



**Diseño e implementación de un controlador digital para led RGB de potencia, para la generación del iluminante estándar a con fines de calibración de instrumentos**

**Design and implementation of a digital controller for power RGB led, for the generation of standard illuminant a for instrument calibration purposes**

Samuel Mar-Barón<sup>1</sup>, Rubén Salas-Cabrera<sup>1</sup>, José-Federico Chong-Flores<sup>1</sup>, Mario Gómez-García<sup>1</sup>, Christian-Emanuel Vicencio-Cruz<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México – IT Ciudad Madero, Tamaulipas, México.

---

Recibido: 31-10-2022  
Aceptado: 08-12-2022

Autor correspondal: [revistadigital@itsta.edu.mx](mailto:revistadigital@itsta.edu.mx)

## **Resumen**

A través del presente se expone la implementación de un sistema de control digital microprocesado, capaz de conectarse a internet y registrar los datos en una nube en tiempo real. Este no solo podrá recrear el iluminante A con menores costos, sino que con ayuda de este se verificará los luxómetros que posteriormente serán usados por el CENAM para corroborar el correcto funcionamiento de los mismos. Así mismo, este implementará una HMI que ejecutará, además de lo ya antes mencionado, diversas pruebas lumínicas para su posterior análisis.

## **Palabras clave**

Luxómetro, iluminante, estímulos primarios, filamento de tungsteno, fotometría, longitud de onda, semiconductor, iluminancia.

## **Abstract**

Through this article it discusses the implementation of a digital control system with microcontroller, capable of connecting to the internet and record data in a real-time cloud. This will not only be able to recreate the illuminant A with lower costs, but with the help of this it will verify the lux meters which will be used later by the CENAM to corroborate the correct functioning of the same. Likewise, this will implement an HMI that will execute, in addition to the aforementioned criteria, various light tests for subsequent analysis.

## **Keywords**

Lux meter, illuminant, primary stimuli, tungsten filament, photometry, wavelength, semiconductor, illuminance.

## **Introducción**

Desde el año 1931 la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, por sus siglas en francés) ha establecido distintos iluminantes estándar que son utilizados en la evaluación de estímulos primarios de los objetos transmisores y reflectores de luz. En el caso del iluminante A, utilizado para este proyecto, este es capaz de proporcionar a través de una lámpara de filamento de tungsteno, una temperatura espectral de 2856 °K.

Gracias a que este iluminante puede ser producido por la mano del hombre, es relativamente sencillo recrear dicho iluminante a través de lámparas incandescentes, cuya intensidad de corriente eléctrica puede ser ajustada para llegar a dicha temperatura de color. Es por ello que es uno de los parámetros más utilizados en el ámbito de la fotometría por parte del CENAM, ya que se utiliza en investigaciones (estudios), pruebas, verificaciones, etc; esto es porque precisamente este iluminante conlleva a una longitud de onda con suficiente respuesta ante el ojo humano.

Por otro lado, para que se puedan llevar a cabo este tipo de mediciones, se necesita de una lámpara especialmente calibrada para generar estrictamente dicho iluminante. Sin embargo, debido a que solo puede proveer de una iluminación correcta por unas cuantas horas, su costo es miles de veces mayor a una lámpara de uso comercial o incluso industrial. Esto es pertinente debido a que los instrumentos encargados de medir la iluminación requieren de una correcta calibración para así proceder a medir la misma en los centros de trabajo mencionados en la NOM-025-STPS-2008, donde se deben cumplir con los estándares de iluminación dependiendo de la actividad realizada.

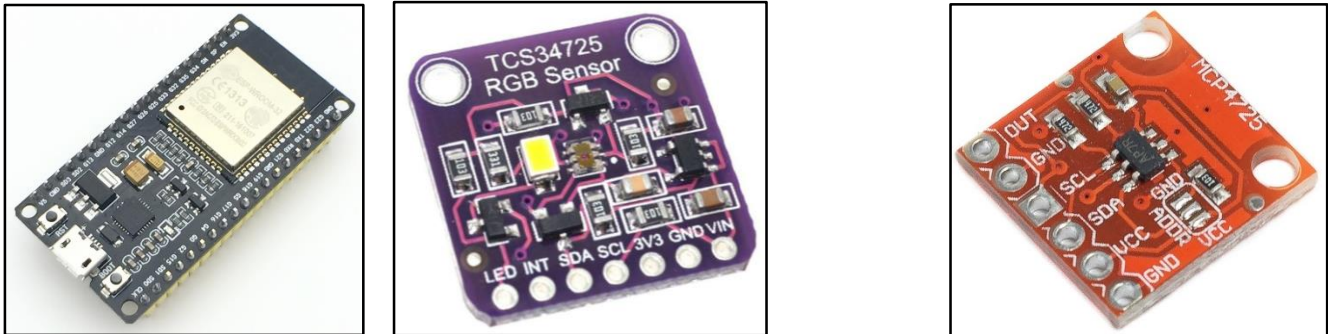
Es importante tomar en cuenta que debido a la facilidad de recrear el ya mencionado iluminante, se ha decidido implementar un LED RGB de potencia monocromático, en el cual se puede variar la corriente en cada una de sus tres líneas independientes correspondientes a cada color. No obstante, debido que a este semiconductor no está diseñado para el fin aquí mencionado, se espera que tenga un rango de iluminancia de 10 – 50,000 lx.

### ***Materiales y Métodos***

A continuación, se mencionan los dispositivos utilizados en dos fases distintas que sentaron las bases para el producto final ya mencionado. Cabe destacar que en cada una de las fases se llevó a cabo la importante implementación de un dispositivo fabricado con el objetivo de funcionar a través del protocolo IoT (Internet Of Things – Internet de las cosas, por sus siglas en inglés) y por ello tiene implementado un módulo Wi-Fi con el mismo, el cual como se comentó en el resumen abre las posibilidades de enlazarse con una nube digital para que registre los datos en todo momento que este detecte una nuevo.

- ❖ Microcontrolador ESP32: Este dispositivo funciona con el mismo *IDE* perteneciente a Arduino®, con lo cual lo convierte en un dispositivo altamente versátil. Esto es debido a que en este proyecto no solo se busca rebajar en costos un método que ya existe para calibrar a los medidores de luz ya conocidos, sino llevar dicho el mismo a otro nivel de tecnología para ahorrar tiempos de recolección de datos y combinarlo con las tecnologías actuales en el mundo.
- ❖ Sensor de color RGB TCS34725: Además de haber incluido un microcontrolador de nuevas tecnologías, también se usó un Módulo-Sensor RGB que es capaz de transformar el flujo luminoso incidente en datos de 16 bits a su salida con ayuda de una matriz de fotodiodos incluidos y un ADC por cada matriz de color (rojo, verde y azul) que en conjunto enviarán los datos a través del protocolo I<sup>2</sup>C. Cabe destacar que este tipo de protocolos es altamente utilizado ya que debido a que los actuadores o sensores pueden tener 128 direcciones diferentes, estos mismos solo necesitan conectarse en paralelo uno con otro a través de dos cables (CLOCK y DATA), con lo cual se ahorran no solo la cantidad de conductores, sino también la programación.
- ❖ DAC MCP4725 (Convertidor digital-análogo): Para la fase digital se contó con un dispositivo de igual forma en tipo módulo, que se encuentra listo y configurado para convertir datos

digitales en valores análogos. Precisamente este es el método inverso en contraste con el ADC, el cual con ayuda de valores análogos como lo es una diferencia de potencial, convierte este en un dato de distintos bits dependiendo de la resolución del mismo. Así que el DAC entonces basa su funcionamiento a través de una instrucción con el valor análogo o voltaje requerido a la salida generado por el microcontrolador y posteriormente se genera dicho voltaje en el pin determinado. Este mismo está sujeto a la resolución que tenga el mismo, ya que, a más resolución, mejor precisión se obtiene a la salida.



