

Equipment for measuring the power of Progressive Addition Lenses

Equipo para medir la potencia de lentes progresivas

Y. Mejía-Barbosa*, S. Rodríguez-Mendoza

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

(*E-mail: ymejiab@unal.edu.co)

Received: 10/10/2024

Accepted: 13/12/2024

DOI: 10.7149/OPA.57.4.51188

ABSTRACT:

An optical device designed and manufactured at the Universidad Nacional de Colombia to characterize the refraction of progressive addition ophthalmic lenses is described. The operating principle of the device is the modified Hartmann test. The device evaluates in-frame or uncut lenses. It includes a linear translation stage that allows to measure a wide dynamic range of the refractive power of the lenses, an Arduino module to control the equipment functions, a Raspberry pi module with an application that processes the images, and a touch screen to operate the equipment and display the spherical power and cylinder maps of the lenses.

Key words: Progressive Lenses, Hartmann test, Refraction power maps

RESUMEN:

Se describe un equipo diseñado y fabricado en la Universidad Nacional de Colombia para medir la potencia refractiva de lentes oftálmicas progresivas. El equipo evalúa lentes enmarcadas en la montura o sin cortar. El principio de funcionamiento del equipo es la prueba de Hartmann modificada. El equipo incluye un desplazador lineal que permite evaluar en un amplio rango dinámico la potencia refractiva, una tarjeta Arduino Uno para controlar algunas de las funciones del equipo, un microcomputador (Raspberry Pi) para procesar las imágenes generadas con las lentes progresivas, una pantalla táctil para operar el equipo y visualizar los mapas de potencia esférica y cilindro. El equipo es portable y se puede disponer de él en un consultorio de optometría.

Palabras clave: Lentes progresivas, prueba de Hartmann, mapas de potencia refractiva.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] D. R. Pope, "Progressive addition lenses: history, design, wearer satisfaction and trends," in *Vision science and its applications*, p. NW9 (Optica Publishing Group, 2000). URL <https://doi.org/10.1364/VISA.2000.NW9>.
- [2] Essilor, "Compendio de Óptica Oftálmica: Las lentes progresivas," Varilux Univeristy (2006).
- [3] L. Qin, L. Qian, and J. Yu, "Design and fabrication of the progressive addition lenses," in *2011 International Conference on Optical Instruments and Technology: Solid State Lighting and Display Technologies, Holography, Speckle Pattern Interferometry, and Micro/Nano Manufacturing and Metrology*, vol. 8202, pp. 319–324 (SPIE, 2011). URL <https://doi.org/10.1117/12.907057>.
- [4] C.-Y. Huang, T. W. Raasch, Y. Y. Allen, J. E. Sheedy, B. Andre, and M. A. Bullimore, "Comparison of three techniques in measuring progressive addition lenses," *Optometry and vision science* **89**(11), 1564–1573 (2012). URL <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31826ca26b>.
- [5] <https://rotlex.com/products/class-plus/>.
- [6] <https://www.visionix.com/wp-content/uploads/2023/03/BrochureES-VX40-ind10-0322-WEB.pdf>.
- [7] T. W. Raasch, L. Su, and A. Yi, "Whole-surface characterization of progressive addition lenses," *Optometry and vision science* **88**(2), E217–E226 (2011). URL <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3182084807>.



- [8] J. T. Winthrop and C. R. Worthington, "Theory of Fresnel images. I. Plane periodic objects in monochromatic light," *JOSA* **55**(4), 373–381 (1965). URL <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.000373>.
- [9] K. Creath and J. Wyant, "Moiré and fringe projection techniques," *Optical shop testing* **2**, 653–685 (1992). URL <https://www.academia.edu/download/43904096/moirechaptersecured.pdf>.
- [10] Y. Nakano and K. Murata, "Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens," *Applied optics* **24**(19), 3162–3166 (1985). URL <https://doi.org/10.1364/AO.24.003162>.
- [11] I. Ghozeil, "Hartmann and other screen tests," *Optical shop testing* p. 323 (1978).
- [12] Y. Mejía Barbosa, "La prueba de Hartmann en ciencias de la visión," *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular* **10**(1), 149–165 (2012).
- [13] E. Kreyszig, *Differential geometry*, vol. 11 (Courier Corporation, 1991).
- [14] Y. Mejía, D. A. Mora, and D. E. Díaz, "Power maps and wavefront for progressive addition lenses in eye-glass frames," *Optometry and Vision Science* **91**(10), 1259–1270 (2014). URL <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000366>.
- [15] <https://www.python.org/> www.python.org/.
- [16] W. Burger and M. J. Burge, *Principles of digital image processing: advanced methods* (Springer Science & Business Media, 2013).
- [17] J. A. Quiroga, D. Crespo, and E. Bernabeu, "Fourier transform method for automatic processing of moiré deflectograms," *Optical Engineering* **38**(6), 974–982 (1999). URL <https://doi.org/10.1117/1.602138>.
- [18] Y. Mejía, "Extrapolation, interpolation, and identification of spots in Hartmann patterns," *Applied Optics* **53**(26), 6073–6082 (2014). URL <https://doi.org/10.1364/AO.53.006073>.
- [19] R. L. Burden, J. D. Faires, and A. M. Burden, *Numerical analysis* (Cengage learning, 2015).
- [20] <https://www.utb.edu.co/en/cancoa-2024/> www.utb.edu.co/en/cancoa-2024/.
- [21] S. Rodríguez-Mendoza and Y. Mejía-Barbosa, "Design and Assembly of a Prototype Equipment for Measuring the Refractive Power of Progressive Ophthalmic Lenses," in *Laser Science*, pp. JM4A–96 (Optica Publishing Group, 2023). URL <https://doi.org/10.1364/FIO.2023.JM4A.96>.

1. Introducción

Las lentes oftálmicas progresivas (PAL's, por sus siglas en inglés Progressive Addition Lenses) se emplean para corregir la presbicia junto con otros defectos refractivos como la miopía, hipermetropía o astigmatismo [1]. En una de sus caras la curvatura varía de manera continua, lográndose un aumento progresivo de la potencia refractiva desde la parte superior (para la visión lejana) hasta la parte inferior (para la visión cercana). En la otra cara la superficie es esférica o tórica [2]. El diseño óptico de estas lentes es más bien complejo, tallando la superficie con curvas horizontales de diferente radio de curvatura a lo largo de una línea (línea umbilical) desde arriba hasta abajo. Este tallado se realiza con máquinas de control numérico de gran precisión [3]. Desde el punto de vista del desempeño óptico una PAL tiene básicamente 4 zonas, como se muestra en la Fig. 1:

- zona de visión lejana, situada en la parte superior, empleada para la corrección de la miopía, hipermetropía y/o astigmatismo,
- zona de visión cercana, de potencia constante, situada en la parte inferior, empleada para la corrección de la presbicia,
- corredor o pasillo progresivo, que comunica la zona de visión lejana con la zona de visión cercana, en el que la potencia varía de una manera continua entre las potencias de las zonas de visión lejana y visión cercana. La diferencia de las potencias de las dos zonas se denomina adición progresiva. El corredor posee una cierta anchura con las características apropiadas para la visión del usuario,
- zonas marginales o laterales, donde la lente es defectuosa en la formación de la imagen debido a la geometría cilíndrica variable que resulta en la fabricación de estas lentes.

