

DISEÑO CIRCUITAL DE UN ESCÁNER LÁSER OPTOMEATRÓNICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE FRUTAS EN TIEMPO REAL

*DESIGN OF AN OPTOMECHATRONIC LASER SCANNER FOR
REAL TIME FRUIT CLASSIFICATION*

David Fernández Rodríguez

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
M23271371@tuxtla.tecnm.mx

Rafael Mota Grajales

Tecnológico Nacional de México / IT de Tuxtla Gutiérrez, México
rafael.mg@tuxtla.mx

Recepción: 26/noviembre/2024

Aceptación: 27/diciembre/2024

Resumen

El procesamiento y la clasificación de frutas en la agricultura de poscosecha requieren tecnologías eficientes y accesibles para los productores. Este estudio presenta el desarrollo de un sistema optomecatrónico de alta velocidad que utiliza un arreglo de láseres semiconductores y fotodetectores comerciales para capturar contornos bidimensionales de frutas. El objetivo es mejorar la precisión y eficiencia de los sistemas automatizados de clasificación, proporcionando información en tiempo real para el procesamiento. A medida que la fruta atraviesa el área de escaneo, el sistema registra las interrupciones de los haces de luz generadas por el contorno de la fruta, permitiendo la creación de perfiles transversales de su forma. Estos perfiles se utilizan para reconstruir la geometría de la fruta, permitiendo la estimación de su volumen. Para validar el sistema, se implementó un algoritmo en Verilog en una FPGA Tang Nano 20K, que mide los tiempos de respuesta del circuito y realiza cálculos de volumen con alta precisión en tiempo real. Este enfoque incrementa la eficiencia y la sostenibilidad en el sector agroindustrial al mejorar la clasificación rápida y precisa en las líneas de producción.

Palabras Clave: Clasificación, Láseres, Optomecatrónico, Procesamiento, Volumen.

Abstract

The processing and classification of fruits in post-harvest agriculture demands efficient and accessible technologies for producers. This study presents the development of a high-speed optomechatronic system that uses an array of semiconductor lasers and commercial photodetectors to capture two-dimensional contours of fruits. The objective is to improve the accuracy and efficiency of automated classification systems by providing real-time information for processing. As the fruit passes through the scanning area, the system records interruptions in the light beams generated by the fruit's contour, allowing the creation of cross-sectional profiles of its shape. These profiles are used to reconstruct the fruit's geometry, enabling volume estimation. To validate the system, an algorithm was implemented in Verilog on a Tang Nano 20K FPGA, which measures the circuit's response times and performs volume calculations with high precision in real time. This approach enhances efficiency and sustainability in the agro-industrial sector by improving fast and accurate classification in production lines.

Keywords: *Classification, Lasers, Optomechatronic, Processing, Volume.*

1. Introducción

El proceso de selección y clasificación de productos vegetales es cada vez más importante en la agroindustria, debido a la necesidad de mantener una producción estable y eficiente. La alta capacidad de discriminación de productos es fundamental para este objetivo. Sin embargo, la inclusión del factor humano en estos sistemas de clasificación puede causar retrasos productivos y ser propensa a errores, ya que los operadores se basan en su propia percepción de calidad, la cual puede variar entre ellos. En este contexto, los sistemas automatizados se presentan como una solución viable y eficiente. Diversos enfoques han sido utilizados para lograr la clasificación de productos vegetales sin la intervención del factor humano. Entre estos, el uso de tecnología láser ha demostrado ser especialmente prometedor. [Moreda, 2007] reportó la aplicabilidad de un sensor de anillo óptico para determinar el tamaño de frutos no esféricos, utilizando un arreglo de emisores y receptores de

infrarrojos que describen la curvatura de los objetos mediante la formación de cuerdas tangenciales.

Otra tecnología utilizada para la clasificación de frutas es la basada en sensores capacitivos, como lo mostró [Taghinezhad, 2012], quien se centró en medir el volumen de frutas específicas. Aunque este enfoque ofreció alta precisión en la medición, tuvo limitaciones en la velocidad de operación debido a las características de los componentes electrónicos utilizados. Asimismo, [Costa, 2017] aprovecharon el uso de láseres para evaluar la firmeza de los frutos de la palma de coyol, obteniendo resultados no invasivos y precisos sobre la calidad del producto. De manera similar, [Minarni, 2017] utilizó láseres de diodo de 532 nm y 680 nm junto con una cámara CMOS en una plataforma giratoria para clasificar la madurez de racimos de fruta fresca de palma aceitera, utilizando intensidades de reflectancia para diferenciar los niveles de madurez. Este método, aunque efectivo, depende de equipos especializados que pueden aumentar los costos y la complejidad del sistema. [Makhsous, 2019] presentó un sistema de luz estructurada (SLS) móvil para medir el volumen y tamaño de porciones de alimentos en la dieta de pacientes diabéticos. Utilizando un módulo láser y una lente de difracción, el sistema logró una mejora del 40% en la precisión de las mediciones en comparación con los métodos manuales. De manera similar, [Lockman, 2019] exploró la tecnología de imágenes con láser para detectar la madurez de vainas de cacao, empleando un escáner láser para capturar imágenes detalladas y algoritmos para analizar características de madurez, optimizando el proceso de cosecha. Por otra parte, en [Chu, 2024] implementaron un láser de línea roja en su sistema de escaneo para la localización precisa de frutas. El láser proyecta líneas sobre la superficie de las frutas, permitiendo calcular su posición en 3D mediante triangulación láser, lo que mejora la precisión incluso en condiciones de iluminación variable o cuando las frutas están parcialmente bloqueadas por hojas o ramas.

