TecnoLógicas

ISSN-p: 0123-7799
ISSN-e: 2256-5337

Vol. 27, no. 60, e3006, 2024

Recibido: 02 febrero 2024
Aceptado: 06 junio 2024
Disponible: 22 junio 2024

©Instituto Tecnológico Metropolitano
Este trabajo está licenciado bajo una Licencia Internacional Creative Commons Atribución (CC BY-NC-SA)

Fabricación y control de un sistema de desinfección con UV-C LED para ajo *(Allium sativum L.)* utilizado en siembra

Fabrication and Control of a Decontamination System with UV-C LED for Garlic *(Allium sativum L.)* Used in Planting

Edgar Zacarías-Moreno[1];
José Alejandro García-Arredondo[2];
Nivia Iracemi Escalante-García[3];
José Alonso Dena-Aguilar[4];
Israel Álvarez-Ramírez[5];
José Ernesto Olvera-González[6]

[1] CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada, Tecnológico Nacional de México, Aguascalientes-México, edgar.zm@parteaga.tecnm.mx
[2] CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada, Aguascalientes-México, algarcia@ciateq.mx
[3] Tecnológico Nacional de México, Aguascalientes-México, nivia.eg@pabellon.tecnm.mx
[4] Tecnológico Nacional de México, Aguascalientes-México, jose.da@pabellon.tecnm.mx
[5] Tecnológico Nacional de México, Aguascalientes-México, israel.ar@pabellon.tecnm.mx
[6] Tecnológico Nacional de México, Aguascalientes-México, jose.og@pabellon.tecnm.mx

Cómo citar / How to cite

E. Zacarías-Moreno, J. A. García-Arredondo, N. I. Escalante-García, J. A. Dena-Aguilar, I. Álvarez-Ramírez, and J. E. Olvera-González, "Fabricación y control de un sistema de desinfección con UV-C LED para ajo utilizado en siembra," *TecnoLógicas*, vol. 27, no. 60, e3006, Jun. 2024. https://doi.org/10.22430/22565337.3006

Resumen

El proceso de desinfección es esencial para prevenir proliferación de bacterias que pueden contaminar los alimentos causando pérdida dentro de la cadena de suministro. Por lo tanto, el objetivo de la propuesta tuvo como finalidad la fabricación y control de un sistema de desinfección integrando una banda transportadora multinivel y luz UV-C LED. La metodología consistió en adaptar la automatización al mecanismo, mediante la programación con base en GEMMA y GRAFCET. Se integró un Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés) e Interfaz Hombre Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) como elementos de control. Adicionalmente, se configuraron diferentes rutinas como la velocidad de la banda, altura de las lámparas, el tiempo de exposición, paro de emergencia y emisión de la luz UV-C LED en cada zona de radiación. Se realizó un conteo microbiológico para evaluar el proceso de desinfección de la semilla de ajo *(Allium sativum L.)*, utilizando dosis reportadas en la literatura. Los resultados demostraron que la propuesta es un producto científico tecnológico semi-industrial. Los niveles de la banda transportadora permiten que la semilla de ajo rote durante el proceso de desinfección. Con un efecto germicida del 92.30 % en mesófilos aerobios, se atiende adecuadamente el funcionamiento de los mecanismos de transporte y emisión de luz UV-C LED. Se puede concluir que el sistema puede adaptarse a cualquier producto del sector agroindustrial, además la automatización se puede extender con la inclusión de mayores parámetros. Para trabajo futuro queda determinar la mejor dosis, manejo de otros productos y combinaciones de radiación UV LED, así como un conteo microbiológico más exhaustivo.

Palabras clave

Agroindustria, automatización, desinfección de alimentos, diodo emisor de luz (LED), semilla de ajo (*Allium Sativum*), ultravioleta tipo C.

Abstract

The decontamination process is essential to prevent the proliferation of bacteria that can contaminate food causing loss within the supply chain. Therefore, the objective of the proposal was to manufacture and control a decontamination system that integrates a multilevel conveyor belt and UV-C LED light. The methodology consisted of adapting the automation to the mechanism, through programming based on GEMMA and GRAFCET. A Programmable Logic Controller (PLC) and a Human Machine Interface (HMI) were integrated as control elements. Additionally, different routines were configured such as the speed of the band, height of the lamps, exposure time, emergency stop, and emission of UV-C LED light in each radiation zone. A microbiological count was performed to evaluate the garlic *(Allium sativum L.)* seed disinfection process, using doses reported in the literature. The results gave evidence that the proposal is a semi-industrial scientific technological product. The levels of the conveyor belt allow the garlic seed to rotate during the disinfection process. With a 92.30 % germicidal effect on aerobic mesophiles, the functioning of the transport and emission mechanisms of the UV-C LED light is adequately taken care of. It can be concluded that the system can be adapted to any product of the agroindustrial sector; the automation can also be extended with the inclusion of more parameters. For future work, it remains to determine the best dose, handling of other products and combinations of UV LED radiation, as well as a more exhaustive microbiological count.

Keywords

Agroindustry, automation, food decontamination, light emitter diode (LED), garlic seed (*Allium Sativum*), type C Ultraviolet.

1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria ha experimentado un rápido crecimiento en la producción, el servicio y acceso al mercado [1]. El consumo de los productos agrícolas de calidad surge por el interés de ingerir alimentos con alto contenido nutrimental (vitaminas, minerales y antioxidantes) [2], no obstante, estos productos son susceptibles a contaminación por bacterias en cualquier etapa de la cadena de abastecimiento (cultivo, transporte, envasado, almacenamiento y venta final). En 2022, la FAO ha reportado que la contaminación por bacterias causa pérdidas sustanciales en los productos (32 % en frutas y hortalizas, 12.4 % en productos de origen animal) [3]. Los alimentos inocuos son fundamentales para la salud y garantizar la reducción de hambre alrededor del mundo. Si los productos no cuentan con calidad e inocuidad, no existe seguridad alimentaria y la cadena de abastecimiento se vuelve compleja, afectando negativamente la salud pública, el comercio y la economía. El proceso de desinfección garantiza la inocuidad de los alimentos, para llevarlo a cabo regularmente se emplea agua, así como, agentes químicos durante la producción, conservación y consumo. Una alternativa es la radiación Ultravioleta (UV) aplicada a la desinfección de alimentos como bebidas, condimentos en polvo, productos frescos y procesados, carnes, pescados y mariscos, obteniendo efectos germicidas [4]–[9]. Sin embargo, este tipo de tecnología presenta baja capacidad de incidencia en los distintos alimentos, es decir, la descontaminación solamente se realiza de forma superficial [10].

Por su parte, la tecnología UV-C LED surge como una opción a la desinfección de espacios y alimentos. Es un método alternativo respecto a las técnicas convencionales, debido a que no deja residuos y no modifica las propiedades físicas y/o químicas en los alimentos [10], [11]. Su rango abarca de 200 a 280 nm, su característica es que los fotones emitidos contienen alta energía, es decir la absorción de un fotón por molécula [13].

Este tipo de tecnología UV LED presenta diversas ventajas, tales como el menor consumo de energía, funciona con baja temperatura, tiene mayor vida útil (10000 h), disipación de calor, mayor fiabilidad, tamaño reducido en comparación a otras fuentes aplicadas para la desinfección [14], [15] como las lámparas de mercurio, excimer y lámparas de UV profunda (Deep Ultraviolet, por sus siglas en inglés DUV) [16]. Otra característica de los UV LED, es su emisión de luz pulsada controlando parámetros como frecuencia, ciclo de trabajo e intensidad, implementadas en [2], [12]. Un punto relevante es que a pesar de que las lámparas con contenido de mercurio son efectivas para la desinfección, presentan desventajas al ser tóxico para los humanos, así como, es un elemento peligroso para el medio ambiente. Las lámparas excimer y DUV se han utilizado en la purificación de aire y agua mostrando resultados adecuados. Sin embargo, no existen suficientes investigaciones para determinar su eficiencia germicida con diferentes patógenos [17], [18]. En relación con la emisión de diferentes longitudes de onda (UV-A y UV-B) fue evaluado el efecto desinfectante con UV-A LED en la inactivación de *E. Coli* y *Vibrio parahaemolyticus*. Con dosis de 54 J/cm^2 y 27 J/cm^2, respectivamente, obtuvieron un efecto germicida del 100 % en *E. Coli*. y del 85 % en *Vibrio Parahaemolyticus* [17]. Una máquina de esterilización mediante exposición a radiación UV-C montada en una banda transportadora fue desarrollada en Indonesia [17]; demuestra la flexibilidad que tiene el proceso de esterilización antes de ser empacado el producto. Se desarrolló el control utilizando una pantalla interfaz hombre–máquina (HMI, por sus siglas en inglés) de la marca Omron, dentro de los parámetros que pueden ser configurados son: el avance y/o paro de la banda, encendido y/o apagado de lámparas UV, así como el estado de operación de la máquina [18]. Los autores consideran como trabajo futuro, la determinación de la duración de la radiación UV para lograr un efecto germicida completo, dado que, el sistema fue probado solamente a nivel laboratorio y no en un ambiente real del

sector agroindustrial. Otro trabajo, consistió generar una cámara de tratamiento donde instalaron lámparas UV-C LED combinado con calor (60°C) para la desinfección de superficies (vidrio, PVC, acero inoxidable (SUS), teflón y silicio) previamente inoculadas con bacterias (*E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium y L. monocytogenes*) presentes en alimentos. De acuerdo con los resultados obtenidos, el efecto de inactivación en las bacterias logró hasta 1 log [11].

