



*Una universidad incluyente y comprometida con  
el desarrollo integral*

---

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN  
ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO  
RADIACIÓN ULTRASÓNICA**

Autor

**CARLOS EDUARDO ABRIL PÉREZ**

Director

**DIEGO ALFONSO PELÁEZ**

Co-director

**VÍCTOR JULIO VARGAS SARMIENTO**

**INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA**



---

**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE  
TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA**

---

**DICIEMBRE 3 DE 2020**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA  
CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA**

**FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: 17 de mayo 2020  
FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: de diciembre 2020**

**NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA LA SUSTENTACIÓN:**

\_\_\_\_\_  
**CARLOS EDUARDO ABRIL PÉREZ  
AUTOR**

\_\_\_\_\_  
**DIEGO ALFONSO PELÁEZ  
DIRECTOR**

\_\_\_\_\_  
**JOSÉ DANIEL RAMÍREZ CORZO  
DIRECTORA DE PROGRAMA**

**JURADO CALIFICADOR:**

\_\_\_\_\_  
**DIEGO ALFONSO PELÁEZ**

\_\_\_\_\_  
**DIEGO ARMANDO MEJÍA  
BUGALLO**

\_\_\_\_\_  
**CÉSAR AUGUSTO PEÑA CORTÉS**

**PAMPLONA NORTE DE SANTANDER  
COLOMBIA  
DICIEMBRE 3 DE 2020**



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

*Para ustedes;*

*Judith Aleida, Cristian Danniell y Wendy Hernández*

*Eterna Gratitud*



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

---

*Este trabajo de grado esta dedico a Dios quién me guio y me dio fuerzas para seguir adelante y no desfallecer ante las adversidades.*

*A mi madre Judith Aleida que durante toda mi vida ha forjado en mí, Valores, Virtudes y son el mejor ejemplo de responsabilidad y dedicación, a mi hermano quien siempre confió en mis ideas y siempre ha estado en los momentos difíciles demostrándome cariño. A mi novia que desde la distancia siempre me ha brindado su apoyo el cual me ha sido de gran ayuda en los momentos más difíciles. A mis compañeros y amigos quienes son y fueron un apoyo en las buenas y en las malas y por último a todos los docentes que hicieron parte en la formación de mi carrera en especial a Diego Alfonso Peláez, docente que confió en mis capacidades y me dio la oportunidad de realizar este proyecto junto su dirección, de haber sido constante, y siempre dar ese apoyo en los momentos más difíciles y un gran apoyo personal y profesional,*

*A mi madre, Judith Aleida Pérez,*

*A mi hermano, Cristian Danniél*

*A mi novia, Wendy Hernández*

*A mis compañeros y amigos, Omar Esneider, Fernando Rodríguez, Yurley Katherine y Oscar Lemus*

*A mi director, Diego Peláez*



## RESUMEN

En el Departamento, de Norte de Santander, la explotación de tomate es manejada por pequeños y medianos productores, los cuales comercializan el producto en el mercado local y nacional, siendo este un valor importante para el componente socio-económico de muchos productores y sus familias. En el municipio de Pamplonita Los productores campesinos de la vereda El Salvador se asociaron para fomentar el cultivo de tomates en invernadero. Generalmente la mayoría de cultivos son a campo abierto en donde el viento y las abejas pueden hacer que las plantas de tomates polinicen. Sin embargo, en un invernadero, este proceso se reduce debido a la baja fuerza del viento y la alta humedad relativa para el crecimiento de las plantas. Debido a estas limitaciones, es necesario utilizar diferentes técnicas que apoyen el correcto proceso de polinización. Por ende, con este trabajo se plantea un prototipo de polinización ultrasónica, capaz de suplir la falta de aire ambiental y la presencia de abejas polinizadoras. Logrando una polinización controlada y focalizada, permitiendo así la auto-polinización o polinización cruzada, mejorando el crecimiento del fruto y por ende la producción.



# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

## 1 Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
JUSTIFICACIÓN .....	16
1.1.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
METODOLOGÍA.....	1
1 REFERENTES TEÓRICOS.....	4
1.1 HÁBITOS DE CRECIMIENTO .....	4
1.2 FISIOLÓGÍA DEL CULTIVO .....	4
1.3 POLINIZACIÓN .....	5
1.3.1 TIPOS DE POLINIZACIÓN .....	5
1.3.2 POLINIZACIÓN DIRECTA .....	6
1.3.3 POLINIZACIÓN ARTIFICIAL.....	7
1.3.4 POLINIZACIÓN CRUZADA .....	7
1.4 TÉCNICAS DE POLINIZACIÓN .....	8
1.4.1 USO DE ABEJORROS.....	8
1.4.2 USO DE SOPLADORAS .....	8
1.4.3 POLINIZACIÓN MANUAL .....	8
1.4.4 VIBRADOR ELÉCTRICO.....	9
1.4.5 APLICACIÓN DE HORMONAS.....	9
1.5 MORFOLOGÍA DE LA FLOR .....	9
1.5.1 PEDÚNCULO .....	11
1.5.2 EL CÁLIZ.....	12
1.5.3 COROLA.....	13
1.5.4 EL ANDROCEO .....	13
1.5.5 EL GINECEO .....	14
1.6 SENSOR ULTRASÓNICO (SONAR- BERO- 3RG6012-3AD00).....	15
1.7 OPTO ACOPLADOR.....	16
1.8 TRANSISTOR DARLINGTON .....	17
1.8.1 CÁLCULOS: DARLINGTON TIP122 .....	18
1.9 BATERÍAS DE IONES DE LITIO .....	19
1.10 BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM).....	20
1.11 COOLER .....	21
1.12 ARDUINO NANO .....	21



# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

1.13	BASTÓN CANADIENSE DE CODERA INTEGRAL.....	23
1.14	TP4056 .....	23
1.15	REGULADOR DE TENSIÓN 7812 .....	24
1.16	ESTADO DEL ARTE.....	24
1.16.1	Polinización de manzana: Una vista .....	24
1.16.2	Polinizadores artificiales diseñados materialmente .....	24
1.16.3	Polinización asistida en palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores .....	25
1.16.4	Desarrollo del sistema de polinización de fresa mediante presión de radiación ultrasónica.....	25
2	Diseño del sistema polinizador en cultivos de tomate mediante radiación ultrasónica. ....	28
2.1	DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL .....	29
2.1.1	CÁLCULOS TRANSISTOR DARLINGTON.....	29
2.2	DISEÑO DE LA BATERÍA DEL CIRCUITO.....	37
2.2.1	MEDICIÓN DEL VOLTAJE INICIAL .....	37
2.2.2	CARGA COMPLETA DE LA CELDA .....	38
2.2.3	MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	40
2.2.4	PRUEBA DE DESCARGA .....	40
2.2.5	AUTO DESCARGA.....	40
2.3	DISEÑO DEL SOPORTE DEL SONAR Y COOLERS .....	41
3	CONSTRUCCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROTOTIPO ULTRASÓNICO PARA LA POLINIZACIÓN. ....	44
3.1	CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA .....	44
3.2	CONSTRUCCIÓN DEL POWER BANK.....	46
3.3	CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE DEL SONAR Y LOS COOLERS .....	47
3.4	ENSAMBLE DE TODAS LAS ETAPAS.....	48
4	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POLINIZACIÓN EN EL CULTIVO DE TOMATE. ....	50
4.1	INSPECCIÓN DEL CULTIVO.....	50
5	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE POLINIZACIÓN RESPECTO A MÉTODOS TRADICIONALES UTILIZADOS EN LA REGIÓN. ....	57
5.1	RESULTADOS .....	57
6	CONCLUSIONES .....	62
7	TRABAJOS FUTUROS .....	63
8	REFERENCIAS.....	64



## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. 1. Metodología para el desarrollo del diseño, acondicionamiento y verificación del prototipo [Autor].	1
Figura 1. 2. Diferencias entre autopolinización y polinización cruzada [6].	5
Figura 1. 3. Ciclo de una especie de planta autógama [7].	6
Figura 1. 4. Método de polinización artificial [8].	7
Figura 1. 5. Partes de la flor [27].	10
Figura 1. 6. Esquema de la flor en donde se destaca el pedúnculo [27].	11
Figura 1. 7. Esquema de la flor en donde se destaca el pedúnculo el cual empieza donde termina el receptáculo [10].	12
Figura 1. 8. Esquema de la flor de tomate en donde se destaca el cáliz [10].	12
Figura 1. 9. Esquema de la flor de tomate en donde se destaca la corola [10].	13
Figura 1. 10. Esquema de la flor de tomate donde se encuentra el estambre [10].	13
Figura 1. 11. Esquema de la flor de tomate donde se encuentra el gineceo [10].	14
Figura 1. 12. Zonas de operación del sonar-BERO [14].	16
Figura 1. 13. Pc817 con su diagrama general a salida opto transistor [16].	17
Figura 1. 14. Esquema de transistor Darlington integrado Tip122 [17].	17
Figura 1. 15. Conexión transistor Darlington integrado Tip122 [Autor].	18
Figura 1. 16. Celda de Li-Ion ICR18650 a 3.7v nominales y 2600 mAh nominales [Autor].	19
Figura 1. 17. Esquema de conexión para la configuración 6s 24.5 Vmax con Bms balanceador [18].	20
Figura 1. 18. Esquema BMS para celdas 18650 Li-Ion 6s [21].	20
Figura 1. 19. Esquema de un cooler común [22].	21
Figura 1. 20. Esquema de Arduino Nano [23].	22
Figura 1. 21. Esquema Pinout y Datasheet [23].	22
Figura 1. 22. Bastón de codera integral [25].	23
Figura 1. 23. Esquema del TP4056 sus partes [20].	23
Figura 1. 24. Encapsulado del regulador 7812CT [26].	24
Figura 1. 25. Bastón de codera integral visto desde tres perfiles [Autor].	28
Figura 1. 26. Bastón de codera integral visto desde tres perfiles con el acople del sonar y el banco de coolers [Autor].	29
Figura 1. 27. Simulación [Autor].	32
Figura 1. 28. Schematic [Autor].	33
Figura 1. 29. PCB de 80 mm de ancho por 60 mm de alto [Autor].	33
Figura 1. 30. Diseño del contenedor del circuito [Autor].	34
Figura 1. 31. Extracción de celdas [Autor].	37
Figura 1. 32. Medición de voltaje inicial al costado izquierdo de cada celda [Autor].	38
Figura 1. 33. Esquema de conexión para la carga de celdas [20].	39
Figura 1. 34. Medición de voltaje de corte máximo de las 12 celdas [Autor].	39



