

Medida de la calidad óptica de lentes intraoculares multifocales *in vitro* mediante un sistema de paso simple y doble paso modificado

Harold Zuluaga Duque^{1 *}, Sergio Luque², Fernando Díaz-Doutón², Jaime Pujol¹
¹ Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6). Rambla Sant
Nebridi 10, 08022, Terrassa-Barcelona. <http://www.cd6.upc.es>

² Visiometrics S.L., Crta. Nacional 150 Km. 14.5 IPCT-TR20 08227 Terrassa
<http://www.cd6.upc.es>

1. Introducción

Las cataratas son un proceso fisiológico inherente al envejecimiento, debido a la opacificación del cristalino, que acarrea pérdida de visión y es la causa del 75 % de casos de baja visión en pacientes de más de 65 años, y cuya única solución terapéutica es la cirugía, donde se extrae el cristalino y se sustituye por una lente intraocular (LIO). Una LIO monofocal permite la corrección del efecto refractivo creado al extraer el cristalino. En los últimos años se han desarrollado LIOs multifocales que permiten al paciente ver simultáneamente de lejos y de cerca. La evaluación de la calidad óptica de una LIO monofocal puede hacerse por ejemplo utilizando un sistema de paso simple (solamente *in vitro*) o utilizando la técnica del doble paso o un sensor para la medida de aberraciones (*in vitro* o *in vivo*). Estos sistemas actualmente están implementados en clínica. Sin embargo en el caso de LIOs multifocales, el desenfoque que se produce en la imagen del primer paso, es una limitación muy importante para la evaluación de la calidad óptica de estas lentes. En este trabajo se presentan medidas de la calidad óptica de LIOs multifocales obtenidas *in vitro* a través de un sistema de doble paso modificado que permite tener enfocada la luz en la retina después del primer paso. Los resultados obtenidos se comparan con los obtenidos con un sistema de paso simple.

2. Método

En la técnica de paso simple (Figura 1a), un láser es colocado en la parte posterior del ojo artificial que contiene la LIOM, enfocándose luego mediante un sistema Badal las imágenes de los focos de la LIOM en la CCD. La técnica de doble paso [2] está basada en formar la imagen de una fuente puntual sobre la retina y analizar la luz reflejada después del doble paso a través del medio ocular. Esta técnica de doble paso permite evaluar objetivamente la calidad óptica y se ha manifestado como la única que tiene en cuenta los dos factores que influyen en la óptica ocular que son las aberraciones y la difusión intraocular [1]. En la Figura 1b, se muestra un sistema de doble paso típico. En el primer paso, un láser que está acoplado a una fibra (M), se colima mediante una lente (L_1), y tras reflexión en un separador de haz (BS_1), atraviesa el sistema Badal compuesto por las lentes $L_3 - L_4$ y los espejos móviles $E_2 - E_3$, para penetrar en el ojo del paciente formando una imagen de O en la retina (O'). La luz se refleja en la retina, y tras realizar el mismo trayecto a la inversa atraviesa BS_1 y se forma una imagen de O' en una CCD, O'' que es conocida como imagen de doble paso o imagen aérea retiniana. La distribución de intensidades en el plano de la CCD es igual a la correlación cruzada de las PSFs de cada paso de tal forma que se obtiene la siguiente ecuación que asocia la intensidad retiniana con la intensidad sobre la CCD:

$$TF [I''(x'', y'')] = OTF_1(u, v) OTF_2(u, v) = MTF_1(u, v) MTF_2(u, v) e^{i(PTF_1(u, v) - PTF_2(u, v))} \quad (1)$$

Donde la OTF es la Función de Transferencia Óptica, cuyo módulo es la Función de Transferencia de Modulación y su fase la Función de Transferencia de Fase (PTF, del inglés Phase Transfer Function). Para extraer información de la MTF ocular pueden usarse dos configuraciones distintas del sistema de doble paso: la simétrica y la asimétrica. En el doble paso simétrico: Se corresponde con el caso en que las pupilas de entrada y salida son del mismo tamaño, lo que produce la pérdida de la información de las aberraciones asimétricas. En el doble paso asimétrico: La pupila de uno de

