

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un equipo germicida de luz pulsante con interfaz de control para uso
experimental

INGE - 2520

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Carla Antonella García Falconi

Joel Alexander Olvera Escobar

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a cada uno de los miembros de mi familia y a la memoria de mi abuelo, quienes han sido mi motivación constante a lo largo de esta travesía. A ellos les debo todos mis logros.

A las amistades que la universidad me ha brindado, y a mi pareja Luis Santamaria, gracias por todo su apoyo y por las risas compartidas.

Un agradecimiento especial para mi mejor amigo y compañero Joel Olvera, por su dedicación y perseverancia.

Por su inmenso cariño, compañía y buenos recuerdos, el cierre de esta etapa es un triunfo nuestro.

Carla Antonella García Falconi

Dedicatoria

Con inmenso amor y agradecimiento, dedico este trabajo a mis padres, Orlando Olvera y Patricia Escobar, y a mi querida hermana Karim Olvera, quienes con su cariño y valores han motivado y formado la persona quien hoy soy.

A esta dedicatoria también sumo a mis amistades más cercanas Marlon Mancero y Ginger García, y al increíble grupo del Club de Mecatrónica quienes han hecho de mi vida académica y personal sea mas agradable y en ciertos momentos posible.

A mi compañera y gran amiga Carla García, y los docentes que realmente aman enseñar y producir excelentes estudiantes.

Y, por último, a quien escribe esta dedicatoria, que, a pesar de los momentos de duda y confusión, siguió adelante.

Joel Alexander Olvera Escobar

Declaración Expresa

Nosotros Carla Antonella García Falconi y Joel Alexander Olvera Escobar acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 22 de mayo del 2024.



Carla Antonella García

Falconi



Joel Alexander Olvera

Escobar

Evaluadores

Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph. D.

Profesor de Materia

Alexander Prieto León, M. Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

Las enfermedades de transmisión alimentaria no representan únicamente un riesgo para la salud y vida de millones de personas, sino también afecta los recursos y economía, en este caso, del Ecuador. A falta de tecnologías emergentes en el país para la sanitización y conservación de alimentos, se ha propuesto el desarrollo de un prototipo germicida/bactericida para uso experimental, con interfaz HMI que permita el control pulsos de luz UV-C, que mantenga un registro de las pruebas realizadas.

Considerando lo mencionado y la investigación realizada, se procedió a realizar el diseño electrónico y físico del prototipo, y por consecuencia la selección de los materiales y componentes a utilizar, como también los entornos de programación relevantes a la elaboración de la aplicación. A partir del proceso anterior se produjo una construcción en su mayoría de acrílico del dispositivo, conteniendo los elementos necesarios para el funcionamiento deseado, como también un HMI que permite el control del número de pulsos, el tiempo de exposición y el registro de las pruebas en una base de datos.

En síntesis, se demuestra la obtención de lo propuesto, garantizando que el dispositivo satisface los requerimientos y funcionamiento deseado, obteniendo un equipo de sanitización de alimentos para uso experimental.

Palabras Clave: Luz UV-C, Experimental, Interfaz HMI, Prototipo, Luz pulsante.

Abstract

Foodborne diseases not only represent a risk to the health and lives of millions of people, but also affect the resources and economy, in this case, of Ecuador. In the absence of emerging technologies in the country for the sanitization and preservation of food, the development of a germicidal/bactericidal prototype for experimental use has been proposed, with HMI interface that allows the control of UV-C light pulses, which keeps a record of the tests performed.

Considering the above mentioned and the research carried out, we proceeded to the electronic and physical design of the prototype, and consequently the selection of the materials and components to be used, as well as the programming environments relevant to the development of the application. From the previous process, a mostly acrylic construction of the device was produced, containing the necessary elements for the desired operation, as well as an HMI that allows the control of the number of pulses, the exposure time and the recording of the tests in a database.

In summary, it is demonstrated the achievement of the proposed, ensuring that the device meets the requirements and desired performance, obtaining a food sanitization equipment for experimental use.

Keywords: *UV-C light, Experimental, HMI interface, Prototype, Pulsed light.*

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	X
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Marco teórico	5
1.5.1 Enfermedades transmitidas por alimentos	5
1.5.2 Microorganismos patógenos en la superficie de alimentos	6
1.5.3 Procesos termales de conservación de alimentos	7
1.5.4 Procesos no termales de conservación de alimentos	8
1.5.5 Espectro electromagnético	9
1.5.6 Irradiación como método de conservación de alimentos	10
1.5.7 Tecnología de luz pulsante con radiación Ultravioleta.....	11
1.6 Estado del arte	13
1.6.1 AvaLight-XE Pulsed Xenon Light Source	13
1.6.2 Prototipo de luz pulsante con lámpara de Xenon	15

1.6.3 Luz ultravioleta: Inactivación microbiana en frutas.....	17
Capítulo 2	20
2.1 Metodología.....	21
2.2 Análisis de requerimientos.....	21
2.3 Diseño conceptual.....	21
2.4 Selección de la alternativa de solución	22
2.4.1 Alternativas de solución para sensores y actuadores.....	23
2.4.2 Selección de microcontrolador	25
2.4.3 Selección de software para interfaz	27
2.4.4 Selección de material para prototipo	30
2.5 Proceso de diseño	33
2.6 Diseño electrónico	34
2.7 Programación de la interfaz y microcontrolador	41
2.7.1 Programación de la interfaz.....	43
2.7.2 Programación del microcontrolador	48
2.8 Diseño mecánico	49
2.8.1 Medidas	50
2.8.2 Material y propiedades	51
2.8.3 Ensamblaje.....	52
2.8.4 Reflectividad	54
Capítulo 3	56
3.1 Resultados y análisis	57
3.2 Implementación del circuito.....	57
3.3 Ensamblaje del equipo.....	58
3.4 Programación	60
3.4.1 Programación del microcontrolador	60
3.4.2 Aplicación de escritorio.....	63

3.5 Cotización de rubros	68
Capítulo 4	70
4.1 Conclusiones y recomendaciones	71
4.1.1 Conclusiones	71
4.1.2 Recomendaciones	72
Referencias.....	73
Apéndices	79

Abreviaturas

AC	Corriente alterna
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
ARN	Ácido Ribonucleico
CFU	Unidades Formadoras de Colonias
DC	Corriente directa
ETA	Enfermedades de transmisión alimentaria
FAO	Organización de la alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
HMI	Interfaz Humano-Máquina
IR	Infrarrojo
OMS	Organización Mundial de la Salud
PL	Luz Pulsante
UV	Ultravioleta
UV-C	Ultravioleta con rango C

Simbología

A	Amperios
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros cuadrados
g	Gramos
Hz	Hertzios
J	Julios
kJ	Kilojulios
log	Logaritmo
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
MHz	Megahertzios
mm	Milímetros
MPa	Megapascales
ms	Milisegundos
N	Newtons
nm	Nanómetro
Ohm	Ohmiaje
s	Segundos
UFC	Unidades formadoras de colonias
uW	Microvatios
V	Voltios
W	Vatios

Índice de figuras

Figura 1 Rangos y clasificación de luz ultravioleta	10
Figura 2 Dispositivo de luz pulsante AvaLight-XE	14
Figura 3 Espectrómetro AvaSpec	14
Figura 4 Diagrama esquemático del prototipo de luz pulsante	15
Figura 5 Diseño conceptual	22
Figura 6 Proceso de diseño	33
Figura 7 Circuito del sistema	34
Figura 8 Lámpara de luz UV-C	35
Figura 9 Sensor GUVA-S12D	37
Figura 10 Microcontrolador ESP32	38
Figura 11 ESP32 Pinout	39
Figura 12 Módulo de relé de estado sólido 5 V DC de 2 canales	40
Figura 13 Esquemático módulo de relé estado sólido	41
Figura 14 Logo Qt Creator	42
Figura 15 Desarrollo de la aplicación en Qt Creator	44
Figura 16 Desarrollo de la ventana "Base de datos"	44
Figura 17 Diagrama de flujo de los botones laterales	45
Figura 18 Diagrama de flujo en la ventana "Nuevo registro"	46
Figura 19 Diagrama de flujo de la ventana "Base de datos"	47
Figura 20 Diagrama de flujo del microcontrolador	49
Figura 21 Boceto prototipo	50
Figura 22 Renderizado del prototipo	51
Figura 23 Vista explotada del ensamblaje	52
Figura 24 Lista de piezas vista explotada	53
Figura 25 Tensión de Von Mises en soporte	54
Figura 26 Desplazamiento en Y en soporte	54
Figura 27 Cinta Aluminum Foil Tape UL723	55
Figura 28 Circuito y conexiones	57
Figura 29 Planchas de acrílico para la carcasa	58
Figura 30 Carcasa ensamblada	59

Figura 31	<i>Carcasa con cinta de aluminio reflectiva</i>	60
Figura 32	<i>Resultados del sensor con la lámpara fuera del prototipo</i>	61
Figura 33	<i>Resultados del sensor con la lámpara dentro de la carcasa reflectiva</i>	62
Figura 34	<i>Pantalla principal de la aplicación</i>	63
Figura 35	<i>Respuesta del equipo al presionar el botón de encendido</i>	64
Figura 36	<i>Equipo en funcionamiento</i>	65
Figura 37	<i>Comunicación serial de la aplicación al ejecutar una prueba</i>	65
Figura 38	<i>Pantalla de base de datos</i>	66
Figura 39	<i>Registro automático de información luego de un experimento</i>	67
Figura 40	<i>Ingreso de información adicional del experimento</i>	67
Figura 41	<i>Registro en archivo CSV</i>	68

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Microorganismos patógenos causante de ETA</i>	6
Tabla 2 <i>Fuentes de radiación y beneficios</i>	11
Tabla 3 <i>Datos técnicos del dispositivo AvaLight-XE</i>	13
Tabla 4 <i>Reducción microbial en frutas y vegetales luego del tratamiento de PL</i>	16
Tabla 5 <i>Reducción microbial en frutas y vegetales con luz pulsante</i>	18
Tabla 6 <i>Evaluación de criterios de las alternativas de sensores y actuadores</i>	24
Tabla 7 <i>Matriz de decisión de alternativas de sensores y actuadores</i>	25
Tabla 8 <i>Evaluación de criterios de las alternativas de microcontrolador</i>	26
Tabla 9 <i>Matriz de decisión de alternativas de microcontrolador</i>	27
Tabla 10 <i>Evaluación de criterios de las alternativas del programa para diseñar interfaz</i>	28
Tabla 11 <i>Matriz de decisión de alternativas del programa para diseñar interfaz</i>	29
Tabla 12 <i>Evaluación de criterios del material para el equipo</i>	31
Tabla 13 <i>Matriz de decisión de alternativas del material para el equipo</i>	32
Tabla 14 <i>Características lámpara UV-C</i>	35
Tabla 15 <i>Dosis de radiación con distintos tiempos de exposición</i>	37
Tabla 16 <i>Características sensor GUVA-S12D</i>	37
Tabla 17 <i>Características ESP32</i>	39
Tabla 18 <i>Características módulo de relé estado sólido 5 V</i>	41
Tabla 19 <i>Características cinta reflectiva de Aluminio</i>	55
Tabla 20 <i>Costo componentes electrónicos y mecánicos</i>	68

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las enfermedades de origen alimentario provocadas por el consumo de alimentos contaminados siguen siendo una de las principales causas de morbilidad en todo el mundo, donde cada año hasta 600 millones de personas de todo el mundo, o casi 1 de cada 10, enferman tras consumir alimentos contaminados. De estas personas, 420.000 mueren, incluidos 125.000 niños menores de 5 años [1].

Es evidente que los métodos para reducir o eliminar los peligros microbiológicos relacionados con los alimentos afectarán significativamente la incidencia de dichas enfermedades, por lo que la conservación de alimentos es crucial en el sector de la industria alimentaria, donde desinfección y preservación de la vida útil de los alimentos es fundamental para garantizar la demanda en los mercados y asegurar la salubridad alimentaria. Actualmente, existen técnicas termales para conservar alimentos como procesos de refrigeración, pasteurización y congelación, pero presentan falencias en resultados como degradación de nutrientes, cambios en el sabor y elevados costos energéticos [2]. Bajo estas circunstancias, la búsqueda de una técnica de preservación innovadora ha permitido el desarrollo de tecnologías no térmicas, entre las que destaca la tecnología de luz pulsante, o por sus siglas en inglés PL (Pulsed Light).

1.2 Descripción del problema

En el Ecuador no existe un equipo de conservación de alimentos mediante la tecnología de luz pulsante. Este proyecto busca traer al país esta nueva tecnología innovadora para la conservación y desinfección de alimentos a la facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), específicamente en el laboratorio de bioprocesos se desea incursionar en esta tecnología y poder desarrollar pruebas de laboratorio en un futuro.

Además, el uso de esta tecnología puede disminuir los casos anuales de enfermedades transmitidas por alimentos, actualmente registrados en 9765, mediante la erradicación de patógenos con pulsos de luz UV-C (Luz ultravioleta de rango C con un rango de 200 a 280 nm) [3].

Por lo anterior se desea diseñar un prototipo de luz pulsante accesible que permita el ajuste de parámetros como número de pulsos y duración de estos para que los especialistas en el área de ingeniería en alimentos puedan probar su efectividad al momento de emitir pulsos de luz ultravioleta previo a la inversión de la implementación de este.

1.3 Justificación del problema

Uno de los enfoques innovadores para abordar esta problemática es la tecnología de luz pulsante, que ofrece un método eficiente y seguro para la desinfección de alimentos, prolongando su vida útil y garantizando la salud de los consumidores [3]. La introducción de la tecnología de luz pulsante en el país se convierte en una alternativa ante esta necesidad, que busca mejorar los estándares de calidad y seguridad en la producción y procesamiento de alimentos [4].

La implementación de tecnologías innovadoras como la luz pulsante en la industria alimentaria de Ecuador no solo abordaría los desafíos de conservación de alimentos y la disminución de casos de ETA (Enfermedades de Transmisión Alimentaria), sino que también ayudaría a reducir el impacto del desperdicio alimentario en el país. De acuerdo con datos recopilados por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el 2019, Ecuador desperdicia alrededor de 939 mil toneladas de alimento por año, lo que equivale a 334 millones de dólares anuales [5]. Esta cantidad significativa de alimentos desperdiciados no solo representa una pérdida económica, sino también un

desperdicio de recursos naturales y una amenaza para la seguridad alimentaria y la salud pública.

Es esencial solucionar esta problemática para garantizar la salud pública, reducir los desperdicios alimentarios, mejorar la calidad de los productos y fortalecer la competitividad de la industria alimentaria. Esta innovadora tecnología ofrece una solución eficaz y segura para prolongar la vida útil de los alimentos, proteger la salud de los consumidores y promover la sostenibilidad ambiental, lo que contribuirá significativamente al desarrollo económico y social del país.

Para abordar con lo mencionado, se hará uso de un microcontrolador y una pantalla de usuario o HMI (Interfaz Humano-Máquina), para el control y monitoreo de los parámetros relevantes al manejo de los pulsos de la luz UV-C (tiempo, frecuencia, etc.), como también el registro de los datos ingresados y obtenidos a una base de datos. Además, en esta solución se considera también el diseño de la estructura, siendo un factor de importancia la distancia que tiene el alimento hacia la fuente de emisión de luz.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un prototipo de un equipo de luz pulsante para pruebas experimentales de desinfección y conservación de alimentos mediante la conexión a un microcontrolador con una interfaz HMI que permita ajustar tanto el número de pulsos como el tiempo de exposición del alimento a analizar.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar diversos sistemas de conservación de alimentos mediante luz pulsante para escoger la opción más adecuada a los requerimientos del cliente.

2. Seleccionar los componentes electrónicos apropiados para el desarrollo del prototipo teniendo en cuenta la idoneidad según los requisitos y las limitaciones existentes.
3. Desarrollar el algoritmo que permita controlar el número de pulsos y el tiempo de exposición del alimento mediante el uso de un microcontrolador, así como la comunicación con la interfaz HMI para la facilidad de configuración de acuerdo con lo que necesite el usuario.
4. Diseñar la interfaz HMI mediante el uso de entorno de programación libre, teniendo en cuenta los parámetros e información que se van a ingresar y obtener del prototipo, para el control y monitoreo del equipo.
5. Construir el prototipo funcional del equipo de luz pulsante, asegurando la correcta disposición y compatibilidad de los componentes, como también el espacio y exposición de la luz UV-C necesaria para los alimentos a estudiar.
6. Validar el correcto funcionamiento del prototipo a través de pruebas reales.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Enfermedades transmitidas por alimentos

Las enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) ocurren cuando dos o más personas presentan síntomas similares después de consumir el mismo alimento, identificándolo como la fuente de la enfermedad a través de análisis epidemiológicos [4].

Las ETA pueden clasificarse como infecciones e intoxicaciones, también denominadas infecciones por ingesta de toxinas [6].

- La infección ocurre cuando se ingesta un alimento que contiene microorganismos patógenos vivos.
- La intoxicación sucede al ingerir alimentos con toxinas producidas por bacterias en su estructura.

1.5.2 Microorganismos patógenos en la superficie de alimentos

Se conocen alrededor de 250 agentes etiológicos con la capacidad de producir ETA, entre los más comunes se encuentran las siguientes enlistadas en la Tabla 1.

Tabla 1

Microorganismos patógenos causante de ETA

Agente	Tiempo de incubación	Fuentes comprometidas	Síntomas
Giardia	1 a 6 semanas	Agua, hortalizas y frutas.	Dolor abdominal, diarrea mucoide.
Norovirus	12 a 48 horas	Frutas, verduras de hojas verdes, agua.	Fiebre, dolor general del cuerpo
Escherichia coli	3 a 4 días	Vegetales crudos y carnes de res poco cocinada	Diarrea, calambres estomacales y vómitos
Salmonella	12 a 36 horas	Aguacate o guacamole procesado y huevos	Diarrea, fiebre y vómitos
Listeria innocua	3 a 70 días	Leche sin pasteurizar y vegetales contaminados	Gastroenteritis febril

Varias de estas bacterias se encuentran las superficies de frutas y vegetales, los cuales serán el principal enfoque de este proyecto por su tamaño y facilidad de adquisición. Es por esto que el tamaño de la bandeja donde se depositará el alimento debe ser acorde a una medida estándar donde puedan caber los alimentos a analizar.

También a partir de un estudio de los efectos germicidas de la aplicación de luz pulsante en frutas enteras y frutas cortadas se obtuvieron favorables resultados de la reducción

microbiana respecto a microorganismos como *Escherichia Colia*, *Salmonella* y *Listeria innocua* [7].

1.5.3 Procesos termales de conservación de alimentos

Tradicionalmente, la gran mayoría de alimentos han sido conservados mediante procesos térmicos siendo estos sometidos a temperaturas que oscilan entre los 60 a 100 °C durante varios segundos o minutos de manera continua. En estos procesos transfieren una gran cantidad de energía a los alimentos, lo que provoca que haya cambios en su estructura y en la calidad de estos [8].

A continuación, se enlistan los procesos térmicos ampliamente utilizados en la actualidad para la conservación de alimentos.

- **Refrigeración:** Consiste en almacenar los alimentos como lácteos, frutas, carnes y verduras en temperaturas de 0 a 4°C. Este proceso retrasa la aparición de microorganismos mientras que permite la conservación de las propiedades de los alimentos., sin embargo, no erradican la posibilidad de reproducción de los agentes patógenos los cuales pueden reactivarse una vez que sean descongelados [8].
- **Pasteurización:** Se aplica una temperatura por debajo de los 100°C a alimentos envasados herméticamente. Este proceso se utiliza en lácteos, jugos, cerveza y salsas. A diferencia de otros procesos, en este se conserva el sabor y propiedades nutricionales del mismo, no obstante, no elimina totalmente a los microorganismos por lo que es necesario refrigerar los alimentos previamente y después de su consumo limitando su vida útil de 2 a 3 semanas [9].
- **Tratamiento térmico ultrarrápido (calentamiento indirecto por vapor):** Consiste en el calentamiento rápido de un alimento por encima del punto de ebullición del agua durante un tiempo muy corto. Los productos que son sometidos a este proceso son

leches, jugos, salsas y pures. Aumenta la vida útil de los alimentos, a pesar de ello, causa la pérdida de vitaminas sensibles al calor, modificar las estructuras de las proteínas y afecta el sabor de este [10].

1.5.4 Procesos no termales de conservación de alimentos

En la actualidad se están desarrollando nuevas tecnologías que permitan la eliminación de microorganismos mientras se conservan sus propiedades nutricionales y prolongan la vida útil de los alimentos mediante su conservación.

Entre los nuevos avances y estudios desarrollados se encuentran los siguientes procesos.

