

# DISEÑO DE UN CIRCUITO DE CONTROL DE ILUMINACIÓN PARA UN SISTEMA FORMADOR DE IMÁGENES DE PURKINJE

**Armando Gómez Vieyra**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*agvte@correo.azc.uam.mx*

**Ezequiel Martínez Solís**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ezequiel.martinez.s@hotmail.com*

**Juan Jesús Ocampo Hidalgo**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jjoh@correo.azc.uam.mx*

**Karla Beatriz Vergara Vázquez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*karlavergara\_b@outlook.com*

**Uriel Calderón Uribe**

Universidad de Guanajuato  
*urielcal91@gmail.com*

**Geovanni Hernández Gómez**

Universidad de Guanajuato  
*geov.hernandez@ugto.mx*

## Resumen

Las imágenes de Purkinje son generadas por reflexión de la luz en las diferentes interfaces oculares (córnea anterior y posterior, y cristalino anterior y posterior). El estudio de estas imágenes es de suma importancia tanto en la

optometría como en la oftalmología. En la UAM Azcapotzalco se ha desarrollado un sistema formador de imágenes de Purkinje, el cual permite generar y detectar dichas imágenes de individuos in-vivo. El sistema optoelectrónico presentado, consta de una iluminación infrarroja a 840nm, alimentada por un convertidor digital/analógico (current-steering DAC) con salida de corriente, el cual fue diseñado con transistores y multiplexores analógicos CMOS. El DAC entrega de 6.5 a 7.5 mA de corriente por LED en pasos de 0.25 mA (n bits de resolución), en las diferentes matrices. De este modo, las matrices funcionan apropiadamente sin saturarse, y por ende es posible generar las Imágenes de Purkinje sin reflexión y sin ruido de fondo, con lo cual se ha reducido el intervalo de la prueba (con tiempos de 10 a 15 minutos por sujeto).

**Palabras Claves:** DAC de corriente, iluminación LED, imágenes de Purkinje, sistema ocular humano, tecnología CMOS.

### **Abstract**

*Purkinje images are generated by the light reflection at different ocular interfaces (anterior and posterior cornea, anterior and posterior lens). The study of these images is of paramount importance in both optometry and ophthalmology. In UAM-Azcapotzalco, a Purkinje image-forming system has been developed, which allows the generation and detection of such images of in-vivo. The optoelectronic system presented, consists of an infrared illumination at 840nm, powered by a current-steering DAC with current output, which was designed with analogue CMOS transistors and multiplexers. The DAC delivers from 6.5 to 7.5 mA of current by LED in steps of 0.25 mA (n bits of resolution), in the different matrices. In this way, the matrices function properly without saturation, and therefore it is possible to generate the Purkinje Images without reflection and without background noise, which has reduced the interval of the test (with times of 10 to 15 minutes per subject).*

**Keywords:** Current DAC, human eye system CMOS technology, LED lighting, Purkinje images.

## 1. Introducción

Las Imágenes de Purkinje fueron observadas por vez primera por Johannes Evangelista Purkinje (Fisiólogo) en 1821, con la ayuda de una linterna y más tarde confirmadas por Luis Joseph Sanson en 1837 [Marquez, 1926]. Las imágenes son cuatro, ver figura 1, dos corneales y otras dos del cristalino.

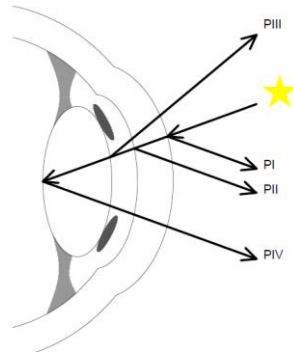


Figura 1 Esquema de la formación de las imágenes de Purkinje.