* e-mail: harold.zuluaga@cd6.upc.edu

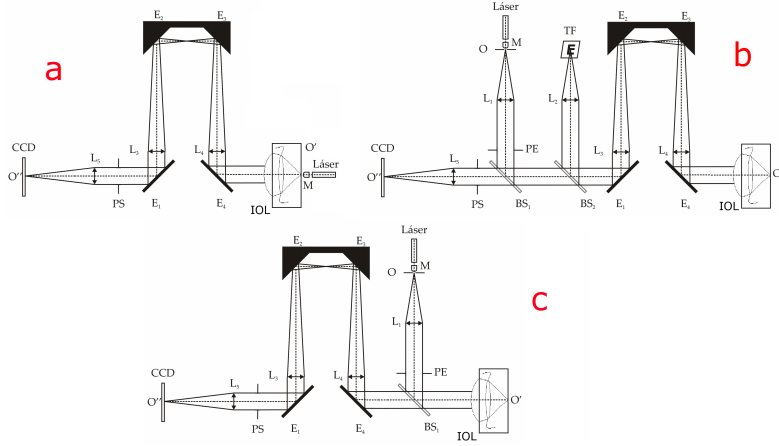


Figura 1: Esquema básico de los sistemas utilizados, a- sistema de paso simple, b- sistema de doble paso, c- sistema de doble paso modificado.

los pasos, es de un diámetro muy reducido, de forma que en ese paso el sistema puede considerarse limitado por difracción, es decir, el ojo no tiene ningún efecto de degradación en la formación de la imagen en dicho paso. En el sistema de doble paso modificado, figura 1c, se utilizan las mismas partes del doble paso convencional, pero al no pasar el láser por el sistema badal se obtiene la imagen de los dos focos en la CCD, ya que los rayos que llegan a la superficie de la cornea artificial son paralelos, lo que se asemeja a la situación de visión lejana, cosa que no ocurre cuando el primer paso atraviesa el sistema badal donde los rayos no necesariamente llegan paralelos y al tener cierta vergencia producen poca claridad en los focos hacia el segundo paso. Las medidas se realizaron sobre 3 tipos de lentes intraoculares (IOLs) multifocales: La NGX1 multifocal refractiva, la SN60D3 multifocal difractiva, la SN6AD3 multifocal difractiva con la parte posterior asferica. Las lentes intraoculares multifocales utilizadas se midieron todas con pupila de salida de 4mm, las pupilas de entrada fueron de 2mm y de 4mm, para estudiar la configuración asimétrica (pupila de entrada 2mm y pupila de salida 4mm) y simétricas (pupila de entrada 4mm y pupila de salida 4mm).

3. Resultados

Las medidas obtenidas con el sistema de doble paso modificado pueden compararse con la imagen obtenida por convolución de dos imágenes de paso simple, de acuerdo con la expresión(1). En la tabla 1 se indican las diferentes configuraciones estudiadas.

Imagen medida con sistema de doble paso modificado.	Imagen que generan las convoluciones medidas con sistema de paso simple.
Foco 1 Pupila de 2mm	Foco 1 Pupila de 2mm conv. Foco 1 Pupila de 4mm
Foco 2 Pupila de 2mm	Foco 1 Pupila de 2mm conv. Foco 2 Pupila de 4mm
Foco 1 Pupila de 4mm	Foco 1 Pupila de 4mm conv. Foco 1 Pupila de 4mm
Foco 2 Pupila de 4mm	Foco 1 Pupila de 4mm conv. Foco 2 Pupila de 4mm

Tabla 1: Tabla con las reglas de convolución de imágenes de paso simple para obtener las diferentes imágenes de los focos experimentales medidas con el sistema de doble paso modificado, para pupilas de 2mm y 4mm; (conv.) significa convolución.

