

Diseño de un sistema IoT para polinización inteligente en invernaderos de Tomate

¹Ulises Bañuelos Amezcua, ²Juan José Venegas Moreno, ³Moisés Rodríguez Morales, ⁴José de Jesús Hernández Martínez, ⁵Ramiro Rodríguez Mendoza
Tecnológico Nacional de México / ITJMMPYH ^{1,2,3,4,5}

Resumen - Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación de un sistema automático de polinización por vibración basado en arquitectura IoT, desarrollado para invernaderos de tomate en el sur de Jalisco. El sistema, controlado por un microcontrolador ESP32 y sensores DHT22, activa un mecanismo de vibración tipo biela-manivela únicamente cuando se cumplen condiciones ambientales óptimas (25 – 29 °C de temperatura y 75 – 80% de humedad relativa), maximizando la viabilidad del polen. Se construyó un prototipo de bajo costo e instalación sencilla, cuya operación fue supervisada remotamente mediante la plataforma ThingsBoard. Las pruebas de campo, realizadas durante dos meses en dos invernaderos de 135 m², demostraron un incremento significativo en el porcentaje de cuajado de flores en el cultivo con polinización automática (90.3 % ±4.8) en comparación con el grupo de control con polinización manual (57.1 % ±6.3), con una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.001$), validando así la efectividad y exactitud del sistema propuesto bajo condiciones ambientales controladas.

Índice de Términos – Polinización asistida, Invernaderos de tomate, Vibración mecánica, Agricultura de precisión, IoT agrícola, Sensado ambiental, Automatización agroindustrial.

Abstract - This study presents the design, implementation, and validation of an automatic vibration-based pollination system with an IoT architecture, developed for tomato greenhouses in southern Jalisco. Controlled by an ESP32 microcontroller and DHT22 sensors, the system activates a crank-slider vibration mechanism only under optimal environmental conditions (25 – 29 °C temperature and 75 – 80% relative humidity), maximizing pollen viability. A low-cost, easily deployable prototype was built and remotely monitored using the ThingsBoard platform. Field tests conducted over two months in two 135 m² greenhouses demonstrated a significant increase in flower fruit set in the automated system (90.3% ±4.8) compared to the control group with manual pollination (57.1% ±6.3), with the difference being statistically significant ($p < 0.001$), confirming the accuracy and effectiveness of the proposed system under controlled environmental conditions.

Keywords – Assisted pollination, Tomato greenhouses, Mechanical vibration, Precision agriculture, Agricultural IoT, Environmental sensing, Agro-industrial automation.

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una hortaliza clave en la economía mundial [8]. En México, su cultivo intensivo bajo invernadero permite un estricto control ambiental [20]. No obstante, al ser espacios cerrados, los invernaderos limitan el acceso de polinizadores naturales, lo que representa un desafío significativo para lograr una fecundación eficiente [31].

Las colmenas comerciales de abejorros (*Bombus spp.*), aunque efectivas para mejorar el cuajado de frutos en cultivos protegidos [14], representan un costo significativo para los productores. Cada colmena tiene una vida útil limitada de entre 8 y 12 semanas [15] y su precio en México puede oscilar entre \$2,000 y \$2,800 MXN por unidad, dependiendo de la temporada y del proveedor [26]. A esto se suma la necesidad de mantener condiciones ambientales específicas dentro del invernadero para su supervivencia [25].

Además, su uso impone restricciones en el manejo fitosanitario, ya que muchos pesticidas y fungicidas de amplio espectro son letales para los polinizadores [17]. Esto obliga a los productores a emplear productos selectivos, menos agresivos y generalmente más costosos [31], así como a programar aplicaciones fuera del horario de actividad de los abejorros [11], lo cual incrementa la complejidad operativa y el costo de producción.

En este contexto, y ante la creciente disminución de poblaciones de abejorros a nivel global debido al cambio climático, enfermedades y pérdida de hábitat [9], [6], resulta indispensable el desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles, como sistemas de polinización automática que no dependan de agentes biológicos y que

puedan operar en sincronía con el control ambiental del invernadero [5].

A. Sistemas de polinización por vibración en invernaderos de Tomate

La polinización por vibración, también conocida como buzz pollination, es un mecanismo natural en el que el polen es liberado únicamente cuando las anteras poricidas de ciertas flores, como las del tomate, son agitadas a frecuencias específicas [3], [2]. En condiciones de cultivo protegido, donde los polinizadores naturales como los abejorros pueden estar ausentes, esta necesidad ha impulsado el desarrollo de tecnologías de polinización asistida basadas en vibración mecánica [4].

Uno de los métodos más utilizados en pequeña y mediana escala es el uso de vibradores eléctricos manuales. Estos dispositivos portátiles permiten al operario aplicar vibraciones directamente al pedicelo floral durante la floración [18]. Diversos estudios reportan que este método incrementa significativamente el número de frutos cuajados cuando se aplica de forma diaria [19], aunque implica un alto costo en mano de obra y tiempo [27].