Algunas características ópticas de las PAL's, como la adición progresiva y la potencia de las zonas, generalmente se miden con lensómetros comunes. Sin embargo, esto son solo medidas locales, por lo que no se puede tener la caracterización refractiva en toda la región de las PAL's. Para medir las características ópticas en toda el área de las PAL's se han diseñado equipos que generan mapas bidimensionales de la potencia y el astigmatismo en cada punto de la PAL. El primer mapa, denominado mapa de potencia esférica (o simplemente esfera), muestra

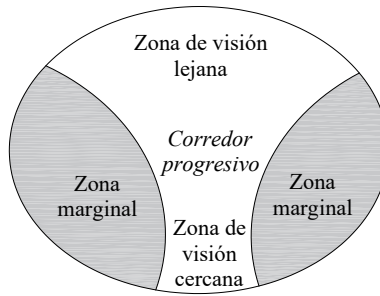


Fig. 1. Esquema de las zonas ópticas de una Lente Oftálmica Progresiva (PAL).

curvas de valor dióptrico constante denominadas isoesferas (que unen puntos de la superficie de la PAL con igual potencia esférica); el segundo mapa, denominado mapa de cilindro, muestra curvas de valor dióptrico constante denominadas isocilindros (que unen puntos de la superficie con igual valor de cilindro). Con el mapa de potencia esférica se obtiene directamente la adición y la potencia en las zonas de visión lejana y cercana, mientras que con el mapa de cilindro se puede medir la geometría del corredor progresivo.

A continuación, haremos una breve descripción de las principales técnicas empleadas para medir la potencia de las PAL's, a saber: (a) topografía mediante máquina de coordenadas con palpador de precisión, (b) deflecometría óptica de moiré, (c) prueba óptica de Hartmann [4]. Algunos de estos métodos han sido implementados por compañías como Rotlex [5] y Visionix [6]. Luego, con base en una modificación de la prueba de Hartmann mostraremos de manera general el diseño y la construcción de un equipo para medir la potencia de las PAL's. Tanto el diseño como la construcción han sido hechos completamente en la Universidad Nacional de Colombia por miembros del Grupo de Óptica del Departamento de Física. Finalmente, mostramos algunos resultados obtenidos con este equipo para una PAL (mapas de esfera y cilindro).

2. Algunas técnicas para medir la potencia de las PAL's

2.1. Máquina de coordenadas con palpador

Esta máquina permite desplazar linealmente una sonda o palpador en los tres ejes espaciales de coordenadas, x y y para el desplazamiento lateral y z para medir la altura [7]. El palpador es esencialmente una varilla con una pequeña esfera recubierta de diamante en uno de sus extremos. La máquina desplaza la esfera en una malla de puntos (x,y) . En cada punto la esfera se desplaza verticalmente hasta estar en contacto con la pieza que se está midiendo, de donde se obtiene la altura local de la pieza con respecto al plano de referencia, como se muestra en la Fig. 2. Al final se obtienen los valores de altura $z(x,y)$ de la superficie en los puntos de la malla. Por ejemplo, si se mide una de las caras de una lente de diámetro 60 mm y los puntos de la malla están separados 0.5 mm, el número total de medidas (muestras) es aproximadamente 11300, es decir, la topografía de la cara de la lente se construye con 11300 muestras. Entonces, para reconstruir la superficie (en forma discreta) la máquina realiza un escaneo de la superficie en un gran número de puntos siguiendo una malla cuadrículada.

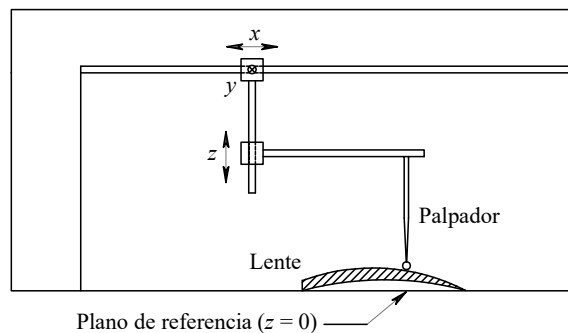


Fig. 2. Esquema de una máquina de coordenadas xyz con palpador de precisión.

El escaneo se debe realizar en las dos caras teniendo cuidado de hacer coincidir los puntos de la malla en ambas caras de la lente. De esta manera se tiene la forma de las caras y su espesor local. Con la geometría de la lente y el índice de refracción del material de la lente se puede calcular las propiedades refractivas y generar los mapas de potencia esférica y cilindro.

2.2. Deflectometría de moiré

Esta técnica es menos intuitiva que la anterior. Hace uso de dos fenómenos ópticos: las autoimágenes de Talbot [8] y las franjas de moiré [9]. Cuando un objeto plano periódico es iluminado con un haz de luz monocromático colimado (manojos de rayos luminosos paralelos entre sí) a cierta distancia, conocida como distancia de Talbot, se observa una imagen idéntica al objeto sin necesidad de una lente que forme la imagen. Este fenómeno se explica mediante la difracción de Fresnel [8]. Supongamos que tenemos una rejilla de líneas negras y transparentes paralelas uniformemente espaciadas como la rejilla R de la Fig. 3. La separación entre dos líneas consecutivas se denomina periodo espacial, y en el caso de la rejilla R se hace igual a $p = 0.2$ mm. Si iluminamos esta rejilla con un haz de luz colimado de longitud de onda $\lambda = 0.000632$ mm (láser He-Ne), la autoimagen de Talbot se localiza según la fórmula $z_T = 2Mp^2/\lambda$, es decir a 63.3 mm de la rejilla R. El parámetro M mide la convergencia ($M < 1$) o divergencia ($M > 1$) del haz que ilumina la rejilla. En el caso del haz colimado $M = 1$.

