

3.2.2. Láser de femtosegundo LENSAR®

Federico Alonso Aliste, Julia Hernández Lucena, José María Sánchez González, Jonatan Amián Cordero

La compañía LENSAR® Inc. (Winter Park, Florida, USA) fue fundada en el año 2004. En el 2010 consiguió su primera patente en la Universidad de Missouri, un láser de femtosegundo (LFS) de pulso ultracorto para realizar la fotodisrupción de tejidos del segmento anterior del ojo. En 2010 obtuvo la aprobación de la FDA (*Food and Drug Admi-*



Figura 1. Plataforma LENSAR® Laser System-fs 3D.

nistration) para la realización de la capsulotomía anterior y la fragmentación de cristalino. Con sucesivas especificaciones y modificaciones se llega hasta el sistema LFS LENSAR® 3D (LLS-fs 3D, del inglés *LENSAR Laser System-fs 3D*) con Streamline®, aprobado por la FDA en el año 2018. Aunque tradicionalmente el LENSAR se ha asociado a la cirugía de catarata (FLACS, del inglés *Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery*), actualmente tiene aceptadas otros usos como son la realización de incisiones arcuatas, incisiones limbares y bolsillos o *pockets* corneales y está en estudio su uso como tratamiento de la presbicia con LFS sobre el cristalino (1).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL LFS LENSAR®

La plataforma LENSAR® 3D está compuesta de dispositivos de interfaz del paciente, una unidad de LFS con sistema de imagen, un sistema informático para la programación y planificación de los procedimientos, un vídeo-microscopio, unos pedales de control y la camilla quirúrgica (fig. 1).

Tabla 1. Características técnicas del láser de femtosegundo LENSAR®

Especificaciones del láser quirúrgico en el plano de tratamiento		
Especificación	Valor nominal	Unidades
Longitud de onda del centro láser (λ)	1.030 \pm 2	Nanómetros
Láser de potencia máxima media	\leq 1,2 \pm 3%	Watts
Láser máximo energía / pulso	\leq 15 \pm 3%	μ joules
Pulso máximo tasa de repetición (PRF)	80 \pm 0,5	kHz (kilohertz)
Rango del ancho de pulso	1.300 a 2.000 (\pm 1%)	Femtosegundos, FWHM, sech ²
Divergencia del haz (ángulo completo, 1/e ² , en el aire)	240 (\pm 30), \pm 5%	Mili radianes
Clasificación del láser, IEC 60825-1:2007	Clase 4	
3D-CSI Iluminación SDL especificaciones en el plano de tratamiento		
Especificación	Valor nominal	Unidades
SLD rango de longitud de emisión (λ_{max} - λ_{min})	845 a 920	Nanómetros
SLD máximo de potencia media (cw)	\leq 4	Miliwatts
SLD divergencia del haz (ángulo completo, 1/e ² , en el aire)	105 (\pm 10)	Mili radianes
Clasificación del láser, IEC 60825-1:2007	Clase 3B	

En la tabla 1 se enumeran las especificaciones técnicas del LFS LENSAR®.

Para su correcto funcionamiento, LENSAR® precisa de unas condiciones ambientales determinadas:

– **Para su transporte y almacenamiento:**

- Temperatura: -20°F a $+140^{\circ}\text{F}$ ($-28,9^{\circ}\text{C}$ a $+60^{\circ}\text{C}$).
- Humedad relativa: 5% a 95% sin condensación.
- Altitud: 0 pies a 15.000 pies MSL (pies sobre el nivel medio del mar) (0 m hasta 4.572 m MSL).
- Presión atmosférica: 500 hPa a 1060 hPa (50 kPa a 106 kPa) (0,49 atm a 1,05 atm).

– **Para su funcionamiento:**

- Temperatura: 65°F a 75°F ($18,3^{\circ}\text{C}$ a $23,9^{\circ}\text{C}$).
- Humedad relativa: $\leq 80\%$ sin condensación.
- Altitud: 0 a 10.000 pies MSL (0 m a 3.048 m MSL).
- Presión atmosférica: 700 hPa a 1060 hPa (70 kPa a 106 kPa) (0,69 atm a 1,05 atm).