Las MTF's de las lentes intraoculares se presentan en la figuras 2, 3, 4. Tanto en las medidas experimentales como en las obtenidas por convolución, las MTF de las LIO eran muy similares, en la figura 2 de la lente NGX1 puede observarse que el foco 1 con pupila de 2mm tuvo una MTF mayor que la del foco 1 pupila de 4mm, lo mismo ocurrió en el caso del foco 2, donde la pupila de 2mm tuvo una MTF mayor que la de 4mm. Esto quiere decir que según estos resultados para la lente intraocular refractiva NGX1 entrar a la lente con un tamaño de pupila de 2mm genera mejor calidad visual que entrar con 4mm. Para la lente SN6AD3 que se puede apreciar en la figura 3, que el comportamiento de la MTF alcanza mayores valores cuando se entra al sistema

con pupila de 4mm tanto para el foco 1 como para el foco 2, esto quiere decir que para la lente intraocular difractiva con parte posterior asferica SN6AD3 entrar a la lente con un tamaño de pupila de 4mm genera mejor calidad visual que entrar con 2mm. Para la lente SN60D3 que se puede apreciar en la figura 4, el comportamiento de la MTF alcanza mayores valores cuando se entra al sistema con pupila de 4mm tanto para el foco 1 como para el foco 2, esto quiere decir que para la lente intraocular difractiva SN60D3 entrar a la lente con un tamaño de pupila de 4mm genera mejor calidad visual que entrar con 2mm. Las MTFs medidas experimentalmente de las Lentes Intraoculares comparadas para un mismo foco pueden observarse, para el foco 1 y foco 2 con pupila de entrada de 2mm en la figura 5, para el foco 1 y foco 2 con pupila de entrada de 4mm en la figura 6.

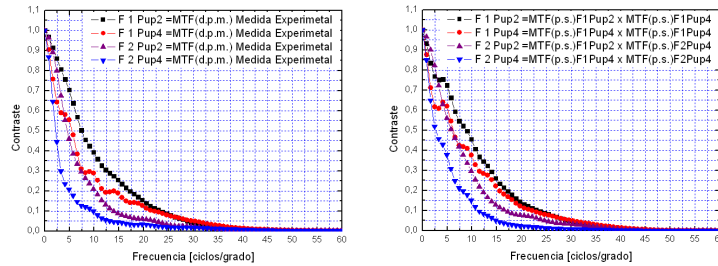


Figura 2: MTF's de la lente intraocular NGX1, para todos los focos de la lente, medidas experimentalmente, por medio del sistema de doble paso modificado y productos de la convolución de las imágenes de paso simple.

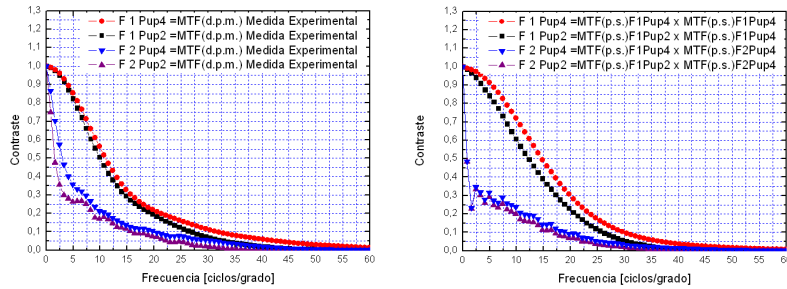


Figura 3: MTF's de la lente intraocular SN6AD3, para todos los focos de la lente, medidas experimentalmente, por medio del sistema de doble paso modificado y productos de la convolución de las imágenes de paso simple.

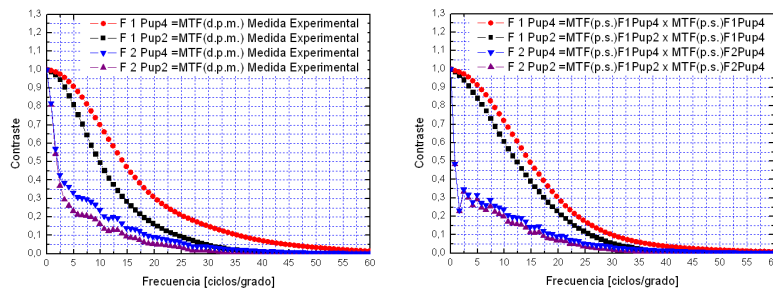


Figura 4: MTF's de la lente intraocular SN60D3, para todos los focos de la lente, medidas experimentalmente, por medio del sistema de doble paso modificado y productos de la convolución de las imágenes de paso simple.