En la región sur de Jalisco, los productores de tomate a gran escala recurren comúnmente a técnicas manuales rudimentarias para inducir la polinización. Estas consisten en golpear o sacudir los hilos de entutorado (tutores) que sostienen las plantas, con el fin de simular las vibraciones necesarias para liberar el polen de las flores. Esta práctica fue documentada mediante observación directa durante el trabajo de campo realizado en invernaderos locales en el marco del presente proyecto. Aunque puede lograr resultados aceptables en pequeñas áreas, su eficiencia disminuye considerablemente en superficies mayores, ya que demanda un número elevado de trabajadores y largas jornadas para cubrir todo el invernadero. Estudios previos han señalado que los métodos manuales tienden a presentar baja escalabilidad, mayor variabilidad en la polinización y costos operativos más elevados debido a la fuerte dependencia del factor humano [16].

En respuesta a estas limitaciones, han surgido sistemas automatizados como el ShaQer, un dispositivo que induce vibraciones a través de los hilos de entutorado del cultivo. Este sistema permite cubrir grandes áreas con un solo operador, reduciendo hasta un 75 % el tiempo necesario en comparación con métodos manuales. Además, su funcionamiento puede ser programado para coincidir con las horas de máxima viabilidad del polen [23].

Sin embargo, estos sistemas no están exentos de desafíos. Su instalación requiere una infraestructura de entutorado adecuada, compatible con la transmisión efectiva de vibraciones. En algunos casos, la eficiencia de la polinización puede verse reducida si las vibraciones no alcanzan con suficiente intensidad a todos los racimos florales [10]. Aunque el costo operativo es bajo, la inversión inicial en equipos puede ser elevada para pequeños productores, y el mantenimiento técnico especializado representa una barrera adicional en regiones con recursos limitados [24].

Avances recientes en robótica y visión por computadora han permitido el desarrollo de robots autónomos para polinización de precisión. Tal es el caso de Stickbug, un robot hexápodo inspirado en insectos, que utiliza cámaras y redes neuronales para detectar flores listas para ser polinizadas. El sistema aplica una vibración precisa en la base de la flor mediante actuadores eléctricos. Durante pruebas de laboratorio, alcanzó una tasa de cuajado del 50 % con más de 1.5 polinizaciones por minuto, acercándose a la eficiencia observada en abejorros [1].

No obstante, estos sistemas enfrentan desafíos considerables para su implementación en entornos agrícolas reales. Su complejidad técnica implica costos elevados tanto en adquisición como en mantenimiento. Además, requieren superficies planas y bien organizadas para su desplazamiento, lo que puede no estar disponible en todos los invernaderos [21]. La necesidad de calibración frecuente, alimentación eléctrica constante y conectividad robusta también limita su uso en zonas rurales con infraestructura deficiente [29]. Aunque prometedores, estos sistemas aún se encuentran en etapas experimentales, y su eficiencia no ha sido validada a gran escala ni en condiciones variables de campo [29].

También se están explorando métodos híbridos que combinan la vibración mecánica con corrientes de aire dirigidas, con el objetivo de mejorar la dispersión del polen y minimizar el daño mecánico a las flores. Un estudio de la Universidad de Wageningen destaca que estos sistemas híbridos permiten una mayor cobertura floral con menor intervención humana, lo que los posiciona como una opción prometedora para cultivos altamente tecnificados y de alta densidad [22], [28].

No obstante, su implementación presenta desafíos técnicos importantes. La calibración precisa del flujo de aire y la frecuencia de vibración es crucial para evitar pérdidas de polen o daño a estructuras florales sensibles. Además, estos sistemas suelen requerir un diseño específico del invernadero y un sistema de control ambiental más complejo, lo que incrementa su costo de

instalación y mantenimiento [13], [7]. Su adopción se ve limitada principalmente a unidades de producción de alta inversión con infraestructura avanzada [30].

A pesar de los avances en polinización asistida, muchos de los sistemas existentes siguen siendo poco accesibles para los productores del sur de Jalisco, debido a su alto costo, complejidad técnica y requerimientos de infraestructura especializada, lo que limita su adopción en entornos agrícolas tradicionales. En consecuencia, se hace necesaria una solución eficiente, económica y adaptada a las condiciones reales de los invernaderos regionales, que además contemple desde su diseño la compatibilidad con fuentes de energía renovable como sistemas fotovoltaicos, permitiendo así su futura operación autónoma, sostenible y acorde con los principios de eficiencia energética y sustentabilidad ambiental [13], [30].

En este contexto, el Tecnológico Nacional de México (TecNM) y el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez (ITJMMPyH), a través de su Cuerpo Académico “Centro de Investigación en Tecnología Electromecánica Aplicada” (CITEA), asumen un papel estratégico como desarrolladores y evaluadores continuos del sistema. La participación institucional garantiza el seguimiento, la mejora y la transferencia tecnológica hacia los sectores productivos, consolidando un puente efectivo entre la investigación académica y la innovación agrícola aplicada [12].

