

Implementación de un Detector de Frecuencia de Aleteo Basado en Luz Infrarroja y Mejoras en un Sistema Automatizado Para la Clasificación de Mosquitos

Normann Zichner¹, Dr. Diego H. Stalder², Dr. Christian Schaerer³

¹Alumno, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

²Orientador, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

³Orientador, Facultad Politécnica. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

Palabras clave:

- Mosquitos
- Wolbachia
- Clasificador
- Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT)
- Fotodiodo
- Automatización
- Mecanismo de succión
- Motor paso a paso
- Interfaz gráfica
- *Orange Pi*

Resumen

Este trabajo propone mejoras a un sistema mecatrónico clasificador de mosquitos por sexo, originalmente basado en la frecuencia de aleteo detectada por micrófono, un método sensible al ruido ambiental. Para lograr una clasificación más precisa e inmune a interferencias, se reemplaza el sensor de audio por un sistema óptico infrarrojo que mide la frecuencia de aleteo sin afectación por sonidos externos. Además, se abordaron otras limitaciones del prototipo anterior: se diseñó un nuevo sistema de succión más silencioso y compacto, se implementó una PCB para organizar el cableado y reducir interferencias, se automatizó la detección de entrada de mosquitos y se desarrolló una interfaz gráfica para facilitar su operación. Los resultados confirmaron que el sistema infrarrojo detecta con mayor claridad las frecuencias distintivas del aleteo de los mosquitos, validando la efectividad de las mejoras implementadas.

Keywords:

- Mosquitoes
- Wolbachia
- Classifier
- Short-Time Fourier Transform (STFT)
- Photodiode
- Automation
- Suction mechanism
- Stepper motor
- Graphical user interface (GUI)
- *Orange Pi*

Abstract

This work proposes improvements to a mechatronic mosquito sex-sorting system, originally based on wingbeat frequency detected by a microphone—a method sensitive to environmental noise. To achieve more precise and interference-immune classification, the audio sensor is replaced with an infrared optical system that measures wingbeat frequency without being affected by external sounds. Additionally, other limitations of the previous prototype were addressed: a new, quieter, and more compact suction system was designed; a PCB was implemented to organize wiring and reduce interference; the detection of mosquito entry was automated; and a graphical user interface was developed to facilitate operation. The results confirmed that the infrared system detects the distinctive wingbeat frequencies of mosquitoes with greater clarity, validating the effectiveness of the implemented improvements.

1. Introducción

Las enfermedades transmitidas por mosquitos representan uno de los mayores desafíos para la salud pública a nivel global. Entre las más destacadas se encuentran el dengue, el chikungunya, la malaria, el Zika y la fiebre amarilla, las cuales afectan a millones de personas cada año [1] [2] [3]. Estas enfermedades no solo causan un impacto significativo en la salud humana, sino que también generan una carga económica considerable debido a los costos asociados con el tratamiento, la prevención y la pérdida de productividad.

Una de las estrategias utilizadas para combatir las enfermedades transmitidas por mosquitos es el uso de mosquitos genéticamente modificados, diseñados para reducir las poblaciones de vectores o limitar su capacidad de transmitir patógenos. Estos mosquitos portan un gen letal que, al aparearse con hembras silvestres, impide la viabilidad de la descendencia, reduciendo gradualmente la población [4]. Otra estrategia utilizada es el uso de mosquitos infectados con la bacteria *Wolbachia*, que bloquea la transmisión de virus como el dengue y el Zika [5]. En ambos casos, es crucial separar los machos

de las hembras antes de su liberación, ya que los machos no pican a las personas ni a los animales y no representan un riesgo para la salud. La eficacia de estas técnicas depende en gran medida de la precisión en la separación de sexos.

La separación de mosquitos machos y hembras es un paso crítico en ambos métodos, ya que garantiza que sólo los individuos adecuados sean liberados en el medio ambiente. Tradicionalmente, esta separación se ha realizado manualmente, lo que resulta en un proceso laborioso, costoso y propenso a errores. Además, la identificación manual de los sexos requiere personal capacitado y puede ser un cuello de botella en la producción a gran escala de mosquitos para programas de control.

En este contexto fue realizado un trabajo final de grado previo en esta misma universidad, se diseñó y fabricó un sistema mecatrónico capaz de separar los mosquitos según su sexo mediante la detección de la frecuencia de aleteo con un micrófono [6]. Este enfoque se basó en la diferencia de frecuencias entre machos y hembras, ya que los primeros baten sus alas a una frecuencia mayor. Sin embargo, el sistema presenta limitaciones debido a la sensibilidad del micrófono al ruido ambiental, lo que afecta la precisión de la clasificación y genera resultados erróneos.

Por este motivo, en este trabajo final de grado se propone reemplazar el método de detección basado en sonido por uno basado en luz infrarroja para medir la frecuencia de aleteo de los mosquitos, ya que este método no se ve afectado por el ruido ambiental, lo que permitirá una clasificación más precisa y confiable. Un fotodiodo detectará los movimientos de las alas de los mosquitos al atravesar el haz de luz, lo que facilitará la identificación de su frecuencia de aleteo sin interferencias externas [7] [8].