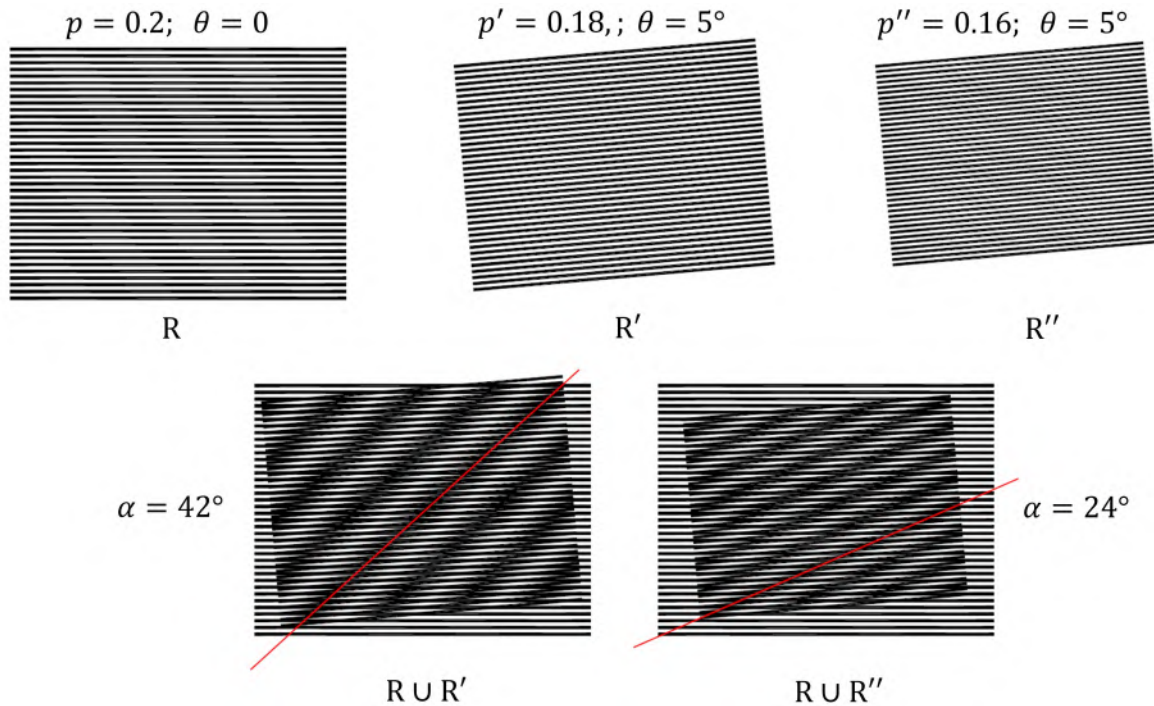


Fig. 3. Rejillas de líneas paralelas y efecto moiré al superponer dos de ellas.

Por otra parte, cuando dos rejillas periódicas como R y R' en la Fig. 3 se superponen, el resultado es un patrón de sombras o franjas (R U R') conocidas como franjas de moiré. Las franjas oscuras ocurren en la superposición de las líneas negras de R con las líneas negras o transparentes de R' y las franjas claras ocurren en la superposición de las líneas transparentes de ambas rejillas. En la Fig. 3 la rejilla R' tiene un periodo espacial $p' = 0.18$ mm y está rotada $\theta = 5^\circ$ en comparación con la rejilla R. Esta rotación y el periodo espacial de las dos rejillas determinan la rotación y separación de las franjas de moiré. En este caso las franjas están inclinadas un ángulo $\alpha = 42^\circ$. Si el periodo espacial de la segunda rejilla se cambia a $p'' = 0.16$ mm, manteniendo la rotación de $\theta = 5^\circ$, como la rejilla R'' de la Fig. 3, se tiene un nuevo patrón de franjas de moiré (R U R'') con franjas inclinadas un ángulo $\alpha = 24^\circ$. También se observa un cambio en la separación de las franjas de los dos patrones.

Los resultados anteriores se pueden usar para medir la potencia de lentes. Consideremos el montaje óptico de la Fig. 4. Un haz de luz láser de longitud de onda λ incide en la lente LE y es enfocado en el punto focal secundario de LE. En este punto también se localiza el punto focal primario de la lente colimadora LC, de modo que después de LC la luz emerge colimada e incide en la Lente que se ha de analizar. Allí la luz se refracta cambiando la dirección de los rayos. Supongamos que la Lente es esférica positiva, entonces los rayos convergen, por lo que el parámetro $M < 1$. Si justo después de la Lente se coloca una rejilla de líneas paralelas R con periodo espacial p , a la distancia de Talbot $z_T = 2Mp^2/\lambda$, se tendrá una réplica de R pero con un periodo espacial $p' < p$. Al colocar en el plano donde se forma la réplica R' otra rejilla de líneas paralelas idéntica a R, pero con cierto ángulo de rotación θ , tendremos un patrón de franjas paralelas de moiré inclinadas el ángulo α , el cual es registrado con ayuda de una lente formadora de imagen LI en el sensor de la Cámara. La imagen obtenida se procesa para medir con precisión

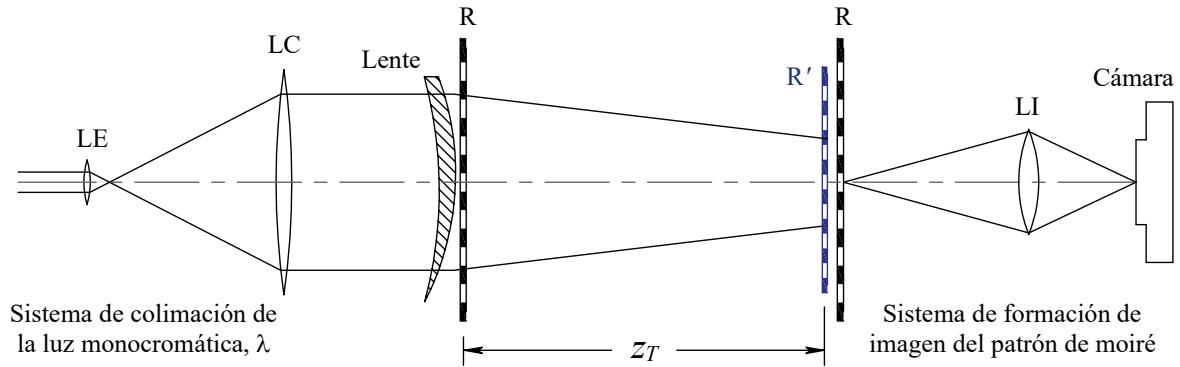


Fig. 4. Montaje óptico para medir la potencia refractiva de una lente mediante la autoimagen de Talbot y el patrón de franjas de moiré.

el ángulo α . La ecuación con la que se calcula la distancia focal de la Lente resulta ser [10]

$$f = \frac{z_T}{\sin(\theta)\tan(\alpha) + \cos(\theta) - 1}. \quad (1)$$

Si en lugar de una lente esférica positiva se analiza una PAL, las franjas de moiré ya no serán paralelas sino distorsionadas. Con un análisis cuidadoso de las franjas se determina la potencia local de la lente. Esta técnica de moiré ha sido utilizada por la compañía Rotlex [5] en equipos para medir la potencia de las PAL's.