En un prototipo de laboratorio para la desinfección con radiación UV-A LED, el control fue programado con Arduino y LabVIEW [19]. La luz UV-A LED tiene un pico de emisión a 374 nm irradiando productos en fresco (ajo, chile serrano y jitomate). Las dosis de radiación fueron 7.9, 23.7, 47.4 y 71.1 J/cm^2. La emisión de irradiación no generó efectos secundarios en algunas características organolépticas. Adicionalmente, este trabajo concede la visualización de nuevas mejoras para el diseño, desarrollo e implementación de un equipo que se encuentre en un ambiente real. Así como, considerar factores sobre el tiempo de emisión de la luz, la distancia y la eliminación de barreras físicas o zonas de sombra, son reto en el diseño y desarrollo de nuevos sistemas de desinfección.

En la región bajío – norte de México– el cultivo de ajo (*Allium sativum L.*) tiene relevancia social y económica, dado que, es una hortaliza que se produce en invierno, cuando se reducen las fuentes de empleo rural. La superficie por sembrar es de 7820 ha con una producción a obtener de rendimiento esperado (um/ha) de 13.91. Las enfermedades que se presentan con mayores frecuencias son las de raíz (pudrición blanca) presentándose con intensidad variable en cada ciclo de cultivo [20]. En esta zona productiva, la transmisión y propagación de las enfermedades más importantes de la raíz o bulbo del ajo son asociadas con el empleo de semilla contaminada. De igual forma, en un estudio se muestra que con un tratamiento controlado de temperatura y humedad los bulbillos usados para siembra tienen efectos positivos en germinación, crecimiento vegetativo y rendimiento en los cultivos [21]. Un dato muy importante es que los bulbillos de ajo predestinados para la siembra en el siguiente ciclo de cultivo son obtenidos de los bulbos de la cosecha previa.

En la Figura 1a se muestra como es la selección de semilla de ajo. En primer lugar, se pela la cabeza de ajo para dejar libre los dientes de ajo, después se pasan por un mecanismo con cilindro inclinado y giratorio con rejillas de diferentes dimensiones para que por gravedad salgan las piezas a través de las tolvas clasificadas por su tamaño. Después de su clasificación, se etiquetan y almacenan temporalmente de acuerdo con su tamaño y otras condiciones de proceso como se observa en la Figura 1b.

a. b.

Figura 1. Selección de semilla. a) Mecanismo para la clasificación de semilla. b) Etiquetado por tamaño de las semillas de ajo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 representa la desinfección de la semilla de ajo, la cual es aplicada como una práctica preventiva y/o curativa para favorecer la inocuidad de las plantas en el cultivo, mejorando la supervivencia en sus primeras etapas de crecimiento. La elección de productos químicos y dosis estará condicionada a los resultados del análisis de semillas, además de las indicaciones de desinfección están sujetas al tipo de agroquímicos y organismos de gobierno, que señalan que respecto a la dosis de producto (kg, l) por cada 100 kg de semilla sin especificar el tamaño del ajo utilizado, sin embargo, el tamaño de la semilla es proporcional a la dosis para que se tenga una buena aplicación.

Figura 2. Proceso manual de limpieza de semilla de ajo. Fuente: elaboración propia.

La línea de investigación de Biosistemas Mecatrónicos del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA) en el Tecnológico Nacional de México campus Pabellón de Arteaga tiene como propósito atender la necesidad de desinfección de alimentos a través del diseño, construcción e implementación de dispositivos y sistemas programables para procesos del sector agroindustrial. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar un proceso de desinfección de semillas de ajo para siembra que sustituya los métodos convencionales (agentes químicos, agua, jabón, métodos térmicos, entre otros) por medio de un equipo que integra tecnología de UV-C LED, que permita al sistema abarcar mayor área de radiación para la semilla de ajo, reducir el mantenimiento correctivo y/o preventivo, así como, robustecer el control automático de los procedimientos, como notificación a fallas, incrementar la seguridad del equipo y operador, y una bitácora durante la operación del equipo.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1 Construcción de máquina y proceso de automatización (control)

La Figura 3 representa el sistema de desinfección (diseño e implementación) construido con base a las necesidades de la industria. El sistema consta de una banda transportadora con dos desniveles tipo escalón (en total 3 zonas). Cada zona tiene integrado un sistema de radiación artificial UV-C LED en la parte superior. La primera cabina o zona tiene una dimensión de 75 cm × 31.3 cm × 20 cm, la segunda de 83 cm × 31.3 cm × 20 cm y la tercera

106 cm × 31.3 cm × 20 cm, teniendo en total una longitud de 206 cm, el sistema de iluminación está conformado por un arreglo de dos lámparas con dimensiones de 20 cm × 13 cm. El proceso general de desinfección consiste en hacer pasar el ajo a través de cada zona o área. Posteriormente, el ajo cae por una rampa logrando que gire en cada estación con el propósito de irradiar todas las caras del producto durante su estancia en el área de irradiación. Se instalaron cabinas con material reflejante (ayuda a maximizar el área de radiación) para evitar la exposición del operador a la radiación UV-C LED. Los elementos mecánicos y de Policloruro de Vinilo (PVC, por sus siglas en inglés) fueron construidos con materiales de grado alimenticio para cumplir con la regulación de la industria alimentaria. La desinfección del ajo configurada de forma automática con base en un Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés) y HMI.

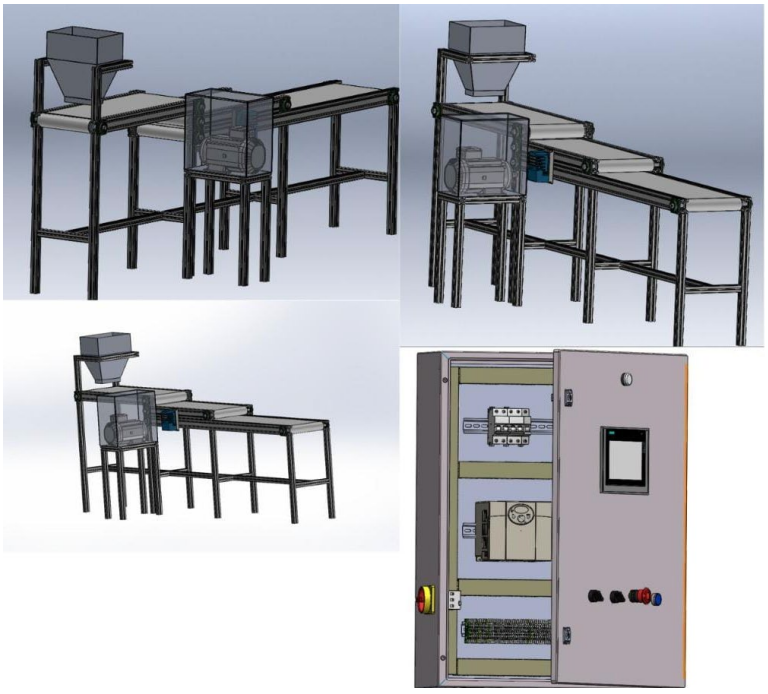

Figura 3. Máquina para desinfección de semilla de ajo. Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Criterio general para especificación de equipos en la Industria 4.0

La industria alimentaria 4.0 es una oportunidad para incrementar la calidad, seguridad y sostenibilidad de los alimentos, al mismo tiempo, satisfacer las demandas de los consumidores. Se estableció un marco de referencia de especificaciones con base a la tecnología de la industria 4.0, para la integración de la automatización. El sistema desarrollado puede aplicarse directamente dentro del sector agroindustrial, así como social. Por lo anterior, en la Tabla 1 se seleccionaron los criterios que cumple el sistema de desinfección, evaluando su nivel de madurez respecto a su relación con la industria 4.0 y el periodo de tiempo para alcanzar las metas de acuerdo a información presentada por el esquema de la Asociación Alemana de Fabricantes de Maquinaria (VDMA por sus siglas en alemán) en el Industrie 4.0 Forum [22]. Las filas indican las diferentes funciones (estrategia y organización, fabricación inteligente, operaciones inteligentes, productos inteligentes, entre otros) con las que cumple el equipo, y las columnas son las rutinas que realiza el sistema. Para que sea más representativo, las celas sombreadas son con lo que cumple el sistema.