Además de mejorar el método de detección, se abordarán otros problemas identificados en el sistema anterior. Actualmente, el sistema de succión genera un alto nivel de ruido sonoro y eléctrico, lo que puede afectar tanto la estabilidad del dispositivo como la detección de los mosquitos. También se ha identificado una falta de robustez y organización en el cableado, lo que dificulta el mantenimiento y puede comprometer el funcionamiento del sistema. Otro aspecto a mejorar es la automatización del proceso: en la versión actual, el operador debe notificar manualmente la entrada de un mosquito en la trampa, lo que reduce la eficiencia del sistema. Asimismo, el software de control se maneja a través de una línea de comandos, lo que dificulta su uso para operadores sin conocimientos técnicos avanzados. Para solucionar estos inconvenientes, se diseñará un

nuevo sistema de succión más compacto y silencioso, se implementará una placa de circuito impreso (PCB) que optimice el cableado, se automatizará la detección de los mosquitos y se desarrollará una interfaz gráfica intuitiva que facilite el monitoreo y control del sistema.

2. Objetivo General

Implementar mejoras en la electrónica, el software y el sistema mecánico del Sistema Clasificador de Mosquitos.

3. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema de clasificación de mosquitos basado en la detección de la frecuencia de aleteo mediante luz infrarroja.
- Diseñar y desarrollar una placa de circuito impreso (PCB) que optimice el cableado del sistema, mejorando su organización y confiabilidad.
- Reemplazar el sistema de succión por uno más compacto y con menor ruido sonoro y electrónico.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica intuitiva que permita controlar y monitorear el sistema de clasificación.
- Evaluar la funcionalidad de los sistemas implementados mediante pruebas experimentales y análisis de resultados.

4. Marco Teórico

La clasificación manual de mosquitos en laboratorio, aunque esencial para estudios entomológicos, es lenta, propensa a errores y estresante para los insectos, limitando la productividad y la escalabilidad de los programas de control vectorial [9] [10] [11]. La automatización surge como una solución para procesar grandes volúmenes de muestras con alta precisión y reproducibilidad [12], utilizando sensores ópticos [8] [13] y acústicos [14] [15] [16], que permiten discriminar sexo y especie con la frecuencia de aleteo, o cámaras mediante diferencias morfológicas [17] [18] [19] [20], alcanzando altos niveles de precisión.

Los sistemas automatizados integran principios mecatrónicos, incluyendo sensado óptico [8] [7] [21] [22] y acústico [23] [24] [25], actuadores precisos, control de flujo de succión y protocolos de comunicación eficientes, combinados con procesamiento de señales y algoritmos de clasificación [26] [27], como se puede ver en la figura 1. A pesar de los avances, la mayoría de las tecnologías existentes están diseñadas para uso en campo y presentan limitaciones

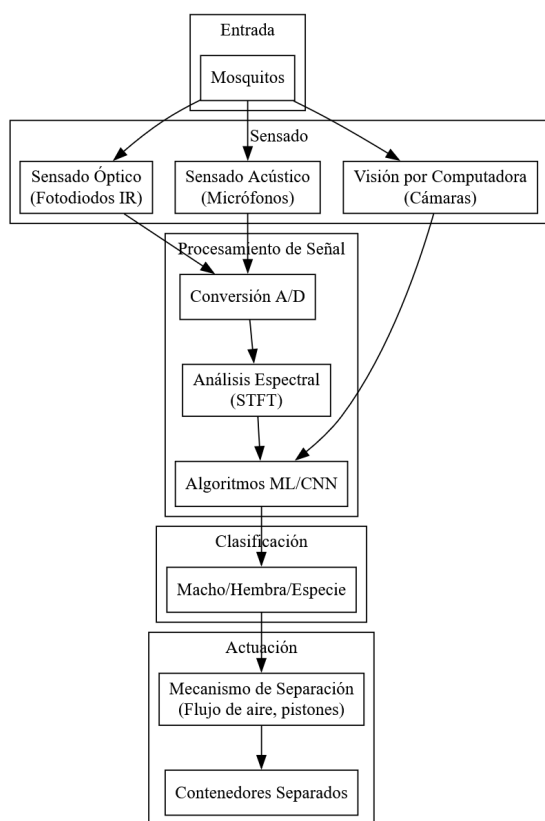


Figura 1: Proceso típico de clasificación de mosquitos.

en entornos de laboratorio, evidenciando un vacío tecnológico en sistemas que permitan captura, procesamiento y clasificación en tiempo real con alta exactitud y robustez [28] [29] [30] [31] [32] [33].