2.3. Prueba de Hartmann

Esta prueba originalmente propuesta para evaluar la forma de espejos cóncavos en astronomía [11], con algunas variantes, ha encontrado gran aplicación en la medida de aberraciones en sistemas ópticos como en lentes y el ojo humano con microlentes Hartmann-Shack [12]. Para el caso del análisis de una Lente, se emplea un sistema como el mostrado en la Fig. 5.

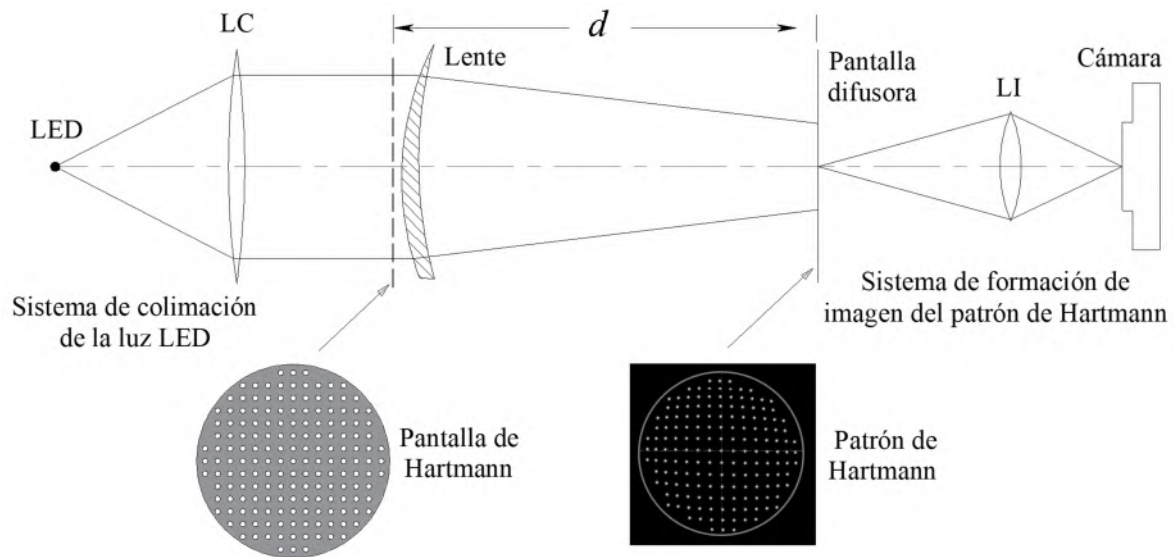


Fig. 5. Montaje óptico para medir la potencia refractiva de una lente mediante una modificación de la prueba de Hartmann.

En esta prueba la fuente de iluminación también debe ser pequeña, pero a diferencia de la deflectometría de moiré donde se usa un láser, aquí se puede usar un LED de dimensiones pequeñas. El LED se localiza en el punto focal primario de la lente colimadora LC generando un haz de luz colimada con el que se ilumina una pantalla opaca con un arreglo cuadrado de agujeros denominada pantalla de Hartmann. De esta manera, solo se dejan pasar rayos de luz en las posiciones de los agujeros. Luego se coloca la Lente (PAL) que es analizada solamente por los rayos seleccionados. La proyección de los rayos refractados por la Lente se observa en una pantalla difusora como un arreglo de puntos distorsionado, denominado Patrón de Hartmann, el cual es registrado con ayuda de una

lente formadora de imagen LI en el sensor de una Cámara. La imagen obtenida se procesa para medir con precisión la posición de los puntos.

En la Fig. 6 se muestra la geometría de la refracción de los rayos. En el plano xy se encuentra la pantalla de Hartmann, W representa el frente de onda refractado por la Lente (justo después de la Lente). La pantalla difusora se encuentra a la distancia d de la pantalla de Hartmann. Supongamos que en el punto P hay un agujero. Cuando no se coloca la Lente, el rayo seleccionado por P sigue sin desviarse y llega a la pantalla difusora en la coordenada y_R . Esta es la coordenada de referencia y la imagen de todos los rayos se denomina imagen o patrón de referencia. Cuando se coloca la Lente, el rayo seleccionado por P se desvía en el punto Q y llega a la pantalla difusora en la coordenada y . Esta es la coordenada distorsionada. Con estas coordenadas se mide la desviación lateral de los rayos refractados en la dirección y , la cual se define matemáticamente como $TA_y = y - y_R$. En la dirección x también ocurre desviación de los rayos refractados, y en forma análoga a lo que describimos para la dirección y , se define la desviación lateral en la dirección x como $TA_x = x - x_R$. La distancia entre los puntos P y Q corresponde al frente de onda refractado W en las coordenadas (x_R, y_R) .

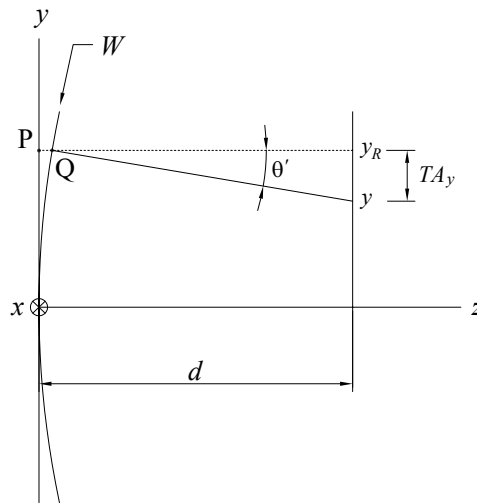


Fig. 6. Geometría de la desviación de los rayos en la prueba modificada de Hartmann.

Las desviaciones laterales de los rayos (también conocidas como aberraciones de rayo) se relacionan matemáticamente con el frente de onda refractado por la Lente mediante las ecuaciones

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{TA_x}{d} \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{TA_y}{d} \quad (3)$$

Lo anterior significa que para medir el frente de onda refractado se debe integrar las Ecs. (2) y (3). Esta técnica de Hartmann ha sido empleada por la compañía Visionix [6] en equipos para medir la potencia de las PAL's.