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

Figura 1. 35. Diseño del soporte del sonar y coolers [Autor].	41
Figura 1. 36. Esquema del acople entre el soporte y la caña del bastón [Autor].	42
Figura 1. 37. Proceso de plancho y quemado [Autor].	44
Figura 1. 38. Esquema final de la implementación del circuito de potencia [Autor].	45
Figura 1. 39. Esquema de conexión de las celdas [Autor].	46
Figura 1. 40. Esquema de conexiones entre celdas [Autor].	46
Figura 1. 41. Esquema final del Power Bank [Autor].	47
Figura 1. 42. Esquema del ensamble final del soporte [Autor].	47
Figura 1. 43. Esquema del acople que integra el soporte y la caña del prototipo [Autor].	48
Figura 1. 44. Resultado del prototipo luego del ensamble de todas las etapas [Autor].	48
Figura 1. 45. Vista exterior del cultivo [Autor].	50
Figura 1. 46. Vista interior del cultivo [Autor].	51
Figura 1. 47. Comportamiento de la temperatura en el transcurso del día [Autor].	52
Figura 1. 48. Conversatorio con el agricultor sobre las técnicas de polinización utilizadas en el cultivo [Autor].	52
Figura 1. 49. Selección del surco con presencia de flores abiertas [Autor].	53
Figura 1. 50. Inicio de polinización [Autor].	53
Figura 1. 51. Polinización [Autor].	54
Figura 1. 52. Segunda polinización [Autor].	54
Figura 1. 53. Adaptación en la polinización [Autor].	55
Figura 1. 54. Tercer día de polinización [Autor].	55
Figura 1. 55. Diferencia entre flores y frutos con respecto a los métodos de polinización artificial y natural [Autor].	57
Figura 1. 56. Etiquetado de las plantas polinizadas artificialmente (PA) [Autor].	58
Figura 1. 57 Etiquetado de las plantas polinizadas naturalmente (PL) [Autor].	58
Figura 1. 58. Efectos de polinización con respeto al diámetro del fruto [Autor].	59
Figura 1. 59. Efectos de la baja cuaja en los frutos [Autor].	60
Figura 1. 60. Diámetro de los frutos polinizados naturalmente (PL) y artificialmente (PA) [Autor].	60
Figura 1. 61. Frutos polinizados artificialmente con el prototipo [Autor].	61



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Darlington Tip122 .....	29
Tabla 2. Especificaciones del motor (Coolers) .....	30
Tabla 3. Especificaciones de la salida digital .....	30
Tabla 4. Diferencias entre softwares .....	34
Tabla 5. Mediciones en celdas ICR18650 26C.....	40
Tabla 6. Mediciones en celdas ICR18659 22F.....	41
Tabla 7. Ventajas y desventajas entre componentes PTH Y SMD.....	45
Tabla 8. Efecto de los métodos de polinización con respecto al número de flores polinizadas, frutos cuajados y el diámetro del fruto. ....	59



