

Diseño y construcción de un prototipo de esterilización empleando radiación UV-C para alimentos industrializados

Design and construction of a UV-C sterilization prototype for industrial food products

Jefferson Gaona-González¹, Rodolfo Merino-Vivanco², Jorge Carrión-González³, Andy Vega-León⁴, Jonathan González-Espinosa³ y Alba Vargas-Naula^{4,*}

¹ Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

² Centro de Investigación, Innovación, Desarrollo de Prototipos Tecnológicos y Pruebas Electroenergéticas – I2TEC, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

³ Carrera de Electricidad, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

⁴ Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador

* Autor para correspondencia: alba.vargas@unl.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 05/04/2023

Fecha de aceptación del manuscrito: 15/05/2023

Fecha de publicación: 30/06/2023

Resumen—Los alimentos que se comercializan en empaques pueden estar contaminados con distintos tipos de microorganismos que producen enfermedades. El desarrollo de esta investigación brinda una solución para la esterilización de alimentos industrializados mediante el uso de la Radiación Ultravioleta (UV) en 253,7 nm. Se analizaron trabajos relacionados a la tecnología UV y sus efectos en los patógenos para determinar el valor necesario de dosis UV, y se investigó sobre la población patógena propensa a desarrollarse en materiales como: plástico, cartón, vidrio y metal. Para el dimensionamiento y construcción del prototipo se realizó la toma de medidas de los principales alimentos industrializados que se ofertan en los supermercados, así como se analizó el tipo de material a utilizar, seleccionando el acero inoxidable por sus propiedades reflectivas y de anti corrosión. Para verificar la correcta aplicación de dosis UV y garantizar la seguridad de los usuarios, se realizaron pruebas con un radiómetro y se verificó que el prototipo no genere gases tóxicos mediante el uso de un medidor de ozono. El prototipo es capaz de trabajar en dos modos de operación: estándar y envase, arrojando una dosis UV máxima de 57,64 mJ/cm² en el proceso más largo del modo estándar. Los resultados obtenidos mostraron que el prototipo sirve para esterilizar distintos tipos de envases y que las dosis de radiación UV emitidas por las lámparas son suficientes para inactivar varios tipos de microorganismos, entre ellos la *Escherichia coli* que es una de las bacterias más comunes encontradas en los supermercados del país.

Palabras clave—Esterilización, Ultravioleta, Prototipo, Alimentos, Microorganismos.

Abstract—Packaged foods can be contaminated with various types of microorganisms that cause disease. The development of this research provides a solution for the sterilization of industrialized foods through the use of ultraviolet (UV) radiation at 253.7 nm. Studies related to UV technology and its effects on pathogens were analyzed to determine the necessary value of UV doses, and research was conducted on the pathogen population prone to develop in materials such as plastic, cardboard, glass and metal. For the sizing and construction of the prototype, measurements were taken of the main industrialized foods offered in supermarkets, and the type of material to be used was analyzed, selecting stainless steel for its reflective and anti-corrosion properties. In order to verify the correct application of the UV doses and to guarantee the safety of the users, tests were carried out with a radiometer and it was verified that the prototype does not generate toxic gases with an ozone meter. The prototype is capable of operating in two modes: standard and package, with a maximum UV dose of 57.64 mJ/cm² in the longer process of the standard mode. The results obtained showed that the prototype can be used to sterilize different types of containers and that the doses of UV radiation emitted by the lamps are sufficient to inactivate several types of microorganisms, including *Escherichia coli*, one of the most common bacteria found in the country's supermarkets.

Keywords—Sterilization, Ultraviolet, Prototype, Food, Microorganisms.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la alimentación se ha considerado como un elemento primordial para la preservación de la salud humana; por lo tanto, es importante mantener un estricto cuidado respecto a la higiene que poseen

los alimentos que se ingieren. Pese a ello, este tema suele pasar desapercibido cuando el alimento se ofrece dentro de un envase o empaque, ya que estas superficies pueden estar contaminadas con microorganismos sin que el consumidor lo note. El procedimiento de esterilización para eliminar o miti-

gar dichos microbios es una herramienta vital para controlar la proliferación de enfermedades y preservar la salud de las personas.

Según Wilkinson (2023), la contaminación alimentaria hace referencia a la presencia de un contaminante en el alimento que puede provocar alteraciones en la salud del consumidor. Dicha contaminación puede producirse durante la manipulación del comestible o en las etapas del proceso de fabricación. Dependiendo de su naturaleza, puede ser una contaminación biológica, química y cruzada. Sin embargo, en la cadena de producción y suministro es en donde existe una mayor posibilidad de contaminación, deterioro y/o alteración de los alimentos (Martínez, 2013).

Existen diversos microorganismos que pueden llegar a estar en contacto con los alimentos y cumplir con distintos roles; por ejemplo, los probióticos que aportan en el procesamiento de los alimentos, los saprofitos que son un factor clave en la biodegradación y deterioro de alimentos, y los patógenos que producen infecciones e intoxicaciones alimentarias (Bencko, 2020).