Tabla 1. Evaluación de criterios de selección de sistemas de control con base en V*DMA Industrie 4.0 Forum*. Fuente: elaboración propia.

Máquina					
Integración sensores/actuadores	No se utilizan	Incluidos	Datos de sensores procesados	Datos procesados y evaluados	Autonomía de máquina en función de datos
Comunicación conectividad	No tiene interfaces	La máquina envía y/o recibe señales I/O	La máquina posee interfaces Fieldbus	La máquina posee interfaz Ethernet Industrial	La máquina posee acceso a internet
Funciones de almacenamiento de datos e intercambio de información	Sin funciones	Posibilidades de identificación	Se tiene almacenador de datos pasivo	Se tiene almacenador de datos autónomo	Intercambio de información integral
Monitoreo	Sin monitoreo	Detección de fallas	Registro operativo	Pronóstico de funcionamiento de la máquina	Medidas autónomas de control
Servicios de TI asociados a la máquina	Ningún servicio	Servicios a través de portal online	Ejecución de servicios directamente	Ejecución autónoma de servicios	Completa integración de servicios TI
Modelos de negocio para la máquina	Ganancia por medio de la venta de un producto estándar	Venta y asesoría sobre el producto	Venta, asesoría y adaptación de la máquina a necesidades del cliente	Venta adicional de prestaciones de servicio asociadas a la máquina	Venta de funciones de producción

La Tabla 2 indica los criterios de selección para la integración de la máquina de desinfección de ajo insertado en otros procesos, se muestran las celdas sombreadas de acuerdo con lo que cumple el sistema. El equipo permitió el almacenamiento y recuperación de la información durante el proceso de desinfección teniendo acceso local. El registro de los datos permite hacer comparativas en los parámetros configurados para detectar los mejores en dosis, tiempo, velocidad de la banda, producto. El HMI concede la visualización *in situ* de los parámetros durante el proceso de desinfección, abriendo la posibilidad de establecer trabajo a futuro como la dosis, el tiempo, diferentes productos (chile, jitomate, nuez, entre otros), inserción de nuevos sensores (emisión de luz y temperatura del ambiente).

De acuerdo con los criterios seleccionados en las Tablas 1 y 2, los dispositivos de control que permitieron una integración científica y tecnológica, y a su vez, alineados a las necesidades de la industria 4.0. Las herramientas más ad-hoc para el desarrollo de la propuesta fueron PLC *Allen-Bradley* de la serie *CompactLogix* 5380, HMI *Allen-Bradley PanelView Plus* 7, Convertidor de frecuencia *SMVector Type* ESV751N01SXC, Luminarias UV-C LED Modelo P0004-M0002-L25W-UVC. En la Tabla 3 se muestran las especificaciones y características principales de componente.

2.1.2 Diseño de automatización con GRAFCET y GEMMA

Se debe establecer una metodología para desarrollar el control de la automatización, a través de un modelo que represente de forma exacta la secuencia de operación y, por ende, su documentación para consulta y mejoras a futuro. Las herramientas, que son aplicadas para llevar a cabo esta tarea, además de ser una estrategia de estandarización y que se encuentran vigentes son la guía para el estudio de los modos de marchas y estados (GEMMA) [23] y Gráfico de control mediante etapas y transiciones (GRAFCET) [24].

Tabla 2. Consideraciones de integración con otros procesos seleccionados con base en *VDMA Industrie 4.0 Forum*. Fuente: elaboración propia.

Proceso de sanitización					
Procesamiento de datos en la producción	Sin procesamiento de datos	Almacenamiento de datos para documentación	Análisis de datos para supervisión de procesos	Análisis para la planificación / control de procesos	Control / planificación automáticos de procesos
Comunicación máquina a máquina M2M	Sin comunicación	Interfaces Fieldbus	Interfaces Ethernet Industriales	Las máquinas disponen de acceso a internet	Servicios Web (software M2M)
Conexión de la producción con otras áreas de la empresa	Sin conexión	Intercambio de información vía e-mail	Formato único de datos y regulación para el intercambio de datos	Formato único de datos y servidor en la red	Soluciones TI integradas en la red
Infraestructura TIC en la producción	Intercambio de información por mail	Servidor de datos central en la producción	Portal con base internet con uso común de datos	Intercambio automático de información	Proveedores y clientes integrados en diseño del proceso
Interfaces personas - máquinas	Sin intercambio de información	Uso de dispositivos de visualización local	Supervisión / control de producción centralizada y descentraliza da	Uso de dispositivos de visualización móviles	Realidad ampliada y asistida
Eficiencia de la producción en lotes pequeños	Medios de producción rígidos y pequeño porcentaje de piezas iguales	Uso de medios de producción flexibles y piezas iguales	Medios de producción flexibles y unidades modulares para los productos	Producción flexible y modular, enfocada en componentes dentro de la empresa	Producción flexible y modular, enfocada en componentes en una red

Tabla 3. Principales componentes del Sistema de Desinfección. Fuente: elaboración propia.

Dispositivo	Características y especificaciones principales
PLC Allen-Bradley CompactLogix 5380 (Rockwell Automation, Milwaukee, United States)	Comunicación 2 puertos Ethernet-IP hasta 1 Gps / 8 módulos I/O locales / Puerto USB / Memoria SD
HMI Allen-Bradley PanelView Plus 7 (Rockwell Automation, Milwaukee, United States)	Comunicación Ethernet-IP / Hasta 100 pantallas, hasta 500 alarmas / Puerto USB / Memoria SD
Convertidor de frecuencia SMVector Type ESV751N01SXC (Lenze, Hamelin, Germany)	Alimentación a 120V o 240V CA monofásica / 1hp / Control mediante PLC para arranque, paro, giro y variación de velocidad
Luminarias UV-C LED Modelo P0004-M0002-L25W-UVC Laboratorio Iluminación Artificial, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México)	Voltaje de alimentación 37.5V Max. / Variación de intensidad luminosa / Iluminación intermitente o luz pulsada

El primer paso es analizar e identificar los requerimientos del sistema para establecer los subsistemas que conformarán sistema de desinfección. Después de considerar lo anterior, la herramienta GEMMA fue aplicada en la etapa de análisis, identificación de modos de operación, actores principales dentro de cada proceso, cambio entre los estados o procesos. Por su parte GRAFCET, permitió el diseño del proceso de automatización. La Figura 4, representa la metodología GEMMA aplicada a los modos de funcionamiento de la automatización dentro del sistema de desinfección, además, de generar la documentación, contribuir a visualizar la interacción e integración de los modos de operación (seguridad del operador y/o equipo, tratamiento de fallas, restablecer condiciones iniciales y/o específicos antes del encendido y/o apagado, por mencionar algunos).

Los requerimientos indicados por los productores de ajo fueron transformados utilizando GEMMA para los criterios de diseño mecánico y automatización, como se muestra en la Figura 5. De acuerdo con esto, se establecieron los modos de funcionamiento como el estado de origen del sistema (A6), espera de estado inicial (A1), producción normal (F1), alto pérdida de fin de ciclo. Todos estos procesos, fueron considerados desde la energización del sistema, pasando por producción normal y finalización del ciclo configurando el modo o estado de espera para dar continuidad con el siguiente ciclo. La nomenclatura de GEMMA aplicada al sistema de desinfección es representada con cuadros para las funciones. Por ejemplo, A1 es la espera en estado inicial, siguiendo a F1 (producción normal); es importante denotar que, entre A1 y F1 existe una condición de transición o cambio, representada con una línea horizontal. La condición de transición o cambio es una señal que envía el dispositivo para iniciar el ciclo, es decir, el botón de inicio de ciclo (b_ini_ciclo). De acuerdo con la representación de la Figura 5, A1 termina al presentarse o activarse alguna de las dos condiciones subsecuentes F1 (b_ini_ciclo) o F4 (b_ajuste_test_ciclo) si fueron activadas, una u otra respectivamente. De la misma manera, F1 contiene condiciones para finalizar el proceso denotadas por !paro_emerg (el símbolo "!" es interpretado como una señal que deja estar presente o que se desactiva).

