

REFRACCIÓN SUBJETIVA: UN NUEVO MÉTODO VECTORIAL PARA DETERMINAR EL CILINDRO (1/3)

La técnica de refracción utilizada para la búsqueda del cilindro corrector de una prescripción ha evolucionado muy poco desde hace muchos años. La razón principal son las limitaciones impuestas por los forópteros con presentación de lentes en intervalos de 0,25 dioptrías.

Actualmente, los forópteros con variación continua de potencia permiten actuar simultáneamente y con gran precisión en la esfera, el cilindro y el eje de la corrección.

De este modo es posible desarrollar nuevas técnicas de refracción.

Esta serie de tres artículos describe los principios de un nuevo método vectorial de determinación del cilindro corrector y presenta la lógica de un algoritmo automático de búsqueda del cilindro asociado.



Hélène Starynkevitch

Responsable de Estudios I+D
División Instruments
Essilor International

Hélène Starynkevitch tiene un Diploma de Técnico Superior en Óptica del Instituto y Centro de Optometría (ICO) de Bures sur Yvette (2013) y la Universidad de Orsay París Sur XI en Ingeniería de la Salud, con especialización en Ciencias de la Visión (2016). Actualmente es ingeniera de estudios en el departamento de I+D de Essilor Instruments. Trabaja en el desarrollo de métodos y algoritmos de examen de la vista asociados a los nuevos instrumentos y a la concepción de interfaces para los profesionales. También es responsable de estudios de optometría sobre la comparación de los instrumentos y/o sobre las metodologías de examen de la vista. Hélène también ha trabajado como voluntaria en VisionSoliDev realizando exámenes de la vista a personas desfavorecidas.



Gildas Marin

Responsable de Estudios I+D
Servicio I+D Ciencias de la Visión
Essilor International

Gildas Marin obtuvo su diploma de ingeniero en óptica en 1993 y continuó sus estudios con una tesis sobre diagnóstico por imágenes en el instituto de óptica y el hospital de la Pitié-Salpêtrière (París), defendida en 1997. Desde 2006, es responsable de estudios en ciencias de la visión en Essilor International. Sus ámbitos de investigación principales son la modelización de la visión, la simulación de los efectos ópticos y las prestaciones visuales, en particular del impacto de las aberraciones ópticas en la visión. Más recientemente, ha trabajado en la mejora de los métodos de refracción. A partir de 2015, es responsable del programa de investigación sobre el desarrollo y la validación de los algoritmos y los métodos de refracción precisa aplicados en el Vision-R™ 800 y la oferta AVA™ (Advanced Vision Accuracy).



Dominique Meslin

Director Soluciones de Refracción
División Instruments
Essilor International

Dominique Meslin, óptico y optometrista de formación, ha desarrollado la mayor parte de su carrera en Essilor, primero en el Departamento de Investigación y Desarrollo y después en distintos puestos técnicos de Marketing y Comunicación en Francia y en Estados Unidos. Durante 10 años, fue director de la Essilor Academy Europe y posteriormente responsable de Relaciones Profesionales en Essilor Europe. En la actualidad, se encarga de las nuevas Soluciones de Refracción en la División Instruments de Essilor International. A lo largo de su carrera, Dominique Meslin ha dirigido numerosos seminarios para profesionales de la visión. Es autor de varios artículos científicos y de innumerables publicaciones técnicas de Essilor, en especial de la serie «Cahiers d'Optique Oculaire» (Cuadernos de Óptica Ocular).

Desde hace casi un siglo, la técnica de refracción utilizada para la búsqueda del cilindro corrector de un paciente apenas ha evolucionado. Consiste, universalmente, en utilizar un cilindro cruzado llamado «de Jackson» y estudiar la variación de sus efectos en diferentes posiciones para buscar el eje del cilindro y después su potencia y, finalmente, ajustar su efecto sobre la potencia de la esfera. Si esta técnica ha evolucionado poco desde que se inventó es sobre todo porque los propios forópteros han evolucionado poco: desde hace casi un siglo, solo permiten colocar lentes esféricas y cilíndricas ante los ojos de un paciente en intervalos de potencia de 0,25 dioptrías y, normalmente, intervalos de eje de 5 grados, sin la posibilidad de actuar simultáneamente sobre la esfera, el cilindro y el eje de la corrección.