En la industria existe una gran cantidad de microorganismos asociados a la contaminación de las superficies de los alimentos, entre los principales están: *Escherichia coli*, *Salmonella* spp, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, etc. (Chauret, 2014). En el ámbito nacional, Pillalaza y Baquero (2018), examinaron decenas de carros de compras usados en los supermercados del cantón Quito e identificaron la presencia de varias bacterias coliformes, siendo la *Escherichia coli* la predominante.

Según menciona Coba (2021), la agencia ecuatoriana de estudios de mercado Dichter & Neira realizó una investigación en el año 2021 de cerca de 350 000 compras en 400 tiendas, obteniendo como uno de los resultados que en la lista de compras de los ecuatorianos, el primer lugar lo ocupaban los alimentos provenientes de la industria, como: gaseosas, snacks, agua embotellada, etc.; es decir, los ecuatorianos muestran una fuerte inclinación hacia la compra de productos que se comercialicen en un envase/empaque. Es por este motivo que los envases son un elemento esencial ya que son los encargados de preservar el contenido, asegurar la calidad del mismo y mostrar información importante sobre el alimento a consumir; por ello, también es importante el tipo de material del que están contruidos, ya sea vidrio, metal, plástico, etc. (Food Insight, 2020).

Respecto a los microorganismos presentes en los envases, en Sood et al. (2019), se realizó el análisis de distintos tipos de recipientes hechos a partir de cartón y papel, en donde se comprobó la presencia de las bacterias: *Bacillus*, *Staphylococcus* y *Pseudomonas*. En la investigación hecha por Siroli et al. (2017), se mostró la presencia de *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella* spp en envases hechos a base de materiales plásticos. En alimentos enlatados (atún) también existe la probabilidad de contaminación con microorganismos, como: *Clostridium* spp, *Salmonella* spp, *Shigella* spp, *Campylobacter jejuni* y *Escherichia coli* (Traister, n.d.). Finalmente, según Pinto et al. (2015), al analizar envases de vidrio del sector industrial, se identificaron bacterias como *Staphylococcus* spp. y *Bacillus cereus*.

Una de las formas para inactivar estos microorganismos y desinfectar superficies es el uso de radiación ultravioleta.

Debido a las características celulares de estos microbios, no existe una dosis de radiación UV estándar que se considere letal para todos. Sin embargo, en Malayeri et al.(2016), se presentan las dosis recomendadas para la inactivación de ciertos patógenos, obteniendo como información relevante al objeto de estudio de este proyecto, que la mayor dosis de radiación es de 36 mJ/cm² para envases hechos a partir de papel/cartón y la mínima de 4,6 mJ/cm² para plásticos. Adicionalmente, se puede concluir que el plástico es más susceptible a albergar microorganismos (cerca de 6 tipos de bacterias) mientras que el vidrio tiene menor posibilidad de contaminación (2 tipos de bacterias).

En el estudio reciente realizado por Bartolomeu et al. (2022) se evaluó la eficacia de la radiación UV-C en la esterilización de superficies inanimadas, como plástico, metal, madera y vidrio; obteniendo como resultado que las superficies de plástico, metal y madera necesitaron cerca de un minuto para lograr la inactivación de patógenos, mientras que el vidrio requirió un tiempo total de 30 segundos. Para este estudio emplearon lámparas UV-C con una emisión máxima de 254 nm.

La ingesta de alimentos contaminados o desinfectados incorrectamente tiene repercusiones en la salud de las personas, produciendo enfermedades que van desde diarreas hasta síndromes neurológicos. Estas afecciones pueden llegar a ser letales y por tal motivo han sido clasificadas bajo el nombre de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA) por parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la misma estima que las ETA llegan a enfermar a 600 millones de personas cada año y miles fallecen debido a esta causa. Otro dato para tener en cuenta es que aproximadamente el 40% de la población que padece de ETA corresponde a niños menores de 5 años (Organización Mundial de la Salud, 2020).

Frente a las desventajas y limitaciones que involucran los distintos métodos tradicionales de desinfección y a la necesidad de preservar la salud de las personas que consumen alimentos contenidos en envases / empaques, resulta factible implementar prototipos que involucren una tecnología con capacidad germicida, que brinden una esterilización eficaz y eficiente, y que no produzcan residuos químicos; es decir, que usen radiación ultravioleta.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se exponen los diferentes componentes necesarios para el cumplimiento de la investigación.

Contexto

El proyecto se desarrolló dentro de un marco compuesto de dos categorías, tales como la académica y la social, durante el periodo de abril 2021 a septiembre 2022, en la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables (FEIRNNR) de la Universidad Nacional de Loja (UNL).