Este proyecto responde a estas necesidades mediante el diseño de un sistema automático de polinización por vibración, activado en función de variables ambientales monitoreadas en tiempo real mediante una arquitectura IoT, con potencial de evolución hacia soluciones energéticamente limpias [32], [6].

II. DESARROLLO

A. Caracterización del proceso de polinización regional

En la región sur de Jalisco, la polinización en cultivos de Tomate bajo invernadero se realiza mayormente de forma manual mediante métodos rudimentarios, debido a la limitada accesibilidad a tecnologías modernas de polinización asistida. En visitas de campo realizadas a unidades productivas de escala pequeña y media, se documentó el uso extendido de técnicas basadas en la inducción mecánica por contacto, donde los trabajadores golpean o sacuden directamente los hilos de entutorado (tutores) que sostienen las plantas, utilizando varas o tubos metálicos. Este procedimiento busca generar

vibraciones que simulen la acción de insectos polinizadores, estimulando así la liberación de polen en las flores.

Aunque este método presenta una ventaja en términos de bajo costo inicial al no requerir equipamiento especializado, se identificaron múltiples limitaciones desde el punto de vista técnico y operativo. La principal desventaja es su dependencia de la mano de obra intensiva, ya que se requiere un número considerable de trabajadores para cubrir extensiones de una hectárea o más, particularmente durante el pico de floración, lo que incrementa los costos laborales y reduce la eficiencia operativa. Asimismo, se observó variabilidad en los resultados, atribuible a la subjetividad del procedimiento, la falta de estandarización en la intensidad de las vibraciones aplicadas y el cansancio del personal en jornadas prolongadas.

Estos hallazgos proporcionan una base técnica sólida para diseñar un sistema automatizado de polinización por vibración adaptado al entorno regional, priorizando la eficiencia, la sostenibilidad y la adopción práctica por parte del sector agrícola local.

B. Selección de sensores y actuadores

La implementación de un sistema de polinización automático por vibración requiere que los mecanismos se activen únicamente bajo condiciones climáticas que favorezcan la fecundación del cultivo de tomate. Esto se debe a que variables como la temperatura y la humedad relativa tienen una influencia directa en la viabilidad del polen, la calidad de la floración y el éxito del cuajado de frutos.

Categoría	Requisito
Funcional	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación precisa de vibración en el racimo floral. • Activación programada en función de temperatura y humedad. • Cobertura total del área de cultivo.
No funcional	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a polvo, humedad y variaciones térmicas. • Facilidad de uso y mantenimiento por personal agrícola. • Bajo costo de implementación y operación. • Compatibilidad con infraestructura de entutorado existente.

Tabla 1. Requisitos funcionales y no funcionales para sistema de polinización automática por vibración

Con base en estas condiciones críticas, se seleccionaron sensores ambientales capaces de medir y reportar en tiempo real los valores de temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero. El sensor elegido fue el DHT22, un módulo ampliamente validado en aplicaciones agrícolas por su precisión, bajo costo y compatibilidad con microcontroladores IoT. El DHT22 ofrece un rango de operación de temperatura de -40°C a 80°C , con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, y un rango de humedad relativa del 0 % al 100 %, con una precisión de $\pm 2\%$. Su salida digital y compatibilidad con el protocolo I2C facilita su integración con unidades de control como el ESP32, utilizado en este proyecto por su capacidad de procesamiento, conectividad inalámbrica y bajo consumo energético.

En cuanto a los actuadores para este experimento se optó por utilizar un mecanismo tipo biela-manivela, el cual transforma el movimiento rotativo de un motor DC en una vibración lineal alternante. Este tipo de vibración se asemeja más a la acción natural de los polinizadores como los abejorros, y permite una mayor transferencia de energía hacia los hilos de entutorado que sostienen las plantas.

En la Figura 1 se presenta el diagrama simplificado de la lógica de funcionamiento del sistema. El sensor DHT22 mide temperatura y humedad en el invernadero; los datos son interpretados por el microcontrolador ESP32, que activa un motor DC con mecanismo biela-manivela para inducir la vibración cuando se cumplen las condiciones ambientales preestablecidas.

Esta arquitectura de sensado y actuación, además de ser eficiente y de bajo costo, ha sido diseñada con visión de sostenibilidad. Su compatibilidad con energías limpias, como sistemas fotovoltaicos, permitirá en el futuro una operación autónoma y amigable con el medio ambiente, alineándose con los principios de eficiencia energética y agricultura inteligente. En la tabla 2 se presentan algunas de las características de los componentes más importantes del sistema de polinización.



Figura 1. Arquitectura funcional del sistema de polinización automática

Componente	Función	Especificaciones técnicas
Sensor DHT22	Medición de temperatura y humedad relativa	Temp: -40 a 80°C , Precisión: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ HR: 0-100%, Precisión: $\pm 2\%$, Protocolo I2C
Controlador ESP32	Procesamiento, control y comunicación del sistema	Wi-Fi, Bluetooth, ADC, PWM, I2C/SPI, 2 núcleos, Bajo consumo energético
Motor DC con biela-manivela	Generación de vibraciones para polinización	12V con control manual de velocidad.