3. Curvaturas principales del frente de onda y mapas de potencia

A partir de W se calcula mediante derivadas parciales las curvaturas principales del frente de onda. Dado un punto (x, y) en W las curvaturas principales en ese punto son las curvaturas máxima y mínima (ortogonales entre si). Si W es una superficie esférica las curvaturas máxima y mínima en cualquier punto son iguales al radio de curvatura de la esfera, se dice que los puntos son umbílicos. Pero si la Lente es progresiva, W estará distorsionada y en general las curvaturas máxima y mínima son diferentes [13].

Las curvaturas principales se suelen calcular utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k_{max} = H + \sqrt{(H^2 - K)} \quad (4)$$

y

$$k_{min} = H - \sqrt{(H^2 - K)}, \quad (5)$$

siendo H la curvatura media y K la curvatura de Gauss, que a su vez se calculan como

$$H = \frac{(1 + W_x^2)W_{yy} - 2W_xW_yW_{xy} + (1 + W_y^2)W_{xx}}{2(1 + W_x^2 + W_y^2)^{3/2}} \quad (6)$$

y

$$K = \frac{W_{xx}W_{yy} - W_{xy}^2}{(1 + W_x^2 + W_y^2)^2}, \quad (7)$$

donde W_x y W_y son las primeras derivadas parciales del frente de onda en las direcciones x y y , respectivamente, y W_{xx} , W_{yy} , y W_{xy} son las segundas derivadas parciales del frente de onda.

Entonces, el promedio aritmético de las curvaturas principales define la curvatura media (potencia esférica)

$$S = \frac{k_{max} + k_{min}}{2} \quad (8)$$

y la diferencia de las curvaturas principales define el cilindro

$$C = k_{max} - k_{min}. \quad (9)$$

Las cantidades S y C en unidades de dioptrías definen los mapas de potencia esférica y cilindro.

4. Equipo para lentes progresivas (UNLOP)

En el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, el Grupo de Óptica Aplicada ha diseñado y construido un equipo para medir la potencia refractiva de las PAL's, como se muestra en la Fig. 7, y al cual denominaremos en adelante UNLOP. El equipo se basa en la configuración óptica de la Fig. 5, pero en lugar de emplear una pantalla opaca con agujeros, usa una lámina transparente con una malla regular de puntos negros. Lo anterior tiene la ventaja que permite ver el borde o marco de las lentes cuando están ensambladas en las gafas.

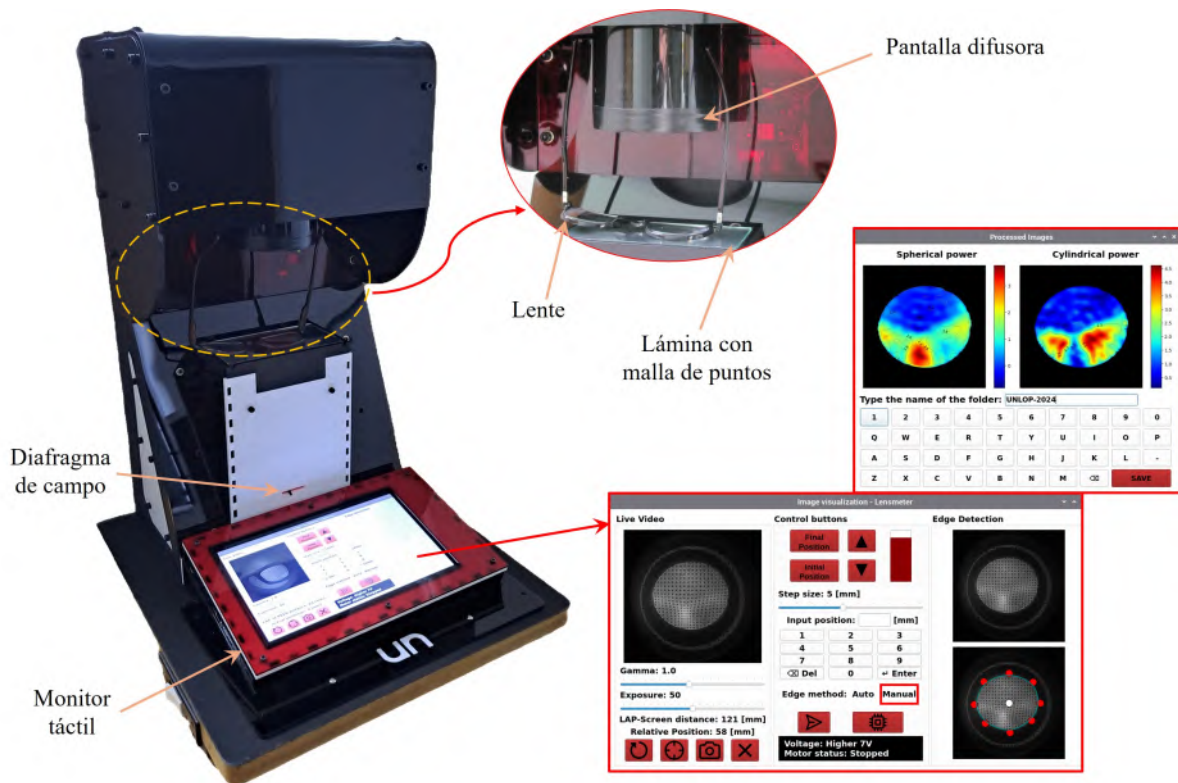


Fig. 7. Equipo Universidad Nacional de Colombia para medir la potencia refractiva de lentes progresivas oftálmicas - UNLOP. En el monitor táctil se abre una interfase gráfica para procesar la imagen generada por la PAL y calcular los mapas de potencia refractiva.

4.1. El hardware

El equipo UNLOP, como se ve en la Fig. 7 consta de:

- una lámina transparente con la malla de puntos, que está debajo de una lámina de vidrio que sirve para mantener en buen estado la lámina de puntos y de soporte sobre el cual se colocan las lentes progresivas sin cortar o en el marco de las gafas,
- una pantalla difusora, donde se proyecta la malla de puntos distorsionada cuando se coloca una PAL,
- un diafragma de campo, que permite fijar el borde del patrón de puntos con el que se evalúa la PAL,
- un monitor o pantalla táctil, con la que se controla el equipo y se realiza el procesamiento de la imagen que se tiene en la pantalla difusora.

