



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Desarrollo de un sistema de iluminación inteligente para acuarios plantados de agua dulce

Sebastian Ramírez Montoya.

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Asesor

Ricardo Andrés Velásquez Vélez, Ingeniero Electrónico

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Medellín

2022

Cita	Ramirez Montoya [1]
Referencia	[1] S. Ramirez Montoya, "Desarrollo de un sistema de iluminación inteligente para acuarios plantados de agua dulce", Trabajo de grado, Ingeniería Electronica, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Augusto Enrique Salazar Jiménez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Índice

1. Abstract	7
2. Resumen	8
3. Introducción	8
4. Contribución de este trabajo	9
5. Estado del arte	9
6. Objetivos	10
6.1. Objetivo general	10
6.2. Objetivos específicos	10
7. Marco teórico	10
8. Metodología	18
8.1. Elección de los LEDs	18
8.1.1. Eficiencia del LED	18
8.1.2. Mezcla de colores uniforme (efecto disco)	20
8.1.3. Completar el espectro	22
8.1.4. Refrigeración LED	25
8.2. Hardware del dispositivo	29
8.2.1. Tarjeta de potencia	32
8.2.2. Tarjeta de control	34
8.2.3. Tarjeta de LEDs	37
8.3. Software	37
8.3.1. FrontEnd	40
8.3.2. BackEnd	43
8.3.3. Microcontrolador Raspberry Pi Pico	45
8.4. Arquitectura	50
9. Experimentos y resultados	51

10. Conclusiones	58
11. Agradecimientos	58
A. Vistas de la aplicación	59
B. Referencias	69

Índice de figuras

1.	Encapsulado de los LEDs XP-E2 [11].	15
2.	Geometría de la sección transversal del MCPCB [12]	16
3.	Estructura SinkPad MCPCB [13]	17
4.	Espectro lumínico de absorción de pigmentos para las plantas [4]	23
5.	Espectro de radiación para los LED Cree de referencia XP-E2 [15].	24
6.	Distribución de LEDs escogida.	26
7.	Gestión térmica de los LEDs seleccionados [16].	27
8.	Modelo eléctrico del conjunto LEDs - disipador	27
9.	Esquemático y tarjeta PCB del circuito de potencia.	35
10.	Esquemático y tarjeta PCB del circuito de control.	38
11.	Esquemático y tarjeta PCB del circuito de LEDs.	39
12.	Encarpetado de la aplicación web y móvil (componentes, interfaces, vistas y servicios).	41
13.	Diagrama UML de paquetes simplificado, con la arquitectura de paquetes de la aplicación.	42
14.	Diagrama de flujo FrontEnd	44
15.	Diagrama de flujo BackEnd	45
16.	Detalle de las funciones de cada microservicio	46
17.	Clases implementadas para cubrir las funcionalidades en el microcontrolador	47
18.	Diagrama de flujo microcontrolador	49
19.	Arquitectura desarrollada en AWS	51
20.	Tarjetas del sistema diseñado	53
21.	Lámpara terminada	54
22.	Canales configurables de la lámpara.	55
23.	Lámpara con todos los canales activos	56
24.	Estándar de toma de mediciones	57
25.	Vista de login.	59
26.	Vista para recuperar la contraseña.	60
27.	Vista de registro de un nuevo usuario.	61
28.	Vista dashboard principal.	62
29.	Vista de información general de la lámpara.	63

30.	Vista de configuración avanzada de la lámpara.	64
31.	Vista de configuración manual de la lámpara.	65
32.	Vista de configuración de efectos que tendrá la lámpara.	66
33.	Vista para ver y editar la información de la cuenta del usuario.	67
34.	Vista para cambiar la contraseña cuando el usuario se encuentra autenticado. . . .	68

Índice de tablas

I.	Potencia radiométrica de los emisores Luxeon Rebel ES Royal Blue a 350 y 700 mA, según bins de luminosidad [10].	14
II.	Estructura bin de longitud de onda máxima para emisores Luxeon Rebel Far red [10].	17
III.	Características principales de los COB Cree CXA2520 [14].	21
IV.	Flujo luminoso de los LEDs XP-E2 seleccionados [15]	25
V.	Potencia eléctrica de los LEDs XP-E2 seleccionados [15]	29
VI.	Resistencia térmica de los LEDs XP-E2 seleccionados [15]	30
VII.	Resistencia térmica total de las series formadas.	30
VIII.	Costos de los materiales utilizados en el desarrollo del hardware	33
IX.	Tabla para calcular el valor de la inductancia para el integrado PT4115 [17].	36
X.	Costo de fabricación del sistema desarrollado para diferentes unidades	52
XI.	Resultados obtenidos de las mediciones del PAR	52
XII.	Resultados obtenidos de las mediciones de luminosidad	56
XIII.	Resumen de los resultados obtenidos de las mediciones entre las diferentes luminarias	57

1. Abstract

To have a successful planted aquarium, a balance of several factors is required, the most important of which is lighting. Light needs to meet several requirements to be profitable for our plants. The most important of them is the PAR (photosynthetic active radiation) that allows to determine the number of photons per second that are in the range between 400 and 700 nm in a certain area. The objective of this work is to develop an optimal lighting system that meets all the functional requirements at a moderate cost. For this, the good LED manufacturers are investigated and the good light emitters that meet the good efficiency and the appropriate spectral range are selected. In addition to making hardware and software that allow them to be controlled.

2. Resumen

Para tener un acuario plantado exitoso se requiere un equilibrio de varios factores, el más importante de ellos es la iluminación, la cual necesita tener varios requerimientos para que sea aprovechable para nuestras plantas. El más importante de ellos es el PAR (radiación fotosintética activa) que permite determinar la cantidad de fotones por segundo que están en el rango entre 400 y 700 nm en una determinada área. El objetivo de estudio de este trabajo es desarrollar un sistema de iluminación que cumpla con todos los requerimientos funcionales a un costo moderado. Para ello se investigan los mejores fabricantes de LEDs y se seleccionan los mejores emisores de luz que cumplan con la mejor eficiencia y el rango espectral adecuado. Además de realizar un hardware y software que permita controlarlos. Por último, el costo de fabricación de nuestro sistema es aceptable, el cual tiene un valor de \$834555 para una sola unidad. mientras que para una fabricación en masa de unas 10000 unidades, el costo de fabricación por unidad es de unos \$215593, el cual es un valor competitivo comparado con la lámpara que presenta las mejores características lumínicas, la cual tiene un costo de \$1600000.

3. Introducción

El paisajismo acuático o aquascaping es el arte de construir y mantener jardines o paisajes bajo el agua. Los insumos más importantes en este tipo de jardines son las plantas acuáticas, las cuales van acompañadas de manera armoniosa con materiales inertes como piedras y troncos, de tal manera que se conviertan en un paisaje natural estéticamente agradable a la vista. Para lograr que las plantas crezcan y se desarrollen adecuadamente se necesita tener un correcto equilibrio entre la filtración, sustratos, abonados, dióxido de carbono y, el más importante de todos, la iluminación. En este último factor nos concentramos en este proyecto.

Los sistemas de iluminación comerciales son muy costosos, poseen interfaces de usuario difíciles de manejar, y no cuentan con la posibilidad de realizar actualizaciones de forma remota. Por esta razón, este proyecto busca desarrollar un sistema de iluminación inteligente de bajo costo que permita reproducir todas las características ambientales necesarias para el correcto desarrollo y evolución tanto de las plantas como del ecosistema en general. Este sistema contará con interfaces de usuario intuitivas tanto móvil como web, las cuales permitan realizar configuraciones y los ajustes necesarios. Además, será posible monitorear y recibir notificaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema.

4. Contribución de este trabajo

Este trabajo busca desarrollar una lámpara para acuarios plantados de agua dulce, que cumpla con los requerimientos de espectro lumínico, PAR, calidad y bajo costo. Además de ofrecer una interfaz intuitiva para la configuración del dispositivo. El objetivo del trabajo es que los usuarios finales puedan alcanzar un adecuado desarrollo de su ecosistema acuático usando un sistema de calidad de bajo costo.

5. Estado del arte

Actualmente en el mercado hay muchas empresas productoras de iluminación para acuarios plantados de agua dulce. Las más reconocidas por su calidad y buenos resultados son: Chihiros, ADA, y Fluval. Todas ellas llevan gran trayectoria en el mundo de la acuarofilia y constantemente se encuentran a la vanguardia tecnológica.

Este trabajo tomó como referencia las siguientes luminarias:

RGB VIVID2 mini de Chihiros: cuenta con 80 LEDs RGB de 1 vatio cada uno. Además posee un flujo luminoso de 4000 lúmenes y tiene una vida útil de 50000 horas.

AQUASKY MOON 301 C Plug de ADA: tiene 50 LEDs blancos de alrededor de 7000 grados Kelvin de 0.5 vatios cada uno. Además cuenta con un flujo luminoso de 2000 lúmenes y tiene una vida útil de de 30000 horas.

TWINSTAR Serie E de Fluval: está construida con 30 LEDs de colores blancos de 6000 grados kelvin, rojos, azules y verdes de 0.5 vatios cada uno. Además cuenta con un flujo luminoso de 1000 lúmenes y tiene una vida útil de 30000 horas.

De las tres lámparas que se tomaron como referencia, la mejor es la VIVID2 debido a su gran flujo luminoso así como el PAR que suministra. Estas características permiten tener acuarios mucho más profundos. La segunda mejor opción es la lámpara AQUASKY, la cuál cuenta con unos LEDs blancos especialmente diseñados para resaltar hermosamente el color de las plantas. Y por último tenemos la TWINSTAR, la cuál cuenta con un excelente espectro debido a su combinación de LEDs. Adicionalmente, tanto la VIVID2 como la AQUASKY cuentan con una aplicación móvil que permite la configuración del dispositivo, mientras que la TWINSTAR

solo se puede usar manualmente. Finalmente, la VIVID2 es la lámpara más costosa (\$1600000) seguida de la AQUASKY (\$1100000) y de último la TWINSTAR (\$830000).

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de iluminación de alta calidad que permita la reproducción de plantas acuáticas y promueva el correcto desarrollo de ecosistemas acuáticos de agua dulce, mediante el control y el monitoreo de los efectos naturales (efecto luna, efecto amanecer, efecto atardecer y efecto tormenta), intensidad y espectro lumínico usando interfaces de usuario tanto móvil como web.

6.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar el hardware de control y potencia necesario que reproduzca el espectro lumínico adecuado para el crecimiento de vegetación acuática en acuarios de agua dulce.
2. Desarrollar una interfaz móvil y web a través de Flutter&Angular que permita la configuración, monitoreo y control del hardware desarrollado de manera simple y precisa.
3. Evaluar el costo del sistema con respecto a los sistemas de iluminación de la marca Chihiros, la empresa número uno en estos sistemas.

7. Marco teórico

Para un correcto desarrollo y evolución de un ecosistema acuático en acuarios de agua dulce, en especial la reproducción de vegetación acuática, es necesario tener un equilibrio entre los siguientes factores: filtración, sustrato, dióxido de carbono, fertilizantes e iluminación. Este último factor es el más crítico, ya que de él depende el equilibrio de los demás. La iluminación ideal en un acuario plantado debe tener un correcto balance entre calidad, cantidad y duración. Las plantas acuáticas al igual que cualquier organismo vivo, absorben luz para realizar diferentes procesos que ayudan a su desarrollo. Uno de estos procesos es la fotosíntesis, la cuál permite asimilar sustancias inorgánicas como el dióxido de carbono y agua transformándolas en sustancias orgánicas como hidratos. A través de este proceso, las plantas desprenden pequeñas cantidades de oxígeno debido a la transformación de energía luminosa en energía química producida por

la clorofila [1], [2]. Sin embargo, no toda la luz es absorbida, parte de ella es reflejada, lo cuál permite ver sus llamativos y hermosos colores.

Todas las plantas comparten un rango espectral bien definido biologicamente, sin embargo, cada especie absorbe en diferente proporción cada franja espectral. Este rango espectral usualmente se llama PAR (radiación fotosintética activa), el cual se mide en nanómetros. Las plantas utilizan las franjas espectrales que están más concentradas en la zona azul (450nm) y la zona roja (650nm). Del resto del espectro, la menos aprovechada es la de color verde ya que es el color propio de la clorofila, y por lo tanto es la zona del espectro que más se refleja. Por otra parte, el espectro de los ultravioleta e infrarrojo no es muy aprovechado por las plantas [3].

Las plantas que tienen colores amarillos, anaranjados o rojos intensos, poseen un tipo de pigmentos en las células llamados carotenoides. Estos pigmentos absorben la luz en la zona azul del espectro y reflejan las luces en la zona roja. Cuando este tipo de plantas son sometidas a tipos de iluminación inadecuadas o a intensidades inferiores a las necesarias, pueden reemplazar sus pigmentos rojos por clorofila, para evitar reflejar el color rojo y poder así aprovecharlo en el proceso fotosintético.

La duración de la luz también juega un papel importante en el desarrollo de la planta. El tiempo de exposición de la planta a la luz se conoce como fotoperiodo. Basándonos en la naturaleza, las plantas no reciben iluminación las 24 horas. Por ejemplo, en zonas muy tropicales, el fotoperiodo de las plantas es de 12 horas. Sin embargo, durante este tiempo, las plantas no están expuestas a la misma cantidad de luz. Si la cantidad de luz es menor a la requerida, el proceso fotosintético no puede llevarse a cabo, por lo que se convierte en un parámetro importante a tener en cuenta. La forma más apropiada para determinar la cantidad de luz que necesitan las plantas es a través de un medidor de PAR [3], [4]. Este medidor permite calcular cuántas partículas de luz (fotones) dentro del rango entre 400nm – 700nm llegan a un metro cuadrado de área por cada segundo. El PAR ayuda a determinar si una fuente luminosa es apta para que nuestras plantas realicen el proceso fotosintético correctamente y puedan adquirir sus correctas coloraciones [4].

Actualmente existen una amplia variedad de iluminación para acuarios plantados, entre las que se destacan:

Los tubos de neón: también conocidos como fluorescentes, son el tipo de iluminación más básica para acuarios plantados. Los fluorescentes emiten luz gracias a dos elementos que están en el interior del tubo. El primero es un gas ionizado y el segundo un recubrimiento fluorescente que

cambia su composición química al contacto con dicho gas [5], [6]. Estas variaciones químicas pueden generar luz del color que deseemos y se pueden diseñar para cubrir necesidades concretas de las plantas acuáticas. Los tubos fluorescentes diseñados para acuarios plantados suelen emitir luz en la parte naranja-rojo o roja-azul-violeta del espectro luminoso. Como este tipo de luz es poco estética para el acuario, se suele mezclar con tubos fluorescentes blancos para equilibrar el color visible. Este tipo de iluminación era la más utilizada, principalmente por su bajo costo, su relativa eficiencia y su asequibilidad.

Lámparas HQI o haluro metálico: este tipo de luminaria es conocida comúnmente como lámparas halógenas. Son lámparas que presentan una potencia muy alta y una reproducción muy precisa de los colores del espectro luminoso. La forma de emisión de luz se da gracias a la interacción entre un arco eléctrico y una mezcla de gases en el interior del tubo. Dependiendo de la mezcla de gases, la luz emitida será de un color u otro. Este tipo de iluminación es muy potente y se suele usar en acuarios muy profundos superiores a 60 cm de altura. Su gran potencia va acompañada de una gran generación de calor, la cual debe tenerse en cuenta [5]. Estas lámparas son uno de los métodos de iluminación más caros debido a su alto consumo energético, comparado con otras opciones de iluminación disponibles.

Lámpara de vapor de mercurio: este tipo de luminaria es muy similar en funcionamiento a las lámparas halógenas. Proporcionan mayor potencia que los tubos fluorescentes, pero menor que las lámparas de haluro metálico. En este sentido, son muy útiles para iluminar acuarios plantados entre 45 y 60 cm de altura. Aunque estas lámparas no emiten el espectro ideal para el crecimiento de las plantas, tienen una gran potencia que puede compensar esa carencia. Sin embargo, desprenden gran cantidad de calor en su funcionamiento [5], [6].

Pantallas LED: Desde la aparición del LED, este tipo de iluminación se ha convertido en la más utilizada. Si bien las lámparas halógenas eran la opción más potente, capaces de permitir el desarrollo pleno de todas las especies de plantas acuáticas, ahora la iluminación LED ha tomado la delantera en cuanto a eficiencia energética y calidad del espectro. Una de sus desventajas es que en ocasiones puede tener una inversión inicial más alta que otro tipo de lámpara [5]. Sin embargo, es una inversión que se recupera a largo plazo, debido a su eficiencia energética y a su larga vida útil. Las luces LED se volvieron ideales para los acuarios ya que pueden emitir luz en espectros muy concretos, ofreciendo una iluminación para los acuarios plantados muy precisa y

beneficiosa para la fotosíntesis.

Las pantallas LED para acuarios pueden iluminar en una sola dirección sin necesidad de utilizar reflectores [5], (como ocurriría, por ejemplo, con los fluorescentes, los halógenos o lámparas de vapor de mercurio), por lo que con una menor potencia se puede conseguir la misma cantidad de luz en lúmenes que otras lámparas más potentes. Otro aspecto importante acerca de las lámparas LED es que su intensidad puede regularse muy fácilmente. Además, no emiten luz en la franja ultravioleta ni infrarroja del espectro. No todos los LEDs que existen en el mercado son aptos para lograr tener un acuario plantado exitoso, por lo que se deben escoger LEDs de buena calidad. Los mejores fabricantes parametrizan sus LEDs por medio de un serial que se conoce como contenedor o bin en inglés [7], ya que, por razones tecnológicas, las características de los LEDs pueden diferir incluso dentro del mismo lote de fabricación [7], [8]. De esta manera, los fabricantes clasifican la calidad del LED a través de este contenedor o bin.

Actualmente existen dos tipos de contenedores importantes: color y eficiencia. Los contenedores de color clasifican los LEDs de acuerdo a las longitudes de onda o espectro, mientras que los contenedores de eficiencia los clasifican según su capacidad para convertir la energía eléctrica en luz [7]-[9]. Si observamos los contenedores de colores ofrecidos en el mercado, podemos ver que un mismo emisor LED está disponible en diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, considere la generación de emisores Philips Luxeon Rebel Far Red mostrada en la TABLE II.

La longitud de onda máxima de un emisor LED puede variar significativamente. Según el contenedor de color, la longitud de onda puede ser muy estrecha; a veces de solo 5nm de ancho o incluso menos. Es importante tener esto en cuenta cuando queremos cubrir todo el rango espectral deseado, de lo contrario, podemos perder algunos tonos de color.

La segunda categoría de contenedores (es decir, luminosidad o eficiencia) también es muy importante. Los fabricantes utilizan este tipo de contenedor para clasificar sus LEDs de acuerdo con la salida de potencia lumínica, mientras que el consumo de energía eléctrica es el mismo. Por ejemplo, para el mismo tipo de LED la diferencia de eficiencia entre contenedores puede ser significativa. Esto lo podemos ver en la hoja de datos del Luxeon Rebel Royal Blue de la TABLE I. La tabla muestra que la eficiencia de la conversión de energía eléctrica en energía luminosa puede variar del 37 % al 53 % para diferentes contenedores con la misma corriente. Esto significa que el mejor contenedor es un 40 % más eficiente en comparación con el peor

contenedor.

TABLE I

POTENCIA RADIOMÉTRICA DE LOS EMISORES LUXEON REBEL ES ROYAL BLUE A 350 Y 700 mA, SEGÚN BINS DE LUMINOSIDAD [10].

Color	Número de pieza	Consumo @ 350mA			Consumo @ 700mA		
		Flujo luminoso mínimo (lm) o potencia radiométrica (mW)	Flujo luminoso típico (lm) o potencia radiométrica (mW)	Eficacia (lm/W) o eficacia radiante	Flujo luminoso mínimo (lm) o potencia radiométrica (mW)	Flujo luminoso típico (lm) o potencia radiométrica (mW)	Eficacia (lm/W) o eficacia radiante
	LXML-PR01-0500	500mW	520mW	48 %		910mW	40 %
	LXML-PR01-0425	425mW	480mW	44 %		840mW	37 %
	LXML-PR02-1100				1100mW	1120mW	53 %
	LXML-PR02-1050				1050mW	1070mW	51 %
Royal Blue	LXML-PR02-1000				1000mW	1030mW	49 %
	LXML-PR02-0950				950mW	970mW	46 %
	LXML-PR02-0900				900mW	940mW	44 %
	LXML-PR02-0800				800mW	890mW	42 %
	LXML-PR02-A900				900mW	1030mW	49 %

Los fabricantes de luminarias se ven tentados en utilizar LEDs poco eficientes, ya que un contenedor eficiente podrá tener el doble del precio comparado con aquel de menor eficiencia. Además, los LEDs de la mejor calidad son escasos, ya que el mejor contenedor requiere de esfuerzos significativos por parte del fabricante. Por esto, hay que tener cuidado si un fabricante de luminarias solo especifica, por ejemplo, que el dispositivo está hecho con LEDs Cree sin especificar la referencia utilizada. Lo más probable es que el dispositivo esté construido con LEDs de dos o incluso tres generaciones anteriores cuyo rendimiento es mediocre.

Los LEDs modernos son bastante eficientes en la conversión de energía eléctrica en luz. Sin embargo, estos LEDs desperdician aproximadamente la mitad de la energía consumida en forma de calor, dado que el cristal es bastante pequeño (generalmente los cristales LED de potencia tienen una superficie de 1 a 2 mm^2 , en la Fig. 1 se muestra el encapsulado de un LED moderno de la marca Cree). Por lo tanto, la eliminación de calor de los LEDs es muy importante ya que su vida útil y rendimiento dependen de la temperatura de funcionamiento. Cuando la temperatura del cristal de un LED tolerante como Luxeon Royal Blue de Phillips aumenta de 25 a 100 °C, su rendimiento disminuye en un 10 %. Un LED menos tolerante como el Luxeon Amber de Philips podría perder hasta un 75 % de su eficiencia. Esta caída de desempeño es aún más notoria en los LEDs baratos, generalmente de fabricación asiática.