Tabla 2. Características de componentes

C. Estrategia de control

La estrategia de control implementada en el sistema de polinización por vibración tiene como objetivo asegurar que la activación de los actuadores ocurra únicamente bajo condiciones climáticas óptimas para la fecundación del cultivo de tomate. Estas condiciones se determinan principalmente a partir de las variables de temperatura y humedad relativa, las cuales influyen directamente en la viabilidad del polen y en el éxito del cuajado de frutos.

El núcleo del sistema es un microcontrolador ESP32, el cual ejecuta una rutina de control actualizada a 1 Hz, evaluando en tiempo real las lecturas de sensores ambientales (DHT22) y los estados internos del sistema. El sistema opera bajo tres modos configurables:

- Activación por temperatura donde el polinizador se activa únicamente cuando la temperatura se encuentra entre 25°C y 29°C .
- Activación por temperatura y humedad donde la activación ocurre solo si ambas condiciones se cumplen: temperatura entre $25 - 29^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa entre $75 - 80\%$.
- Activación sostenida donde el motor permanece activo mientras el operador lo active.

Adicionalmente, el sistema cuenta con capacidades IoT que permiten su supervisión y configuración remota mediante una interfaz basada en la plataforma ThingsBoard. Desde esta interfaz es posible:

- Activar o desactivar el sistema manualmente.
- Cambiar entre modos de operación.
- Establecer nuevos umbrales de temperatura y humedad.
- Monitorear en tiempo real variables ambientales y del sistema.

Entre los parámetros que se reportan al servidor se incluyen no solo temperatura y humedad del ambiente, sino también la temperatura del motor y del gabinete de control, lo que permite detectar sobrecalentamientos o

condiciones adversas que puedan comprometer el funcionamiento del sistema. Esto mejora la estabilidad del sistema, al tiempo que proporciona alertas preventivas para mantenimiento.

Este enfoque modular y supervisado refuerza la sostenibilidad operativa del sistema, ofreciendo automatización inteligente, acceso remoto y seguridad operativa, todo con potencial de integración en arquitecturas de agricultura de precisión basadas en energías renovables.

D. *Diseño y construcción del sistema*

El sistema de polinización automática fue concebido bajo los criterios de adaptabilidad presentados anteriormente, bajo costo y facilidad de implementación en entornos agrícolas. Su diseño integra componentes mecánicos, electrónicos y de control, con énfasis en la robustez y eficiencia operativa.

Se utilizó Sketchup como software de diseño asistido por computadora (CAD 3D) para modelar los soportes del motor y los mecanismos de transmisión de vibración tipo biela-manivela, los cuales se acoplan directamente a las estructuras de entutorado del cultivo. En la Figura 2 se presenta el modelo CAD del sistema montado en un gabinete IP65 que muestra el motor DC con mecanismo biela-manivela (en rojo), la fuente de alimentación, el microcontrolador ESP32 y la electrónica de control. Este diseño compacto permite operación en ambientes agrícolas, protegiendo los componentes de humedad y polvo.

Para la manufactura de las piezas mecánicas del sistema de vibración se utilizó tecnología de impresión 3D con filamento ABS, seleccionado por su resistencia a la humedad y a la temperatura. La Figura 3 muestra los equipos utilizados para este proceso, que permitieron iteraciones rápidas del diseño y la producción eficiente de componentes funcionales.

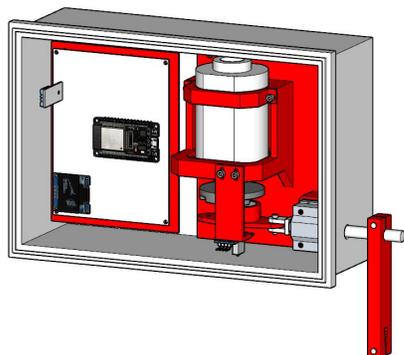


Figura 2. Ensamble CAD del sistema de polinización automática dentro del gabinete de control



Figura 3. Impresoras 3D utilizadas para la fabricación de componentes del sistema

Para la etapa de control se utilizó una tarjeta de desarrollo comercial basada en el microcontrolador ESP32 de 30 pines, con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada. Esta placa fue seleccionada por su disponibilidad en el mercado, bajo costo, facilidad de programación y amplio soporte en entornos de desarrollo como Arduino IDE. Su uso permitió reducir tiempos de integración y facilitó la conexión directa con sensores digitales como el DHT22, así como con actuadores mediante módulos de potencia.

El sistema fue ensamblado dentro de un gabinete IP65, protegiendo los componentes electrónicos frente al polvo, humedad y cambios bruscos de temperatura como se muestra en la Figura 4. Se añadieron además sensores internos para monitorear la temperatura del gabinete, del motor y de la electrónica, permitiendo detectar condiciones de sobrecalentamiento y prevenir fallas prematuras.