Actualmente, gracias a los nuevos forópteros con variación continua de potencia controlada, con una precisión de 0,01 dioptrías en la potencia y de 0,1 grados en el eje, y que permiten actuar simultáneamente en la esfera, el cilindro y su eje^(*), es posible proponer un nuevo enfoque de la refracción subjetiva, llamada «Digital Infinite Refraction™»⁽¹⁾. De este modo se ha podido desarrollar un método vectorial, a la vez más coherente y más preciso, para determinar el cilindro. El objetivo de esta publicación es presentar sus principios y explicar su lógica.

En este primer artículo, recordaremos la definición vectorial de la refracción y su representación en el «Espacio Dióptrico». Después, compararemos de manera general los métodos de la «Refracción Tradicional» y la «Digital Infinite Refraction™». Posteriormente, en un segundo artículo, describiremos detalladamente las técnicas utilizadas en la «Refracción Tradicional» y la «Digital Infinite Refraction™» para la búsqueda del eje del cilindro y para la búsqueda de la potencia del cilindro. Finalmente, en un tercer artículo, describiremos el principio y la lógica del nuevo método de determinación del cilindro propuesto por la «Digital Infinite

PALABRAS CLAVE

Refracción subjetiva, refracción vectorial, espacio dióptrico, búsqueda del cilindro, cilindros cruzados, foróptero, algoritmo de refracción, Vision-R™ 800.

(*) Foróptero Vision-R™ 800 con variación continua de potencia de Essilor Instruments

Refraction™», en comparación con el método de la «Refracción Tradicional» y comentaremos su aplicación en el desarrollo de un algoritmo automático de búsqueda del cilindro.

Así pues, le invitamos a descubrir en profundidad un nuevo método vectorial de determinación del cilindro corrector. Queremos precisar que para la perfecta comprensión del contenido de este artículo es necesario tener un buen conocimiento y comprensión de los principios básicos de la refracción.

1) Representación vectorial del cilindro en un espacio dióptrico

Expresión «polar» frente a expresión «cartesiana» de la refracción:

En óptica oftálmica se suele expresar la fórmula de una refracción a través de su «expresión polar» — esfera, cilindro y eje—, pero también es posible formular una «expresión cartesiana» con 3 coordenadas:

- 1) la potencia esférica equivalente o esfera media M , igual a la potencia de la esfera más la mitad de la del cilindro,
- 2) la componente horizontal del cilindro con el eje a 0° ($J0^\circ$), que representa la componente directa / indirecta del astigmatismo,
- 3) la componente oblicua del cilindro con el eje a 45° ($J45^\circ$), que representa la componente oblicua del astigmatismo.

Esta «expresión cartesiana» tiene la ventaja de expresar la fórmula refractiva en forma de 3 componentes independientes unas de otras y expresadas, las tres, en una unidad única y coherente, la dioptría. Estas pueden sustituir convenientemente las componentes de la expresión polar clásica de la refracción —esfera, cilindro y eje— que son interdependientes y se expresan en unidades diferentes, en dioptrías para la esfera y el cilindro y en grados para el eje. Además, la expresión cartesiana proporciona una fórmula global única de la refracción que facilita su análisis y las comparaciones estadísticas⁽²⁾.

A título ilustrativo, se puede consultar la tabla 1 que presenta algunos ejemplos de transposición en coordenadas cartesianas de fórmulas de refracción expresadas en coordenadas polares clásicas. En esta tabla se puede observar que la expresión cartesiana de una fórmula refractiva consiste, en cierto modo, en expresar la refracción como una componente media y dos componentes cilíndricas puras, es decir, con las esferas medias nulas y similares a fórmulas de cilindros cruzados de Jackson, una a $0^\circ / 90^\circ$ que representa la componente horizontal / vertical del astigmatismo y la otra a $45^\circ / 135^\circ$, que representa la componente oblicua del astigmatismo.