**Imagen 1.** Dispositivos base para la generación del proyecto presente. A la derecha el ESP32 modelo NODE-MCU32S. Al centro el módulo sensor RGB TCS34725. Y a la izquierda el DAC MCP4725.

### Fase Analógica

Para poder controlar el funcionamiento de todo el circuito de control para el LED RGB de potencia se llevó a cabo la construcción de una fuente de corriente que fuera capaz de controlar la misma con ayuda de *amplificadores operacionales*, los cuales estarán configurados como seguidores de voltaje o *buffers*; y para ahorrar circuitería excesiva se optó por circuitos integrados que tienen dentro de sí hasta cuatro A.O's. Por ello mismo el circuito construido posee dos etapas dentro sí.

Una de ellas es la llamada etapa de reducción o supresión de ruido y la segunda es la de control de potencia donde con ayuda de transistores del mismo tipo se controlará cuanta corriente es llevada a cada uno de los colores del dispositivo. Esto a mayor detalle es:

- Etapa de supresión de ruido: Ya que el ruido es uno de los factores que afectan en extremo a un circuito, ya sea la misma señal parasita o en su lugar por una mala conexión de "falsos" o pequeños cortos, se implementó un circuito integrado dedicado a eliminar este tipo de detalles, llamado *Amplificador Operacional de Instrumentación (A.O.I)*. El cual con ayuda de uno de sus pines es capaz de proporcionar voltaje de salida sin la presencia de ruido con lo cual aseguramos que el voltaje a ingresar en el siguiente A.O sea lo más "limpio" posible.  
Como dato interesante este C.I no necesita de una configuración especial, ya que la ganancia que lleva consigo por defecto es de 1.
- Etapa de potencia: Esta se encuentra configurada de manera similar al A.O anterior, con la pequeña diferencia de que este si necesita un pequeño arreglo para la

configuración de seguidor, y posteriormente conecta su salida a un transistor NPN de potencia que se encuentra con una resistencia de alta potencia del lado del emisor. La funcionalidad de este se basa en una simple fórmula con la cual obtendremos las corrientes respectivas:

$$I_{LEDI} = \frac{V_I}{3.3\Omega}$$

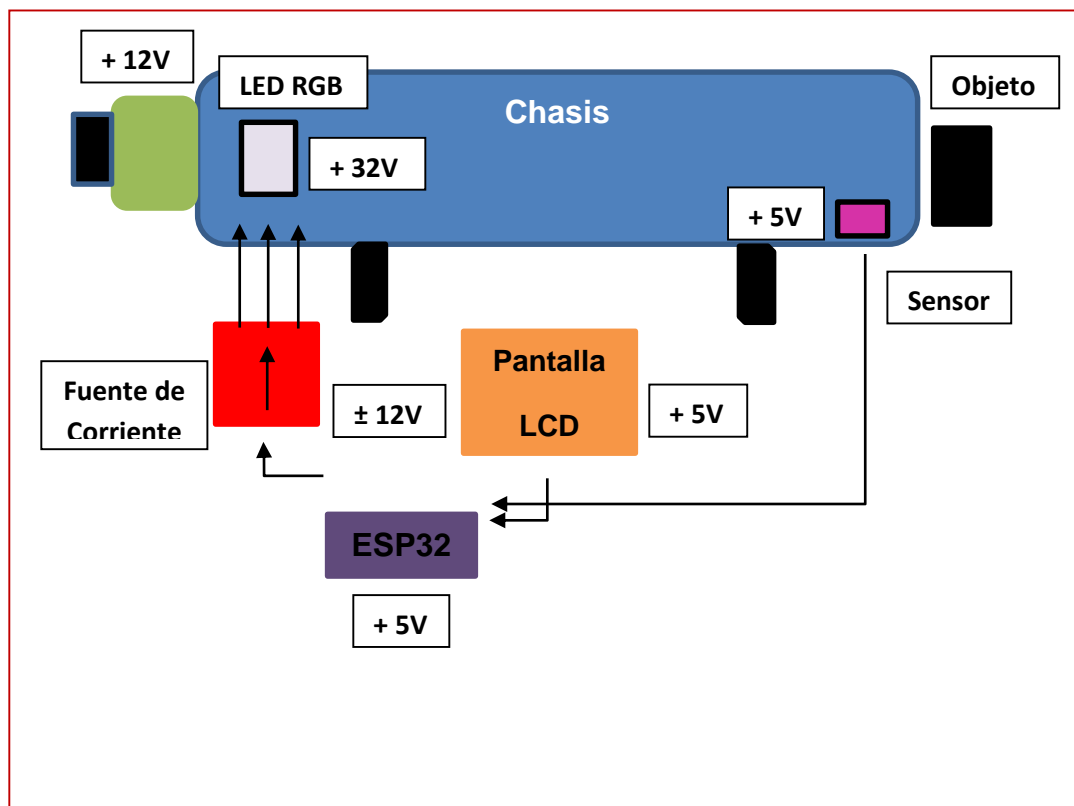
Donde:

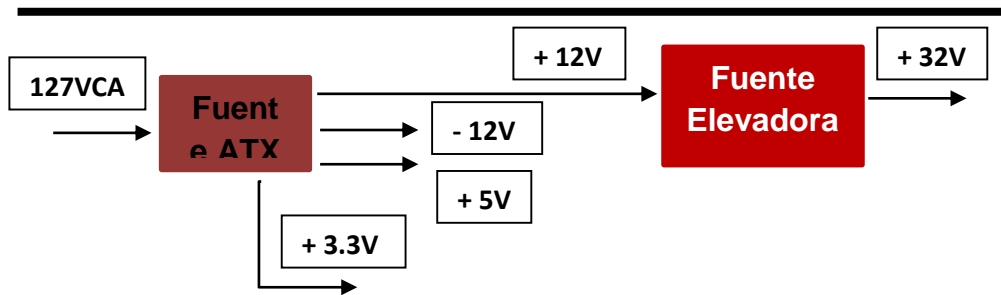
$I_{LEDI}$  = Corriente individual para cada línea de LED

$V_I$  = Voltaje de entrada (Potenciómetro o DAC)

Por supuesto que esta corriente estará totalmente sujeta a lo que se varíe en la etapa de supresión. Así mismo, este LED se encuentra alimentado a una fuente elevadora de +32V con lo cual el ánodo común se conecta directo al potencial positivo de dicha fuente y cada uno de los cátodos es conectado a los colectores de los transistores. Con lo cual cada vez que se varíe el voltaje de entrada en los A.O.I y debido a que el siguiente A.O es seguidor, habrá el mismo voltaje presente de la entrada No inversora en la Inversora del último, y posteriormente esta diferencia de potencial existirá en la resistencia de potencia y finalmente en el colector del transistor. Por ello es de vital importancia eliminar el mayor ruido posible en el A.O cuádruple, ya que se pueden sumar corrientes parásitas al resultado.

Además de estos dispositivos analógicos, también se implementaron los ya mencionados digitales como el sensor RGB que en todo momento se tomó en cuenta mientras se variaba el voltaje de entrada. Dichos datos muestreados se desplegaron con ayuda de una pantalla LCD que para la fase de este proyecto se había contemplado. Estos resultados son mayormente apreciados en el apartado de *resultados y discusión*. Así mismo, en breve se muestra un diagrama a bloques de las partes más importantes de la fase análoga.





