6. Dispositivo de obtención de imágenes de objetos extensos. El movimiento axial del objeto se consigue mediante un motor paso a paso (no representado).

El desplazamiento del objeto, la captura y el procesamiento de las imágenes se automatizaron con un programa propio desarrollado en LabVIEW®. Con el sistema propuesto 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 aproximan a las condiciones reales de visión. Como objeto se utilizó, un test de resolución (USAF, U.S Air Force 1951) que presenta múltiples frecuencias discretas.

Aunque se han diseñado y fabricado diferentes LIOMs con distintos parámetros de diseño, a modo de ejemplo, se presentan los resultados de 2 tipos de LIOMs fractales. La única diferencia que existe entre estas 2 lentes es la alternancia entre las zonas y por lo tanto el número de zonas destinadas para visión de lejos y de cerca. La nomenclatura que se utiliza para denominarlas es: 6FI y 6FD, donde el 6 representa el

diámetro máximo en el que se distribuye el perfil, F indica que la lente diseñada tiene una geometría fractal y la letra: I o D representa la alternancia de las zonas para visión de lejos y cerca (I: centro-lejos) (D: centro-cerca).

Las características de las LIOMs 6FI, 6FD y de las 4 LIOMs comerciales, con las que se han comparado, se resumen en la Tabla 1.

Nombre	P _I /Ad	Tipo
6FI y 6FD	19.5 D/ 3.5 D	Fractal
ReZoom	19.5 D/ 3.5 D	Refractiva Zonal
Tecnis	22 D/ 4 D	Híbrida
Restor	22.5 D/ 4 D	Híbrida Apodizada
AcriLisa	13.5 D/ 3.75 D	Híbrida

Tabla 1. Características de las LIOMs fractales y comerciales evaluadas

Algunos de los resultados experimentales obtenidos se muestran en las figuras siguientes: Fig.7, Fig.8 y Fig.9.

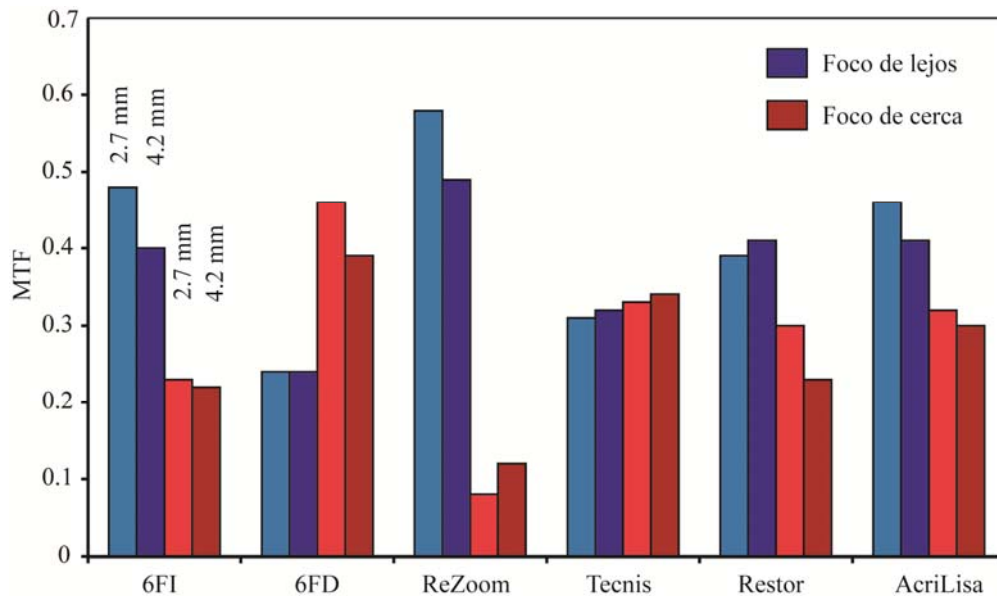


Figura 7. Valor de la MTF monocromática ($\lambda=560$ nm y frecuencia objeto de 5l/mm) en función del diámetro pupilar para los dos foco..

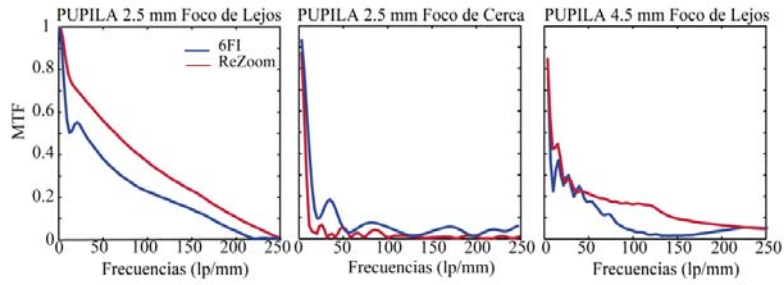


Figura 8. MTFs 1D para las lentes 6FI y ReZoom.

	6FI	ReZoom	Tecnis	Restor	AcriLisa
FOCO DE LEJOS DIÁMETRO 2.7 mm					
-0,25D					
0 D					
+0,25D					
FOCO DE CERCA DIÁMETRO 2.7 mm					
-0,25D					
0 D					
+0,25D					

Figura 9. Imágenes del Test USAF obtenidas con luz blanca para los dos focos.



5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad (FIS2011-23175), la Generalitat Valenciana (PROMETEO2009-077) y la Universitat Politècnica de València (INNOVA SP20120569), España.

6. Referencias.

- [1] G. Saavedra, W.D. Furlan y J.A. Monsoriu, “*Fractal Zone Plate*”, *Optics Letters* **28**(12), 971-973 (2003).
- [2] W.D. Furlan, G. Saavedra y J.A. Monsoriu, “*Fractal Zone Plate produce axial irradiance with Fractal Profile*”, *Optics and Photonics News* **14**(12), 31 (2003).
- [3] J.A. Monsoriu, W.D. Furlan, G. Saavedra y F. Giménez, “*Devil’s lenses*”, *Optics Express* **15**(21), 524-529 (2007).
- [4] C. Casanova, W.D. Furlan, L. Remón, A. Calatayud, J.A. Monsoriu y O. Mendoza-Yero, “*Self-similar focusing with generalized Devil’s Lenses*”, *Journal of the Optical Society of America A* **28**(2), 210-213 (2011).
- [5] W.D. Furlan, P. Andrés, G. Saavedra, A. Pons, J.A. Monsoriu, A. Calatayud, L. Remón, F. Giménez, J.L. Rojas, E. Larra y P.J. Salazar “*Lente oftálmica multifocal y prodecimiento para su obtención*”. PCT/ES2011/070559 (2010).