La primera imagen (PI) se produce por reflexión sobre la superficie anterior de la córnea que actúa como un espejo convexo y da lugar a una imagen virtual. Esta imagen es más intensa debido a la gran diferencia de índices de refracción entre el aire y las células de la córnea. Dicha imagen está situada a nivel del plano pupilar y tiene un tamaño intermedio entre las imágenes que producen las 2 superficies del cristalino. La imagen en cuestión se conoce también como reflejo luminoso corneal. La segunda imagen (PII) se produce sobre la superficie posterior de la córnea. Es de escasa intensidad debido a que la diferencia entre los índices de refracción de la córnea y el humor acuoso es muy pequeña. Además, está localizada muy cerca de la PI, ya que el radio de curvatura de la cara posterior es ligeramente inferior al de la cara anterior. Todo ello hace que esta imagen pase desapercibida ya que su tamaño también es ligeramente menor. La tercera imagen de Purkinje (PIII) se forma sobre la superficie anterior del cristalino que también actúa como un espejo convexo. Es la mayor de todas en cuanto a tamaño debido a que el radio de curvatura de la cara anterior del cristalino es mayor que los de la córnea, pero su intensidad luminosa es la más débil debido a varios factores como son: el mayor tamaño de la imagen, la escasa

diferencia entre el índice de refracción del humor acuoso y el del cristalino, una superficie menos lisa que la de la córnea y la conformación del cristalino con diferentes índices de refracción. Durante el estímulo visual conocido como acomodación, esta imagen se hace más pequeña, ya que disminuye el radio de curvatura, es decir, aumenta la curvatura de la cara anterior del cristalino. La cuarta imagen (PIV), se forma por reflexión sobre la superficie posterior del cristalino, que a diferencia de las otras actúa como un espejo cóncavo, por lo que se produce una imagen real e invertida. Su intensidad es mayor que la de la tercera imagen, pero su tamaño es menor que el de la primera (superficie anterior de la córnea) [Kaschke, 2014].

Recientemente, Taberero y coautores [Taberero, 2006] desarrollaron un sistema para estudiar la alineación de las estructuras oculares a partir de las Imágenes de Purkinje. Basado en esta investigación, se ha desarrollado un instrumento que permite obtener las imágenes de Purkinje, en una sola toma [Escamilla, 2014], [Cosme, 2016]. Este instrumento consta de una cámara CCD conectada a una PC, con lo cual realiza la captura y almacenamiento de las imágenes, empleando un módulo desarrollado bajo la plataforma LabView. Como se mencionó anteriormente, las Imágenes de Purkinje son cuatro (PI, PII, PIII y PIV), que se generan cuando se hace incidir luz infrarroja (840 nm) desde la superficie corneal, hasta el cristalino, del ojo humano. El uso de diodos emisores de luz (LEDs) infrarrojos conectados en serie a un transistor BJT que estabiliza la corriente consumida presenta muchas desventajas, que incrementan el grado de dificultad para generar las imágenes de interés. Las desventajas que tiene este arreglo son: El arreglo de diodos no irradia la intensidad luminosa apropiada: Dadas las características I-V no-lineales de los LEDs y los transistores BJT, ligeros aumentos en el voltaje provocan aumentos muy drásticos en la corriente, lo cual vuelve muy crítico el ajuste. En consecuencia, la generación de las imágenes de Purkinje se vuelve muy tardada.

Las imágenes captadas con dicho sistema de control de la corriente suministrada al LED, se observan con mucha reflexión y ruido, esto hace que se pierda nitidez en los reflejos de interés. No tener uniformidad en la iluminación hace que la

intensidad del haz de luz incidente en la superficie corneal se aprecie entre sí en algunas partes con más potencia que en otras, como consecuencia de esto, al localizar las coordenadas del centro de cada imagen, en la mayoría de los casos están fuera del eje céntrico, esto se observa en la figura 2 [Cosme, 2016].

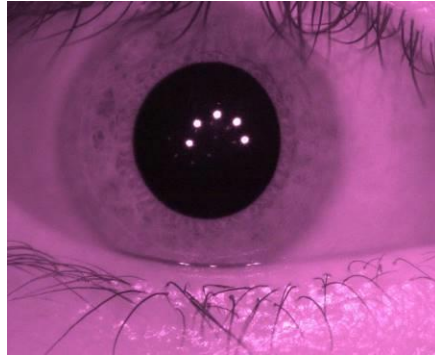


Figura 2 Reflejos de Purkinje en la superficie de interés.

En este trabajo se presenta el diseño y la implementación de un sistema electrónico, que permite lograr una iluminación uniforme y controlada para este instrumento.