DISPOSITIVO DE INTERFAZ DEL PACIENTE

El LLS-fs 3D emplea un anillo de succión y un dispositivo de interfaz del paciente sin contacto con la córnea (*no corneal-touch patient interface device*) (PID), un conjunto que actúa de interfaz entre el ojo del paciente y el LLS-fs 3D (fig. 2).



Figura 2. Conjunto de dispositivos de interfaz del paciente del LENSAR®.

La interfaz del paciente del LENSAR® es anatómicamente adecuada para la realización de FLACS, gracias a sus características:

– La interfaz llena de líquido (20-30 ml de BSS) mantiene la integridad de la córnea sin deformarla, lo que permite una colocación precisa del láser y una imagen clara de toda la cámara anterior.

– Esta interfaz líquida evita eficazmente que los impulsos del láser sean refractados por la córnea. También proporciona una superficie de acoplamiento sin contacto que minimiza la deformación de la córnea y ayuda a reducir la elevación de la presión intraocular (PIO) inducida por el proceso de acoplamiento o *docking* del PID con el globo ocular.

– El diseño elíptico ofrece un ajuste mejor y anatómicamente correcto. El anillo de succión de baja presión inmoviliza el ojo con un pequeño aumento de la PIO, reflejando la forma natural del ojo, al tiempo que minimiza el riesgo de pliegues corneales y estrías que podrían afectar la precisión del tratamiento láser.

Una vez que el brazo PID y el anillo de succión se acoplan, se bloquean los dos componentes juntos haciendo una rotación en el sentido de las agujas del reloj (2).

IMÁGENES CON REALIDAD AUMENTADA

El sistema de imágenes superior del láser LENSAR® recopila un espectro de datos biométricos (hasta 2 veces más rápido con la actualización del Streamline®) y luego reconstruye un modelo 3D preciso de la verdadera anatomía del ojo de cada paciente utilizando el sistema patentado de LENSAR® con tecnología de Realidad Aumentada™ (3). Debido a que detecta exactamente dónde están las estructuras oculares independientemente del grado de catarata, incluidas cataratas blancas o brunescentes, los pulsos de láser se pueden enfocar con precisión, por lo que la ejecución del tratamiento se realizará con total seguridad y exactitud (fig. 3).

Características principales del sistema de imágenes de LENSAR® (fig. 4A)

1. La cámara giratoria toma capturas de 2 ángulos diferentes en hasta 8 posiciones diferentes alrededor del eje óptico, para adquirir un máximo de 16