- **Tratamiento a alta presión:** Un producto en un envase sellado es sometido a presiones elevadas, en su mayoría a través del agua. Algunos alimentos que experimentan este proceso son jugos, salsas y hummus. Permite conservar un sabor fresco pero su precio de elaboración es elevado, además requiere refrigeración [10].
- **Acidificación:** Se agregan ácidos orgánicos y/o inorgánicos a un alimento para aumentar la acidez o reducir el pH por debajo de un umbral que impida la reproducción de microorganismos patógenos y causantes de deterioro. Es utilizado en bebidas, salsas, frutas y vegetales enlatados. Su desventaja se halla en la modificación de sabor y apariencia de los alimentos.
- **Irradiación:** Consiste en la exposición del producto a radiaciones ionizantes, rayos electromagnéticos, partículas u ondas de alta energía. Se utiliza en alimentos la inhibición de microorganismos en frutas, vegetales, carne y empaques, sin embargo, pueden experimentar cambios en su color.

1.5.5 Espectro electromagnético

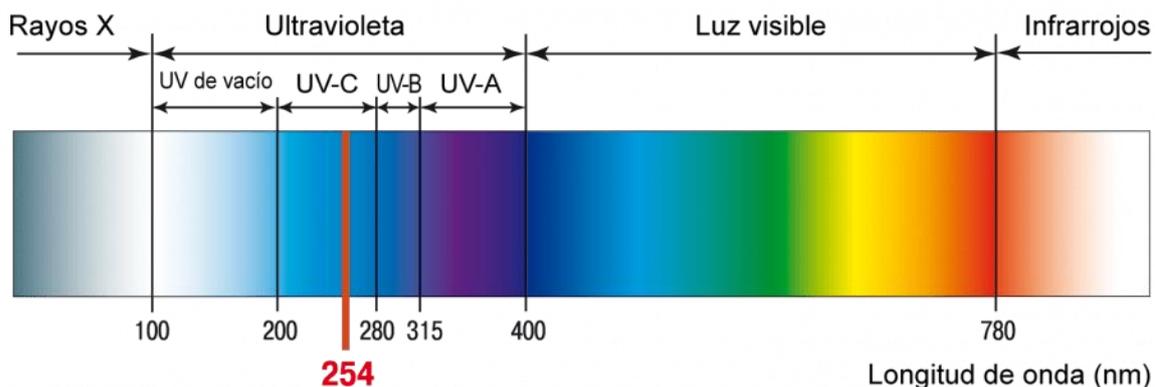
Se denomina espectro electromagnético al conjunto de tipo de radiación que se desplaza en ondas electromagnéticas. Este rango comprende desde los rayos X hasta ondas de mayor longitud como la luz infrarroja [11]. Entre las más importante se encuentran:

- Luz infrarroja (IR): Su longitud de onda va desde los 780 nm a 1 mm, esta categoría está asociada al calor ya que cualquier objeto con una temperatura mayor a cero absoluto genera ondas infrarrojas [12].
- Luz visible: Su rango de longitud de onda va desde los 400 a los 780 nanómetros, y es visible para el ser humano [13].
- UV-A: Su longitud de onda es de 315 a 400 nanómetros (nm), esta luz es de baja energía y es la menos dañina para el ser humano al utilizada en fototerapia y tratamientos estéticos. Su prolongada exposición provoca envejecimiento prematuro y oscurecimiento en la piel [14].
- UV-B: Su longitud de onda comprende los 280 a 315 nm, posee más energía que la UV-A y es potencialmente dañina al causar quemaduras e incluso cáncer de piel cuando su exposición es excesiva.
- UV-C: Posee un rango de onda de 200 a 280 nm y es considerada como germicida y bactericida, ya que posee la capacidad de erradicar microorganismos al estos absorber la energía de la luz UV-C. Su factor germicida es más efectivo en su pico de 254 nm [10]. Es altamente perjudicial para el ser humano ya que puede afectar directamente el ARN y ADN de las células vivas y produce daño ocular.
- Rayos X: Su longitud de onda varía entre 1pm a 10 nm, este tipo de radiación surge de fenómenos extranucleares [15].

En la Figura 1 se pueden visualizar las diferentes de luz ultravioleta, así como ellos espectros de los rayos X, luz visible e infrarroja explicados anteriormente.

Figura 1

Rangos y clasificación de luz ultravioleta [16]



1.5.6 Irradiación como método de conservación de alimentos

La irradiación de alimentos es considerada una práctica aprobada por la Administración de Medicamentos y Alimentos (FDA por sus siglas en inglés) que contribuye en la mejora de la seguridad alimenticia y la prolongación de la vida útil de los alimentos por medio de la eliminación de microorganismos [17].

Esta tecnología aporta varios beneficios al sector alimenticio, entre ellos se encuentran:

- Prevención de enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) al erradicar organismos como la Salmonella y E. Coli.
- Conservación de alimentos mediante la inactivación de organismos causantes de descomposición y la extensión de su tiempo de vida.
- Postergación de la germinación y maduración de frutas y vegetales
- Esterilización de alimentos y empaques.

La radiación utilizada en estos procesos puede ser ionizante o no ionizante, su diferencia se encuentra en que la radiación ionizante es capaz de remover los electrones de las

moléculas o átomos, mientras que la no ionizante solo posee la energía suficiente para excitar electrones a niveles de energía superiores.

La

Tabla

2

Fuentes de radiación y beneficios [17] detalla el origen, tipo y beneficios de los métodos de conservación por irradiación.

Tabla 2

Fuentes de radiación y beneficios [17]

Radiación	Origen	Tipo	Beneficios
Rayos gamma	Isótopos radiactivos	Ionizante	Alta penetración
Rayos X	Electrones hiperenergéticos	Ionizante	Alta penetración
Haz de electrones	Acelerador de electrones	Ionizante	Mayor precisión
Luz UV-C	Lámparas de Xenón y Lámparas UV-C	No ionizante	Penetración superficial

Dado que la radiación que provee la luz UV-C penetra superficialmente a los objetos de prueba se optó por trabajar con esta sobre todas las demás opciones, perseverando la integridad del alimento con el fin de que sea apto para consumirlo.

1.5.7 Tecnología de luz pulsante con radiación Ultravioleta

La tecnología emergente de Luz pulsante consiste en la emisión intermitente de intensas longitudes de ondas, también conocidos como pulsos de luz, las cuales varían desde la gama de luz visible, Ultravioleta (UV) e infrarroja. Este proceso no térmico ha demostrado efectividad en la erradicación de microorganismos patógenos en la superficie de los alimentos

y sus empaques, mientras que conserva sus propiedades nutricionales y sensoriales. Esta respuesta positiva se debe a la mínima exposición al calor constante, percibiendo menos daños ocasionados por el calor [3].

El dispositivo posee en su interior una fuente de luz UV-C, que puede ser emitida por lámparas de Xenón o bombillas UV-C, con un pico de 254 nm para una desinfección eficaz. Además, cuenta con un panel de control para ajustar el número de pulsos y tiempo de exposición de la prueba. Para garantizar la máxima eficiencia, el dispositivo está equipado con una bandeja o estante ajustable, lo que facilita la regulación de la distancia entre la luz y el alimento que se desee desinfectar.

La dosis de radiación recibida por los alimentos es trascendente para garantizar la desinfección y eliminación de los microorganismos, y puede ser expresada como:

$$D = \left[\frac{I \cdot t}{1000} \right] \quad (1.1)$$

Donde:

- D equivale a la dosis de irradiación aplicada en kilojulios por metro cuadrado (kJ/m^2).
- I es la intensidad de irradiación bajo el área de emisión de luz UV-C en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
- t representa el tiempo de exposición del alimento a la luz pulsante en segundos (s).

El tiempo de exposición es variable dependiendo del alimento y se aconseja trabajar con la luz de 1 a 5 minutos para no incrementar la temperatura de la superficie ni producir cambios en su estructura mientras se mantiene el efecto germicida del mismo.

También es de vital importancia la distancia entre la luz y el producto, procurando mantener el alimento lo más cerca posible de la bombilla UV-C, esto se debe a que mientras más cerca se encuentre más eficaz será la descontaminación.

Entre los efectos reportados en alimentos sometidos a esta tecnología se encontró una reducción significativa de la población bacteriana con el único efecto adverso de descoloración tras la repetición continua de pruebas [18].

1.6 Estado del arte

La sanitización de alimentos con luz UV-C se caracteriza por un creciente interés en la tecnología de desinfección sin químicos. Este interés ha impulsado numerosos estudios y desarrollos en las últimas décadas, enfocados en la eficacia microbiana de la luz UV-C, la optimización de los parámetros de aplicación, y la integración de sistemas automatizados en procesos industriales.

A continuación, se presentan algunas soluciones de equipos con tecnología de luz pulsante para la desinfección de alimentos que sirven como investigación para llevar a cabo el presente proyecto.

1.6.1 AvaLight-XE Pulsed Xenon Light Source

Este dispositivo es una fuente de luz pulsante de Xenón diseñada para aplicaciones que requieran luz ultravioleta. Al conectarse al espectrómetro, AvaSpec los pulsos que emiten se encuentran sincronizados con la data recolectada por el espectrómetro.

A continuación, se enlistan las características que proporciona el equipo en la Tabla 3.

Tabla 3

Datos técnicos del dispositivo AvaLight-XE [19]

Característica	Valor
----------------	-------

Rango de longitud de onda	200-1000 nm
Duración de pulso	5
Delay de pulso	6
Frecuencia de pulso	100 Hz

Este equipo por su alta eficiencia y su amplia utilidad posee un valor de mercado de £1,151.00 siendo alrededor de \$1464,83 en dólares americanos [20].

En la Figura 2

Dispositivo de luz pulsante AvaLight-XE[21] y Figura 3, se puede observar el dispositivo de luz pulsante y el espectrómetro respectivamente.

Figura 2

Dispositivo de luz pulsante AvaLight-XE[21]



Figura 3

Espectrómetro AvaSpec [22]



Su capacidad para proporcionar pulsos de luz ultravioleta de alta intensidad y controlados con precisión es fundamental para experimentos que requieren una sincronización exacta entre la fuente de luz y la recolección de datos.

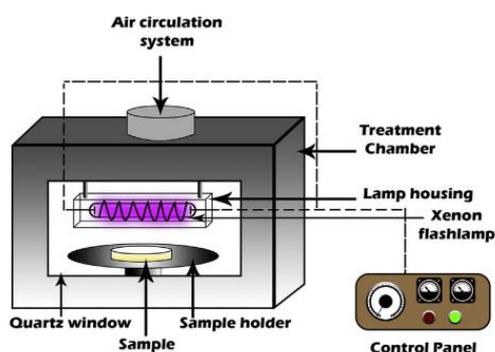
1.6.2 Prototipo de luz pulsante con lámpara de Xenon

En el artículo titulado “Recent Advances in the Application of Pulsed Light Processing for Improving Food Safety and Increasing Shelf Life” de R. Mahendran, K. Ratish Ramanan, J. Barba, et al. (2019), se utiliza una lámpara de xenón para el diseño de un equipo de luz pulsante. Este equipo provee de 1 a 20 pulsos por segundo con una densidad de energía, también denominada dosis de irradiación, de 0.01 a 50 Julios por centímetro cuadrado.

La Figura 4 se muestra el prototipo de luz pulsante del artículo previamente mencionado junto con los elementos que lo conforman.

Figura 4

Diagrama esquemático del prototipo de luz pulsante [23]



El equipo de PL posee componentes como una fuente de luz UV-C, un porta muestras y un control de panel. Sin embargo, debido a que se ha empleado una lámpara de Xenón que libera gases, es necesario agregar un sistema de ventilación. Este detalle es fundamental al momento de escoger la fuente de luz ultravioleta y al desarrollar el diseño del equipo para el presente proyecto.

Este equipo fue diseñado para el estudio de la reducción del recuento bacteriano medido en Unidades Formadoras de Colonias (CFU, por sus siglas en inglés) por gramo, en varios productos alimenticios por medio de la tecnología de luz pulsante, donde se tuvieron resultados exitosos en que se pueden visualizar en la Tabla 4 [23].

Tabla 4

Reducción microbiana en frutas y vegetales luego del tratamiento de PL [23]

Producto alimenticio	Microorganismo tratado	Condiciones de funcionamiento	Reducción (\log_{10} CFU/g)
Aguacate	Aerobic mesophilic	Fluencia total (J/cm ²): 14; Ancho de pulso (μ s): 360; Distancia de la lámpara (cm): 5	1,20
Frambuesas	Salmonella	Frecuencia (Hz): 1; Fluencia total (J/cm ²): 28,2; Tiempo de exposición (s): 30; Distancia de la lámpara (cm): 13	4,5
	Escherichia coli		3,9
Tomates frescos cortados	Listeria innocua	Fluencia total (J/cm ²): 8; y mantenido en frío a 4 °C durante 20 días	0,9
	Escherichia coli		1,4
Rodajas de manzanas recién cortadas	Microbios mesófilos y psicrófilos	Número de impulsos: 40; Fluencia total: (J/cm ²): 16; Ancho de pulso (μ s): 300	1,55

Espinaca	Bacterias aerobias	Fluencia total (J/cm ²): 20 y 40;	0,5-2,2
	mesófilas	Ancho de pulso (ms): 0.3	
	Bacterias psicrótróficas		
	Coliformes		

1.6.3 Luz ultravioleta: Inactivación microbiana en frutas

Otra investigación de la reducción de la población microbiana en productos alimenticios se puede encontrar en el artículo “Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas” de Dionelys Millán, Lucía Romero, Marbella Brito, et al. (2015), donde se recopilan los resultados de someter ciertas muestras de alimentos infectados con microorganismos y bacterias a la tecnología de luz pulsante para evidenciar su eficacia [7].

Se desarrolló un equipo de luz pulsante con longitudes de onda que varían de 200 a 280 nm dentro del rango de luz UV-C. Se realizaron varias pruebas en las que la dosis de irradiación aplicada a los productos fluctuó entre 0.2 y 20 kJ/m². Además, la distancia entre la lámpara y los alimentos varió de 10 a 40 cm, dependiendo del tipo de alimento.

Este artículo posee resultados a partir de la realización de varios experimentos con diferentes parámetros como distancia, tiempo de exposición, inóculo inicial, entre otros. Los diferentes valores obtenidos a partir de la modificación de las variables mencionadas previamente se encuentran expuesto en la

Tabla 5.

Las pruebas realizadas demostraron que este tipo de tratamiento prolonga la vida útil de los alimentos sin afectar significativamente sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales. Se observó que las frutas enteras, aunque expuestas a dosis de microorganismos, mostraron una mayor inhibición microbiana y una prolongación de su vida útil en comparación con las

frutas cortadas. En las frutas cortadas, el proceso no puede garantizar la estabilidad microbiológica ni detener el metabolismo activo, lo que lleva a una mayor degradación.

Tabla 5

Reducción microbial en frutas y vegetales con luz pulsante [7]

Producto alimenticio	Microorganismo	Inóculo inicial	Tiempo de exposición	Dosis de exposición	Distancia (cm)	Reducción microbiana
Mora azul (fruta entera)	Escherichia coli	10^9 UFC/m	1, 5 y 10 min	20 mW/cm ²	0,9	5,83 log UFC/g
Aguacate (fruta entera)	Escherichia coli	10^7 UFC/mL	30 s	0,5; 1,0 y 3,0 kJ/m ²	15	1,0-3,5 log
	Listeria innocua					1,0-3,5 log
	Salmonella spp					5,0 log
Fresa (cortada)	Escherichia coli	107-108 UFC/g	10 y 60 min	1,2 y 7,2 J/cm ²	8	1 y 1,4 log
	Listeria innocua					UFC/g
Manzana (cortada)	Listeria innocua	5×10^{-4} UFC/g	10 min	5,6 kJ/m ²	10	1,0 log UFC/g

A partir de lo presentado en este primer capítulo, nuestro equipo de luz pulsante se destaca por su balance entre economía y conveniencia, lo que lo hace especialmente adecuado para laboratorios y pequeñas instituciones. A diferencia de los dispositivos de alta gama,

nuestro prototipo ofrece una solución accesible que no compromete la calidad, con un diseño intuitivo y un mantenimiento sencillo que lo hacen ideal para entornos con recursos limitados. Su flexibilidad para manejar diferentes tipos de alimentos y aplicaciones proporciona la adaptabilidad necesaria en un entorno de investigación, cumpliendo así con el objetivo de ofrecer una herramienta práctica y eficaz.

Capítulo 2

2.1 Metodología.

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto fue necesario seguir una serie de evaluaciones que determinan la correcta selección de componentes, alternativas y diseños que proporcionen el correcto funcionamiento del prototipo de luz pulsante.

2.2 Análisis de requerimientos

Antes de realizar el diseño electrónico, programación de la interfaz y el diseño mecánico del prototipo, es necesario tener en cuenta las especificaciones que el cliente desea.

A continuación, se enlistan los requerimientos de la cliente Tania Guzmán:

- El dispositivo debe emitir luz UV en el rango de 200 a 280 nm para la desinfección y conservación de los alimentos.
- Ajuste de número de pulsos y duración por medio de una aplicación.
- El prototipo debe tener las siguientes dimensiones 40 cm de alto, 30 cm de ancho y 30 cm de largo, para permitir la entrada de una o varias muestras en el interior del equipo.
- Su estructura debe ser parcial o totalmente de acrílico, ya que este material no permite la transferencia de rayos UV y no daña la vista.

2.3 Diseño conceptual

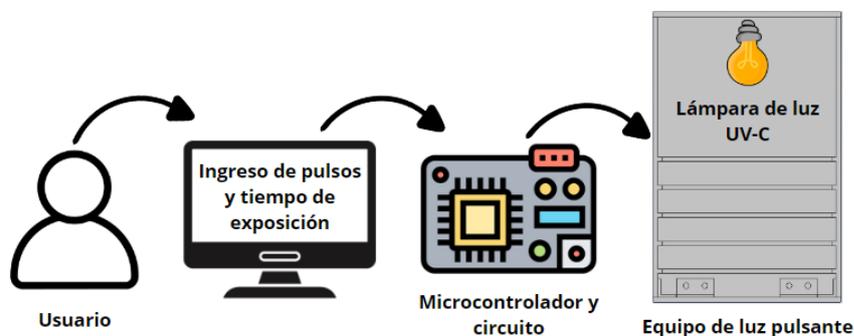
El diseño conceptual plantea un prototipo de luz pulsante UV-C. El usuario podrá ajustar la frecuencia de los pulsos y el tiempo total de exposición mediante una interfaz de escritorio. Esta aplicación se comunicará con un microcontrolador que controlará la lámpara según los parámetros establecidos.

El circuito debe contener los componentes necesarios para asegurar el número de pulsos establecidos por el usuario desde la aplicación y se agregará un sensor de luz UV-C que detecte que se esté proporcionando el rango de longitud de onda adecuado.

A continuación, se ilustra en la Figura 5 el boceto del prototipo con los elementos necesarios para su funcionamiento.

Figura 5

Diseño conceptual



2.4 Selección de la alternativa de solución

El análisis de las posibles alternativas de solución se estructuró dividiendo el proyecto en cuatro secciones clave. A continuación, se detallan estas secciones y se explora cómo su integración contribuye a la solución final propuesta.

- Sensores y actuadores
- Microcontrolador
- Software de programación
- Diseño y modelo del prototipo

2.4.1 Alternativas de solución para sensores y actuadores

En esta sección se presentan las posibles soluciones basadas en componentes electrónicos que permiten el desarrollo eficiente del prototipo. Se incluyen opciones para sensores UV y fuentes de emisión UV-C, elementos clave que actuarán como detectores y actuadores, respectivamente, en el circuito a realizar.

- **Alternativa 1**

Implementar una lámpara de Xenón como fuente de luz UV para el equipo de luz pulsante, proporcionando longitudes de onda UV-A, UV-B y UV-C, junto con el sensor GUVA-S12D para la detección de la radiación UV emitida.

- **Alternativa 2**

Emplear una lámpara UV especializada que emita exclusivamente luz UV-C con un pico en 254 nm para la erradicación eficaz de microorganismos, incorporando el sensor UVM30 para la detección precisa de la radiación UV-C en todo su rango.

Una vez identificadas las posibles alternativas, se procedió a evaluarlas conforme con criterios de selección específicos y su prioridad correspondiente en la Tabla 6. Los siguientes apartados presentan en detalle los criterios establecidos para este proceso de evaluación.

- Precio: Componentes de valor accesible.
- Espectro lumínico: Varios rangos de longitud de onda para llevar a cabo más pruebas.
- Facilidad de uso: Evalúa la complejidad de instalación en el prototipo y los ajustes que se deben integrar a este.
- Complejidad de configuración: Dificultad que experimenta el usuario para configurar la luz UV.

Tabla 6*Evaluación de criterios de las alternativas de sensores y actuadores*

Espectro lumínico > Complejidad de configuración > Precio > Facilidad de uso						
Criterio	Espectro lumínico	Complejidad de configuración	Precio	Facilidad de uso	$\Sigma+1$	Ponderación
Espectro lumínico	0	0	0	0	1	0,14
Complejidad de configuración	0	0	1	1	3	0,43
Precio	0	0	0	1	2	0,29
Facilidad de uso	0	0	0	0	1	0,14

Se estableció la prioridad de criterios para seleccionar sensores y actuadores. Espectro lumínico se consideró primordial, dado que el proyecto es un prototipo para evaluar la funcionalidad de emisión de pulsos controlados por el usuario. Esto simplifica la operación tanto para el cliente como para los desarrolladores.