Procedimiento

Se realizaron diversas actividades resumidas a continuación:

1. Se realizó una revisión bibliográfica de los conceptos fundamentales relacionados a la tecnología ultravioleta, como espectro de operación, unidades de medida, irradiancia, dosis y tiempo de exposición en diversas fuentes enfocadas a la investigación científica.
2. Se recopiló información de investigaciones enfocados a la determinación de dosis UV para la inactivación de patógenos como virus y bacterias.
3. Se analizaron los distintos tipos de materiales utilizados para la fabricación de envases alimentarios con el fin de recopilar las bacterias más comunes presentes en cada tipo.
4. Se evaluaron las características dimensionales de los alimentos industrializados que se ofertan en supermercados para establecer un volumen adecuado de desinfección.
5. Se diseñó un circuito de control y activación en base a los aspectos técnicos inmersos utilizando materiales electrónicos idóneos
6. Se realizaron los cálculos de energía necesaria para el dimensionamiento y cantidad de lámparas.
7. Se desarrolló una interfaz GUI para el manejo del equipo considerando los fundamentos determinados.
8. Se fabricó el diseño desarrollado a partir del material y componentes elegidos.
9. Se realizaron pruebas de validación de resultados del prototipo.

Recursos de Hardware y Software

Los recursos utilizados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Recursos de Hardware y Software.

Tipo	Recurso	Aplicación
Hardware	Raspberry Pi 3B	Ejecución de operaciones
	Python	Lenguaje de programación
Software	PyCharm v.2022.1.2	Interfaz gráfica
	Proteus v.8	Simulación de circuitos de control
	Tinkercad	Diseño de estructura en 3D
	Lucidchart	Diagrama de operación del prototipo

Presupuesto

En la Tabla 2 se detallan los materiales utilizados para el diseño y construcción del prototipo. Todos los elementos se adquirieron a proveedores locales y nacionales.

Para determinar el costo total para la fabricación del prototipo se tomó en cuenta el valor total de los materiales, el costo por el diseño de los elementos que componen el dispositivo y el valor por la mano de obra de construcción de la estructura metálica (carcasa). Estos valores se resumen en la Tabla 3.

Debido a que los materiales se compraron en el mercado local y nacional, y que la mano de obra para el diseño y construcción del prototipo también es de origen local, existe facilidad para que la población adquiera este prototipo; así como el soporte en caso de existir alguna novedad.

Tabla 2: Presupuesto de materiales para la construcción del prototipo

Ítem	Material - Dispositivo	Cantidad	Unidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
1	Lámpara UV-C	2	Unidad	178,00	356,00
2	Raspberry Pi	1	Unidad	325,00	325,00
3	Pantalla TFT Raspberry Pi - 2.8" táctil PiTFT	1	Unidad	85,00	85,00
4	Tarjeta electrónica de control	1	Unidad	25,00	25,00
5	Fuente de alimentación	2	Unidad	16,00	32,00
6	Estructura de acero inoxidable	1	Unidad	245,00	145,00
7	Impresión 3D	1	Global	85,00	85,00
TOTAL					1153,00

Tabla 3: Presupuesto total para la elaboración del prototipo.

Ítem	Rubro	Valor total (\$)
1	Materiales	1153,00
2	Diseño	2500,00
3	Construcción	350,00
Total		4003,00

RESULTADOS

Fundamentos de operación

Una vez establecidas las bases teóricas y analizado la documentación relevante respecto a sistemas de desinfección con radiación ultravioleta germicida (UVGI) para superficies, se determinaron ciertos requerimientos necesarios para una adecuada operación del prototipo:

- La capacidad de penetración de la UV-C hace que no pueda ir más allá de la superficie del envase, por lo que se requieren objetos libres de polvo o grasa para el tratamiento.
- Los sistemas UVGI para superficies deben cubrir las áreas sombreadas que se puedan generar, de manera que requieren irradiar al objeto desde más de un punto, cubriendo distintos ángulos.
- Las cabinas o cajas UV resaltan de entre todos los equipos para desinfección de objetos por su facilidad de manejo y de no requerir uso de protección especial.
- Las barreras contra la radiación deben ser eficaces y además tener propiedades reflectivas para concentrar de mejor manera la energía, a la vez que cubren las áreas sombreadas.
- La dosis UV que recibe un objeto depende de la intensidad del foco de radiación y el tiempo de exposición.
- La energía ultravioleta radiada sigue la ley del cuadrado inverso, lo que minimiza su eficacia conforme aumenta la distancia.
- La incorporación de un mecanismo de seguridad como alarmas, sensores, etc., para proteger la integridad de los operarios es muy necesaria.
- Las características dimensionales del dispositivo de esterilización deben proveer un espacio adecuado para poder incorporar fácilmente los objetos (alimentos).

- La inhibición de gas ozono es fundamental para aplicaciones domésticas.

Dosis de inactivación

A partir de la investigación realizada sobre las dosis de radiación necesarias para inactivar los patógenos presentes en cada material de construcción según los diferentes envases que se pueden encontrar, se establecieron las dosis específicas para cada material, teniendo en cuenta el patógeno que requería la mayor concentración de energía para su inactivación (Tabla 4).

Tabla 4: Dosis para cada material de envase.