## **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se realizó el diseño de un prototipo de polinización por medio de radiación ultrasónica para el cultivo de tomate del municipio de Pamplonita. En el capítulo 1 se analizaron temas de importancia tales como: El estudio de los hábitos de crecimiento de la planta. Esto se realizó con el fin de conocer las etapas de la planta durante su desarrollo para así poder registrar los ciclos en donde la floración se hace presente. Luego se indagó sobre la fisiología del cultivo para entender como las plantas de tomate funciona en respuesta a los factores ambientales y cuidados del cultivo. Por ejemplo, en situaciones donde el cultivo de tomate es en invernadero, es necesario conocer su desarrollo (crecimiento, formación de racimos florales, desarrollo de frutos entre otros). Seguidamente se procedió al estudio de los tipos de polinización y sus respectivas técnicas, en donde se encontraron las siguientes técnicas: el uso de abejorros, el uso de sopladoras industriales, el uso de vibradores eléctricos, aplicación de hormonas y la polinización manual convencional. De la misma manera se indago sobre cómo es la morfología de la flor, esto con el objetivo de comprender el sistema de fertilización y sus partes reproductoras. También fue necesario realizar una selección de componentes para la construcción del prototipo, la selección partió desde el tipo de sensor ultrasónico, el sistema embebido, la elección de la fuente alimentación, los actuadores encargados de crear corrientes de aire (Coolers), entre otros. Luego de tener la recopilación de toda la información descrita en el capítulo 1 se realizó el diseño del sistema polinizador planteado en el capítulo 3. En dicho capítulo se describe como se desarrolló el diseño de la etapa de control, el diseño de la fuente de alimentación (Power Bank), también se describe como fue el proceso previo que se le realizó al diseño de la fuente de alimentación y por último el diseño del soporte del sonar y los coolers. Ya en el capítulo 4 se procedió a realizar la construcción de las etapas mencionadas en el capítulo 3 las cuales cumplen un papel fundamental en el ensamble final del sistema polinizador. Seguidamente del ensamble se realizó la implementación del prototipo en el cultivo bajo invernadero en donde primero se hizo una previa inspección del cultivo teniendo en cuenta aspectos como la ubicación del terreno, los materiales de construcción de la estructura del invernadero, el diseño del techo, el material que cubre el techo entre otros, después de lo cual se entablo un tema de conversación con el agricultor en donde se intervinieron temas sobre las técnicas de polinización con las que contaba el cultivo y por qué la utilización de dicha técnica. Luego de tener la información del agricultor se hicieron las pruebas de campo en donde primero se identificó la flor, luego se focalizó directamente el sonar en la flor a una distancia de 10 cm con el fin de que la radiación desprendiera los granos de polen para luego ser esparcidos con los coolers hacia el estigma de la flor. El proceso de dispersión del polen fue regulado en un lapso de 5 segundos de aplicación, ayudando a que los granos de polen no fuesen esparcidos en su totalidad fuera del estigma. Las pruebas realizadas dieron como resultado un aumento en la cantidad y diámetro del fruto luego de la polinización realizada.



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para el 2016 a nivel mundial se produjeron 177.042 millones de kilos, siendo China el principal productor con 56.399 millones de kilos, seguido por India con el 31'8 % del total mundial, Estados Unidos con 13.038 millones de kilos, Turquía con 12.600 millones de kilos, Egipto con 7.943 millones de kilos, España con 4.671 millones de kilos, México con 4.047 millones de kilos, Marruecos con 1.231 millones de kilos y Holanda con 900 millones de kilos [1]. Luego para el año 2018 los principales países importadores fueron; Estados Unidos (1.1856'68 millones de kilos), Alemania (722'44 millones de kilos), Rusia (533'32 millones de kilos), Francia (525'48 millones de kilos) y Países Bajos como, Holanda (231'87 millones de kilos) [2]. Para el año 2013-2014 en Colombia se produjeron de 412.351,2 ton, siendo Norte de Santander el principal departamento productor con 119.787 ton, seguido por Antioquia con 47.110 ton, Boyacá con 46.638 ton, Santander con 42.924 ton y Cundinamarca con 26.851 ton. Con las variedades chonto, cherry y milano. [3]. Por otra parte, la Iniciativa Colombiana de Polinizadores Abejas (ICPA) plantea que el uso de las abejas en la polinización de cultivos de importancia económica y en el mantenimiento de la biodiversidad de las áreas naturales es uno de los temas más importante desde 1995, pero se conoce que en diferentes partes del mundo la riqueza y abundancia de las abejas silvestres están disminuyendo de una manera alarmante. En los Estados Unidos demostraron la desaparición de miles de colonias de abejas manejadas en más de 22 estados, conocida como el Desorden del Colapso de las Colonias, en donde se expone el peligro sobre la producción de cultivos que dependen de la polinización de dichas abejas en cultivos de nueces, bayas, frutas y hortalizas [4]. En Colombia Solo durante el año 2018 se reportó la muerte de 16 mil colmenas en regiones como el Quindío y Cundinamarca [5]. Este índice de afectación radica en factores como la intensificación de la agricultura, la pérdida del hábitat, la fragmentación, el mal uso de plaguicidas en la agricultura, los parásitos y las enfermedades han sido identificados como los principales causantes de este vertiginoso descenso [5].