En segundo lugar, se priorizó la complejidad de configuración, ya que el sistema se utilizará para múltiples pruebas realizadas por el usuario debe ser fácil de utilizar y configurar. El costo también fue un factor importante, considerando la posibilidad de replicación futura.

Aunque se contempló la versatilidad para trabajar con diversos espectros de ondas, se determinó que una lámpara UV-C sería suficiente para los objetivos actuales del proyecto.

Tabla 7*Matriz de decisión de alternativas de sensores y actuadores*

Soluciones	Espectro lumínico	Complejidad de configuración	Precio	Facilidad de uso	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa #1	0,27	0,15	0,07	0,07	0,05	1
Alternativa #2	0,13	0,15	0,13	0,03	0,05	2

Luego de considerar las posibles soluciones junto al peso que aportan a cada criterio se obtuvo que la Alternativa #1 que establece el uso de una lámpara de luz UV-C con un pico de 254 nm para la desinfección de alimentos es la solución adecuada para el prototipo y el uso del sensor GUVA-S12D.

2.4.2 Selección de microcontrolador

De la misma manera, para el proceso de selección de un microcontrolador se consideraron las alternativas de dispositivos accesibles y con las características requeridas para el procesado y manipulación de las distintas entradas y salidas que se van a utilizar en el prototipo.

- **Alternativa 1**

Hacer uso del microcontrolador ESP32.

- **Alternativa 2**

Hacer uso del microcontrolador Arduino Nano.

Los criterios de selección para la selección del microcontrolador ideal para realizar la comunicación serial y procesamiento de los datos ingresados a la interfaz son los siguientes:

- Procesador: Refiriéndose a la potencia del procesador.

- **Compatibilidad:** Que tan apto es el uso de este dispositivo de acuerdo con los componentes a utilizar en el prototipo.
- **Actualizable:** Capacidad del dispositivo a ser sujeto a cambios y correcciones en base a las necesidades del usuario.
- **Precio:** El costo que tiene el dispositivo en el mercado.

A continuación, se puede apreciar la evaluación de criterios en la Tabla 8.

Tabla 8

Evaluación de criterios de las alternativas de microcontrolador

Procesador > Compatibilidad > Actualizable > Precio						
Criterio	Procesador	Compatibilidad	Actualizable	Precio	$\Sigma+1$	Ponderación
Procesador	0	1	1	1	4	0,40
Compatibilidad	0	0	1	1	3	0,30
Actualizable	0	0	0	1	2	0,20
Precio	0	0	0	0	1	0,10

En este se dio prioridad a la capacidad del procesador teniendo en cuenta que se va a manejar datos entre la aplicación y el microcontrolador, por lo que se espera que se obtengan las salidas esperadas en el menor tiempo posible.

Luego, tenemos la compatibilidad del microcontrolador con los componentes, lo cual se debe considerar a la hora de trabajar con sensores o módulos los cuales capaz tengan mayor afinidad con un tipo de controlador.

Así mismo se tiene, con menor prioridad, la capacidad de ser actualizable como parámetro importante, debido a que el proceso de prototipado como la exigencia de los requerimientos del usuario pueden estar sujetos a cambios.

Con una prioridad menor, se tiene el precio como consideración, debido a que no consta como algo esencial para que el prototipo se lleve a cabo.

En la Tabla 9 se encuentra la matriz de decisión para escoger el microcontrolador adecuado para el presente proyecto.

Tabla 9

Matriz de decisión de alternativas de microcontrolador

Soluciones	Procesador	Compatibilidad	Actualizable	Precio	$\Sigma+1$	Prioridad
Alternativa #1	0,27	0,15	0,13	0,03	1,58	1
Alternativa #2	0,13	0,15	0,07	0,07	1,42	2

Según la evaluación de criterios realizada para este caso, se obtuvo que la ESP32 (Alternativa #1) es la solución más viable como microcontrolador para el procesado y control de los componentes a utilizar del prototipo.

2.4.3 Selección de software para interfaz

En este apartado se consideraron los softwares a emplear para el desarrollo y diseño de la interfaz HMI donde se establecerá la comunicación entre el usuario y el microcontrolador que controlará los ajustes ingresados por la aplicación.

- **Alternativa 1**

Utilizar el software de Android Studio para desarrollar una aplicación móvil que permita controlar el ajuste de pulsos y tiempo de exposición del equipo.

- **Alternativa 2**

Desarrollar una aplicación de escritorio con QT Creator que será instalada en un equipo del laboratorio de bioprocesos para la ejecución de pruebas experimentales con el equipo de luz pulsante.

Los criterios de selección para la elección del programa idóneo para realizar la aplicación de escritorio pueden ser encontrados en la Tabla 10.

- Facilidad de uso: Fácil de usar por el usuario.
- Experiencia del usuario: Brindar las herramientas necesarias sin causar molestias al usuario.
- Funcionalidad: Cantidad de operaciones que se pueden realizar.
- Complejidad de desarrollo: Cual es más fácil de realizar la programación de la interfaz.

Tabla 10

Evaluación de criterios de las alternativas del programa para diseñar interfaz

Experiencia del usuario > Facilidad de uso > Complejidad de desarrollo > Funcionalidad						
Criterio	Experiencia del usuario	Facilidad de uso	Complejidad de desarrollo	Funcionalidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Experiencia del usuario	0	1	1	1	4	0,40
Facilidad de uso	0	0	1	1	3	0,30
Complejidad de desarrollo	0	0	0	1	2	0,20
Funcionalidad	0	0	0	0	1	0,10

Se priorizó la experiencia del usuario como criterio principal. Una aplicación de escritorio ofrece mayor comodidad sin interferir en las funciones diarias del usuario, evitando problemas comunes de las aplicaciones móviles como la necesidad de espacio de almacenamiento o descargas adicionales. Además, proporciona una mayor potencia de procesamiento, crucial para el manejo eficiente de datos de laboratorio.

La facilidad de uso se priorizó para garantizar que los usuarios puedan manejar la aplicación sin complicaciones. En cuanto a la complejidad de desarrollo, se optó por un diseño sencillo pero eficiente, considerando que se trata de un prototipo cuya función principal es el control de la luz UV-C mediante el ingreso de parámetros.

El criterio de funcionalidad, que incluye características adicionales como la conexión a la nube para visualizar la base de datos a través de una página web, se consideró de menor prioridad. Estas opciones se reservan para futuras mejoras para el proyecto.

La Tabla 11 presenta la ponderación de cada criterio respecto a las soluciones.

Tabla 11

Matriz de decisión de alternativas del programa para diseñar interfaz

Soluciones	Experiencia del usuario	Facilidad de uso	Complejidad de desarrollo	Funcionalidad	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa #1	0,13	0,15	0,10	0,03	1,4	2
Alternativa #2	0,27	0,15	0,10	0,07	1,58	1

Tomando en cuenta la evaluación de criterios se obtuvo que la Alternativa #2 es la más adecuada para la solución de la interfaz del prototipo proveyendo una ejecución óptima y

sencilla para la aplicación de escritorio y el ingreso de los parámetros establecidos para el control de la luz UV-C.

2.4.4 Selección de material para prototipo

En este proceso de selección de acuerdo con criterios de evaluación se consideró también la construcción del contenedor o envoltorio del prototipo como tal. Por lo que se tienen en cuenta las siguientes alternativas de materiales para su diseño.

- **Alternativa 1**

Utilizar PLA para la construcción del contenedor del prototipo.

- **Alternativa 2**

Utilizar acrílico para la construcción del contenedor del prototipo.

- **Alternativa 3**

Utilizar madera para la construcción del contenedor del prototipo.

Los siguientes parámetros presentan los criterios establecidos, con su descripción, para este proceso de evaluación.

- **Precio:** Componentes de valor accesible.
- **Seguridad:** En referente a la estructura y su resistencia, como también su condición frente agentes externos (humedad, temperatura, etc.)
- **Funcionalidad:** Con respecto a la compatibilidad de los materiales con las muestras y la facilidad de manipulación y ensamble.

Peso: El peso del material

En la Tabla 12 se presentan los criterios establecidos para su evaluación de prioridad.

Tabla 12*Evaluación de criterios del material para el equipo*

Seguridad > Precio > Funcionalidad > Peso						
Criterio	Seguridad	Precio	Funcionalidad	Peso	$\Sigma+1$	Ponderación
Seguridad	0	1	0,5	1	3,5	0,35
Precio	0	0	1	1	3	0,30
Funcionalidad	0,5	0	0	1	2,5	0,25
Peso	0	0	0	0	1	0,10

En la selección de la caja para el proyecto, se priorizó la seguridad como criterio principal. Se consideró la utilización de materiales resistentes que prevengan accidentes o daños. Las características de seguridad propuestas incluyen cerraduras seguras y un sistema de ventilación adecuado para evitar sobrecalentamientos. Además, se evaluaron opciones de cajas resistentes a la humedad y a temperaturas extremas, asegurando su integridad y funcionamiento en diversas condiciones ambientales.

En segundo lugar, se consideró el precio. Se analizaron materiales de alta calidad, pero a un costo accesible, buscando equilibrar la inversión y la durabilidad del producto. Se llevó a cabo un estudio exhaustivo de proveedores y materiales para asegurar que la caja no solo sea segura sino también económica, permitiendo una implementación eficiente dentro del presupuesto del proyecto.

El criterio de funcionalidad también fue cuidadosamente evaluado. Se buscaron cajas que permitan un fácil acceso y manejo de los componentes internos. Además, se consideró la posibilidad de expansión para futuras mejoras o modificaciones, asegurando que la caja no solo cumpla con los requisitos actuales, sino que también se adapte a posibles necesidades futuras.

Por último, se tuvo en cuenta el peso de la caja. Se seleccionaron materiales que, sin comprometer la seguridad y funcionalidad, mantengan la caja lo más liviana posible. Esto facilita su transporte e instalación, y reduce la carga en el entorno donde se utilizará. Se buscó un equilibrio entre la robustez y la ligereza, garantizando que la caja sea manejable y práctica para los usuarios.

En la matriz de la Tabla 13 se evalúa la alternativa más acertada para el material del equipo.

Tabla 13

Matriz de decisión de alternativas del material para el equipo

Soluciones	Seguridad	Precio	Funcionalidad	Peso	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa #1	0,14	0,11	0,09	0,04	1,37	2
Alternativa #2	0,15	0,11	0,08	0,04	1,39	1
Alternativa #3	0,06	0,08	0,09	0,02	1,24	3

En base a la evaluación de criterios se obtuvo que la Alternativa #2 (Acrílico) es el material más adecuado para la propuesta de solución, cumpliendo con que se mantenga la seguridad y funcionalidad del equipo, como también un precio razonable para su uso en la construcción del prototipo.

2.4.5 Integración de soluciones

Tras identificar las alternativas óptimas para cada área de interés, se procedió a integrarlas en una solución unificada. Esta propuesta integral incorpora los elementos más efectivos de cada sección, culminando en el desarrollo de un prototipo de luz pulsante con las siguientes características:

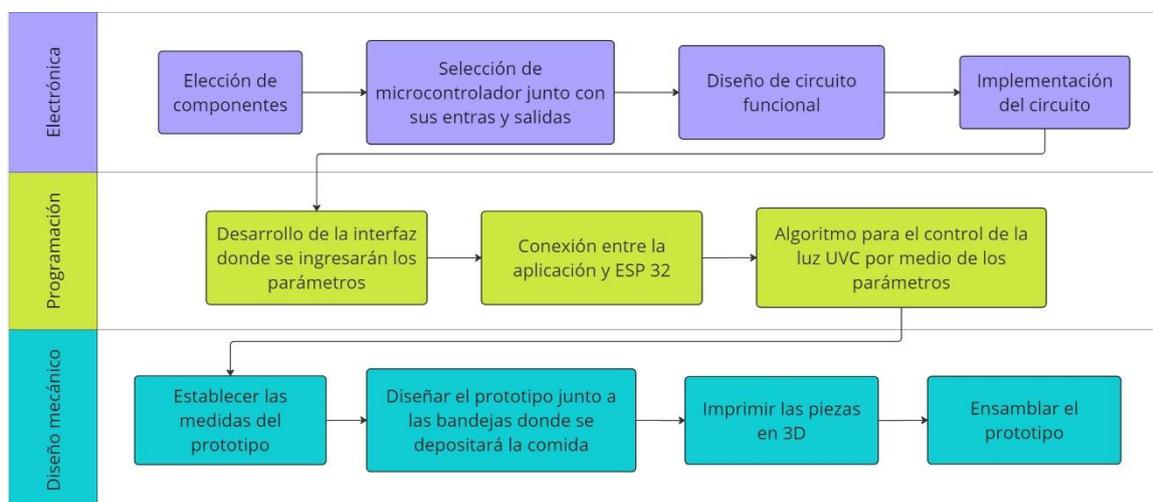
- Fuente de luz que emite exclusivamente radiación UV-C.
- Aplicación desarrollada en Qt Creator para la ejecución de experimentos en alimentos.
- Caja fabricada en su mayoría de acrílico con dimensiones específicas según los requerimientos del cliente.
- Utilización de un microcontrolador ESP32 para el control del circuito y la comunicación con la interfaz de usuario.

2.5 Proceso de diseño

En el proceso de diseño de la Figura 6 se presentan las etapas que se realizarán para desarrollar el presente proyecto, una vez ya definidas las limitaciones y requerimientos que se deben considerar en la solución.

Figura 6

Proceso de diseño



El diseño está dividido en tres fases:

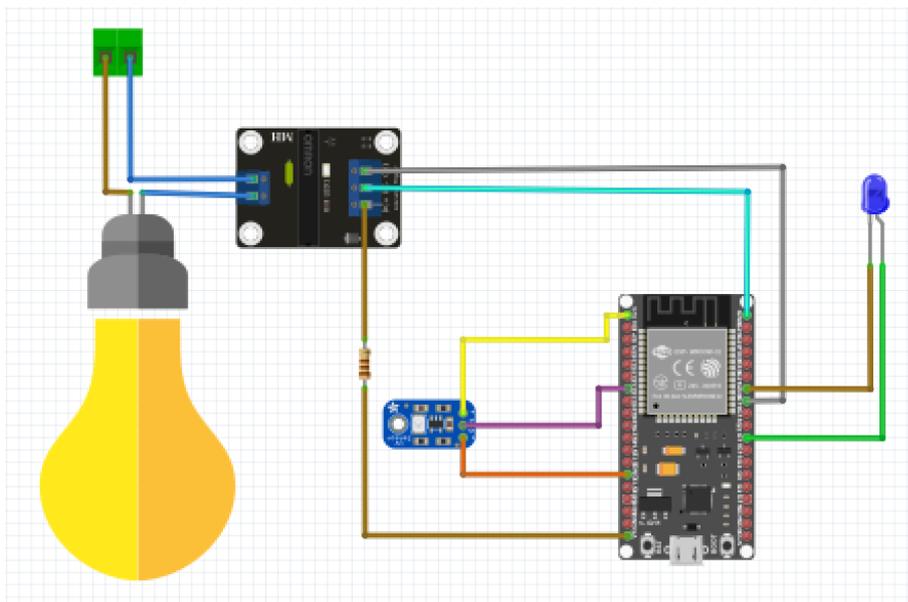
- Electrónica: Desarrollo de un circuito de control para la emisión de pulsos de luz UV-C, destinado a la desinfección y conservación de alimentos.
- Programación: Creación de una aplicación de escritorio que permita la entrada de parámetros para realizar pruebas en los alimentos, así como la implementación del algoritmo de control de pulsos para el microcontrolador.
- Mecánica: Diseño físico del prototipo basado en las especificaciones proporcionadas por el cliente.

2.6 Diseño electrónico

Considerando la alternativa de solución seleccionada, se obtuvo el circuito presente en la Figura 7 con los componentes elegidos que garanticen el funcionamiento del encendido y apagado de los pulsos emitidos por la lámpara de luz UV-C.

Figura 7

Circuito del sistema



En la ilustración se pueden observar los siguientes componentes con sus características:

- Lámpara de luz UV-C: La lámpara en la Figura 8 emite una radiación electromagnética ultravioleta en el rango de 200 a 280 [nm]. Sus características se encuentran en la Tabla 14.

Figura 8

Lámpara de luz UV-C [24]



Tabla 14

Características lámpara UV-C [24]

Característica	Valor
Voltaje de alimentación	120 [V] AC
Longitud de onda	253.8 [nm]
¿Genera calor?	No
¿Necesita un sistema de ventilación?	No
Medidas	367.03* 65.02* 61.97 [mm]
Precio	\$15,99

Potencia	8 [W]
Irradiancia	515 [$\mu W/cm^2$]

Para garantizar una conexión segura y eficiente entre la lámpara y el relé, es crucial considerar la capacidad de manejo de corriente del relé. Con este fin, se procedió a calcular la corriente que la lámpara consumiría. Este cálculo es esencial para asegurar que la corriente operativa se mantenga dentro de los límites seguros del relé, previniendo así posibles daños al componente o fallos en el sistema.

$$I = \frac{\text{Potencia de la lámpara}}{\text{Voltaje de la lámpara}} \quad (2.1)$$

$$I = \frac{8 [\text{Watts}]}{120 [\text{V}]}$$

$$I = 0.0667 [\text{A}]$$

Siendo la corriente de la lámpara un valor aproximado a 0.07 [A] se puede asegurar que funcionará sin problemas junto al relé, puesto que la corriente máxima de este componente de 2 [A].

Otra característica que se debe tener en cuenta es la dosis de exposición máxima permitida en [J/cm^2] para el tratamiento de los alimentos con luz pulsante, la cual no puede ser mayor a 12 [J/cm^2] y la duración de encendido de la lámpara emisora de pulsos no puede ser mayor a 2 [ms] según las regulaciones de la FDA [25].

Empleando la ecuación de dosis de exposición, también conocida como dosis de radiación (1.1), se registraron los cálculos estimados al trabajar con diferentes tiempos de exposición en la Tabla 15 donde se obtuvo que ninguno sobrepasa la dosis máxima debido al bajo irradiancia de la lámpara.

Tabla 15*Dosis de radiación con distintos tiempos de exposición*

Irradiancia de la lámpara	Tiempo de exposición	Dosis de exposición
515 [$\mu W/cm^2$]	10 [s]	0.00515 [J/cm^2]
	1 [min]	0.0309 [J/cm^2]
	5 [min]	0.1545 [J/cm^2]
	10 [min]	0.309 [J/cm^2]

- Sensor de luz GUVA-S12D: Sensor de luz ultravioleta (UV) de la Figura 9, entrega una señal analógica que depende de la cantidad de luz UV que detecta [26]. Para más información acerca del sensor revisar la Tabla 16.

Figura 9*Sensor GUVA-S12D***Tabla 16***Características sensor GUVA-S12D*

Característica	Valor
Longitud de onda detectada	240-370 nm
Rango de voltaje	2.7 V ~ 5.5 [V] DC

Precio	\$10,00
Compatible con placas de desarrollo	Sí
Magnitud detectada	Intensidad de la radiación ultravioleta de 0 a 4094 Índice de luz UV

- ESP32: Es una serie de microcontroladores system on a chip de bajo coste y bajo consumo con Wi-Fi integrado y Bluetooth de modo dual. Provee voltajes de operación de 3.3 a 5.0 [V] dependiendo de su pin y su conexión USB, lo que permite alimentar al módulo de relé de 5 V para su correcta operación [27]. En la Figura 10, Figura 11 y Tabla 17 se encuentran más detalles acerca de este componente.

Figura 10

Microcontrolador ESP32 [27]



Figura 11

ESP32 Pinout [28]

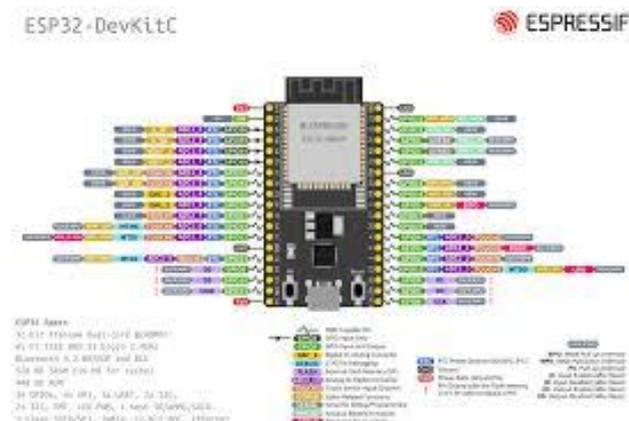


Tabla 17

Características ESP32

Característica	Valor
Procesador	Xtensa dual-core 32-bit hasta 240 [MHz]
Voltaje operativo	3.3 [V] (pines GPIO) 3.0 – 5.0 [V] (USB y fuente 5V)
Digital I/O pins	34
Analog input pins	18
Digital PWM I/O pins	16
Clock speed	240 [MHz]
¿Posee conectividad?	Sí, Wi-Fi y Bluetooth
Precio	\$10,00

- Módulo de relé de estado sólido 5V DC de 2 canales: El componente electrónico de la Figura 12 funciona como interruptor controlado de manera eléctrica. A

diferencia del módulo de relé electromecánico, no posee partes móviles, aumentando su vida útil. Debido a su diseño permite una conmutación rápida y silenciosa.