El equipo en su interior contiene:

- un LED rojo de 3W, de pequeñas dimensiones que funciona apropiadamente como fuente puntual,
- un doblete acromático, que colima la luz que emerge del LED para iluminar con un frente de onda plano la lámina de puntos,
- un sistema formador de imagen, conformado por una cámara CMOS y una lente de enfoque fijo. Este sistema está arriba de la pantalla difusora y registra las imágenes proyectadas en la pantalla difusora, (Fig. 5).

El conjunto cámara - lente de enfoque - pantalla difusora conforma una unidad que se puede acercar o alejar de la PAL cambiando la distancia d (Ecs. (2) y (3)) desde 63 mm hasta 131 mm manteniendo enfocada la imagen del patrón de puntos que se proyecta en la pantalla difusora. La variación de la distancia d entre la PAL y la pantalla difusora permite optimizar la imagen del patrón de puntos y facilitar el procesamiento de las imágenes.

Las PAL's con o sin marco de gafas se colocan sobre la lámina de vidrio que está encima de la lámina de puntos, como se ve en la Fig. 7. Las lentes simplemente descansan sobre la lámina y su centrado y orientación se controla con una mirilla superpuesta a la imagen, como se muestra en la Fig. 10.

UNLOP también incluye en su interior un sistema de control electrónico eficiente que permite la automatización de las mediciones y el procesamiento de datos en tiempo real. Para lograr este objetivo, se integraron dos plataformas: la Raspberry Pi y el Arduino Uno, que proporcionan capacidad de procesamiento y control preciso de los componentes del sistema. La combinación de estas dos tecnologías ofrece una solución para manejar tanto las tareas computacionales complejas como el control de los elementos eléctricos y ópticos, lo que permite que el sistema funcione de manera coordinada y eficaz. Mientras que la Raspberry Pi actúa como el núcleo de procesamiento y control en general, el Arduino Uno se encarga de las tareas de interacción con los sensores, motor de paso e iluminación LED.

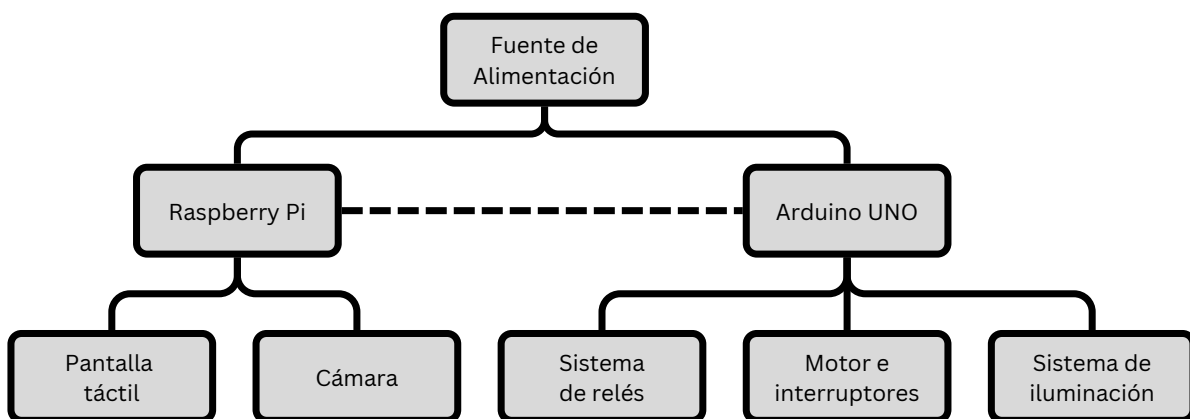


Fig. 8. Diagrama de las conexiones del equipo prototipo

La Fig. 8, ilustra las conexiones presentes del equipo, donde las líneas continuas representan alimentación de voltaje así como transferencias de información para todos los elementos de la tercera fila. Las líneas punteadas son la comunicación entre la Raspberry Pi y el Arduino Uno, que se realiza mediante el puerto serial, lo que permite una transmisión de datos de manera confiable y eficiente. La Raspberry Pi envía comandos al Arduino para controlar el motor, mientras que el Arduino Uno le devuelve datos de los interruptores y medidores de voltaje.

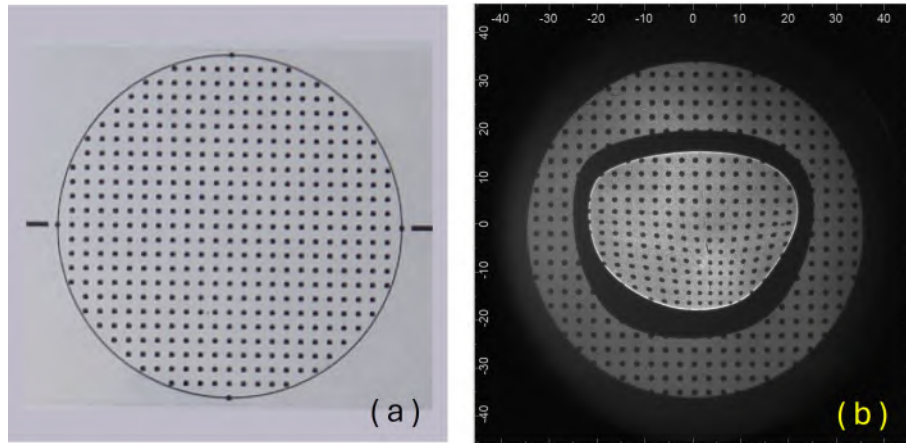


Fig. 9. (a) Lámina con malla regular de puntos, (b) imagen del patrón de puntos en la pantalla difusora (Fig. 7) generada con una PAL de valores nominales SPH 0.00 D, CYL 0.00 D, AXIS 0° y ADD +2.25 D cuando la distancia entre la lámina de patrones y la pantalla difusora es 115 mm. La escala en (b) está dada en mm.

En la Fig. 9(a) se muestra la lámina con malla de puntos empleada en el equipo UNLOP y en la Fig. 9(b) la imagen en la pantalla difusora cuando se coloca una PAL con valores nominales SPH 0.00 D, CYL 0.00 D, AXIS 0° y ADD +2.25 D. La distancia entre la lámina de patrones y la pantalla difusora es 115 mm. La escala en las imágenes está dada en mm. El resultado final que obtiene el usuario son los mapas de potencia esférica y de cilindro de la lente bajo análisis [14].