Desafortunadamente, las tecnologías conocidas comúnmente hoy en día no permiten montar

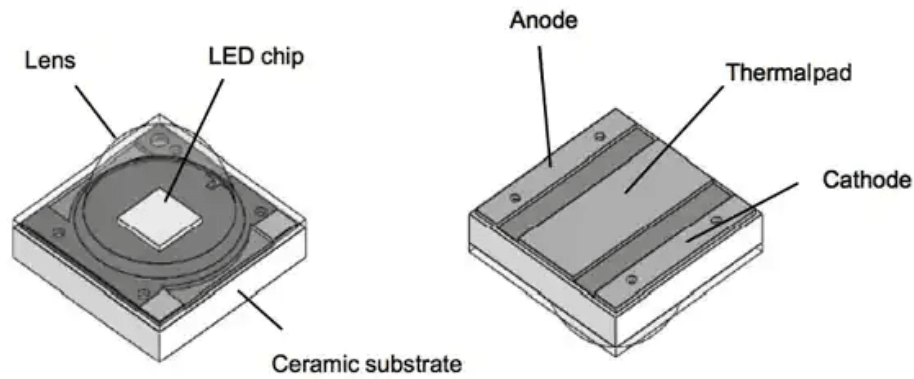


Fig. 1. Encapsulado de los LEDs XP-E2 [11].

el cristal LED directamente en el disipador de calor. Por lo tanto, el cristal requiere un encapsulado especial cuya capacidad de transferencia es descrita por un parámetro llamada resistencia térmica. Este parámetro es medido en los grados de aumento de temperatura por vatio de calor generado ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$). La resistencia térmica de los mejores LED es de aproximadamente $2.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

Ahora la pregunta es: ¿qué influencia tiene la resistencia térmica en la temperatura del cristal? Supongamos que tiene dos LEDs de 3W última generación. Podría ser, por ejemplo, un LED Cree XPEBGR-L1-R250-00E01 color verde con una resistencia térmica de $11^{\circ}\text{C}/\text{W}$ y un LED Royal Cree XPEBRY-L1-R250-00R01 color azul con una resistencia térmica de $8^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Cuando ambos funcionen a 300mA, la caída de tensión será de 2.82V y 3.1V, respectivamente. Esto implica un consumo total de energía de unos 0.846W y 0.93W, respectivamente. Por lo que el encapsulado del segundo LED agregará $0.93\text{W} * 8^{\circ}\text{C}/\text{W} = 7.44^{\circ}\text{C}$ a la temperatura del cristal mientras que el primero agregará $0.846\text{W} * 11^{\circ}\text{C}/\text{W} = 9.306^{\circ}\text{C}$. Es decir que la temperatura total de solo dos LEDs según la ecuación 3 sería de unos 168.096°C , lo que conlleva a que los conductores deben estar aislados de alguna manera del disipador de calor, para evitar que se derrita su recubrimiento y puedan entrar en cortocircuito con el disipador. Por lo tanto, el diodo LED debe ser instalado en un PCB especial, el cual es luego montado en un disipador de calor. La resistencia térmica de PCB comunes de fibra de vidrio es de unos $60^{\circ}\text{C}/\text{W}$ o incluso más. Sin embargo, esto es inaceptable para los requerimientos de las lámparas. Por lo tanto, se han diseñado PCBs metálicos especiales (MCPCB) que tienen un menor valor de resistencia térmica. Su estructura es mostrada en la Fig. 2.

$$T_G = 60^{\circ}\text{C} + 9.306^{\circ}\text{C} + 12.25^{\circ}\text{C} + 4^{\circ}\text{C} = 85.556^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$T_B = 60^\circ\text{C} + 7.44^\circ\text{C} + 11.5^\circ\text{C} + 3.6^\circ\text{C} = 82.54^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$T_{total} = T_G + T_B = 85.556^\circ\text{C} + 82.54^\circ\text{C} = 168.096^\circ\text{C} \quad (3)$$

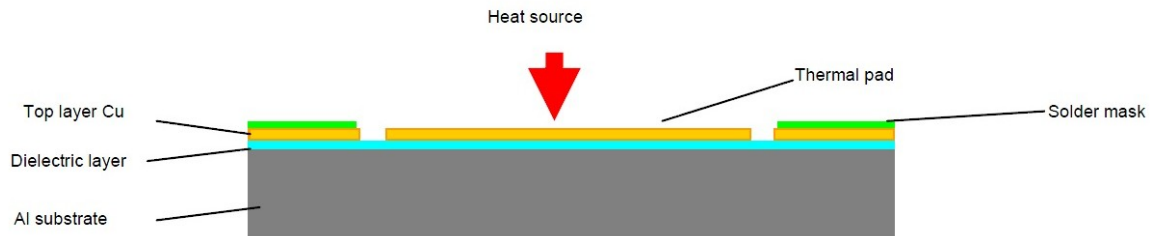


Fig. 2. Geometría de la sección transversal del MCPCB [12]

Como se puede observar, la fuente de calor o heat source de la [12] donde va el thermal Pad del LED no toca el metal directamente, sino que lo hace a través de una capa dieléctrica delgada. Desafortunadamente, la conductividad térmica de los materiales dieléctricos es cientos de veces menor que la del aluminio o el cobre mientras que la resistencia térmica total del MCPCB está alrededor de $0.2^\circ\text{C}/\text{W}$ para un LED de superficie grande y alrededor de $5.3^\circ\text{C}/\text{W}$ para uno de superficie pequeña.

Como hemos visto, existen dos obstáculos principales para eliminar eficientemente el exceso de calor del diodo LED. El primero debido al encapsulado, en el cual los fabricantes trabajan constantemente para reducir la resistencia térmica de la unión de sus diodos LEDs. La segunda por la capa dieléctrica entre la almohadilla térmica del LED y el metal del MCPCB, esto fue solucionado por la empresa estadounidense SinkPad en el año 2,011. Donde ofreció una tecnología patentada llamada SinkPad, que permite disipar el calor de la almohadilla térmica del LED directamente al metal del MCPCB. La estructura del SinkPad MCPCB se muestra en la Fig. 3. Allí se puede ver las partes elevadas del metal MCPCB que tocan directamente la almohadilla del LED. Mientras que las pistas eléctricas están situadas en un PCB separado. Este enfoque da como resultado una reducción significativa de la resistencia térmica, y cuantos más LEDs hallan en la superficie del MCPCB, más profundo será el efecto.

En la siguiente sección se explica a detalle como se construyó la lámpara LED propuesta.

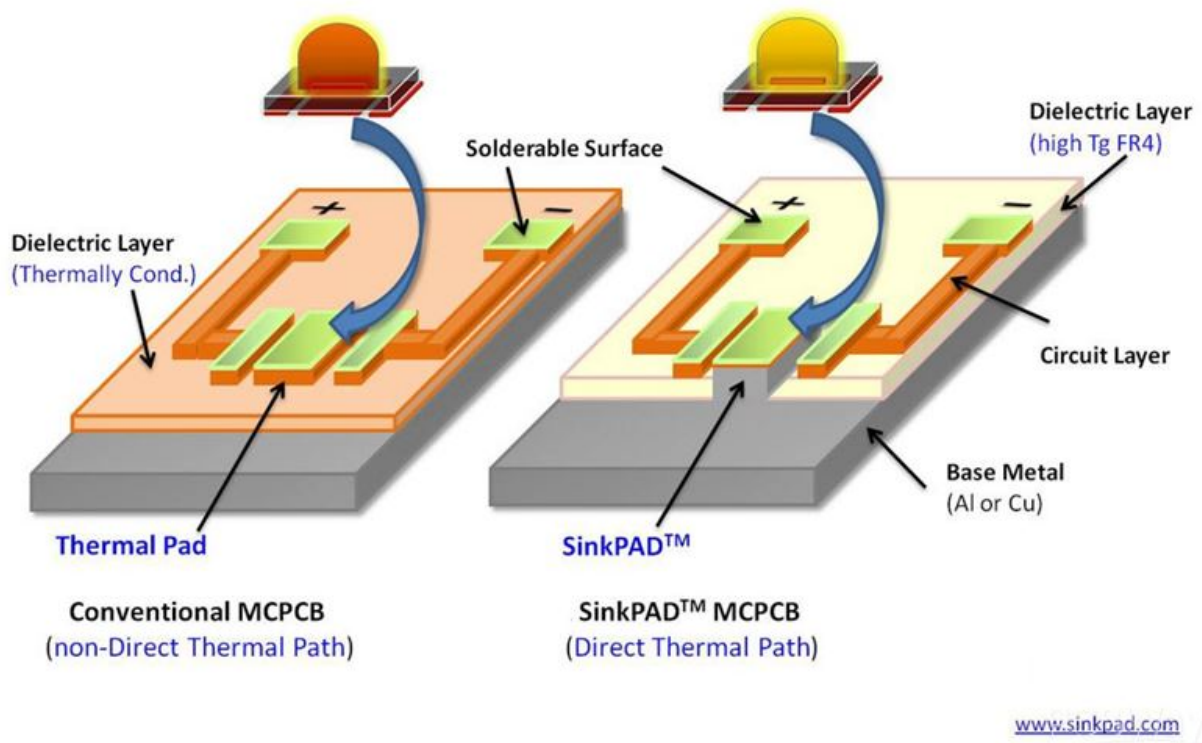


Fig. 3. Estructura SinkPad MCPCB [13]

TABLE II

ESTRUCTURA BIN DE LONGITUD DE ONDA MÁXIMA PARA EMISORES LUXEON REBEL FAR RED [10].

Color	Número de pieza	Contenedor	Longitud de onda (nm)	
			Mínima	Máxima
Far Red	LXML-PF01	1	730	740
		1	720	730
		3	740	750

8. Metodología

Muchos aspectos se tuvieron en cuenta para el diseño y construcción del sistema de iluminación de acuarios plantados propuesto en este trabajo. La metodología está dividida en dos secciones principales. La primer sección habla acerca de los aspectos considerados para elegir los LEDs que constituyen la iluminaria. La segunda sección describe el diseño del hardware y software del sistema de iluminación.

8.1. Elección de los LEDs

Este trabajo consideró cuatro aspectos con el fin de elegir los LEDs necesarios para construir una lámpara de alta calidad y bajo precio. El primer aspecto es la eficiencia de los semiconductores, la cual debe ser óptima para reducir costos energéticos y aumentar el tiempo de vida del sistema. El segundo es la mezcla uniforme de colores para evitar tonos de color antiestéticos en el acuario. El tercero es el uso del espectro lumínico para que la planta pueda aprovecharlo en el proceso fotosintético. El cuarto es la temperatura para garantizar el buen funcionamiento de los diodos LED.

8.1.1. Eficiencia del LED

Se realizó una búsqueda exhaustiva de las mejores empresas productoras de LEDs en el mercado. Según los hallazgos, las empresas Cree y Phillips son las ganadoras, ya que producen semiconductores más eficientes en función de la iluminación y la potencia. Sin embargo, no todos los fabricantes especifican el contenedor de sus LEDs, por lo que dificulta construir una luminaria de alta calidad usando estas marcas.

Desafortunadamente, los intereses del fabricante no siempre coinciden con los del usuario. Un ejemplo es la elección de los LEDs para la construcción de la lámpara. Por una parte, si el fabricante usara LEDs de alta calidad, eso solo representaría un 20 % del costo total del sistema de iluminación. Sin embargo, añadiría un 40 % más de eficiencia usando la misma cantidad de energía como se muestra en la TABLE I para el caso del Luxeon Rebel ES Royal Blue. Por otra parte, si el fabricante se decanta por LEDs de menor eficiencia, esto reduciría el costo de fabricación pero aumentaría los costos de sostenimiento para el usuario final. Por ejemplo, supongamos un dispositivo LED de 300W, con una operación diaria de 12 horas y un costo energético de 200 pesos por kWh. La energía total consumida en 1 año de operación costaría \$262800 usando el

peor contenedor. Por el contrario, si se usara una instalación con el mejor contenedor, el usuario final se ahorraría \$105120 pesos durante el mismo periodo. Estos cálculos se muestra a continuación:

$$\frac{kwh}{dia} = \frac{300w * 1kw}{1000w} * \frac{12horas}{dia} = 3.6 \frac{kwh}{dia} \quad (4)$$

$$\frac{kwh}{año} = 3.6 \frac{kwh}{dia} * \frac{365 dia}{1 año} = 1314 \frac{kwh}{año} \quad (5)$$

$$Costoparaelpeorcontenedor = 1314 \frac{kwh}{año} * \$200 = \$262800 \quad (6)$$

$$Ahorroparaelmejorcontenedor = \$262800 * 40 \% = \$105120 \quad (7)$$

Hay muchas otras ventajas en el uso de LEDs con mayor eficiencia. Por ejemplo, la temperatura de unión es más baja durante su funcionamiento, lo que ocasiona un aumento en el rendimiento de la luz y una vida útil más larga. Por el contrario, los LEDs menos eficientes producen mayor temperatura de unión, la cual es transferido al medio ambiente. Por lo tanto, es probable que tanto el acuario como la habitación requieran de una unidad de enfriamiento más potente.

Hasta ahora la estimación se ha basado en una diferencia de eficiencia del 40 % para el caso del LED Luxeon Rebel ES Royal Blue entre los mejores y los peores contenedores. Dependiente del tipo de LED, esta diferencia puede ser mayor o menor. Si se amplía el rango de búsqueda y se consideran LEDs de diferentes fabricantes, la diferencia de eficiencia podría ser aún mayor. Si, por ejemplo, se comparan LEDs chinos con respecto a aquellos contenedores producidos por los mejores fabricantes, la diferencia de eficiencia podría ser de tres veces o incluso más. Esto significa que si comparamos dos lámparas de la misma potencia pero con diferente precio, aquella que es más barata puede producir menos luz por peso consumido; esto es cierto si se asume una relación directa entre el costo de la lámpara y el costo de los materiales usados. Por lo mencionado anteriormente, está demostrado que el costo del LED de mayor eficiencia se justificará con el tiempo, lo que significa una elección importante a la hora de construir una lámpara.

De esta manera y teniendo en cuenta los contenedores más importantes (color y eficiencia) mencionados en la sección anterior, se optó por escoger el fabricante Cree con su referencia de

LEDs XP-E2, ya que tiene las mejores características en cuanto a: vida útil, eficiencia lumínica, térmica y PAR. Esto se debe a que dichos LEDs están optimizados para la horticultura.

8.1.2. Mezcla de colores uniforme (efecto disco)

El llamado efecto disco se observa cuando un acuario se ilumina con varios LEDs de potencia (especialmente multicolores) que se colocan a cierta distancia entre sí. Cada LED es una fuente de luz puntual, que se asemeja a un pequeño sol. Si los LEDs son de diferente color, producirían un efecto coloreado como luces de discoteca a lo largo del acuario.

La única forma de superar este efecto es ubicando los cristales LED lo más cerca posible. Sin embargo, no se pueden colocar todos los LEDs de la luminaria en un solo lugar, ya que queremos iluminar toda la superficie de manera más o menos uniforme. Por lo tanto, debemos agrupar LEDs de diferentes colores en un proporción adecuada. Los grupos resultantes pueden distribuirse uniformemente sobre la superficie del acuario.

Una opción de agrupar los LEDs en un espacio pequeño es a través de un COB (Chips On Board) personalizado juntando varios cristales LED en una placa. Una COB es una matriz de cristales LED individuales unidos a una placa común y cubiertos casi siempre por un compuesto protector (generalmente silicona). Tienen varias ventajas sobre los LEDs de montaje superficial y se están generalizando bastante para el uso de iluminación. De hecho, son fáciles de montar, proporcionan un costo relativamente bajo por luz emitida y son poco exigentes para la óptica. Esta tecnología se ha convertido en una buena opción para la iluminación de carreteras, almacenes u otras instalaciones grandes.

Un COB personalizado puede proporcionar una combinación de colores perfecta si se seleccionan cristales con un espectro correcto. Sin embargo, creemos que esta tecnología no es la mejor opción para un acuario plantado, ya que no cumplen con los tres aspectos principales: espectro, eficiencia y óptica. Una COB puede contener cualquier cristal, sin embargo, ninguno de los principales fabricantes de cristales cubren todo el rango espectral requerido para la iluminación de acuarios plantados. Por ejemplo, Cree no produce violeta (actínica verdadera). Existen empresas más pequeñas que fabrican una gama más amplia de LEDs y sus cristales cubren el espectro requerido. Sin embargo, no cumplen con el requerimiento de eficiencia. Teóricamente, cristales de diferentes fabricantes pueden ser combinados en un paquete COB, pero esto puede ser prácticamente imposible para cristales similares fabricados por diferentes marcas. Como re-

sultado, una COB tendría que usar cristales con una eficiencia significativamente menor, en comparación con los principales fabricantes del mundo. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la generación de calor de una COB. Por ejemplo, considere los COB más nuevos de Cree, uno de los principales líderes mundiales en tecnologías LED. Esta empresa presta la máxima atención a la mejora de las características térmicas de sus productos. Según las hojas de datos, la resistencia térmica de los COB de Cree varía de 2.5 °C/W para la referencia CXA1507 a unos impresionantes 0.8 °C/W para la referencia CXA2520. Esto parece bastante bueno, solo hasta que notamos que la referencia CXA2520 puede consumir hasta 50W de energía. De acuerdo con la hoja de datos TABLE III, esto agrega 40°C significativos a la temperatura de la unión por encima de la temperatura de la carcasa del LED. Para la referencia CXA2530, que tiene un consumo de energía de 61W, la temperatura de unión será mayor.

TABLE III

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS COB CREE CXA2520 [14].

Características	Unidad	Valor típico	Valor máximo
Resistencia térmica efectiva, unión a cápsula	°C/W	0.8	
Ángulo de visión	grados	115	
Clasificación ESD		Clase 2	
Corriente directa DC	mA	550	1250
Corriente inversa	mA		0.1
Voltaje directo (@ 550mA, 85°C)	V	36	
Voltaje directo (@ 550mA, 25°C)	V	37	42
Temperatura de unión del LED	°C		150
Coefficiente de temperatura de voltaje	mV/°C	-21	

Además es importante resaltar que la resistencia térmica de los COB de fabricantes asiáticos suele ser incluso mayor que la de los Cree. Esto puede provocar un sobrecalentamiento grave del cristal (aunque la temperatura del disipador de calor se mantenga en el rango aceptable).

Un mejor enfoque sería montar en un PCB de emisores LED individuales cuidadosamente seleccionados en lugar de usar un COB. Además, como se mencionó anteriormente, los contenedores de dichos LEDs deben ser los más eficientes para minimizar la generación de calor mientras que el PCB debe ser adecuado para proporcionar la mejor disipación de calor del cris-

tal. Este enfoque no solo ayuda a evitar el efecto disco, además, supera las desventajas dadas por una COB. De esta manera, los haces de luz de los LEDs de diferente color se mezclarán bien sin formar sombras de color. Cuanto menor sea la distancia entre LEDs, menor efecto sombra habrá en el acuario. Sin embargo, si es necesario utilizar ópticas secundarias para cerrar el haz luminoso, la distancia entre los LEDs no puede ser menor que el tamaño de dichas ópticas.

La distribución de los LEDs se muestra en la Fig. 6, se escogió dicha distribución para evitar el efecto disco y lograr que los diferentes colores se mezclaran correctamente. La separación entre los LEDs es de 1.5 cm, esto se debe a la óptica que estamos utilizando. La cual tiene un diámetro de 1 cm. Estas ópticas se utilizan para cerrar el ángulo de apertura que tiene el LED por defecto, que según el fabricante esta entre 110° y 130° dependiendo del color del LED, y poder concentrarlo en una determinada área y poder lograr que la luz llegue a una mayor profundidad. La óptica seleccionada es de 60° del fabricante LEDLink Optics, que es uno de los mejores fabricantes de ópticas del mercado.

8.1.3. Completar el espectro

Para ajustar el espectro, nuestro PCB debe contener LEDs individuales o grupos de ellos que irradian rangos de longitudes de onda diferentes. A continuación, se muestran las reglas generales que consideramos importantes a la hora de diseñar una luminaria con el espectro requerido para un acuario plantado de agua dulce.

Como se mencionó en la sección 8.1.1, para la fabricación de una lámpara de alta calidad, se deben escoger aquellos LEDs de mayor eficiencia. Una vez seleccionada la marca, nos centramos en elegir aquellas referencias de semiconductores que emitieran las características espectrales necesarias para un adecuado desarrollo de las plantas dentro del acuario. Para ello se se tomó como referencia el espectro lumínico de absorción de pigmentos de las plantas, el cual se observa en la Fig. 4. Como se puede observar, las plantas consumen gran parte de las clorofilas y demás pigmentos en la franja de los azules y de los rojos. Por otra parte, el consumo de verde es muy poco debido a que no aportan ningún beneficio nutricional. El aporte de este color es más una cuestión estética para que el acuario se vea más agradable, debido al realce de este color. Sin embargo, tener exceso de este color traería consigo problemas de aparición de algas en el acuario. Por lo tanto, nuestro diseño consideró una cantidad mínima de este color.

Los LEDs de color blanco son el tipo de emisor ampliamente usada para cumplir las necesidades generales del acuario. Esto es debido a que se basan en LEDs de color azul real (royal

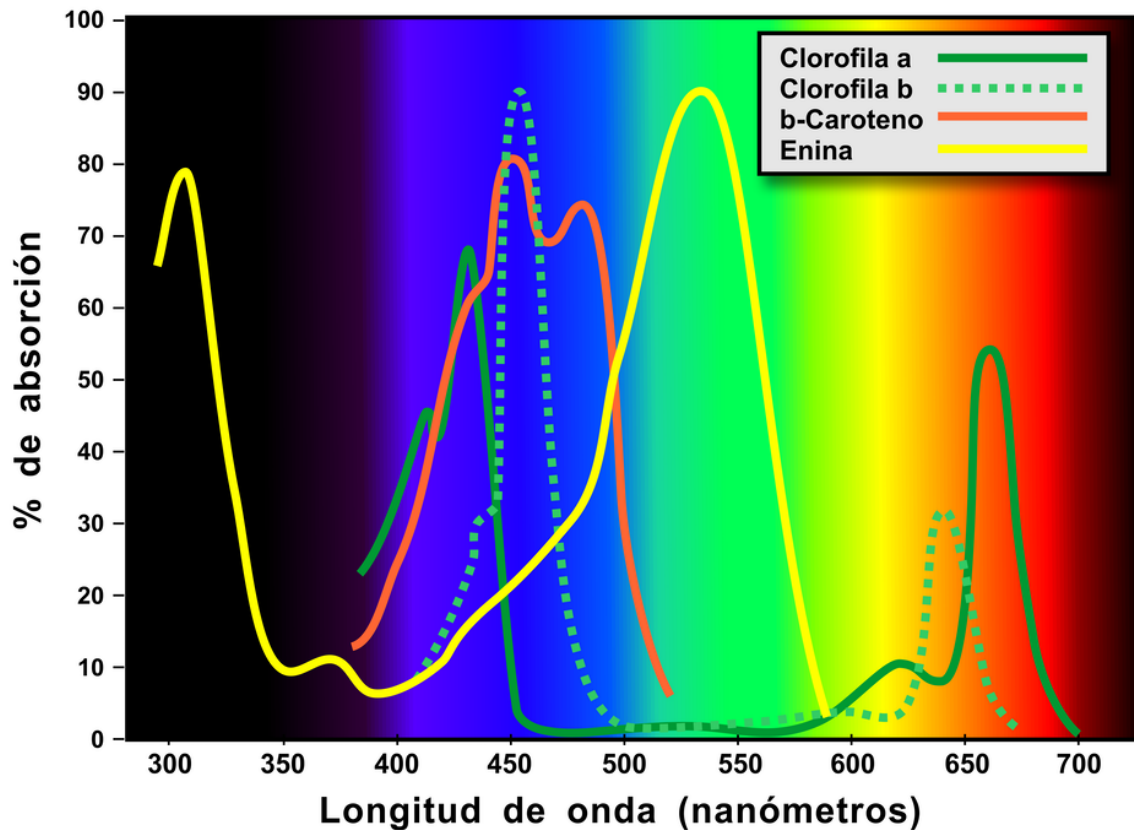
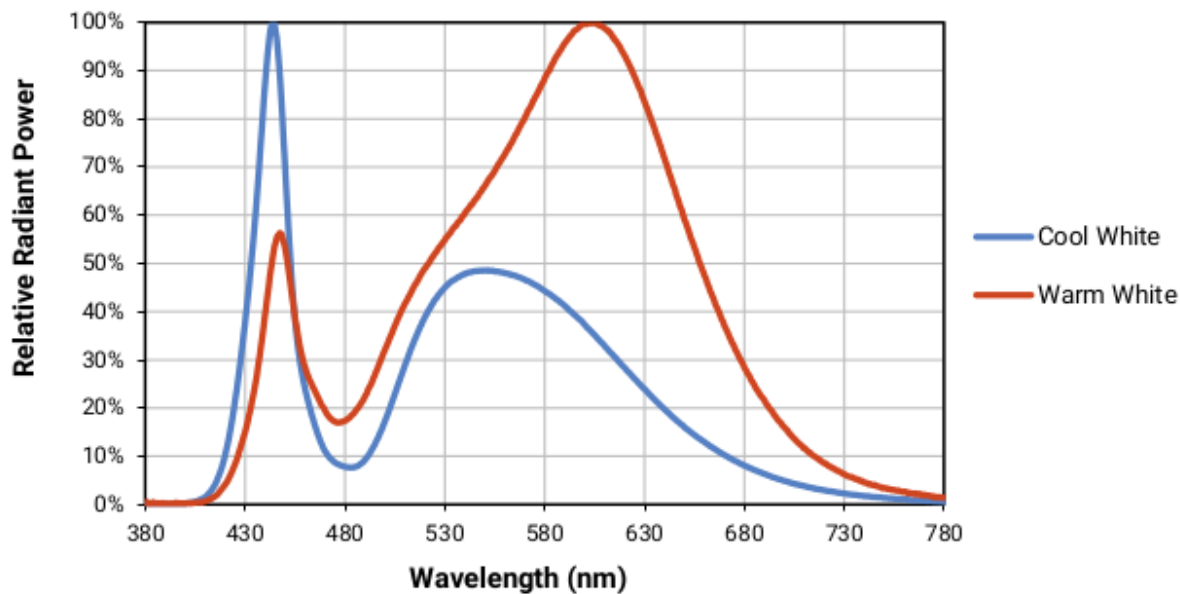


Fig. 4. Espectro lumínico de absorción de pigmentos para las plantas [4]

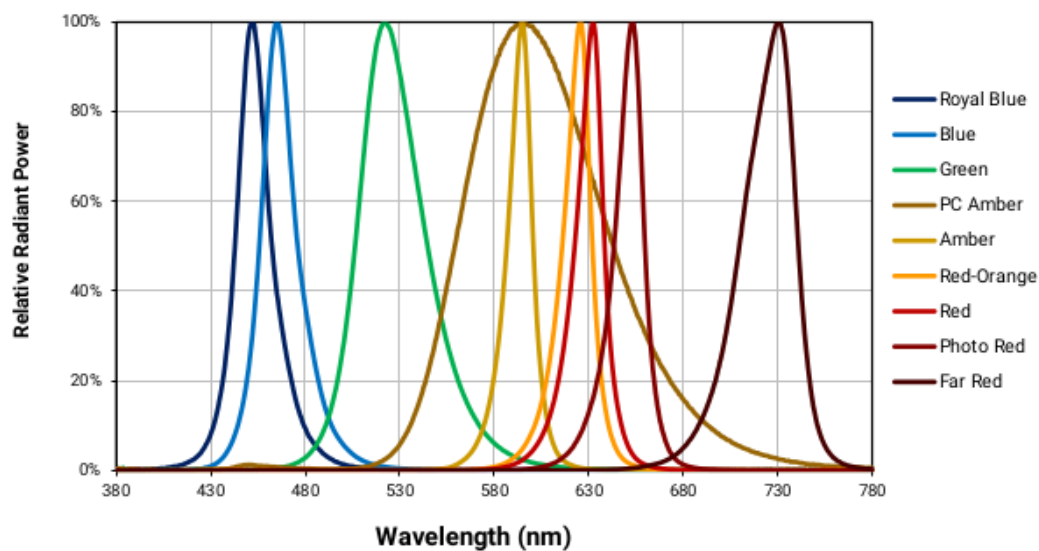
blue) con fósforo especiales aplicados en la parte superior para convertir parte de la luz azul en longitudes de onda más largas. Esta tecnología está muy desarrollada y se va perfeccionando constantemente. Los LEDs blancos están disponibles fácilmente por un costo moderado, incluso aquellos con contenedores más eficientes.