La relación que une las dos expresiones polar y cartesiana de una misma fórmula de refracción depende de un simple cálculo de trigonometría y es relativamente fácil pasar de una expresión a otra:

- Si se conoce la fórmula polar clásica de la refracción Esf (Cil) Eje, se podrán calcular las tres coordenadas de su expresión cartesiana por medio de las 3 fórmulas siguientes:

- $M = Esf + Cil / 2$;
- $J0^\circ = Cil * Cos (2 * Eje)$;
- $J45^\circ = Cil * Sen (2 * Eje)$.

Cabe observar que, debido al ciclo no trigonométrico del eje, es decir, a su variación de 0 a 180° y no de 0° a 360° , es necesario duplicar el valor del eje del cilindro.

- Por otra parte, si se conocen las dos componentes cartesianas del cilindro, $J0^\circ$ y $J45^\circ$, es fácil encontrar sus componentes polares, cilindro y eje, mediante composición vectorial; y, para la esfera, basta con restar algebraicamente la mitad del valor del cilindro al de la esfera equivalente, para encontrar el valor. Las fórmulas son las siguientes, en convenio de cilindro negativo:

- $Esf = M - Cil / 2$
- $Cil = -\sqrt{J0^{o2} + J45^{o2}}$
- $Eje = 0,5 * Arc Tan (J45^\circ / J0^\circ) + C$, con C constante igual a 90 si $J0^\circ > 0$ e igual a 0 si $J0^\circ < 0$.

Para facilitar la comprensión y la representación gráfica, en esta publicación hemos decidido no usar ponderación de $1/2$ entre los valores de las componentes $J0^\circ$ y $J45^\circ$ del

Tabla 1: Expresiones polar y cartesiana de diferentes fórmulas de refracción

EXPRESIÓN POLAR			EXPRESIÓN CARTESIANA		
Esfera	Cilindro	Eje	M	$J0^\circ$	$J45^\circ$
+2,00			+2,00	0,00	0,00
-2,00			-2,00	0,00	0,00
Plano	-2,00	0	-1,00	-2,00	0,00
Plano	-2,00	90	-1,00	+2,00	0,00
Plano	-2,00	45	-1,00	0,00	-2,00
Plano	-2,00	135	-1,00	0,00	+2,00
+1,00	-2,00	120	0,00	+1,00	+1,73
+1,00	-2,00	30	0,00	-1,00	-1,73

cilindro, por un lado, y la potencia esférica equivalente M por otro, como suele ser el caso en la literatura sobre la expresión vectorial de la refracción. El principio es el mismo, pero así es más fácil de entender.

Representación de la refracción en un «Espacio Dióptrico»:

El interés de la expresión cartesiana de la refracción es que permite representar cualquier fórmula refractiva en una referencia ortogonal tridimensional llamada «Espacio Dióptrico». La refracción se representa mediante un vector único, cuyas proyecciones en los 3 ejes de la referencia son las coordenadas cartesianas de la fórmula refractiva.