Este diseño balancea robustez, accesibilidad económica y posibilidad de expansión futura, sentando las bases para el despliegue de tecnología agrícola eficiente en regiones donde la automatización aún representa una barrera económica o técnica.

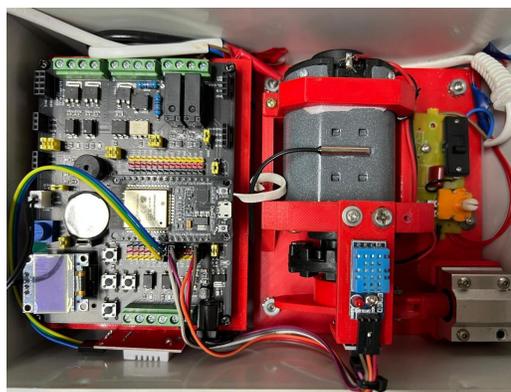


Figura 4. Sistema de control en gabinete IP65 para operación en ambientes agrícolas.

Con una inversión estimada de aproximadamente \$2,500 MXN por unidad, el sistema desarrollado representa una alternativa de bajo costo frente a soluciones comerciales de polinización asistida, como colmenas de abejorros o robots agrícolas. Este costo incluye todos los componentes electrónicos, elementos mecánicos y un gabinete IP65 para operación en campo. Su diseño modular y escalable permite adaptarse a distintos tamaños de invernadero, y su costo puede reducirse aún más mediante producción en serie o convenios institucionales. Esta accesibilidad económica fortalece el potencial de adopción por parte de pequeños y medianos productores, alineándose con los objetivos de transferencia tecnológica y sostenibilidad del proyecto.

III. METODOLOGÍA

A. Preparación del invernadero

Para este proyecto se utilizaron dos invernaderos independientes, cada uno con una superficie de 135 m². En ambos espacios se realizó una limpieza exhaustiva, desinfección de herramientas, ajuste de estructuras, así como la revisión y puesta a punto de los sistemas de riego y ventilación. El sustrato utilizado consistió en una mezcla de ceniza obtenida de la combustión del bagazo de caña empleado en calderas. Esta ceniza se seleccionó por su capacidad para retener humedad, su carácter estéril derivado del proceso térmico y su contenido de minerales beneficiosos, como el potasio. La mezcla fue colocada en 80 bolsas distribuidas uniformemente en cada invernadero. En cada bolsa se establecieron dos plántulas de tomate de la variedad Sargento, cada una con dos tallos productivos.

Uno de los invernaderos fue designado como grupo de control, sin intervención del sistema automatizado, mientras que el segundo se empleó como área experimental para la evaluación del desempeño del sistema de polinización automática. La Figura 5 muestra la configuración inicial del cultivo después del trasplante, y la Figura 6 presenta una vista estructural general con la identificación de cada invernadero.



Figura 5. Distribución de plántulas en bolsas durante la etapa inicial del experimento.

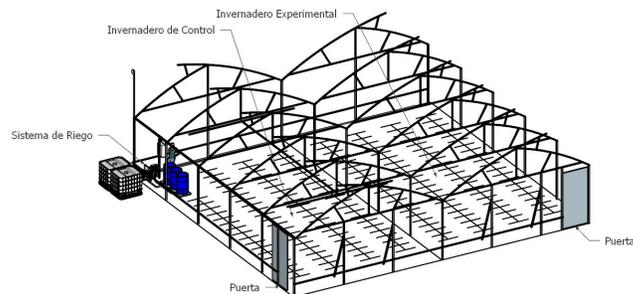


Figura 6. Vista estructural del área de pruebas agrícolas utilizada en el proyecto

B. Sistema IoT e infraestructura de campo

Con el objetivo de monitorear en tiempo real las variables ambientales y controlar de manera remota el sistema de polinización automática, se implementó una arquitectura IoT basada en microcontroladores ESP32 y la plataforma de código abierto ThingsBoard, desplegada en un servidor local con sistema operativo Ubuntu 24.10. Para la comunicación de datos, se configuró un broker MQTT, encargado de gestionar los mensajes enviados por los dispositivos instalados en los invernaderos.

Los nodos ESP32 recolectan y transmiten información sobre temperatura, humedad relativa y estado del actuador vibratorio, además de permitir la configuración remota de parámetros críticos, como los umbrales de activación y el número máximo de ciclos diarios. Para garantizar una conectividad estable a una distancia aproximada de 200 metros desde el edificio institucional, se estableció un enlace inalámbrico punto a punto mediante antenas CPE710, lo que aseguró un canal de comunicación robusto y con baja latencia. La Figura 7 muestra el proceso de alineación e instalación de las antenas de comunicación, necesarias para establecer la infraestructura de red entre el servidor local y los invernaderos.



Figura 7. Infraestructura de comunicación inalámbrica entre el servidor local y los invernaderos mediante antenas CPE710.