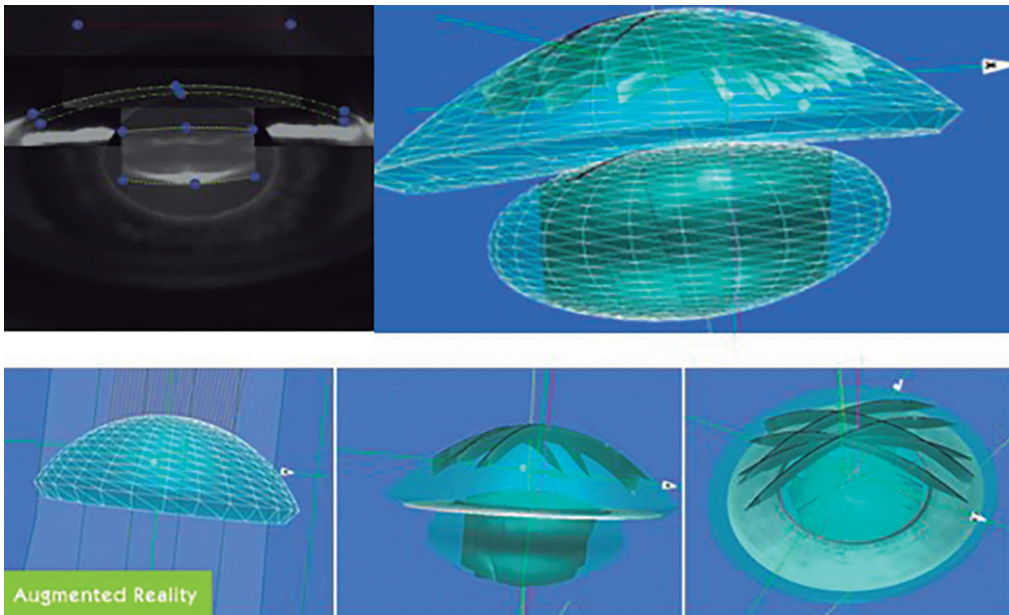


Figura 3. Imagen de Realidad Aumentada del LFS LENSAR®. Durante el proceso de reconstrucción 3D, el software de Realidad Aumentada del LENSAR® analiza la curvatura de la cápsula anterior y posterior del cristalino en relación con el eje óptico, y es capaz de compensar la inclinación (*tilt*) del cristalino. Obsérvese que el patrón de tratamiento (área oscura) encaja dentro del saco capsular sin afectar a las estructuras adyacentes.

imágenes. El escaneo y la obtención de imágenes es hasta 2 veces más rápido con la última actualización del Streamline®, el Streamline® IV.

2. La realidad aumentada utiliza los datos biométricos, la tecnología Scheimpflug (4), la tecnología de trazado óptico de rayos y una iluminación de diodo superluminiscente (SLD) para crear un modelo 3D preciso del segmento anterior del ojo, permitiendo una visualización clara del mismo así como la detección de las diferentes capas del cristalino mediante el control de la dispersión de la luz.

3. El escaneo de velocidad variable garantiza una captura de alta definición que muestra todas las estructuras oculares del segmento anterior en detalle.

4. La detección automática de superficies identifica las superficies anterior y posterior de la córnea así como las cápsulas anterior y posterior del cristalino, y permite una imagen de alta resolución desde la córnea anterior hasta la cápsula posterior del cristalino independientemente de la densidad de éste o de la opacidad de medios.

5. A diferencia de los sistemas basados en tomografía de coherencia óptica (OCT) que aportan dos imágenes del segmento anterior (un corte sagital y un corte transversal), LENSAR® utiliza datos biométricos y modelado 3D en los ejes X, Y, Z para detectar y compensar incluso el grado más pequeño de inclinación (*tilt*) del cristalino (5) (fig. 3).

Con el Streamline® IV, LENSAR® clasifica automáticamente la densidad de cataratas, en una escala del 1 al 5 (fig. 4B).

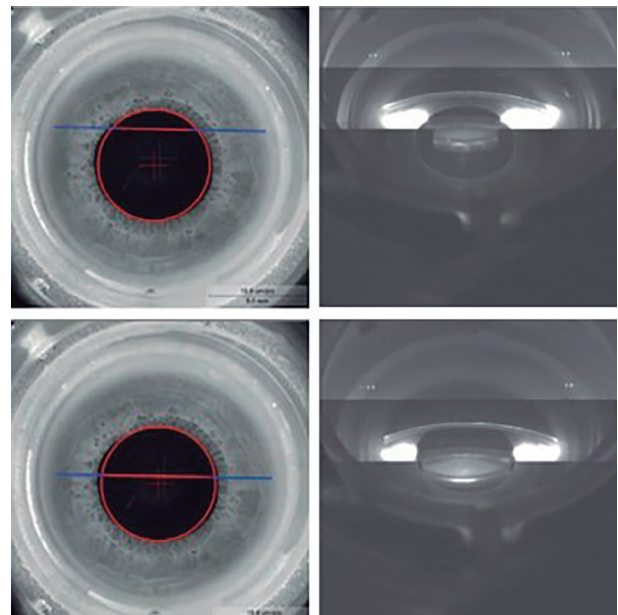


Figura 4A. La cámara de Realidad Aumentada realiza dos escaneos de cada una de las posiciones de visualización para producir un mínimo de 10 imágenes para la reconstrucción 3D del segmento anterior del ojo.