5. Arquitectura Funcional Previa

El prototipo anterior constituía un sistema mecánico integrado por cuatro subsistemas principales que operaban de manera coordinada:

- **Sensado de frecuencia:** Implementado mediante captura de audio con el micrófono Saramonic SR-ULM10L, con procesamiento STFT en Python para el análisis espectral de las señales acústicas generadas por el aleteo de los mosquitos.
- **Mecanismo de succión:** Turbina de vacío (soplador de hojas comercial) activada por un relé con salidas de succión y soplado por dos tubos conectados a un selector de flujo controlado por un servomotor. Control de velocidad manual.
- **Sistema de posicionamiento:** Motor paso a paso 28BYJ-48 con controlador ULN2003, operando en lazo abierto sin retroalimentación de posición para orientar la cámara móvil hacia las diferentes estaciones de trabajo.

ción para orientar la cámara móvil hacia las diferentes estaciones de trabajo.

- **Procesamiento:** Raspberry Pi 4 con sistema operativo Raspbian, ejecutando programas de supervisión y control del sistema desde la terminal.

5.1. Limitaciones Detectadas

El análisis exhaustivo del prototipo anterior reveló limitaciones críticas que impactaban directamente en su confiabilidad y precisión operativa:

- **Ruido electrónico y acústico:** El sistema de succión tiene un nivel de ruido acústico muy elevado para un ambiente de laboratorio (supera los 90dB) y además consume una cantidad elevada de corriente que genera bajadas de tensión al encenderse e interferencias constantes en la red eléctrica capaces de dañar circuitos sensibles. Además, el cableado general poco robusto aporta al ruido electrónico.
- **Baja precisión en la detección de aleteo:** El sistema de detección basado en sonido requiere un entorno bastante silencioso para tener una relación señal ruido capaz de diferenciar con precisión las señales generadas por los mosquitos.
- **Problemas mecánicos:** Torque insuficiente del motor 28BYJ-48 (3.43 N.cm) que impide el posicionamiento confiable bajo cargas variables, combinado con fricción excesiva en el mecanismo de deslizamiento angular que genera un error acumulativo y la falta de un final de carrera que impide conocer la posición automáticamente al iniciar el sistema.
- **Falta de detección automática de entrada de mosquitos:** No hay un sistema que detecte cuando o cuantos mosquitos ingresan al clasificador. La detección de mosquitos depende completamente de la observación visual del operario, quien debe presionar un botón por cada insecto detectado. Dado que el sistema de succión los absorbe a alta velocidad, es frecuente que pasen desapercibidos, generando subconteo significativo.
- **Control desde línea de comandos:** La operación del sistema requiere ingresar instrucciones manualmente en la terminal, sin interfaz gráfica. Esto limita la usabilidad para usuarios no técnicos y ralentiza el flujo de trabajo en escenarios que demandan interacción rápida o repetitiva.

6. Selección de Componentes

6.1. Procesador Principal

Se optó por el Orange Pi 3B como unidad de procesamiento principal en reemplazo del Raspberry Pi 4. Ambas plataformas ofrecen capacidades de hardware comparables, pero el Orange Pi presenta ventajas significativas en accesibilidad de costo y disponibilidad inmediata, al no verse afectado por la escasez global y prácticas de reventa que han elevado sustancialmente el precio del Raspberry Pi. Como contraparte, esta elección implica desarrollar adaptaciones de software para compensar el menor soporte nativo en el ecosistema Orange Pi.

6.2. Sensores y Actuadores

La Tabla 1 resume los principales sensores y actuadores seleccionados para el sistema:

Tabla 1: Sensores y actuadores principales del sistema

Componente	Función		Especificaciones clave
OPT101	Sensado infrarrojo	in-de frecuencia	Fotodiodo amplificado, respuesta máxima a 850nm
ADS1256	Adquisición de datos		ADC 24 bits, 8 canales, hasta 30 kSPS, SPI
AS5600	Retroalimentación de posición		Encoder magnético, 12 bits, I2C
Nema 17 + A4988	Posicionamiento angular		Motor paso a paso, 14 N.cm
ESC bidireccional + BLDC	Control de succión		PWM 50 Hz, bidireccional, hasta 30A y 130000 rpm

Se mantienen la cámara y el micrófono USB previos para documentación visual de los experimentos y captura de audio como método complementario de medición de frecuencia.

6.3. Sistema de Interfaz

Componentes para la interacción usuario-máquina:

- **Pantalla táctil MPI3508:** Display HDMI de 3.5 pulgadas con resolución de 480×320 píxeles y control táctil resistivo por SPI

6.4. Sistema Energético

El sistema de alimentación fue diseñado para proveer energía estable y confiable a todos los componentes:

- **Baterías:** Dos baterías Li-ion de 3.7V y 4000mAh conectadas en serie (7.4V) para alimentar el ESC
- **PCB de distribución:** Diseño personalizado para alimentar sensores, actuadores y componentes electrónicos
- **Fuente de 12V:** Fuente de 12V y 3A para alimentar el PCB de distribución
- **Fuente de 5V:** Fuente de 5V y 3A para alimentar el Orange Pi 3B. Solamente la pantalla táctil se alimenta desde el Orange Pi

7. Diseño Mecatrónico

7.1. Sistema de Succión

El sistema de succión fue completamente rediseñado para cumplir con los requerimientos de flujo bidireccional y bajo nivel de ruido. En la figura 2 se puede ver el funcionamiento del sistema.