## 2. Métodos

Se procedió a caracterizar 10 LEDs infrarrojos, tanto óptica como electrónicamente, para definir los parámetros necesarios del sistema electrónico. Empleamos una esfera integradora de 6" Edmund Optics, un Power Meter Marca Newport Modelo 1916-R, una fuente de alimentación controlada digitalmente, un multímetro Keithley DMM5.5 y un multímetro AMPROBE Compact 15XP-B. Las curvas características encontradas se pueden observar en la figura 3, donde se corroboró que tenían propiedades similares y que son acordes a la literatura.

El sistema completo a bloques que se desarrolló se muestra en la figura 4. Donde se observa un bloque del sistema de alimentación general, que es una fuente de voltaje de corriente directa variable de los 3 a los 15 V, basada en un regulador LM317 y monitoreada por un microcontrolador ATmega328 que muestra el voltaje de salida en una pantalla de cristal líquido. Un bloque de fuente de corriente, el cual basa su construcción en un espejo de corriente simple con transistores

MOSFET. El bloque de control digital será construido a partir de la implementación de multiplexores analógicos (con tecnología MOSFET), que podrán ser controlados manualmente o mediante una computadora personal o un microcontrolador. Este sistema permite trabajar de manera manual o implementar un sistema automatizado para análisis de las estructuras oculares.

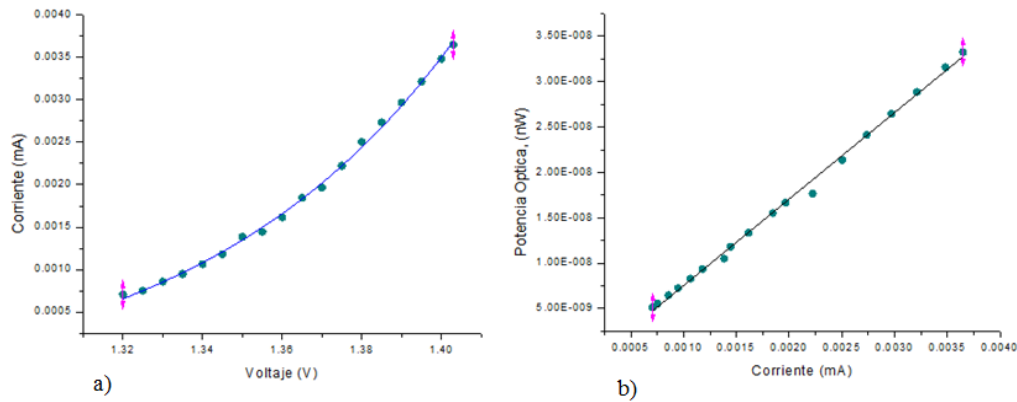


Figura 3 a) Curva de corriente contra el voltaje. b) Potencia óptica contra la corriente.

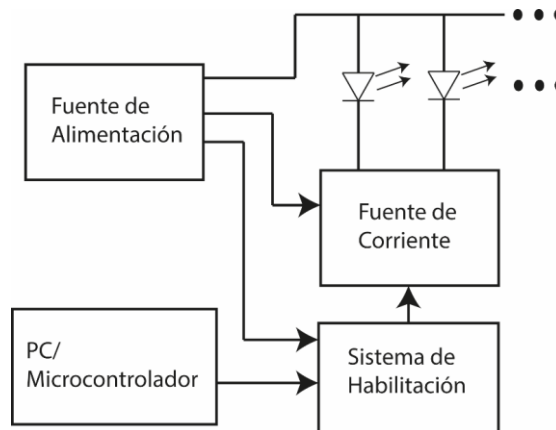


Figura 4 Sistema a bloques para el control de iluminación.

Tomando en cuenta a los dispositivos disponibles en el mercado y a las características de éstos, se decidió basar todo el diseño en tecnología CMOS ya que son más estables a la temperatura que la tecnología BJT, presentan una elevada impedancia de entrada y no son sensibles a la radiación externa. Sin embargo, el manejo y ensamblaje se complica debido a que se dañan con la electricidad estática.

## La Fuente de Corriente

Existen diversas configuraciones para crear este subsistema, por lo que se eligió como punto de partida, una fuente de corriente de dos transistores, llamada también espejo de corriente, que se ilustra en la figura 5 [Neamen, 2010]. Donde se observa una corriente de referencia ( $I_{REF}$ ), que entra al primer transistor que se conecta como un diodo. El voltaje en este transistor activa el segundo transistor. Lo que provoca que las corrientes de ambas terminales fuente ( $I_{S1}$  e  $I_{S2}$ ) son prácticamente iguales, debido a que las compuertas están en paralelo. Con lo anterior se logra que la corriente en la terminal de drenaje ( $I_{D2}$ ) sea igual a la corriente de referencia ( $I_{REF}$ ).