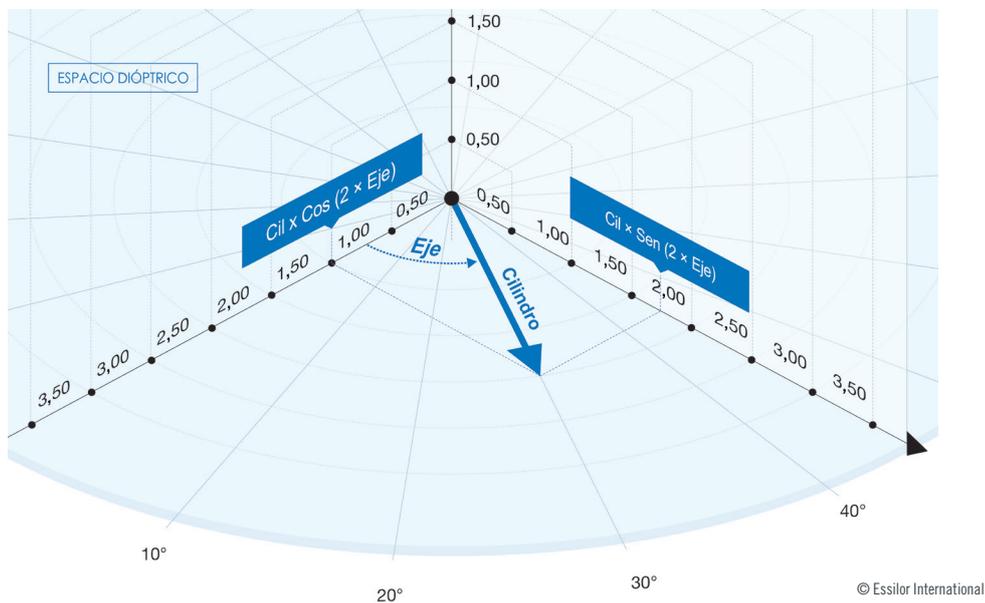
Se basan pues en 3 ejes:

- la potencia esférica equivalente, o esfera media M ,
- la componente horizontal del cilindro $J0^\circ$,
- la componente oblicua del cilindro $J45^\circ$.

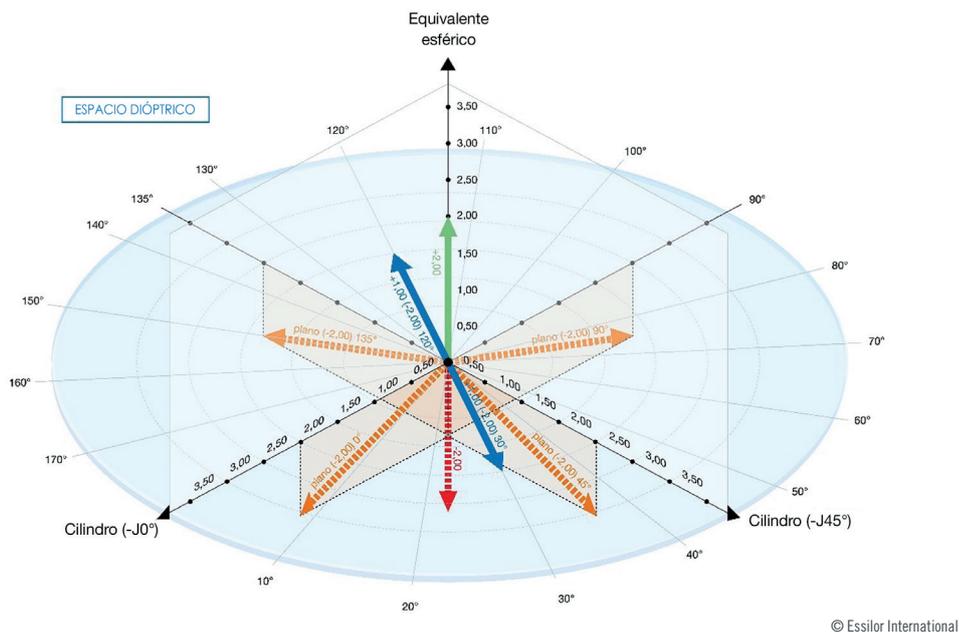
La representación tridimensional del Espacio Dióptrico presentado en la figura 1 es una versión adaptada de la representación convencional, cuya explicación detallada se puede encontrar en publicaciones de referencia (2, 3, 4, 5). Esta representación permite visualizar de forma simple, y en 3 dimensiones, las características de cualquier fórmula refractiva. La esfera se expresa según el eje «vertical» y el cilindro según un plano «horizontal»: el eje del cilindro se representa mediante la rotación alrededor del eje vertical