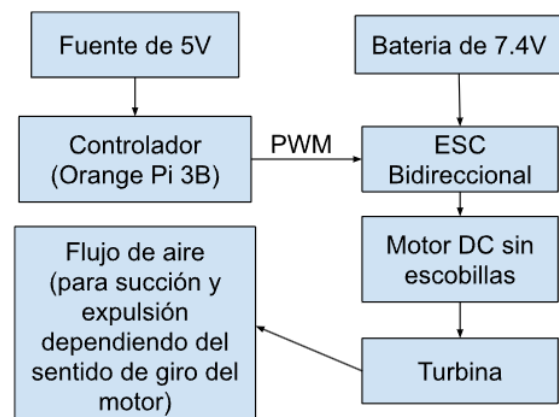


Figura 2: Diagrama del sistema de succión y expulsión.

7.2. Sistema de Posicionamiento

El sistema de posicionamiento fue mejorado significativamente mediante el reemplazo del motor paso a paso anterior por un Nema 17 17HS4023, que proporciona un torque sustancialmente mayor (14 N.cm vs 3.43 N.cm) y la adición del encoder AS5600 para retroalimentación de posición absoluta.

7.3. Módulo de Entrada

El módulo de entrada fue rediseñado para incluir dos pares independientes de LED-fotodiodo infrarrojo,

permitiendo no solo la detección del paso de mosquitos sino también la determinación de la dirección de movimiento. Se utilizó un circuito amplificador basado en transistor NPN que proporciona una ganancia de transimpedancia de aproximadamente $1000\times$ a la señal del fotodiodo.

7.4. Sensado Infrarrojo

El sistema de sensado infrarrojo utiliza el sensor OPT101, en la configuración en que su fotodiodo interno tiene una ganancia de transimpedancia de $10^6 V/A$ y una matriz de LEDs infrarrojos de 850 nm. Como se muestra en la Figura 3, el montaje se realiza dentro de la cámara móvil, permitiendo la medición directa de las variaciones de sombra y reflectancia durante el aleteo de los mosquitos.



Figura 3: Montaje del OPT101 y LEDs IR en la cámara móvil.

7.5. Adquisición de Datos

El subsistema de adquisición implementa el convertor analógico-digital ADS1256 configurado en dos modos operativos según el sensor:

- 2 kSPS con el módulo de entrada, lectura de la salida de ambos fotodiodos en modo diferencial. Código de adquisición implementado en Python.
- 3.75 kSPS con el OPT101, frecuencia que supera el criterio de Nyquist para las frecuencias de aleteo de mosquitos, que pueden llegar hasta los 1 kHz. Código de adquisición implementado en C porque la velocidad de ejecución en python fue insuficiente.

7.6. PCB de Alimentación

La placa de circuito impreso (PCB) de alimentación integra conversión DC-DC de 12V a 5V y distribución de energía para todos los sensores y actuadores del sistema. El controlador A4988 para posicionamiento está integrado en este diseño.

8. Software y Control

8.1. Arquitectura de Software

La arquitectura de software implementa un sistema multiproceso que separa la interfaz gráfica del control de hardware. Esta separación garantiza que la interfaz permanezca responsiva incluso durante operaciones intensivas de adquisición y procesamiento. El código está disponible en github [34].

8.2. Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica, desarrollada en Kivy, se organiza en cuatro páginas que facilitan la operación del sistema. Las cuatro páginas de la interfaz son:

- **Página Principal:** Control operativo, monitoreo y visualización de resultados
- **Página de Cámara:** Captura y gestión de imágenes y video
- **Página de Configuración:** Ajuste de parámetros del sistema
- **Página de Mediciones:** Visualización y gestión de datos almacenados

8.3. Modos de Operación

El sistema soporta dos modos de operación principales:

- **Modo manual:** Permite el control individual de cada componente del sistema, ideal para calibración y diagnóstico
- **Modo automático:** Ejecuta el ciclo completo de clasificación: detección → medición → registro → captura de imagen → liberación

9. Resultados

9.1. Sistema de succión

Para comparar los sistemas nuevo y viejo se realizaron mediciones de flujo de aire y nivel de sonido en sus rangos completos de velocidad, tanto para la succión como para la expulsión de aire. Las mediciones se hicieron conectando el analizador de flujo directamente a la cápsula móvil. En las mediciones de la succión, figura 5a, el sistema nuevo tiene un ruido sonoro