## JUSTIFICACIÓN

Debido al gran índice de mortalidad de colmenas de abejas reportada en los últimos años en Colombia y a la migración de los agricultores hacia la implementación de sistemas de invernadero en los cultivos, se plasmó el proyecto de polinización artificial, el cual tiene como finalidad integrar técnicas de polinización a través de ultrasonido específicamente en cultivos bajo invernadero, debido a que en estos cultivos la flor de la planta no se encuentra en condiciones óptimas para producir frutos con buenos estándares de calidad. La implementación de este sistema artificial con respecto a las técnicas convencionales se caracteriza en no ser un sistema de polinización invasivo, ayudando a que su accionamiento sea controlado, es apto para cualquier agricultor gracias a su liviano peso, su ergonomía e innovación. Otro gran aporte que tiene el proyecto es la inclusión de la robótica y electrónica con el agro colombiano, conocido actualmente como la industria 4.0 del campo. Siendo capaz de suplir problemas que afecten a los campesinos en sus labores de agricultura y economía propia.

Por otra parte, la implementación del sistema de polinización artificial utilizando radiación ultrasónica permitió que en cultivos bajo invernadero especialmente en cultivos de tomate se mitigara la problemática en cuanto a la producción, debido a que en el cultivo no se implementaba ningún método de polinización, dando como resultado cosechas normales, pero con frutos prematuros. Es por eso que, con la implementación del sistema como un nuevo método de polinización, se garantizó que la producción de la cosecha se incrementara en torno a la cantidad de frutos presentes en cada planta y al tamaño de los frutos, dando como resultado un balance de costos y beneficios favorables para el agricultor, ya que con el sistema el agricultor directamente controlaría desde un principio a fin el resultado de la cosecha.



# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de polinización por radiación ultrasónica para cultivos de tomate en el municipio de Pamplonita.

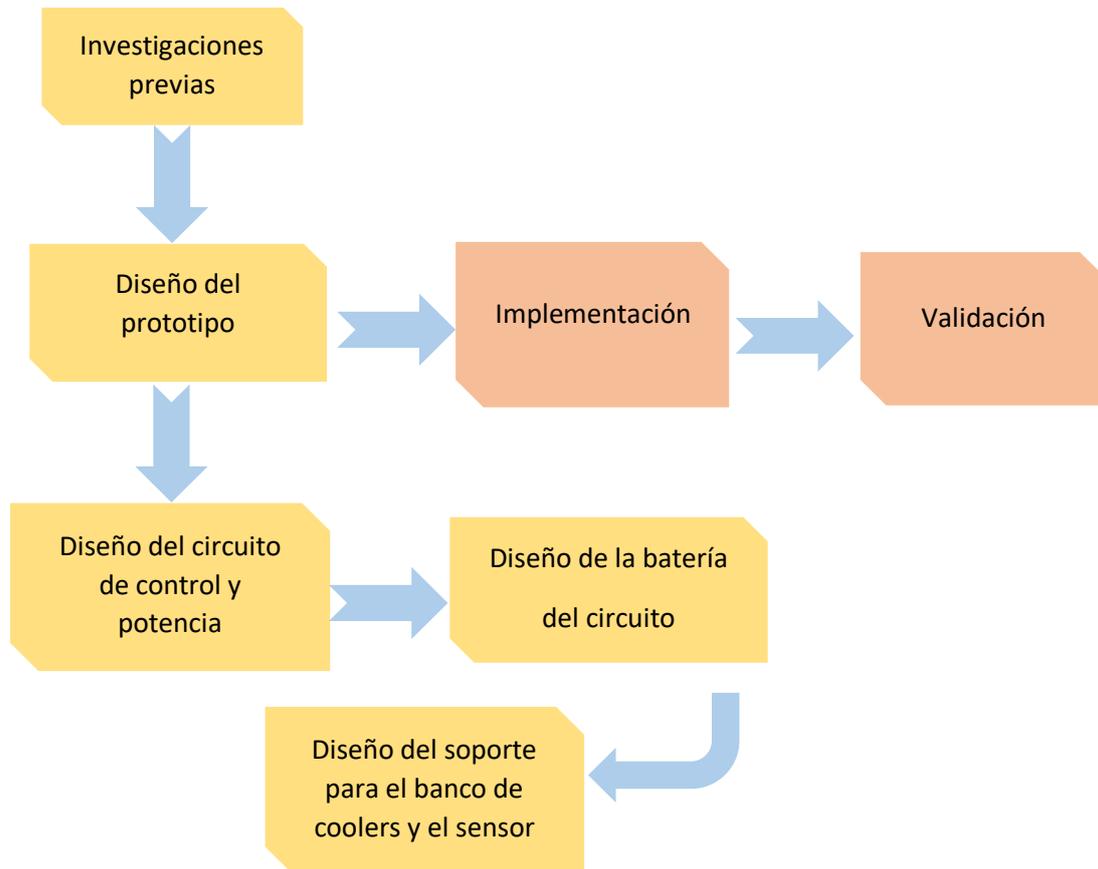
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el sistema para la polinización de cultivos de tomate mediante radiación ultrasónica.
- Construir el prototipo ultrasónico para la polinización.
- Implementar el sistema de polinización en un cultivo de tomate previamente seleccionado el cual cumpla con las condiciones requeridas.
- Validar el sistema de polinización respecto a métodos tradicionales utilizados en la región.



## METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología de desarrollo para las etapas de investigación, diseño, acondicionamiento y verificación.



*Figura 1. 1. Metodología para el desarrollo del diseño, acondicionamiento y verificación del prototipo [Autor].*

La **primera etapa del sistema** consiste en la recolección de información sobre cuál ha sido el índice de incidencia de la producción de cultivos de tomate en el municipio. Se encontró que según los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en los últimos años en Colombia se produjeron 412.351,2 ton, siendo **Norte de Santander** el principal departamento productor con 119.787 ton, seguido por Antioquia con 47.110 ton. Gracias a esa información se procedió a indagar sobre cuáles son las técnicas de polinización que generalmente se implementan para este tipo de cultivos. Dando como resultado que actualmente en los cultivos de tomate de invernadero los agricultores presentan un inconveniente con el sistema de polinización, ya que en cultivos en campo abierto las flores al ser hermafroditas pueden polinizarse con el aire, pero en cultivos de invernadero la presencia de corrientes



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

de aire es limitada, por ende, tienen que migrar a usar otras técnicas las cuales van desde **1.** El uso de abejorros: Dicha técnica es excelente para la polinización, debido a que ellos saben con exactitud cuándo salir a trabajar permitiendo que la fertilización sea perfecta, mejorando los resultados en rendimiento y calidad del fruto. Esta técnica tiene una limitante, el cual surge de la mala práctica del uso de insecticidas en otros cultivos, logrando que la población de abejas y abejorros se encuentre en decadencia, dificultando así la implementación sus servicios. **2.** La siguiente técnica se basa en la implementación de sopladoras que comúnmente se utilizan para barrer hojas. La técnica es sencilla y consiste en dirigir la corriente de aire directamente sobre los racimos de flores, para esto se establece una distancia de aplicación de aproximadamente entre 2 a 2.5 metros de distancia para así evitar que el polen no se esparza por completo y la polinización no sea irregular. Sin embargo, la calidad y rendimiento de los frutos es menor debido a que la distancia de aplicación no es controlada, ocasionando que en su mayoría la corriente de aire expulse por completo el polen negando la posibilidad de que llegue al estigma. **3.** La polinización manual es otra técnica utilizada, la cual consiste en utilizar a una persona como ente polinizador, en donde manualmente tiene que agitar las ramas de la planta logrando que el polen se desprenda y pueda llegar directamente al estigma. Esta técnica al no utilizar equipos o insectos la convierte en económica. Pero al ser una técnica invasiva dificulta la eficiencia en cultivos de área extensas. **4.** La técnica del vibrador eléctrico consiste en utilizar vibradores alimentados por baterías, los cuales se ubican en directamente sobre el pedúnculo del racimo de flores durante unos segundos. La vibración que generan dichos vibradores logran desprender los granos de polen, permitiendo que caigan en el estigma y con ellos se fertilicen los óvulos. Esta técnica es muy costosa ya que representa pagos extras de jornales e incremento en la adquisición de los vibradores. **5.** La técnica de aplicación de hormonas en especial las auxinas, tiene varias particularidades tales como: Su aplicación debe ser focalizada y solo a las flores que se encuentren abiertas, en caso de realizar la aplicación en exceso puede provocar daños en las plantas. Los frutos que se generan con esta práctica no poseen semillas.

Para dar validez sobre investigaciones de polinización artificial. En el artículo sobre la polinización de manzanas con irradiación de polen y polinización artificial los autores Fernando Ramírez y Thomas Lee hablan de que el polen es espolvoreado sobre la parte superior del árbol de manzana el cual cae sobre una corriente de aire ascendente producida por un actuador que cumple la función de rociador de aire. Por otra parte, se habla de que algunos agricultores implementan helicópteros para aplicar el polen por el aire luego de ser mezclado con un diluyente adecuando [31] .