Material	Dosis de inactivación (mJ/cm ²)
Plástico	17
Papel/Cartón	36
Metal	29
Vidrio	12

El microorganismo *Escherichia coli* se estableció como el más frecuente en los supermercados del país; por lo tanto, cualquier dosis suministrada debe cubrir su dosis de inactivación. De esta manera se puede establecer una dosis máxima para alcanzar una esterilización en cualquier material de envase, comparando los microorganismos que requerían las dosis más altas necesarias para su inactivación, lo cual puede apreciarse en la Tabla 5.

Tabla 5: Comparación de dosis de acuerdo con distintos criterios.

Indicador	Microorganismo	Dosis de inactivación (mJ/cm ²)
OMS	Hepatitis A	35
Industria alimenticia	<i>Cryptosporidium</i> spp.	6
Supermercados	<i>Escherichia coli</i>	17

Una vez contrastadas las dosis, se estableció el valor de 35 mJ/cm² como la dosis máxima necesaria para esterilizar cualquier material de envase, lo cual es necesario para calcular los tiempos de exposición durante el que operarán las fuentes de radiación para proveer la esterilización a los objetos.

Fuente de radiación

Se realizó la búsqueda de una fuente de radiación que cumpla con la longitud necesaria para su acoplamiento en el volumen de desinfección, así como con los fundamentos de operación establecidos.

Luego, se midió la intensidad UV a partir de una variación de la distancia con el fin de determinar la intensidad emitida a la distancia requerida. Las mediciones se pueden observar en la Tabla 6, que muestran la intensidad medida desde 1 cm hasta 50 cm.

Con el fin de observar de mejor manera la variación de la intensidad UV conforme se realizaba un aumento a la distancia, se elaboró la gráfica correspondiente contrastando ambas partes (potencia y distancia). Los valores se detallan en la Tabla 6 y la gráfica puede observarse en la Figura 1, la cual muestra el cumplimiento de la ley del cuadrado inverso.

Tabla 6: Comparación de dosis de acuerdo con distintos criterios.

Distancia del foco de radiación (cm)	Intensidad de radiación (μW/cm ²)	Producción de ozono O3 (ppm)
1	8785	0
3	5383	0
5	4038,8	0
10	2052	0
15	1305	0
20	907	0
25	653	0
30	494	0
35	395	0
40	318	0
45	259	0
50	217	0

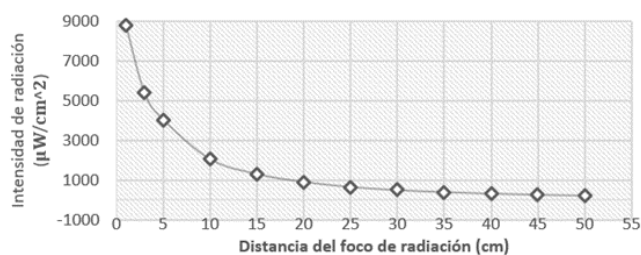


Fig. 1: Variación de la intensidad UV del foco de radiación.

Dispositivo de seguridad e iluminación

Un dispositivo de seguridad es necesario en la categoría de proyecto en el que se encuentra el presente prototipo; por lo cual, se implementó un sensor para controlar la apertura/cierre de la puerta, de manera que condicione la operación del prototipo y provea seguridad al usuario mientras lo usa.

El sensor usado para este proyecto es el sensor de apertura de puerta MC-38, debido a su gran rango de operación y portabilidad. Este sensor es diseñado propiamente para el control de puertas y ventanas en gran infinidad de proyectos, se compone de dos partes y sus características pueden observarse en la Tabla 7.

Tabla 7: Características de MC-38.

Sensor de apertura de puerta MC-38	
Corriente nominal	100 mA
Tensión nominal	100 V
Potencia nominal	3 W
Dimensiones	27 mm x 14 mm x 8 mm
Distancia de activación mínima	15 mm
Distancia de activación máxima	25 mm

Adicionalmente, aprovechando la implementación de este sensor, se añadió un dispositivo para indicar cuando la puerta se encuentre abierta. Para este caso una cinta Led se considera idónea, puesto que provee de iluminación suficiente en entornos de baja luminosidad.

Criterios para el dimensionamiento estructural

La investigación realizada sobre las características dimensionales de los alimentos analizados, arrojó medidas necesarias de 32,5 cm (alto), 22 cm (largo) y 16,9 cm (ancho), estableciendo así una forma rectangular para el primer espacio. También se consideraron criterios adicionales, como la disposición de un producto dentro del volumen (vertical u

horizontal), características de los elementos y espacios adicionales; de esta manera, las medidas se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8: Medidas finales del volumen de desinfección.

Medida	Valor (cm)
Alto (Vertical)	40
Largo (Horizontal)	60
Ancho (Profundidad)	40

Se consideró la implementación de un material que sea altamente resistivo al crecimiento microbiano y a la vez cuente con propiedades reflectivas, asegurando que la radiación llegue a todos los puntos. Luego de realizar las debidas consultas, el material idóneo resultó ser el acero inoxidable pues cumple con los requerimientos antes descritos.