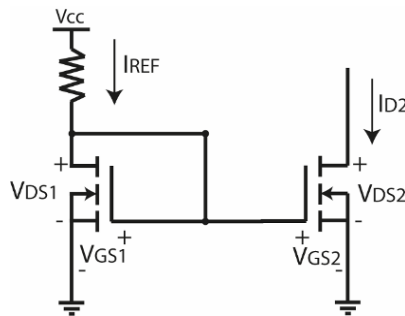


Figura 5 Fuente básica de corriente básica MOSFET de dos transistores.

Por lo que la resistencia, ajustaría la corriente de referencia, y podría proporcionar los pasos adecuados para incrementar la corriente mediante la incorporación de salidas múltiples, dejando una corriente base (con dos o más salidas activas) y el resto controlados para ir incrementando la corriente en pasos constantes, ver figura 6.

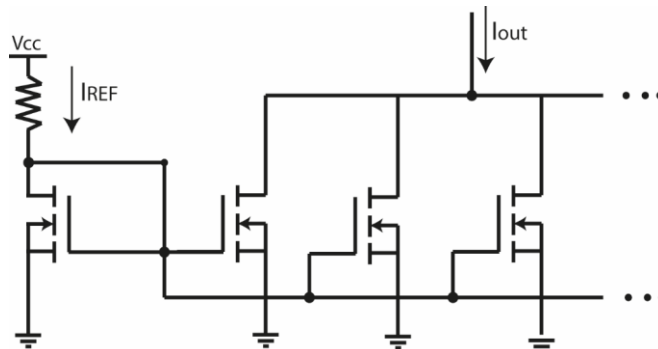


Figura 6 Fuente de corriente de transistores de salidas múltiples.

## El Sistema de Habilitación

Este sistema es diseñado empleando multiplexores analógicos, que pueden construirse a partir de interruptores analógicos CMOS. Idealmente, los interruptores, presentan una resistencia nula cuando están cerrados y una impedancia infinita cuando están abiertos. Al implementarse el multiplexor analógico, se emplean interruptores bilaterales CD4016BE. El diagrama a bloques del sistema a implementar se muestra en la figura 7.

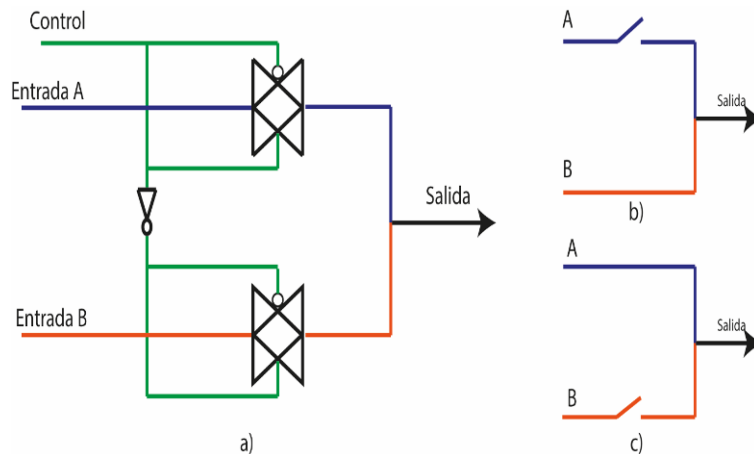


Figura 7 Formación de un Multiplexor Analógico a partir de interruptores bilaterales.

En el bloque SWA y SWB están en posibles salidas lógicas: 0 y 1, la señal de corriente que reciben las compuertas lógicas están presentes en los pines de control A y control B; al presentarse un estado cero lógico en el SWA la señal circundante deja de pasar, dirigiéndose solamente en el bloque SWB con estado uno lógico, al final del recorrido se tiene para éste una salida S igual a B, lo anterior puede ilustrarse por medio del circuito equivalente de la figura 7b.