La **segunda etapa** vincula el diseño del prototipo, el diseño de la etapa de control y potencia, el diseño de la batería y el diseño del soporte de los coolers y el sonar.

En la **tercera etapa** se procede a implementar el prototipo iniciando desde la implementación del circuito de potencia, la construcción del Power Bank y la construcción del soporte junto con el sonar y los coolers.



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez

**Director:** Diego Alfonso Peláez

# CAPÍTULO 1



## 1 REFERENTES TEÓRICOS

### 1.1 HÁBITOS DE CRECIMIENTO

La planta de tomate en general inicia su crecimiento a partir de un tallo principal, formando entre 5 y 10 hojas antes de producir el primer racimo floral. Luego, comienzan a diferenciarse dos formas de crecimiento de la planta: el crecimiento indeterminado y el crecimiento determinado. En plantas de crecimiento indeterminado, se forma en la axila de la hoja más joven (la que está inmediatamente por debajo del racimo floral más reciente) una yema vegetativa que continúa el crecimiento y desplaza esta hoja a una posición por encima del racimo floral más reciente y sigue su crecimiento formando tres o cuatro hojas y luego un nuevo racimo floral. A partir de ahí el proceso se vuelve repetitivo, debido a que de la nueva inflorescencia surge una yema que desarrolla nuevamente 3 o 4 hojas y un nuevo racimo floral y así sucesivamente se repite esta secuencia de crecimiento hasta que las condiciones sean favorables. De esta forma, las plantas de crecimiento indeterminado pueden crecer indefinidamente alcanzando longitudes mayores a 5 metros. Generalmente requieren sistemas de soporte o “tutorado” para mantenerse erectas. La producción de frutos se maneja a lo largo de toda la planta y para evitar la proliferación de nuevos tallos, deben podarse continuamente los nuevos brotes axilares [29].

### 1.2 FISIOLÓGÍA DEL CULTIVO

En términos generales la fisiología es la forma como la planta de tomate funciona como respuesta a los factores ambientales y cuidados del cultivo. Por ejemplo, cuando el cultivo de tomate es en invernadero su desarrollo (crecimiento, formación de racimos florales, desarrollo de frutos, entre otros) es diferente al del cultivo a campo abierto, por efecto de las diferencias en la temperatura. De la misma manera, las prácticas de manejo como fertilización o podas hacen que la planta funcione de una u otra forma. Entender un poco la fisiología de la planta de tomate nos ayuda a comprender cómo las prácticas de manejo del cultivo inciden en su productividad [29].

La fisiología del cultivo depende de cada etapa de desarrollo. La primera etapa de desarrollo conocida como desarrollo vegetativo se produce desde la germinación y emergencia de la plántula hasta la aparición del primer racimo floral. En general, el primer racimo floral surge después de la formación de 5 a



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

10 hojas, cuando la planta tiene una altura mayor a 40 cm. En la segunda etapa de desarrollo se presenta un crecimiento simultáneo entre crecimiento vegetativo y reproductivo con la aparición de nuevas hojas y racimos florales a partir de los cuales se van formando progresivamente los frutos. Posteriormente, se inicia la etapa de producción en la cual los primeros frutos en desarrollarse comienzan su madurez y cosecha. En esta etapa, al tiempo en que se cosechan los frutos, la planta sigue desarrollando hojas y nuevos racimos florales. Finalmente se llega al estado de desarrollo en el cual, debido a factores asociados al tipo de hábito de crecimiento o a las prácticas de manejo, se detiene de forma natural o inducida el crecimiento de la planta y solamente se mantiene el desarrollo de los frutos que ya se han formado [29].

### 1.3 POLINIZACIÓN

La polinización es el proceso en el cual los granos de polen viajan desde los sacos polínicos hasta los estigmas, en el que se encuentran las oosferas. Por otra parte, si la polinización se realiza entre flores de la misma planta se denomina autopolinización, y si la polinización es entre dos plantas distintas y de la misma especie se denomina polinización cruzada. La Figura 1. 2 muestra de manera gráfica la diferencia entre autopolinización y polinización cruzada [6].