En la Figura 2 se aprecia la estructura física y la disposición de los dos espacios o compartimentos considerados para abarcar las operaciones de desinfección de forma óptima. El primer compartimento contiene las lámparas UV (ubicadas arriba y abajo), una rejilla para colocar los productos, una puerta con vidrio transparente que permite visualizar el procedimiento de esterilización; y, el segundo, la pantalla de la unidad de procesamiento (Raspberry Pi) que además sirve de contenedor para los componentes electrónicos necesarios.

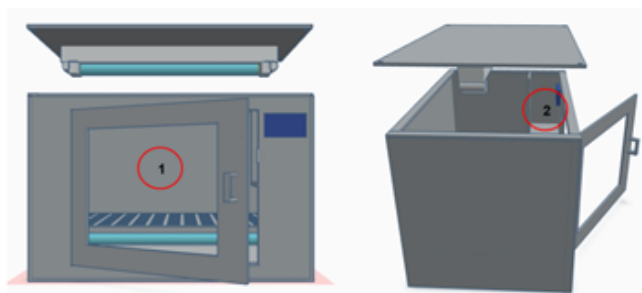


Fig. 2: Diseño estructural en 3D del prototipo.

El diseño realizado permite que, tanto el primer como el segundo compartimento, dispongan de una cubierta desplegable para facilitar mantenimientos futuros y ofrecer la posibilidad de incorporar nuevos componentes o realizar nuevas conexiones.

Impresión de elementos 3D

Como medida de protección de los elementos se realizó la impresión de una carcasa para la Raspberry Pi, según archivos base de uso libre disponibles en Internet. De igual forma, se imprimió un soporte para aislar la placa PCB y un contenedor para el sensor de puerta, tal como se observa en la Figura 3.

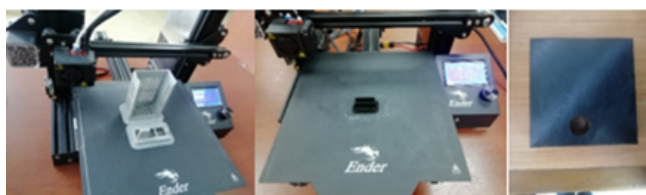


Fig. 3: Elementos impresos en 3D.

Fabricación de estructura física final

En base a los criterios de diseño descritos en párrafos anteriores, se realizó la fabricación de la estructura en acero inoxidable que puede apreciarse en la Figura 4. Cabe mencionar que el material base es el acero mate, el cual es más resistente a la corrosión y cuenta con un espesor de 1 mm para proveer firmeza frente a las manipulaciones que pudieran realizarse.



Fig. 4: Estructura fabricada.

También se fabricó una malla de metal (Figura 5) para el soporte de los productos que se coloquen dentro del prototipo. Posee varias perforaciones para no obstruir el paso de la luz; sin embargo, éstas no le restan rigidez ya que soporta normalmente los elementos que se pongan sobre la misma.



Fig. 5: Malla de soporte.

Circuito de control y activación

Para el diseño del circuito electrónico requerido para activar y controlar el equipo, se utilizó el software de simulación electrónico Proteus. En la Figura 6 se observa el circuito, el cual está compuesto por: capacitores, diodos, un módulo relé de dos canales, Leds (integrados en el módulo relé), diodos, un regulador de voltaje que provee una alimentación estable de 5 V para el módulo relé.

También se incluyó la esquematización de lámparas de 110 V, simulando las lámparas UV; la cinta Led y las señales de activación utilizando pulsadores, lo que simula las señales de los pines GPIO de la Raspberry Pi. De esta forma, se realizó el diseño de la placa PCB que se observa en la Figura 7.

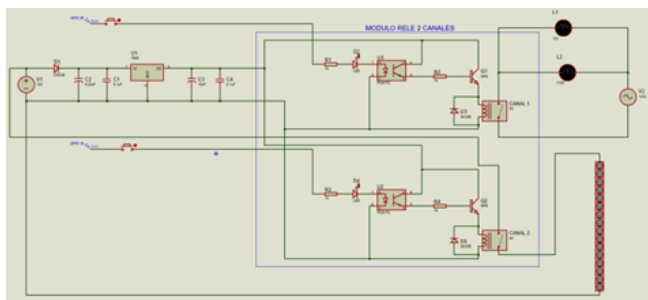


Fig. 6: Circuito de activación y control.



Fig. 7: Placa PCB de circuito de control y activación.

Medición de intensidad UV efectiva y cálculo de tiempos de exposición

En base a las dosis requeridas y la intensidad proporcionada por la fuente de radiación, se calculó el tiempo de exposición necesario para esterilizar cada material y un tiempo necesario que abarque la esterilización de todos los materiales para envases establecidos, en base a la dosis proporcionada por la Tabla 9.

Tabla 9: Dosis para cálculo de tiempos de exposición.