La aplicación de láseres de semiconductor también ha mostrado resultados prometedores en la clasificación de frutas. [Wu, 2020] subrayó la importancia de utilizar láseres para obtener imágenes detalladas de retrodispersión de luz en manzanas, lo que permite una evaluación no destructiva y precisa de la calidad de

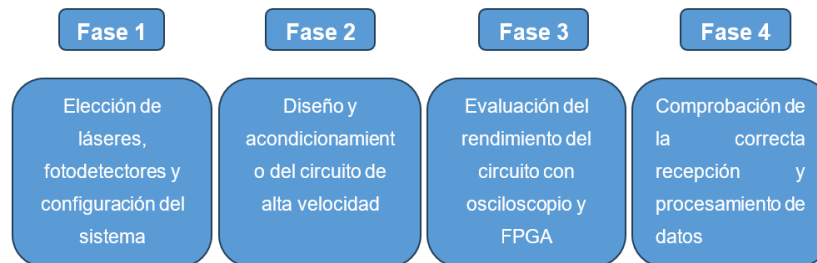
las frutas. [Zhang, 2020], por otro lado, utilizó escaneo láser 3D para estimar el número y tamaño de naranjas en el campo, aplicando algoritmos para mejorar la gestión de la producción y planificación de la cosecha. Además, [Rahman, 2021] empleó la reflexión láser para identificar defectos en fresas, utilizando la cantidad de luz reflejada y la electricidad generada en la superficie para diferenciar entre fresas sanas y defectuosas. En los últimos años, han surgido nuevas tecnologías que aumentan la eficiencia en la clasificación de productos vegetales. Entre estas, las Field Programmable Gate Array (FPGA) se destacan por su capacidad de reconfiguración dinámica y su alto nivel de paralelismo, lo que permite un alto rendimiento con bajo consumo energético [Maschi, 2024]. Estas características convierten a las FPGA en herramientas ideales para recibir y procesar la información transmitida por dispositivos optomecatrónicos de alta velocidad en la clasificación de productos vegetales. Estos avances, junto con los desarrollos en dispositivos optoelectrónicos de alta velocidad, como destacan [Shi, 2022], han mejorado la capacidad de procesamiento en tiempo real y la precisión, consolidando su relevancia en aplicaciones industriales. La revisión de la literatura muestra claramente la creciente importancia de la tecnología láser en la clasificación de frutas y otros productos vegetales.

Los estudios analizados demuestran que los escáneres láser y otras técnicas basadas en láser ofrecen ventajas significativas en términos de precisión, eficiencia y no destructividad, lo que los hace adecuados para aplicaciones en la industria agroindustrial. En este contexto, el estudio se centra en diseñar un sistema optomecatrónico que, mediante láseres semiconductores y fotodetectores, capture en tiempo real los contornos de frutas para mejorar la clasificación automatizada. El dispositivo se integra con una FPGA para procesar rápidamente los datos y aumentar la eficiencia y precisión en las líneas de producción.

2. Métodos

La configuración del dispositivo optomecatrónico se basó en un arreglo matricial de 8 x 8 láseres semiconductores y sus fotodetectores correspondientes. Fue esencial analizar las características de estos láseres y fotodetectores utilizados en

el sistema para optimizar el diseño y asegurar un rendimiento óptimo en aplicaciones específicas. En la Figura 1, se presenta un esquema que resume las fases metodológicas del estudio, desde la selección de componentes hasta la validación del sistema y la medición de la velocidad de respuesta.



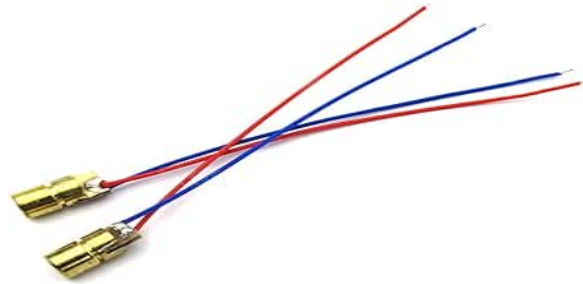
Fuente: elaboración propia

Figura 1 Metodología de diseño.

Un láser se define como un dispositivo que emplea la emisión estimulada de radiación en un medio específico para generar un haz de luz en el cual la monocromaticidad, coherencia y direccionalidad están rigurosamente controladas. Específicamente, los elementos semiconductores tienen un pequeño número de portadores libres que puedan moverse a través de la red cristalina cuando se les aplica un campo externo. En el caso de que los portadores sean electrones, se está en presencia de semiconductores tipo n; sí, por el contrario, son huecos, se tienen semiconductores de tipo p. La unión de uno n y otro p se llama diodo. Estas uniones son también la base de los láseres semiconductores. Durante décadas, los láseres semiconductores han liderado las ventas en el mercado gracias a su destacado rendimiento [Fernández, 2010].