La distribución espectral de la luz emitida por un emisor de luz blanca fría y de un emisor de luz blanca cálida del fabricante CREE de referencia XP-E2 se muestra en la Figura 5a. Note que un emisor de luz blanca fría tiene mayor concentración de luz azul (alrededor de los 440nm) emitida por el cristal a través del fósforo, mientras aquel de luz cálida desplaza la concentración de potencia a longitudes de onda de la franja roja. En consecuencia una combinación de ambos blancos es ideal para tener presencia de ambas zonas espectrales.

Teniendo en cuenta la Fig. 4 y la Figura 5a. Además, de las recomendaciones de los aquascapers Colombianos Jhonny Vanegas y Sebastián Puerta. La combinación de LEDs blanco frío de $6000^{\circ}K$ y blanco cálido de $4000^{\circ}K$ cubren gran parte de las necesidades espectrales que necesitan las plantas para el proceso fotosintético. Para terminar de completar el espectro requerido nos apoyamos nuevamente de la Fig. 4, donde tenemos el espectro al que queremos llegar. Y



(a) Espectro LEDs blancos.



(b) Espectro LEDs colores del azul al rojo.

Fig. 5. Espectro de radiación para los LED Cree de referencia XP-E2 [15].

realizamos una comparación con la Figura 5b donde tenemos todos los colores disponibles para la referencia de LEDs seleccionados. Podemos notar que aunque la combinación de blancos nos aporta espectro en la zona azul y roja, es necesario intensificar la zona Azul alrededor de los 420 nm y en la zona roja alrededor de los 640 nm para cubrir todo el espectro requerido. Por lo tanto, se seleccionan LEDs de color Royal Blue y Azul para tener cubierta toda la franja del espectro azul y se seleccionan LEDs de color Photo Red y Rojo para cubrir toda la franja del espectro rojo.

Como la luminaria propuesta está enfocada para acuarios pequeños de dimensiones 30cm × 30cm × 30cm, los requerimientos lumínicos para mantener cualquier tipo de plantas en este tipo de acuarios oscilan alrededor de 1.300 lúmenes y un PAR de $70 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esto implica que se necesitan 22 LEDs de la referencia XP-E2 para cumplir con dichas condiciones. La TABLE IV muestra la referencia de los LEDs seleccionados, así como la cantidad usada por referencia y la capacidad en lúmenes. Note que, según el fabricante Cree, con esta cantidad de emisores podríamos alcanzar alrededor de 2383 lúmenes.

TABLE IV
FLUJO LUMINOSO DE LOS LEDs XP-E2 SELECCIONADOS [15]

Color del LED	Referencia	Cantidad	Lúmenes (lm)	Total Lúmenes (lm)
Royal Blue	XPEBRY-L1-0000-00S01	2	58.0	116.0
Blue	XPEBBL-L1-0000-00301	2	45.7	91.4
Amber	XPEBAM-L1-0000-00901	2	80.6	161.2
Photo Red	XPEBPR-L1-0000-00D01	2	42.0	84.0
Red	XPEBRD-L1-0000-00901	2	80.6	161.2
Green	XPEBGR-L1-0000-00J01	2	148.0	296.0
White 6000°K	XPEBWT-L1-0000-00G53	6	151.0	906.0
White 4000°K	XPEBWT-01-0000-00FE5	4	142.0	568.0
			Total	2383.0

8.1.4. Refrigeración LED

Para el calculo del disipador de los LEDs seleccionados en la sección anterior, se tomo como referencia la Fig. 7, donde se muestra el flujo de calor desde la unión del LED hasta el medio ambiente. La cual se puede resumir de la siguiente manera: Primeramente el calor se conduce desde las uniones de los LEDs hasta la placa del circuito impreso, luego pasa a través del material



Fig. 6. Distribución de LEDs escogida.

conductor o pasta térmica, después, pasa al disipador y por último, se conduce por convección y se irradia al medio ambiente. Esta trayectoria térmica se puede asemejar a una red de resistencias de un circuito eléctrico, donde las resistencias térmicas están representadas por las resistencias eléctricas, el flujo de calor es aproximado por la corriente eléctrica y las temperaturas correspondientes dentro del sistema corresponden a los voltajes eléctricos [16]. En la Fig. 8 podemos observar la equivalencia al modelo eléctrico del conjunto LEDs - disipador. Por lo cual, la resistencia total R_t desde T_{jmax} hasta T_a es la suma de las resistencias R_{jc}, R_{cd}, R_{da} , como se muestra en la ecuación 8.

$$R_t = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \quad (8)$$

El valor de la resistencia que nos interesa hallar es R_{da} que corresponde a la resistencia del disipador. Para ello podemos decir que:

$$T_{jmax} - T_a = P_d * R_t \quad (9)$$

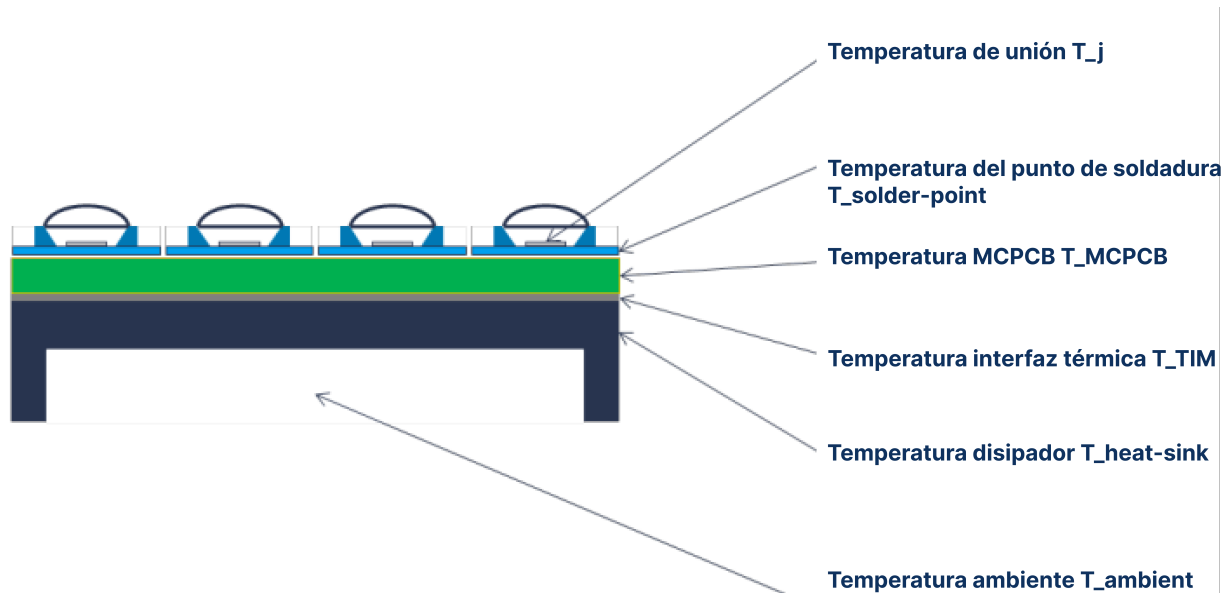


Fig. 7. Gestión térmica de los LEDs seleccionados [16].

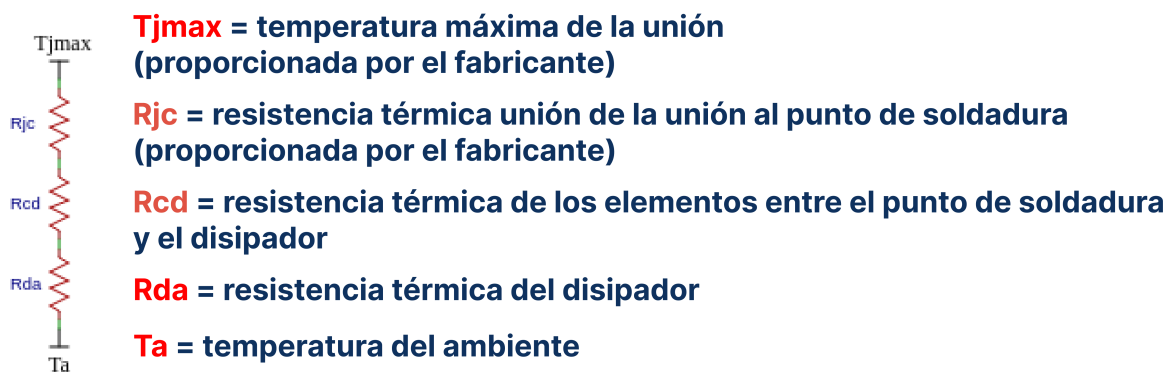


Fig. 8. Modelo eléctrico del conjunto LEDs - disipador

reemplazando R_t en la ecuación anterior nos queda

$$T_{jmax} - T_a = P_d * (R_{jc} + R_{cd} + R_{da}) \quad (10)$$

de la ecuación anterior podemos despejar R_{da} quedando la ecuación de la siguiente manera

$$R_{da} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_d} - (R_{jc} + R_{cd}) \quad (11)$$

Para el cálculo de la potencia disipada P_d se utiliza la ecuación 13, donde se necesita encontrar la potencia eléctrica y la eficiencia. Para ello, en la TABLE V se muestra la potencia eléctrica de nuestro conjunto de LEDs seleccionados, la cual se calculó con la ecuación 12. Para calcular la eficiencia, el fabricante nos indica que para condiciones normales de funcionamiento la eficiencia de sus LEDs es superior al 40%. Es decir que el 60% de la energía entrante se

transforma en calor [16]. Para ser conservador, se tomo un valor de eficiencia mucho menor al indicado por el fabricante de un 30 %. Con estos valores tenemos que la potencia disipada va ser igual a 12,51W.

$$P_e = V_f * I_f \quad (12)$$

$$P_d = P_e * eficiencia \quad (13)$$

$$P_d = 17.88W * 0.70 = 12.51W \quad (14)$$

Donde:

P_e = potencia eléctrica

P_d = potencia disipada

V_f = voltaje directo del LED

I_f = corriente directa del LED

El valor T_{jmax} , es la temperatura máxima que soporta el semiconductor antes de quemarse. Este valor es proporcionado por el fabricante y su valor es de 150°C. Sin embargo, queremos que nuestros LEDs no alcancen dicha temperatura por lo que se eligió un valor de T_{jmax} menor al suministrado por el fabricante, igual a 100°C. Para el valor de la temperatura ambiente T_a se eligió un valor de 25°C. Para el valor de la resistencia R_{jc} se dispone de la TABLE VII, donde se toman los valores de las resistencias térmicas y se calcula la resistencia total, sumando los paralelos que resultan de la serie de cada canal, como se muestra en la TABLE VI. El valor de la resistencia R_{jc} se muestra en la siguiente ecuación:

$$R_{jc} = \frac{1}{\frac{1}{28} + \frac{1}{30} + \frac{1}{22} + \frac{1}{32} + \frac{1}{24} + \frac{1}{24}} = 4.36^\circ\text{C/W} \quad (15)$$

El último valor que nos falta hallar, para calcular la resistencia del disipador es la resistencia R_{cd} , la cual es la resistencia de los elementos que hay entre el punto de soldadura y el disipador. Para nuestro caso dichos elementos son el MCPCB, cuyo valor es de 0.0016°C/W de acuerdo a la ecuación 16 y la pasta térmica cuyo valor es de 1°C/W.

$$R_{mcpcb} = \frac{L}{K * A} = \frac{0.002\text{m}}{1\text{W/mk} * 1.2\text{m}^2} = 0.0016^\circ\text{K/W} = 0.0016^\circ\text{C/W} \quad (16)$$

Donde:

R_{mcpcb} = resistencia térmica del MCPCB

L = Espesor del MCPCB

K = es la conductividad térmica

A = es el área de contacto

En este punto tenemos todos los valores para encontrar la resistencia del disipador. la cual se calcula a continuación.

$$R_{da} = \frac{100^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{12.51\text{W}} - (1.0016^{\circ}\text{C}/\text{W} + 4.36^{\circ}\text{C}/\text{W}) = 0.63^{\circ}\text{C}/\text{W} \quad (17)$$

El disipador que se consiguió que cumple con la resistencia térmica de $0.63^{\circ}\text{C}/\text{W}$ tiene las siguiente dimensiones: 30cm de Largo \times 14cm de Ancho \times 3cm de Alto. Es importante tener en cuenta que las temperaturas estimadas serán peores, debido a: las imperfecciones de montaje del MCPCB, a una capa desigual del compuesto conductor, al lugar geográfico donde se coloque a funcionar el dispositivo, entre otras. Para sortear el aumento de temperatura dado por las consideraciones que no se tuvieron en cuenta en el calculo del disipador, el sistema cuenta con un ventilador para extraer el exceso de calor generado por los LEDs.

TABLE V

POTENCIA ELÉCTRICA DE LOS LEDs XP-E2 SELECCIONADOS [15]

Color LED	Cantidad	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Eléctrica Total (W)
Royal Blue	2	3.10	0.30	1.86
Blue	2	3.10	0.30	1.86
Amber	2	2.20	0.30	1.32
Green	2	2.85	0.30	1.71
Photo Red	2	2.05	0.30	1.23
Red	2	2.30	0.30	1.38
White 6000 °K	6	2.84	0.30	5.11
White 4000 °K	4	2.84	0.30	3.40
TOTAL				17.88

8.2. Hardware del dispositivo

Para el diseño del circuito electrónico, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de elección de hardware:

- ✓ Microcontrolador de bajo consumo que contará con un bus de datos I2C, múltiples salidas de PWM y mínimo 2 UARTS. Además que pudiera ser programado en lenguajes de alto nivel como MicroPython o similares.

TABLE VI

RESISTENCIA TÉRMICA DE LOS LEDs XP-E2 SELECCIONADOS [15]

Resistencia térmica de la unión al punto de soldadura			
Color del LED	Cantidad	Unitaria (°C/W)	Total (°C/W)
Royal Blue	2	7	14
Blue	2	7	14
Amber	2	6	12
Green	2	9	18
PhotoRed	2	7	14
Red	2	4	8
White 6000 °K	6	8	48
White 4000 °K	4	8	32

TABLE VII

RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL DE LAS SERIES FORMADAS.

Serie	Cantidad de LEDs	Resistencia total de la serie (°C/W)
Azul	4	28
Verde-Amber	4	30
Red	4	22
White 4000 °K	4	32
White_1 6000 °K	3	24
White_2 6000°K	3	24

- ✓ Módulos de comunicación WIFI y Bluetooth que contarán con comunicación serial con el microcontrolador.
- ✓ Integrados para el manejo y control del tiempo.
- ✓ Memoria ROM para el almacenamiento de los datos.
- ✓ Driver de potencia para controlar los LEDs ya sea por medio de transistores Mosfet o a través de drivers de corriente.

Para la elección de los integrados, no solo se tuvieron en cuenta lo requerimiento técnicos sino también el costo y el consumo eléctrico. La descripción de los elementos usados, así como la cantidad y valor unitario se describen en la TABLE VIII. Como se describe en la tabla, el costo total de los materiales es de tan solo \$834555.10. Algunas razones consideradas para elegir estos componentes se detallan a continuación:

- ✓ Se consideró la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi Pico, ya que es económica y de bajo consumo energético y, además, puede ser programada en diferentes lenguajes de programación como C, C++ y Micropython. Esta tarjeta cuenta con múltiples salidas PWM, dos UARTS y dos buses de datos I2C.
- ✓ El integrado ESP8285 se escogió para la comunicación WIFI, ya que tiene una amplia documentación y puede ser configurado fácilmente mediante interfaz serial y comandos AT.
- ✓ El integrado JYD-30 se eligió para la comunicación Bluetooth porque es de bajo consumo y puede ser fácilmente configurado por interfaz serial y comandos AT.
- ✓ El control de los LEDs se realizó mediante el driver de corriente PT4115, debido a que necesita pocos componentes adicionales para poder funcionar y, además, puede controlar la intensidad de los LEDs mediante una señal PWM o ajustando una resistencia variable en el pin DIM del mismo.
- ✓ El control del tiempo se realizó mediante el integrado MCP7940N cuyo consumo energético es bajo. Además, cuenta con comunicación I2C así como múltiples alarmas y modos de hora configurables (12h y 24h). Está diseñado para funcionar hasta el año 2399.
- ✓ La memoria EEPROM 24LC256I se usó para el almacenamiento de datos. Cuenta con comunicación I2C y una capacidad de 256Kbytes.

Adicionalmente, se usaron los LEDs descritos en la sección 8.1.3 para cumplir con las condiciones lumínicas de la lámpara. Los demás componentes se usaron por razones técnicas y económicas. Además, estos se adaptan a las condiciones circuitales de la luminaria.

Una vez fueron elegidos y estudiados cada uno de los componentes, se procedió a realizar los respectivos diagramas circuitales para la fabricación de las tres tarjetas: la de potencia, la de control y la de LEDs. La primera contiene toda la parte de potencia para la alimentación de los LEDs. La segunda contiene el microcontrolador, el circuito de comunicación (WIFI y Bluetooth) y el control de temperatura y refrigeración. La última contiene el arreglo de los LEDs de potencia necesarios. Antes de iniciar con el desarrollo de las tarjetas, se hizo una investigación de las mejores herramientas para diseño y fabricación de las mismas. Por una parte, se encontró que el software EasyEda es ampliamente usado para el desarrollo y diseño de los esquemáticos. Además, cuenta con un licencia gratuita tanto en su versión Desktop como Web. Por otra parte, se encontró que la empresa de fabricación de circuitos electrónicos PCBWay era una empresa china muy demandada en la fabricación de impresos electrónicos. Además, sus productos son de buena calidad y bajo costo. Por lo tanto, este trabajo eligió el software EasyEda para el diseño de las tarjetas y la empresa PCBWay para la fabricación de las mismas.

Una vez elegidas las herramientas de desarrollo, se procedió a diseñar las tres tarjetas mencionadas anteriormente. Cada una de ellas fue construida teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Perforación mínima de 0.4mm.
- ✓ Distancia de Drill mínima entre Pad y componente de 0.25mm.
- ✓ Distancia de Drill mínima entre Pad y vías de 0.25mm.
- ✓ Ancho mínimo de pistas de 0.2mm.

Adicionalmente, cada tarjeta tuvo una consideración de diseño particular de acuerdo a sus necesidades técnicas. La descripción de diseño de cada una de las tarjetas se explican en las secciones subsiguientes.

8.2.1. Tarjeta de potencia

Como nuestro sistema consta de 6 series de LEDs, una por cada color (una serie para el Azul, otra para el Rojo, otra para el Verde-Ámbar, otra para el White de 4000°K y dos series

TABLE VIII**COSTOS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL HARDWARE**

Costos Hardware			
Descripción	Cantidad	Valor Unitario(\$)	Valor Total(\$)
PCB tarjeta de control	1	88560.00	88560.00
Fusibe rápido SMD 0451 1A	1	890.60	890.60
Capacitor cerámico 10 uf C0805 50 voltios	2	168.90	337.80
Capacitor cerámico 0.1 uf C0603 50 voltios	3	49.98	149.94
Regulador positivo 3.3V-3A LDO,D2PAK	1	2570.00	2570.00
PS2801-1-A	1	1890.00	1890.00
Resistencia 1kohm 0603 1/4 w	6	30.46	182.76
Diodo shottky 40V 5A DO-214AB	2	680.60	1361.20
Led rojo smd 0603	2	234.80	469.60
MOSFET IRF540ZSTRLPBF canal N 100V 36A	1	1980.00	1980.00
Memoria EEPROM de 256 Kbit serial 24LC256-I/SN	1	2256.00	2256.00
Reloj de tiempo real RTC MCP7940MT	1	2451.00	2451.00
Resistencia 10kohm 0603 1/4 w	4	30.46	121.84
Capacitor cerámico 100pf 50 voltios	1	290.40	290.40
Capacitor cerámico 2.2pf de 50 voltios	2	240.78	481.56
Cristal smd 32.768 khz	1	2236.00	2236.00
Base para CR2032 superficial	1	899.60	899.60
Batería de litio tipo moneda CR2032	1	1466.00	1466.00
Bluetooth JDY-31	1	5568.00	5568.00
Módulo wifi ESP8285	1	9543.00	9543.00
Pulsador rectangular smd	1	257.00	257.00
Raspberry pi pico	1	20990.00	20990.00
Header macho smd 2.54 mm 1*40	1	704.40	704.40
Ventilador 12 voltios	1	3250.00	3250.00
sensor de temperatura DS18B20	1	8200.00	8200.00
PCB tarjeta de potencia	2	45000.00	90000.00
Driver PT4115	6	1160.00	6960.00
Capacitor electrolítico smd 220 uf 25 voltios	6	544.90	3269.40
Inductor 68uH SMD CDRH74R Blindado	6	890.00	5340.00
Resistencia Smd 2512 1w 1 % 0.33ohm Sensor Corriente	6	890.60	5343.60
Diodo shottky 40V 1A SOD-123	6	149.90	899.40
MCPCB tarjeta leds	1	110800.00	110800.00
Led Cree blanco 6400°K XPEBWT-L1-0000-00G53	6	5890.00	35340.00
Led Cree blanco 4000°K XPEBWT-01-0000-00FE5	4	5635.00	22540.00
Led Cree blue XPEBBL-L1-0000-00301	2	5619.00	11238.00

para el White de 6000°K). Por lo tanto, es necesario contar con 6 drivers para controlar cada serie. La Figura 9a muestra el esquemático de la tarjeta de potencia para controlar 3 series de LEDs. El objetivo de esta tarjeta es controlar la intensidad de los LEDs. El control se hace mediante el driver de corriente (integrado PT4115), el cuál contiene su propia función interna de protección contra sobretemperaturas y sobrecargas. Además es fácil de configurar; solo necesita de una resistencia, una bobina y un diodo schottky. La resistencia se encarga de sensar la cantidad de corriente que necesita el LED mientras el diodo se usa para proteger el integrado de los picos de corriente inversa que genere la bobina. El driver puede ser alimentado entre 6 y 30 voltios y suministrar una corriente máxima de salida de 1.2 amperios. Además, puede cambiar la intensidad lumínica de los LEDs modificando el voltaje en el pin DIM cuyo rango está entre 0.5 y 2.5 voltios. Si el voltaje es superior al rango definido por el fabricante, la corriente de salida será constante y no aumentará más. Si el cambio de voltaje se hace mediante una señal PWM, como es nuestro caso, se debe tener en cuenta que la frecuencia de la señal de PWM según el fabricante debe estar entre 100Hz y 20kHz [17].