Material	Dosis UV para esterilización (mJ/cm ²)
Plástico	17
Papel/Cartón	36
Metal	29
Vidrio	12
General	36

La ecuación 1 sirve para encontrar una expresión que permita calcular el tiempo requerido de manera matemática para alcanzar la dosis necesaria:

$$D = E_t * I_R \quad (1)$$

$$E_t = \frac{D}{I_R}$$

En donde:

- D = Dosis UV necesaria (mJ/cm²)
- E_t = Tiempo requerido (segundos)
- I_R = Intensidad de radiación UV (μW/cm²)

Durante la medición, la intensidad generada mostró ser no lineal respecto al paso del tiempo, esto debido a que empezó con un valor que fue aumentando conforme transcurrían los segundos. Luego, tras mantener encendidos los focos de radiación durante un minuto, la intensidad alcanzó un pico máximo de 633,5 uW/cm². A partir de este tiempo no existió una mayor variación respecto a la potencia generada; por lo tanto, este valor es el que se empleó como intensidad de radiación UV para realizar los cálculos correspondientes; En la Tabla 10 se resumen las mediciones realizadas en 5, 30, 45 y 60 segundos.

Tabla 10: Mediciones de intensidad UV efectiva.

Tiempo (s)	Intensidad UV de las fuentes (mJ/cm ²)
5	604,2
30	608,4
45	613,1
≥ 60	633,5

Ya que las propiedades físicas de cada material son diferentes, es necesario considerar un margen de seguridad para garantizar que la dosis requerida, sea suministrada en su totalidad. Se considerará un margen del 15 % para plástico, 30 % para vidrio, 45 % para metal y 60 % para el papel/cartón.

Además, debido a que las lámparas UV requieren de un tiempo para estabilizarse y suministrar una dosis estable, este tiempo debe adicionarse al inicio de cualquier periodo de esterilización. Las mediciones realizadas indican que es necesario un tiempo de 1 minuto de calentamiento para estabilizar la intensidad UV suministrada, considerando estos criterios los tiempos de exposición finales fueron calculados y se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Tiempos de exposición finales.

Tipo	Tiempo calculado (s)	Margen de seguridad (s)	Tiempo de exposición (s)	Tiempo de exposición (min, s)
Plástico	27	4	91	1' 31"
Papel/Cartón	57	34	151	2' 31"
Metal	46	21	127	2' 7"
Vidrio	19	6	85	1' 25"
General	57	34	151	2' 31"

Los tiempos finales consideran el tiempo de calentamiento (60 s). Sobre los valores que poseen decimales, se recomienda considerar el redondeo al inmediato superior. Una vez obtenidos los tiempos de exposición finales, se editó el código fuente para establecerlos dentro de cada modo de operación en el prototipo; para ello se accedió de forma remota mediante la herramienta VNC Server que permite establecer una conexión inalámbrica y manipular el sistema de la Raspberry Pi desde un computador.

Medición de radiación UV externa y generación de ozono

Para garantizar que no existan fugas de radiación UV, se realizaron mediciones con el radiómetro LS126C UV Light Meter en puntos estratégicos del prototipo, como en las uniones de la puerta con la estructura; obteniendo valores de 0,0

$\mu\text{W}/\text{cm}^2$. También se realizó la verificación interna y externa de que no existe la generación de ozono con el Detector de gases HD-P900. Estas pruebas se pueden observar en la Figura 8.



Fig. 8: Mediciones de UV y de ozono.

Con los parámetros configurados y los valores necesarios obtenidos, se realizaron pruebas de operación para verificar el cumplimiento del tiempo de exposición para cada uno de los modos de operación del dispositivo: estándar y envases (Figura 9). En el modo “estándar” es posible desinfectar distintos tipos de empaques, mientras que en el modo “envases” se considera específicamente el material del que está hecho el envase del alimento, es decir, se usa únicamente cuando los envases a desinfectar son del mismo material.



Fig. 9: Procesos de esterilización para distintos tipos de alimentos industrializados.

En la Tabla 12 se resumen las características de los modos de operación, los tiempos necesarios según la dosis efectiva medida y el material a esterilizar.

Tabla 12: Características de modo de operación.

Modo	Tiempo de exposición (min, s)	Intensidad UV efectiva ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Material	Dosis UV suministrada (mJ/cm^2)
Estándar	2'31"	633,5	Hasta Cartón	57,64
	1'31"		Plástico	19,63
Envases	2'31"	633,5	Papel / Cartón	57
	2'7"		Metal	42,44
	1'25"		Vidrio	15,83

Se debe tener en cuenta que las dosis UV de inactivación para los patógenos difieren en su valor; por lo cual, el prototipo diseñado es capaz contrarrestar una mayor gama de los expuestos en la Tabla 13, siempre y cuando se encuentren dentro del rango de operación. En otras palabras, la dosis de inactivación debe ser igual o menor que la dosis UV máxima que puede generar el prototipo ($57,64 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) mediante el proceso más largo.

DISCUSIÓN

El proceso inmerso en el diseño y la construcción de un dispositivo que opera con tecnología ultravioleta debe estar

Tabla 13: Dosis UV para inactivar microorganismos.