Detección inteligente de la inclinación del cristalino

El sistema de imágenes de LENSAR® recopila datos biométricos en múltiples ángulos y en los ejes X, Y, Z, de tal manera que este LFS tiene la capacidad de detectar y compensar la inclinación (*tilt*) del cristalino con respecto al eje óptico, lo que contribuye a la seguridad del tratamiento (6,7), evitando la reali-

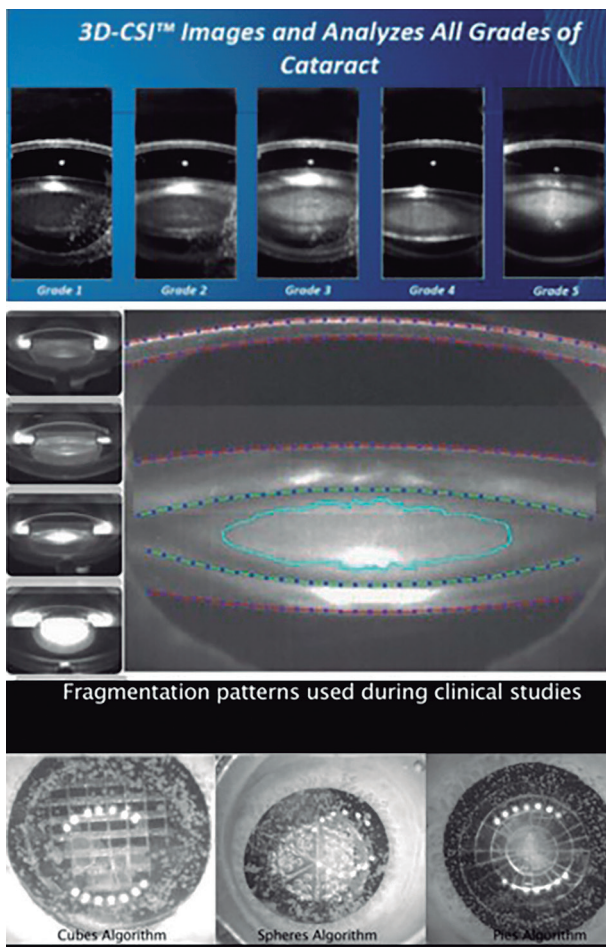


Figura 4B. Streamline® clasifica automáticamente cada catarata en una escala del 1 al 5 en función de la densidad y ubicación del núcleo, y además determina la densidad y ubicación del núcleo. Con estos datos, LENSAR® permitirá elegir el patrón de facofragmentación más adecuado en cada caso.

zación de capsulotomías incompletas y previniendo el daño sobre la cápsula posterior. Esto se obtiene gracias a que la capsulotomía centrada en pupila es inclinada para que coincida con el *tilt* del cristalino para lograr una capsulotomía completa, y lo mismo ocurre con los patrones de fragmentación, que se ajustan al *tilt* del cristalino para prevenir el daño capsular posterior (fig. 5).

CAPSULOTOMÍA

El sistema LENSAR® automatiza el tamaño, la forma y la ubicación de la capsulorrexis:

- Puede ajustarse a menos de 250 μm del margen pupilar cuando el sistema detecta una constricción intraoperatoria de la pupila.