Por una parte, debido a que los LEDs usados en este trabajo necesitan 300mA para funcionar, el cálculo de la resistencia se realizó de la siguiente manera:

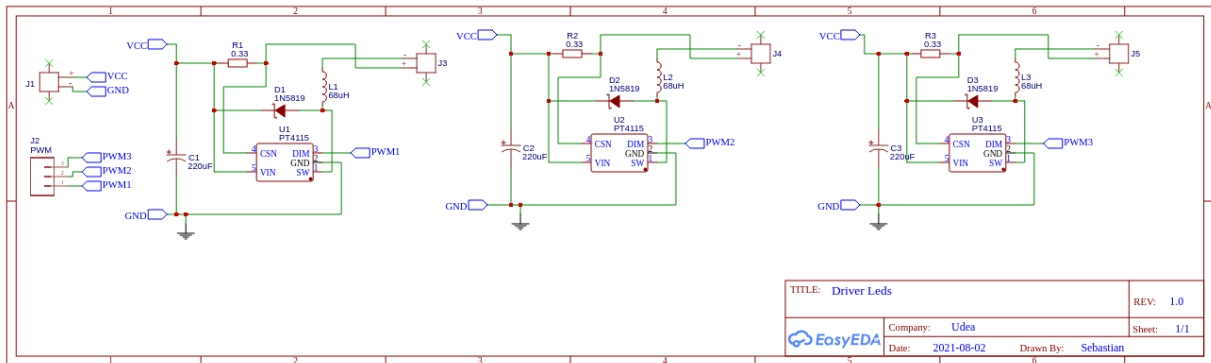
$$R = \frac{0.1}{I_{out}} = \frac{0.1}{0.3A} = 0.33\Omega, \quad (18)$$

donde 0.1 es una constante dada por el fabricante y I_{out} es la corriente de consumo de los LEDs [17], para nuestro caso 300 mA. Por otra parte, el cálculo de la inductancia de la bobina se hizo a través la TABLE IX suministrada por el fabricante. Dada la corriente de 300mA, el valor de inductancia elegido fue de $68\mu H$.

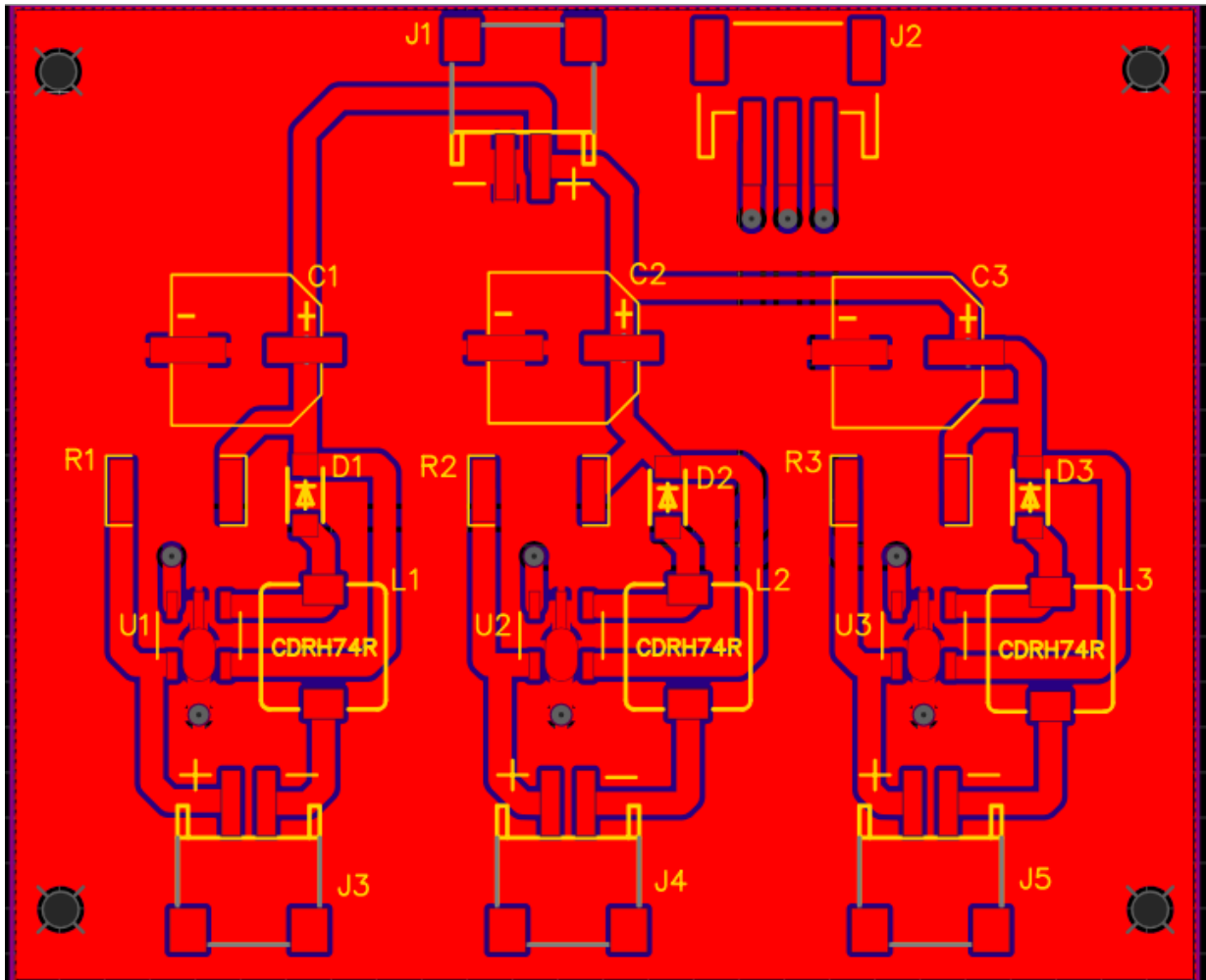
La Figura 9b muestra el PCB de potencia. Esta tarjeta fue diseñada en fibra de vidrio a una sola capa con un espesor de lámina de 1.6 mm, un espesor del cobre de 35 micras y un color verde del antisoldear. Para esta tarjeta se fabricaron dos unidades.

8.2.2. Tarjeta de control

Esta tarjeta es la más compleja de las tres. En la Figura 10a se puede apreciar el esquemático del circuito de control. En la parte superior izquierda tenemos la alimentación del sistema, la cual proporciona 12 voltios y 3 amperios. Esta alimentación se conecta a través del Jack de 2.5mm cuyo positivo contiene un fusible para proteger la tarjeta de alguna sobrecarga. Luego del fusible tenemos un regulador de voltaje positivo de 3.3 voltios para alimentar todos los demás integrados



(a) Esquemático.



(b) Tarjeta PCB.

Fig. 9. Esquemático y tarjeta PCB del circuito de potencia.

TABLE IX

TABLA PARA CALCULAR EL VALOR DE LA INDUCTANCIA PARA EL INTEGRADO PT4115 [17].

Corriente de carga	Inductor	Corriente de saturación
$I_{out} > 1A$	27 – 47 μ H	
$0.8A < I_{out} \leq 1A$	32 – 82 μ H	1.3 - 1.5 veces
$0.4A < I_{out} \leq 0.8A$	47 – 100 μ H	la corriente de carga
$I_{out} \leq 0.4A$	68 – 220 μ H	

de la tarjeta. Este regulador está conectado a dos capacitores de 10 μ F, uno a la entrada y otro a la salida, con el fin de mitigar el efector rizado y tener así un nivel DC estable.

En la parte superior derecha, está la tarjeta de desarrollo Rasberry Pi Pico en donde se encuentra el microcontrolador utilizado. La alimentación de 3.3 voltios de la tarjeta se realiza a través del pin 44 (Vsys), el cual está conectado a un diodo schottky con el fin de evitar cortocircuitos cuando la tarjeta se conecta al cable USB de 5 voltios para programarla. En los pines 16 y 17 (GP12 y GP13) está configurado el bus de datos I2C con sus respectivas resistencias pull-up para mantener los niveles de voltaje. Este bus está disponible para la comunicación con el integrado RTC y la memoria EEPROM. Los pines 1 y 2 (GP0 y GP1) conectan una de las UART para la comunicación con el módulo Bluetooth, mientras que los pines 6 y 7 (GP4 y GP5) conectan la otra UART para la comunicación con el módulo WIFI. Los demás pines se usaron para generar las señales PWM y conectar el sensor de temperatura DS18B20 para sensar la temperatura del disipador de calor de lo LEDs. Los pines PWM están conectados a la tarjeta de potencia por medio de los conectores de salida para controlar la intensidad de los LEDs. En nuestro caso se consideraron 6 salidas/canales de control PWM.

En la mitad superior tenemos el módulo Bluetooth cuyo LED de estado de conexión está conectado con su respectiva resistencia limitadora. Debajo de este módulo se encuentra el módulo WIFI, que solo está conectado con un pulsador en el pin RST para reiniciar el módulo cuando se presente una novedad. El módulo RTC se encuentra en la parte inferior derecha. Los pines X1 y X2 están conectados al cristal para introducirle la frecuencia al integrado. Según la hoja de datos, tanto el cristal como los capacitores C7 y C8 deben estar lo más cerca posible del cristal para

evitar interferencias y mal funcionamiento. El pin XBAT está conectado a una batería para que el módulo continúe funcionando cuando se corte la entrada principal de alimentación en el pin VCC. Los pines SCL y SDA pertenecen al bus I2C, mientras que el pin MFP notifica las alarmas que se tengan configuradas en el RTC. Estos tres pines están conectados al microcontrolador.

En la mitad de la parte izquierda está la memoria EEPROM cuya dirección de comunicación en la red I2C se configura a través de los pines A0, A1 y A2. Los pines SCL y SDA están conectados al bus I2C con el integrado. Arriba de la memoria EEPROM tenemos el control del ventilador, el cual se encarga de refrigerar el disipador de LEDs. El ventilador se controla a través de un optoacoplador para proteger el integrado junto con un transistor tipo MOSFET de canal N para manejar la potencia.

La Figura 9b describe el PCB de control. Este PCB fue diseñado a dos capas en fibra de vidrio con un espesor de lámina de 1.6 mm, un espesor del cobre de 35 micras y un color verde para el antisolder.

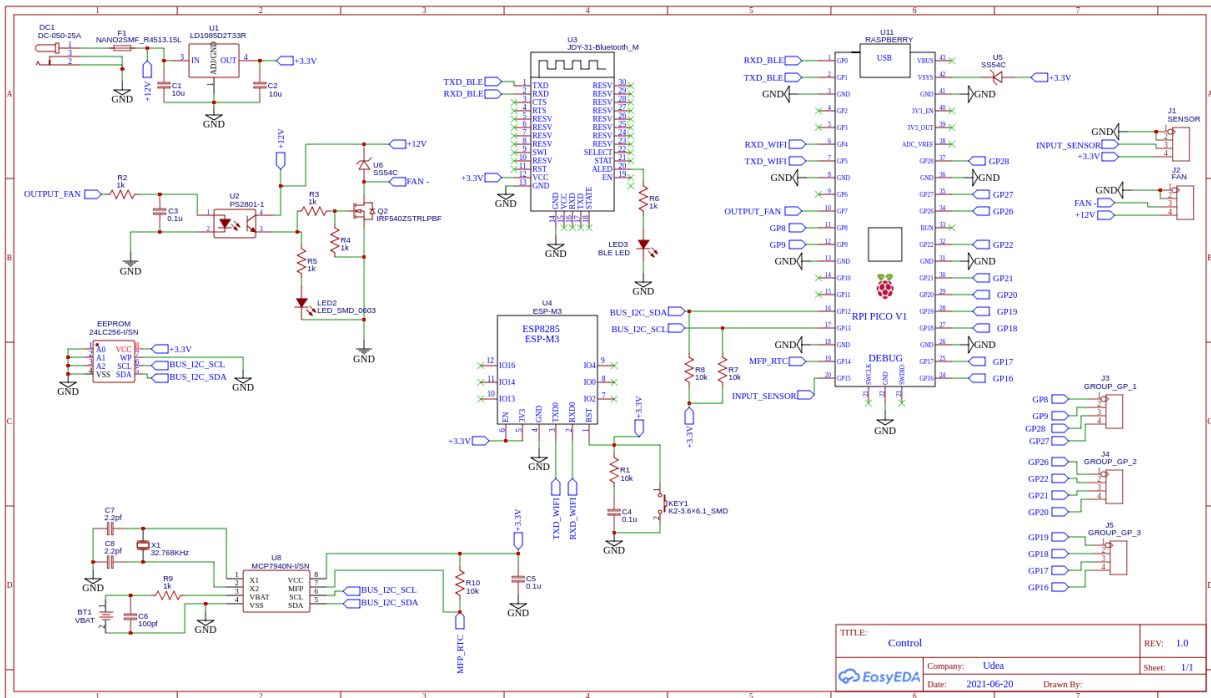
8.2.3. Tarjeta de LEDs

El esquemático de la tarjeta de LEDs se muestra en la Figura 11b. Esta tarjeta tiene 9 salidas en donde están conectadas diferentes series de LEDs. Cada serie está compuesta por un solo color, exceptuando el color White de $6500^{\circ}K$, que usa dos series. Esto se debe a que la alimentación utilizada es de 12 voltios, mientras que los 6 LEDs usados requieren de 17.04 voltios (2.84 voltios por LED). Así que se separaron los LEDs en grupos de tres, dando como resultado un consumo de 8.52 voltios por serie.

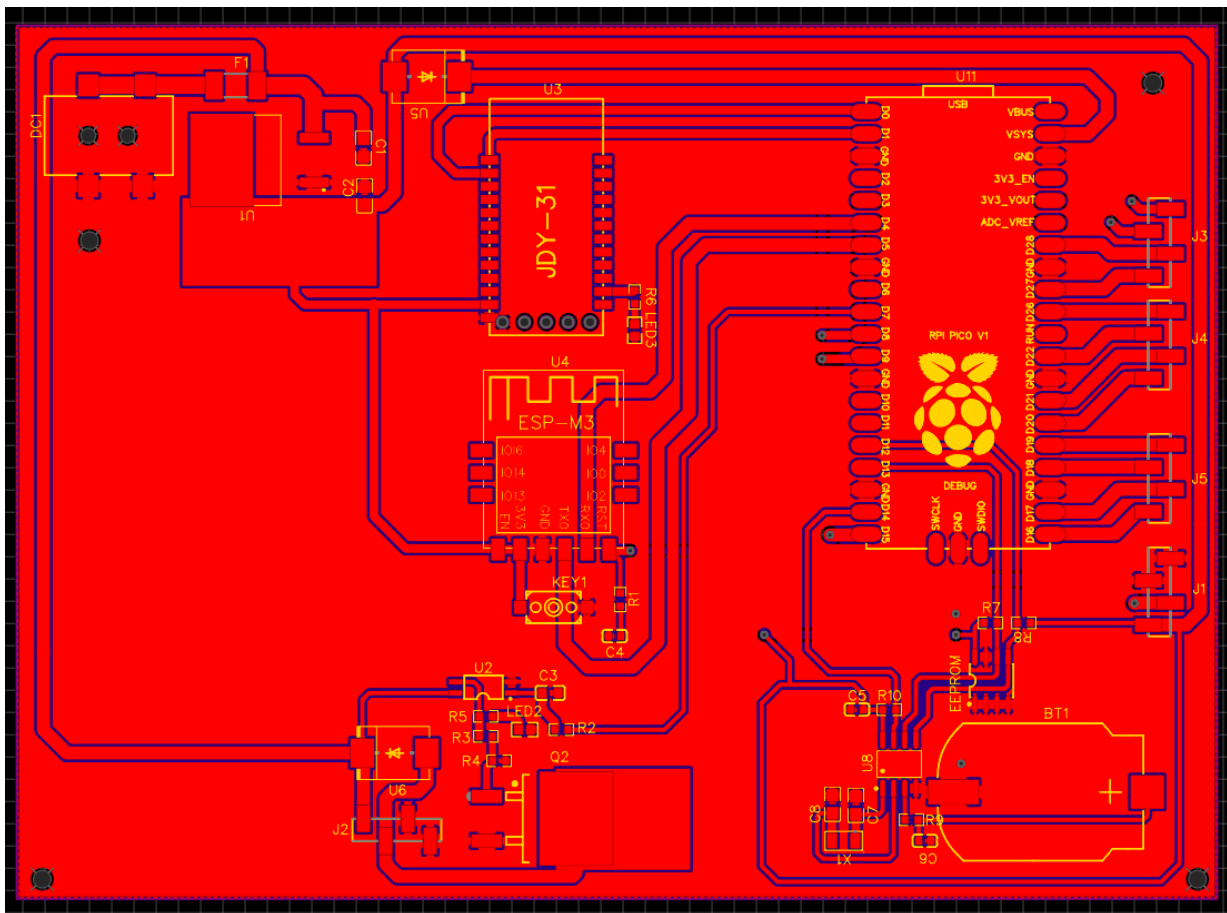
La Figura 11b detalla el PCB para la tarjeta de LEDs. El PCB consta de una sola capa en aluminio de conductividad $1W/mk$, con un espesor de lámina de 2 mm, un espesor del cobre de 35 micras y un color blanco para antisolder.

8.3. Software

En esta sección se explica cómo se desarrolló el software del sistema. El requisito principal del software es poder controlar el hardware de manera adecuada por medio de una interfaz de usuario. Además, el software debe ser escalable, mantenible y reutilizable. Para ello, esta sección se divide en tres partes: FrontEnd, BackEnd, y Microcontrolador. Las siguientes secciones describen el desarrollo de software de cada una de estas partes.

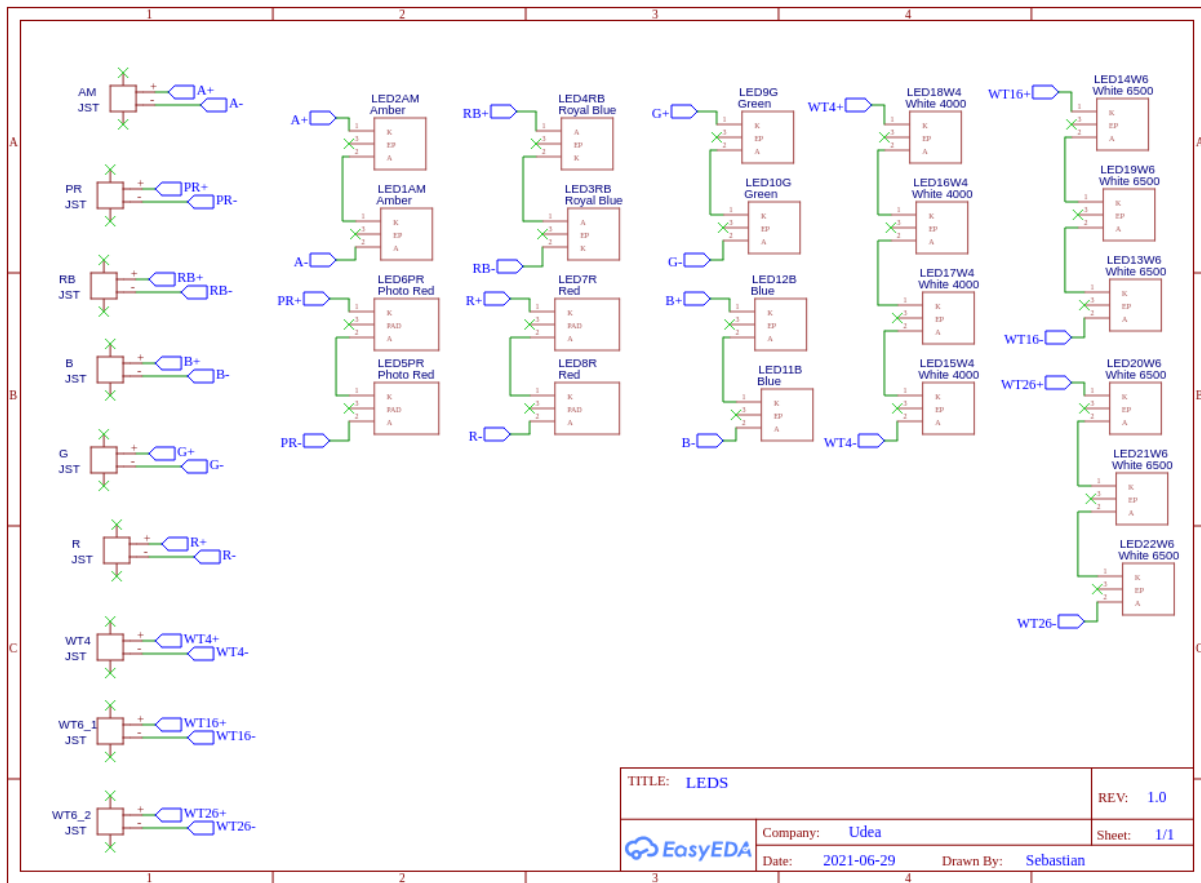


(a) Esquemático.