El módulo de emisión estuvo compuesto por una matriz de 8 x 8 láseres. Se utilizaron diodos láser de punto rojo con carcasas de cobre, específicamente el modelo IL2N4, que son dispositivos de uso común y estuvieron disponibles a precios asequibles en el mercado, caracterizados por su eficiencia en aplicaciones de bajo consumo energético y alta estabilidad en la proyección del haz. Estos diodos láser son conocidos por su capacidad de emitir luz coherente y direccional con una longitud de onda de 650 nm, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren precisión en la alineación del haz de luz. Además, su diseño compacto y robusto

permite su integración en sistemas optomecatrónicos, garantizando tanto la durabilidad del dispositivo como un rendimiento estable incluso en condiciones ambientales variables. En la Figura 2 se ilustra la forma y estructura del láser.



Fuente: <https://pigra.com.mx/general-modulos/143-diodo-laser.html>

Figura 2 Diodo Láser IL2N4.

Estos láseres se destacan por ser dispositivos muy compactos, con dimensiones de $6.5 \times 18 \text{ mm}$, y emiten un haz de luz intenso de 650 nm . Algunas de sus características son:

- Tipo de salida: Punto.
- Voltaje de Operación: 5 V .
- Potencia de salida: 5 mW .
- Diámetro del Punto: 6 mm .
- Temperatura de funcionamiento: -30 a $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Los fotodiodos se consideran los dispositivos optoelectrónicos semiconductores más simples y, al mismo tiempo, los más versátiles del mercado. Se utilizan para la detección de luz en las regiones espectrales ultravioleta, visible e infrarroja. Gracias a su pequeño tamaño, robustez, estabilidad, linealidad, velocidad y bajo nivel de ruido, son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones como sistemas ópticos, fotometría, física de partículas, entre otras [Zhao, 2018].

El segundo módulo del prototipo es el de detección, el cual se encarga de recibir la señal luminosa y convertirla en una señal eléctrica. Para ello se usaron fotodiodos rectangulares modelo PD3069CP. En la Figura 3 se muestra la forma de estos dispositivos.



Fuente: <http://www.szsgir.com/English/Product/2748654614.html>

Figura 3 Fotodetector PD3069CP.

Algunas de sus características principales son:

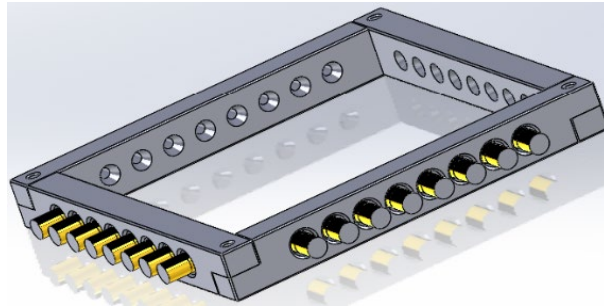
- Color: Transparente.
- Rango de ancho de banda espectral: 400 – 1100 *nm*.
- Longitud de onda de la sensibilidad máxima: 650 *nm*.
- Tiempo de subida/bajada: 30/30 *ns*.

En la etapa de recepción del dispositivo, se empleó el amplificador operacional TL084CN configurado como comparador, debido a sus características ventajosas para esta investigación específica. Este amplificador operacional se seleccionó por su bajo consumo de potencia, alta velocidad de respuesta, bajo nivel de ruido y alta ganancia de voltaje. Además, su arquitectura de entrada JFET proporciona una alta impedancia de entrada y baja corriente de polarización, lo cual es crucial para aplicaciones de alta precisión. Las principales características del amplificador operacional TL084CN:

- Ganancia de voltaje: 120 *Db*.
- Ancho de banda: 4 *MHz*.
- Tasa de cambio de voltaje: 16 *V/us*.
- Voltaje y corriente offset: 10 *mV/100 pA*.
- Corriente de vías: 20 *pA*.
- Proporción de rechazo de modo común: 86 *dB*.

Se diseñó un prototipo en SolidWorks, mostrado en la Figura 4, para integrar los láseres y fotodetectores con una alineación precisa. El diseño cuadrado del prototipo, con dimensiones de 10 x 10 *cm* y una separación de 4 *mm* entre los láseres, asegura que cada láser proyecte su haz directamente hacia el fotodetector

opuesto. Esto establece un ángulo de incidencia de 90 grados con respecto al plano de los fotodetectores, maximizando la eficiencia de detección.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Soporte para láseres y fotodetectores.