En su placa esquemática se puede observar que en su interior tiene incorporado un optoacoplador, que brinda protección al circuito de control para evitar sobretensiones, y un TRIAC que sirve como aislamiento térmico y permite controlar la fase de corriente AC. Estos componentes se pueden visualizar en la Figura 13.

Se seleccionó este componente ya que se alimentará con los 5 V que provee el microcontrolador ESP32 para evitar utilizar una fuente externa, y de esta manera controlar el encendido y apagado de la lámpara UV-C. También cuenta con más características idóneas para el presente trabajo, las cuales se presentan en la Tabla 18.

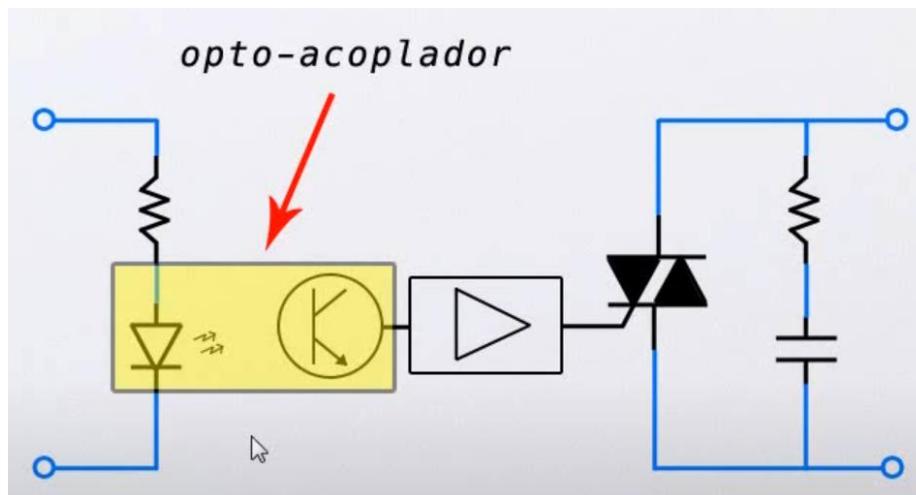
Figura 12

Módulo de relé de estado sólido 5 V DC de 2 canales [29]



Figura 13

Esquemático módulo de relé estado sólido [30]

**Tabla 18**

Características módulo de relé estado sólido 5 V [29]

Característica	Valor
Voltaje de operación	0 – 0.5 [V] SSR etapa baja Off 2.5 - 5 [V] SSR etapa alta On
Rango de tensión de carga	100 a 220 [V] AC (50/60 [Hz])
Corriente máxima	2 [A]
Trigger	Bajo

2.7 Programación de la interfaz y microcontrolador

- QT Creator: Entorno de desarrollo integrado (IDE) multiplataforma que permite el diseño y programación de aplicaciones de escritorio y móviles. Su logo se encuentra en la Figura 14 y sus características estas listadas en la Tabla 18.

Figura 14*Logo Qt Creator [31]***Tabla 18***Características Qt Creator [32]*

Característica	Valor
Espacio	6 GB
Compatibilidad con sistemas operativos	Linux, Mac, Windows
Desarrollo	Aplicaciones móviles y de escritorio
Open source	Sí

El proyecto consta de dos componentes de software: el primero se encarga del desarrollo de la aplicación, mientras que el segundo es un algoritmo que procesa los parámetros ingresados por el usuario a través de la interfaz. Este algoritmo genera una secuencia precisa de activación y desactivación de la lámpara, simulando los pulsos necesarios para el proceso de desinfección.

2.7.1 Programación de la interfaz

El programa fue diseñado con la versión Open source de Qt Creator 6 junto con la herramienta de generación de código CMake.

El proyecto está dividido en 4 archivos de código siendo estos:

- `Mainwindow.h`: Archivo `.h` con declaraciones de clases, funciones y variables que contienen la pantalla principal y la pantalla de la base de datos.
- `Main.cpp`: Archivo principal de un programa en C++ y contiene la función `main()`, que es el punto de entrada del programa.
- `Mainwindow.cpp`: Archivo que configura una GUI que permite al usuario interactuar con un dispositivo ESP32, iniciar y detener pruebas, manejar temporizadores para el conteo regresivo, y guardar registros en un archivo CSV. La aplicación usa señales y slots de Qt para manejar eventos y actualizaciones en la interfaz de usuario.
- `Mainwindow.ui`: Interfaz que permite la navegación entre las pantallas y el ingreso de parámetros como número de pulsos y tiempo de exposición, además de agregar información a la tabla de experimentos.

Las capturas desde el programa de la Figura 15 y Figura 16 permiten visualizar el entorno de trabajo de Qt cuando se estaban desarrollando las ventanas correspondientes.

Figura 15

Desarrollo de la aplicación en Qt Creator

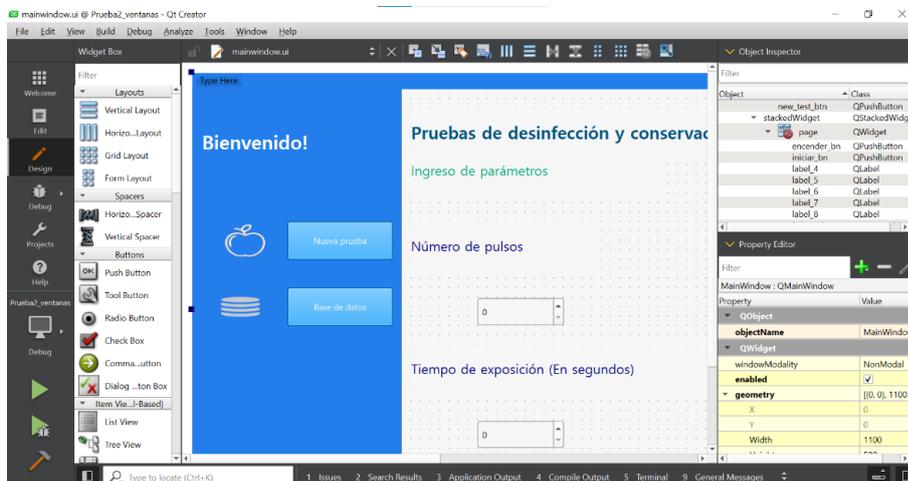
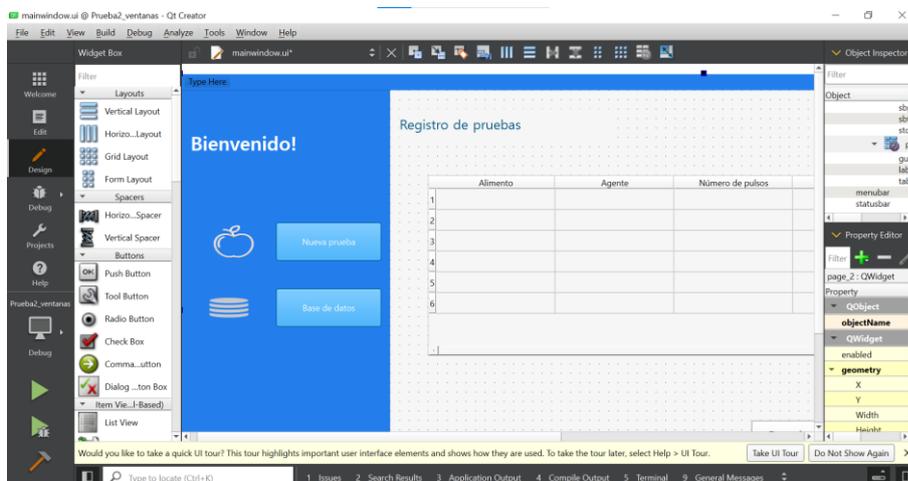


Figura 16

Desarrollo de la ventana "Base de datos"



Al ejecutar la aplicación se abre automáticamente la pantalla principal, en la cual se encuentran dos botones del lado izquierdo de la ventana, cuyo comportamiento se detalla a continuación:

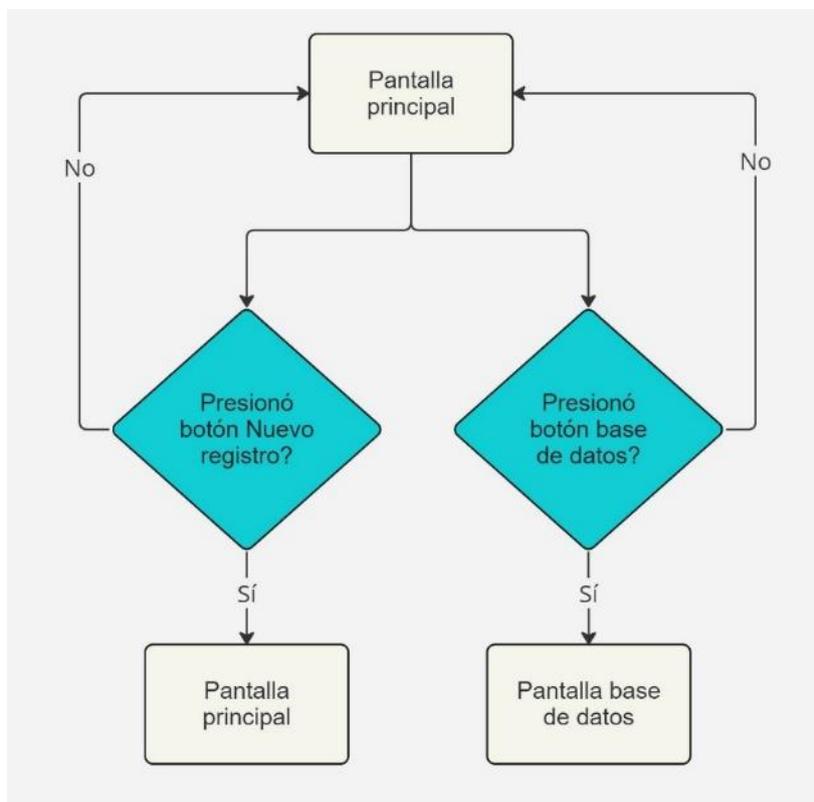
- Si se presiona el botón “Nuevo registro”, el programa se mantiene en la pantalla principal.

- Si se presiona el botón “Base de datos”, se accede a la pantalla de registros de experimentos donde se puede visualizar las pruebas realizadas y permite agregar más información sobre el experimento.

A continuación, se presenta el comportamiento expuesto en la Figura 17.

Figura 17

Diagrama de flujo de los botones laterales



En la pantalla principal se tiene la siguiente secuencia de pasos que el usuario debe seguir para llevar a cabo el proceso de desinfección de alimentos.

Inicialmente el usuario debe presionar el botón de encendido, que sirve como un condicional para poder inicializar el proceso. Este botón envía una señal que prende por dos segundos la lámpara con el fin de medir la cantidad de luz UV que está proveyendo.

Luego, se ingresan y validan que los parámetros ingresados de número de pulsos y tiempo de exposición sean mayores a 0 para posteriormente hacer click en el botón “Iniciar” y

empezar la secuencia de encendido y apagado del foco según las variables ingresada por pantalla.

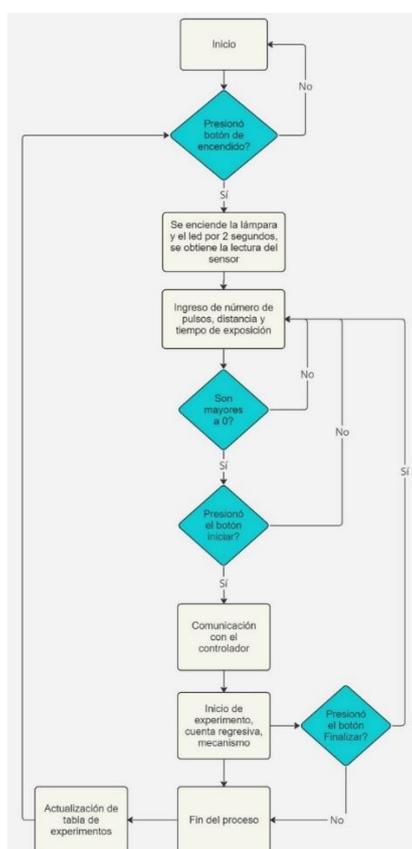
Una vez que el tiempo de exposición establecido haya culminado, es decir la cuenta regresiva llegue a 0, el proceso habrá terminado y de manera automática se guardará en la tabla de registro la información de número de pulsos, fecha y hora del inicio del experimento, tiempo de exposición, la fecha y hora de la finalización del experimento y la cantidad de luz UV-C en mV.

También se encuentra el botón “Finalizar” que detiene la prueba y reinicia los parámetros de tiempo de exposición y número de pulsos con un valor de 0.

El diagrama de flujo que explica las acciones a seguir del usuario se presenta en la Figura 18.

Figura 18

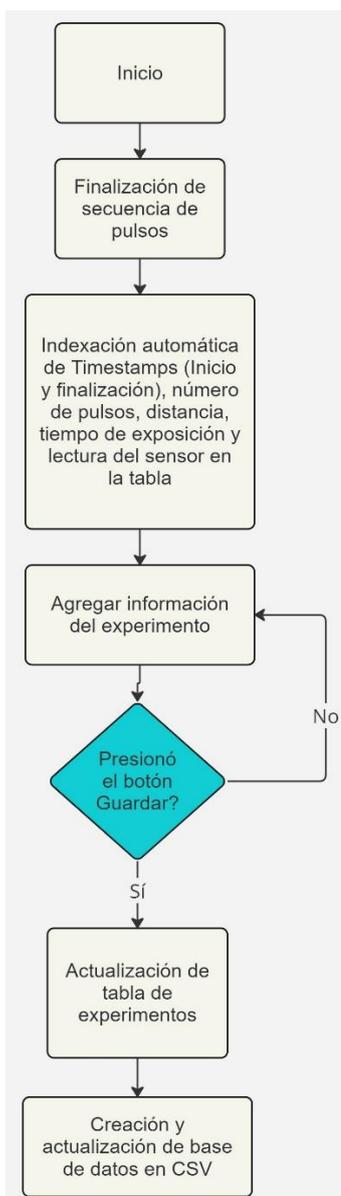
Diagrama de flujo en la ventana "Nuevo registro"



En caso de que se accediera a la ventana “Base de datos” se tiene el siguiente diagrama de flujo en la Figura 19 que refleja como el usuario puede ingresar nueva información en la tabla de experimentos sobre la prueba realizada para posteriormente guardarlo y registrarlo de manera automática en un archivo CSV al presionar el botón “Guardar”.

Figura 19

Diagrama de flujo de la ventana "Base de datos"



2.7.2 Programación del microcontrolador

Inicialmente se debe correr el siguiente código para poder iniciar el proceso de pulsos con los parámetros ingresados en la aplicación, ya que mediante la comunicación serial se recibirá la señal de “1” que envía el botón de encendido ubicado en la pestaña principal. Al obtener esta señal se activa el relé, encendiendo la lámpara por dos segundos y obteniendo en ese lapso de tiempo la medición de luz UV-C leída por el sensor.

Posteriormente, una vez que se reciben y validan los parámetros, se inicia la secuencia de encendido y apagado de la lámpara representando los pulsos de luz UV-C. Se utilizó la siguiente ecuación para representar el comportamiento de los pulsos, donde el tiempo de encendido del pulso es 10 [ms] para evitar el rápido desgaste de la lámpara.

$$N * D + (N - 1) * A = T \quad (2.2)$$

$$A = \frac{T - (N * D)}{N - 1} \quad (2.3)$$

Donde:

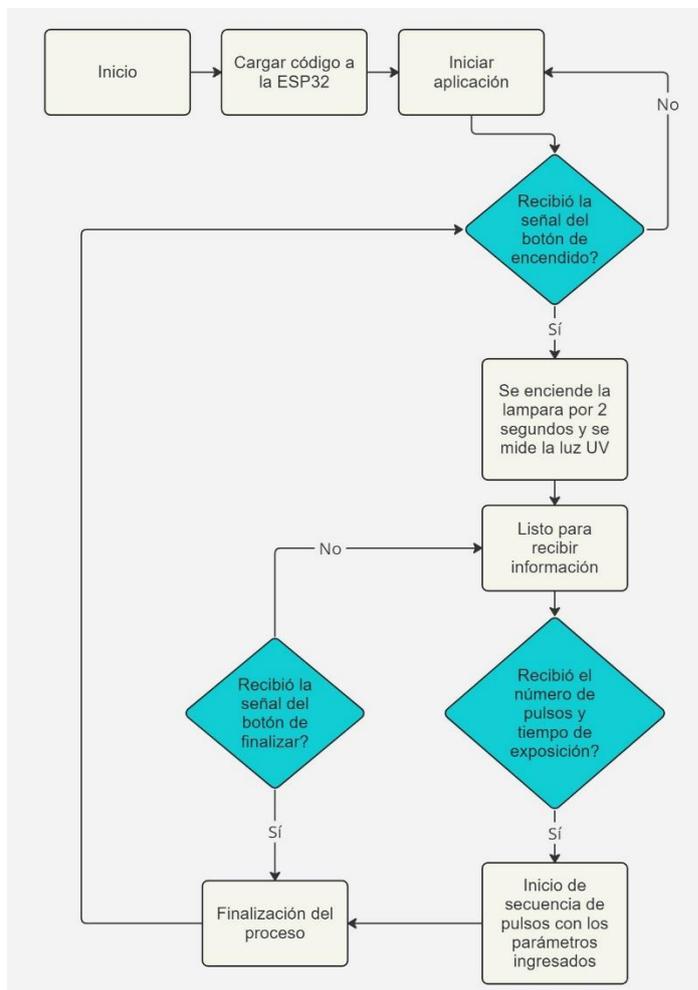
- N: Numero de pulsos.
- T: Tiempo de exposición en segundos.
- D: Tiempo de encendido igual a 10 [ms].
- A: Duración de apagado entre pulsos.

En caso de presionar el botón “Finalizar” el microcontrolador recibe una señal de “STOP” la cual culmina la secuencia de pulsos y vuelve a habilitar el botón encendido para realizar una nueva prueba.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo en la Figura 20 que ilustra el proceso implementado en el código del microcontrolador.

Figura 20

Diagrama de flujo del microcontrolador



2.8 Diseño mecánico

El diseño de una estructura tipo gabinete para el prototipo enfocado en el uso de luz pulsante UV-C implica la creación de un mueble funcional y seguro que permita la desinfección eficiente de objetos mediante la irradiación con luz ultravioleta. Este contenedor se construirá con materiales resistentes a la radiación UV y un ensamblaje seguro para garantizar la contención adecuada de la luz, protegiendo a los usuarios de la exposición directa.

2.8.1 Medidas

De acuerdo con los requerimientos dados por el cliente y por las dimensiones de los componentes se opta por utilizar las siguientes medidas aproximadas:

- Ancho: 30 cm
- Alto: 40 cm
- Largo: 30 cm
- Espesor: 3 mm

También se considera la distancia que va a tener cada soporte de la bandeja con respecto al emisor de luz UV-C, y una separación de 5 cm de altura entre cada soporte. Con estas dimensiones generales se procedió a desarrollar un boceto del modelo del prototipo, obteniendo el siguiente modelo en la Figura 21 y Figura 22.

Figura 21

Boceto prototipo

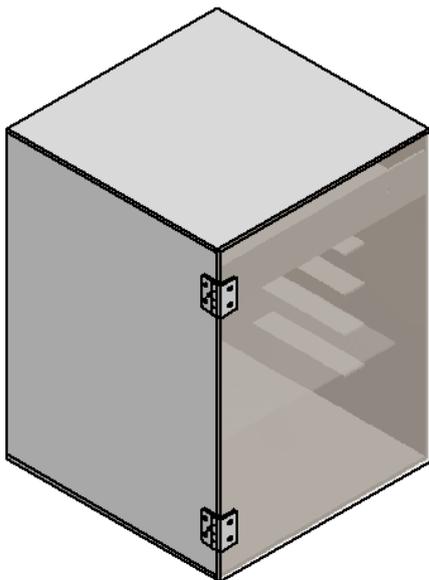


Figura 22

Renderizado del prototipo



2.8.2 Material y propiedades

El acrílico, con su alta resistencia a los impactos y claridad óptica, es ideal para las ventanas y paneles del gabinete, permitiendo la visibilidad de los objetos durante la desinfección mientras mantiene contenida la luz UV-C, asegurando la seguridad del usuario.