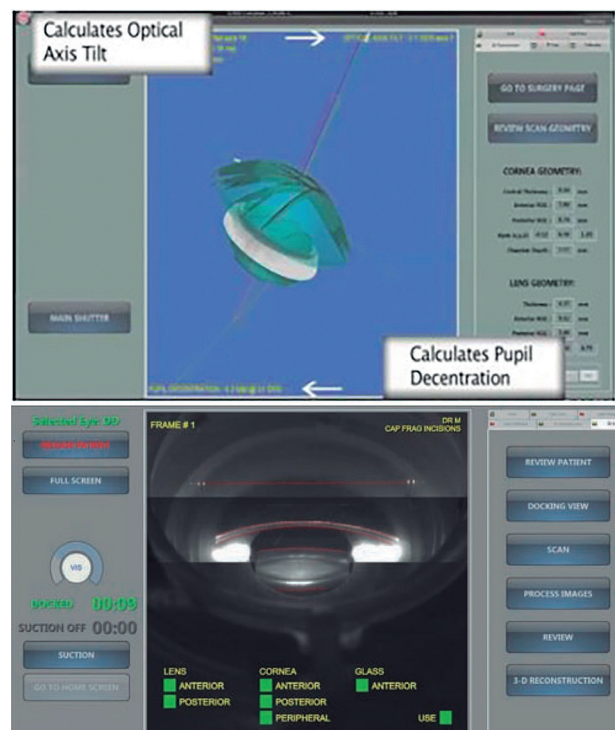


Figura 5. Detección automática de las superficies anterior y posterior del cristalino y su grado de inclinación.

- Puede centrarse en el eje óptico o en la pupila.
- Una capsulorrexis precisa puede contribuir a un posicionamiento efectivo de la lente (ELP) más consistente y a obtener mejores resultados refractivos (2,3).

Las preferencias del cirujano se pueden ajustar según sea necesario, pudiendo estar precargadas. Además, el cirujano tiene la **opción de centrar la capsulorrexis anterior sobre el eje óptico del cristalino o sobre el centro de la pupila** en un intento de maximizar la ELP (8) (fig. 5).

PATRONES DE FRAGMENTACIÓN PERSONALIZADOS AUTOMÁTICOS

El software LensDoctor patentado del LENSAR® incorpora una variedad de patrones de fragmentación, de manera que selecciona automáticamente un patrón de fragmentación preprogramado y personalizado por el cirujano y un ajuste de energía en función de los resultados de las imágenes automáticas de la densidad de cataratas (categorías 1-5), lo que aumenta la eficiencia del procedimiento y ahorra tiempo entre las imágenes y el tratamiento (fig. 4B).

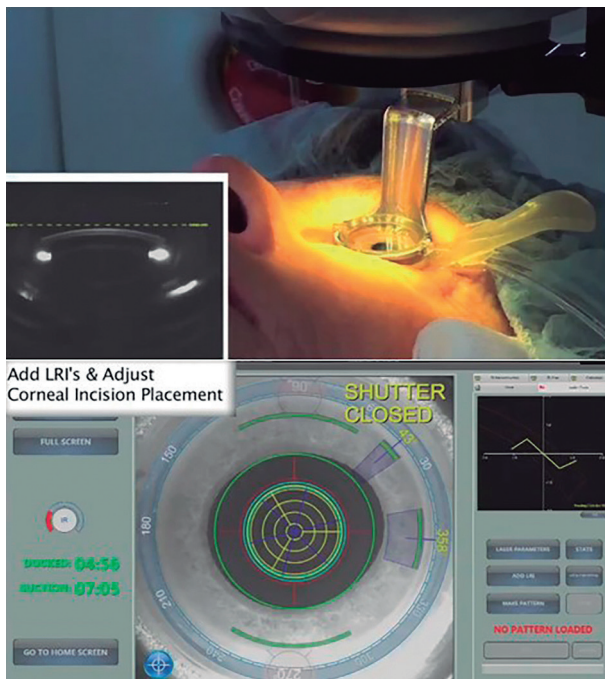


Figura 6. Incisiones de entrada (incisión principal y paracentesis) e incisiones arcuatas precisas con el LENSAR®, gracias al beneficio adicional del registro del iris para compensar la ciclo-rotación.