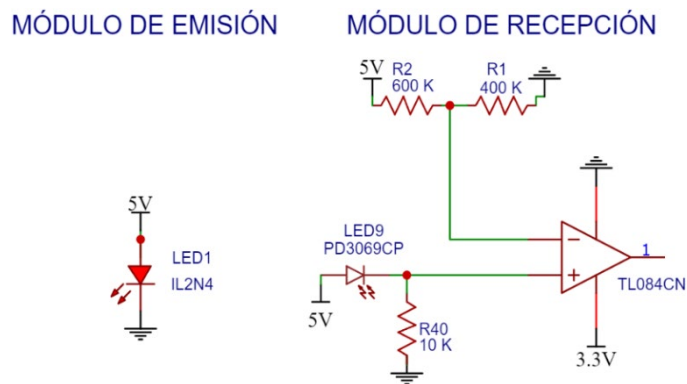
La configuración simétrica facilita la alineación y distribución uniforme de los componentes, optimizando tanto el espacio interno como el proceso de fabricación y montaje. Además, esta disposición asegura que cualquier desviación mínima en la trayectoria del haz de luz se detecte de manera efectiva, mejorando la precisión del sistema. El diseño robusto minimiza las vibraciones, garantizando estabilidad y precisión en el funcionamiento del dispositivo optomecatrónico.

El dispositivo emplea un arreglo de 16 láseres y 16 fotodetectores dispuestos de manera fija, uno frente al otro, de modo que los láseres proyectan haces de luz directamente hacia los fotodetectores opuestos. Esta configuración asegura que, al atravesar una fruta u objeto el área de escaneo, los haces de luz se interrumpen, desactivando los fotodetectores correspondientes. Los fotodetectores están alineados de manera perpendicular al plano de movimiento del objeto, lo que permite capturar con precisión los puntos de interrupción sin requerir colocaciones en ángulos específicos.

A medida que la fruta se desplaza a través del escáner, el sistema registra las interrupciones en forma de un vector de 16 elementos, donde cada elemento indica el estado de un fotodetector (activo o desactivado). Este vector se actualiza conforme el objeto avanza, generando cortes transversales del contorno del objeto en tiempo real. Dado que la posición de cada fotodetector es fija y conocida, se puede reconstruir la forma del objeto con base en las desactivaciones detectadas.

Este enfoque permite obtener información detallada del contorno sin necesidad de análisis complejos de reflexión o absorción de la luz, facilitando un mapeo eficiente para el procesamiento y la clasificación.

La Figura 5 muestra la disposición detallada del circuito diseñado para convertir la señal de salida de los fotodetectores en una señal compatible con cualquier microcontrolador. El funcionamiento del circuito fue verificado con la FPGA Tang Nano 20K. Los amplificadores operacionales, modelo TL084CN, se configuraron en modo comparador para proporcionar estabilidad al sistema. Esta configuración es crucial para manejar múltiples salidas, asegurando que los niveles de voltaje cambien de manera precisa y predecible ante la activación de los fotodetectores. Además, ofrece alta impedancia de entrada y baja corriente de polarización, lo que optimiza la precisión en la detección de señales débiles provenientes de los fotodetectores.

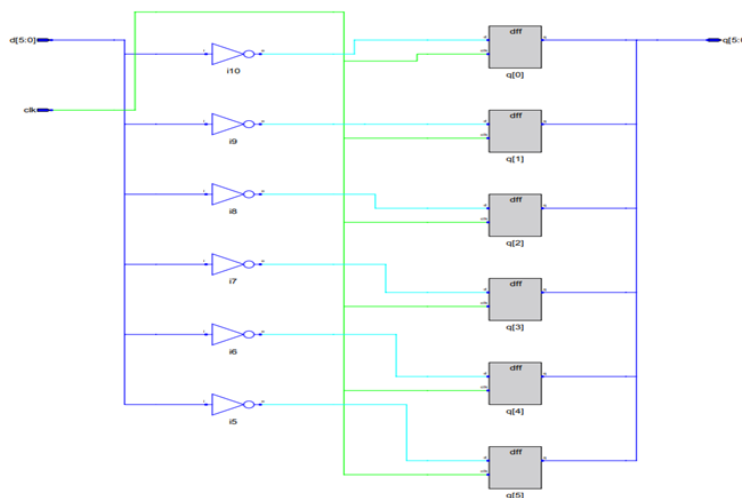


Fuente: elaboración propia

Figura 5 Soporte para láseres y fotodetectores.

Para la activación de los 16 láseres del sistema, se emplea una fuente conmutada de 5 VDC y 3 A, cuya capacidad es suficiente para cubrir el consumo total de los láseres. La alta velocidad de respuesta del sistema de mapeo se verificó mediante un osciloscopio de alta precisión. Posteriormente, las salidas del circuito se conectaron a las entradas de la FPGA Tang Nano 20K, lo que permitió confirmar que los niveles de voltaje eran adecuados para ser registrados por dispositivos compatibles, garantizando así precisión y estabilidad en el funcionamiento del sistema.

El módulo de pruebas se desarrolló en Verilog utilizando el entorno de desarrollo Gowin. Este módulo lee las entradas de voltaje y muestra su activación a través de los LEDs de prueba en la tarjeta. El diseño consta de 8 inversores, que trabajan con lógica inversa, y 8 registros encargados de almacenar la información y transferirla a la salida en cada pulso de reloj. El sistema es síncrono y opera a una frecuencia apropiada para la Tang Nano 20K, como se muestra en la Figura 6 a nivel de RTL (Register Transfer Level).