**Figura 1.** Diagrama a bloques utilizado para la fase analógica.

### Detalles

Como se puede apreciar en la *Figura 1*, la forma de alimentación marcada es de una fuente ATX que es capaz de proporcionar distintos voltajes, que servirán perfectamente para alimentar a los A.O, transistores, LED RGB y finalmente el control de información por parte del ESP32 y la pantalla LCD; la cual fue cambiada por una completamente distinta en la etapa digital. Finalmente, el empaquetado de todo esto solo involucró la preparación de la cámara oscura, y el circuito colocado sobre una base de triplay para contener las protoboard respectivas. Este producto se ve representado en el apartado a continuación de *resultados y discusión*.

### Fase Digital

Al tener en cuenta la parte analógica, se elaboró una mejora en todo el circuito, donde se omite por completo los potenciómetros para variar el voltaje manualmente, y se pasa directo a la implementación de tres distintos DAC, los cuales funcionarán digitalmente a través del microcontrolador ESP32. Así mismo, cambió de una pantalla LCD de 2x16 a una pantalla tipo touch NEXTION ® con una resolución de 800 x 480 pixeles multicolor que puede ser programada a través del software *Nextion Editor* con el cual es posible desarrollar la lógica de programación a través de gadgets; para después pasar a la comunicación de los datos a través del protocolo UART, que utiliza los cables RX y TX que se enlazan de forma cruzada con el ESP32 y hacen posible el funcionamiento de una HMI.

En el caso del chasis que ensambla a toda la circuitería y los dispositivos de control, se cambió de una cámara oscura expuesta a la luz, a un gabinete que recorta las medidas pasadas de la misma a unas más pequeñas. De hecho, la circuitería esta soldada a una PCB donde el circuito ha sido totalmente optimizado.

## **Resultados y discusión**

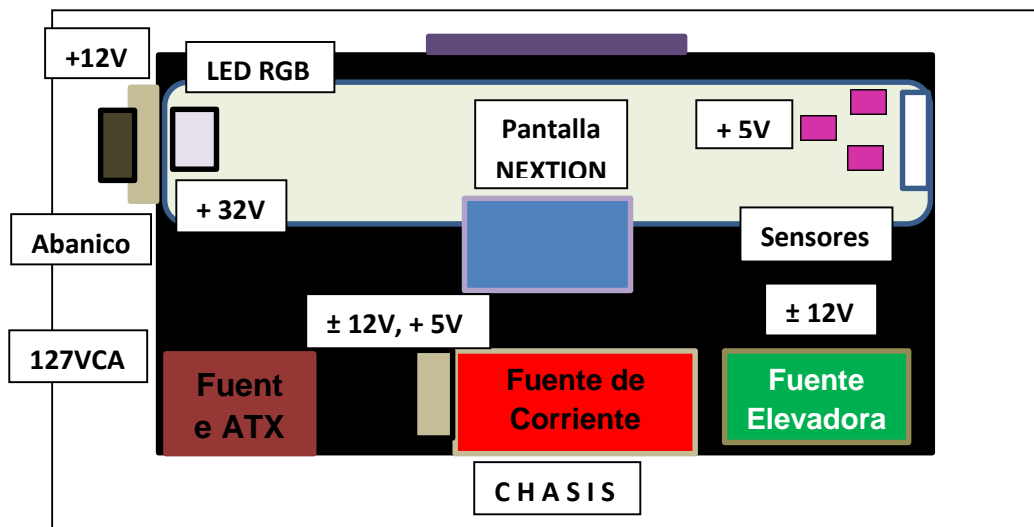
Se implementaron nuevos variadores de voltaje de ser analógicos a digitales, sino que también se diseñó un control de activación para los distintos DAC, ya que, si bien es cierto que transmiten información con solo dos cables del protocolo I<sup>2</sup>C, estos solo son capaces de cambiar entre dos direcciones de acuerdo al modelo provisto. A esto mismo se le suma el hecho de que para obtener mayor precisión al momento de medir, se añadieron 2 sensores más que al momento de medir proporcionarán mayor eficacia al momento de la entrega de datos. Sin embargo, existe un principio de incertidumbre acerca de las direcciones hexadecimales de cada uno de los dispositivos, ya que, para el caso de los sensores, estos poseen la misma en cada uno de los tres. Por esto mismo se implementó un circuito integrado que sea capaz de activar y desactivar cada uno de los mismos cuando se requiera por parte del programa.

Por otro lado, para controlar la fuente de corriente, se encargarán en conjunto el ESP32 y la pantalla Nextion. Esta última, con ayuda de algunos gadgets como lo son textos y botones, manipulará los valores digitales para variar el voltaje de salida de los DAC y también a su vez activar y desactivar a los sensores. Claro que todo esto está sujeto al cerebro de la operación, el cual es el ESP32, ya que la pantalla touch no utiliza el mismo protocolo de comunicación que los sensores y DAC's; y así el microcontrolador se encarga de pasar los datos de un dispositivo a otro, en otras palabras, lleva la "armonía" de la operación en general.

Para cerrar con todos los dispositivos presentes, en la fuente de corriente se cuenta con un ventilador de +12V que se encarga de enfriar al disipador del LED RGB de potencia ya que, si bien es cierto que el semiconductor se activa de manera discreta, también se realizan pruebas continuas, es decir, no importa el tiempo de las pruebas, porque en cualquier tiempo se necesita de un continuo enfriamiento y así evitar sobrecalentamiento que provocaría daños irreversibles en el LED RGB o el circuito en general.

### Detalles

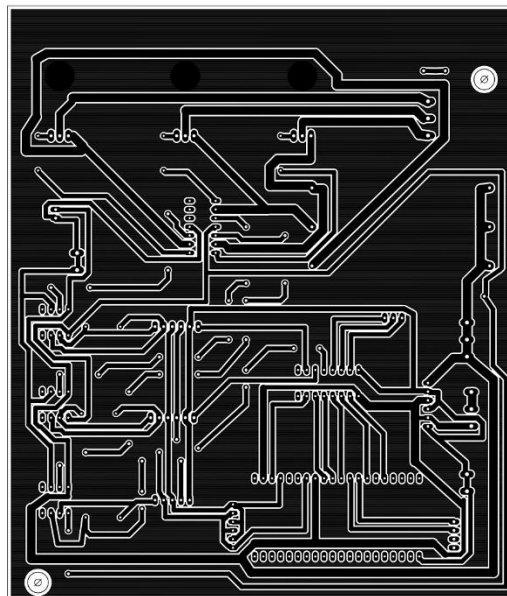
Ya que el diseño tomó un giro de 180° con la implementación de otros dispositivos de interfaces como lo fue la pantalla touch, se construyó un gabinete que pudiera guardar la circuitería en la PCB, la fuente elevadora (Boost) y por supuesto la ya mencionada pantalla. Su diagrama a bloques es el siguiente:



**Figura 2.** Diagrama a bloques de la fase digital. Primer prototipo final.

Como se comentó al comienzo de la fase digital, se consideró el diseño de una PCB a través de un software de diseño electrónico llamado *Eagle®*, y que posteriormente fue mandada a realizarse el proceso de corte, impresión de la serigrafía, raspado de pistas, etc; todo esto con ayuda de una empresa extranjera (China) dedicada a la fabricación de las mismas, así como de otro tipo de trabajos como lo puede ser impresión por inyección de plástico.