Microorganismo	Tipo	Dosis de inactivación (mJ/cm^2)
<i>Bacillus cereus</i>	Bacteria	12
<i>Bacillus subtilis</i>	Espora	36
<i>Campylobacter jejuni</i>	Bacteria	5,80
<i>Clostridium</i> spp.	Espora	8,40
<i>Cryptosporidium</i> spp.	Parásito	6
<i>Enterococcus</i> spp.	Bacteria	15
<i>Escherichia coli</i>	Bacteria	17
<i>Listeria monocytogenes</i>	Bacteria	4,60
Hepatitis A	Virus	35
Norovirus	Virus	30
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bacteria	17
<i>Salmonella</i> spp.	Bacteria	29
<i>Serratia</i> spp.	Bacteria	2,20
<i>Shigella</i> spp.	Bacteria	8,20
<i>Staphylococcus aureus</i>	Bacteria	10
<i>Vibrio cholerae</i>	Bacteria	8,90

sujeto a investigación, con el fin de establecer los fundamentos acordes a los requerimientos de esta tecnología. Por otro lado, tanto el dimensionamiento como la estructuración de los subsistemas que lo componen se determinan en base a las características de sus componentes, los cuales se implementan en base a las necesidades del dispositivo.

De entre todos los materiales, el acero inoxidable resulta ser el candidato más equilibrado la construcción de dispositivos que operan con tecnología UVGI, debido a su durabilidad, capacidad de reflexión a los rayos UV (permitiendo cubrir las zonas oscuras de un objetivo) y es altamente resistente a la corrosión y crecimiento microbiano. Debido a esto múltiples trabajos como los de Ochoa y Llanos (2021) y Guairacaja y Cevallos (2021), lo utilizan como material de construcción para la estructura de su prototipo.

Al medir la intensidad generada, es posible calcular la dosis UV que se alcanza; de esta forma, comparando esta dosis con las expuestas por Malayeri et al. (2016), se puede verificar que se han alcanzado 5 o más niveles de reducción logarítmica para los patógenos objetivos, lo cual, según la investigación realizada, permite alcanzar la esterilización en los productos sometidos.

Las mediciones realizadas indican que la intensidad UV que recibe un producto, se estabiliza tras estar expuesto alrededor de un minuto a la radiación, lo cual resultó muy importante para el cálculo correcto de los tiempos de exposición para cada uno de los modos de operación. Cabe destacar que en el diseño realizado por Ochoa y Llanos (2021), se establecen tiempos similares para cada uno de los tipos de productos que se pueden usar; sin embargo, dentro de los alimentos industrializados, únicamente se tratan enlatados.

El hecho de incluir investigaciones nacionales como internacionales respecto a los patógenos propensos a desarrollarse en un determinado material de envase para alimentos, permite establecer criterios más sólidos respecto a la población patógena objetiva por cada modo de operación, produciendo un tratamiento más específico y efectivo. Asimismo, esta con-

dición, proporciona compatibilidad para su uso en entornos nacionales e internacionales.

Otro aspecto para tener en cuenta, es el estado del envase respecto al cambio en sus características físicas, tales como el color. Durante las pruebas realizadas, los productos que se sometieron a los procesos de esterilización, no presentaron cambios en la integridad de su envase. Estos resultados son similares a los obtenidos por Castillo y Ulloa (2017), donde se expusieron láminas de papel encerado de color verde (material de protección para la piel de banano) a la radiación ultravioleta, y luego se verificó que el papel conservaba su color y no presentaba quemaduras luego de la exposición.

CONCLUSIONES

En el presente proyecto se diseñó y construyó un sistema de esterilización que actúa sobre la superficie del envase de alimentos industrializados aprovechando la capacidad germicida de la luz ultravioleta de onda corta.

Los conceptos teóricos adquiridos a través de la revisión de múltiples fuentes bibliográficas, permitieron el establecimiento de las bases de desarrollo del prototipo; tales como, la dimensión estructural, material de construcción, población patógena objetiva, categorías de envases, dosis UV necesarias y fuentes de radiación UV.

La utilización de una Raspberry Pi como unidad de control permite concentrar y controlar varios subsistemas a través de una sola placa, de manera que favorece la proyección a futuro a la vez que facilita su integración a nuevas tecnologías emergentes.

Las dimensiones estructurales del prototipo estuvieron sujetas principalmente a las dimensiones de los productos (alimentos) sobre los cuales se realizaron las respectivas mediciones, teniendo en cuenta criterios como las distintas formas de disposición de estos dentro del dispositivo.

El diseño del prototipo en dos compartimentos permitió centralizar el control y ofrecer un acople ideal entre los procesos que se ejecutan, a la vez que muestra flexibilidad para extender su capacidad, facilitar el mantenimiento y prestar nuevas opciones de uso.

Las pruebas realizadas demostraron la nula emisión de calor por parte de las fuentes de radiación al extraer los productos luego de un proceso de esterilización, esto permitió desestimar la idea de la generación de calor externo que pueda afectar al usuario durante la manipulación del dispositivo.