PLANES DE PROCEDIMIENTOS GENERADOS POR SOFTWARE

Para ayudar a ahorrar un tiempo valioso, el software de LENSAR® crea un plan de procedimiento automatizado utilizando una biometría específica del paciente combinada con las preferencias seleccionables por el cirujano:

1. Localización preferida de la incisión.
2. Lente intraocular (LIO) a implantar.
3. Inclinación del cristalino.
4. Densidad nuclear.
5. Patrones preferidos de fragmentación.

INCISIONES CORNEALES INTELIGENTES

El sistema LENSAR® está aprobado para una gama completa de incisiones corneales (9) y con imágenes en tiempo real de *Intelligent Incisions™* patentado. Con este sistema de imagen, se puede visualizar la córnea justo antes de la realización de la incisión corneal para asegurarse de la correcta localización de la misma. Los parámetros controlados por el cirujano le permiten crear cortes de espesor total y parcial, de un solo plano y de varios planos en la córnea para realizar:



Video 1. Cirugía de catarata asistida por el láser de femtosegundo LENSAR® (Cortesía de LENSAR® Inc.).

1. Incisión principal de entrada y paracentesis.
2. Incisiones arcuatas precisas: LENSAR® gracias al beneficio adicional del registro del iris para compensar la ciclo-rotación, consigue una alta precisión en la colocación de la incisión para mejorar los resultados quirúrgicos (fig. 6).

En el vídeo 1 se muestran los pasos quirúrgicos de una cirugía de catarata asistida por el LFS LENSAR®.

GESTIÓN DEL ASTIGMATISMO CON EL STREAMLINE® IV

Streamline® IV es una actualización del sistema LENSAR® que permite controlar mejor el astigmatismo y optimizar los resultados visuales y refractivos de los pacientes (fig. 7). Para ello, el Streamline® IV aporta las siguientes mejoras:

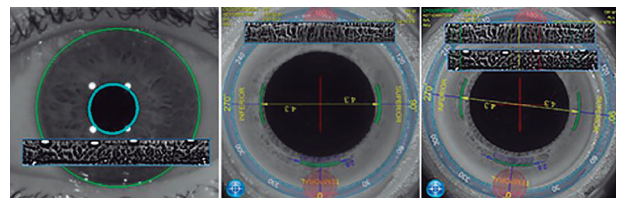


Figura 7. El registro del iris identifica los puntos de referencia en el iris en una imagen de topografía preoperatoria con el paciente sentado (izquierda) y luego encuentra los mismos puntos de referencia en una imagen tomada mientras el paciente está en decúbito supino bajo el LENSAR® (centro). La ciclo-rotación se ajusta automáticamente sin necesidad de macado manual con tinta (derecha).

Capsulorrexis Refractiva IntelliAxis™ (10)

1. LENSAR® con Streamline® IV permite la realización de marcas capsulares permanentes y biomecánicamente estables que permiten señalar con precisión el eje astigmático más curvo en la propia cápsula anterior, para guiar así el alineamiento del eje de la LIO tórica, tanto intraoperatoriamente como luego en el control postoperatorio (fig. 8). Esto