Para el caso del software de diseño de Eagle se extrajo el archivo de las pistas resultantes a través del mismo, dando como medidas del primer prototipo de 15 x 17.4 cm. Cabe destacar que estas medidas son convertidas porque el software toma como referencia la unidad de milímetros (mm) y realmente son 150 x 174 mm. Su forma final es la siguiente:



**Figura 3.** Placa de cobre con el diseño propuesto en la fase digital.



La empresa mencionada en el párrafo anterior es llamada JLCPCB ® y trabaja, para el caso de la fabricación de los circuitos eléctricos, a través de archivos *Gerber* los cuales contienen toda la información vital del circuito como lo es el nombre de los componentes, medidas de los *pats*, perforaciones e incluso el llamado *hatching* (*capa de tierra*). Esta última proporciona apoyo contra el ruido que pueda entrar en la placa. Para apreciar el armado de las placas véase el siguiente proceso que se siguen en las instalaciones, donde se ha conservado a las marcas de agua colocadas por la misma ya que al ser una empresa de terceros, se debe guardar los derechos de autor pertenecientes a la misma.

Apartado Especial: Proceso de construcción de la PCB dentro de las instalaciones de JLCPCB

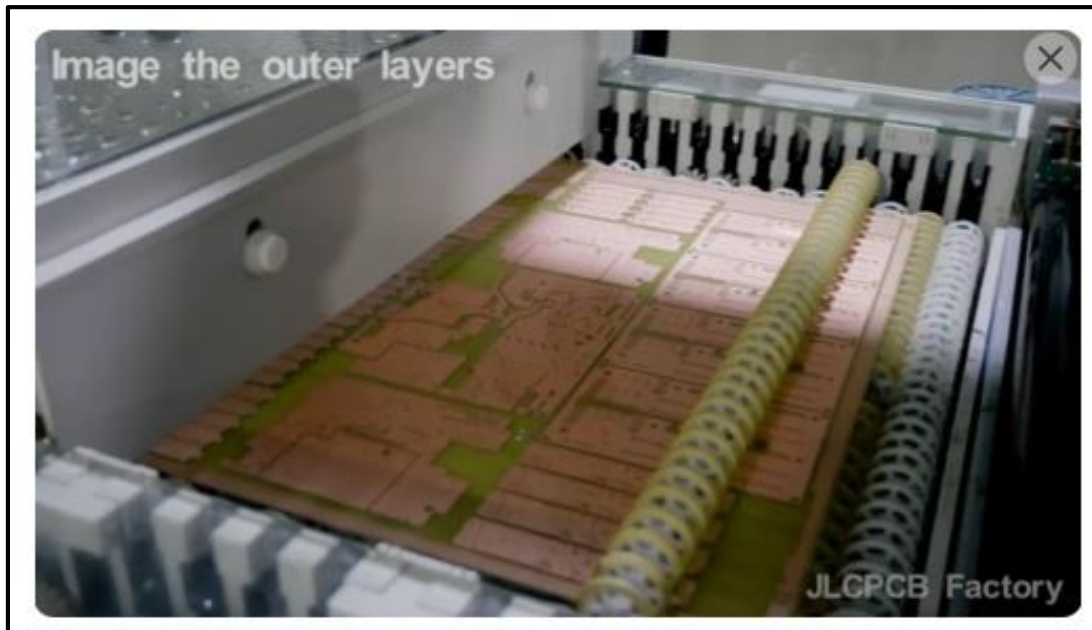