El desarrollo de mecanismos de seguridad resulta importante en dispositivos que operan con tecnología UVGI, de esta forma se precautela la integridad del usuario frente a los efectos resultantes de la exposición a la radiación ultravioleta.

Los tiempos de exposición finales incluyeron un tiempo de calentamiento para las fuentes de radiación con el fin de estabilizar la intensidad irradiada, un tiempo extra acorde a las características de cada material y el tiempo calculado que relaciona la intensidad UV y dosis UV necesaria a través de las ecuaciones obtenidas en la revisión literaria.

Las mediciones realizadas con el radiómetro UV permitieron verificar que el dispositivo es capaz de producir la radiación necesaria para alcanzar la dosis UV de inactivación para la población patógena tendiente a desarrollarse acorde al material de un envase.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja y a sus profesores, en especial al director del proyecto, el Ing. Pabel Merino, encargado del Centro de Investigación, Innovación, Desarrollo de Prototipos Tecnológicos y Pruebas Electroenergéticas – I2TEC.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: RMV; metodología: RMV; análisis formal: AVL.; investigación: JGG; recursos: JGE; curación de datos: JCG; redacción — preparación del borrador original: JGG; redacción — revisión y edición: AVN; administración de proyecto: RMV; adquisición de financiamiento para la investigación: JGG. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Rodolfo Merino-Vivanco: RMV. Andy Vega-León: AVL. Jefferson Gaona-González: JGG. Jonathan González-Espinosa: JGE. Jorge Carrión-González: JCG. Alba Vargas-Naula: AVN.

FINANCIAMIENTO

El financiamiento para el desarrollo del proyecto se obtuvo de los propios recursos de los autores.

REFERENCIAS

- Bartolomeu, M., Braz, M., Costa, P., Duarte, J., Peireira, C., & Almeida, A. (2022). Evaluation of UV-C Radiation Efficiency in the Decontamination of Inanimate Surfaces and Personal Protective Equipment Contaminated with Phage;6. *Microorganisms*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030593>
- Bencko, V. (2020). *Hygiene and Epidemiology: Selected Chapters*. Charles University, Karolinum Press.
- Castillo, P., & Ulloa, L. (2017). Diseño de cámara de luz uv-c prototipo para el manejo de pudrición de corona en frutos de exportación de banano [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41544>
- Chauret, C. P. (2014). Sanitization. In C. A. Batt & M. Lou Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition) (Second Edition)*, pp. 360–364. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00407-9>
- Coba, G. (2021). Gaseosas y snacks lideran la lista de compras en las tiendas. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gaseosas-snacks-compra-ecuatorianos-desnutricion/>
- Food Insight. (2020). Food Packaging and the Quality of Your Food. Food Insight. <https://foodinsight.org/food-packaging-and-the-quality-of-your-food/>
- Guairacaja, M., & Cevallos, L. (2021). Diseño e implementación de un prototipo para la potabilización de agua mediante esterilizador ultravioleta monitoreado de forma remota en la parroquia Punín [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21126>
- Malayeri, A., Mohseni, M., & Cairns, B. (2016). Fluence (UV Dose) Required to Achieve Incremental Log Inactiva-

tion of Bacteria, Protozoa, Viruses and Algae. *IUVA News*, 18, 4–6.

Martínez, R. M. G. (2013). Contaminación de los alimentos durante los procesos de origen y almacenamiento. *Aldaba: Revista Del Centro Asociado a La UNED de Melilla*, 36, 51–64.

Ochoa, L. F., & LLanos, S. W. (2021). Propuesta de diseño de una cabina de desinfección para víveres usando luz ultravioleta (UV) aplicado en supermercados de la ciudad de Cuenca [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21332>

Organización Mundial de la Salud. (2020). Inocuidad de los alimentos. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

Pillalaza, D., & Baquero, M. (2018). Aislamiento e identificación de Coliformes y *Escherichia coli* BLEE en coches de compras de supermercados en el cantón Quito [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16012>

Pinto, M. J. de V., Veiga, J. M., Fernandes, P., Ramos, C., Gonçalves, S., Velho, M. M. L. V., & Guerreiro, J. S. (2015). Airborne Microorganisms Associated with Packaging Glass Sorting Facilities. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 78(11), 685–696. <https://doi.org/10.1080/15287394.2015.1021942>

Siroli, L., Patrignani, F., Serrazanetti, D. I., Chiavari, C., Benevelli, M., Grazia, L., & Lanciotti, R. (2017). Survival of Spoilage and Pathogenic Microorganisms on Cardboard and Plastic Packaging Materials. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02606>

Sood, S., Sharma, C., & others. (2019). Bacteria in Indian food packaging papers and paperboards with various contents of pulp fiber. *Food and Nutrition Sciences*, 10(04), 349.

Traister, J. (n.d.). Precautions for Canned Tuna. *Livestrong.Com*. <https://www.livestrong.com/article/499781-precautions-for-canned-tuna/>

Wilkinson, S. (2023). Types of Food Contamination. *CPD Online College*. <https://cpdonline.co.uk/knowledge-base/food-hygiene/types-of-food-contamination/>