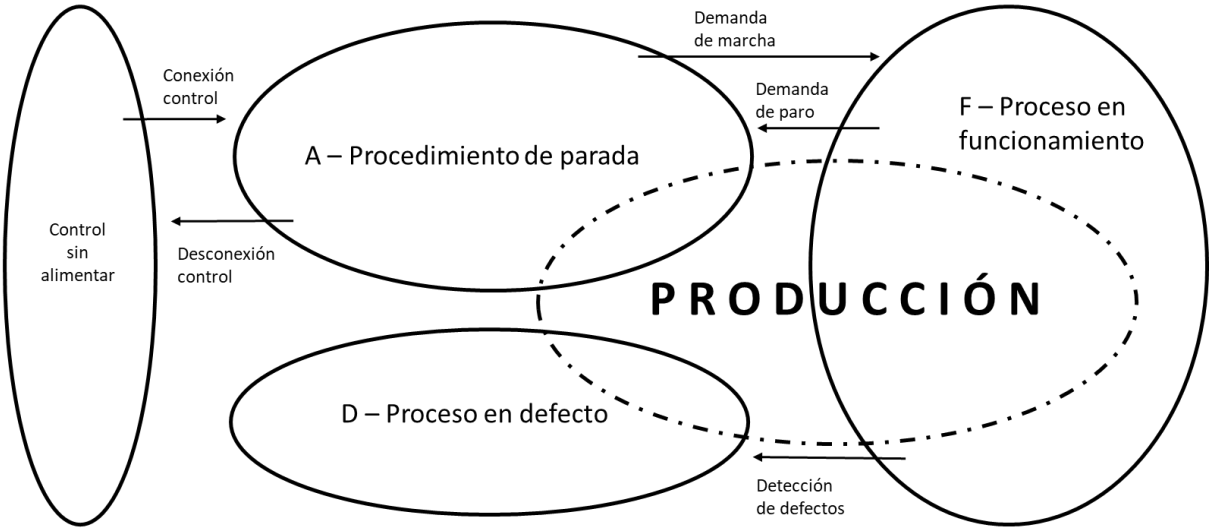

Figura 4. Modos de funcionamiento con base en la guía GEMMA. Fuente: elaboración propia.

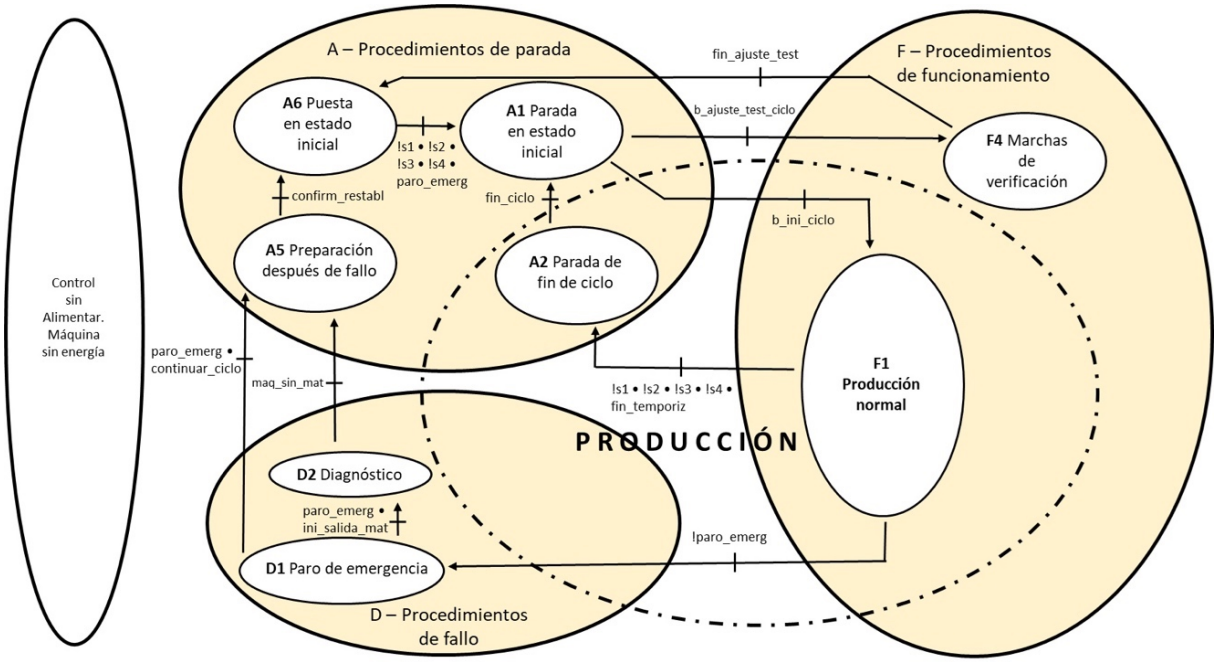

Figura 5. Modos de funcionamiento con base a la guía GEMMA para la máquina de desinfección de ajo. Fuente: elaboración propia.

GRAFCET al ser un método estandarizado y declarado en el estándar IEC 61131-3 [25] fue aplicado para llevar a cabo el proceso de automatización o programación en el sistema de desinfección. Las funciones son indicadas con la metodología GEMMA y a través de GRAFCET permiten agrupar y observar a detalle los modos de arranque y/o paro, así como sus interacciones, es decir, se definió la funcionalidad de la máquina en macro etapas describiendo los pasos que conlleva a cada una, para posteriormente desarrollar la programación en bloque de funciones o diagramas escalera [23].

2.2 Caracterización del sistema de radiación artificial tipo UV-C LED

El sistema de radiación (un arreglo de dos lámparas por nivel) fue caracterizado con un espectro radiómetro ILT950UV (*International Light Technologies, Massachusetts, United States*) con un rango de 200 a 1100 nm y un medidor LightScout UV (*Spectrum Technologies, Illinois, United States*) en rango 250-400 nm. El sensor fue colocado paralelamente al sistema de radiación artificial dentro de la banda transportadora para su caracterización. La obtención del espectro de luz UV-C LED con el ILT950UV fue una distancia de 5 cm entre las lámparas y el espectro radiómetro. Tanto el espectro radiómetro, como el medidor de LightScout UV fueron utilizados para cuantificar las dosis en las lámparas UV.

La Figura 6 muestra el pico de radiación de las lámparas, cabe mencionar que el espectro radiómetro integra la emisión por segundo. La caracterización del sistema de radiación UV-C LED fue realizada dentro del Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA).

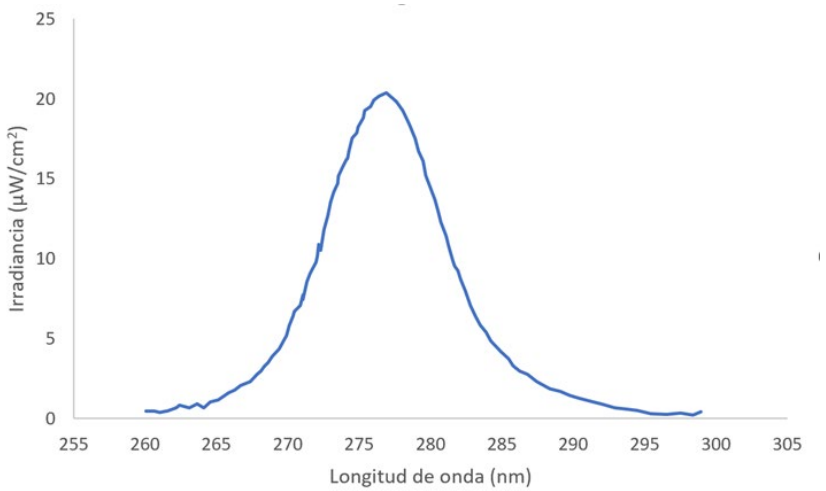

Figura 6. Longitud de onda del espectro de emisión de las lámparas UV-C. Fuente: elaboración propia.

2.3 Método de verificación de desinfección de la semilla de ajo

Para determinar un nivel adecuado de desinfección en la semilla de ajo, se establecieron las dosis utilizadas en un trabajo previo [2]. Para determinar la inactivación bacteriana fueron utilizadas semillas de ajo (1 kg) obtenidas de la empresa productora y de la misma cosecha. Posteriormente, se cuantificó la cantidad inicial de bacterias antes del proceso de irradiación con un gramo (1 g) del producto (semilla de ajo). Finalizado el proceso de desinfección, fue tomado un gramo (1 g) de la muestra tratada para determinar el porcentaje de inactivación bacteriana, lo anterior, con referente a la norma oficial mexicana NOM-092-SSA1-1994 de bienes y servicios (método para la cuenta de bacterias aerobias en placa). El análisis estadístico fue realizado con pruebas de comparación múltiples de Fisher, Dunet, Tukey y Hsu, considerando valores estadísticos de P inferior a 0.05 y altamente significativo con los valores de P inferiores a 0.001 con el paquete estadístico *Minitab* 17.