Algunas de sus propiedades físicas [33] relevantes son:

- De densidad baja
- Resistente a los rayos ultravioleta
- Fácil de limpiar
- Máxima temperatura de exposición 90 °C

El PLA (ácido poliláctico) es un bioplástico derivado de recursos renovables como el maíz y la caña de azúcar; es biodegradable y fácil de imprimir en 3D, siendo popular en la fabricación de prototipos y productos desechables. Sus propiedades físicas [34] relevantes:

- De densidad baja
- Resistente a los rayos ultravioleta (de menor manera que el acrílico)

- Fácil de limpiar
- Máxima temperatura de exposición 55 °C
- Baja resistencia a la humedad

2.8.3 Ensamblaje

A continuación, se muestra la vista explotada del ensamble en la Figura 23 con el fin de demostrar donde iría cada pieza, también se denota con un número y se tabula junto a una descripción cada elemento en la Figura 24.

Figura 23

Vista explotada del ensamble

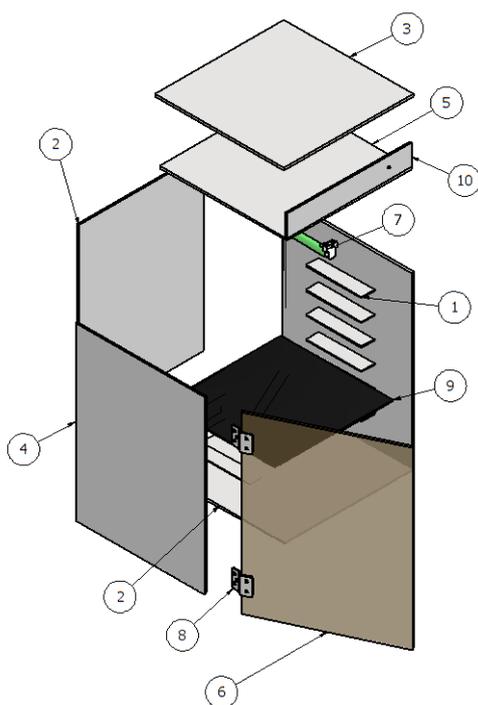


Figura 24*Lista de piezas vista explotada*

LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	12	Porta Bandeja	
2	1	Plancha de Acrílico Trasera	400x290
3	2	Plancha de Acrílico Sup/Inf	300x300
4	2	Plancha de Acrílico Lateral	400x300
5	1	Plancha de Acrílico Divisor	290x290
6	1	Plancha de Acrílico Puerta	410x300
7	1	Lampara UVC	
8	2	Bisagra L	
9	1	Bandeja	275x260
10	1	Tapa	290x50

Se tiene algunas observaciones relevantes con respecto al espesor de la bandeja o plancha de acrílico en general. Se sabe que se va a colocar algún tipo de alimento, según lo discutido con la clienta, esto se puede tratar de tres muestras de un mismo alimento. Para esto se realizó una simulación considerando el peso de tres papayas, con un peso promedio de 1.5 kg.

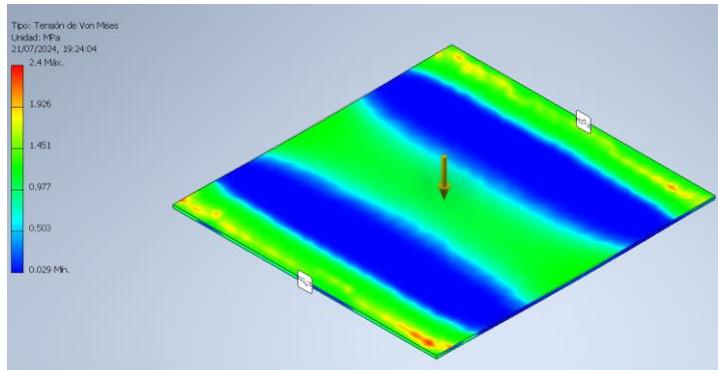
La carga de la que se va a someter la bandeja es:

$$F = 1.5 * 3 * 9.8 = 44.1 N \quad (2.4)$$

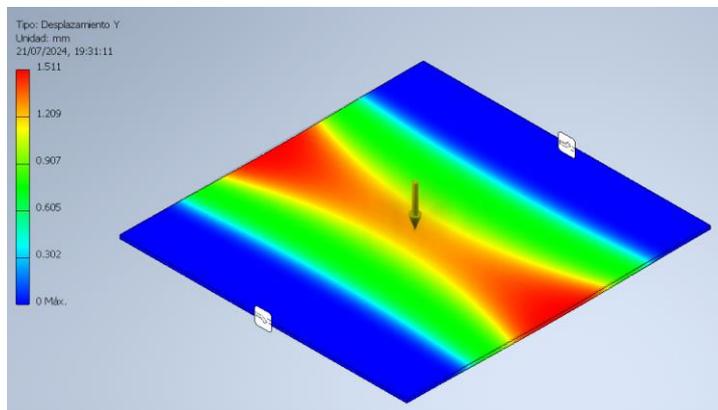
Parar redondear este valor se usa:

$$F = 50 N \quad (2.5)$$

A continuación, se presentan las simulaciones realizadas con el software de Inventor en la Figura 25 y Figura 26.

Figura 25*Tensión de Von Mises en soporte*

Con un grosor de 3 mm para la plancha de acrlico se obtuvo que el valor máximo de tensión o estrés es de 2,4 MPa con un valor de 50 N, lo cual es 27 veces menor al valor máximo de tensión que soporta el acrlico (63.8 MPa) antes de deformarse.

Figura 26*Desplazamiento en Y en soporte*

Así mismo podemos notar que la deformación en Y es menor a 2 mm, por lo que no habrá inconvenientes con la manipulación y colocación de los alimentos de prueba.

2.8.4 Reflectividad

El interior del gabinete se revistió con cinta reflectiva de aluminio para maximizar la reflexión de la luz UV-C emitida por la lámpara en las paredes laterales y la parte posterior.

Se empleó la cinta 'Aluminum Foil Tape UL723' de la marca IPG de la Figura 27, seleccionada por sus propiedades destacadas: alta reflectividad, bloqueo de olores y humedad, y capacidad para prevenir la pérdida de calor y refrigeración [35] referenciadas en la Tabla 19.

Figura 27

Cinta Aluminum Foil Tape UL723 [35]



Tabla 19

Características cinta reflectiva de Aluminio [36]

Característica	Valor
Rango de temperatura operacional	-17 ~ 107 [°C]
Reflectividad	95%
Resistencia a la tracción	18 [N/mm]

Considerando que la irradiancia que provee la lámpara es de $515 [\mu W/cm^2]$ y que el factor de reflectividad de la cinta de 95%, por lo tanto, se estima que la irradiancia reflejada es de $489.25 [\mu W/cm^2]$.

$$Reflectividad (\%) = \left(\frac{Irradiancia\ reflejada}{Irradiancia\ incidente} \right) \times 100 \quad (2.6)$$

$$95 \% = \left(\frac{Irradiancia\ reflejada}{515 [\mu W/cm^2]} \right) \times 100$$

$$Irradiancia\ reflejada = 489.25 [\mu W/cm^2]$$

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

En esta sección presenta los resultados y análisis derivados del desarrollo del prototipo de luz pulsante. Se divide en tres partes: la implementación del circuito, ensamblaje del equipo y programación. Además, se detalla el análisis de rubros que conlleva desarrollar el proyecto.

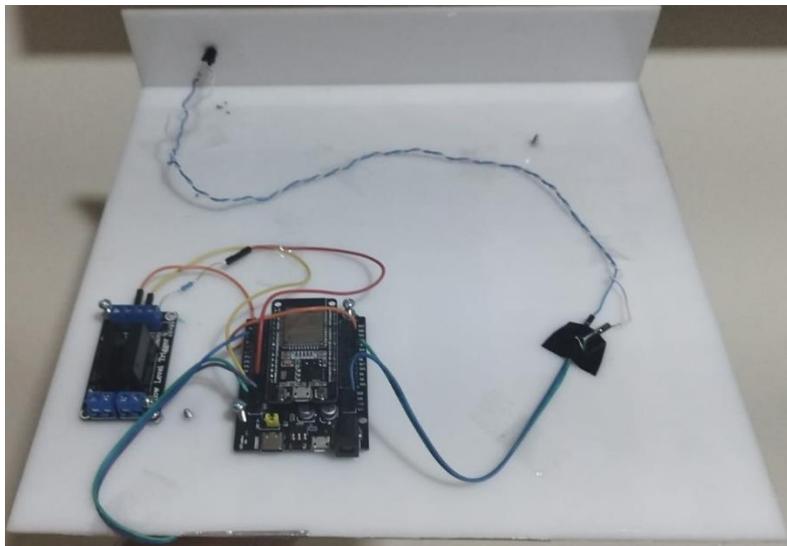
3.2 Implementación del circuito

Para llevar a cabo las conexiones especificadas en los planos eléctricos fue necesario el uso de una tarjeta de extensión, o también conocida como “Shield”, donde se conectaron los componentes al controlador con sus respectivas entradas y salidas [37].

Las conexiones realizadas se pueden observar en la Figura 28.

Figura 28

Circuito y conexiones



Se verificó el correcto funcionamiento del relé y del led previo a las pruebas realizadas junto a la aplicación para verificar su estado.

El relé respondió con eficiencia al poder ejecutar secuencia de pulsos con una duración de encendido de 10 ms logrando controlar la lámpara de luz UV-C, mientras que el led no presentó problemas en su función de encendido y apagado.

3.3 Ensamblaje del equipo

En referencia a la construcción del equipo se siguió un procedimiento de acuerdo con los materiales necesarios. Partiendo del material solicitado, la plancha de acrílico (de 3 mm), se realizaron los cortes a medida para el ensamble del cuerpo del prototipo y los soportes de la bandeja como se puede visualizar en la Figura 29. Las uniones se realizaron con cemento acrílico, un sellante plástico que permite una fuerte sujeción entre el material mencionado, el cual al ser aplicado se debe mantener las superficies a unir completamente lisas.

Figura 29

Planchas de acrílico para la carcasa



Ya teniendo las piezas de acrílico colocadas y adheridas, se procedió a colocar la puerta con las respectivas bisagras modeladas a medida. Estas bisagras tipo L se diseñaron con la consideración de que la plancha que sería la puerta tenga un grosor de 5 mm. Para sujetar la puerta y las bisagras se utilizaron tornillos y tuercas de 1/4 in, el paso no es relevante mientras

sean compatibles entre sí. En la Figura 30 podemos observar el resultado del proceso anterior, obteniendo la estructura en su mayoría como se la indica en los planos.

Figura 30

Carcasa ensamblada



A partir de lo obtenido, se procede a agregar la cinta de aluminio, que servirá de agente reflectivo para los pulsos de luz, a lo largo de las superficies donde incida directa o indirectamente el pulso. Además, se agregan dos últimas piezas que no son fijas, el compartimiento de los componentes electrónicos y la bandeja donde se van a colocar las muestras. Estas dos últimas piezas son extraíbles, ya sea para el mantenimiento y reemplazo de los componentes o para introducir las muestras de alimentos al prototipo.

El producto final se encuentra en la Figura 31.

Figura 31

Carcasa con cinta de aluminio reflectiva



3.4 Programación

Se detallan las pruebas realizadas en la aplicación para verificar su correcta comunicación con el microcontrolador, así como los experimentos efectuados con el circuito integrado dentro de la carcasa del dispositivo.

3.4.1 Programación del microcontrolador

Para llevar a cabo la secuencia de encendido y apagado de la lámpara simulando los pulsos de luz, se desarrolló un algoritmo específico para la ESP32, encargado de controlar los componentes electrónicos del proyecto.

Al medir la respuesta del sensor frente a la lámpara de luz UV-C fuera de la carcasa del prototipo se obtuvieron los siguientes valores en la Figura 32.

Figura 32

Resultados del sensor con la lámpara fuera del prototipo

```

Sensor reading = 686.00, Sensor voltage = 0.55, Indice UV = 5.53
Sensor reading = 709.00, Sensor voltage = 0.57, Indice UV = 5.71
Sensor reading = 768.00, Sensor voltage = 0.62, Indice UV = 6.19
Sensor reading = 635.00, Sensor voltage = 0.51, Indice UV = 5.12
Sensor reading = 688.00, Sensor voltage = 0.55, Indice UV = 5.54
Sensor reading = 694.00, Sensor voltage = 0.56, Indice UV = 5.59
Sensor reading = 597.00, Sensor voltage = 0.48, Indice UV = 4.81
Sensor reading = 718.00, Sensor voltage = 0.58, Indice UV = 5.79
Sensor reading = 669.00, Sensor voltage = 0.54, Indice UV = 5.39
Sensor reading = 576.00, Sensor voltage = 0.46, Indice UV = 4.64
Sensor reading = 703.00, Sensor voltage = 0.57, Indice UV = 5.67

```

El valor "Sensor reading" obtenido con el sensor UV GUVA-S12SD es un valor analógico que refleja la intensidad de la radiación ultravioleta (UV) que el sensor está captando en un momento dado. Este sensor convierte la radiación UV en una señal eléctrica que luego es medida como un voltaje. Este voltaje se traduce a un valor digital a través del convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador al que el sensor está conectado, generalmente en un rango de 0 a 4095 si se usa un ADC de 12 bits. El valor resultante ("Sensor reading") depende de la cantidad de luz UV que incide sobre el sensor: a mayor intensidad de UV, mayor será el valor registrado.

Comparando con LEDs de luz UV-A y UV-B, el sensor puede detectar valores pequeños que varían desde 0.10 hasta 110.00, que corresponden a un índice de luz UV. Este índice mide la intensidad de la radiación ultravioleta, donde un valor de 11 o más es considerado peligroso para la salud humana.

Cuando se utiliza la lámpara UV, los valores captados por el sensor son de 576.00 en adelante, lo que representa un índice UV de aproximadamente 4.81. Aunque este nivel está por debajo del umbral de riesgo extremo, indica una intensidad significativa de radiación UV. Además, el valor del voltaje obtenido puede transformarse en índice UV al dividirlo por 0.1, proporcionando una medida directa de la intensidad UV.

Se obtuvo un promedio de lecturas de sensor de 678.27, que indica la intensidad de la luz UV fuera del equipo mientras que el valor promedio del índice UV es de 5.45.

Consecuentemente se realizaron las mismas mediciones en la Figura 33 con la lámpara dentro del prototipo cubierto con la cinta de aluminio reflectiva para comparar los resultados obtenidos en el caso anterior.

Figura 33

Resultados del sensor con la lámpara dentro de la carcasa reflectiva

```
Sensor reading = 972.00, Sensor voltage = 0.78, Indice UV = 7.83
Sensor reading = 787.00, Sensor voltage = 0.63, Indice UV = 6.34
Sensor reading = 959.00, Sensor voltage = 0.77, Indice UV = 7.73
Sensor reading = 893.00, Sensor voltage = 0.72, Indice UV = 7.20
Sensor reading = 1052.00, Sensor voltage = 0.85, Indice UV = 8.48
Sensor reading = 1076.00, Sensor voltage = 0.87, Indice UV = 8.67
Sensor reading = 928.00, Sensor voltage = 0.75, Indice UV = 7.48
Sensor reading = 1062.00, Sensor voltage = 0.86, Indice UV = 8.56
Sensor reading = 880.00, Sensor voltage = 0.71, Indice UV = 7.09
Sensor reading = 851.00, Sensor voltage = 0.69, Indice UV = 6.86
Sensor reading = 815.00, Sensor voltage = 0.66, Indice UV = 6.57
Sensor reading = 805.00, Sensor voltage = 0.65, Indice UV = 6.49
```

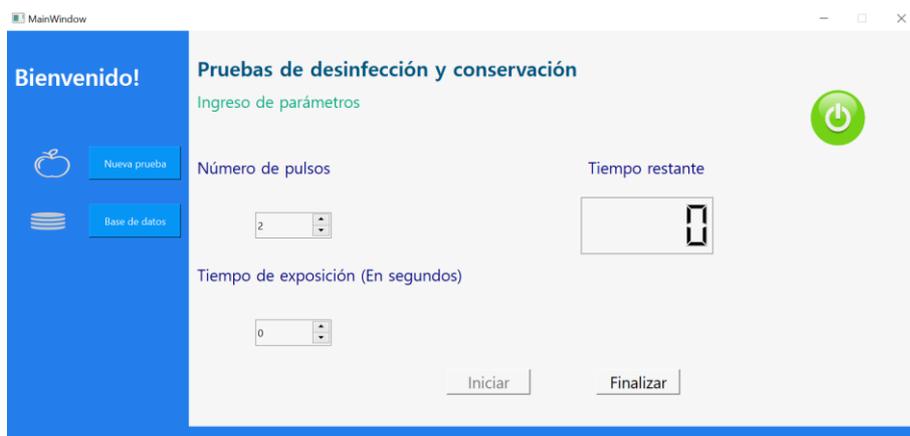
Al realizar las pruebas, se obtuvo una lectura promedio del sensor de 915.36 y un índice UV promedio de 7.49. Estos valores representan un incremento del 34.93% en la lectura promedio del sensor y del 37.43% en el índice UV promedio en comparación con los datos tomados fuera del equipo con el material reflectivo.

3.4.2 Aplicación de escritorio

En esta sección se presentan las capturas de pantalla de la aplicación, junto con los resultados de las pruebas realizadas. Se incluye la ventana principal en la Figura 34, denominada "Nueva prueba", acompañada de su correspondiente guía de uso.

Figura 34

Pantalla principal de la aplicación

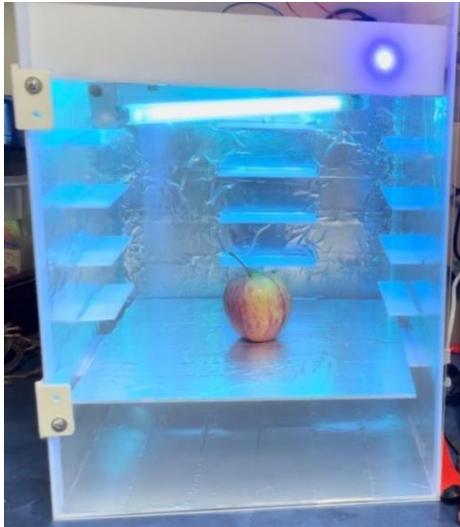


En la pantalla principal del lado izquierdo se pueden observar dos botones: “Nueva prueba” y “Base de datos”, al hacer click en el primer botón se redireccionará a la pantalla principal mientras que al presionar el segundo se podrá acceder a la base de datos de las pruebas que se han realizado con el prototipo.

En su parte central se encuentra un botón de encendido que permite inicializar el sistema, caso contrario no se podrá controlar los pulsos de luz. Cuando se presiona dicho botón, el sistema enciende un led junto a la lámpara por dos segundos para verificar el correcto funcionamiento de la misma y su lectura de luz UV-C, como se aprecia en la Figura 35. Una vez culminados los dos segundos y la lectura del sensor UV, se pueden establecer el valor de número de pulsos y el tiempo de exposición total que experimentará el alimento a analizar.

Figura 35

Respuesta del equipo al presionar el botón de encendido



Al presionar el botón iniciar el proceso de desinfección empezará por medio de la comunicación serial entre la aplicación y la ESP32, la cual recibirá dichos parámetros para la activación y el apagado del relé que controla la lámpara UV-C de acuerdo con el patrón de pulsos establecidos, tal como se muestra en la Figura 36. Simultáneamente se mostrará del lado derecho una cuenta regresiva de la prueba a efectuar. Mientras que el botón “Finalizar” culmina el proceso, eliminando los parámetros ingresados previamente.

En la Figura 37 se puede observar los mensajes que envía y obtiene la aplicación de Qt desde la comunicación serial entre la aplicación y el microcontrolador.

Figura 36

Equipo en funcionamiento

**Figura 37**

Comunicación serial de la aplicación al ejecutar una prueba

```
mainwindow.cpp  MainWindow:readSerial() -> void
259 while (newlineIndex != -1) {
260     QString receivedMessage = buffer.left(newlineIndex).trimmed(); // Extraer el mensaje completo
261     buffer = buffer.mid(newlineIndex + 1); // Eliminar el mensaje procesado del buffer
262
263     if (receivedMessage.contains("Signal received, starting UV detection...")) {
264         qDebug() << "ESP32 is ready to start sequence.";
265         ui->iniciar_bn->setEnabled(true); // Habilitar el botón de iniciar
266         alreadySent = true; // Marcar que la señal '1' ha sido recibida
    }
}

Application Output
Prueba2_ventanas
Product ID: 60000
Enviando 1
Enviando 1
ESP32 is ready to start sequence.
Unexpected message: "Ready to receive pulse and time data"
ESP32 is ready to start sequence.
UV sensor value: 8367.55
Unexpected message: "Ready to receive pulse and time data"
Fecha y hora de inicio: "2024-08-23 16:10:38"
Sequence completed. Ready for new input.
Unexpected message: "Ready for new input"
Unexpected message: "Debes encender el sistema primero."
Fecha y hora de finalización: "2024-08-23 16:10:42"
```

Una vez terminada la secuencia de pulsos el usuario puede acceder a la ventana de base de datos en la Figura 38 donde se registran las pruebas realizadas con el equipo.