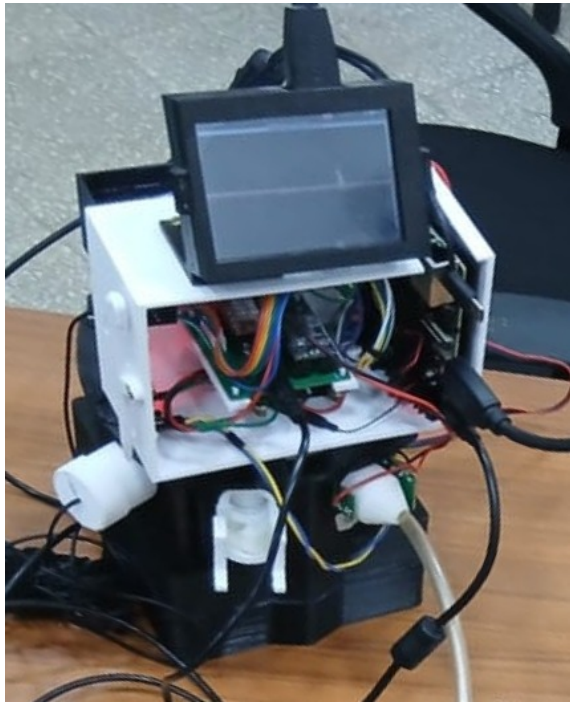


Figura 4: Sistema completamente integrado y ensamblado.

alrededor de 10 dB menos para mismos niveles de flujo y un rango de flujo más amplio. En las mediciones de la expulsión, figura 5b, ambos sistemas tienen un nivel sonoro prácticamente igual para flujos iguales, el sistema viejo puede llegar a flujos más elevados que el sistema nuevo no alcanza mientras que el sistema nuevo es capaz de lograr flujos más pequeños que el sistema viejo no puede.

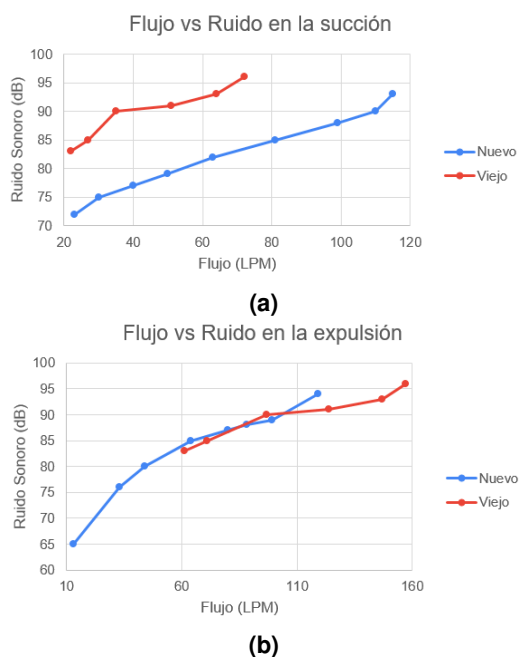


Figura 5: (a) Succión. (b) Expulsión.

9.2. Detección de entrada de mosquitos

La figura 6 muestra la entrada de 9 mosquitos al sistema con el algoritmo de detección de entrada detectando los mosquitos correctamente. Se pueden ver en la señal además varias caídas de una sola muestra, esto ocurre debido a que la lectura no es en tiempo real y a veces no se terminaron de leer todos los bits antes de que el estado del pin DRDY del ADS1256 cambie. En general el algoritmo no detecta esto como entrada de mosquitos, pero si el Orange Pi está siendo muy sobrecargado estos errores son más frecuentes y si hay muchos de seguido pueden causar una detección falsa.

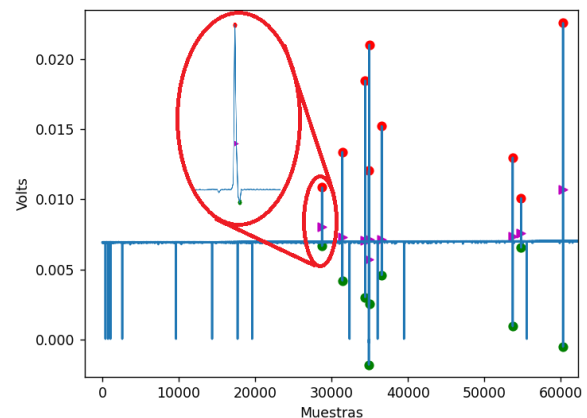


Figura 6: Detección de entrada de mosquitos.

9.3. Detección de frecuencia de aleteo

En la figura 7 se puede ver una medición con el nuevo sistema de detección de frecuencia de aleteo en la que se detectan mosquitos hembras y machos. La señal de los mosquitos machos se puede ver entre 600 y 900 Hz, y la señal de los mosquitos hembra entre 400 y 650 Hz. También se puede ver el segundo armónico de la señal de las hembras.