2.3.1 Configuración de la dosis

La dosis de radiación está relacionada con el tiempo de exposición (t) del ajo junto al flujo luminoso (I) emitido por las lámparas UV-C LED. Kowalski [26] estableció un modelo matemático que relaciona estos parámetros de acuerdo con (1):

$$D = I \times t \tag{1}$$

Donde, D es la dosis aplicada definida en $mJ \cdot cm^{-2}$, I es la irradiación dada en $mW \cdot cm^{-2}$ y t es el tiempo cuantificado en segundos (s).

2.3.2 Determinación del nivel de inactivación

Se utilizó el método de vaciado en placa para cuantificar la inactivación bacteriana. El procedimiento consiste en la cuantificación de bacterias visibles en la muestra, reportando el número total de unidades formadoras de colonias (UFC) [27]. Los microorganismos utilizados en esta propuesta son mesófilos aerobios (*salmonela*) y coliformes (*E.-coli*), dado que, son los que se encuentran en los productos en fresco que se consumen. Para cada muestra dispuesta en la placa de *Petri*, se realizaron diluciones en serie y 1 mL de la dilución fue sembrada en

agar ABRV y AME, para ser llevados a incubación durante 48 h a una temperatura de 37°C. Después, fueron contadas determinando la concentración bacteriana restante en la muestra. La inactivación de bacterias se calculó mediante (2) [28], [29].

$$Inactivation\ Log = Log\left(\frac{N_t}{N_0}\right) \tag{2}$$

Donde N_t es el conteo de colonias después de la radiación UV-C y N_0 es la cuenta inicial de colonias antes de la radiación UV-C.

2.3.3 Efecto germinicida

El efecto germicida de la radiación empleada se determinó mediante (3):

$$LogGE = Log\left(\frac{N_0}{N_t}\right) \tag{3}$$

Donde, N_0 es el conteo de colonias antes de la radiación UV-C y N_t es el conteo de colonias después de la radiación UV. La eficiencia del efecto germicida (E) permite determinar la eficiencia de la técnica de desinfección en porcentaje. El valor de %E se calculó de acuerdo con (4) [30].

$$Eficiencia(\%) = \left(\frac{N_0 - N_t}{N_0}\right) \times 100 \tag{4}$$

Donde, N_0 es el conteo de colonias antes de la radiación UV y N_t es el conteo de colonias después de la radiación UV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los métodos con radiación UV-C LED aplicados a la desinfección de alimentos, han demostrado ser una técnica efectiva para la inactivación de bacterias, así como, conservar las características físicas. Además, es una alternativa a los procedimientos convencionales con altas temperaturas, productos químicos o energía como los rayos gama que modifican algunas de las propiedades de los alimentos.

En este trabajo, se propuso el desarrollo e implementación de un sistema automatizado de desinfección de semilla de ajo para siembra. La tecnología desarrollada consta de tres cámaras de radiación UV-C LED, y una banda transportadora la cual está dividida en tres niveles con la finalidad de extender el área de radiación. Es importante mencionar que la tecnología desarrollada integra un PLC (por su aplicación industrial e investigación) y una HMI (estatus de entradas y/o salidas) como elementos de control. Una de las principales aportaciones del desarrollo tecnológico es la configuración automática de los diferentes parámetros que controlan el funcionamiento de los mecanismos de transporte (velocidad de la banda, altura de las lámparas, el tiempo de exposición, paro de emergencia) y emisión de la luz UV-C LED en cada zona de radiación. Adicionalmente, se permite el modo de operación manual. La propuesta se oferta como un producto científico y tecnológico semi industrial que puede insertarse en cualquier proceso o etapa de una línea de producción. Los tres niveles

implementados en la banda transportadora permiten que la semilla de ajo gire, lo que conlleva a irradiar una mayor superficie en el producto y evitar el efecto sombra.

De acuerdo con lo reportado en el estado del arte relacionado con sistemas de desinfección [11], [18], [31], solo se considera una etapa para el proceso de inactivación bacteriana tomando como variables la dosis y/o el tiempo de exposición. De igual forma, las contribuciones reportadas indican que modifican las posiciones de las lámparas, integran paredes reflectoras, o bien, el diseño es específico para el tipo de producto o alimento a desinfectar, estableciéndose los valores de todos estos parámetros de forma manual. Adicionalmente, es importante mencionar que son escasos los trabajos en donde se reportan resultados de porcentajes de desinfección obtenidos de su aplicación en ambientes reales [13], [18], [32], [33].

Por tal motivo, el enfoque prioritario de esta investigación fue la automatización de los mecanismos, el controlador del motor y el sistema de radiación artificial UV-C LED para ser considerado en un ambiente real dentro del sector agroindustrial.

Para la validación de la automatización y la programación, la utilización de las metodologías GEMMA y GRAFCET permitieron establecer las macro etapas para el equipo de desinfección, al energizar el equipo para realizar el ciclo completo o bien un ciclo manual para cada uno de los elementos, el esquema desarrollado tiene la finalidad que pueda ser replicado por otros grupos de investigación que tengan como objetivo la automatización de un equipo usando como elementos PLC e HMI (Figura 7).

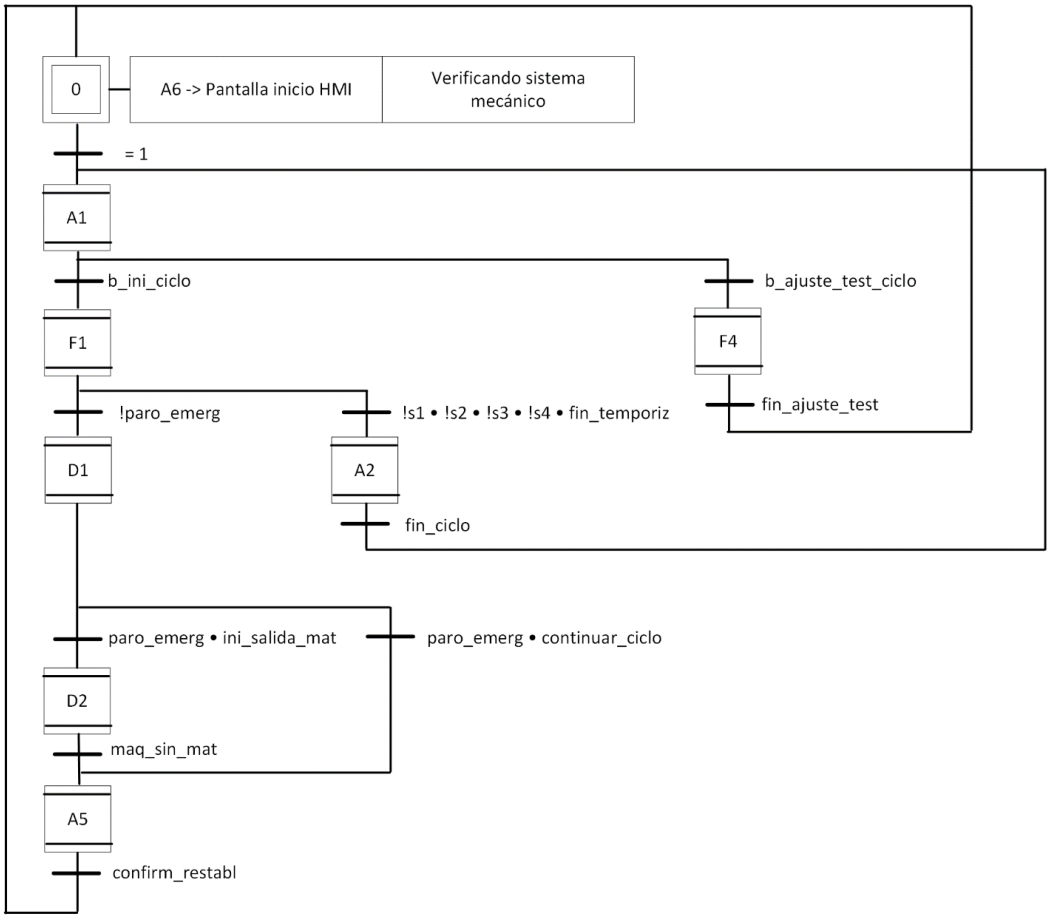

Figura 7. Resultado de la automatización con GRAFCET en la desinfección de ajo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 muestra los resultados del GRAFCET desde el estado inicial del sistema de desinfección de ajo para establecer dos variantes. El equipo se energiza para determinar que el sistema se encuentra en estado inicial, posteriormente, se activa el avance de las bandas y verifica que los sensores detecten el producto, así como, que no se encuentre activado el paro de emergencia, la cual es la segunda opción para activar que el ciclo haya concluido. Algunas de las funciones que fueron programadas en diferentes estados fueron: posición de home (10 y 40), sistema de seguridad activos (20 y 50), condiciones de detección de sensores para control (30 y 60). También, se muestra la transición con el signo "=1", esta condición se ejecuta después del estado 70, para salir de la macro etapa fue indicado con "F1+F4", es decir, se active la macro etapa de Producción Normal (F1) o la macro etapa de Operación Manual sin Orden (F4), según sea seleccionado por el personal operativo o técnico.