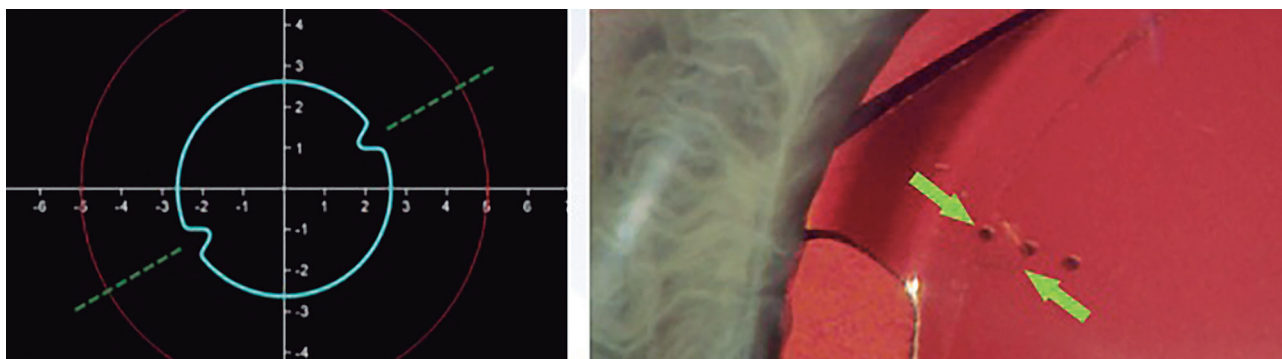


Figura 8. La Capsulorrexis Refractiva IntelliAxis está alineada automáticamente con el eje curvo del astigmatismo basándose en los datos preoperatorios (izquierda). Lente intraocular tórica alineada con la marca capsular de la Capsulorrexis Refractiva IntelliAxis (derecha) (3).

elimina la necesidad de realizar marcas corneales manuales con tinta antes de la cirugía.

2. IntelliAxis®-C: el marcado corneal del eje más curvo también está disponible para incisiones arcuatas.

Transferencia inalámbrica de datos diagnósticos preoperatorios

1. Los datos de la exploración preoperatoria se pueden transferir de forma inalámbrica tanto desde el Pentacam® como desde el Cassini® al sistema láser LENSAR® (también está disponible la transferencia de datos mediante USB desde el Nidek® OPD-Scan III y el Topcon® Aladdin).

2. Esto permite una planificación más precisa del tratamiento del astigmatismo y evita posibles errores de transcripción.

Análisis de datos postoperatorios

1. Los protocolos de tratamiento individualizado del astigmatismo se pueden refinar en función de los datos pre, intra y postoperatorios.

2. Permite a los cirujanos obtener resultados refractivos cada vez mejores a lo largo del tiempo.

Registro de iris y ajuste automático de ciclo-rotación

1. Confirma automáticamente la compatibilidad de la imagen con el punto de captura del examen de diagnóstico preoperatorio (sólo disponible si se emplea Pentacam® y/o Cassini®): por ejemplo, detecta

un enfoque deficiente, el párpado superior o inferior bloqueando el iris...

2. El registro de iris proporciona mayor exactitud a la hora de la colocación de la incisión corneal, ya que compara la imagen preoperatoria con las imágenes tomadas con el LENSAR® cuando ya se ha realizado el *docking*.

3. El registro del iris no se ve afectado por la pérdida de los detalles vasculares debido a efectos farmacológicos (vasoconstrictores).

4. Compensa automáticamente la ciclo-rotación para aumentar la precisión de los *spots* y elimina la necesidad del marcado corneal con tinta.

Planificación de la incisión arcuatas. Incisiones inteligentes™ (fig. 6)

1. Permite una planificación adecuada de la incisión arcuata *one-touch* basada en los datos del nomograma pre-programado más actual de cada cirujano con el fin de reducir el SIA (*surgically-induced astigmatism*) (11).

2. Agrega un nivel de precisión y elimina posibles errores de transcripción mediante el uso de mediciones biométricas individuales del paciente y otros parámetros definidos por el cirujano para determinar automáticamente la profundidad, ubicación y longitud de la incisión arcuata.

3. Aporta imágenes localizadas para monitorear la posición de la córnea inmediatamente antes de cada incisión, para garantizar la ubicación precisa de la misma.

4. Streamline® IV facilita la creación de incisiones que son más fáciles de abrir, al ser capaz de detectar incluso córneas opacas.

Astigmatismo inducido quirúrgicamente (SIA)

1. Modifica automáticamente los parámetros de la incisión para tener en cuenta los valores de SIA y de astigmatismo residual.

Conversiones de potencia de LIO tóricas

1. El selector de LIO tórica mejorado incluye la potencia de LIO tórica definida por el fabricante calculada en el plano corneal teniendo en cuenta el SIA.

2. Ofrece a los cirujanos más precisión para reducir la planificación del tratamiento del astigmatismo corneal residual (12).