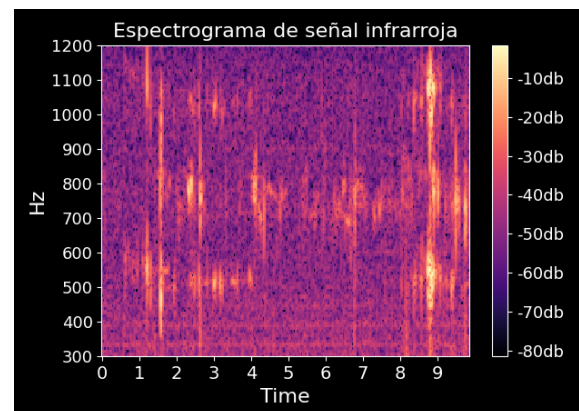
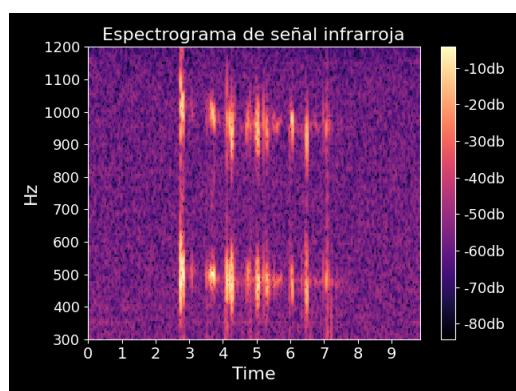
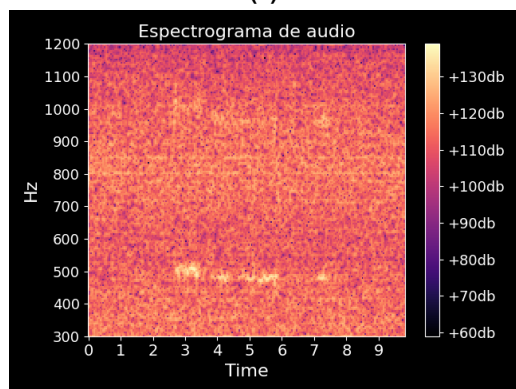


Figura 7: Detección de frecuencia de aleteo de mosquitos con infrarrojo.

En las figuras 8 y 9 se puede ver los resultados de medir la frecuencia de aleteo utilizando audio e infrarrojo simultáneamente. En la figura 8 que se tomó con poco ruido sonoro externo se puede ver que ambas mediciones logran captar las mismas señales generadas por mosquitos hembra, aunque la relación señal ruido del método por infrarrojos es mayor. La medición de la figura 9 coincidió con el aullido de un perro, el efecto del ruido no deseado se ve claramente en la medición con audio, y aunque se puede distinguir aún la señal de los mosquitos hembra, detectarlo de forma automática se vuelve más difícil. La medición con infrarrojos no fue afectada.



(a)



(b)

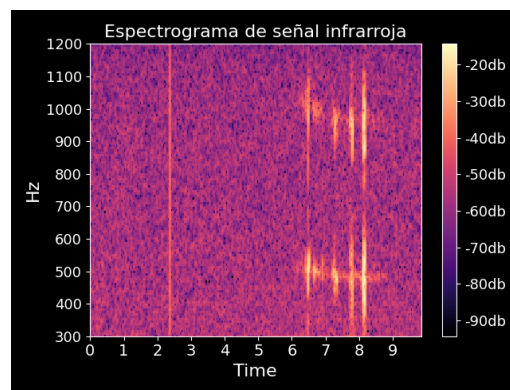
Figura 8: (a) Señal infrarroja. (b) Señal de audio.

10. Conclusión

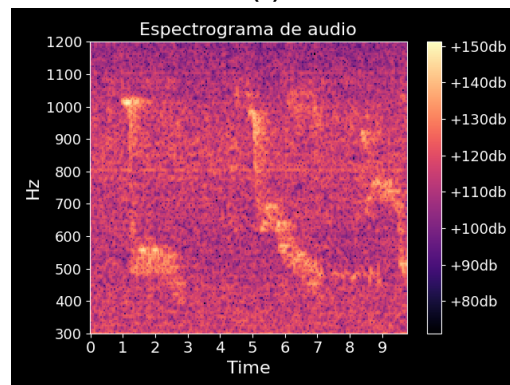
Se logró diseñar e implementar el detector de frecuencia de aleteo basado en luz infrarroja, detectar la frecuencia de aleteo de mosquitos y verificar que coincide con las frecuencias de aleteo detectadas con sonido.

También se logró diseñar e implementar exitosamente un sistema que detecte automáticamente la entrada de mosquitos al clasificador.

En el ámbito electrónico, se desarrolló e implementó una placa de circuito impreso (PCB) personalizada que gestione la alimentación de los distintos



(a)



(b)

Figura 9: (a) Señal infrarroja. (b) Señal de audio.

componentes del sistema, optimizando significativamente la organización del cableado, reduciendo interferencias electromagnéticas y facilitando el mantenimiento del sistema.