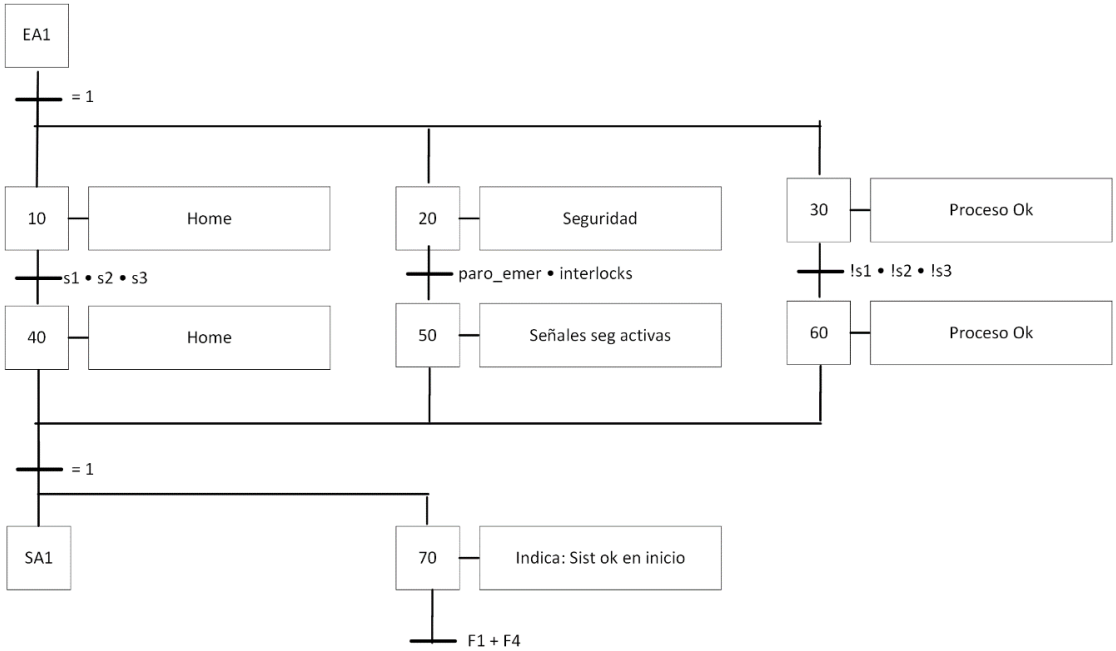

Figura 8. GRAFCET de Puesta a Punto para la máquina de desinfección de ajo. Fuente: elaboración propia.

Las secuencias de GRAFCET de Producción Normal (F1) son representadas en la Figura 9. Esta macro etapa se activa al detectarse la señal del ciclo de inicio estado 10 al demandar al operador la velocidad de la banda transportadora en los tres niveles para el proceso de desinfección de ajo, configurando el valor en la HMI. El sistema comienza su movimiento en el estado 20, posteriormente se activa la radiación UV-C LED (estado 30) en el primer nivel, al mismo tiempo, se mostró al operador que se inicia la desinfección; activando un temporizador para encender el nivel 2, instantes antes de la entrada del producto.

Los sensores s1, s2 y s3 se activan dependiendo de cómo se detecta el producto en cada zona de desinfección. El s4 indica que el producto ha terminado su proceso e indica en la HMI que el ajo terminó su desinfección, aunque un temporizador mantiene la banda en movimiento. El estado 100 o "(R)" indica las acciones del motor de banda y la luz UV-C LED (encendido y/o apagado). La función de fin de ciclo consiste en activar una señal para regresar el sistema a la macro etapa de puesta a punto (A1), estando lista para iniciar otro ciclo de producción normal o para iniciar modo de trabajo manual.

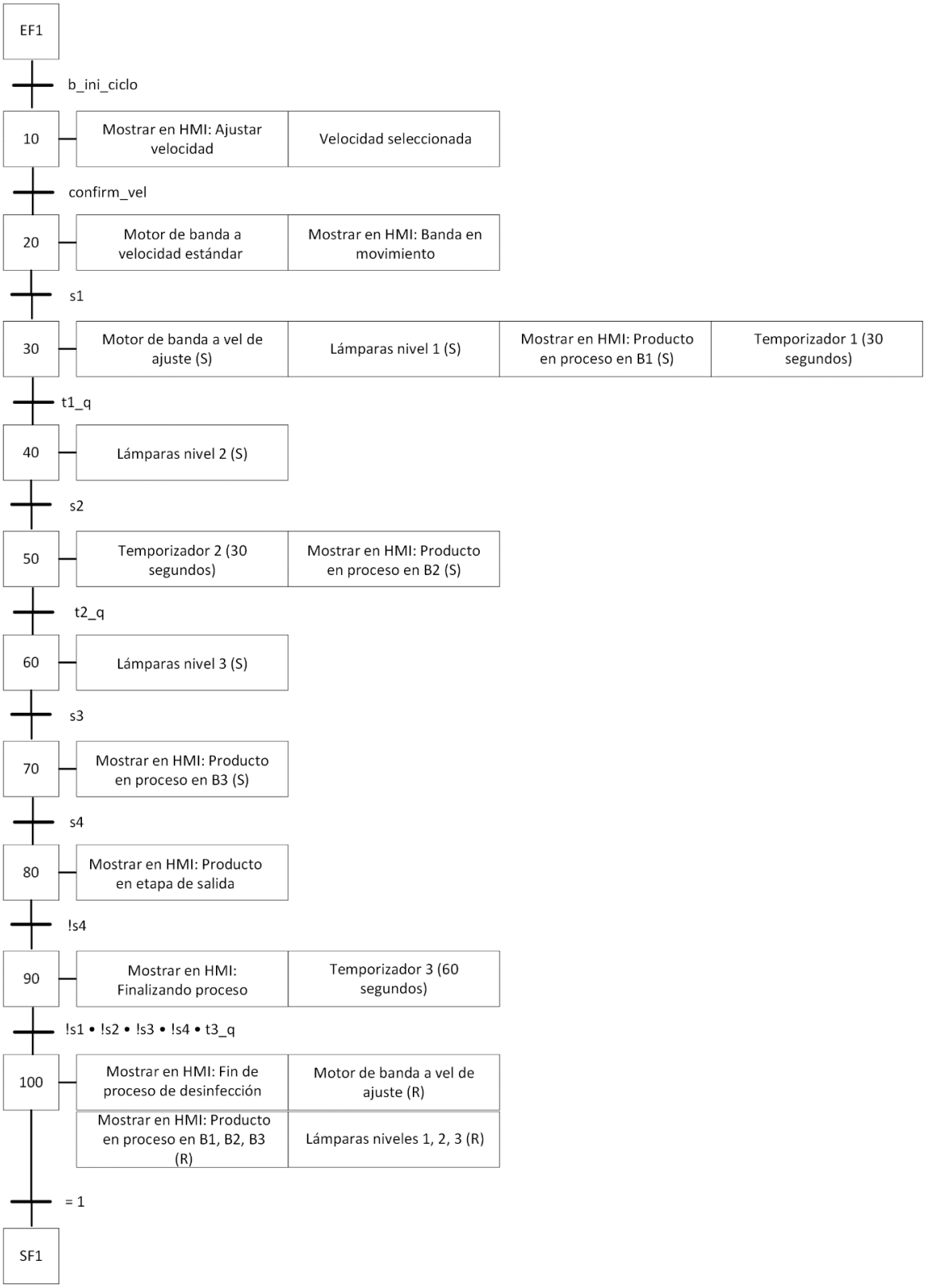

Figura 9. GRAFCET de Producción Normal de la máquina de desinfección de ajo. Fuente: elaboración propia.