Fuente: elaboración propia

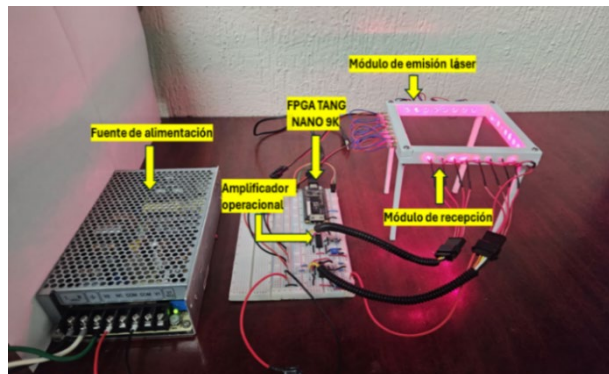
Figura 6 Módulo a nivel de RTL.

Para evaluar el rendimiento del sistema y medir la velocidad de respuesta del circuito, se realizaron una serie de experimentos utilizando un osciloscopio BK Precision modelo 2553. Con el cual se midieron los tiempos de activación y desactivación de las señales generadas por el arreglo de láseres y fotodetectores. Estas señales fueron monitoreadas para asegurar que el sistema operara de manera precisa y estable, incluso a alta velocidad.

Posteriormente, se utilizó la FPGA Tang Nano 20K para validar los resultados obtenidos con el osciloscopio. Se implementó un contador en la FPGA que registraba los ciclos de reloj transcurridos entre los flancos de subida y bajada de las señales de entrada. Esta validación confirmó que los tiempos de respuesta medidos con el osciloscopio, en el rango de nanosegundos, eran precisos y

consistentes con los valores obtenidos mediante la FPGA. De esta forma, se aseguró la fiabilidad del sistema para su posible integración en aplicaciones que demandan tiempos de respuesta rápidos y procesamiento en tiempo real.

El sistema optomecatrónico completo, utilizado para los experimentos, está compuesto por un arreglo de láseres y fotodetectores que se conectan a la FPGA Tang Nano 20K, encargada del procesamiento y transmisión de datos. En la Figura 7, se presenta la integración de todos los componentes clave del sistema, incluyendo los láseres y fotodetectores, dispuestos para asegurar la correcta captura y procesamiento de las señales. Este sistema se configuró para realizar pruebas de rendimiento, validando tanto la velocidad de respuesta como la precisión de las señales en tiempo real.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Prototipo de pruebas.

Una vez probado el sistema, se realizó una prueba de validación mediante el desarrollo de un algoritmo en Verilog que implementa el método de discos para estimar el volumen de objetos esféricos utilizando los datos obtenidos del escáner. Este método, descrito en la Ecuación 1, divide el objeto en secciones cilíndricas (discos) a partir de cortes transversales obtenidos en tiempo real. A medida que la fruta se mueve a través del escáner, el arreglo de láseres y fotodetectores registra las interrupciones de los haces de luz, creando un contorno de la fruta. A partir de estas interrupciones, se determina el diámetro de cada sección transversal del objeto. El volumen total se calcula sumando el volumen de cada disco creado a partir de estos diámetros, permitiendo así una estimación precisa del volumen del

objeto. La Ecuación 1 muestra el cálculo aproximado del volumen mediante la suma de los volúmenes de estos discos:

$$V \approx \sum_{k=0}^n \pi r^2 \Delta x \quad (1)$$

Donde:

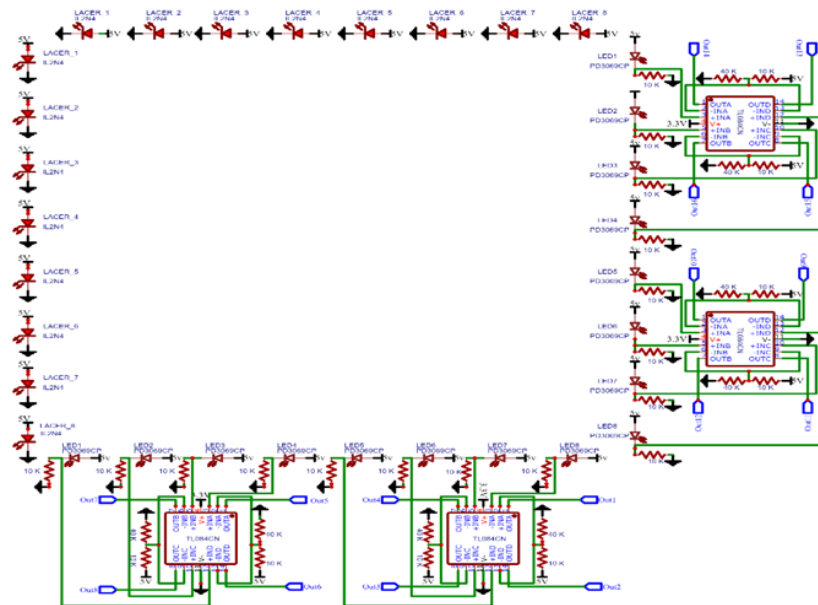
- V : Volumen aproximado del objeto sólido de revolución.
- π : Constante pi (aproximadamente 3.14159).
- r : Es el radio del objeto.
- Δx : Es el tamaño del intervalo o corte.