Figura 38*Pantalla de base de datos*

En la pantalla de “Base de datos” se registrarán los parámetros ingresados en cada prueba y se podrá documentar información importante en los experimentos de luz pulsante como:

1. Alimento analizado
2. Agente microbiano
3. Inóculo inicial
4. Número de pulsos
5. Fecha y hora inicio del experimento
6. Tiempo de exposición en segundos
7. Distancia en centímetros
8. Fecha y hora de la finalización del experimento
9. Reducción microbiana.
10. Luz UV-C

Al presionar el botón guardar estos valores quedarán registrados exitosamente en la base de datos del archivo CSV.

En la Figura 39, se puede visualizar como después de ejecutar una prueba se guardan de manera automática los valores de: número de pulsos, fecha y hora de inicio de la prueba, tiempo de exposición, fecha y hora de finalización de la prueba y la luz UV-C medida por el sensor.

Figura 39

Registro automático de información luego de un experimento

	Número de pulsos	Fecha y hora inicio	Tiempo de exposición	Distancia (cm)	Fecha y hora finalización	Reducción microbiana
1	2	2024-08-23 16:10:38	3		2024-08-23 16:10:42	83
2						
3						
4						
5						

En la fila correspondiente del experimento se puede agregar más información acerca del experimento realizado en cada una de sus columnas, y una vez que se ha ingresado toda la información se puede hacer click en el botón “Guardar”. Este proceso se puede observar en la Figura 40.

Figura 40

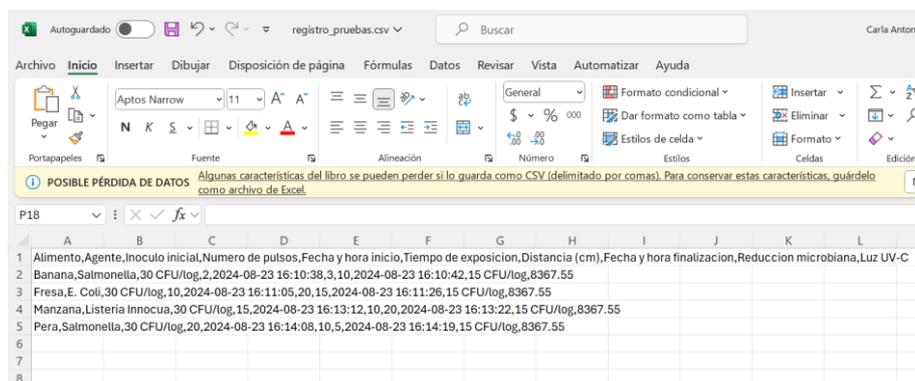
Ingreso de información adicional del experimento

	Alimento	Agente	Inóculo inicial	Número de pulsos	Fecha y hora inicio	Tiempo de exposición	Reducción microbiana
1	Banana	Salmonella	30 CFU/log	2	2024-08-23 16:10:38	3	10
2							
3							
4							
5							

Al presionar dicho botón se genera un único archivo CSV que registra la información representada en la tabla de experimentos tal como se puede apreciar en la Figura 41.

Figura 41

Registro en archivo CSV



3.5 Cotización de rubros

Respecto a los costos significativos en el desarrollo de este proyecto se detallan los valores de cada componente electrónico y mecánico junto a su cantidad en la Tabla 20.

Tabla 20

Costo componentes electrónicos y mecánicos

Categoría	Componente	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
	ESP32	1	15.50	15.50
	Tarjeta de expansión para ESP32	1	7.50	7.50
	Lámpara UV-C	1	26.90	26.90
	Relé de estado sólido de 2 canales	1	6.00	6.00
	Led	1	0.10	0.10

Resistencia 110 ohms	1	0.05	0.05
Sensor UV	1	10.00	10.00
Bisagras en impresión 3D	2	1.50	3.00
Plancha de acrílico	1	69.00	69.00
Cinta de aluminio reflectiva	2	4.00	8.00
Cemento acrílico	1	8.00	8.00
Tornillos	10	0.20	2.00
Total			156.05

Para implementar el circuito se optó por utilizar una tarjeta de expansión para la ESP32 donde se realizaron las conexiones pertinentes a cada sensor y actuador, el cual una vez implementado generó un valor de \$66.05.

En cuanto al ensamblaje de la carcasa, se adquirió una plancha de acrílico para satisfacer los requisitos del cliente, facilitando la visualización del proceso de desinfección de alimentos. Esta modificación, incluyendo el acrílico y los elementos necesarios para su ensamblaje y reflectividad, supuso una inversión total de \$90.00.

En total la ejecución del proyecto tuvo un costo de \$156.05, el cual comparado con otros equipos de luz pulsante cuyo precio varía desde los \$20,000 hasta los \$100,000, la solución presentada es de 99.22% a 99.84% más accesible que los otros dispositivos existentes de luz pulsante para desinfección de alimentos [38].

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de la implementación del equipo germicida por luz pulsante, el cual está diseñado para ser utilizado en el laboratorio de procesos por personal capacitado en procesos de desinfección y conservación de alimentos.

4.1.1 Conclusiones

- Se diseñó una aplicación que permite el ajuste de parámetros para llevar a cabo pruebas de desinfección y conservación de alimentos.
- Se construyó la estructura del prototipo utilizando acrílico blanco y transparente para poder visualizar los experimentos sin que los pulsos de luz UV representen un riesgo al usuario.
- Se desarrolló un algoritmo capaz de controlar los componentes del sistema de emisión de pulsos con luz UV-C a través de la comunicación serial entre la aplicación y el microcontrolador.
- Se generó una base de datos en formato CSV donde se registra la información de cada prueba exitosa para poder visualizar los resultados obtenidos variando la distancia, tiempo de exposición, número de pulsos y demás condiciones.
- Se revistió el interior del equipo con cinta reflectiva de aluminio para garantizar que la luz UV-C se refleje en múltiples ángulos, maximizando la desinfección del alimento.

4.1.2 Recomendaciones

- Para un siguiente prototipo, se sugiere el uso de una plancha de acero inoxidable de grado alimenticio con sus uniones soldadas para garantizar la rigidez y seguridad del equipo en general.
- Si es posible, utilizar un sensor UV de calidad industrial (Honeywell, Heisen, ZED) para obtener lecturas más precisas.
- Agregar una base de datos adicional por cada experimento que contenga más información sobre la medición de la lámpara en cada pulso.
- Realizar seguimiento de la construcción e implementación del prototipo con técnicos y/o especialistas en los campos relevantes para corroborar resultados.
- Agregar un mecanismo para mantener la puerta cerrada si hay alguna prueba en proceso, con el fin de garantizar la seguridad del usuario.

Referencias

- [1] O. Organización mundial de la Salud, “Informe de la OMS señala que los niños menores de 5 años representan casi un tercio de las muertes por enfermedades de transmisión alimentaria,” Informe de la OMS señala que los niños menores de 5 años representan casi un tercio de las muertes por enfermedades de transmisión alimentaria. Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/03-12-2015-who-s-first-ever-global-estimates-of-foodborne-diseases-find-children-under-5-account-for-almost-one-third-of-deaths>
- [2] TERRA Food-Tech, “Métodos De Conservación De Alimentos,” Procedimientos de conservación de alimentos para evitar que estos se deterioren y poderlos consumir en buen estado. Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.terrafoodtech.com/metodos-de-conservacion-de-alimentos/>
- [3] A. N. Arnold, L. Yang, and R. Boyer, “How Is Pulsed-Light Used To Process Foods?”, Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.pubs.ext.vt.edu/content/dam/pubs_ext_vt_edu/FST/fst-357/FST-357.pdf
- [4] M. L. Bhavya and H. Umesh Hebbar, “Pulsed light processing of foods for microbial safety,” *Food Qual. Saf.*, vol. 1, no. 3, pp. 187–202, Oct. 2017, doi: 10.1093/fqsafe/fyx017.
- [5] W. World Health Organization, “Estimating the burden of foodborne diseases,” Estimating the burden of foodborne diseases. Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/activities/estimating-the-burden-of-foodborne-diseases>
- [6] O. Organización Panamericana de la Salud, “Enfermedades transmitidas por alimentos - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud.” Accessed: Jun. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-transmitidas-por-alimentos>

- [7] D. Millán Villarroel, L. Romero González, M. Brito, and A. Y. Ramos-Villarroel, “Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas,” *Saber*, vol. 27, no. 3, pp. 454–469, Sep. 2015.
- [8] G. V. Barbosa-Cánovas, M. M. Góngora-Nieto, and B. G. Swanson, “Nonthermal electrical methods in food preservation/Métodos eléctricos no térmicos para la conservación de alimentos”, doi: 10.1177/108201329800400508.
- [9] Universidad CESUMA, “Técnicas de conservación de alimentos.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.cesuma.mx/blog/tecnicas-de-conservacion-de-alimentos.html>
- [10] IFT, “Thermal Preservation Processes.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.ift.org/policy-and-advocacy/advocacy-toolkits/food-processing/thermal-preservation-process>
- [11] “Espectro Electromagnético - Concepto, regiones, usos e importancia,” <https://concepto.de/>. Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: <https://concepto.de/espectro-electromagnetico/>
- [12] “¿Qué son los infrarrojos?,” Celsius Panel. Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.celsiuspanel.it/es/que-son-los-infrarrojos/>
- [13] E. GmbH, “Espectro visible | ERCO Conocimientos luminotécnicos.” Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.ereco.com/es/planificacion-de-iluminacion/conocimientos-luminotecnicos/fotometria/espectro-visible-7528/>
- [14] M. de ambiente y desarrollo sostenible de C. IDEAM, “GENERALIDADES DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA - IDEAM.” Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-radiacion-ultravioleta>

- [15] “Rayos X,” ingeniatric. Accessed: Aug. 20, 2024. [Online]. Available: <http://ingeniatric.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/572-rayos-x>
- [16] “Luz Ultravioleta UV-C Desinfección Virus y Bacterias. – Ecodelsa.” Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://ecodelsa.com/luz-ultravioleta-uv-c-desinfeccion-virus-y-bacterias/>
- [17] C. for F. S. and A. Nutrition, “La Irradiación de alimentos: Lo que usted debe saber,” *FDA*, Mar. 2024, Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/la-irradiacion-de-alimentos-lo-que-usted-debe-saber>
- [18] V. M. Gómez-López, P. Ragaert, J. Debevere, and F. Devlieghere, “Pulsed light for food decontamination: a review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 18, no. 9, pp. 464–473, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.tifs.2007.03.010.
- [19] “AvaLight-XE-Pulsed-Xenon-Light-Source-Avantes-Datasheet.pdf.” Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.amstechnologies-webshop.com/media/pdf/37/c8/03/AvaLight-XE-Pulsed-Xenon-Light-Source-Avantes-Datasheet.pdf>
- [20] “Xenon Light Source,” The Spectroscopy Shop. Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.spectroscopyshop.com/products/xenon-light-source>
- [21] “AvaLight-XE,” angliainstruments. Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.angliainst.co.uk/pulsed-xenon>
- [22] “AvaSpec-ULS2048CL-EVO,” Avantes. Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.avantes.com/products/spectrometers/starline/avaspec-uls2048cl-evo/>

- [23] R. Mahendran *et al.*, “Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 88, pp. 67–79, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.03.010.
- [24] “Amazon.com: Qualirey Lámpara UV de 8W sin ozono, 253.7nm de longitud de onda UVC bombilla 110V con cable de interruptor de encendido/apagado, enchufe, conector y herramientas de tornillo para : Herramientas y Mejoras del Hogar.” Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: https://www.amazon.com/dp/B0D1K7D4NP?psc=1&ref=ppx_yo2ov_dt_b_product_details
- [25] “CFR - Code of Federal Regulations Title 21.” Accessed: Aug. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=179.41>
- [26] “Módulo Sensor de luz ultravioleta (UV) GUVA-S12SD,” Naylamp Mechatronics - Perú. Accessed: Aug. 24, 2024. [Online]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/1221-modulo-sensor-de-luz-ultravioleta-uv-guva-s12sd.html>
- [27] “MÓDULO ESP32 ESP-32 WIFI BLUETOOTH (38PINES) – Grupo Electrostore.” Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://grupoelectrostore.com/shop/placas-para-programacion/esp/modulo-esp32-esp-32-wifi-bluetooth/>
- [28] “ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide v5.2.2 documentation.” Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>

- [29] “Módulo Rele (Relay) de Estado Solido 2 canales - 5V,” Ferretrónica. Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://ferretronica.com/products/modulo-rele-relay-de-estado-solido-2-canales-5v>
- [30] Bitwise Ar, *Arduino desde cero en Español - Capítulo 52 - Relé (Relay) de Estado Sólido [con esquemático]* , (Dec. 14, 2019). Accessed: Jul. 21, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=x2UW3JODcYU>
- [31] “File:Qt logo 2016.svg - Wikipedia.” Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Qt_logo_2016.svg
- [32] “Embedded Software Development Tools & Cross Platform IDE | Qt Creator.” Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.qt.io/product/development-tools>
- [33] “Overview of materials for Acrylic, General Purpose, Molded.” Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3cb08da2a0054447a3790015b7214d07>
- [34] “Raise3D_Premium_PLA_TDS_V4.pdf.” Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: https://s2.raise3d.com/public/media/2019/07/Raise3D_Premium_PLA_TDS_V4.pdf
- [35] “Aluminum Foil Tape,” IPG. Accessed: Aug. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.itape.com/product/aluminum-foil-tape-general-purpose/>
- [36] “INTERTAPE POLYMER GROUP”.
- [37] “TARJETA EXPANSION ESP32 DEVKIT 30PIN SHIELD - MEGATRONICA.” Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://megatronica.cc/producto/tarjeta-expansion-esp32-devkit-30pin-shield/?srsltid=AfmBOoplzmeWqqivrIiInUHDQ5KsiDa0e9Vr-e-GbNz5OoNkAJaVkhfE>

- [38] “Beneficios de la luz pulsada en la industria de alimentos.” Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.industriaalimentaria.org/blog/contenido/beneficios-de-la-luz-pulsada-en-la-industria-de-alimentos>

APÉNDICES

Apéndice A

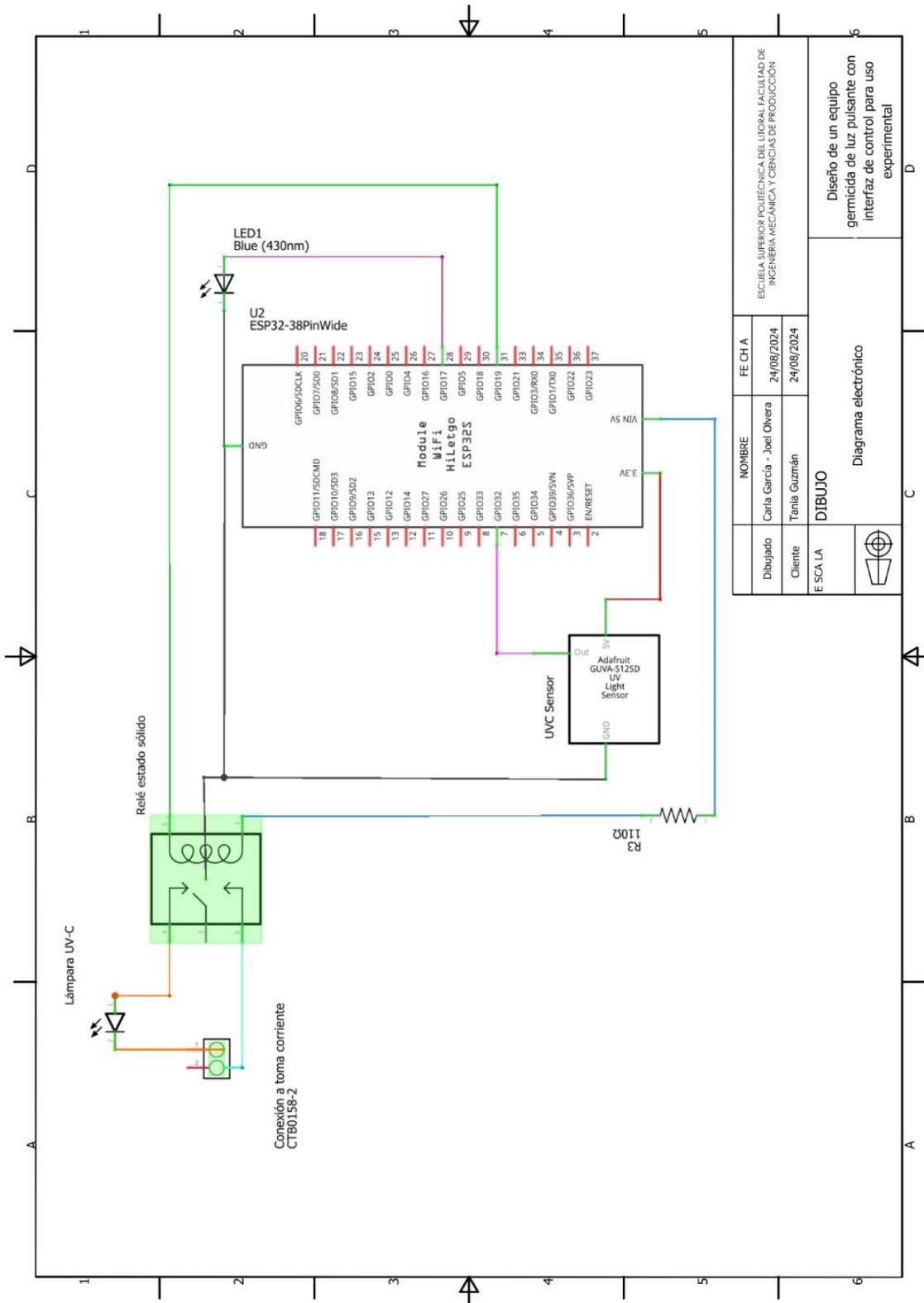


Figura A. 1

Datasheet Relé de estado sólido de 2 canales

2 Channel Solid State Relay Board



A two-channel relay module (HCMODU0115) featuring 2x Omron G3MB-202P solid state relays. A Solid State Relay is similar to a mechanic relay where it can be controlled through a digital signal. Solid State Relay generates no noise and has a much longer lifespan in compared to the traditional mechanic relay.