4.2. El software

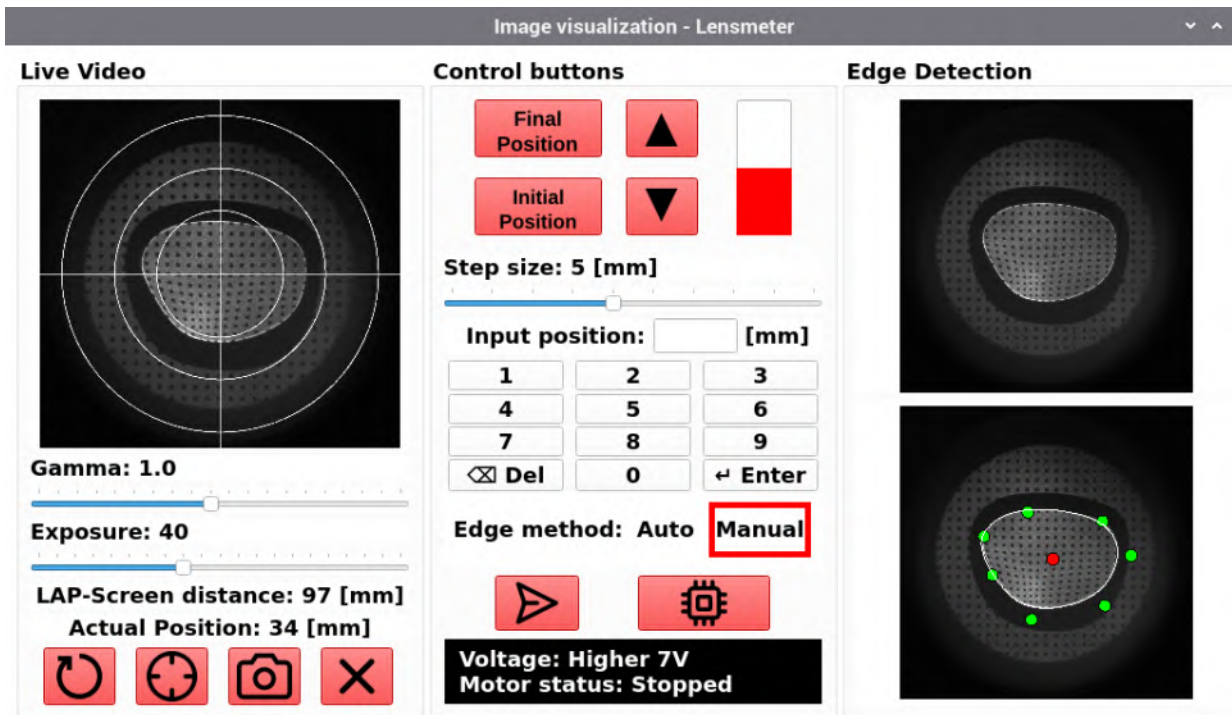


Fig. 10. (a) Interfase gráfica para capturar y procesar los patrones de puntos generados por las PAL's bajo análisis. El equipo opera en un modo completamente automático o en un modo manual para la detección del borde la PAL en los casos en que en el modo automático no se pueda detectar el borde.

Para el análisis de las imágenes en la pantalla difusora, se desarrolló una aplicación en el software Python [15]. La aplicación despliega una interfase gráfica en la pantalla de UNLOP, como se muestran en la Fig. 10, e inicia con

la imagen de la malla de puntos. Al colocar la PAL encima de la lámina de puntos se tiene la imagen distorsionada de los puntos en la pantalla difusora. La escala de esta imagen se puede cambiar acercando o alejando la pantalla difusora (con el motor de paso) luego se hace una detección automática o manual (con los puntos de control en verde) del borde de la lente o del marco de las gafas para eliminar la información que no es relevante en la imagen [16], y después se analiza la distorsión del patrón dentro del borde detectado. El resultado se presenta en una ventana con dos mapas: potencia esférica y cilindro. La interfase gráfica contiene botones (push buttons) para grabar imágenes, desplazar axialmente la pantalla difusora, iniciar y terminar los procesos. Salvo por el uso de los puntos de control, el proceso es completamente automático. Los puntos de control se usan en aquellos casos en que la detección del borde de la gafa o la lente no se pueda realizar automáticamente. En este último caso, desplazando uno o más puntos de control se delinea el contorno de la lente y con eso queda detectado el borde.

El procesamiento de los patrones de puntos en la región de interés (borde de la lente) se realiza mediante el análisis de Fourier. El espectro de Fourier del patrón de puntos distorsionado consiste en un arreglo de lóbulos diferentes que contienen la información de los desplazamientos de los puntos. La localización de estos lóbulos está dada por el vector $\mathbf{v}_{mn} = (mv_{ox}, nv_{oy})$ con m y n números enteros, v_{ox} y v_{oy} las frecuencias espaciales del patrón de puntos en las direcciones x y y , respectivamente. Realizando el filtrado espacial del lóbulo localizado en $\mathbf{v}_{10} = (v_{ox}, 0)$ y luego tomando la transformada inversa se puede determinar la derivada de W en la dirección x (Eq. (3)). En forma similar, realizando el filtrado espacial del lóbulo localizado en $\mathbf{v}_{01} = (0, v_{oy})$ y luego tomando la transformada inversa se puede determinar la derivada de W en la dirección y (Eq. (2)). El filtrado espacial consiste en multiplicar la transformada de Fourier por una máscara circular con valores de 0 en la región exterior del círculo y 1 en la región interna del círculo. Cuando se va a determinar la derivada de W en x , el círculo se define con radio igual a $v = v_{ox}$ y con centro en $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{10}$; cuando se va a determinar la derivada de W en y el círculo se define con radio igual a $v = v_{oy}$ y con centro en $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{01}$. Este método se explica en detalle en Quiroga [17] y Mejía [18]. Note que este proceso parte de la información discreta de las derivadas de W en x y y dadas por cada uno de los puntos y luego con el filtrado espacial de la transformada de Fourier del patrón de puntos y la transformada inversa de Fourier se obtiene la interpolación de las derivadas en toda la región de interés.

Para obtener los mapas de potencia esférica y cilindro con las ecuaciones mostradas en la sección 3, también se requiere conocer las segundas derivadas parciales de W . Esta última tarea se realiza a partir del método de diferencias finitas [19] aplicado a las primeras derivadas parciales interpoladas como se mencionó en el párrafo anterior.

4.3. Los mapas de potencia

Una vez calculadas las curvaturas principales del frente de onda reconstruido, se generan mapas de color (tipo jet) con los valores locales de la potencia esférica y el cilindro, incluyendo las curvas de isoesfera e isocilindro para apreciar mejor los valores locales en cada punto de la PAL. Como ejemplo de lo anterior, analizamos una PAL con los siguientes valores nominales: SPH 0.00, CYL 0.00, AXIS 0° y ADD +2.25 D.