**1. Perforando el PCB**



**2. Deposición de cobre**



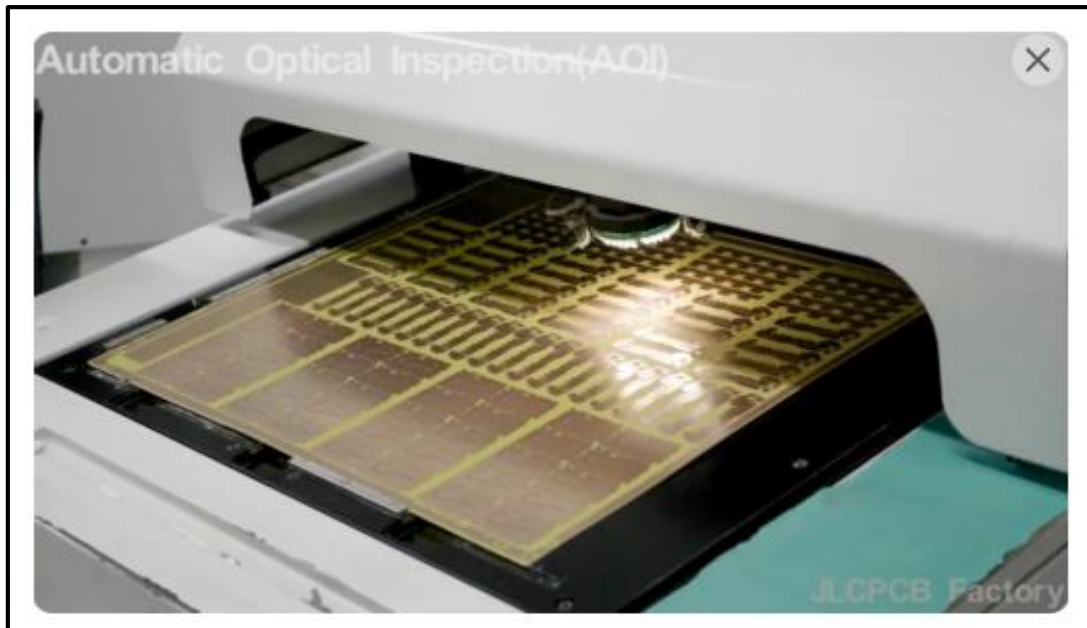
### 3. Capas exteriores



### 4. Revestimiento



### 5. Inspección óptica automática



### 6. Máscara de soldadura





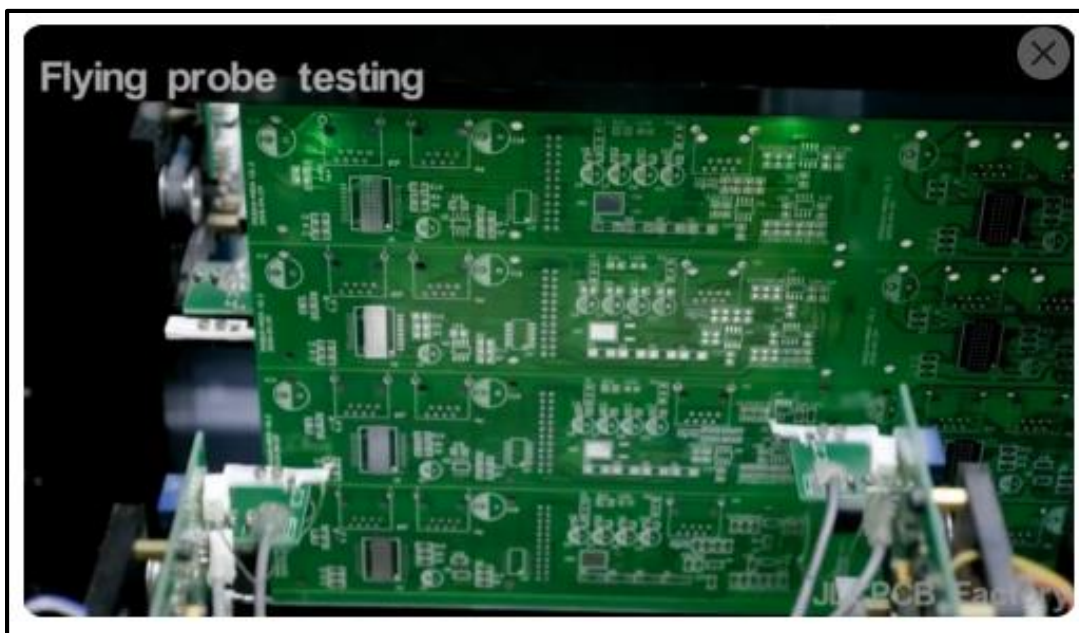
## 7. Serigrafía



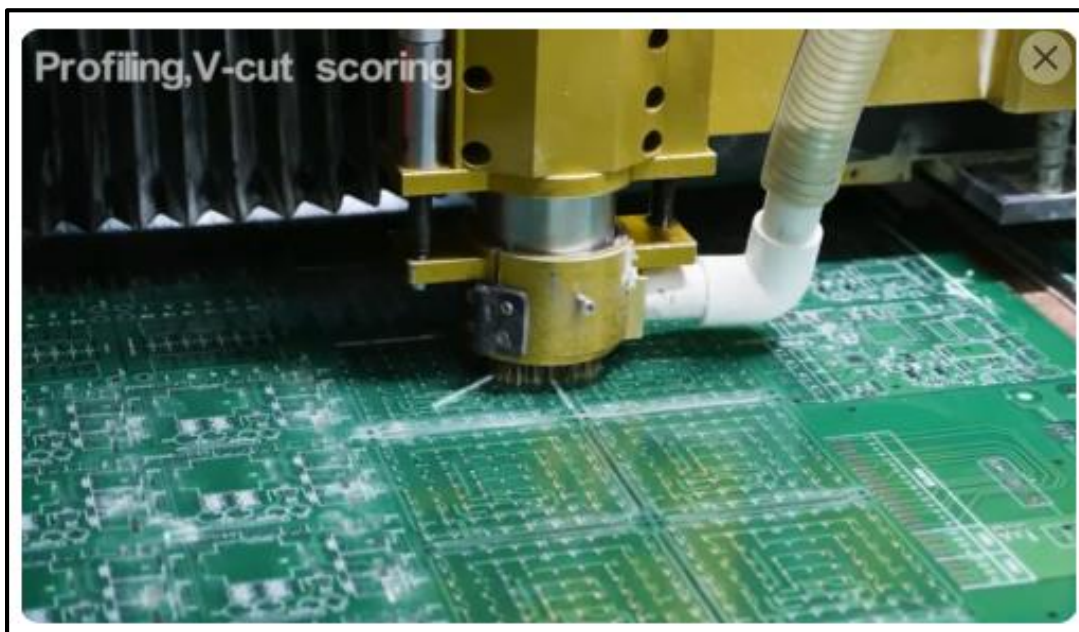
## 8. Nivelación de soldadura por aire caliente



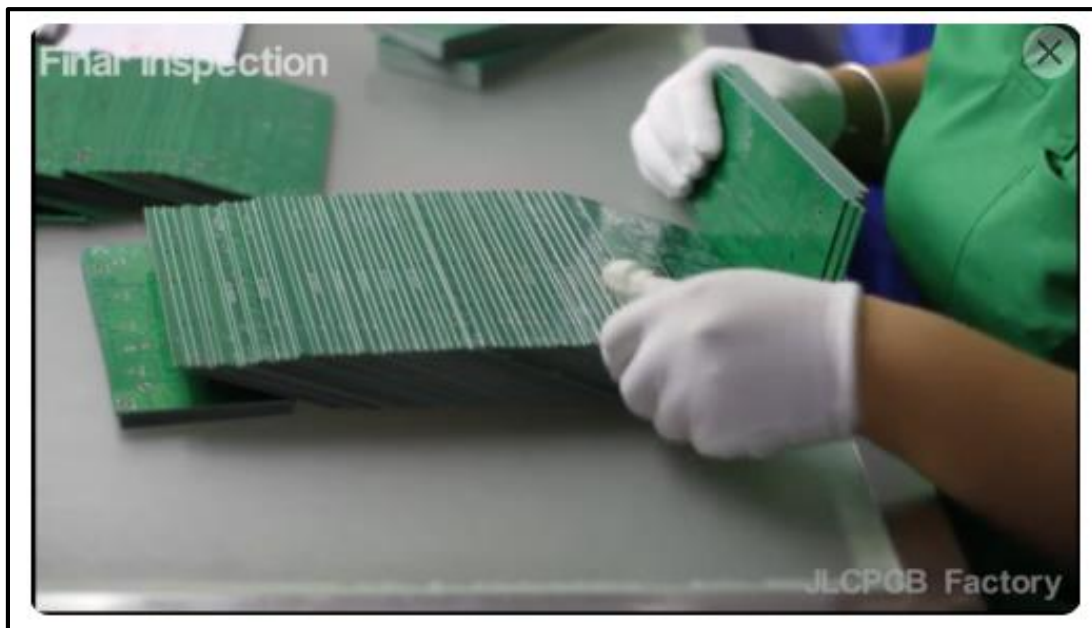
### 9. Prueba eléctrica



### 10. Perfilando o puntuación



### 11. Inspección final



### 12. Empaquetado



Como se puede ver, la empresa labora todo un largo proceso de pasos donde cada una de las estaciones se encuentra altamente capacitada para entregar un producto impecable. Este se puede ver en el apartado de *conclusiones*.

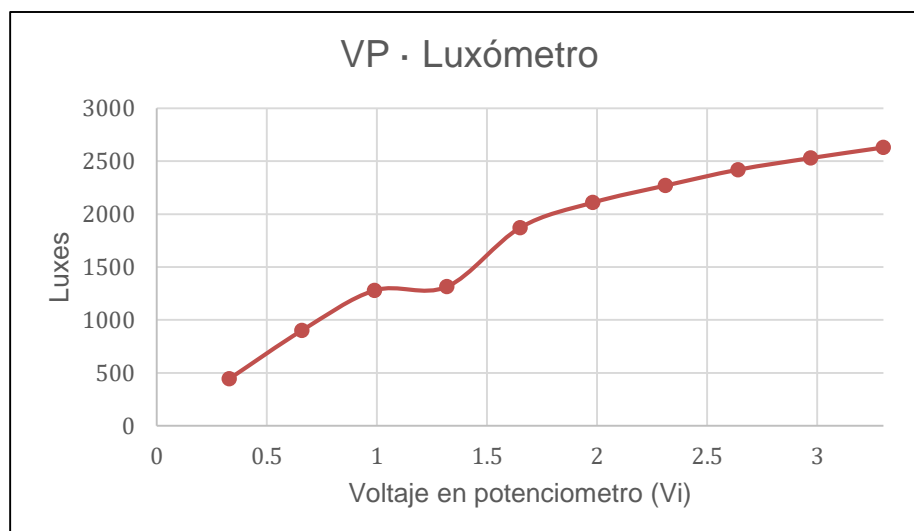
### Pertencientes a la fase analógica o manual

- Es imperativo el tener el mayor cuidado o precisión con los potenciómetros encargados de variar el voltaje de entrada al A.O.I ya que, al no ser de caña estriada, sino verticales con incisión media, se puede llegar a generar cortos inesperados y dañar la fuente de alimentación de todo el circuito.
- Al obtener medidas más fiables se extrajo las siguientes anotaciones, enfatizando las conexiones mecánicas en la protoboard:

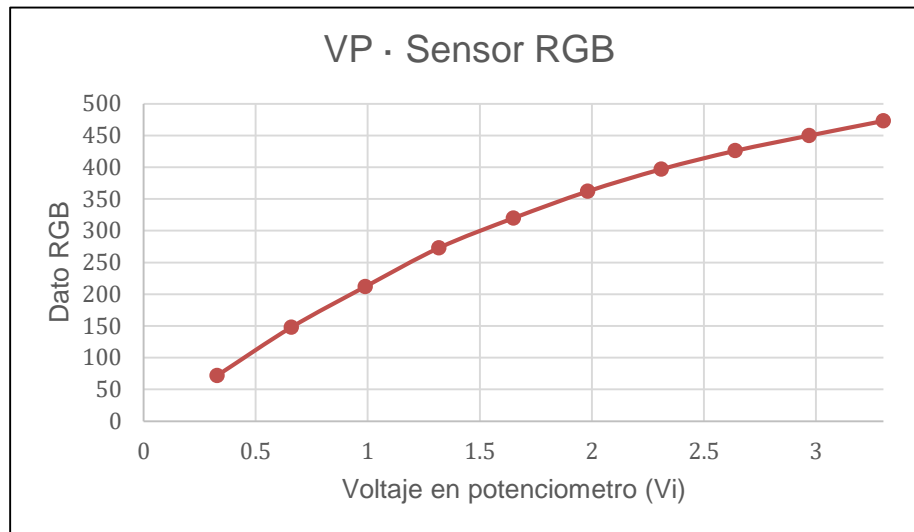
#### Color Rojo

Porcentaje (%)	Voltaje Potenciómetro (V <sub>P</sub> )	Luxómetro	Sensor RGB
10	0.329 V	444 Lx	72
20	0.660 V	902 Lx	148
30	0.990 V	1280 Lx	212
40	1.318 V	1615 Lx	273
50	1.651 V	1873 Lx	320
60	1.981 V	2110 Lx	362
70	2.31 V	2270 Lx	397
80	2.64 V	2420 Lx	426
90	2.97 V	2530 Lx	450
100	3.30 V	2630 Lx	473

**Tabla 1.** Distribución de los datos obtenidos con ayuda del luxómetro y el sensor RGB a la vez.



**Gráfica 1.** Representación de la respuesta del voltaje contra intensidad luminosa medida con el luxómetro.



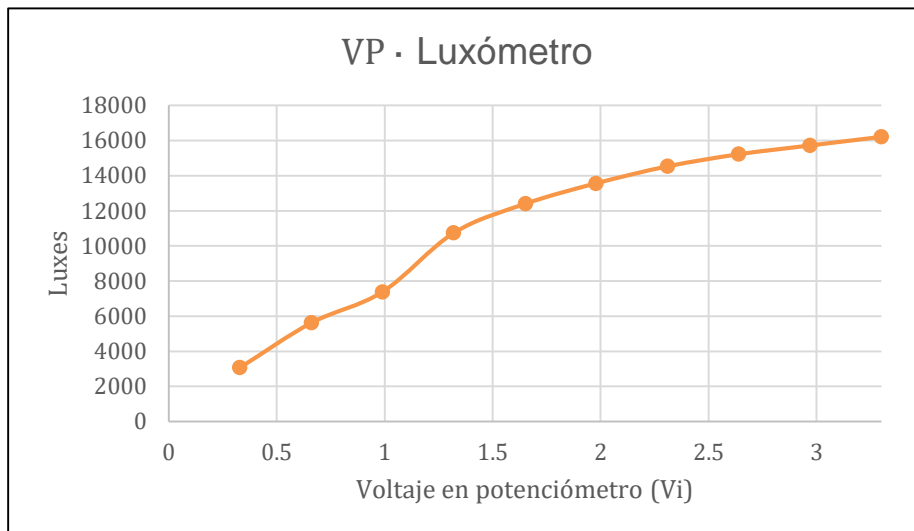
**Gráfica 2.** Representación de la respuesta del voltaje contra color RGB por parte del sensor TCS34725.

### Color Verde

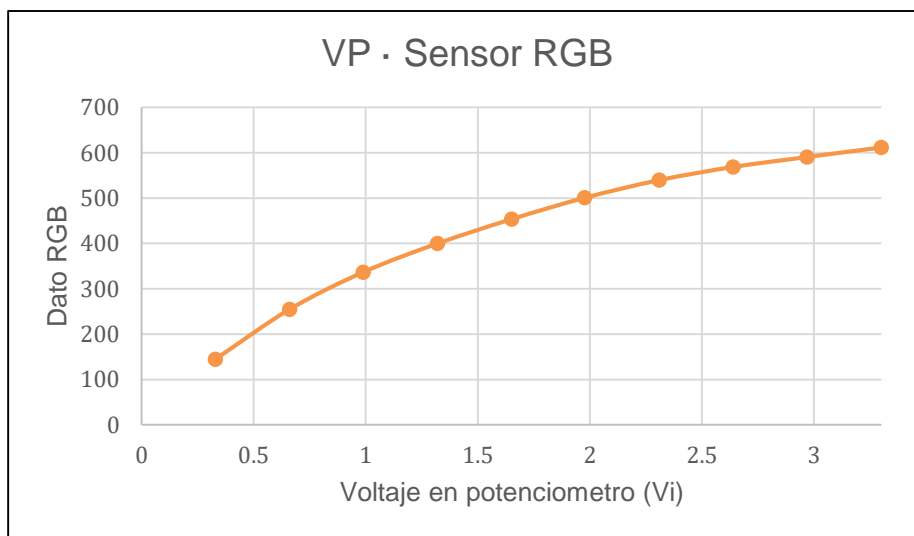
Porcentaje (%)	Voltaje Potenciómetro (V <sub>P</sub> )	Luxómetro	Sensor RGB
10	0.330 V	3080 Lx	145
20	0.661 V	5630 Lx	255
30	0.990 V	7390 Lx	337
40	1.320 V	10750 Lx	400
50	1.652 V	12410 Lx	454
60	1.978 V	13570 Lx	501
70	2.31 V	14540 Lx	540
80	2.64 V	15230 Lx	569
90	2.97 V	15730 Lx	591
100	3.30 V	16220 Lx	612

**Tabla 2.** Distribución de los datos obtenidos con ayuda del luxómetro y el sensor RGB a la vez.





**Gráfica 3.** Representación de la respuesta del voltaje contra intensidad luminosa medida con el luxómetro.



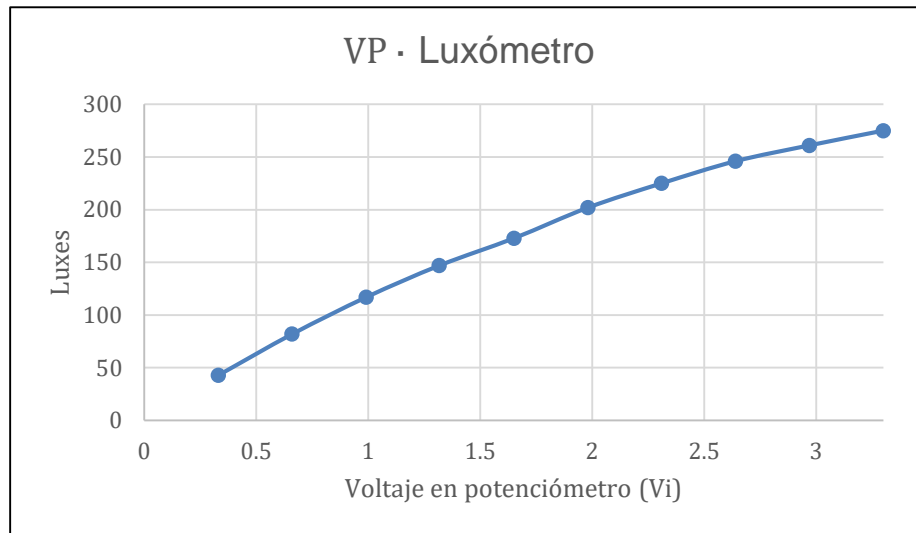
**Gráfica 4.** Representación de la respuesta del voltaje contra color RGB por parte del sensor TCS34725.