Al mismo tiempo, se programaron funciones de manual de operación (F4), paro de emergencia (D1) y tratamiento de defectos (D2), preparación de puesta en marcha posterior al paro de emergencia (A5) y dispositivos para iniciar el proceso (A6). Los GRAFCET fueron programados con el *software Studio* 5000 *Logix Designer* de *Rocwell Automation Technologies* versión 32.00.00 y descargados en el PLC *CompactLogix* 5380 número de catálogo 5069-L306ER y HMI *PanelView Plus* 7 número de catálogo 2711P-T7C21D8S equipos de la marca *Allen Bradley*. La Figura 10a es el área de irradiación para la desinfección de ajo para cada nivel de la banda transportadora. Se visualiza la posición de las lámparas UV-C LED, así como la irradiancia que abarca. En la segunda (Figura 10b), se observa como el ajo se encuentra en el último nivel cubierto en su totalidad por el sistema de radiación LED.

a. b.

Figura 10. Sistema de desinfección para la semilla de ajo. a) Posición de las lámparas UV-C LED. b) Interacción de luz UV con la semilla. Fuente: elaboración propia.

El proceso de caracterización de las lámparas permitió detectar la máxima longitud de onda y con esto se determinó la posición óptima de las lámparas de radiación UV-C LED en el sistema de desinfección. Este aspecto fue validado adicionalmente con pruebas de laboratorio e instrumentación adecuada, comprobándose un mayor efecto germicida sobre las semillas de ajo.

Desde el enfoque microbiológico, fueron realizados experimentos con el producto de ajo por duplicado. La Tabla 4 muestra las dosis configuradas, radiación y el tiempo. Así como, el porcentaje de reducción de mesófilos aerobios y coliformes totales. Las dosis fueron tomadas del trabajo presentado por [34], [35].

Tabla 4. Configuración de parámetros para la desinfección, efecto germicida. Fuente: elaboración propia.

	Luz continua		Resultados finales	
Dosis ($mJ \cdot cm^{-2}$)	Radiación ($mW \cdot cm^{-2}$)	Tiempo (s)	Mesófilos Aerobios (%)	Coliformes (%)
5	0.15	33	85.00	50
15	0.15	100	92.30	99
25	0.15	137	88.50	99

De acuerdo con las dosis utilizadas, se obtuvo con 5 mJ•cm-2 un porcentaje de reducción del 85 % en mesófilos aerobios y 50 % en coliformes totales. Para la dosis de 15 mJ•cm-2 se determina como la mejor con un 92.30 % de Mesófilos Aerobios y 99 % para coliformes totales bacterias presentes en los alimentos. Finalmente, para la dosis de 25 mJ•cm-2 se obtuvo el 88.50 % de reducción para mesófilos aerobios y 99 % en coliformes. Respecto al análisis

estadístico es significativamente diferente el control de las muestras 5, 15 y 25 mJ•cm-2 mesófilos aerobios. Sin embargo, para el caso de coliformes totales las pruebas no mostraron diferencia significativa respecto del control. Adicionalmente, se comprobaron las ventajas que presenta el sistema propuesto, entre ellas está que pueden ser irradiados diferentes productos, dado que puede controlarse las dosis y los rangos en los tratamientos, mediante el encendido y apagado de las luminarias UV-C LED, y mediante el control de la velocidad de la banda transportadora. Además, al contar como control con el PLC y el HMI, se puede integrar directamente esta máquina dentro de un proceso en la línea de producción. Por su parte, [17] realizó el trabajo a nivel laboratorio y diseño de la banda transportadora, al igual que, el efecto germicida lo abordan como un trabajo a futuro. Otro trabajo, donde inocularon pechugas de pollo con Salmonella y posteriormente las irradio con UV-C (250-280nm) con dos irradiaciones, la primera 2 $mW{\cdot}cm^{-2}$ resaltando los tiempos de exposición 60 y 180 s, obtuvo una reducción bacteriana de 90.2 % y 95.2 %, respectivamente. La segunda con 4 $mW{\cdot}cm^{2}$ estableciendo los mismos tiempos (60 y 180 s) evaluó una reducción bacteriana de 99.1 % y 99.5 %, respectivamente [35].

La propuesta presentada en el desarrollo de la investigación atiende un caso real. Analizando los resultados microbiológicos obtenidos podemos asegurar una buena desinfección, ya que cumple con los coliformes fecales totales tanto para agua como para alimentos (20 UFC/mL o ausencia) y en el caso se mesófilos aerobios quedando muy por debajo del límite permisible para consumo humano (40 UFC/mL), siendo un alimento seguro sin exposición a contraer enfermedad, con resultados similares al trabajo referenciado con una menor radiación de UV-C LED.

4. CONCLUSIONES

Una enfermedad transmitida por los alimentos es un reto hacia la salud pública que se puede prevenir, así como el interés en el consumo de productos en fresco, por esta razón el sistema propuesto verificando el control de la automatización, la programación y el efecto germicida que el equipo proporciona. Dentro de las ventajas que presentó el sistema es que concede girar o rotar el producto para irradiar todas sus caras y evitar el efecto sombra. Además, se maximizó el área de irradiación para lograr mayor desinfección en las semillas de ajo. Sin duda, para el logro del objetivo de tener en operación la máquina de desinfección y además de lograr la efectividad del proceso, fue fundamental el uso de los criterios para la automatización de equipos para la industria, ya que fue una guía para la selección de los equipos de control, dejando habilitada la máquina para integrarla a producción real. La revisión y aplicación de la metodología GEMMA permitió desarrollar la automatización basada en el estándar GRAFCET de una forma más organizada y precisa, dado que facilitó una integración completa de funcionalidades. Adicionalmente, permite generar documentación ordenada de la automatización para que pueda retroalimentarse o se establezcan nuevos procesos en la máquina. Como trabajo futuro, se integran nuevas rutinas como diferentes alturas del sistema de radiación UV-C LED, optimizar la vida útil de las lámparas, nuevos experimentación con dosis, tiempo, incluso la combinación de longitudes de onda UV-A y UV-B. De igual forma, habilitar funcionalidades para la industria 4.0 para integrar nuevas tecnologías para el manejo de información almacenada.

5. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Este trabajo de investigación se desarrolló con la guía del Posgrado CIATEQ A.C. para el planteamiento, asesoramiento, y facilidades para realización de la investigación, también se recibieron asesoramiento, financiamiento y facilidades para la manufactura de la máquina por parte del TecNM Campus Pabellón de Arteaga. Se agradece a dichas instituciones, así como también a los asesores por todo su apoyo.

CONFLICTOS DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran que no se presentan conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Edgar Zacarías-Moreno autor de conceptualización, investigación, redacción y escritor del artículo.

José Alejandro García-Arredondo autor que contribuyó como asesor del proyecto, durante el planteamiento, desarrollo de la investigación y apoyo en la escritura del artículo; lo anterior en el área de conocimiento de automatización.

Nivia Escalante-García autora que contribuyó como asesora del proyecto, durante el planteamiento, desarrollo de la investigación y apoyo en la escritura del artículo; lo anterior en el área de conocimiento de biotecnología.

José Alonso Dena-Aguilar autor que contribuyó al desarrollo de la investigación con asesoría en el área de conocimiento de biología para complemento de validación de resultados.

Israel Álvarez-Ramírez autor que contribuyó al desarrollo de la investigación con asesoría para el diseño y manufactura de elementos mecánicos, y pruebas de funcionamiento de la máquina construida.

José Ernesto Olvera-González supervisión, escritura, retroalimentación sobre el funcionamiento y diseño de experimento.