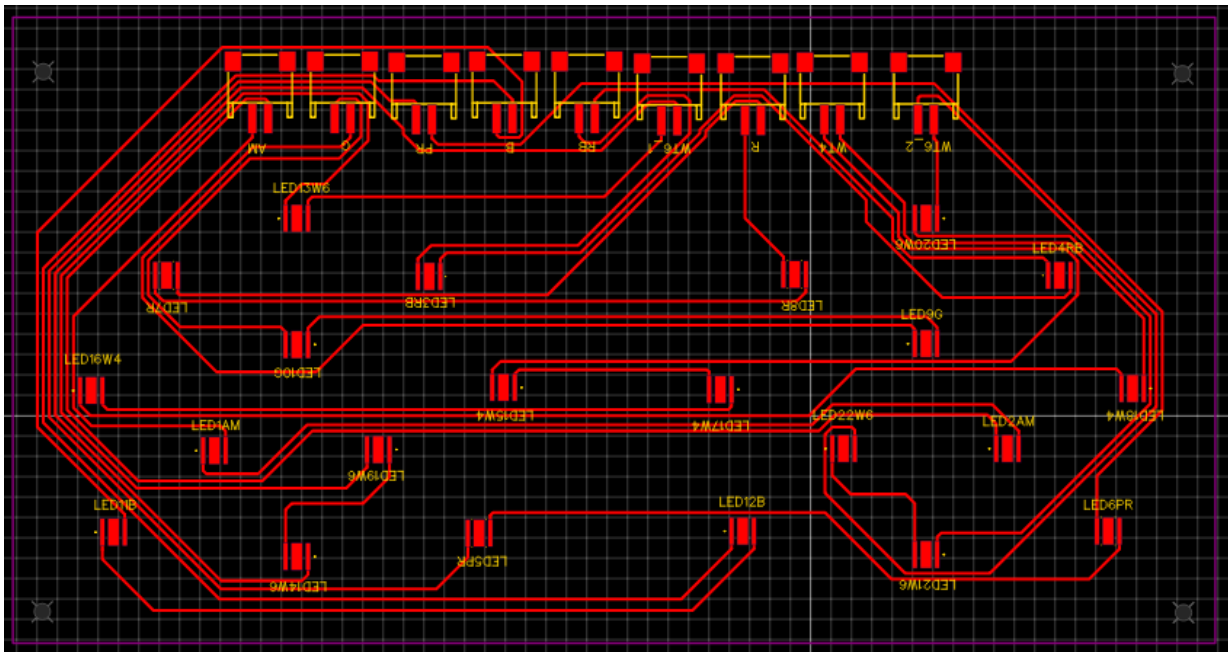


(b) Tarjeta PCB.

Fig. 10. Esquemático y tarjeta PCB del circuito de control.



(a) Esquemático.



(b) Tarjeta PCB.

Fig. 11. Esquemático y tarjeta PCB del circuito de LEDs.

8.3.1. FrontEnd

Por una parte, el aplicativo Web se desarrolló en el Framework Angular en su versión 11. La arquitectura usada en este Framework está basada en componentes cuya comunicación está basada en observables. Los observables son instancias por defecto que permiten la gestión de cualquier evento y cesión de información. Por otra parte, el aplicativo móvil se desarrolló en el SDK Flutter en su versión 2.7. La arquitectura usada en este SDK estaba basada en Widgets cuya comunicación se da a través de servicios. En esencia un componente es similar a un Widget, debido a que ambos son controladores de las vistas en las cuales se incluyen reglas de estilos, servicios como dependencias inyectadas y conjunto de interfaces de datos. Es por esto que cuando se habla de un componente/Widget, se hace referencia a todos los recursos que tiene asociados.

Un componente en Angular se suele almacenar en una carpeta cuyo nombre es el mismo que el del componente. En el componente se almacenan el controlador implementado en Typescript, la vista en archivo HTML y un fichero con las reglas de estilos CSS. Por el contrario, un componente en Flutter consta solo de un archivo de extensión .dart que contiene tanto la lógica, la vista y los estilos del componente. Para ambas herramientas, tanto los modelos como los servicios se almacenan en carpetas independientes y se pueden utilizar en cualquier componente que los requiera. Un ejemplo de una implementación de un componente y sus ficheros se puede observar en la Fig. 12. Para una mayor compresión de los detalles técnicos de ambas herramientas, consulte la documentación oficial ^{1 2}

La arquitectura general de paquetes diseñada para la aplicación FrontEnd se describe en la Fig. 13.

Como se observa en la figura, la raíz del proyecto contiene cuatro carpetas principales: **e2e**, **assets**, **environments** y **app**. La función de cada uno de los paquetes se explica a continuación:

e2e: paquete de extremo a extremo en donde se almacenan los test implementados en Typescript.

assets: paquete en el que se almacenan recursos estáticos que utiliza la aplicación tales como:

texto plano, imágenes, vídeos, audios, entre otros. Esto evita tener que pedir estos recursos al BackEnd.

environments: paquete en el que se almacenan las variables de entorno del aplicativo. Allí se almacenan las configuraciones de los diferentes tanto del entorno de desarrollo como de

¹Enlace documentación Framework Angular: <https://angular.io/>

²Enlace documentación SDK Flutter: <https://flutter.dev>

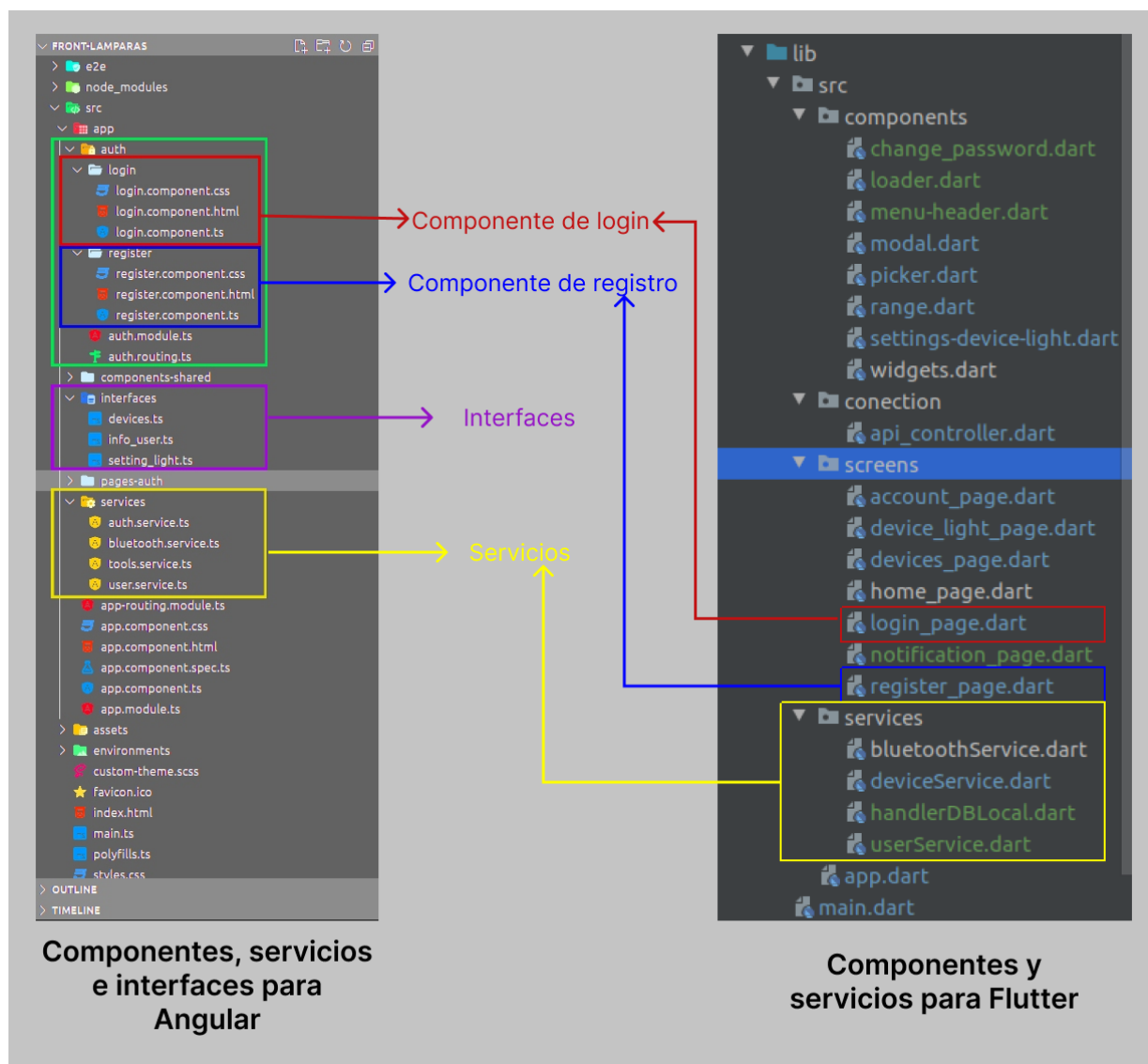


Fig. 12. Encarpetado de la aplicación web y móvil (componentes, interfaces, vistas y servicios).

producción.

app: paquete que incluye el código fuente de toda la aplicación. Está dividido por subpaquetes más pequeños, los cuales permiten tener el aplicativo más legible y de fácil mantenimiento.

auth: paquete que contiene la lógica de los módulos de registro y logueo de usuario.

components-shared: paquete que contiene una colección de componentes compartidos entre los módulos de la aplicación.

interfaces: paquete que contiene los diferentes modelos de datos de la aplicación.

pages-auth: paquete que contiene las diferentes páginas que requieren una previa autori-

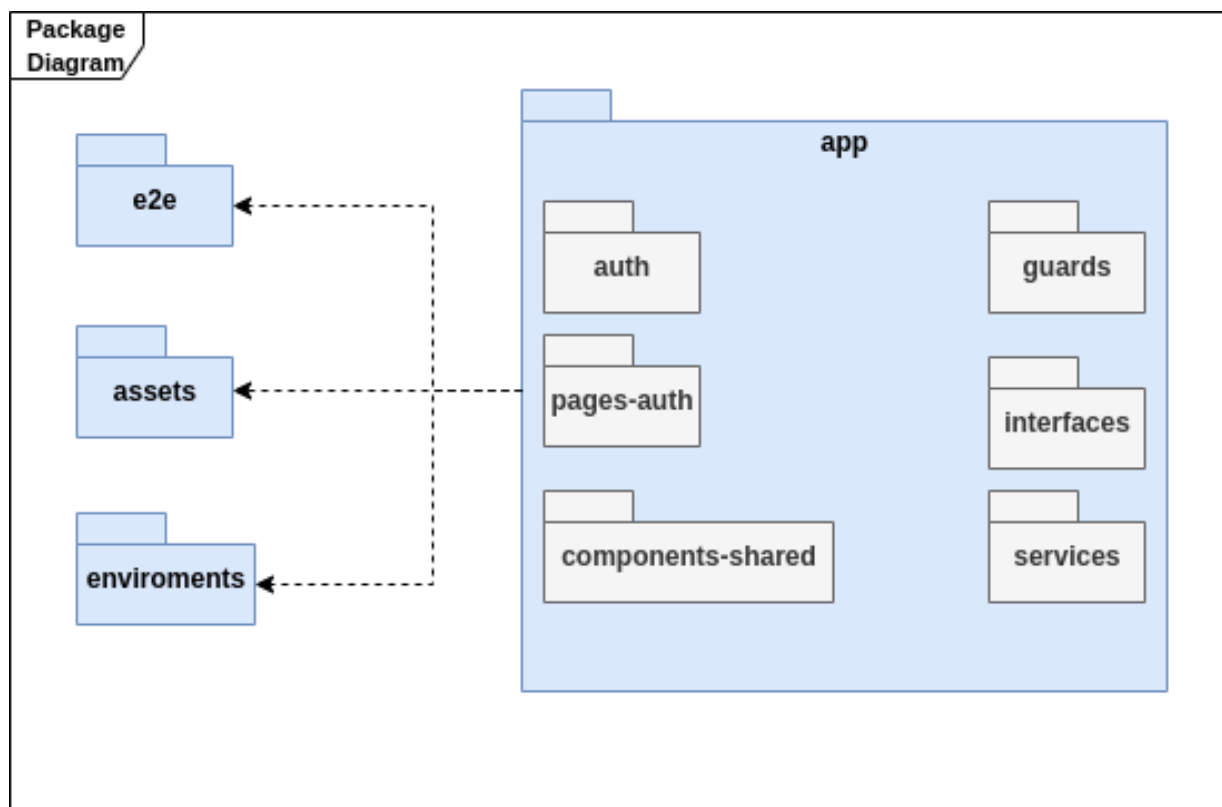


Fig. 13. Diagrama UML de paquetes simplificado, con la arquitectura de paquetes de la aplicación. .

zación para visualizar su contenido.

services: paquete que contiene la lógica de comunicación hacia el BackEnd.

guards: paquete que contiene los métodos de autorización para la navegación entre las diferentes rutas de la aplicación.

Por último, tanto la aplicación web como móvil tiene el mismo flujo lógico. Este flujo se describe en la Fig. 14. Inicialmente, cuando un nuevo usuario ingresa a la página, se le solicita la autenticación a través de la interfaz de logueo, la cual es simple, ya que solo requiere del correo y la contraseña del usuario. Si el usuario se encuentra registrado, pero ha olvidado su contraseña, él podrá restablecer su contraseña para poder ingresar a la aplicación. Si el usuario no cuenta con un registro, se le solicita uno a través de la vista de registro. Esta segunda interfaz está basada en un breve formulario donde se le pide al usuario su nombre, su correo electrónico, su contraseña y la repetición de la misma. Una vez el usuario esté autenticado, la aplicación lo redirigirá al dashboard principal en donde se muestran las lámpara vinculadas a su cuenta. Esta vista permite vincular una nueva lámpara de acuerdo a aquellas que se encuentran cerca de dispositivo. Para agregar la lámpara se le solicita al usuario que acepte los permisos de acceso al recurso

Bluetooth para proceder con la vinculación. Cuando se selecciona una lámpara, al usuario puede seleccionar cuatro vistas posibles: información general, operación automática, operación manual y simulación de efectos. La vista de información general es la que se le muestra al usuario por defecto una vez selecciona la lámpara. Allí el usuario podrá actualizar tanto el nombre, la hora del RTC y el tipo de configuración del dispositivo, así como el nombre y la contraseña de la red WIFI si se desea comunicar a través de este medio y no por Bluetooth. La vista de operación automática permite al usuario configurar una rampa de encendido y apagado así como la intensidad lumínica de cada canal de la luminaria. Estas configuraciones permiten simular los comportamientos naturales del sol desde que amanece hasta que anochece. Por otra parte, la vista de operación manual solo permite la hora de encendido y apagado así como también la intensidad lumínica de cada canal. Finalmente, la vista de efectos permite al usuario simular algunas condiciones climáticas como tormenta y cielo nublado, con el fin de imitar condiciones naturales a las que están sometidas las plantas en su hábitat. En el anexo A se muestran las vistas resultantes tanto web como móvil descritas anteriormente.

8.3.2. BackEnd

El Backend fue desarrollado en el lenguaje de programación JavaScript, utilizando el entorno desarrollo NodeJS en su versión 14. Este entorno está optimizado trabajar en la capa del servidor. Se usó este lenguaje, ya que brinda gran eficiencia, escalabilidad y mantenibilidad, además de contar con una gran comunidad activa.

La construcción del Backend se orientó a microservicios, debido a que permite dividir la aplicación en funcionalidades específicas. Esto se traduce en segmentar el código en pequeños fragmentos que se encargan de pequeñas responsabilidades en la aplicación. Esta metodología orientada a microservicios permite lograr una aplicación de alta disponibilidad y escalabilidad.

Teniendo en cuenta las funcionalidades que necesita la aplicación, se decidió crear los servicios mostrados en la Fig. 16. La función de cada uno de estos microservicios se muestra a continuación:

auth: servicio encargado de la autenticación y el registro del usuario.

middleware: servicio encargado de validar los datos de entrada de cada consulta. Además, genera y valida el token de inicio de sesión.

notification: servicio encargado de administrar las notificaciones.

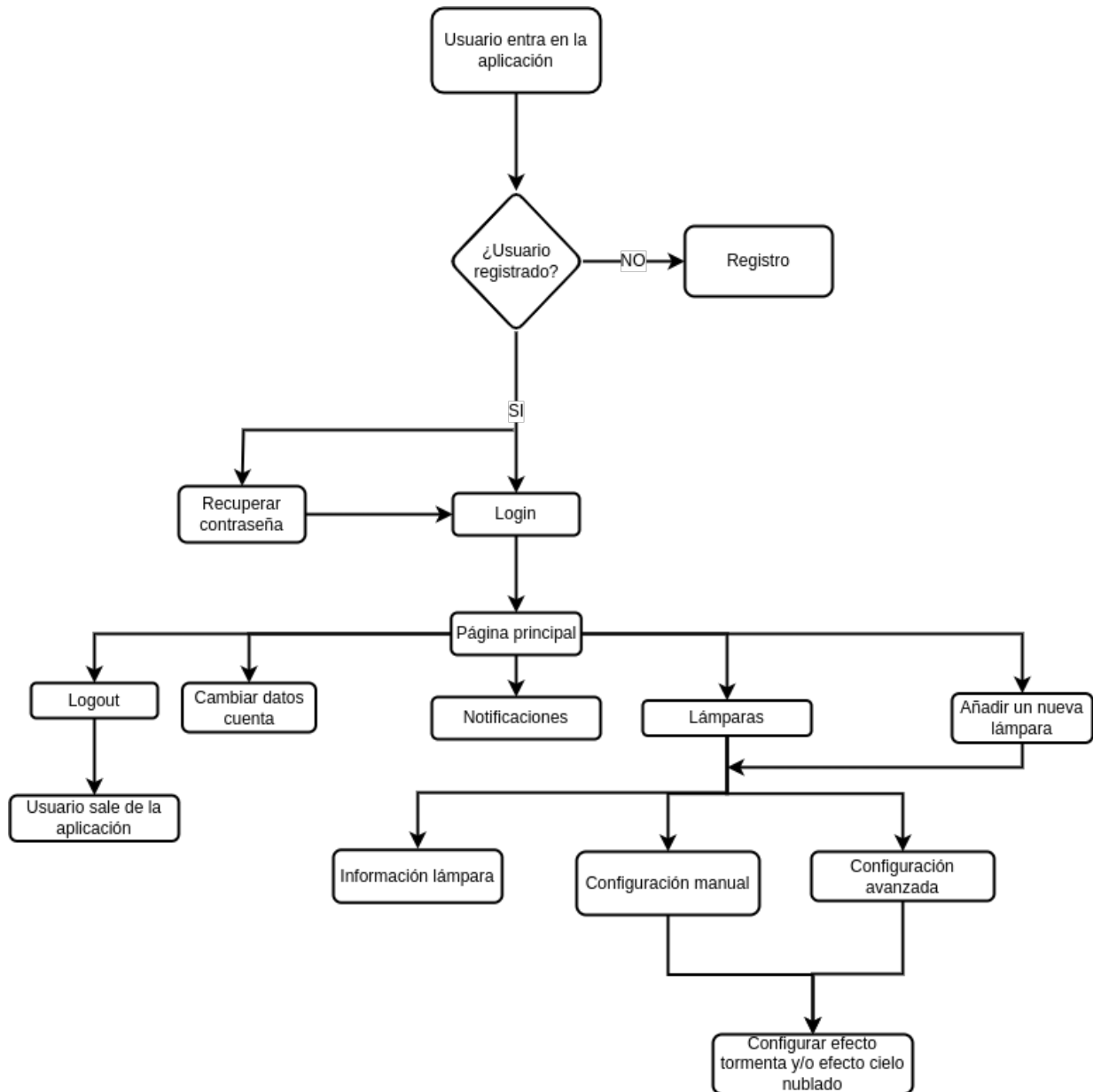


Fig. 14. Diagrama de flujo FrontEnd

recover_password: servicio encargado de gestionar la recuperación de cuentas de usuario.

handler_profile_user: servicio encargado de devolver o actualizar los perfiles de los usuarios.

handler_device: servicio encargado de realizar las siguientes funciones: consultar los dispositivos asociados a un usuario, actualizar la información básica de un dispositivo y asignar un nuevo dispositivo a un usuario.

configure_device: servicio encargado de obtener o actualizar la configuración de un dispositivo.

Adicionalmente, el diagrama de flujo que representa la lógica del Backend se muestra en la Fig. 15.

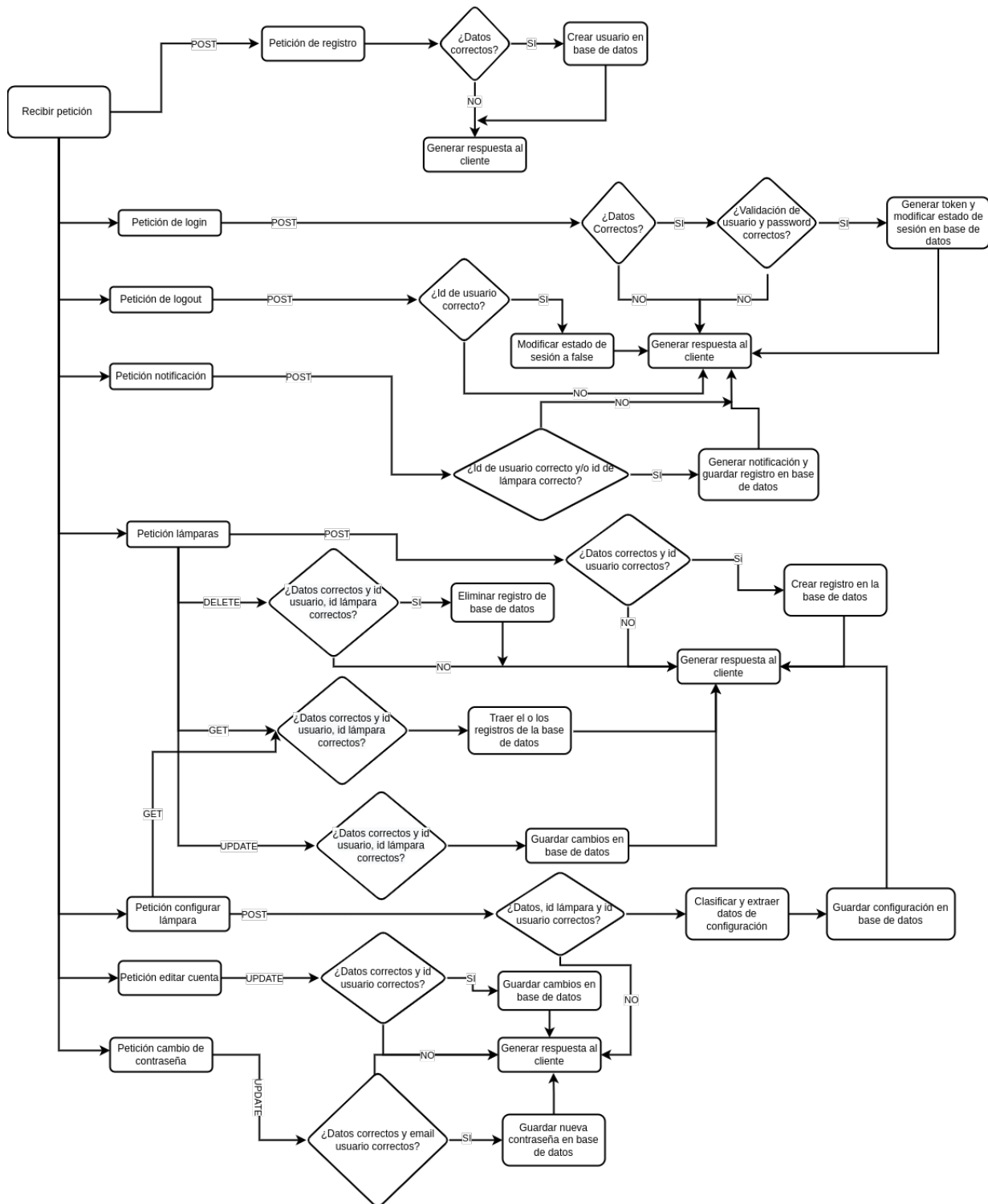


Fig. 15. Diagrama de flujo BackEnd

8.3.3. Microcontrolador Raspberry Pi Pico

El software del microcontrolador se desarrolló en el IDE Thony, el cual es un entorno de desarrollo que soporta tanto Python como MicroPython. Este trabajo usó MicroPython, el cual es un pequeño pero eficiente intérprete basado en Python y optimizado para funcionar en micro-

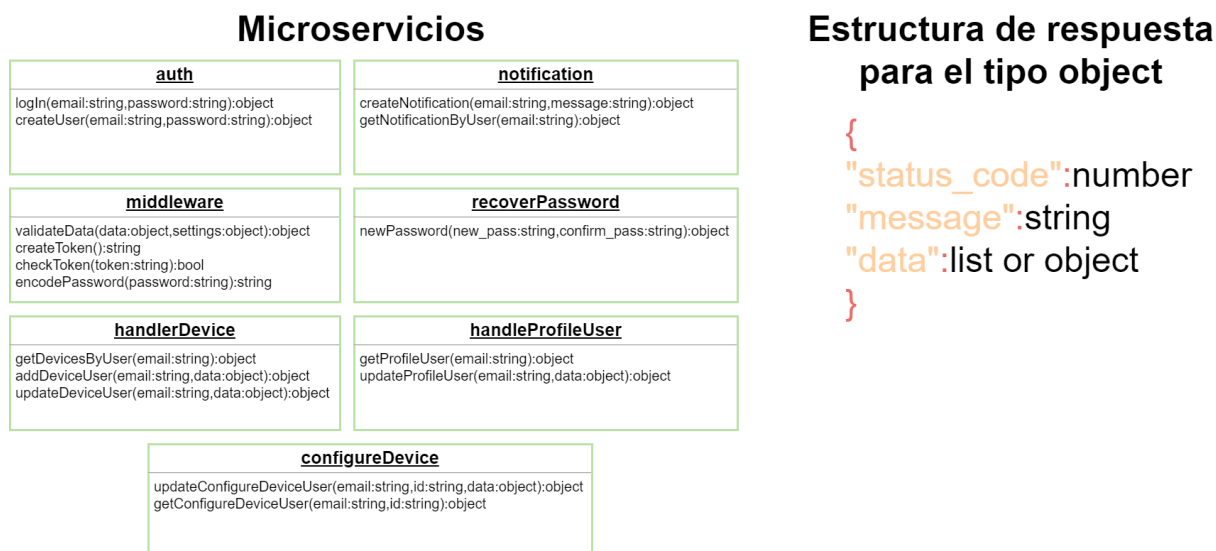


Fig. 16. Detalle de las funciones de cada microservicio

controladores y ambientes de recursos limitados.