## Integración del Sistema Completo

Para la integración final del sistema, se decidió implementar de forma manual el control del sistema de habilitación, sin embargo, es claro que puede habilitarse fácilmente desde un microcontrolador o una computadora personal. Para la etapa de la fuente de corriente se emplearon transistores MOSFET 2N7000 y un potenciómetro de 20 vueltas de valor nominal de 100 k $\Omega$ .



Por la complejidad del sistema, se muestra únicamente una célula acotada del sistema, figura 8, que consta de un DAC de corriente de 2 bits.

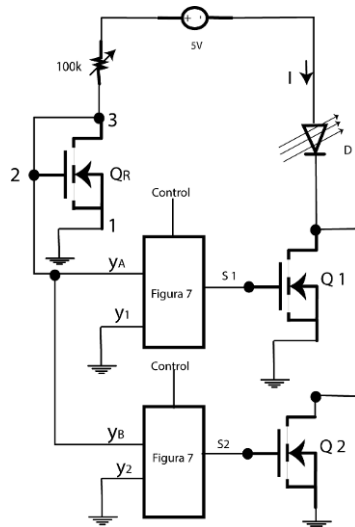


Figura 8 DAC de corriente de 2 bits implementado para controlar “I” en “D1”.

La figura 9 nos muestra el ensamble final para el control de un solo LED. El cual nos permite variar la intensidad de este, a partir de un interruptor miniatura presente en el arreglo, con intensidades bien definidas y bajo muestreos definidos. En este caso se realizó un DAC de corriente de 4 bits.

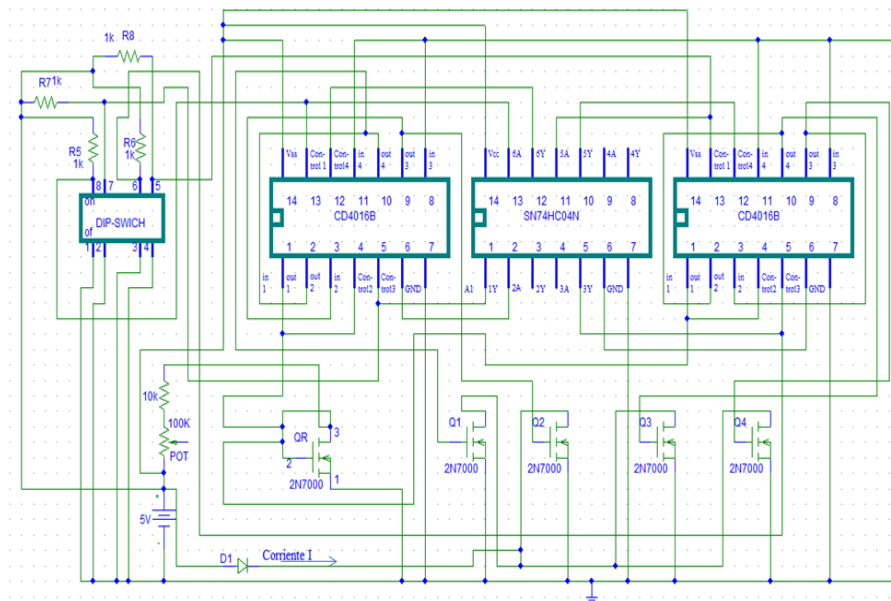


Figura 9 Ensamble final para el control de un solo LED infrarrojo.

Para completar un arreglo de tres, cuatro o más sistemas de iluminación LED, únicamente se tienen que reproducir los ensambles necesarios, mostrados en la figura 9. Cada ensamble comparte el mismo transistor de referencia para gobernar la corriente en el drenaje (salida) de cada uno de los transistores. Y con eso garantizar la misma emisión. Las compuertas lógicas empleadas fueron de tecnología CMOS, que en este caso fueron las SN-74HC04N. La fuente de alimentación estuvo regulada a 5 V.

### **Acondicionamiento de los LED**

Los diodos infrarrojos para el sistema de iluminación que brindó el fabricante, son como el que se observa en la figura 10a. Este diodo por la forma geométrica que tiene el lente (esférico) presentaba problemas, pues el encapsulado epóxido (lente del LED) hace que la luz de éste se dirija aleatoriamente. Este hecho fue un inconveniente, ya que para este trabajo es necesario que la luz del LED esté lo menos dispersa posible (haz de luz puntual). Para resolver este inconveniente, cada LED se sometió a la eliminación del lente; para hacer esto, se sometió cada pieza a un esmerilado abrasivo, para posteriormente pulirlos.