6. REFERENCIAS

[1] A. H. Dar, O. Bashir, S. Khan, A. Wahid, and H. A. Makroo, "4 - Fresh-cut products: Processing operations and equipments," in *Fresh-Cut Fruits and Vegetables,* M. Wasim Siddiqui, Ed, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020, pp. 77–97. https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-816184-5.00004-5

[2] C. D. Iwu, and A. I. Okoh, "Preharvest transmission routes of fresh produce associated bacterial pathogens with outbreak potentials: A review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 22. p. 4407, Nov. 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16224407

[3] FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, *The State of Food Security and Nutrition in the World, Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable,* Rome, 2022. https://doi.org/10.4060/cc0639en

[4] C. H. Sommers, J. E. Sites, and M. Musgrove, "Ultraviolet Light (254 nm) Inactivation of Pathogens on Foods and Stainless Steel Surfaces," *J. Food Saf.*, vol. 30, no. 2, pp. 470–479, May. 2010. https://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4565.2010.00220.x

[5] A. Birmpa, V. Sfika, and A. Vantarakis, "Ultraviolet light and Ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 167, no. 1, pp. 96–102, Oct. 2013. https://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.005

[6] K. Dostert, M. Sigle, and W. Liu, "Narrowband characterisation in an office environment," in *MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing*, L. Torsten

Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. Schneider, Boca Ratón, Florida, USA: CRC Press, 2017, pp. 39–68. https://dx.doi.org/10.1201/b16540

[7] A. A. Gabriel, A. M. P. Tongco, and A. A. Barnes, "Utility of UV-C radiation as anti-Salmonella decontamination treatment for desiccated coconut flakes," *Food Control*, vol. 71, pp. 117–123, Jan. 2017. https://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.026

[8] C. Arroyo, A. Dorozko, E. Gaston, M. O'Sullivan, P. Whyte, and J. G. Lyng, "Light based technologies for microbial inactivation of liquids, bead surfaces and powdered infant formula," *Food Microbiol.*, vol. 67, pp. 49–57, Oct. 2017. https://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2017.06.001

[9] H. Fereshteh-Sadat, A. Hamid-Reza, H. Maghsoudi, R. Hajimohammadi-Farimani, and M. Balvardi, "Effects of a rotational UV-C irradiation system and packaging on the shelf life of fresh pistachio," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 99, no. 11, pp. 5229–5238, Aug. 2019. https://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9763

[10] T. Koutchma, "Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 2, no. 2. pp. 138–155, Jan. 2009. https://dx.doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3

[11] K. Do-kyun, and K. Dong-Hyun, "Effect of surface characteristics on the bactericidal efficacy of UVC LEDs," *Food Control*, vol. 108, p. 106869, Feb. 2020. https://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106869

[12] R. S. Bergman, "Germicidal UV Sources and Systems," *Photochemistry and Photobiology*, vol. 97, no. 3. pp. 466–470, May-Jun. 2021. https://dx.doi.org/10.1111/php.13387

[13] Y. Zhao, and J. Dong, "Effect of inactivating RNA viruses by coupled UVC and UVA LEDs evaluated by a viral surrogate commonly used as a genetic vector," *Biomed. Opt. Express.*, vol. 13, no. 8, pp. 4429-4444, Aug. 2022. https://dx.doi.org/10.1364/boe.468445

[14] Y. Muramoto, M. Kimura, and S. Nouda, "Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 8, p. 084004, Jun. 2014. https://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/8/084004

[15] J. Chen, S. Loeb, and J. H. Kim, "LED revolution: Fundamentals and prospects for UV disinfection applications," *Environmental Science: Water Research and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 188–202, Jan. 2017. https://dx.doi.org/10.1039/c6ew00241b

[16] V. K. Sharma, and H. V. Demir, "Bright Future of Deep-Ultraviolet Photonics: Emerging UVC Chip-Scale Light-Source Technology Platforms, Benchmarking, Challenges, and Outlook for UV Disinfection," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 5, pp. 1513-1521, Apr. 2022. https://dx.doi.org/10.1021/acsphotonics.2c00041

[17] N. Yagi *et al.*, "Sterilization Using 365 nm UV-LED," in *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Lyon, France, 2007, pp. 5841-5844. http://dx.doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353676

[18] F. Zakiyah Rahmanti, B. Anggo Seno Aji, A. Nurdin, W. Maharani, R. Aprilia, and M. Rafi Adityawarman, "A Study of Conveyor System with UV Light for Vegetable and Fruit Sterilization for Farmer," in *2021 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering*, Banyuwangi, Indonesia, 2021, pp. 197-201. https://dx.doi.org/10.1109/ICOMITEE53461.2021.9650309

[19] J. M. Bernal Medina, "Diseño y construcción de un sistema para la desinfección de productos agroalimentarios con luz UV-A LED," M.S. thesis, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Ags., México, 2021. [Online]. Unpublished.

[20] L. Mondani, G. Chiusa, and P. Battilani, "Chemical and biological control of Fusarium species involved in garlic dry rot at early crop stages," *Eur. J. Plant Pathol.*, vol. 160, no. 3, pp. 575–587, Jul. 2021. https://dx.doi.org/10.1007/s10658-021-02265-0

[21] S. Ahmed, and A. Hemada, "Effects of Pre-planting Treatments of Garlic (Allium Sativum l.) Cloves on Growth and Yield Under Middle Egypt Conditions," *Journal of Plant Production*, vol. 3, no. 6, pp. 971–986, Jun. 2012. https://dx.doi.org/10.21608/jpp.2012.84267

[22] *Guideline Industrie 4.0: Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses,* VDMA Verlag., Frankfurt, Germany, 2016, pp. 1–30.
https://www.pac.gr/bcm/uploads/guideline-industrie-4-0-vdma.pdf

[23] J. M. Castillo, G. Barbieri, A. Mejia, J. D. Hernandez, and K. Garces, "A GEMMA-GRAFCET generator for the automation software of smart manufacturing systems," *Machines*, vol. 9, no. 10, Oct. 2021. https://dx.doi.org/10.3390/machines9100232

[24] M. L. Alvarez, I. Saracnaga, A. Burgos, E. Estévez, and M. Marcos, "A methodological support for designing industrial control systems," in *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012)*, Krakow, Poland, 2012, pp. 1-4. https://doi.org/10.1109/ETFA.2012.6489740

[25] *Modos de marcha y parada. La guía GEMMA,* Universidad de Oviedo., Oviedo, España, 1993. http://isa.uniovi.es/~vsuarez/Download/GemmaTelemecanique.PDF

[26] W. Kowalski, "UVGI Disinfection Theory" in *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection,* Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2009, 17-50. https://doi.org/10.1007/978-

3-642-01999-9

[27] I. Terrones-Fernandez *et al.*, "Improvement of the Pour Plate Method by Separate Sterilization of Agar and Other Medium Components and Reduction of the Agar Concentration," *Microbiol. Spectr.*, vol. 11, no. 1, Jan. 2023. https://dx.doi.org/10.1128/spectrum.03161-22

[28] A. Prasad, M. Gänzle, and M. S. Roopesh, "Inactivation of Escherichia coli and Salmonella using 365 and 395 nm high intensity pulsed light emitting diodes," *Foods*, vol. 8, no. 12, p. 679, Dec. 2019. https://dx.doi.org/10.3390/foods8120679

[29] A. Tsunedomi *et al.*, "UVA-LED device to disinfect hydroponic nutrient solution," *J. Med. Investig.*, vol. 65, no. 3.4, pp. 171–176, Oct. 2018. https://doi.org/10.2152/jmi.65.171

[30] L. López V, J. Romero R, and F. Ureta V, "Acción germicida in vitro de productos desinfectantes de uso en la industria de alimentos," *Arch. Latinoam. Nutr.*, vol. 52, no. 1, pp. 74–76, Mar. 2002. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222002000100011

[31] I. Nicolau-Lapeña, P. Colás-Medà, I. Viñas, and I. Alegre, "Inactivation of Escherichia coli, Salmonella enterica and Listeria monocytogenes on apple peel and apple juice by ultraviolet C light treatments with two irradiation devices," *International Journal of Food Microbiology*, vol. 364, p.109535 Mar. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109535

[32] N. Sneha, and B. M. Patil, "The impact of UV-C treatment on fruits and vegetables for quality and shelf life improvement using internet of things," in *Computational Intelligence in Data Mining*, J. Nayak, H, Behera, B. Naik, S. Vimal, and D. Pelusi, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 235–247. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9447-9_18

[33] U. Varshney, N. Aggarwal, and G. Gupta, "Current advances in solar-blind photodetection technology: Using Ga2O3and AlGaN," *J. Mater. Chem. C Mater. Opt. Electron. Devices.,* vol. 10, no. 5, pp. 1573–1593, Dec. 2022. https://doi.org/10.1039/d1tc05101f

[34] E. Flores Gallegos, N. Escalante-García, D. Alanis-Lumbreras, R. Ivanov-Tsonchev, A. Lara-Herrera, and E. Olvera-Gonzalez, "Continuous and Pulsed Ultraviolet-C LED on Germicidal Effect and Energy Consumption in Fresh Products: Applications in Tomatoes as a Model," *Foods*, vol. 11, no. 22, p. 3636, Nov. 2022. https://doi.org/10.3390/foods11223636

[35] A. Calle, M. Fernandez, B. Montoya, M. Schmidt, and J. Thompson, "Uv-c led irradiation reduces salmonella on chicken and food contact surfaces," *Foods*, vol. 10, no. 7, p. 1459. Jul. 2021. https://doi.org/10.3390/foods10071459