Por último, aunque tradicionalmente LENSAR® se ha asociado a la realización en exclusiva de FLACS, la última actualización de la plataforma LENSAR® Laser System aprobada por la FDA agrega la capacidad de realizar procedimientos *pockets* y flaps para la inserción de implantes intraestromales para la corrección de la presbicia. Además, hay estudios sobre la realización de impactos de LFS con la plataforma LENSAR® Laser System para tratamientos de presbicia (13), pero estos aún no han sido autorizados para su uso clínico por la FDA.

CONCLUSIONES

- LENSAR® *Laser System-fs* 3D permite la realización precisa y segura de FLACS.
- LENSAR® emplea un anillo de succión y una interfaz del paciente sin contacto con la córnea (*no corneal-touch patient interface device*).
- Gracias a la tecnología de Realidad Aumentada, LENSAR® hace una reconstrucción 3D del segmento anterior del ojo, detecta la curvatura de la cápsula anterior y posterior del cristalino en relación con el eje óptico, y es capaz de compensar la inclinación (*tilt*) del cristalino para que el tratamiento láser se realice con seguridad.
- LENSAR® clasifica automáticamente la densidad de cataratas, en una escala del 1 al 5, y elige

el patrón de facofragmentación más adecuado para cada caso concreto.

– La Capsulorhexis Refractiva IntelliAxis permite la creación de unas marcas capsulares en el eje astigmático más curvo para guiar la alineación del eje de la lente intraocular tórica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Packer M, Klyce SD, Smith C. The LENSAR® Laser System1. Packer M, Klyce SD, Smith C. The LENSAR® Laser System-fs 3D for Femtosecond Cataract Surgery. US Ophthalmic Review 2014; 7: 89-94.
2. LENSAR®, data of file. LENSAR® Research Report documenting testing and analysis performed to determine the stability of the human eye while docked. US Ophthalmic Review 2014; 7: 89-94.
3. Data on file. LENSAR, Inc.
4. Slade SG, Culbertson WW, Krueger RR. Femtosecond laser for refractive cataract surgery. Cataract Refract Surg Today 2020; 1: 67-73.
5. Alió JL, Abdou AA, Arias Puente A, et al. Femtosecond Laser Cataract Surgery: Updates on Technologies and Outcomes. J Refract Surg 2014; 30: 420-427.
6. Assil K. Refractive Outcomes Following Femtosecond Laser-assisted Cataract Surgery in Post-LASIK Eyes. Poster presented at: International Society of Refractive Surgery (ISRS) Symposium; January 17-20, 2013; New Orleans, LA.
7. Nichamin L. Refractive results following femtosecond laser-assisted capsulotomy. Poster presented at: International Society of Refractive Surgery (ISRS) Symposium; January 17-20, 2013; New Orleans, LA.
8. Cekic O, Batman XC. The relation between capsulorhexis size and anterior chamber depth relation. Ophthalmic Surg Lasers 1999; 30: 185-190.
9. Uy HS, Shah S, Packer M. Comparison of Wound Sealability Between Femtosecond Laser-Constructed and Manual Clear Corneal Incisions in Patients Undergoing Cataract Surgery: A Pilot Study. J Refract Surg 2017; 33: 744-748.
10. Valas Teuma E, Gray G, Bedi R, Packer M. Femtosecond laser-assisted capsulotomy with capsular marks for toric IOL alignment: Comparison of tensile strength with standard femtosecond laser capsulotomy. J Cataract Refract Surg 2019; 45: 1177-1182.
11. Visco DM, Bedi R, Packer M. Femtosecond laser-assisted arcuate keratotomy at the time of cataract surgery for the management of preexisting astigmatism. J Cataract Refract Surg 2019; 45: 1762-1769.
12. Packer M. Image-guided Femtosecond Laser Capsular Marks for Toric Intraocular Lens Alignment-The Refractive Capsulorhexis. US Ophthalmic Review 2019; 12: 60-64.
13. Glasser A. Restoration of accommodation: surgical options for correction of presbyopia. Clin Exp Optom 2008; 91: 279-295.