En el invernadero de control se instaló un nodo IoT básico, con capacidad exclusivamente para el monitoreo ambiental. En contraste, el invernadero experimental fue equipado con el prototipo completo del sistema automatizado, que incluye sensores, actuador mecánico, una tarjeta de desarrollo ESP32, y un gabinete IP65 para la protección del hardware electrónico. Este sistema permitió no solo la activación automática del motor en función de variables climáticas, sino también su operación remota, el monitoreo del estado del sistema, y el ajuste de sus parámetros en tiempo real.

A través de la interfaz web de ThingsBoard, se diseñaron paneles personalizados (dashboards) que permitieron la visualización gráfica en tiempo real de las variables ambientales, así como el seguimiento histórico de su comportamiento. Estos paneles también facilitaron la generación de alertas automáticas ante condiciones críticas y habilitaron la activación manual del sistema de polinización cuando fue necesario. En la Figura 8 se presentan ejemplos de los dashboards desarrollados, donde se observa el monitoreo continuo de temperatura, humedad relativa y estado del actuador.

C. Evaluación del cuajado de flores

Con el objetivo de cuantificar el impacto del sistema de polinización automática sobre el rendimiento reproductivo del cultivo, se implementó una metodología de evaluación basada en el porcentaje de cuajado de flores. Este análisis se llevó a cabo tanto en el invernadero experimental como en el de control, bajo condiciones agronómicas equivalentes.

La evaluación consistió en el conteo diario del número de flores abiertas, es decir, aquellas en fase de floración activa, en secciones previamente delimitadas de cada invernadero. Posteriormente, se realizó un seguimiento durante los siguientes tres a cinco días para identificar cuántas de estas flores lograban desarrollar un fruto visible, indicando un cuajado exitoso.

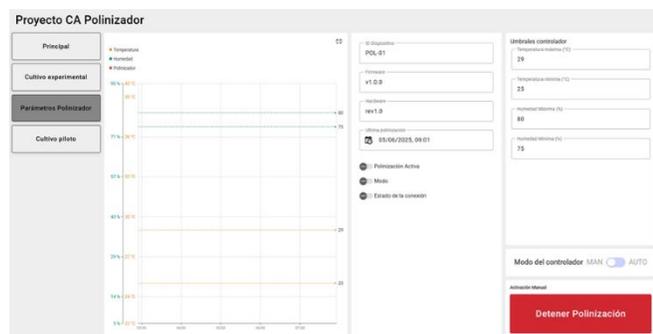


Figura 8. Panel de monitoreo en ThingsBoard con visualización en tiempo real y control del sistema.

El porcentaje de cuajado se calculó aplicando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de cuajado} = \left(\frac{\text{Nro de flores cuajadas}}{\text{Nro total de flores observadas}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Este procedimiento se realizó de forma independiente para cada tratamiento, permitiendo generar un registro continuo y controlado de la eficiencia reproductiva en ambos sistemas. La información obtenida fue utilizada para construir las gráficas de comparación entre el porcentaje de cuajado diario del invernadero con sistema automatizado y el del cultivo de control, validando así la efectividad del dispositivo desarrollado.

Durante las pruebas de campo, se contabilizaron un total de 1,280 flores en el invernadero experimental (con sistema automático) y 1,270 en el grupo control (polinización manual). El porcentaje medio de cuajado fue del 90.3% (± 4.8) en el invernadero experimental, frente al 57.1% (± 6.3) en el control. Para validar estadísticamente esta diferencia, se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes, obteniendo un valor de $p < 0.001$, lo cual indica que la mejora observada es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%. Esta evidencia refuerza la efectividad del sistema automático de polinización bajo condiciones ambientales controladas, confirmando su impacto positivo sobre el rendimiento reproductivo del cultivo de tomate.

D. Pruebas de Campo

Las pruebas de validación del sistema se realizaron utilizando dos invernaderos aislados de 135 m² cada uno durante un periodo continuo de dos meses (marzo y abril de 2025). Uno de los invernaderos funcionó como grupo de control, mientras que el segundo incorporó el sistema de polinización automático con monitoreo IoT.



Figura 9. Polinización manual realizada en el invernadero de control

Ambos espacios fueron sometidos a condiciones agronómicas equivalentes: mismo tipo de sustrato, variedad de tomate, sistema de riego y distribución de bolsas. En el cultivo de control se instaló un nodo IoT básico con sensor DHT22 únicamente para registrar temperatura y humedad relativa. En el cultivo experimental, además del sensor ambiental, se instaló el sistema completo de polinización automatizado, controlado por una tarjeta ESP32.

En el invernadero de control, la polinización fue realizada de forma manual por estudiantes participantes del proyecto, quienes aplicaron vibraciones indirectas a las flores mediante el golpeo controlado de los tutores verticales que sostienen las plantas. Esta práctica, aunque común en sistemas de bajo costo, requiere atención diaria y resulta dependiente de la disponibilidad de mano de obra. La Figura 9 muestra el procedimiento llevado a cabo durante la fase de floración.