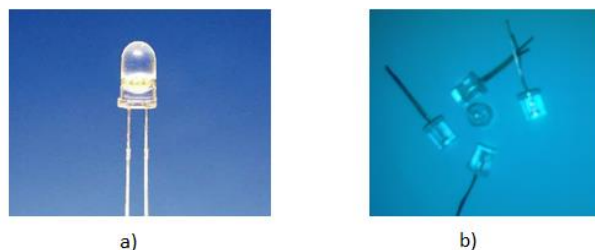


Figura 10 Diodo LED: adquirido con el fabricante y después del proceso de pulido.

El esmerilado abrasivo consistió en devastar el lente del LED a través de una lija de agua del número 1600. El número de la lija se refiere a la porosidad (rugosidad) o a la capacidad para esmerilar. La número 1600 es colocada sobre una superficie plana y sobre de ésta se hace verticalmente el desbaste del LED. La superficie a esmerilar debe quedar horizontalmente de forma plana, sin ningún ángulo de inclinación. El proceso finaliza cuando el esmerilado esta 1.5 mm de la parte interna del LED, ver figura 10b.

El material que se usó en el proceso de pulido fue: Óxido de Silicio de  $0.5 \mu\text{m}$  de granulo, una charola de plástico (25 por 40 cm), un despachador de agua (una botella de refresco con un agujero) y un cuadro de Poliuretano para pulido (10 cm de lado). El proceso de pulido comienza en donde finalizó la etapa de esmerilado. El pulido finaliza cuando la superficie ha adquirido la misma apariencia que tiene el resto del LED.

### 3. Resultados

El arreglo final donde se integró el sistema desarrollado se muestra esquemáticamente en la figura 11. Antes de la realización de este trabajo se obtenían imágenes, como las mostradas en la figura 12.

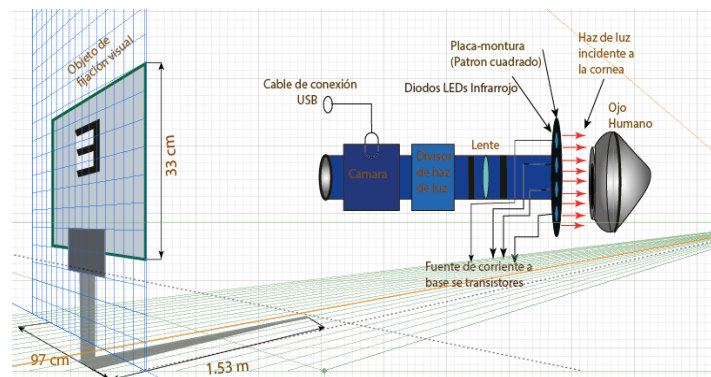


Figura 11 Configuración del Sistema Formador de Reflejos de Purkinje.

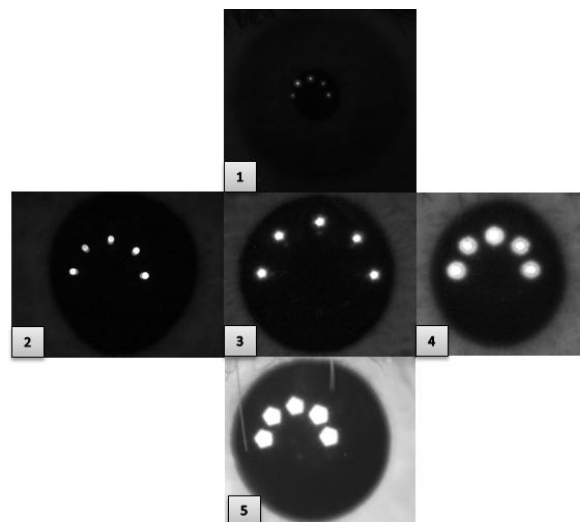


Figura 12 Imágenes típicas obtenidas sin el desarrollo del control de iluminación.

En la figura 13, se muestra las imágenes obtenidas a partir de la implementación de las fuentes de corriente. Debe tenerse presente que se ha cambiado la geometría del patrón de iluminación. Pero los avances cualitativos de este trabajo no pueden evidenciarse cuantitativamente, por ejemplo, el tiempo que tardamos en la toma de datos se reduce a 15 minutos, aun con sujetos que no han usado el instrumento, la comodidad para el individuo de no sufrir un cansancio, etc.