FEATURES:

- 2 channel 2 AMP Solid State Relay board
- Control 2 loads of up to 2 amps each at 120V or 240V AC.
- Good for lighting, holiday displays etc.
- Input control signal voltage:
 - 0-0.5V the state of low-level relay ON
 - 0.5-3.3V Unknown State
 - 3.3-5V high-level relay OFF
- Operating Voltage: 5V
- Operating Current: 16mA
- Maximum Load: 2A @ 240VAC

Figura A. 2

Datasheet sensor GUA-S12D



GUVA-S12SD



TECHNICAL DATA

UV-B Sensor

Features

- Gallium Nitride Based Material
- Schottky-type Photodiode
- Photovoltaic Mode Operation
- Good Visible Blindness
- High Responsivity & Low Dark Current

Applications

- UV Index Monitoring
- UV-A Lamp Monitoring

Absolute Maximum Ratings

Item	Symbol	Value	Unit
Forward Current	I_F	1	mA
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{op}	-30 ... +85	°C
Storage Temperature	T_{st}	-40 ... +90	°C
Soldering Temperature *	T_{sol}	260	°C

* must be completed within 10 seconds

Characteristics (25°C)

Item	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Dark Current	I_D	$V_R = 0.1 \text{ V}$	-	-	1	nA
Photo Current	I_{PD}	UVA Lamp, 1 mW/cm ²	-	113	-	nA
		1 UVI	-	26	-	nA
Temperature Coefficient	I_{TC}	UVA Lamp	-	0.08	-	% / °C
Responsivity	R	$\lambda = 300 \text{ nm}, V_R = 0 \text{ V}$	-	0.14	-	A/W
Spectral Detection Range	λ	10% of R	240	-	370	nm

Package Dimension

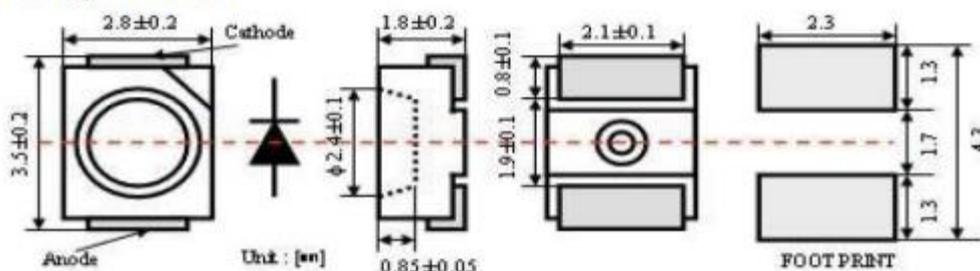
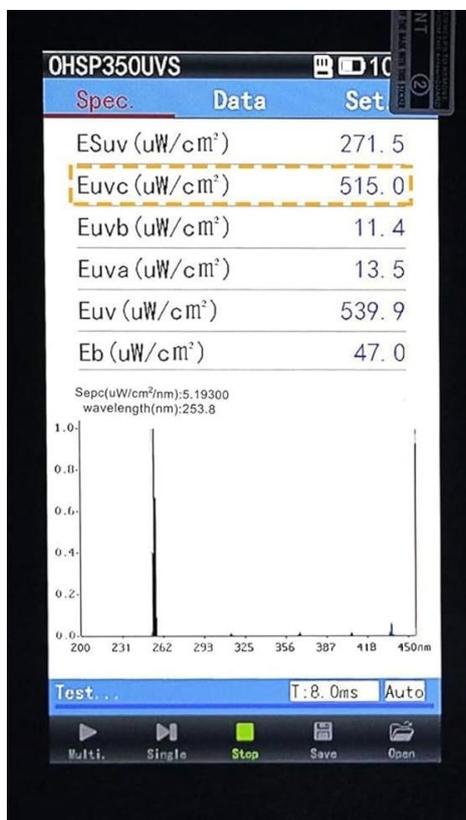


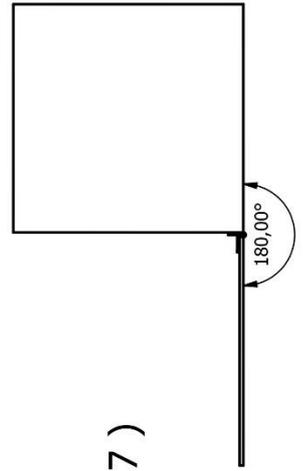
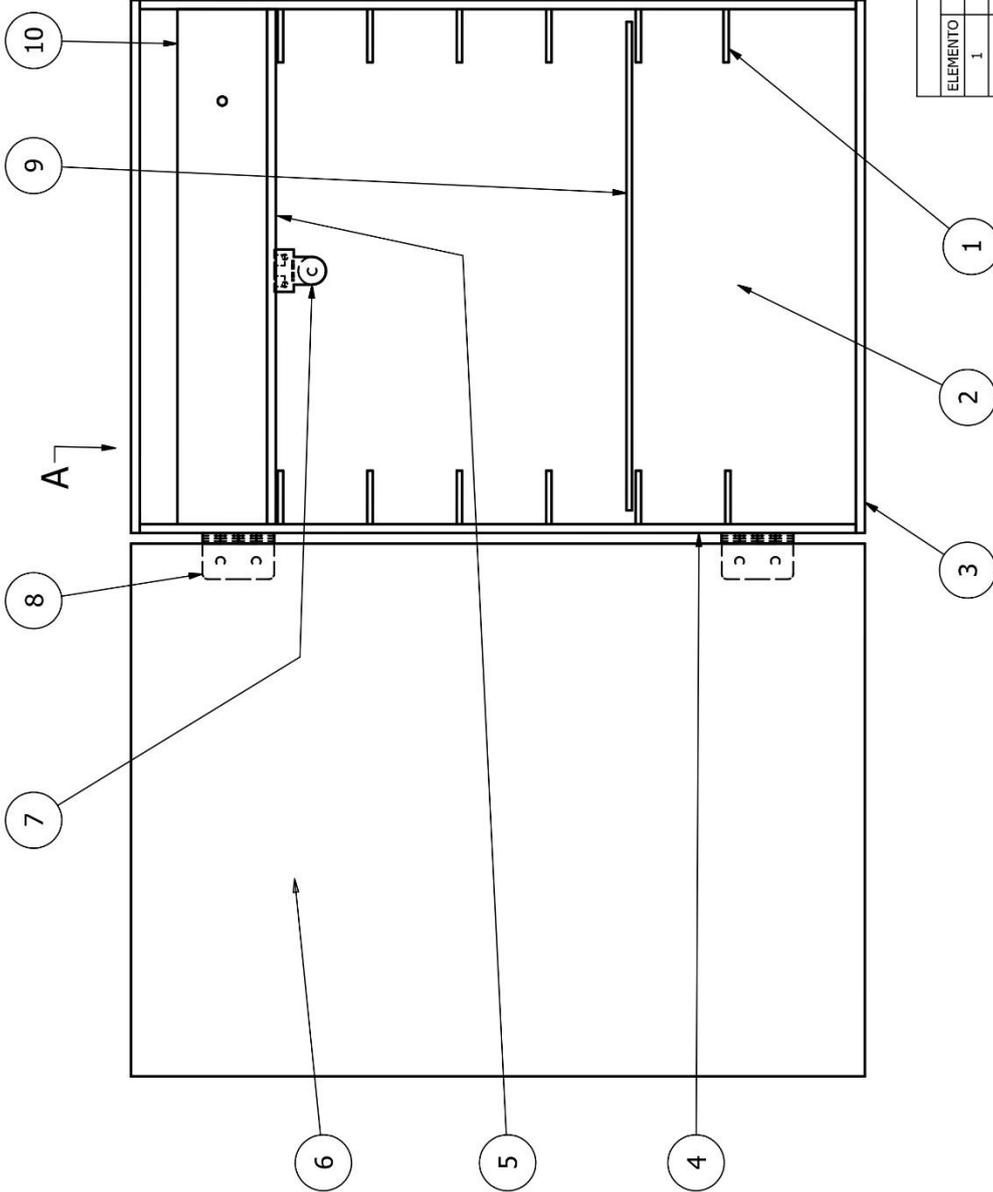
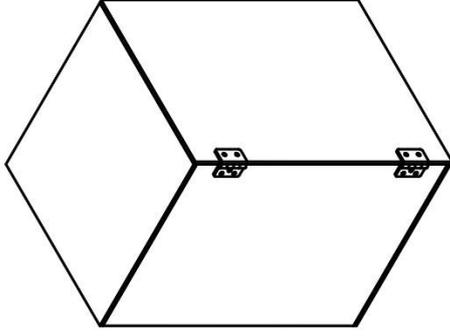
Figura A. 3

Medición de la lámpara con espectrómetro capturado por el proveedor



Apéndice B
Planos Mecánicos

Vista Isométrica (1 : 7)



A (1 : 7)

LISTA DE PIEZAS				MATERIALES		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
ELEMENTO	CIDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	ZONA	PLANO	MATERIALES		DESCRIPCIÓN		ZONA	
1	12	Plancha Soporte	Acrílico	130x30	D4		MATERIALES		DESCRIPCIÓN		ZONA	
2	1	Plancha Trasera	Acrílico	400x290	D4		PESO		DESCRIPCIÓN		ZONA	
3	2	Plancha Sup/Inf	Acrílico	300x300	D3		3.71 kg		DESCRIPCIÓN		ZONA	
4	2	Plancha Lateral	Acrílico	400x300	C1		TOLERANCIAS		DESCRIPCIÓN		ZONA	
5	1	Plancha Divisor	Acrílico	290x290	C1		DIB. 25/08/24		DESCRIPCIÓN		ZONA	
6	1	Plancha Puerta	Acrílico	410x300	B1		REV. 02/09/24		DESCRIPCIÓN		ZONA	
7	1	Lampara UVC	PLA	A2			APROB. 02/09/24		DESCRIPCIÓN		ZONA	
8	2	Bisagra L	PLA	A3			NOMBRE		DESCRIPCIÓN		ZONA	
9	1	Plancha Bandeja	Acrílico	275x260	A5		FECHA		DESCRIPCIÓN		ZONA	
10	1	Plancha Tapa	Acrílico	290x50	A5		25/08/24		DESCRIPCIÓN		ZONA	
				MATERIALES		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				PESO		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				3.71 kg		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				TOLERANCIAS		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				DIB. 25/08/24		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				REV. 02/09/24		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				APROB. 02/09/24		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				NOMBRE		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				FECHA		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				MODIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		
				NOMBRE		DESCRIPCIÓN		ZONA		PLANO		

Ver lista de piezas

ESCALA 1:3

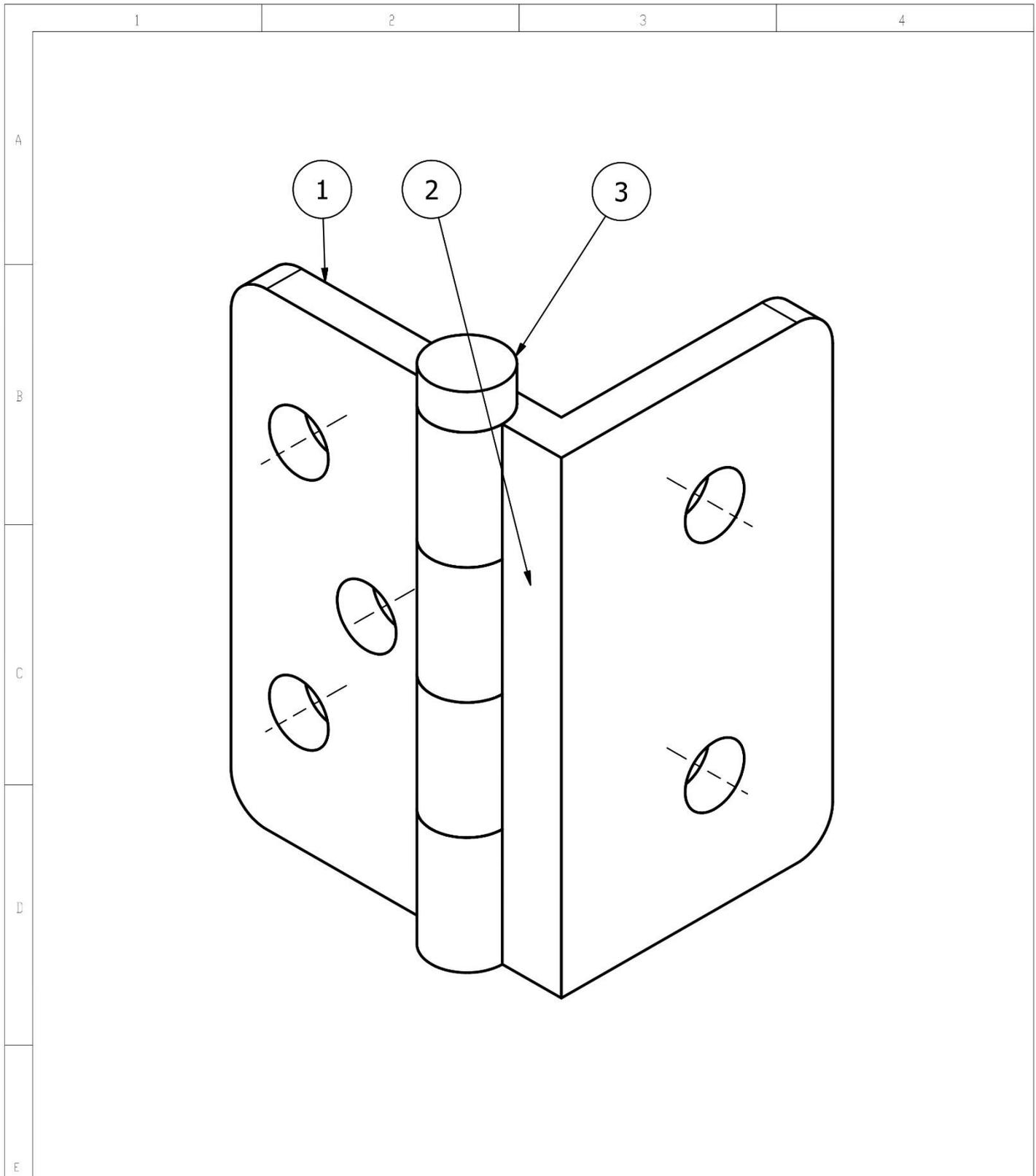
Plano General del Prototipo

NUMERO DEL DIBUJO MCT24 - 100

SUSTITUIVE A:

ESCUOLA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

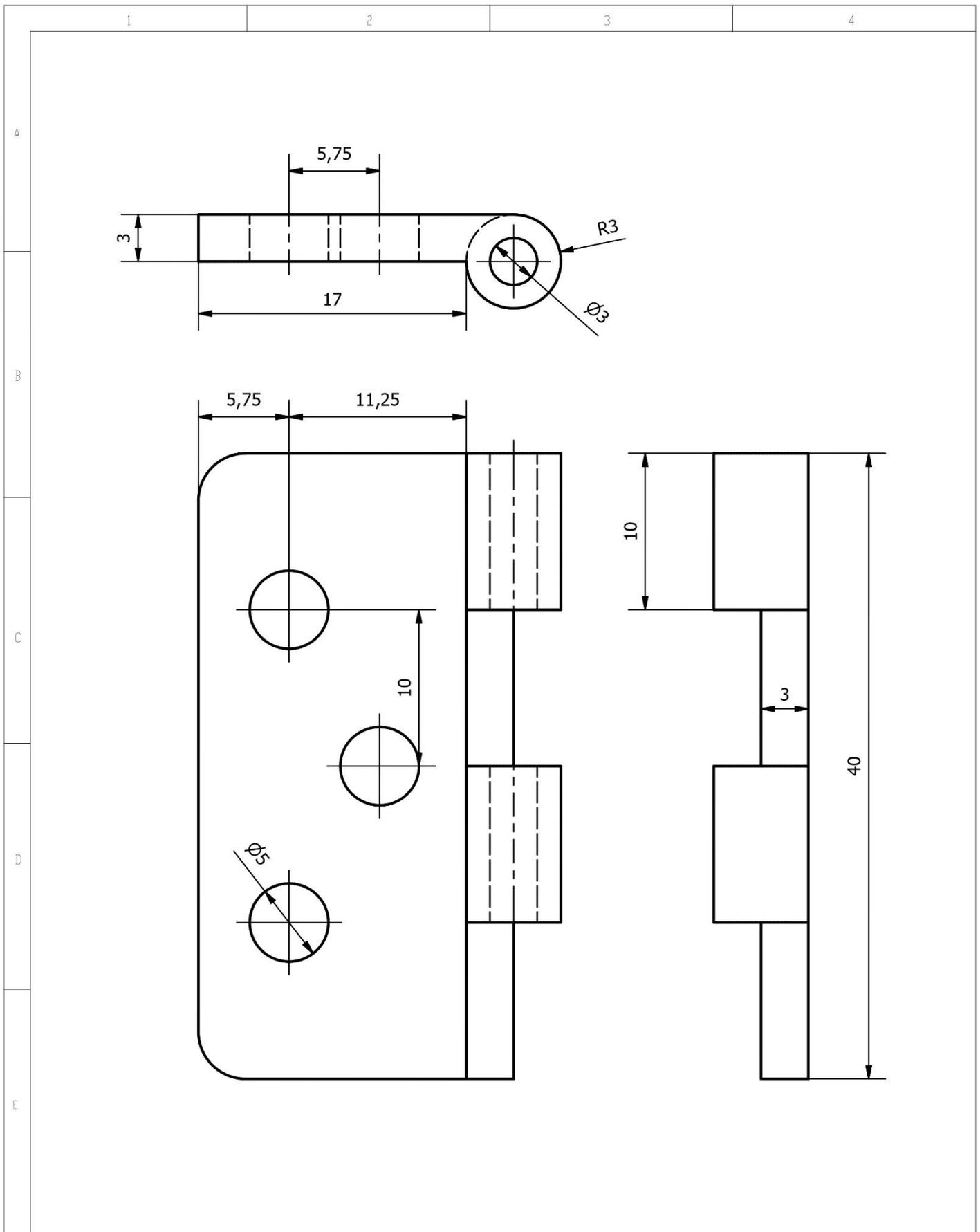


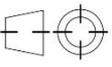


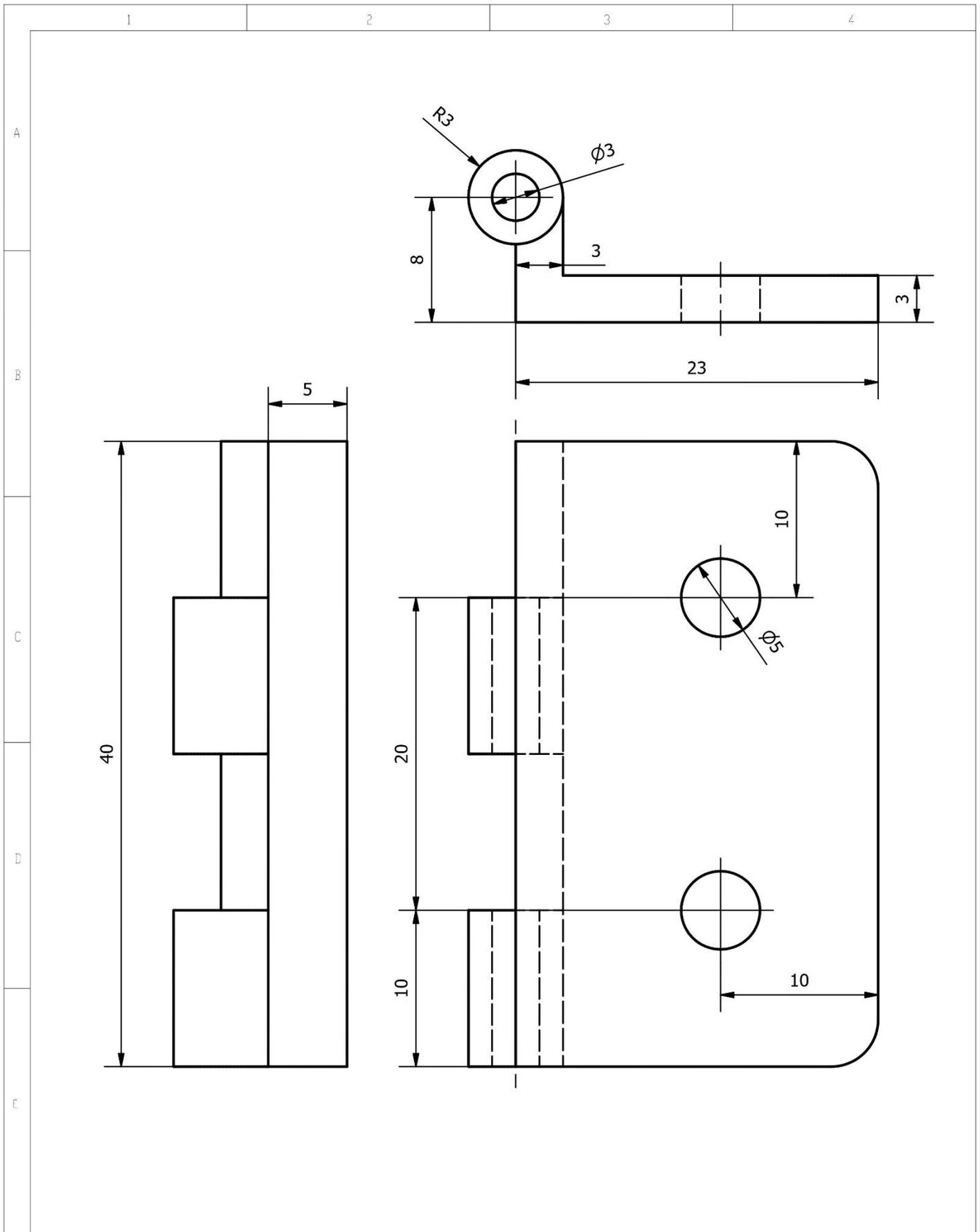
1	1	Placa A	PLA	C2		MCT24 - 201
2	1	Placa B	PLA	C3		MCT24 - 202
3	1	Eje	PLA	B2		MCT24 - 203
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	ZONA	DESCRIPCIÓN	PLANO