A medida que el objeto avanza por el escáner, el método de discos calcula de forma continua y precisa el volumen en tiempo real, ajustándose dinámicamente a las variaciones de forma y tamaño de la fruta. Este enfoque maximiza la eficiencia del sistema al ofrecer resultados en tiempo real de forma continua, lo que resulta fundamental para la automatización en la clasificación de frutas dentro de la industria agroalimentaria, garantizando precisión y rapidez en los procesos de producción. De este modo, se asegura que el sistema mantenga un alto rendimiento, facilitando su integración en entornos industriales que requieren procesamiento ágil y exactitud en el control de calidad.

3. Resultados

El diseño circuital del sistema de emisión y recepción ofrece una visión detallada de la estructura del arreglo, mostrando claramente cómo se interconectan los componentes y cómo se distribuyen las señales a lo largo del sistema. Esta representación es fundamental para comprender con precisión el funcionamiento y la configuración del sistema, lo que garantiza una integración eficiente y un rendimiento óptimo en su aplicación práctica. Los componentes se organizaron de manera fiel, como se muestra en la Figura 8, para facilitar y optimizar el proceso de montaje del circuito. Esto asegura que la disposición física representada en el diagrama coincida exactamente con la implementación real del sistema. Tal precisión es crucial para minimizar errores durante el montaje y garantizar que cada

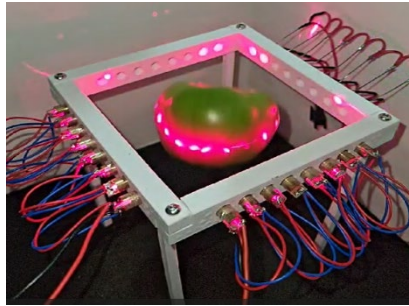
componente esté ubicado de acuerdo con las especificaciones de diseño, asegurando así un montaje eficiente y sin complicaciones.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Representación del circuito.

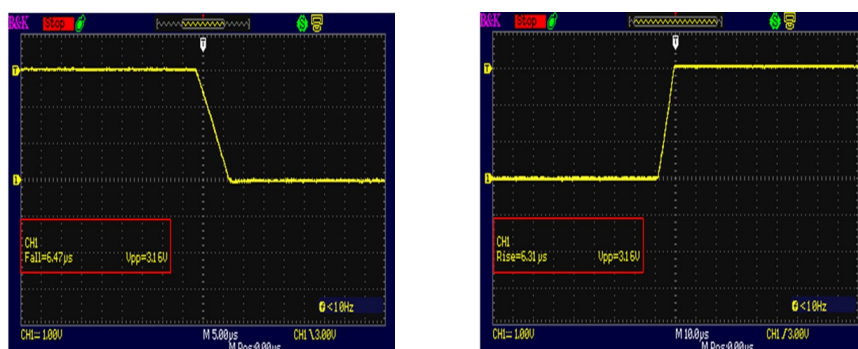
En este punto, el dispositivo estaba listo para las pruebas de funcionamiento. Para evaluar el rendimiento del diseño, se midió el tiempo de respuesta al paso de los objetos esféricos en el área de detección. Estas pruebas permitieron verificar la capacidad del sistema para detectar de manera precisa y rápida la entrada y salida de los objetos en el área monitoreada, como se muestra en la Figura 9. Estas pruebas permitieron verificar varios aspectos clave del rendimiento del sistema, como la capacidad del dispositivo para detectar de inmediato la entrada de un objeto en el área de detección y reconocer su salida. Además, se centraron en medir la velocidad de respuesta del sistema en tiempo real. Los ensayos proporcionaron información crucial sobre la efectividad y eficiencia del dispositivo, confirmando que funcionaba según lo previsto en el diseño. También permitieron visualizar el rendimiento en términos de precisión en la detección y tiempos de respuesta. Los datos obtenidos facilitaron la identificación de posibles áreas de mejora y optimización del sistema, garantizando un desempeño óptimo para futuras aplicaciones.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Prueba de funcionamiento.