En cuanto al sistema mecánico, se reemplazó exitosamente el mecanismo de succión y expulsión anterior por un diseño más compacto, con capacidad de ajuste automático de potencia, que cumplió con los criterios de reducción de ruido sonoro y eléctrico, mejorando las condiciones de operación del equipo. Además se logró modificar el sistema de posicionamiento basado en un motor paso a paso para que sea más consistente y exacto.

Se diseñó e implementó una interfaz gráfica de usuario intuitiva que permite el control y monitoreo integral del sistema de clasificación, proporcionando visualización de resultados, historial de clasificaciones y herramientas para la configuración del equipo.

Las principales limitaciones del sistema son que el ADC no se lee en tiempo real, que la superficie interna de la cámara móvil es muy rugosa, lo que facilita que los mosquitos se sujeten a ella y no vuelen, y que el sistema de entrada no puede asegurar que entre solo un mosquito a la vez.

Referencias

- [1] A. Roth, A. Mercier, C. Lepers, D. Hoy, S. Duituturaga, E. Benyon, L. Guillaumot, and Y. Souares, "Concurrent outbreaks of dengue, chikungunya and zika virus infections - an unprecedented epidemic wave of mosquito-borne viruses in the pacific 2012-2014," *Euro Surveill*, vol. 19, no. 41, p. 20929, 2014.
- [2] J. Patterson, M. Sammon, and M. Garg, "Dengue, zika and chikungunya: Emerging arboviruses in the new world," *West J Emerg Med*, vol. 17, no. 6, pp. 671–679, 2016.
- [3] S. V. Mayer, R. B. Tesh, and N. Vasilakis, "The emergence of arthropod-borne viral diseases: A global prospective on dengue, chikungunya and zika fevers," *Acta Trop*, vol. 166, pp. 155–163, 2017.
- [4] M. W. de Valdez, D. Nimmo, J. Betz, H. Gong, A. James, L. Alphey, and W. Black, "Genetic elimination of dengue vector mosquitoes," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, no. 12, pp. 4772–4775, 2011.
- [5] A. A. e. a. Hoffmann, "Introduction of aedes aegypti mosquitoes carrying w albb wolbachia sharply decreases dengue incidence in disease hotspots," *iScience*, vol. 27, no. 2, p. 108942, 2024.
- [6] H. T. Hongo Kudo, "Diseño e implementación de un sistema mecatrónico de clasificación de mosquitos," 2025.
- [7] J. Wang, S. Zhu, Y. Lin, S. Svanberg, and G. Zhao, "Mosquito counting system based on optical sensing," *Applied Physics B*, vol. 126, pp. 1–10, 2020.
- [8] M. I. González-Pérez, B. Faulhaber, M. Williams, J. Brosa, C. Aranda, N. Pujol, M. Verdún, P. Villalonga, J. Encarnação, N. Busquets, and S. Talavera, "A novel optical sensor system for the automatic classification of mosquitoes by genus and sex with high levels of accuracy," *Parasites & Vectors*, vol. 15, no. 1, p. 190, Jun 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s13071-022-05324-5>
- [9] P. Papathanos, K. Bourtzis, F. Tripet, H. Bossin, J. F. Virgínio, M. Capurro, M. C. Pedrosa, A. Guindo, L. Sylla, M. Coulibaly, F. Yao, P. S. Epopa, and A. Diabaté, "A perspective on the need and current status of efficient sex separation methods for mosquito genetic control," *Parasites & Vectors*, vol. 11, 2018.
- [10] M. Zacarés, G. Salvador-Herranz, D. Almenar, C. Tur, R. Argilés, K. Bourtzis, H. Bossin, and I. Plá, "Exploring the potential of computer vision analysis of pupae size dimorphism for adaptive sex sorting systems of various vector mosquito species," *Parasites & Vectors*, vol. 11, 2018.
- [11] W. Mamai, O. Bueno-Masso, T. Wallner, S. A. Nikiéma, S. Meletiou, L. Deng, F. Balestrino, H. Yamada, and J. Bouyer, "Efficiency assessment of a novel automatic mosquito pupae sex separation system in support of area-wide male-based release strategies," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [12] J.-T. Gong, W. Mamai, X. Wang, J. Zhu, Y. Li, J. Liu, Q. Tang, Y. Huang, J. Zhang, J. Zhou, H. Maiga, N. S. B. Somda, C. Martina, S. S. Kotla, T. Wallner, J. Bouyer, and Z. Xi, "Upscaling the production of sterile male mosquitoes with an automated pupa sex sorter," *Science Robotics*, vol. 9, 2024.
- [13] A. P. Genoud, Y. Gao, G. M. Williams, and B. P. Thomas, "A comparison of supervised machine learning algorithms for mosquito identification from backscattered optical signals," *Ecol. Informatics*, vol. 58, p. 101090, 2020.
- [14] M. P. Su, M. Georgiades, J. Bagi, K. Kyrou, A. Crisanti, and J. T. Albert, "Assessing the acoustic behaviour of anopheles gambiae (s.l.) dsxf mutants: implications for vector control," *Parasites & Vectors*, vol. 13, 2020.
- [15] B. Warren, G. Gibson, and I. Russell, "Sex recognition through midflight mating duets in culex mosquitoes is mediated by acoustic distortion," *Current Biology*, vol. 19, pp. 485–491, 2009.
- [16] G. Gibson and I. Russell, "Flying in tune: Sexual recognition in mosquitoes," *Current Biology*, vol. 16, pp. 1311–1316, 2006.
- [17] D. Li, S. Hegde, A. S. Kumar, A. A. Zacharias, P. Mehta, V. Mukthineni, S. Srimath, S. Patel, M. Suin, R. Chellappa, and S. Acharya, "Towards transforming malaria vector surveillance using vectorbrain: a novel convolutional neural network for mosquito species, sex, and abdomen status identifications," *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [18] V. Kittichai, T. Pengsakul, K. Chumchuen, Y. Samung, P. Sriwichai, N. Phatthamolrat, T. Tongloy, K. Jaksukam, S. Chuwongin, and S. Boonsang, "Deep learning approaches for challenging species and gender identification of mosquito vectors," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021.
- [19] J. Couret, D. C. Moreira, D. Bernier, A. M. Loberiti, E. Dotson, and M. A. Alvarez, "Delimiting cryptic morphological variation among human malaria vector species using convolutional neural