Para utilizar MicroPython en el microcontrolador, fue necesario realizar las configuraciones dadas por el fabricante en su documentación oficial ³.

Teniendo en cuenta las funcionalidades que necesita cubrir el microcontrolador, se decidió crear las clases mostrados en la Fig. 17. La función de cada una de estas clases se muestra a continuación:

HandleTemperature: clase encargada de controlar y monitorear la temperatura del disipador.

Esta clase dispone de los siguientes métodos:

getTemperature: método encargado de leer el pin de entrada del sensor de temperatura DS18B20 y devolver la temperatura en °C.

onFan: método encargado de encender el ventilador cuya función es extraer la temperatura del disipador.

offFan: método encargado de apagar el ventilador.

controlTemperature: método encargado de controlar la temperatura del disipador. El control se hace a través al comparar la temperatura actual con el setpoint fijado 28°C.

RTC: clase encargada de controlar el integrado de tiempo real MCP7940MT a través del bus I2C. Esta clase dispone de los siguientes métodos:

³Enlace documentación Raspberry: <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/micropython.html>

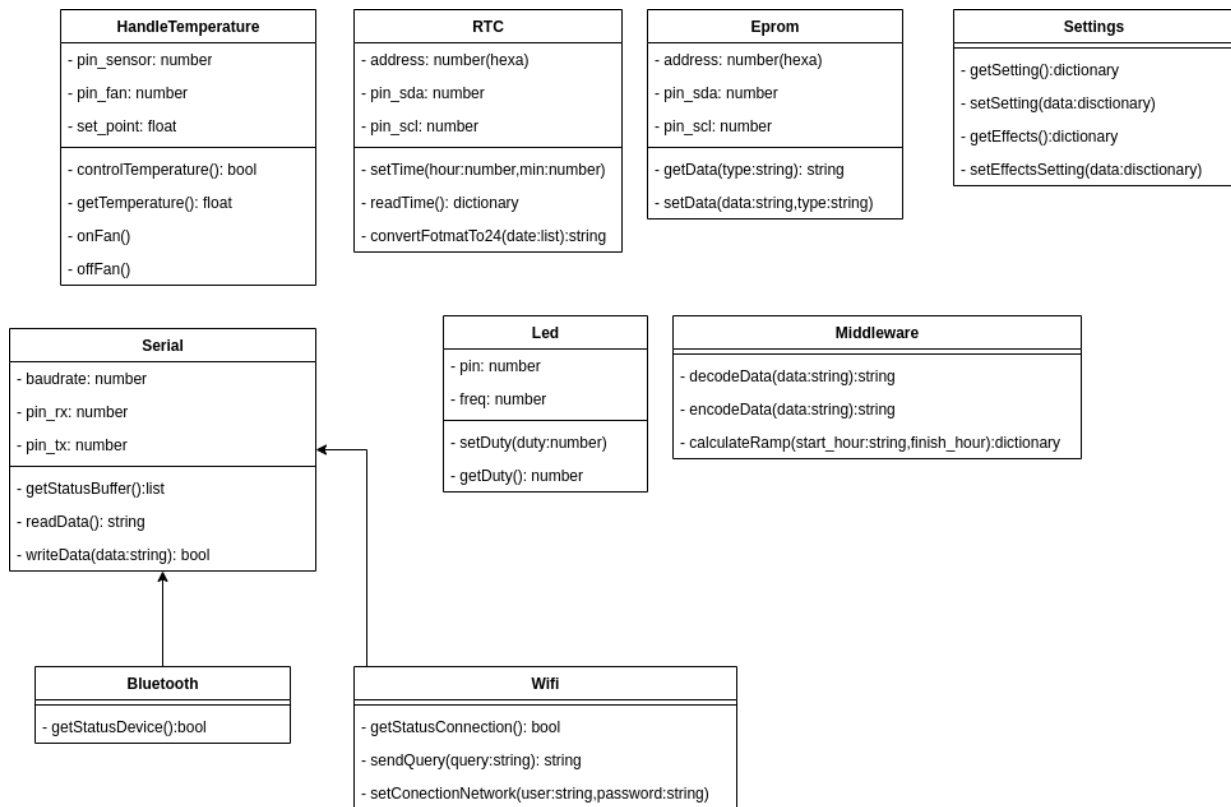


Fig. 17. Clases implementadas para cubrir las funcionalidades en el microcontrolador

setTime: método encargado de comunicarse con el RTC para configurar la hora.

readTime: método encargado de comunicarse con el RTC para leer la hora.

convertFormatTo24: método encargado de cambiar el formato de hora de 12 a 24.

Serial: clase encargada de administrar el serial, la cual dispone los siguiente métodos:

getStatusBuffer: método encargado de verificar si hay datos en el buffer del serial.

readData: método encargado de leer los datos del buffer del serial.

writeData: método encargado de escribir los datos que entran como argumento en el serial.

Bluetooth: clase encargada de administrar el módulo Bluetooth JDY-30 a través del serial. Para ello dispone los siguientes métodos:

getStatusDevice: método encargado de verificar el estado de conexión del módulo Bluetooth.

Wifi: clase encargada de administrar el módulo WIFI ESP8285 a través del serial. Para ello dispone de los siguientes métodos.

getStatusConnection: método encargado de verificar el estado de conexión del módulo WIFI.

sendQuery: método encargado de consumir los endpoints del API según el argumento de entrada.

setConnectionNetwork: método encargado de conectar el módulo ESP8285 a la red WIFI que se le pasa por los argumentos.

Eeprom: clase encargada de administrar el módulo Eeprom 24LC256-I/SN a través del bus I2C. Para ello dispone los siguientes métodos.

getData: método encargado de comunicarse con la memoria Eeprom para leer los datos almacenados.

setData: método encargado de comunicarse con la memoria Eeprom para almacenar información.

Settings: clase encargada de administrar las configuraciones de la lámpara. Para ello dispone los siguientes métodos:

getSetting: método encargado leer la configuración actual de la lámpara en la memoria Eeprom.

setSetting: método encargado de escribir una nueva configuración de la lámpara en la memoria Eeprom.

getEffects: método encargado de leer los efectos de la lámpara almacenados en la memoria Eeprom.

setEffects: método encargado de escribir una nueva configuración de los efectos de la lámpara en la memoria Eeprom.

Led: clase encargada de controlar la intensidad de los LEDs. Para ello dispone los siguientes métodos:

setDuty: método encargado de actualizar el ciclo de dureza de la salida PWM para controlar la luminosidad de los diferentes canales de LEDs.

getDuty: método encargado de devolver el ciclo de dureza al que se encuentra la salida PWM.

Middleware: clase que contiene las operaciones intermedias que apoyan a lógica principal. Estas operaciones intermedias se describen como:

decodeData: método encargado de decodificar la información entrante por los diferentes medios de comunicación. Como nuestra comunicación esta basada en comandos de texto, esta función los interpreta.

encodeData: método encargado de codificar la información saliente hacia clientes conectados.

calculateRamp: método encargado de calcular la rampa de encendido o apagado que tendrá la lámpara cada que se ejecuta una interrupción por Timer.

Adicionalmente, el diagrama de flujo que representa la lógica implementada en el microcontrolador se muestra en la Fig. 18.

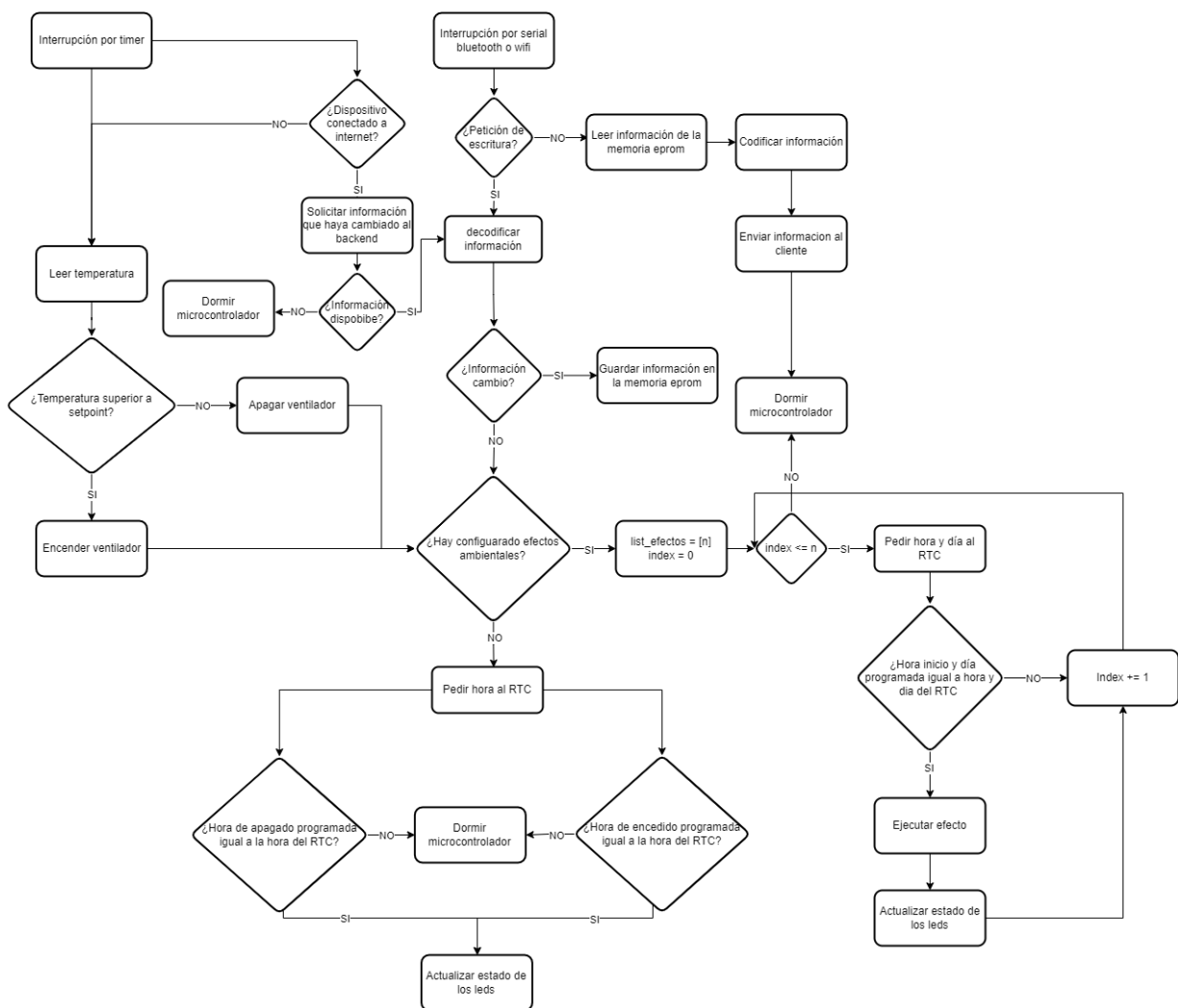


Fig. 18. Diagrama de flujo microcontrolador

8.4. Arquitectura

Para el despliegue de una aplicación web existen principalmente dos formas: La primera es tener una infraestructura física, la cual implica una inversión inicial elevada para la compra del hardware necesario, así como de la configuración y administración del mismo. La segunda es utilizar un proveedor de servicios informáticos en la nube como: Google, AWS, Azure, IBM entre otros. Que brindan todo un ecosistema para la implementación y administración de infraestructura en la nube. En nuestro caso se optó por escoger la segunda opción por las siguientes ventajas: bajo costo de implementación, pago solo por los recursos empleados y alta disponibilidad. En cuanto al proveedor de nube, el escogido fue AWS porque tiene una capa gratuita con más cantidad de peticiones por mes en los servicios que necesitamos e incluso algunos de ellos la capa gratuita es de por vida. Caso contrario con los demás proveedores, que aunque tienen capa gratuita, esta tiene menos peticiones por mes y solo tiene vigencia por un año en los servicios que necesitamos.

Dado que la arquitectura del Backend está orientada a microservicios, la mejor opción para su implementación fue las funciones Lambdas de AWS. Este tipo de servicio permite ejecutar código sin necesidad de aprovisionar o administrar algún servidor. El cliente solo se debe preocupar que la lógica de negocio funcione correctamente y AWS se encarga de aprovisionar el hardware necesario. Es decir que cuando una función Lambda se ejecuta, AWS aprovisiona temporalmente una infraestructura informática de alta disponibilidad y realiza tareas de administración de recursos, incluido el sistema operativo, con el fin de que el microservicio funcione adecuadamente. La infraestructura temporal solo dura hasta que la función termine. De esta manera, el cliente solo debe pagar por este tiempo de ejecución.

Sin embargo, la función Lambda por sí solo no se puede acceder públicamente. Por lo tanto, se necesita de un servicio adicional que exponga públicamente el microservicio a través de endpoint. Este servicio se conoce como API Gateway. El método de comunicación del API Gateway es a través de peticiones HTTP. Adicionalmente, esta herramienta gestiona todas las tareas relativas a la aceptación y procesamiento de cientos de miles de llamados simultáneos. Además, de administrar el tráfico, gestiona todo el control de autorización y acceso al microservicio.

Adicionalmente, nuestra arquitectura cuenta con un sistema de almacenamiento persistente de toda la información relativa a los usuarios. Para ellos se eligió la base de datos no relacional conocida como DynamoDB, el cual es un servicio totalmente administrado. Además, ofrece

un alto rendimiento y escalabilidad. Esta herramienta permite crear tablas con capacidad para almacenar y recuperar cualquier cantidad de datos, así como atender cualquier nivel de tráfico. Se puede escalar la capacidad de rendimiento de las tablas sin tiempo de inactividad ni reducción de desempeño.

Por último, para completar la arquitectura del sistema, se usó el servicio Amazon S3 para desplegar el Frontend. Este servicio está enfocado en el almacenamiento de objetos ofreciendo alta escalabilidad, disponibilidad de datos, seguridad y rendimiento. Sin embargo, es posible alojar un sitio web estático como es nuestro caso.

Tanto la arquitectura diseñada como su flujo se muestra en la Fig. 19. Como se observa en la figura, la arquitectura es de baja complejidad. Dado que AWS ofrece una capa gratuita de por vida para algunos servicios de infraestructura, como los implicados en este proyecto, el costo de facturación en este momento es 0. Sin embargo, a medida que vaya creciendo el proyecto, estos costos aumentarán paulatinamente. Según nuestras estimaciones, la capa gratuita puede soportar hasta 5 usuario que usen el sistema.

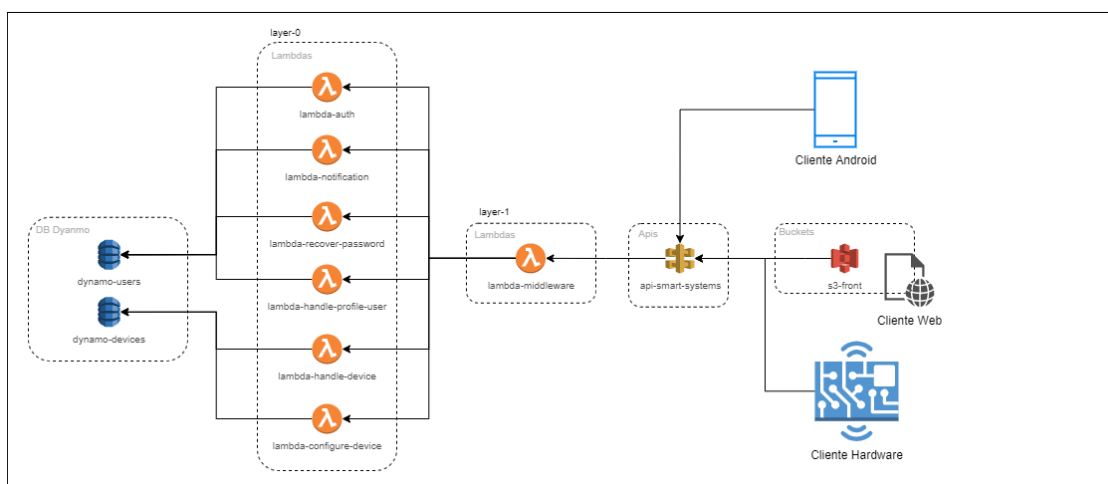


Fig. 19. Arquitectura desarrollada en AWS

9. Experimentos y resultados

Esta sección muestra los resultados obtenidos en el proceso de fabricación de la lámpara. Como se explicó en la sección 8.2, este trabajo desarrollo esencialmente tres tarjetas: la tarjeta de potencia, la tarjeta de control y la tarjeta de LEDs. El resultado final de estas tarjetas se muestra en la Fig. 20. Tanto la MCPCB (tarjeta de LEDs) como las PCB (tarjeta de potencia y de control) se fabricaron con la empresa PCBWay. Todos los componentes fueron soldados usando

soldadura de estaño líquida con punto de fusión de $180^{\circ}C$.

La Fig. 21 muestra el resultado final de lámpara montada sobre un chasis de madera. Tanto la tarjeta de potencia como la de control están dentro del chasis mientras que la tarjeta de LEDs está incrustada en la superficie de inferior de la lámpara. Adicionalmente, la Fig. 23 y la Fig. 22 muestra el montaje de la lámpara sobre la pecera usando todos y cada uno de los canales de emisión de color. Note que en la Fig. 22, la lámpara solo está emitiendo en uno de los cuatro canales disponibles: rojo, azul, verde-ámbar y blanco.

Para verificar la calidad de nuestra lámpara, comparamos nuestro trabajo con las tres mejores luminarias disponibles en el mercado, es decir: Chihiros RGB VIVID2 Mini, ADA AQUASKY MOON 301 C Plug y lámpara Fluval TWINSTAR Serie E. Para comparar las características lumínicas de las lámparas, se tomó como referencia un acuario de $30cm \times 30cm \times 30cm$. Además, se usó un sensor de PAR de la marca Quantum y un luxómetro de la marca Unit para medir los lúmenes. Ambos sensores se ubicaron en tres lugares de medición como se muestra en la Fig. 24. Los resultados de las mediciones así como su promedio se describen en la TABLE XI y TABLE XII para el PAR y la luminosidad, respectivamente. Note que nuestra luminaria alcanzó mayores niveles de PAR y luminosidad con respecto a las lámparas ADA AQUASKY MOON 301 C Plug y Fluval TWINSTAR Serie E.

TABLE X

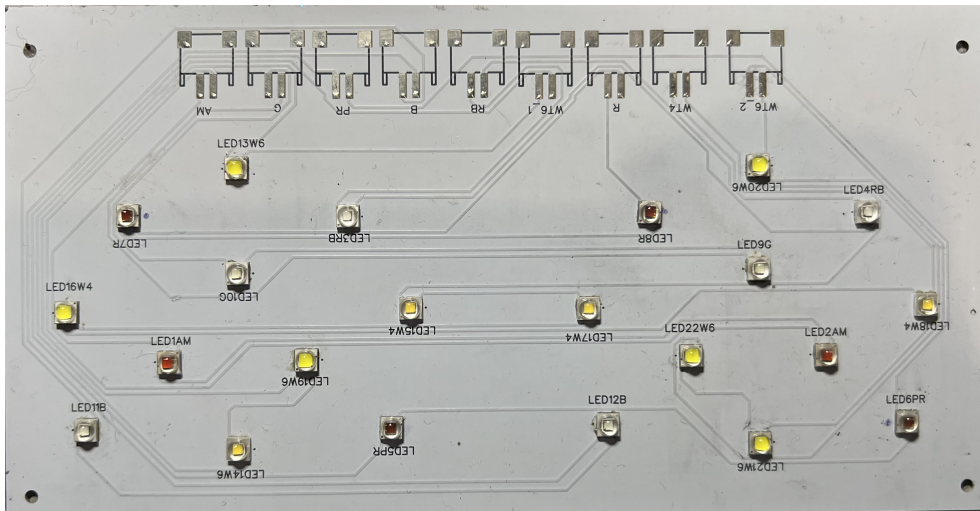
COSTO DE FABRICACIÓN DEL SISTEMA DESARROLLADO PARA DIFERENTES UNIDADES

Dispositivo	Costo de fabricación				
	1(C/U)	10(C/U)	100(C/U)	1000(C/U)	10000(C/U)
Sistema desarrollado	\$834555	\$750360	\$620510	\$470825	\$215963

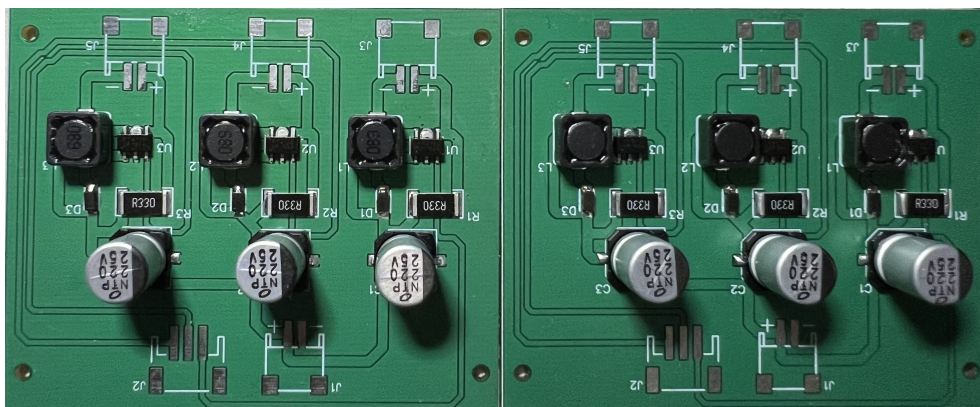
TABLE XI

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES DEL PAR

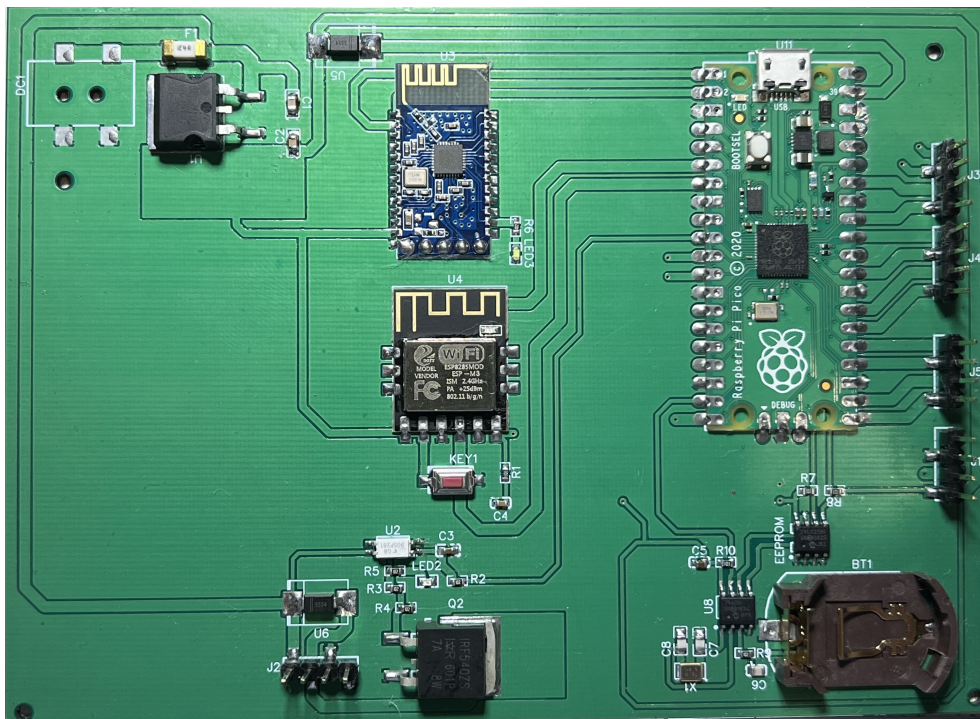
Lámparas	Resultados medición del PAR ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)			
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Chihiros RGB VIVID2 Mini	112.45	115.86	112.98	113.76
ADA AQUASKY MOON 301 C Plug	71.90	73.20	72.60	72.56
Fluval TWINSTAR Serie E	64.36	65.12	64.13	64.53
Sistema Desarrollado	84.65	85.90	84.25	84.93



(a) LEDS.