El resultado de los procesos de registro de imagen, detección de borde y cálculo de los mapas se muestra en la Fig. 11. En cuanto al tiempo empleado en cada uno de los procesos, el registro de la imagen ocurre en menos de un segundo, la detección automática de borde alrededor de 10 segundos (si se hace manual es menor a un segundo pero se debe sumar el tiempo que se emplea en desplazar los puntos de control) y el cálculo de los mapas emplea entre 30 y 40 segundos. En resumen, el tiempo total de estos procesos es alrededor de un minuto. En la Fig. 11(a) se muestra la imagen de la PAL tal y como se ve en la pantalla difusora cuando está a una distancia $d = 115$ mm, en la Fig. 11(b) el procesamiento de la imagen para determinar el borde de la lente, en la Fig. 11(c) el cilindro, y en la Fig. 11(d) el mapa de potencia esférica. Las unidades de las barras de colores en las Figs. 11(c) y 11(d) son dioptrías (D).

En la Fig. 11(c) se observa la geometría del corredor progresivo, mientras que de la Fig. 11(d) se deduce que la adición para la corrección de la presbicia es de 2.50 ± 0.25 D y que en la zona de visión lejana la corrección es aproximadamente neutra. Lo anterior corresponde con los valores nominales de la lente empleada. Los resultados son confiables y describen adecuadamente las características ópticas en toda la región de la PAL.

5. Conclusiones

El equipo UNLOP se diseñó para medir la refracción de lentes progresivas (PAL's). La lámina transparente con la malla de puntos que se emplea para muestrear el frente de onda refractado por las PAL's es una solución efectiva para analizar las PAL's ya que permite ver de manera sencilla el borde de las lentes o gafas. El equipo con esta lámina es más simple que la Máquina de coordenadas con palpador (sección 2.1) o la Deflectometría de moiré (sección 2.2), lo que puede llegar a ser un equipo potencialmente competitivo a los ya existentes en el mercado.

La siguiente fase con UNLOP consiste en realizar un proceso de calibración y comparación empleando lentes patrón (PAL's certificadas) y otros equipos disponibles en el mercado. Además, se contempla la posibilidad de

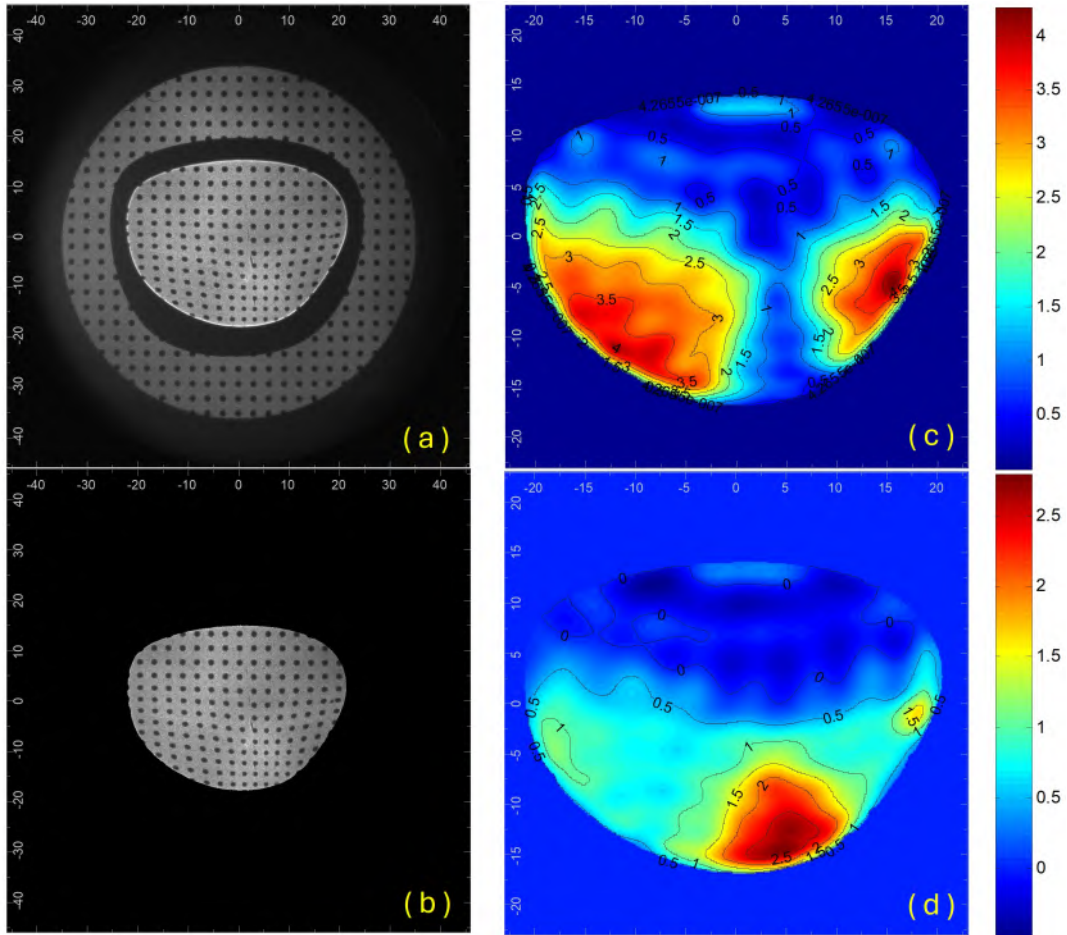


Fig. 11. Resultados generados con el UNLOP para una lente progresiva, cuyos valores nominales son SPH 0.00, CYL 0.00, AXIS 0° y ADD +2.25 D. En (a) se tiene la imagen en la pantalla difusora del patrón de puntos, (b) eliminación de la información no relevante mediante la detección del borde de la lente, (c) mapa de cilindro, y (d) mapa de potencia esférica. La escala en las imágenes está dada en mm y en la barra de colores está dada en D (dioptrías).

incluir herramientas de inteligencia artificial como machine learning para que UNLOP de manera autónoma optimice la distancia de trabajo entre la pantalla difusora y la PAL bajo análisis, así como realizar un seguimiento a los puntos de la malla.

Agradecimientos

El diseño y construcción del equipo se realizó gracias al apoyo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, a través del proyecto de investigación “Diseño y fabricación de un equipo prototipo para medir la potencia refractiva de lentes oftálmicas progresivas – Código Hermes 56500”. Parte de los resultados mostrados en este artículo se presentaron en el Encuentro Nacional de Óptica y la Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones (ENO-CANCOA) 2024 [20] y en el Frontiers in Optics + Laser Science 2023 (FiO, LS) [21].