El sistema de polinización fue programado para activarse solo cuando la temperatura interna estuviera entre 25 °C y 29 °C y la humedad relativa entre 75% y 80%. Estas condiciones óptimas se alcanzaron regularmente en horas específicas del día, lo que resultó en un promedio de dos activaciones por jornada. El sistema fue capaz de detectar en tiempo real las variables y activar el motor vibrador conectado al entutorado en lapsos críticos para la fecundación, de forma automática y sin intervención manual.

Durante el periodo de prueba se monitoreó el número de flores cuajadas diariamente en ambos invernaderos. Los resultados mostraron un incremento significativo en el grupo experimental, con una media de cuajado del 90.3%, frente al 57.1% registrado en el cultivo de control. Esta diferencia sustancial valida la efectividad del sistema como apoyo en la etapa reproductiva del cultivo, reduciendo además la dependencia de mano de obra constante. Durante esta fase, las plantas entraron en plena floración. La Figura 10 muestra un detalle del cultivo experimental durante este periodo, donde se llevó a cabo la polinización automática mediante el sistema desarrollado.



Figura 10. Etapa de floración en el invernadero experimental durante la polinización automática



Figura 11. Desarrollo y cuajado de frutos en plantas tratadas con el sistema de polinización automática.

En la Figura 11 se observan racimos de tomate desarrollados bajo condiciones controladas en el invernadero experimental. Las imágenes documentan el cuajado exitoso y la progresión del fruto, resultado de la acción del sistema de polinización automática, activado bajo condiciones ambientales óptimas. Se evidencia una polinización uniforme, lo cual se reflejó en un incremento en el porcentaje de frutos formados por inflorescencia en comparación con el grupo de control.

En la Figura 12 se observan los frutos en fase de desarrollo sobre plantas cultivadas en sustrato contenido en bolsas, con tutores verticales bajo cubierta plástica.

Todos los datos de sensores y activaciones fueron transmitidos a la plataforma IoT, permitiendo el registro continuo, la supervisión remota y la configuración de parámetros críticos, como umbrales de temperatura, humedad y número máximo de activaciones por día. Esta funcionalidad también permitió monitorear la estabilidad del sistema, incluyendo temperatura interna del gabinete, consumo del motor y conectividad, mejorando la trazabilidad y el mantenimiento preventivo.



Figura 12. Cultivo de tomate durante las pruebas de campo

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el diseño, implementación y validación de un sistema automático de polinización por vibración con arquitectura IoT, orientado a su aplicación en invernaderos de tomate del sur de Jalisco. La solución propuesta responde a la necesidad de alternativas tecnológicas accesibles frente a métodos tradicionales poco eficientes o económicamente inviables, como el uso de colmenas comerciales de abejorros.

Los resultados obtenidos durante dos meses de pruebas de campo demostraron una mejora significativa en el cuajado de flores (90.3% en promedio) frente al cultivo control (57.1%), validando la efectividad del sistema para inducir la fecundación en condiciones ambientales óptimas. El sistema operó de forma autónoma, con un promedio de dos activaciones por día, basado en la supervisión continua de temperatura y humedad relativa, variables críticas para la viabilidad del polen y el éxito reproductivo del cultivo.

La integración con la plataforma ThingsBoard permitió no solo el monitoreo en tiempo real y la configuración remota del sistema, sino también una trazabilidad completa del comportamiento ambiental y operativo. Esto representa un avance relevante hacia la digitalización de procesos agrícolas y la agricultura de precisión.

El enfoque de diseño, basado en componentes de bajo costo, impresión 3D en ABS, y tarjetas de desarrollo comerciales como el ESP32, demuestra que es posible implementar tecnologías inteligentes adaptadas al contexto de pequeños y medianos productores, favoreciendo su adopción y escalabilidad.

Finalmente, este desarrollo sienta las bases para futuras investigaciones en automatización agrícola sostenible, incluyendo la integración de energía solar, mejoras en la detección fenológica mediante visión artificial y la optimización del control adaptativo en entornos variables.

REFERENCIAS

- [1] Bechar, C., & Edan, Y. (2016). *Human-robot collaboration for improved robot performance in agriculture: Challenges and opportunities*. Biosystems Engineering, 149, 94–111.
- [2] Bishop, C. J., et al. (2021). *Technology-driven approaches for artificial pollination*. Trends in Plant Science, 26(5), 467–479.
- [3] Buchmann, S. L. (1983). *Buzz pollination in angiosperms*. In Handbook of Experimental Pollination Biology (pp. 73–113).
- [4] Dag, H., et al. (2009). *Application of electric vibrators to tomato flowers for increasing fruit set under greenhouse conditions*. Acta Horticulturae, (807), 153–158.