Para evaluar la velocidad del sistema, se utilizaron las salidas del circuito conectadas al osciloscopio BK Precision. Este dispositivo permitió capturar las señales en tiempo real con alta precisión, asegurando que cualquier fluctuación o retraso en la respuesta del circuito pudiera ser detectado y analizado con exactitud. Las pruebas consistieron en medir el tiempo de respuesta del sistema al registrar la diferencia entre la activación y desactivación de las señales de entrada. Se realizaron múltiples mediciones en cada una de las salidas del sistema, verificando la rapidez con la que el circuito respondía y transmitía los datos. Los resultados obtenidos permitieron identificar patrones consistentes en la respuesta del sistema, siendo el tiempo mostrado en la Figura 10 el que más se repitió durante las mediciones.



a) Borde de bajada.

b) Borde de subida

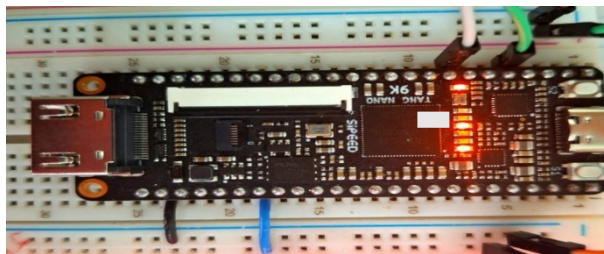
Fuente: elaboración propia

Figura 10 Pruebas de velocidad de respuesta primera iteración.

Los ensayos validaron la eficiencia del sistema para operar en aplicaciones de alta velocidad. Además, los tiempos de respuesta obtenidos se mantuvieron dentro de

los márgenes esperados, lo que demuestra la estabilidad del sistema en condiciones de operación real. Esta estabilidad es crucial para aplicaciones que requieren precisión y consistencia en tiempo real, garantizando un rendimiento confiable incluso en entornos industriales exigentes.

Los niveles de voltaje se mantuvieron estables en 3.1 V, siendo suficientes para ser detectados correctamente por la FPGA. Cada una de las salidas se conectó a las entradas de la FPGA y, utilizando los LED integrados en la placa, se verificó el correcto funcionamiento del sistema a nivel de salida de voltaje. La Figura 11 muestra un ejemplo de esta prueba. En cuanto a la velocidad del circuito, se observó un tiempo de 6.47 ns en el borde de bajada (Figura 10a) y 6.31 ns en el borde de subida (Figura 10b). Una vez verificado el correcto funcionamiento del sistema y la estabilidad del voltaje de entrada, se realizarán pruebas de velocidad utilizando la FPGA Tang Nano 20K (Figura 11) para validar el rendimiento del sistema. Estas pruebas permitirán medir con precisión los tiempos de respuesta del circuito en condiciones operativas reales y confirmar su capacidad para registrar eventos en el rango de nanosegundos. Además, los resultados de estas pruebas proporcionarán una base sólida para el desarrollo de un sistema completo que integre tanto la recopilación como el procesamiento de datos, optimizado para aplicaciones de alta velocidad. Este análisis preliminar ofrece una visión clara de la estabilidad del sistema, resaltando la importancia de su precisión y capacidad de respuesta, aspectos fundamentales para futuras implementaciones más complejas. De este modo, se asegura que el sistema sea robusto y eficiente, preparado para enfrentar los desafíos de proyectos avanzados.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Pruebas de rendimiento.

El algoritmo implementado en Verilog se encarga de recibir la información del escáner y medir el tiempo de respuesta del circuito utilizando un contador que registra los ciclos de reloj entre los bordes de subida y bajada de una señal de entrada. Los valores del contador se almacenan en la memoria RAM de la FPGA y pueden ser visualizados a través de los LEDs de la placa. Este sistema permite medir tiempos de respuesta en el rango de nanosegundos.

Los resultados obtenidos con la FPGA Tang Nano 20K, configurada con un reloj de 100 MHz (10 ns por ciclo), confirmaron que la velocidad del circuito es inferior a 10 ns. Las mediciones con el osciloscopio promediaron tiempos de 6.47 y 6.31 ns, validando el rendimiento del sistema. En la Tabla 1, se presentan los resultados de cuatro iteraciones, donde se observan las mediciones obtenidas tanto por el osciloscopio como por la FPGA, demostrando la correspondencia entre ambas pruebas. Estos resultados refuerzan la precisión y fiabilidad del circuito implementado.

Tabla 1 Resultado de las pruebas de velocidad.

| Iteración | Tiempo de bajada (Osciloscopio) | Tiempo de subida (Osciloscopio) | Ciclos contados (FPGA) |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 1 | 6.47 ns | 6.31 ns | 1 ciclo |
| 2 | 6.70 ns | 6.45 ns | 1 ciclo |
| 3 | 6.50 ns | 6.39 ns | 1 ciclo |
| 4 | 6.44 ns | 6.28 ns | 1 ciclo |

Fuente: elaboración propia

La prueba de funcionamiento, en la que se estimó el volumen de objetos esféricos utilizando el método de discos, arrojó resultados satisfactorios, validando el funcionamiento a alta velocidad del circuito. Aunque el sistema demostró ser eficiente, se continuaron realizando ajustes al algoritmo para mejorar la precisión en la estimación del volumen, lo cual fue crucial para aplicaciones que demandan una alta exactitud en tiempo real.

4. Discusión

Los resultados del estudio evidencian que el dispositivo diseñado permite una detección precisa de objetos esféricos, con tiempos de respuesta promedio de

6.47 *ns* en el borde de bajada y 6.31 *ns* en el borde de subida. Este rendimiento, junto con el bajo costo del dispositivo, lo posiciona como una interfaz eficaz para aplicaciones que demandan alta precisión y velocidad de procesamiento. La utilización de una FPGA resulta una elección óptima debido a su capacidad intrínseca para gestionar datos a altas velocidades de manera eficiente.