LISTA DE PIEZAS

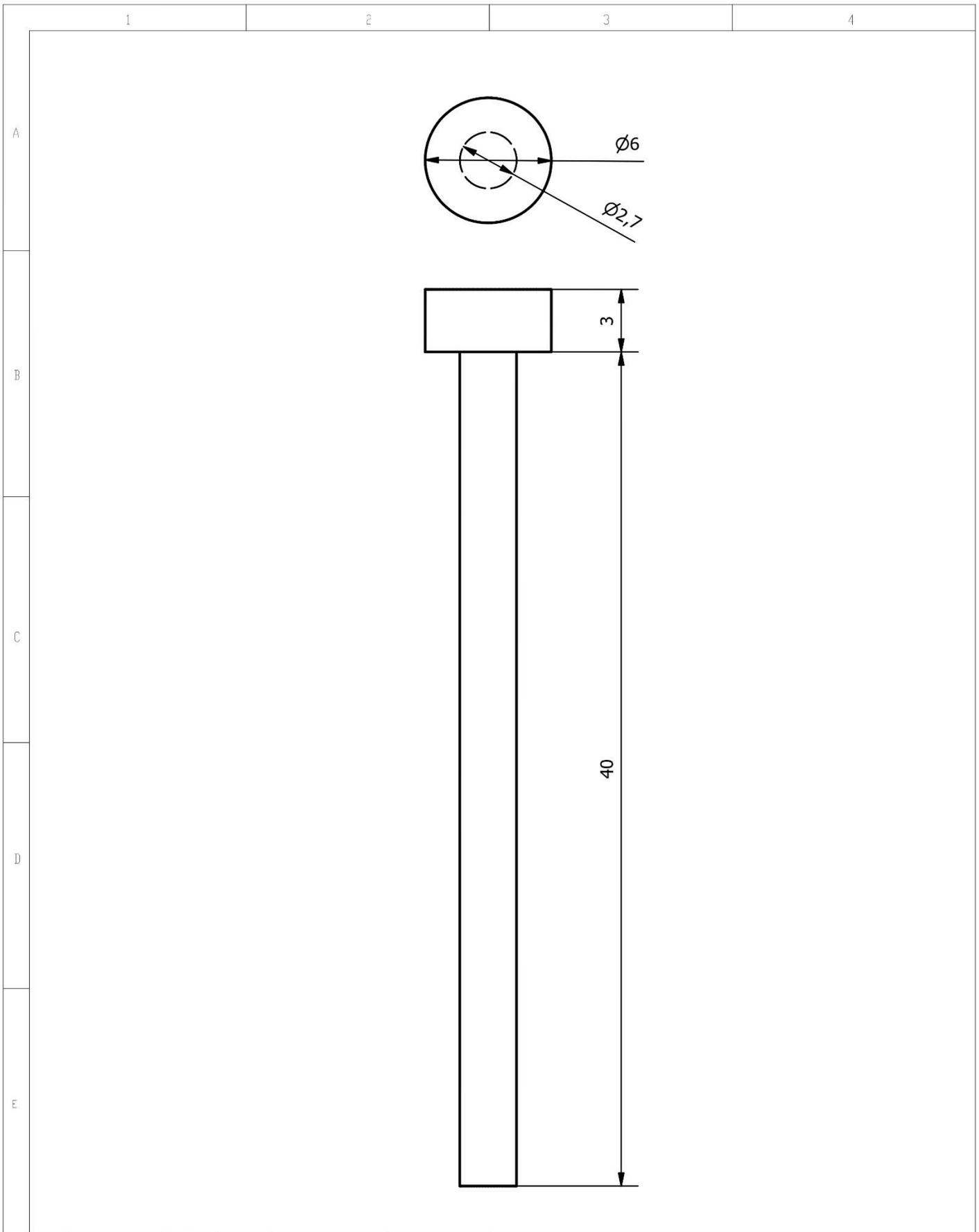
				TOLERANCIAS LINEAL: 0.5 ANGULAR: 0.5	PESO 6 gr	MATERIALES Ver lista de piezas		
				DIB.	FECHA	NOMBRE	DENOMINACIÓN	ESCALA
				REV.	02/09/24	ING. PURUNCAJAS	Conjunto Bisagra L	3:1
				APROB.	02/09/24	ING. PURUNCAJAS		
						ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL	NÚMERO DEL DIBUJO MCT24 - 200	
EDI-CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE				SUSTITUYE A:	



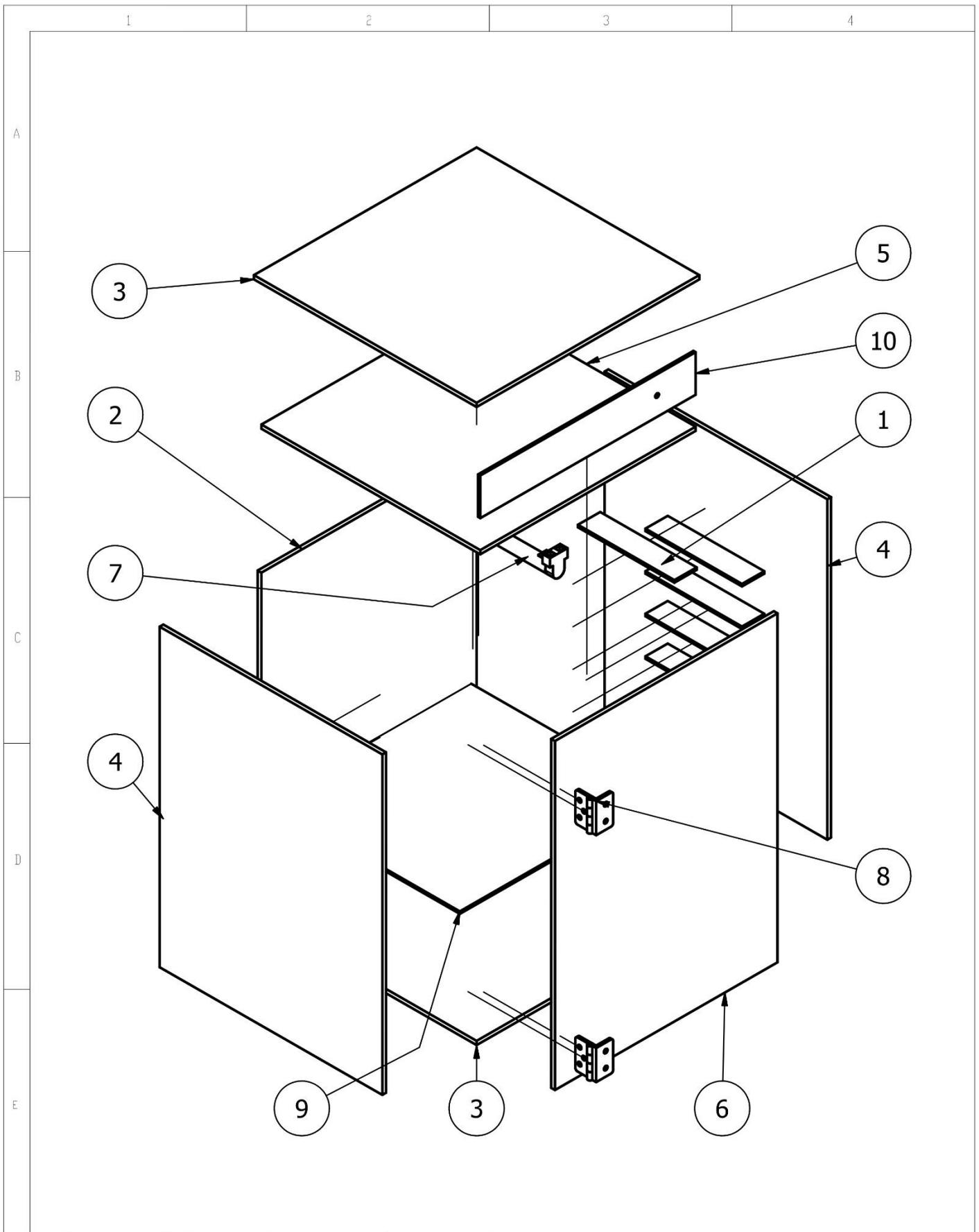
				TOLERANCIAS LINEAL: 0.5 ANGULAR: 0.5	PESO	MATERIALES PLA		
						DENOMINACIÓN Placa A	ESCALA 3:1	
					FECHA			NOMBRE
				DIB.	25/08/24			Joel Olvera Carla García
				REV.	02/09/24			ING. PURUNCAJAS
				APROB.	02/09/24	ING. PURUNCAJAS		
				ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		NÚMERO DEL DIBUJO MCT24 - 200		
EDI- CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			SUSTITUYE A:		



				TOLERANCIAS LINEAL: 0.5 ANGULAR: 0.5	PESO	MATERIALES PLA		
						DENOMINACIÓN Placa B	ESCALA 3:1	
					FECHA			NOMBRE
				DIB.	25/08/24			Joel Olvera Carla García
				REV.	02/09/24			ING. PURUNCAJAS
				APROB.	02/09/24	ING. PURUNCAJAS		
					ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		NÚMERO DEL DIBUJO MCT24 - 202	
EDI- CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE				SUSTITUYE A: 	



				TOLERANCIAS LINEAL: 0.5 ANGULAR: 0.5	PESO	MATERIALES PLA	
						DENOMINACIÓN Eje	ESCALA 4:1
EDI- CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		NÚMERO DEL DIBUJO MCT24 - 203	
						SUSTITUYE A:	



				TOLERANCIAS LINEAL: 0.5 ANGULAR: 0.5	PESO 3.71 kg	MATERIALES Ver lista de piezas	
						DENOMINACIÓN Vista Explotada del Prototipo	ESCALA 1:5
				FECHA	NOMBRE		
				DIB.	25/08/24 Joel Olvera Carla Garcia		
				REV.	02/09/24 ING. PURUNCAJAS		
				APROB.	02/09/24 ING. PURUNCAJAS		
				ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL		NÚMERO DEL DIBUJO MCT24 - 000	
EDI- CIÓN	MODIFICACIÓN	FECHA	NOMBRE			SUSTITUYE A:	

Apéndice C

Figura C. 1

Método `on_iniciar_bn_clicked`

```

void MainWindow::on_encender_bn_clicked() {
    if (alreadySent) {
        qDebug() << "Se evitó enviar dos veces.";
        return;
    }

    // Inicializa el temporizador para el conteo regresivo de 2 segundos
    remainingTime = 2;
    ui->lcdNumber->display(remainingTime);
    timer->start(1000); // Inicia el temporizador con un intervalo de 1 segundo

    // Conectar el temporizador para el conteo regresivo específico de encender
    connect(timer, &QTimer::timeout, this, [=]() {
        if (remainingTime > 0) {
            remainingTime--;
            ui->lcdNumber->display(remainingTime);
        } else {
            timer->stop(); // Detener el temporizador cuando llega a cero
            disconnect(timer, &QTimer::timeout, this, nullptr); // Desconectar el temporizador

            if (esp32->isWritable()) {
                esp32->write("1\n");
                qDebug() << "Enviando 1";
                ui->encender_bn->setEnabled(false); // Deshabilitar el botón de encender después de enviarlo
                ui->iniciar_bn->setEnabled(true);
            } else {
                qDebug() << "ESP32 is not writable";
            }
        }
    });
}

```

Figura C. 2*Método updateCountdown*

```

void MainWindow::updateCountdown()
{
    if (remainingTime > 0) {
        remainingTime--;
        ui->lcdNumber->display(remainingTime);
    } else {
        timer->stop(); // Detener el temporizador cuando llega a cero
        disconnect(timer, &QTimer::timeout, this, nullptr); // Desconectar el temporizador

        if (esp32->isWritable()) {
            esp32->write("END\n");
            esp32->flush();
        }

        QString endTimestamp = QDateTime::currentDateTimeUtc().toTimeZone(QTimeZone("America/Guayaquil")).toString("yyyy-MM-dd hh:mm:ss");
        qDebug() << "Fecha y hora de finalización: " << endTimestamp;

        updateTable(pulsos, tiempo, startTimestamp, endTimestamp, uvValue);

        alreadySent = false; // Permitir una nueva secuencia
        ui->encender_bn->setEnabled(true); // Habilitar el botón de encender para una nueva secuencia
        ui->iniciar_bn->setEnabled(false); // Deshabilitar el botón de iniciar
    }
}

```

Figura C. 3*Método on_stop_bn_clicked*

```

void MainWindow::on_stop_bn_clicked()
{
    timer->stop();
    ui->sbpulsos->setValue(0);
    ui->sbt tiempo->setValue(0);
    ui->lcdNumber->display(0);
    remainingTime = 0;

    if (esp32->isWritable()) {
        esp32->write("STOP\n");
        esp32->flush();
    }

    ui->encender_bn->setEnabled(true); // Habilitar el botón de encender
    alreadySent = false; // Resetear la condición para encender
    ui->iniciar_bn->setEnabled(false); // Deshabilitar el botón de iniciar
    ui->stop_bn->setEnabled(false);
}

```

Figura C. 4*Método updateTable*

```

void MainWindow::updateTable(int pulsos, int tiempo, const QString& startTimestamp, const QString& endTimestamp, double uv)
{
    int rowToUpdate = 0; // Actualizar siempre la primera fila
    ui->tabla_registros->insertRow(rowToUpdate);
    ui->tabla_registros->setItem(rowToUpdate, 3, new QTableWidgetItem(QString::number(pulsos)));
    ui->tabla_registros->setItem(rowToUpdate, 4, new QTableWidgetItem(startTimestamp));
    ui->tabla_registros->setItem(rowToUpdate, 5, new QTableWidgetItem(QString::number(tiempo)));
    ui->tabla_registros->setItem(rowToUpdate, 7, new QTableWidgetItem(endTimestamp));
    ui->tabla_registros->setItem(rowToUpdate, 9, new QTableWidgetItem(QString::number(uvValue)));
}

```

Figura C. 5

Método readSerial

```

void MainWindow::readSerial() {
    static QString buffer; // Buffer para acumular los datos

    buffer += esp32->readAll(); // Leer los datos y acumularlos en el buffer

    // Procesar solo cuando el buffer contiene un mensaje completo (terminado en \n)
    int newlineIndex = buffer.indexOf('\n');
    while (newlineIndex != -1) {
        QString receivedMessage = buffer.left(newlineIndex).trimmed(); // Extraer el mensaje completo
        buffer = buffer.mid(newlineIndex + 1); // Eliminar el mensaje procesado del buffer

        if (receivedMessage.contains("Signal received, starting UV detection...")) {
            qDebug() << "ESP32 is ready to start sequence.";
            ui->iniciar_bn->setEnabled(true); // Habilitar el botón de iniciar
            alreadySent = true; // Marcar que la señal '1' ha sido recibida
        } else if (receivedMessage.startsWith("UV_VALUE:")) {
            QString uvValueStr = receivedMessage.split(":")[1].trimmed();
            uvValue = uvValueStr.toDouble(); // Guardar el valor del sensor UV
            qDebug() << "UV sensor value: " << uvValue;
        } else if (receivedMessage == "SEQUENCE_DONE") {
            qDebug() << "Sequence completed. Ready for new input.";
            ui->encender_bn->setEnabled(true); // Habilitar el botón para una nueva secuencia
            alreadySent = false; // Permitir que el botón de encender se pueda usar de nuevo
            ui->iniciar_bn->setEnabled(false); // Deshabilitar el botón de iniciar
        } else {
            qDebug() << "Unexpected message: " << receivedMessage;
        }
    }

    newlineIndex = buffer.indexOf('\n'); // Verificar si hay otro mensaje completo en el buffer
}

```

Figura C. 6

Método on_guardar_bn_clicked

```

void MainWindow::on_guardar_bn_clicked()
{
    QString desktopPath = QStandardPaths::writableLocation(QStandardPaths::DesktopLocation);
    QString filePath = desktopPath + "/registro_pruebas.csv";

    QFile file(filePath);
    if (file.open(QIODevice::ReadWrite | QIODevice::Text)) {
        // Leer el contenido existente del archivo
        QByteArray fileContent = file.readAll();
        QString existingContent = QString::fromUtf8(fileContent);
        QStringList existingLines = existingContent.split('\n', Qt::SkipEmptyParts);

        // Preparar el contenido para escribir
        QString content;
        QTextStream stream(&content, QIODevice::WriteOnly);
        stream.setGenerateByteOrderMark(true);

        // Escribir el encabezado si el archivo está vacío
        if (existingLines.isEmpty()) {
            stream << QString::fromUtf8("Alimento,Agente,Inoculo inicial,Numero de pulsos,Fecha y hora inicio,Tiempo de ex
        }

        // Recopilar nuevas filas para agregar
        QStringList newRows;
        for (int row = 0; row < ui->tabla_registros->rowCount(); ++row) {
            QStringList rowData;
            bool rowEmpty = true;

            for (int column = 0; column < ui->tabla_registros->columnCount(); ++column) {
                QTableWidgetItem *item = ui->tabla_registros->item(row, column);
                QString text = item ? item->text() : "";
                rowData << text;

                if (!text.isEmpty()) {

```


Apéndice D

Figura D. 1

Inicialización de variables en el microcontrolador

```
#include <Ticker.h>

#define RELAY_PIN 19
#define LED_PIN 17
#define UV_SENSOR_PIN 32

int pulsos = 0;
int tiempo = 0;
bool newData = false;
bool systemActive = false;
bool stopRequested = false;
double uv_Voltaje = 0;
double uv_indice = 0;

const int NUM_SAMPLES = 200; // Número total de muestras (para 2 segundos a 10 ms por muestra)
int sensorValues[NUM_SAMPLES]; // Array para almacenar las muestras
int sampleIndex = 0; // Índice para el array de muestras

unsigned long relayOnTime = 0;
bool relayActive = false;

Ticker sampleTicker;
Ticker pulseSequenceTicker;

enum RelayState {IDLE, ON, OFF};
RelayState currentState = IDLE;
unsigned long pulseStartTime = 0;
unsigned long pulseDuration = 0;

unsigned long offDuration = 0;
int pulseCount = 0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    pinMode(UV_SENSOR_PIN, INPUT);
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Relé apagado
    digitalWrite(LED_PIN, LOW); // LED apagado

    // Initialize Ticker objects
    sampleTicker.attach(0.01, sampleReading); // se realiza sample reading cada 10ms
    pulseSequenceTicker.attach(0.01, managePulseSequence); // Manejo de secuencia de pulso cada 10 ms
}
```

Figura D. 2

Recepción de señales de la aplicación y secuencia de pulsos

```

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    String receivedData = Serial.readStringUntil('\n');
    receivedData.trim(); // Eliminar espacios en blanco

    if (receivedData == "1") {
      Serial.println("Signal received, starting UV detection...");
      digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
      digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Enciende el relé
      relayOnTime = millis(); // Guarda el tiempo actual
      relayActive = true; // Marca el relé como activo
      systemActive = true; // El sistema está activo
      Serial.println("Ready to receive pulse and time data");
      sampleIndex = 0; // Reinicia el índice de muestras
    }
    else if (systemActive && !newData) {
      int commaIndex = receivedData.indexOf(',');
      if (commaIndex != -1) {
        pulsos = receivedData.substring(0, commaIndex).toInt();
        tiempo = receivedData.substring(commaIndex + 1).toInt() * 1000; // Convertir tiempo a milisegundos
        newData = true; // Marca que hay nuevos datos
        pulseCount = 0; // Resetea el contador de pulsos
        currentState = IDLE; // Inicializa el estado
      }
    }
    else if (receivedData == "STOP") {
      stopRequested = true; // Marcar solicitud de parada
    }
  }

  else {
    Serial.println("Debes encender el sistema primero."); // Debugging
  }
}

if (relayActive && millis() - relayOnTime >= 2000) {
  // Calcular el promedio de las muestras
  long sensorValue_sum = 0;
  for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
    sensorValue_sum += sensorValues[i];
  }
  double sensorValue_promedio = sensorValue_sum / (double)NUM_SAMPLES;

  // Convertir el valor promedio a voltaje
  uv_Voltaje = (sensorValue_promedio * 3.3) / 4095.0;
  // Calcular el índice UV
  uv_indice = uv_Voltaje / 0.1;

  // Redondear a 1 si el índice UV está entre 0 y 1
  if (uv_indice > 0 && uv_indice < 1) {
    uv_indice = 1;
  }

  Serial.print("UV_VALUE:");
  Serial.println(uv_indice); // Enviar el valor del sensor UV a la aplicación Qt

  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Apagar el relé
  digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apagar el LED

  relayActive = false; // Marca el relé como inactivo
}
}

```

Figura D. 3*Función sampleReading para lectura del sensor*

```

void sampleReading() {
    if (relayActive && sampleIndex < NUM_SAMPLES) {
        sensorValues[sampleIndex] = analogRead(UV_SENSOR_PIN);
        sampleIndex++;
    }
}

```

Figura D. 4*Función managePulseSequence para ejecución de pulsos*

```

void managePulseSequence() {
    if (newData && systemActive) {
        if (currentState == IDLE) {
            if (stopRequested) {
                Serial.println("Pulse sequence stopped");
                digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Apagar el relé
                digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apagar el LED
                Serial.println("STOP_BUTTON_PRESSED");
                pulseCount = pulsos; // End the sequence
                newData = false; // Reset data flag
            } else {
                pulseDuration = 10; // Duración del encendido en milisegundos
                offDuration = (tiempo - pulsos * pulseDuration) / (pulsos - 1);
                if (offDuration < 0) offDuration = 0;
                currentState = ON; // Cambia el estado a ON
                pulseStartTime = millis();
                pulseCount = 0; // Inicializa el conteo de pulsos
                digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Enciende el relé
            }
        } else if (currentState == ON) {
            if (millis() - pulseStartTime >= pulseDuration) {
                digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Apagar el relé
                currentState = OFF; // Cambia el estado a OFF
                pulseStartTime = millis(); // Resetea el tiempo de inicio del pulso
            }
        } else if (currentState == OFF) {
            if (millis() - pulseStartTime >= offDuration) {
                digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Encender el relé
            }
        }

        pulseCount++;
        if (pulseCount >= pulsos) {
            digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Apagar el relé
            digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apagar el LED
            Serial.println("SEQUENCE_DONE\r\nReady for new input");
            newData = false; // Resetea data flag
            currentState = IDLE; // Resetea el estado a IDLE
        } else {
            currentState = ON; // Cambia el estado a ON
            pulseStartTime = millis(); // Resetea el tiempo de inicio del pulso
        }
    }
}
}

```