- [5] De Luca, P. A., & Vallejo-Marín, M. (2013). *What's the 'buzz' about? The ecology and evolutionary significance of buzz-pollination*. Current Opinion in Plant Biology, 16(4), 429–435.
- [6] Esch, S. V., et al. (2021). *Artificial Pollination: A Review on Concepts, Methods, and Perspectives*. Biosystems Engineering, 204, 360–374.
- [7] FAO. (2014). *Agricultural innovation systems: A framework for analyzing the role of the public sector*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- [8] FAO. (2023). *FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Available: <https://www.fao.org/faostat/>
- [9] Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., & Rotheray, E. L. (2015). *Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers*. Science, 347(6229), 1255957.
- [10] Holguin, T. A., et al. (2019). *Adoption barriers of automated pollination systems in low-tech greenhouses*. International Journal of Agricultural Technology, 15(3), 453–463.
- [11] IPBES. (2016). *The assessment report on pollinators, pollination and food production*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- [12] Jayaraman, P. P., et al. (2016). *Internet of Things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt*. Sensors, 16(11), 1884.
- [13] Klerkx, L., & Rose, D. (2020). *Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?* Global Food Security, 24.
- [14] Koppert Biological Systems. (2022). *Manual de uso de colmenas Natupol para cultivos en invernadero*. Koppert México. Available: <https://www.koppert.mx>
- [15] Observaciones de mercado realizadas en 2024 con proveedores locales en Jalisco y Michoacán. (*Estimación propia basada en cotizaciones comerciales*).
- [16] Obenland, D. J., Dandekar, R. J., Mitcham, E. J., & Slaughter, D. (2019). *Evaluation of a mechanical pollination system (ShaQer) for greenhouse tomatoes*. HortTechnology, 29(1), 78–84.
- [17] SAGARPA-INIFAP. (2021). *Manejo integrado de plagas en agricultura protegida*. México.
- [18] Sahin, V., et al. (2016). *Comparison of pollination techniques in greenhouse-grown tomatoes*. Journal of Applied Botany and Food Quality, 89, 217–222.
- [19] Salazar-Gutiérrez, R. (2020). *Costos operativos del uso de vibración manual en cultivos de tomate bajo invernadero*. Revista Mexicana de Agronegocios, 25(1), 45–52.
- [20] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Producción agrícola protegida en México: situación actual y perspectivas*. Secretaría de Agricultura, México.
- [21] Shamschiri, A., et al. (2018). *Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(1), 1–22.
- [22] Shamschiri, R. R., et al. (2018). *Research and development in greenhouse automation and smart farming: A review*. Information Processing in Agriculture, 5(1), 1–20.
- [23] Slaughter, D., et al. (2017). *Mechanical pollination of greenhouse tomato using vibration systems: constraints and solutions*. Acta Horticulturae, (1170), 45–52.
- [24] St. Pierre, E., Reimers, C., Kohl, J., Kovac, M., & Wood, R. J. (2019). *Stickbug: A biologically inspired hexapod robot for autonomous pollination*. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, pp. 1294–1300.
- [25] Stark, R. E., Banks, J. E., & Vargas, R. (2007). *The toxic effects of pesticide exposure on beneficial insects: a review*. Environmental Entomology, 36(6), 1232–1245.
- [26] Tasei, J.-N. (1995). *Impact of agricultural practices on bees: a review*. Apidologie, 26(1), 49–62.

- [27] Van der Steen, M. T., & van Dijk, J. F. Y. (2008). *Manual and mechanical pollination methods in greenhouse tomato cultivation*. Acta Horticulturae, 801, 361–368.
- [28] Van Henten, E. J., et al. (2002). *Optimal control of greenhouse cultivation*. Annual Reviews in Control, 26(2), 245–256.
- [29] Van Henten, L., et al. (2017). *Greenhouse automation: A model-based approach to the optimal control of pollination*. Acta Horticulturae, 1182, 119–126.
- [30] Van Straten, P., Hemming, A., & van Henten, E. (2018). *Technological development and implementation of advanced greenhouse systems*. Biosystems Engineering, 172, 277–296.
- [31] Velthuis, H. H. W., & van Doorn, A. (2006). *A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination*. Apidologie, 37(4), 421–451.
- [32] Wolfert, S., et al. (2017). *Big Data in Smart Farming – A review*. Agricultural Systems, 153, 69–80.

BIOGRAFÍA AUTORES

Bañuelos Amezcua, Ulises

Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P. 49650. Email: ulises.banuelos@tamazula.tecmm.edu.mx
Maestría en Ingeniería Electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.

Venegas Moreno, Juan José

Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P. 49650. Email: jose.venegas@tamazula.tecmm.edu.mx
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, egresado del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN – Unidad Guadalajara.

Rodríguez Morales, Moisés

Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P. 49650. Email: moises.rodriguez@tamazula.tecmm.edu.mx
Maestría en Ingeniería Electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.

Hernández Martínez, José de Jesús

Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P. 49650. Email: jose.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx
Maestría en Ingeniería Electrónica, egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán.

Rodríguez Mendoza, Ramiro

Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P. 49650. Email: ramiro.rodriguez@tamazula.tecmm.edu.mx