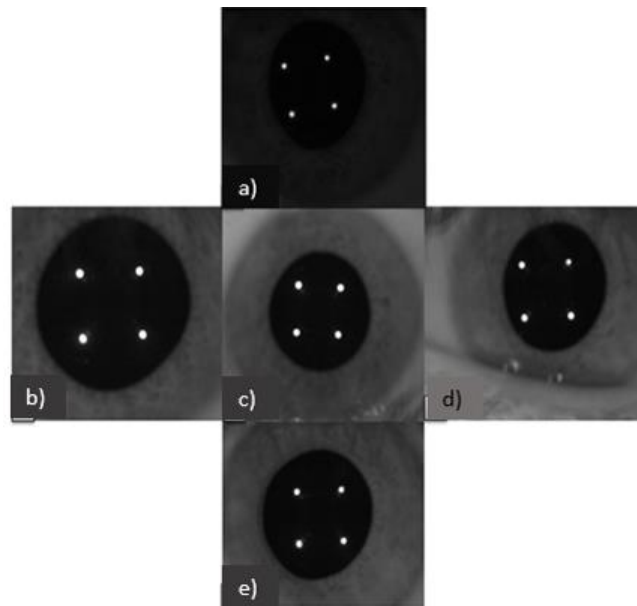


Figura 13 Imágenes para cinco sujetos, implementación arreglo de fuentes de corriente.

La figura 13a: fue captada a 1.92 mA. La figura 13b corresponde al sistema de iluminación alimentado a 2.23 mA. La figura. 13c, generada a 3.5 mA. La figura 13d tomada con una alimentación con 5.5 mA. La figura 13e generada con el sistema de captación de reflejos de Purkinje funcionando con 6.5 mA. Todos los sujetos de prueba son distintos, con edades que oscilan de los 22 años a los 30 años. Se respetan las normas ANSI para la máxima irradiación permitida a un individuo, de hecho, se trabaja con al menos 100 veces por debajo de la norma.

#### **4. Discusión**

La integración en este trabajo del Sistema de Formador de Imágenes de Purkinje ha beneficiado en varios aspectos tanto subjetivos como objetivos. Es

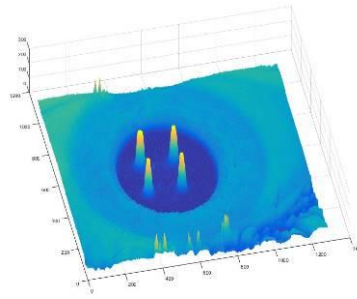
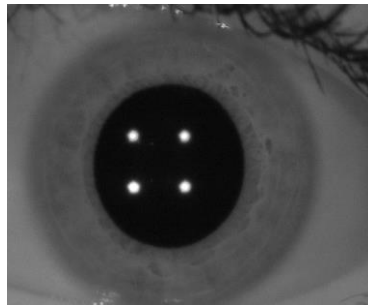
claro que la disminución del tiempo requerido para obtener imágenes bien definidas de las reflexiones intraoculares beneficia tanto al paciente como al usuario del equipo. El control de la emisión de luz a partir de la fuente de corriente, demostró que es posible obtener resultados más homogéneos, con menores reflexiones, aun en condiciones de maquillaje, facilitando el análisis de resultados. La modificación de la forma esférica de los LEDs, permite que los diodos emitan de forma casi puntual. La idea central de la electrónica empleada, fue considerar el umbral de polarización de los diodos LEDs (entre los 5 a los 40 mA). El umbral apropiado se obtuvo con la construcción y diseño de la fuente de corriente. Una muestra de los resultados tanto empíricos como los niveles de detección se presentan en la figura 14, donde se evaluaron sujetos en un rango de 22 a 33 años, hombres y mujeres.

Es recomendable hacer la adquisición de las Imágenes de Purkinje entre las 8:00 y 10:00 horas de la mañana, ya que, si los sujetos de prueba se someten a horas más avanzadas del día, es muy probable que las imágenes de interés no sean adecuadas, porque se estaría experimentando con sujetos con la vista cansada, en consecuencia, adelgazamiento de la lágrima y su actividad neuronal limitaría su capacidad de enfoque visual.