**Color Azul**

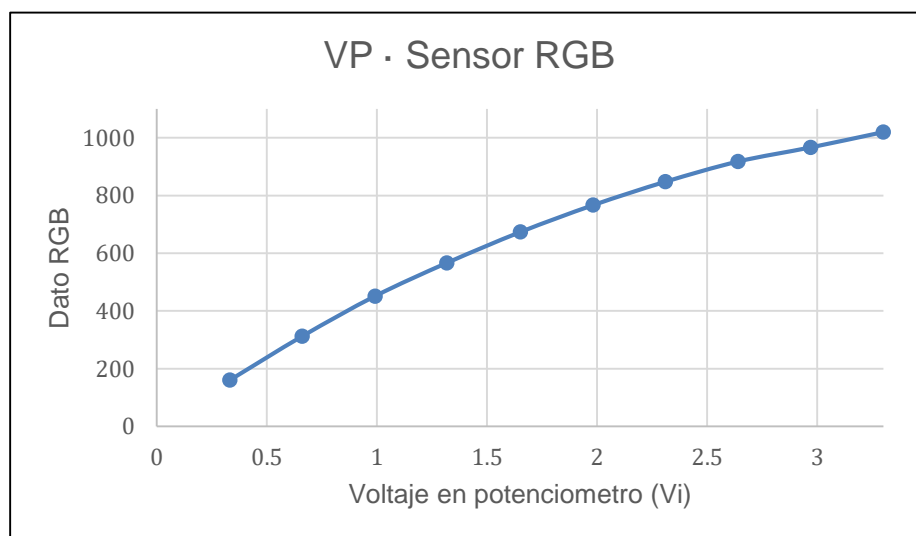
Porcentaje (%)	Voltaje Potenciómetro (V <sub>P</sub> )	Luxómetro	Sensor RGB
10	0.332 V	43 Lx	161
20	0.661 V	82 Lx	313
30	0.992 V	117 Lx	452

40	1.318 V	147 Lx	567
50	1.652 V	173 Lx	674
60	1.982 V	202 Lx	767
70	2.31 V	225 Lx	848
80	2.64 V	246 Lx	918
90	2.97 V	261 Lx	967
100	3.30 V	275 Lx	1020

**Tabla 3.** Distribución de los datos obtenidos con ayuda del luxómetro y el sensor RGB a la vez.

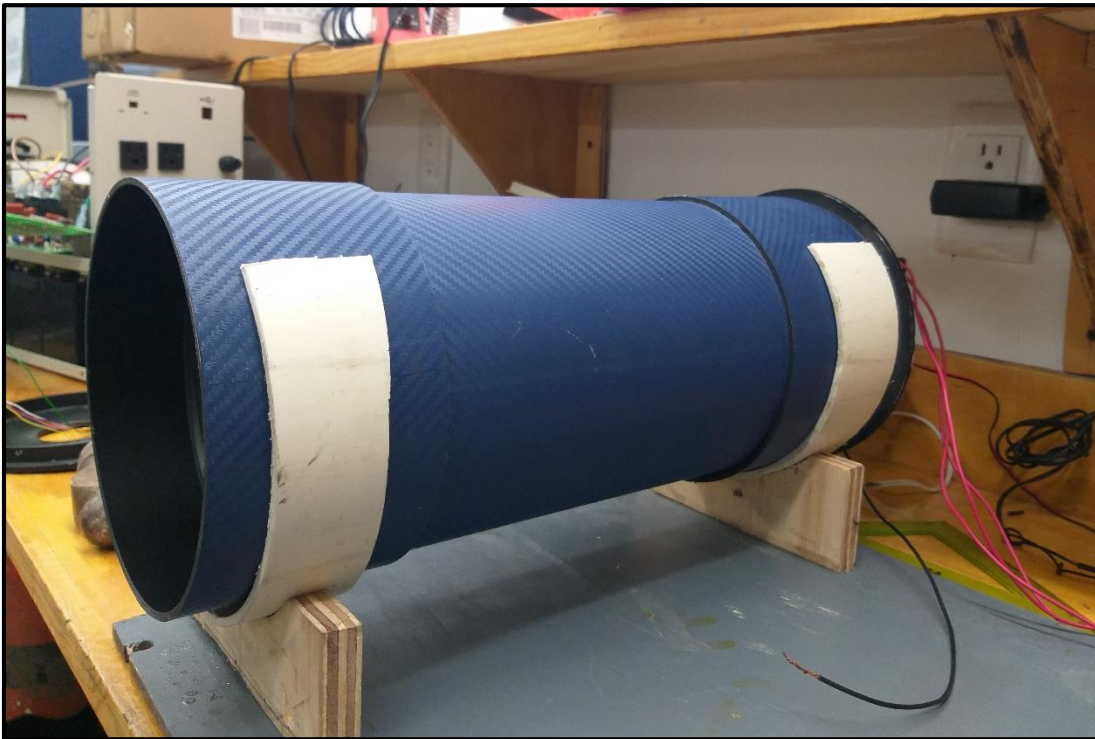


**Gráfica 5.** Representación de la respuesta del voltaje contra intensidad luminosa medida con el luxómetro.



**Gráfica 6.** Representación de la respuesta del voltaje contra color RGB por parte del sensor TCS34725.

- La cámara obscura resulto con medidas aproximadas de 50 cm de largo con un diámetro de 15 cm aproximadamente, así como una base de 40 cm que sostiene a la misma y contiene espacio para las protoboards respectivas. Su construcción se aprecia en la siguiente imagen:



**Imagen 2.** Cámara provisional de obscuridad implementada para la fase análoga.

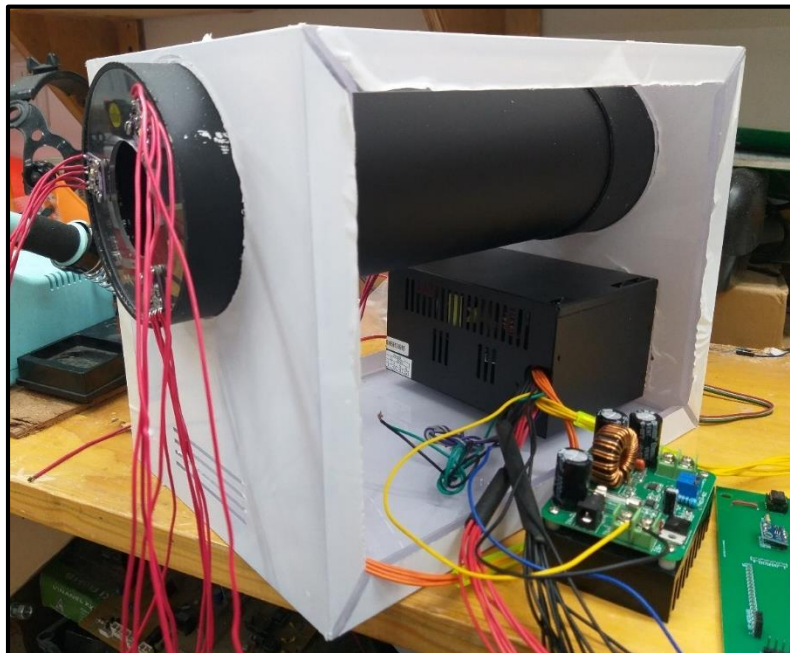
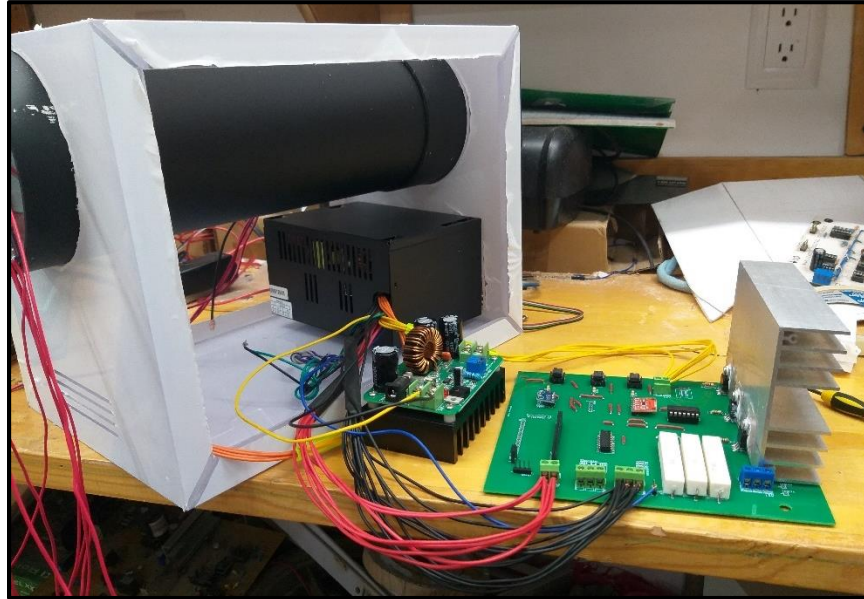
Pertencientes a la fase digital