(b) Potencia.



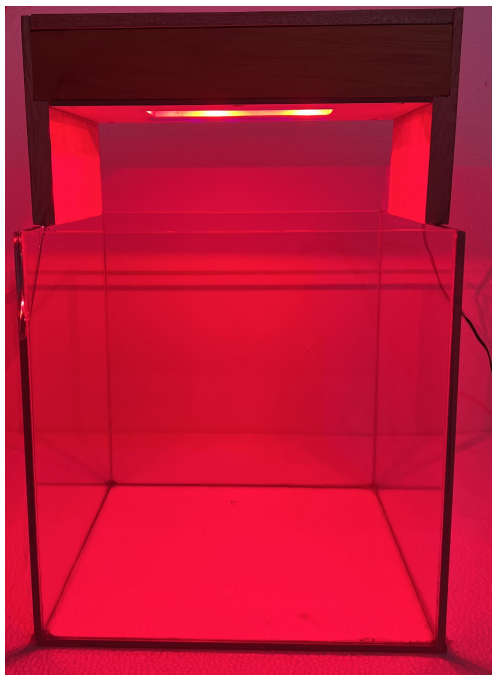
(c) Control

Fig. 20. Tarjetas del sistema diseñado



Fig. 21. Lámpara terminada

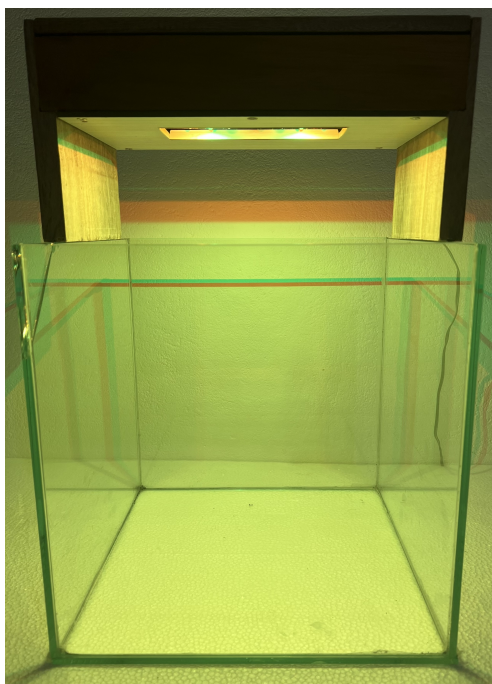
Un resumen general de los resultados obtenidos así como el costo de cada una de las lámparas se reporta en la TABLE XIII. Como se puede observar, nuestra lámpara es la segunda mejor en términos de PAR y luminosidad. Además, en la TABLE X se muestra un costo estimado de fabricación de nuestro sistema para diferentes unidades, allí se puede ver como a medida que se aumentan las unidades de fabricación el costo se reduce notablemente. Aunque este costo solo hace referencia a la fabricación y no tiene en cuenta otros costos como la ganancia, la publicidad entre otros, que hacen que el valor final del producto aumente. Se podría pensar que el costo final



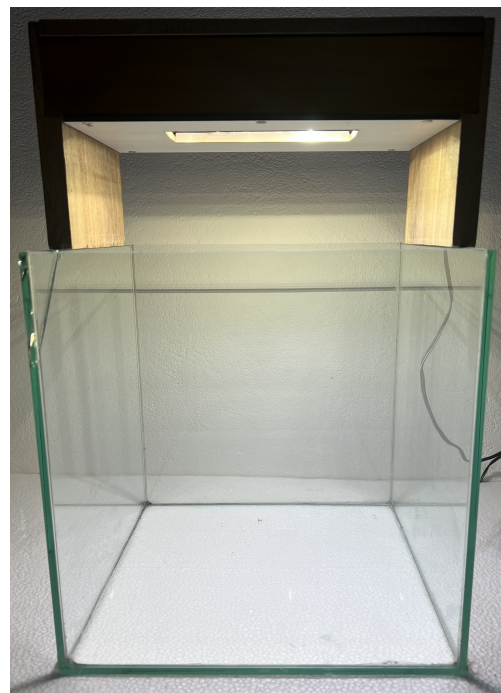
(a) Canal Rojo.



(b) Canal Azul.



(c) Canal Verde-Ámbar.



(d) Canal Blanco.

Fig. 22. Canales configurables de la lámpara.

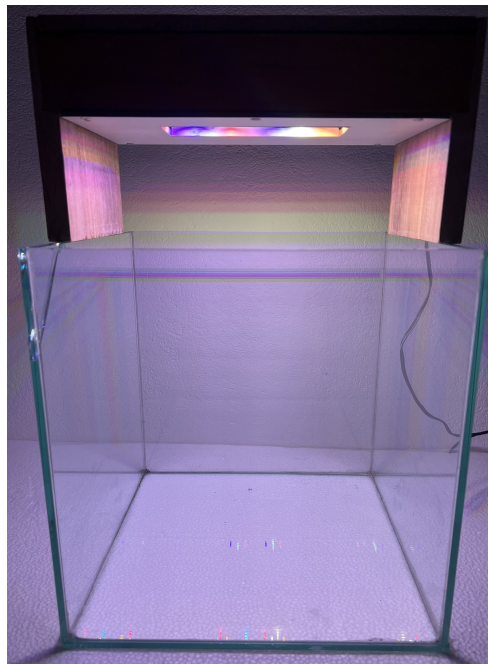


Fig. 23. Lámpara con todos los canales activos

TABLE XII

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES DE LUMINOSIDAD

Resultado mediciones de luminosidad (lm)				
Lámpara	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
Chihiros RGB VIVID2 Mini	3949.50	3950.15	3950.21	3949.95
ADA AQUASKY MOON 301 C Plug	2049.98	2050.25	2050.12	2050.11
Fluval TWINSTAR Serie E	989.98	990.30	989.65	989.97
Sistema Desarrollado	2300.12	2300.40	2299.89	2300.13

del producto luego de agregar estos costos adicionales no supere el costo de la lámpara ADA AQUASKY MOON 301 C Plug ni de la lámpara Chihiros RGB VIVID2 Mini. Ya que se cuenta con un costo de fabricación bajo.

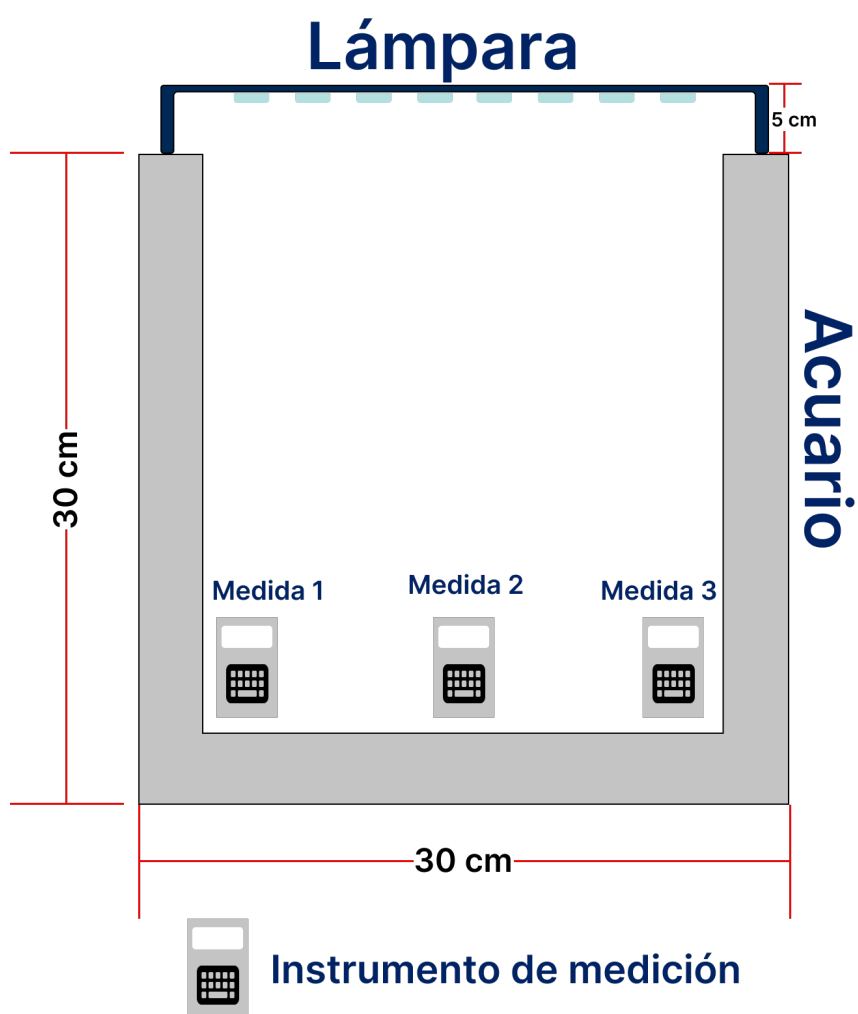


Fig. 24. Estándar de toma de mediciones

TABLE XIII

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MEDICIONES ENTRE LAS DIFERENTES LUMINARIAS

Dispositivo	PAR ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Lúmenes (lm)	Precio (\$)
Chihiros RGB VIVID2 Mini	113.76	3949.95	1600000
ADA AQUASKY MOON 301 C Plug	72.56	2050.11	1100000
Fluval TWINSTAR Serie E	64.53	989.97	830000
Sistema Desarrollado	84.93	2300.13	834555

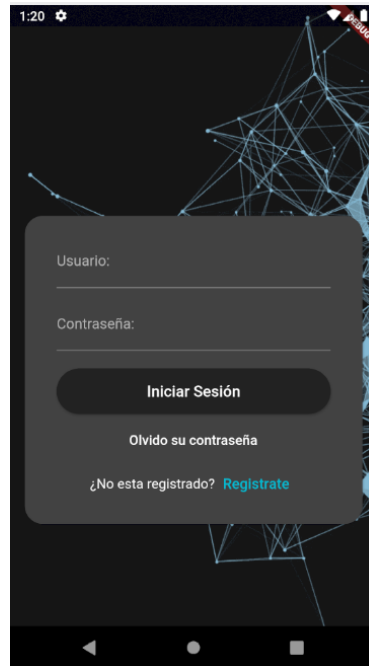
10. Conclusiones

1. El hardware desarrollado proporciona un funcionamiento adecuado de los LEDs, es posible controlar la intensidad lumínica de los diferentes canales, así como de reproducir los diferentes efectos ambientales que el usuario configure.
2. El software implementado tiene la posibilidad de configurar y monitorear el hardware según las necesidades del usuario, mediante interfaces web y móvil de fácil uso.
3. De las mediciones realizadas entre las lámparas que se tomaron como referencia y el sistema desarrollado, se pudo identificar que el sistema desarrollado alcanzó mejores resultados en términos de PAR y luminosidad con respecto a la lámpara ADA AQUASKY MOON 301 C Plug y lámpara Fluval TWINSTAR Serie E.
4. A pesar de que el sistema desarrollado no superó la lámpara Chihiros RGB VIVID2 Mini en términos lumínicos. la lámpara desarrollada resultó ser más económico en la fabricación. Por lo cual creemos que nuestra luminaria puede ser competitiva en el mercado de acuarios nano plantados de agua dulce.

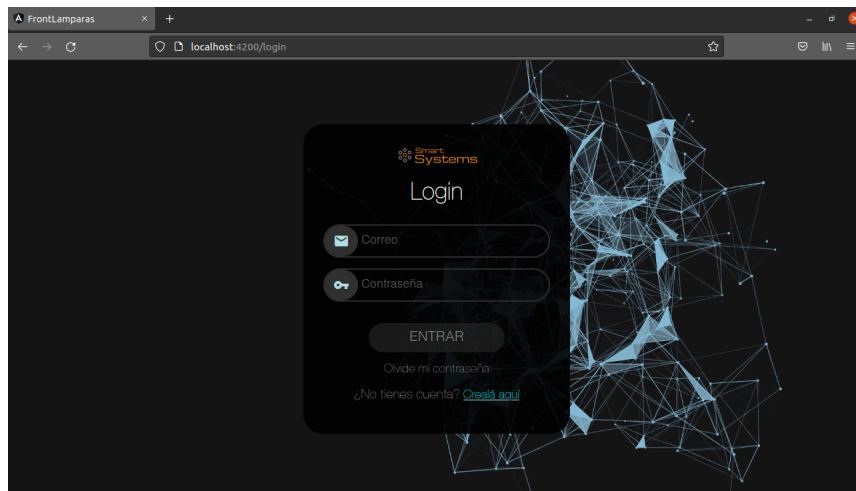
11. Agradecimientos

Agradecimientos al docente Ricardo Andrés Velasquez por su asesoría y guía en la realización de este trabajo. También se le agradece al gerente Jhony Vanegas de la empresa Aquamarket y al gerente Sebastián Puerta de la empresa Deacua por compartir sus conocimientos, experiencias y equipamientos para la realización tanto del sistema de iluminación como de sus pruebas funcionales.

A. Vistas de la aplicación

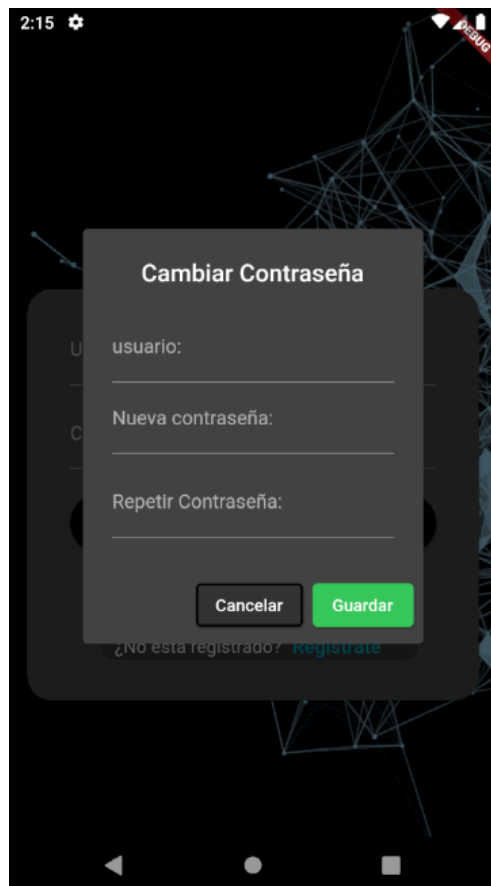


(a) Aplicación móvil.

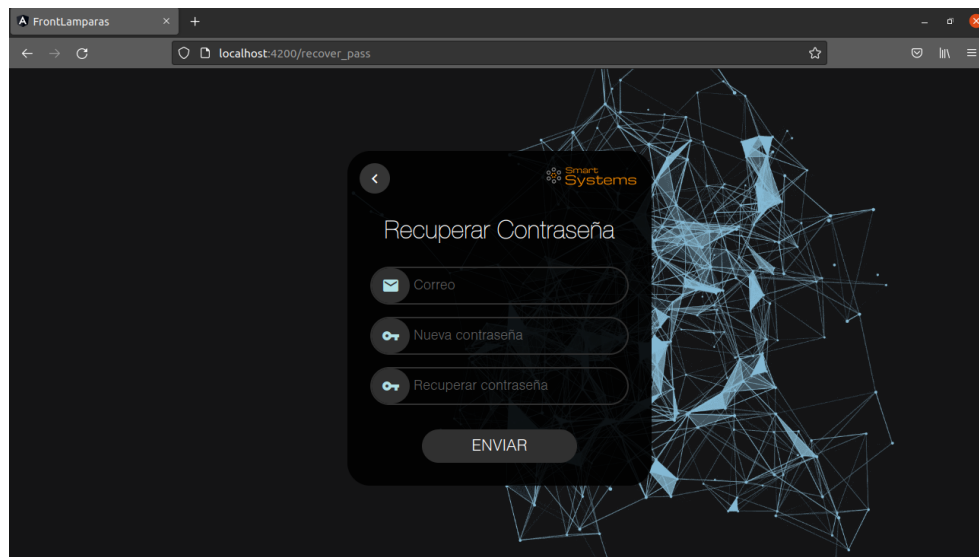


(b) Aplicación web.

Fig. 25. Vista de login.

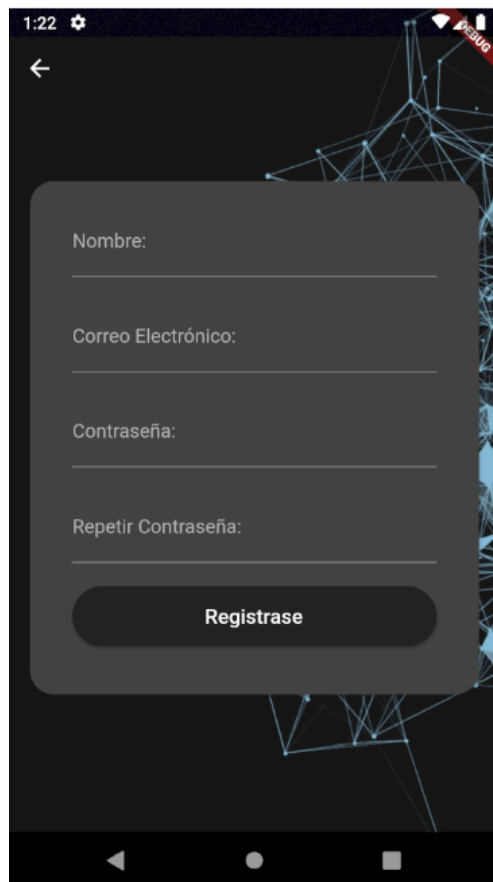


(a) Aplicación móvil.

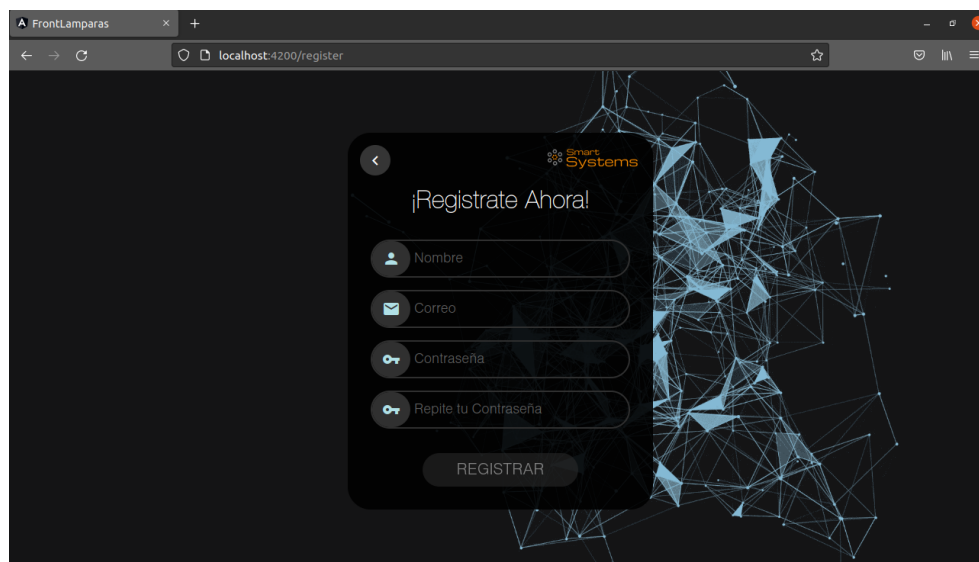


(b) Aplicación web.

Fig. 26. Vista para recuperar la contraseña.

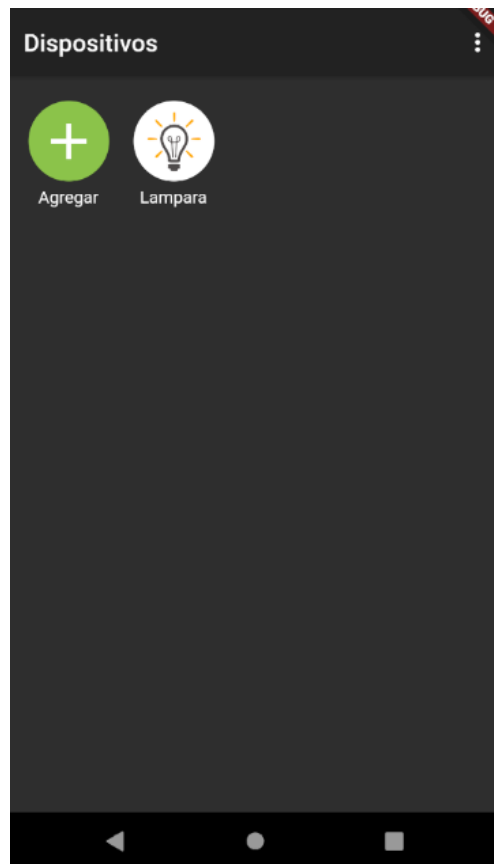


(a) Aplicación móvil.

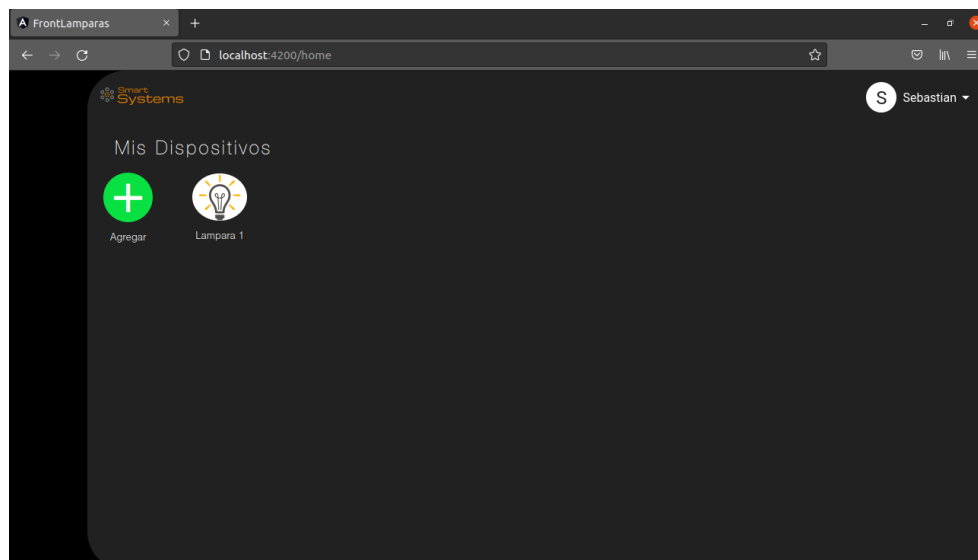


(b) Aplicación web.