Puede notarse claramente que para el foco 1 con pupila de entrada de 2mm, en la figura 5, hay un comportamiento muy similar en las lentes SN6AD3 y SN60D3 para bajas frecuencias, mientras que para altas frecuencias esta por encima la lente SN6AD3, manteniéndose siempre por abajo la lente NGX1; Para el foco 2 pupila de 2mm, en la misma figura, en bajas frecuencias parece comportarse mejor la lente NGX1 y las otras dos de forma muy similar; Para el foco 1 pupila de

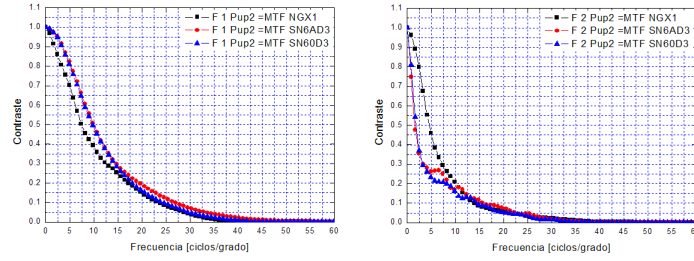


Figura 5: MTF's de las lentes intraoculares NGX1, SN6AD3 y SN60D3 para el foco 1 con pupila de entrada de 2mm y pupila de salida de 4mm (a la izquierda); MTF's de las lentes intraoculares NGX1, SN6AD3 y SN60D3 para el foco 2 con pupila de entrada de 2mm y pupila de salida de 4mm (a la derecha).

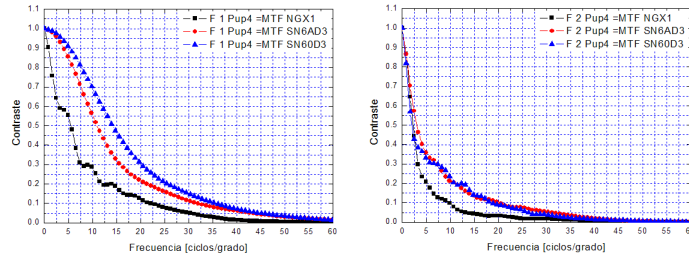


Figura 6: MTF's de las lentes intraoculares NGX1, SN6AD3 y SN60D3 para el foco 1 con pupila de entrada de 4mm y pupila de salida de 4mm (a la izquierda); MTF's de las lentes intraoculares NGX1, SN6AD3 y SN60D3 para el foco 2 con pupila de entrada de 4mm y pupila de salida de 4mm (a la derecha).

4mm, en la figura 6, se muestra un comportamiento mejor en la lente SN60D3, seguida por la SN6A3 y luego por la NGX1; Finalmente para el foco 2 pupila de 4mm, en la figura 6, se muestra un comportamiento muy similar tanto en la lente SN6AD3 como en la lente SN60D3, mientras que la lente NGX1 tiene una MTF por debajo de las otras dos.

4. Conclusiones

Se ha diseñado un nuevo sistema de medida de doble paso que permite superar las limitaciones del sistema convencional para la evaluación de LIOs. Se ha validado la nueva técnica desarrollada comparando los resultados de las MTFs obtenidos a través del nuevo sistema de doble paso modificado con las de MTFs de imágenes de paso simple convolucionadas que teóricamente generarán los mismos resultados. La nueva técnica desarrollada se ha aplicado a la medida de la calidad óptica de tres diseños distintos de lentes intraoculares (refractiva, difractiva y difractiva asférica). Los resultados obtenidos nos han permitido poner de manifiesto las diferencias de comportamiento entre ellas.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto DPI2008-06455-C02-01. Harold Zuluaga D. Agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación la beca predoctoral recibida.

Bibliografía

- [1] Fernando Díaz-Doutón and Antonio Benito and Jaume Pujol and Montserrat Arjona and José Luis Guell and Pablo Artal, "Comparison of the Retinal Image Quality with a Hartmann-Shack Wavefront Sensor and a Double-Pass Instrument", IOVS, 47, p. 1710-1716 (2006).
- [2] J. Santamaria, P. Artal and J. Bescós, "Determination of the point-spread function of human eyes using a hybrid optical-digital method", J. Opt. Soc. Am. A, 4, p. 1109-1114 (1987).