Debido a que este es un prototipo experimental, se obtuvieron por delante los datos que podría dar el DAC y así generar las posteriores gráficas con todo lo ya antes mencionado. Cabe destacar que para estos resultados se tomó en cuenta una resistencia de carga de  $1K\Omega$ :

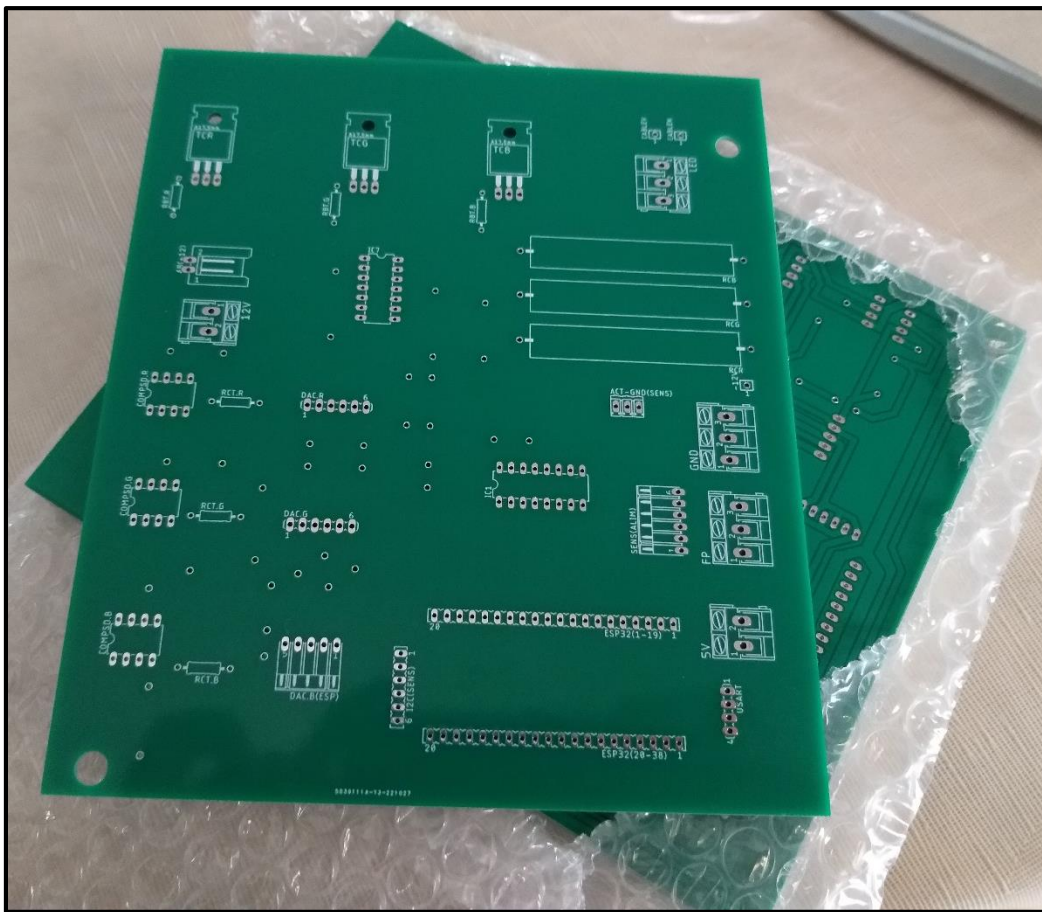
Porcentaje (%)	Valor esperado (V)	$V_{OUT DAC}$ (V)
10	0.33	0.327
20	0.66	0.660
30	0.99	0.990
40	1.32	1.322
50	1.65	1.651
60	1.98	1.982
70	2.31	2.31
80	2.64	2.64
90	2.97	2.97
100	3.3	3.31

**Tabla 4.** Comparación de los valore matemáticos contra los valores de salida del DAC MCP4725.

Para el caso del chasis, como ya se había comentado en párrafos anteriores de cambio de una presentación sencilla, a un prototipo que cambiara no solo el aspecto físico del mismo, sino que demostrara el cambio en toda la implementación presente.



**Imagen 3.** Representación física del prototipo final visto desde dos ángulos distintos.



*Imagen 4. PCB final entregada por JLCPCB en físico.*

## **Conclusiones**

Gracias a este proyecto no solo se está comprobando que con ayuda de pocos componentes electrónicos y aplicando la lógica de programación con su debido ajuste se logra conseguir proyectos que innovan a los que ya existen.

Tal es el caso del presente, en donde el presupuesto de construcción de este calibrador de luxómetros es cientos de veces más económico que la utilización de una lámpara que emana representa al iluminante estándar A.

Así como también se mejoró por completo la manera en que se pudiera calibrar a los mismos, ya que se implementó una HMI capaz de recrear en conjunto con la fuente de corriente el iluminante A y las ya mencionadas pruebas lumínicas.



Por supuesto que este no solo se detendrá en este producto. Ya que el prototipo mejorará a una PCB de doble cara con dispositivos SMD que reduzcan el tamaño del calibrador para volverlo mucho más portátil de lo que ya se tiene.

### ***Referencia bibliográfica***

- ❖ NOM-025-STPS-2008
- ❖ Datasheet: TCS 34725 COLOR LIGHT-TO-DIGITAL CONVERTER with IR FILTER
- ❖ Datasheet: 12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6
- ❖ Datasheet: Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620
- ❖ Datasheet: Toshiba Bipolar Digital Integrated Circuit, Silicon Monolithic ULN2003APG
- ❖ Fundamentos de colorimetría
- ❖ Ley de Bougher-Lambert-Beer
- ❖ CNM-PNF-4 Patrón Nacional de Intensidad Luminosa
- ❖ Aplicaciones de iluminación con LEDs. Fillipo Rugeles, Victor Hugo; Cano Garzón, Hugo Baldomiro; Chávez Osorio, José Andrés.
- ❖ Visión, Luz y Color
- ❖ Publicación Técnica: Calibración de Luxómetros y su uso en la medición de niveles de iluminación. Eric Rosas, Rocío Cardoso.
- ❖ Tesis: Medición Práctica del Color. Ing. Juan Manuel Bujdud Pérez
- ❖ Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)