Figura 1: Representación vectorial de la refracción en un «Espacio Dióptrico»

a) Coordenadas cartesianas: ejemplo de una fórmula de refracción de +1,00 (-2,00) 30°



b) Ejemplos de representaciones vectoriales de diferentes fórmulas de refracción



(fórmulas presentadas en la tabla 1)
 Fórmulas esféricas: +2,00 (en verde) y -2,00 (en rojo);
 Fórmulas astigmáticas: plano (-2,00) con ejes de cilindro a 0°, 45°, 90°, 135° (en naranja)
 y +1,00 (-2,00) con ejes de cilindro a 30° y 120° (en azul).

y la potencia del cilindro mediante la distancia con respecto al origen, seleccionado aquí en convenio de cilindro negativo. Esta representación permite reproducir simplemente cualquier fórmula refractiva en forma de un vector único en el espacio y estudiar las variaciones durante la refracción: es el objeto de la «refracción vectorial».

El ejemplo utilizado en el resto de este artículo es una fórmula de refracción de +1,00 (- 2,00) 30°, cuya potencia esférica equivalente es nula. Ha sido elegido por la comodidad de la representación gráfica, ya que el vector correspondiente se sitúa en el plano horizontal J0° / J45°. Para cualquier otra refracción cuya potencia esférica equivalente no sea nula, la lógica sería la misma, pero el vector evolucionaría en el espacio dejando una traza idéntica a la descrita en el plano J0° / J45°, pero en un plano horizontal paralelo a éste, correspondiente al valor de la potencia esférica equivalente.

2) «Refracción tradicional» frente a «Digital Infinite Refraction™»: similitudes y diferencias.

Aunque las dos técnicas de refracción «tradicional» y refracción «digital» utilizan algunos principios comunes, difieren fundamentalmente en algunos puntos. Vamos a hablar de sus similitudes y sus diferencias antes de abordarlas más detalladamente en los dos artículos siguientes:

a) Refracción mediante «presentación de lentes» frente a refracción mediante «variación continua de potencia»:

- La técnica «tradicional» de refracción es la que se puede realizar mediante presentaciones de lentes esféricas y cilíndricas ante el ojo del paciente. Se puede practicar indistintamente con gafas o lentes de pruebas, con forópteros «manuales» con presentación mecánica de las lentes o con forópteros «automáticos» con presentación motorizada de las lentes. Sean cuales sean los instrumentos de refracción utilizados, el método de refracción es prácticamente el mismo y las lentes se proponen a intervalos de 0,25 dioptrías, lo único que cambia es el modo de presentación de las lentes. Además, la acción sobre la esfera, el eje del cilindro y la potencia del cilindro solo se pueden realizar por separado y de manera sucesiva durante el examen de la refracción.
- En cambio, la técnica «digital» explota las capacidades de un módulo óptico con variaciones continuas de potencias, controlado mediante micromotores digitales. Esta tecnología permite pasar instantáneamente de una fórmula óptica a otra modificando las potencias ópticas y con el intervalo de variación deseado, con una resolución de 0,01 D. Asimismo, es posible actuar sobre la esfera, el eje del cilindro y la potencia del cilindro de manera totalmente simultánea; de este modo, se puede pasar instantáneamente y de manera continua de una fórmula correctora a otra. Esta propiedad es la base de la nueva técnica de refracción.

b) Búsqueda «sucesiva» de las componentes de refracción frente a búsqueda «simultánea»:

- En la técnica de refracción «tradicional», se busca primero la esfera, después el eje del cilindro, a continuación, la potencia del cilindro y, finalmente, el ajuste de la esfera. La búsqueda del cilindro debe efectuarse obligatoriamente en el orden «eje del cilindro» y después «potencia del cilindro» ya que, de lo contrario, puede resultar imposible encontrar la potencia exacta del cilindro. Efectivamente, si bien es posible ajustar y encontrar el valor exacto del eje de un cilindro si su potencia de inicio es inexacta, ajustar la potencia de un cilindro con un eje de inicio inexacto da lugar a un valor distinto del que se obtendría con el eje correcto. Por este motivo, en el método de refracción «tradicional», siempre se busca antes el eje del cilindro que la potencia del cilindro.
- En la técnica de refracción «digital», primero se busca la esfera media y después se procede, en una misma secuencia, a la búsqueda de la potencia y el eje del cilindro manteniendo la potencia esférica equivalente exactamente constante, con una resolución de 0,01 D. Para ello, se tienen en cuenta dos componentes de la refracción: una «componente de potencia» según el eje inicial de la corrección ya existente y una «componente de eje» que es perpendicular en el espacio dióptrico. Como estas componentes de potencia y de eje son ortogonales e independientes una de la otra, la búsqueda del cilindro puede realizarse indistintamente empezando por la componente de eje o por la componente de potencia. Dicho esto, en general las mediciones iniciales de la refracción proporcionadas por los refractómetros automáticos son más precisas en valor de eje que en valor de potencia. Así pues, en la nueva técnica de refracción «digital», se ha optado por empezar buscando el cilindro por la componente de potencia, a la inversa que en el método «tradicional», que empieza siempre por la búsqueda del eje. Es preciso señalar, sin embargo, que habría podido hacerse de otro modo.

c) Búsqueda del astigmatismo: cilindros cruzados «físicos» frente a cilindros cruzados «virtuales».

Las dos técnicas de búsqueda del cilindro, la refracción «tradicional» y la refracción «digital», utilizan los principios del método de los «cilindros cruzados con giro» de Jackson, por el nombre del oftalmólogo americano que lo propuso a principios del siglo XX, pero con ejecuciones muy distintas.

Recordemos que el cilindro cruzado es una lente esferocilíndrica resultante de la combinación de dos lentes planocilíndricas de potencias idénticas, pero con signos contrarios y colocadas perpendicularmente entre ellas, de ahí el nombre de «cilindros cruzados», cuya potencia esférica equivalente es nula. El principio del método de búsqueda del cilindro corrector es introducir este cilindro cruzado delante del ojo del paciente con su corrección y estudiar las variaciones de nitidez de la visión del paciente resultante de la combinación del astigmatismo residual del sistema ojo + lente y el del cilindro cruzado, con éste en diferentes posiciones.

Aunque la utilización de este método de los cilindros cruzados en la refracción «tradicional» y la refracción «digital» presenta similitudes, sus ejecuciones son muy distintas:

- En la refracción «tradicional», el foróptero dispone de cilindros cruzados «físicos» que se invierten durante la refracción. Generalmente se utilizan cilindros cruzados de $\pm 0,25$ D o $\pm 0,50$ D; sus fórmulas ópticas respectivas son $+0,25$ ($-0,50$) y $+0,50$ ($-1,00$). Debido a su construcción, el «mango» de cualquier cilindro cruzado es bisector de los ejes de sus cilindros positivo y negativo, de modo que, mediante un simple giro, es posible intercambiar sus posiciones, dicho de otro modo, girar instantáneamente el eje del cilindro cruzado 90° sin modificar el valor de la esfera. Esta propiedad se utiliza para buscar el eje del cilindro y después su potencia, buscando la orientación del eje y después el valor de la potencia para los que el giro del cilindro cruzado produce una visión borrosa idéntica en el paciente. Analizaremos con detalle esta técnica en el segundo artículo de esta serie.
- En la refracción «digital», se utiliza un principio óptico similar a los cilindros cruzados de Jackson pero, en cambio, no hay cilindros cruzados físicamente presentes en el foróptero. En el módulo óptico se producen efectos ópticos de cilindro cruzado «virtuales» mediante cálculo en combinación con la corrección óptica ya existente del paciente. Por lo tanto, no hay ni colocación de un cilindro cruzado delante del ojo del paciente ni interrupción de la visión al invertirlo, simplemente cambios de correcciones ópticas percibidos de manera instantánea y continua por el paciente. Además, la potencia del cilindro cruzado utilizado no es la de un cilindro cruzado clásico de $\pm 0,25$ D o $\pm 0,50$ D: se puede elegir con una resolución de $0,01$ D para facilitar la comparación entre las dos posiciones y poder parametrizarla al concebir el algoritmo de búsqueda del cilindro; también podría ajustarse durante la refracción en función de la sensibilidad del paciente. Esta flexibilidad ofrece muchas posibilidades de evolución y adaptabilidad de los métodos de refracción. En el ejemplo que plantearemos durante esta publicación, la potencia del cilindro cruzado es de $\pm 0,35$ D.