En comparación con otros enfoques, como el sistema de clasificación de zanahorias basado en visión por computadora descrito por [Dimao, 2017], la solución aquí propuesta es más sencilla y económica. Aunque el sistema de Dimao es eficiente, su complejidad y costo aumentan debido a la integración de múltiples componentes, como sistemas de procesamiento de imágenes, transporte por rodillos y control. De manera similar, el sistema de clasificación de cítricos reportado por Nuño (2023) emplea cámaras de alta precisión y un carril móvil, lo cual, aunque garantiza un análisis detallado, también incrementa considerablemente los costos de instalación y procesamiento. En contraste, el dispositivo presentado en este estudio se distingue por su simplicidad y costo reducido, sin sacrificar precisión ni eficiencia. Estas características lo hacen especialmente adecuado para su implementación a gran escala en entornos comerciales, donde la relación costo-beneficio es un factor crítico.

5. Conclusiones

El sistema optomecatrónico desarrollado en este estudio demuestra una alta eficiencia en la captura de contornos de frutas en dos dimensiones, mejorando significativamente la precisión de la clasificación automática. Utilizando láseres semiconductores y fotodetectores comerciales económicos, el sistema es accesible y económicamente viable para diversas aplicaciones en la agroindustria. Además, su capacidad para formar contornos cerrados de las frutas facilita la entrada de datos a las herramientas de cómputo, optimizando y agilizando los procesos de clasificación en las líneas de producción. Los resultados indican que el sistema es adecuado para su integración en operaciones de postcosecha, proporcionando una solución práctica y efectiva para mejorar la calidad y consistencia en la clasificación de frutas. En resumen, aunque este estudio se centra en el desarrollo de la parte

electrónica, se espera lograr una tecnología completa capaz de clasificar productos vegetales de manera automática. La investigación presenta un avance significativo que podría aumentar la productividad dentro de la agroindustria al integrar la FPGA según se describe en este estudio.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chu, P., Lammers, K., Li, Z., Lu, R. Active Laser-Camera Scanning for High-Precision Fruit Localization in Robotic Harvesting: System Design and Calibration. *Horticulturae*, No. 10, 40, 2024.
- [2] Costa, A., Pinto, F., Braga, R., Motoike, S., Gracia, L. Relationship between biospeckle laser technique and firmness of *Acrocomia aculeata* fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, No. 21, 68–73, 2017.
- [3] Dimao, D., Zhongzhi, H. A Carrot Sorting System Using Machine Vision Technique. *Applied engineering in agriculture*, No. 2, 149-156, 2017.
- [4] Fernández, B. A. El láser, la luz de nuestro tiempo, Globalia, 2010.
- [5] Lockman, N., Hashim, N., Onwude, D. Laser-Based imaging for Cocoa pods maturity detection. *Food and Bioprocess Technology*, No.12, 1928–1937. 2019.
- [6] Makhsous, S., Mohammad, H., Mamishev, A. A Novel Mobile Structured Light System in Food 3D Reconstruction and Volume Estimation. *Sensors*, No. 3, 564, 2019.
- [7] Maschi, F., Korolija, D., Ionso, G. Serverless FPGA: Work-In-Progress. *Proceedings of the 1st Workshop on Serverless Systems, Applications and Methodologies*, 3-4,2024.
- [8] Minarni, S., Anjasmara, R., Nurmaya, S. Ripeness detection simulation of oil palm fruit bunches using laser-based imaging system. *AIP Conference Proceedings*, No. 1, 2017.
- [9] Moreda, G., Ortiz-Cañavate, J. Effect of orientation on the fruit on-line size determination performed by an optical ring sensor. *Journal of food engineering*, No. 81, 388-398, 2007.

- [10] Nuño, M., Dávila, I., Hernández, Y. Real-Time Embedded Vision System for Online Monitoring and Sorting of Citrus Fruits. *Electronics*, No. 12, 3891, 2023.
- [11] Rahman, A., Abd, R., Helmy, S. A laser reflection method to detect strawberry fruit defects. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, No. 2, 255-263, 2021.
- [12] Shi, J., Beling, A., Nishiyama, N. Special Issue on Advanced Ultra-High Speed Optoelectronic Devices. *Photonics*, No. 9, 312, 2022.
- [13] Taghinezhad, J., Alimardani, R., Soltani, M. Prediction of banana volume using capacitive sensing method. *Elixir Agriculture*, No. 46, 8418-8421, 2012.
- [14] Wu, A., Juanhua, Z., Ren, T. Detection of apple defect using laser-induced light backscatter imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*, No. 81, 106454, 2020.
- [15] Zhang, Y., Liu, C., & Liang, Z. In-field estimation of orange number and size by 3D laser scanning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105261. 2020.
- [16] Zhao, Y., Chenglong, L., Liang, Z. Recent research process on perovskite photodetectors: A review for photodetector—materials, physics, and applications. *Chinese Physics B*, No. 12, 127806, 2018.