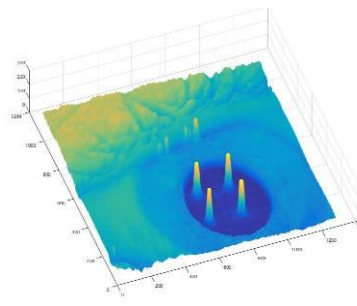
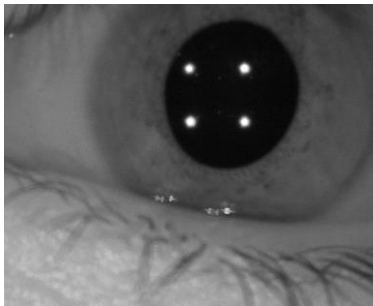
## **5. Conclusiones**

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema electrónico que permite controlar la iluminación infrarroja de una matriz de LEDs. Esto a partir de una fuente de corriente en cascada, cuyo sistema de habilitación fue construido con multiplexores analógicos y que tiene la versatilidad de poder ser controlado mediante un sistema automático o de forma manual. Con este sistema se tiene una iluminación adecuada para realizar diversos experimentos en el Sistema Generador de Imágenes de Purkinje. Los resultados se ven reflejados en la no saturación y la homogeneidad de las Imágenes de Purkinje (principalmente la PI y PIV), logrando una confiabilidad y eficiencia en nuestros experimentos (ver figura 14). Los alcances de este sistema pueden aplicarse en el diseño y construcción de los sistemas de iluminación de cámaras de fondo de ojo, donde se está

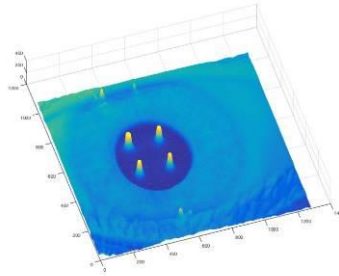
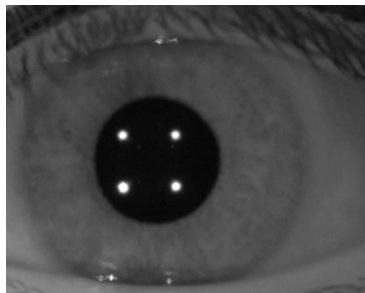
experimentando con diodos de 1 y 3 W, que tienen diferentes rangos en sus curvas características.



a) Sujeto masculino 33 años.



b) Sujeto masculino 23 años.



c) Sujeto femenino 26 años con rímel.

Figura 14 Imágenes de Purkinje (principalmente la PI y PIV).

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] G. A. Escamilla Ruiz. A. Gómez Vieyra. Construcción de un medidor de desalineación de superficies intraoculares basado en imágenes de Purkinje. VII Congreso Internacional de Ingeniería Física, México, pp. 391-392, 28 de noviembre del 2014.

- [2] D. A. Neamen, *Microelectronics Circuit Analysis and Design*, 4<sup>th</sup> edition, Mc Graw-Hill. Singapore. pp. 687-706, 2010.
- [3] I.U. Cosme-Cisneros. G. A. Escamilla-Ruiz. D. Flores-Montoya. G. Hernández-Gómez. A. Gómez-Vieyra. Instrument for recording Purkinje images. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series: 5th International Symposium on Experimental Mechanics and the 9th Symposium on Optics in Industry. Springer International Publishing AG, Agosto del 2016.
- [4] J. Tabernero. A. Benito. V. Nourrit. P. Artal. Instrument for measuring the misalignments of ocular surfaces. *Optics Express*. Vol 14. N. 22, pp. 10945-10956, 30 de octubre del 2006.
- [5] M. Kaschke, K. H. Donnerhacke, M. S. Rill, *Optical Devices in Ophthalmology and Optometry*. 1<sup>st</sup> edition, WILEY-VCH. Germany, pp. 3-14 y pp. 81-87, 2014.
- [6] M. Marquez. Interpretación y valor clínico de las imágenes de Purkinje-Sanson. *Archivos de la Sociedad Oftalmológica Hispano-Americana* Vol. 26. N. 308, pp. 421-435, agosto 1926.