En el segundo artículo hablaremos más detalladamente de la ejecución práctica de estas técnicas de búsqueda del cilindro y sus diferencias.

d) Una técnica tradicional «inalterable» frente a una técnica digital «evolutiva»

- En la refracción «tradicional», la técnica de prueba y el método de búsqueda del cilindro han permanecido inalterables desde hace más de un siglo y tienen pocas posibilidades de evolucionar. Efectivamente, las limitaciones físicas y mecánicas impuestas por los instrumentos no ofrecen esta posibilidad. Además, la realización de la refracción depende totalmente del profesional, que la ejecuta en función de sus conocimientos, de la experiencia adquirida y de la técnica

que haya elegido. La consecuencia es inevitablemente una variabilidad de los resultados de la refracción.

- En la refracción «digital», las técnicas de prueba y los métodos de refracción utilizados son, por el contrario, innovadores y evolutivos. Efectivamente, gracias al control del módulo óptico mediante cálculo y a su flexibilidad total, se abre un campo de posibilidades muy amplio para el desarrollo de nuevos métodos de refracción. Se han inventado los primeros algoritmos de ayuda en la búsqueda de la refracción para formalizar las primeras lógicas de examen. Deberían poder contribuir a una cierta uniformización de los métodos de refracción. Estos algoritmos ya son «adaptativos», es decir, que tienen la capacidad de adaptarse a los pacientes en función de sus respuestas durante el examen. Irán evolucionando a medida que avancen los conocimientos y en un futuro permitirán proponer múltiples soluciones de ayuda en la refracción. En resumen, el nuevo enfoque de la «Digital Infinite Refraction™» abre un inmenso campo de investigación y progreso en materia de métodos de refracción.

Continuaremos con la presentación y análisis de este tema en los dos artículos siguientes.



INFORMACIÓN CLAVE:

- La técnica de búsqueda del cilindro ha evolucionado poco desde que Jackson inventó el método de los «cilindros cruzados» a principios del siglo XX, debido básicamente a que los forópteros «con presentación de lentes» también han evolucionado muy poco.
- Actualmente, gracias a la llegada de los forópteros «con variación continua de potencia», es posible proponer un nuevo método de determinación del cilindro basado en un enfoque «vectorial» de la refracción.
- Este método explora el «espacio dióptrico» de manera más directa, buscando simultáneamente la potencia y el eje del cilindro, y manteniendo al mismo tiempo la potencia esférica equivalente exactamente constante.
- Esta nueva técnica, combinada con las propiedades de un módulo óptico controlado con gran precisión e integrada en algoritmos de ayuda en la búsqueda de la refracción, ofrece muchas posibilidades de evolución y progreso en materia de métodos de refracción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- (1) Longo, A., Meslin, D., «Un nuevo enfoque de la refracción subjetiva», Cahiers d'Ophtalmologie, número 230, pp. 59-63, (septiembre de 2019) y Points de Vue, Essilor International, www.pointsdevue.com (mayo de 2020).
- (2) Thibos, L. N., Wheeler, W., Horner, D., «Power vectors: an application of Fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error», Optom Vis Sci, Jun; 74(6):367-75 (1997).
- (3) Thibos, L. N., Horner, D., «Power vector analysis of the optical outcome of refractive surgery», Journal of Cataract & Refractive Surgery, 27(1), 80-85 (2001).
- (4) Touzeau, O., Costantini, E., Gaujoux, T., Borderie, V., Laroche, L., «Réfraction moyenne et variation de réfraction calculées dans un espace dioptrique», Journal français d'ophtalmologie, 33, 659-669 (2010).
- (5) Touzeau, O., Scheer, S., Allouch, Borderie, V., Laroche, L., «Astigmatisme : analyses mathématiques et représentations graphiques», EMC – Ophtalmologie 1, pp. 117-174, Elsevier (2004).