Fig. 27. Vista de registro de un nuevo usuario.

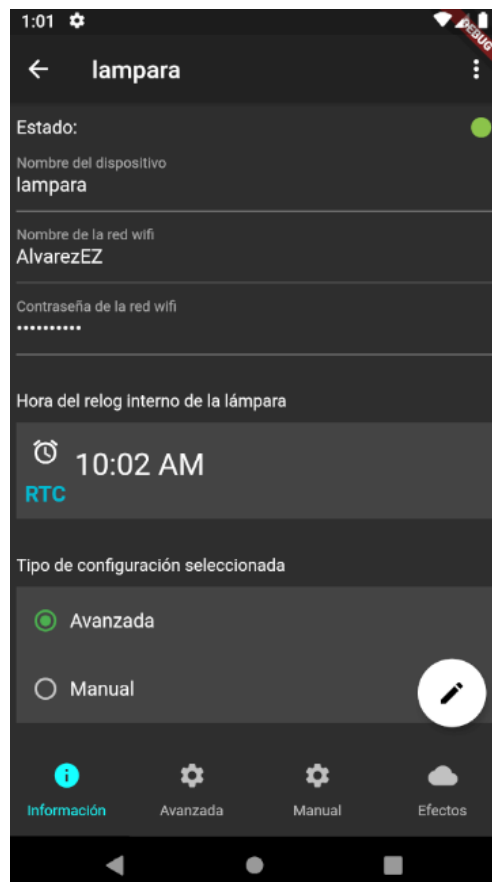


(a) Aplicación móvil.

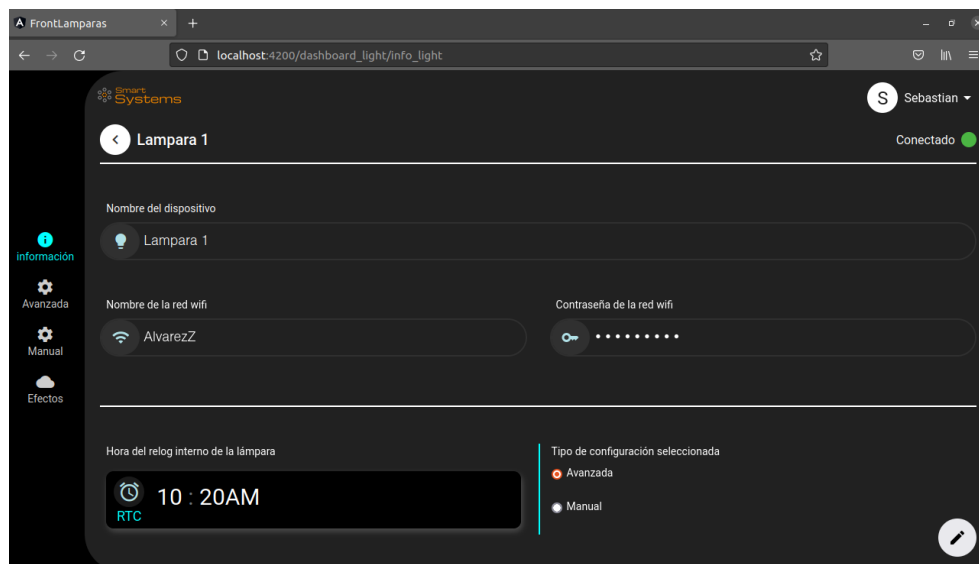


(b) Aplicación web.

Fig. 28. Vista dashboard principal.

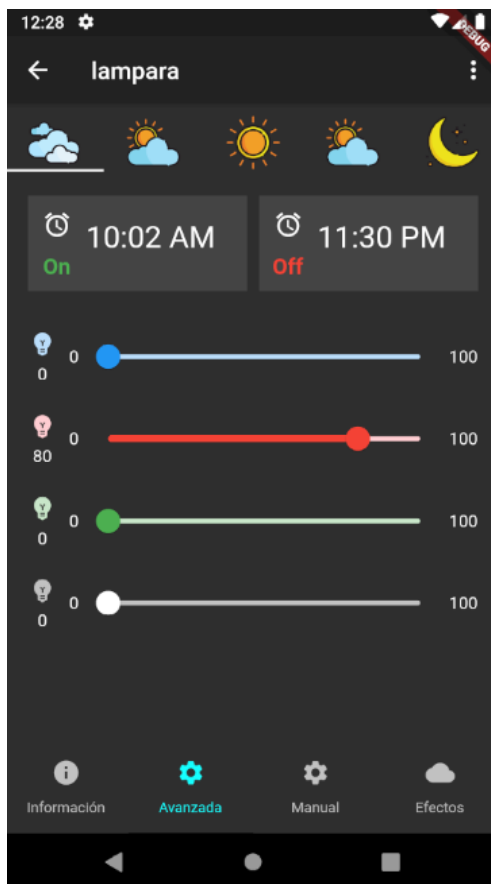


(a) Aplicación móvil.

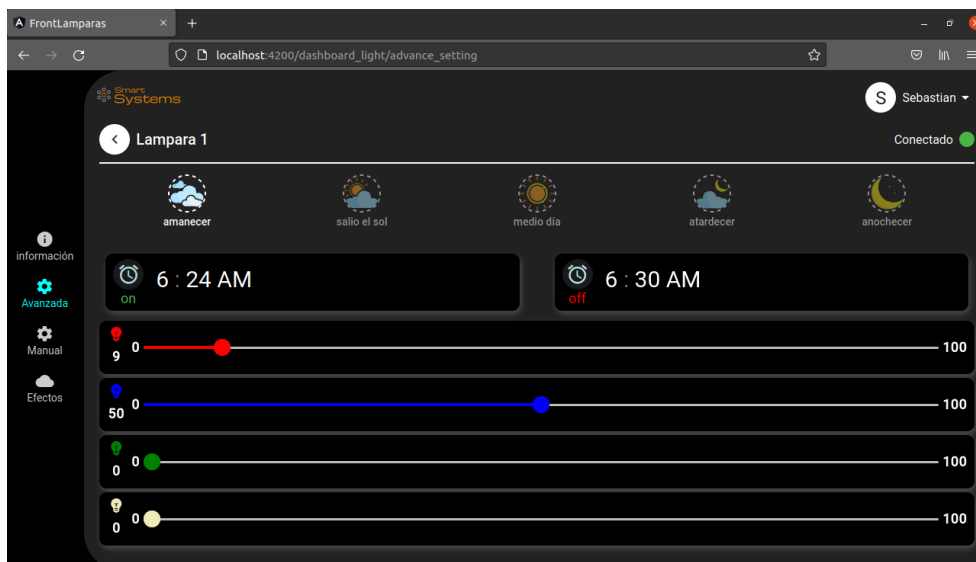


(b) Aplicación web.

Fig. 29. Vista de información general de la lámpara.

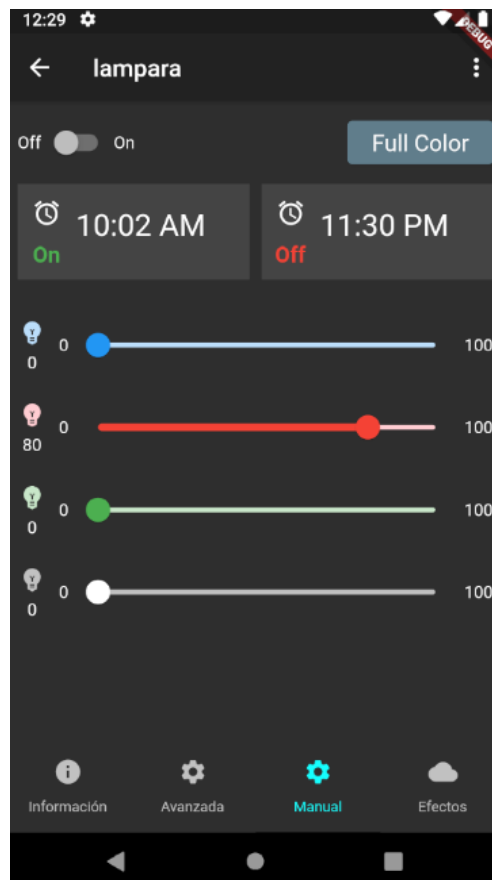


(a) Aplicación móvil.

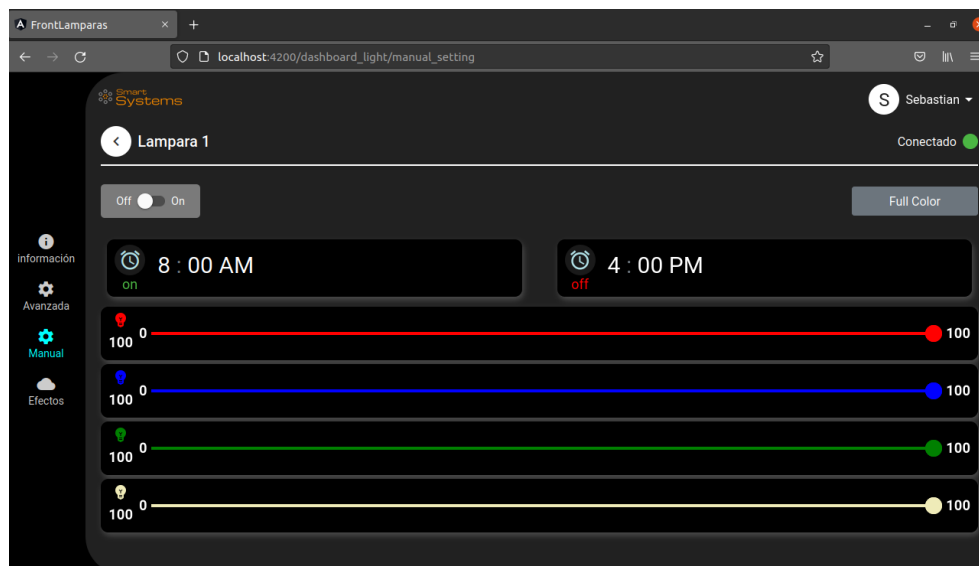


(b) Aplicación web.

Fig. 30. Vista de configuración avanzada de la lámpara.

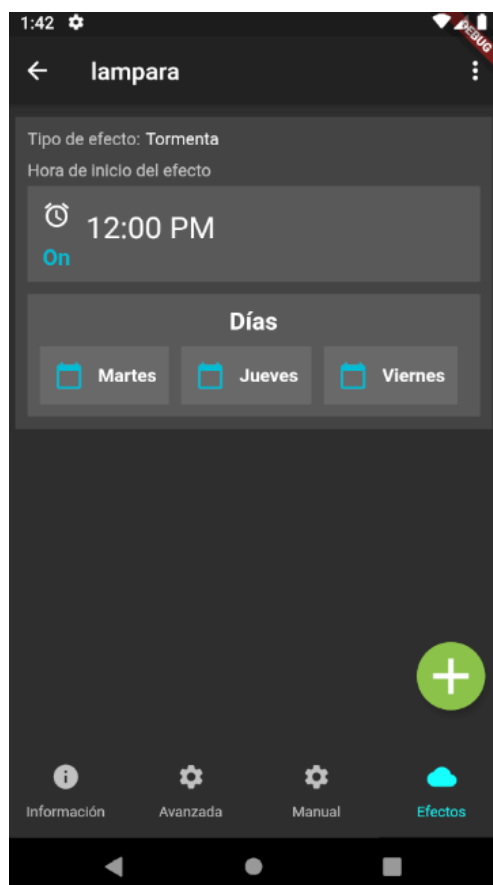


(a) Aplicación móvil.

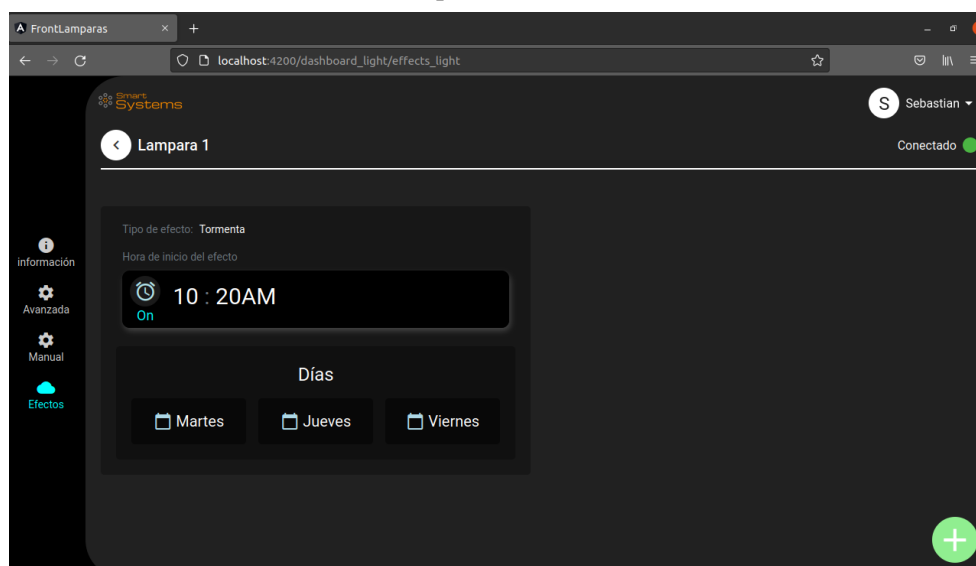


(b) Aplicación web.

Fig. 31. Vista de configuración manual de la lámpara.

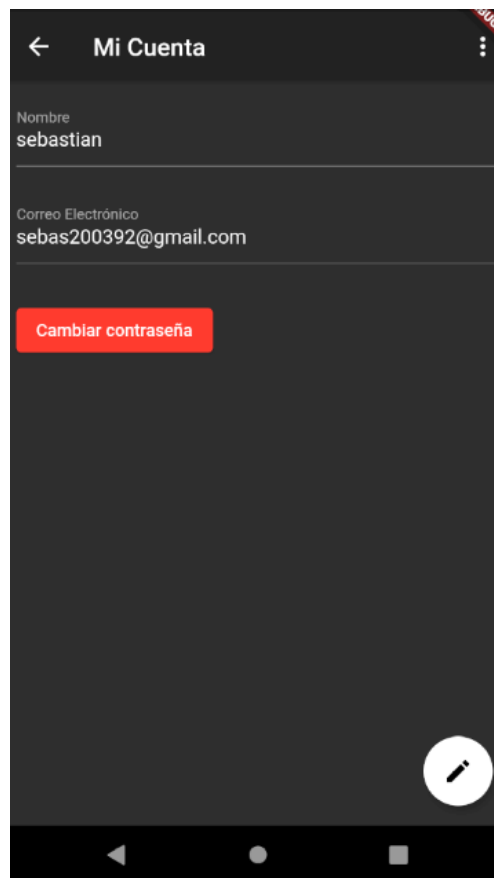


(a) Aplicación móvil.

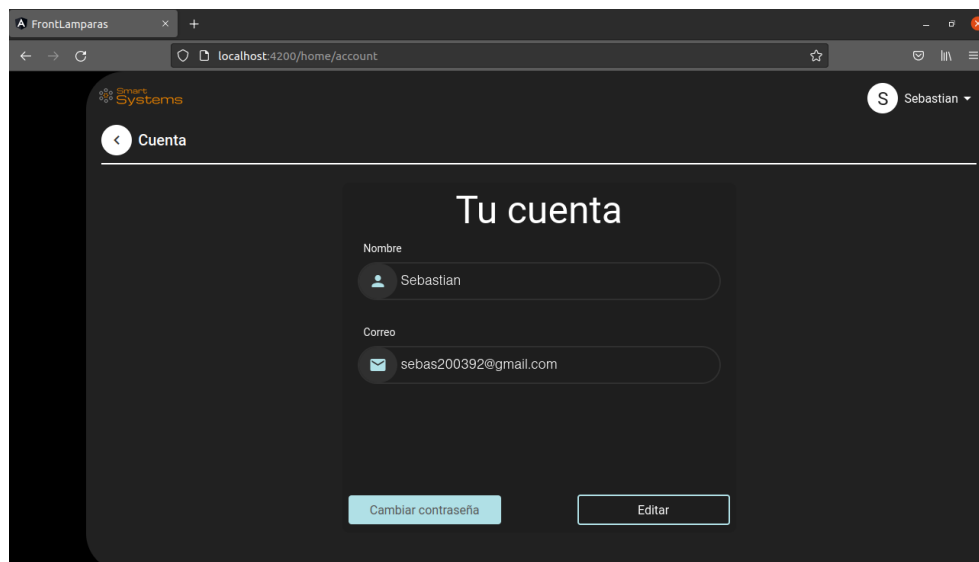


(b) Aplicación web.

Fig. 32. Vista de configuración de efectos que tendrá la lámpara.

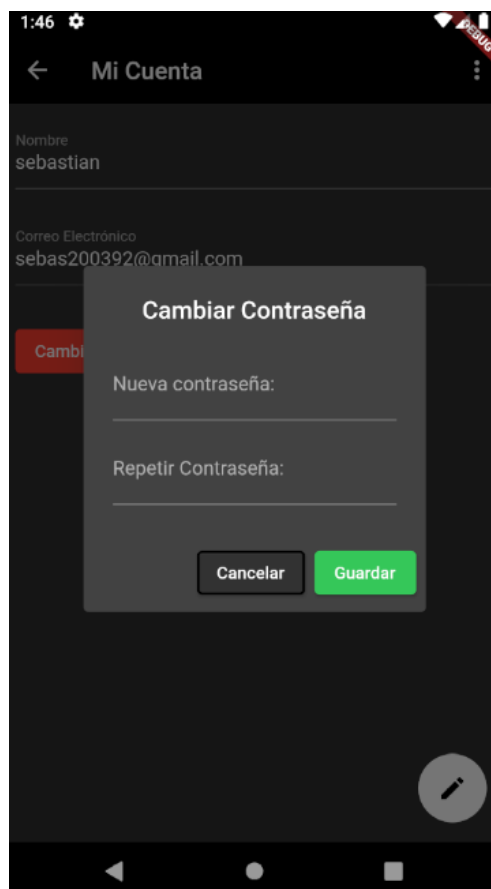


(a) Aplicación móvil.

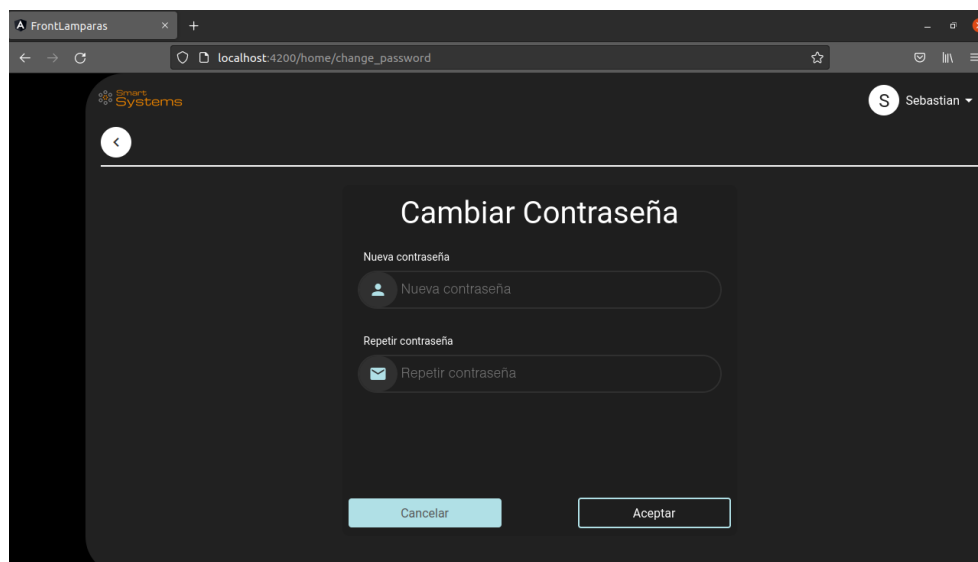


(b) Aplicación web.

Fig. 33. Vista para ver y editar la información de la cuenta del usuario.



(a) Aplicación móvil.



(b) Aplicación web.

Fig. 34. Vista para cambiar la contraseña cuando el usuario se encuentra autenticado.

B. Referencias

- [1] D. Walstad, "Plants As Water Purifiers," *Ecology of the planted aquarium*, págs. 5-10, 2013.
- [2] AGA, "The aquatic gardener," *lighting in planted aquariums*, págs. 5-9, 2018.
- [3] K. A. Randall, "Biology of Aquatic Plants in the Wild," *Sunken gardens, a step by step guide to planting. freshwater aquariums*, págs. 8-12, 2016.
- [4] Acuaflora, *Iluminación para acuarios plantados*, 2018. [En línea]. dirección: <https://www.acuaflora.com/iluminacion>.
- [5] Acuarema, *Iluminación para acuarios plantados*, 2020. [En línea]. dirección: <https://acuarema.com/iluminacion-de-acuario>.
- [6] F. L. Aquatics, *Aquarium Light Guide: The Best Light for Your Aquarium*, 2020. [En línea]. dirección: <https://www.fishlaboratory.com/fish/aquarium-light>.
- [7] Philips, *¿Qué es la creación de códigos bin (binning)?* 2018. [En línea]. dirección: <https://www.lighting.philips.com.co/soporte/soporte-de-productos/preguntas-frecuentes/general-questions/leds/what-is-binning>.
- [8] Iluminet, *Qué significa el término bin o binning en LEDs*, 2012. [En línea]. dirección: <https://www.iluminet.com/que-significa-el-termino-bin-o-binn%20ng-en-leds>.
- [9] ANY-LAMP.COM, *What is LED Binning?* 2015. [En línea]. dirección: <https://www.any-lamp.com/blog/what-is-led-binning>.
- [10] LUMILEDS, *LUXEON Rebel Color Line*, 2017. [En línea]. dirección: <https://www.luxeonstar.com/assets/downloads/ds68.pdf>.
- [11] S. Keeping, *LED Heat Dissipation and Lowering Thermal Resistance of LED Lighting Substrates*, 2011. [En línea]. dirección: <https://www.digikey.com/en/articles/led-heat-dissipation-and-lowering-thermal-resistance-of-led-lighting-substrates>.
- [12] M. Portal, *A Guide to Metal Core PCBs by PCBGOGO*, 2018. [En línea]. dirección: <https://makersportal.com/blog/2018/12/13/a-guide-to-metal-core-pcbs-by-pcbgogo>.
- [13] PCBWay, *Sinkpad PCB*, 2019. [En línea]. dirección: https://www.pcbway.com/project/question/Sinkpad_PCB.html.

- [14] Cree, *XLamp® CXA2520 LED*, 2021. [En línea]. dirección: <https://cree-led.com/media/documents/XLampCXA2520.pdf>.
- [15] Cree®, *XLamp® XP-E2 LEDs*, 2021. [En línea]. dirección: <https://co.mouser.com/datasheet/2/723/XLampXPE2-2327163.pdf>.
- [16] Cree, *Thermal Management of XLamp® and XP-E2 LEDs*, 2021. [En línea]. dirección: <https://cree-led.com/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>.
- [17] HotChip, *Datasheet PT4115*, 2019. [En línea]. dirección: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1141911/ETC2/PT4115.html>.