- networks,” *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 14, 2020.
- [20] V. Kittichai, M. Kaewthamasorn, T. Chaiphongpachara, S. Laojun, T. Saiwichai, K. M. Naing, T. Tongloy, S. Boonsang, and S. Chuwongin, “Enhance fashion classification of mosquito vector species via self-supervised vision transformer,” *Scientific Reports*, vol. 14, 2024.
- [21] D. Kim, T. J. Debriere, S. Cherukumalli, G. S. White, and N. Burkett-Cadena, “Infrared light sensors permit rapid recording of wingbeat frequency and bioacoustic species identification of mosquitoes,” *Scientific Reports*, vol. 11, 2021.
- [22] F. C. B. F. P. Njaime, R. Máspero, A. Leandro, and R. M. de Freitas, “Automated classification of mixed populations of *aedes aegypti* and *culex quinquefasciatus* mosquitoes under field conditions,” *Parasites & Vectors*, vol. 17, 2024.
- [23] S. Ntalampiras, “Automatic acoustic classification of insect species based on directed acyclic graphs,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 145 6, p. EL541, 2019.
- [24] M. S. Fernandes, W. Cordeiro, and M. R. Mendoza, “Detecting *aedes aegypti* mosquitoes through audio classification with convolutional neural networks,” *Computers in biology and medicine*, vol. 129, p. 104152, 2020.
- [25] X. Wei, M. Z. Hossain, and K. A. Ahmed, “A resnet attention model for classifying mosquitoes from wing-beating sounds,” *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [26] D. Brandt, M. Tschaikner, T. Chiaburu, H. Schmidt, I. Schrimpf, A. Stadel, I. E. Beckers, and F. Haußer, “Low cost machine vision for insect classification,” *Intelligent Systems and Applications*, pp. 18–34, 2024.
- [27] Y. Peng and Y. Wang, “Cnn and transformer framework for insect pest classification,” *Ecol. Informatics*, vol. 72, p. 101846, 2022.
- [28] T. Kasinathan, D. Singaraju, and S. R. Uyyala, “Insect classification and detection in field crops using modern machine learning techniques,” *Information Processing in Agriculture*, 2020.
- [29] D. C. Amarathunga, J. Grundy, H. R. Parry, and A. Dorin, “Methods of insect image capture and classification: A systematic literature review,” *Smart Agricultural Technology*, 2021.
- [30] A. Teixeira, J. Ribeiro, R. Morais, J. Sousa, and A. Cunha, “A systematic review on automatic insect detection using deep learning,” *Agriculture*, 2023.
- [31] M. C. F. Lima, M. E. D. de Almeida Leandro, C. Valero, L. C. P. Coronel, and C. O. G. Bazzo, “Automatic detection and monitoring of insect pests—a review,” *Agriculture*, 2020.
- [32] C. Kirkeby, K. Rydhmer, S. M. Cook, A. Strand, M. T. Torrance, J. Swain, J. Prangmsma, A. Johnen, M. K. Jensen, M. Brydegaard, and K. Græsboell, “Advances in automatic identification of flying insects using optical sensors and machine learning,” *Scientific Reports*, vol. 11, 2021.
- [33] A. B. Lakyiere, R.-M. O. G. Mensah, N. Y. Agbenor-Efunam, E. Yamba, and K. Badu, “Trends and advances in image-based mosquito identification and classification using machine learning models: A systematic review,” *Computers in biology and medicine*, vol. 193, p. 110373, 2025.
- [34] N. Zichner, “Trabajo-final-de-grado,” <https://github.com/NormannZ/Trabajo-final-de-grado/tree/main>, 2025.