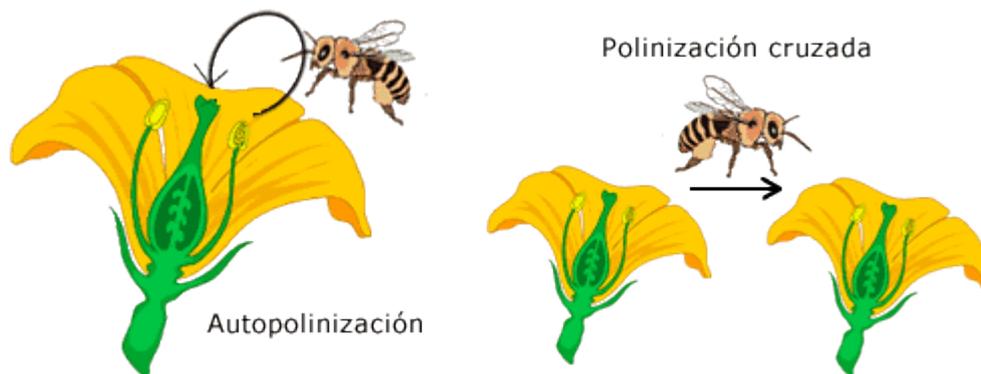


Figura 1. 2. Diferencias entre autopolinización y polinización cruzada [6].

#### 1.3.1 TIPOS DE POLINIZACIÓN

Teniendo en consideración el origen y la fuente del polen se conocen varios métodos de polinización en las plantas, tales como: Polinización directa, polinización artificial, polinización cruzada, la cual puede ser de forma biótica tales como insectos (entomófila), aves (ornitófila) o animales (zoófila) y abiótica tales como el aire (anemófila) o el agua (hidrófila) y polinización directa.



### 1.3.2 POLINIZACIÓN DIRECTA

Dicha polinización se produce cuando el grano del polen viaja solo desde el estambre al estigma de la misma flor. Por ende, a estas especies se les denomina como autógamas, es decir la reproducción sexual se genera con la unión de gametos femeninos y masculinos producidos por el mismo individuo para producir el cigote.

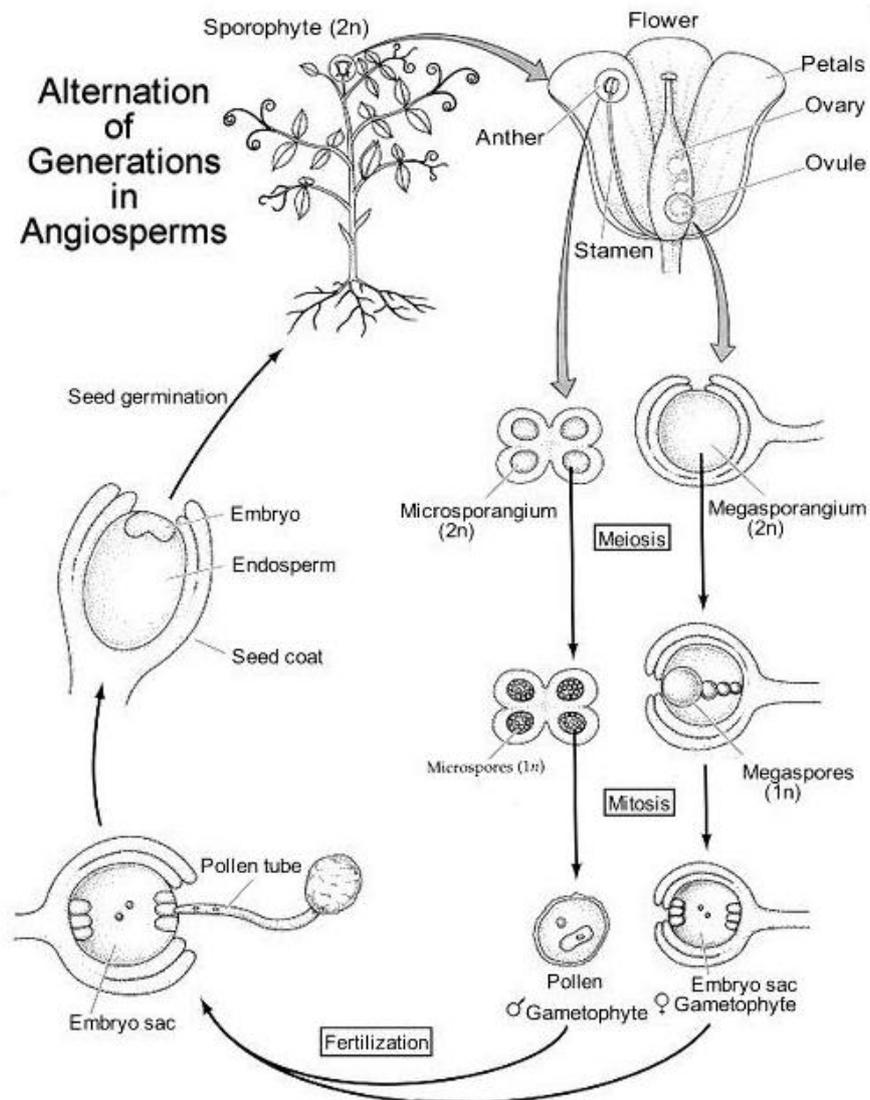


Figura 1. 3. Ciclo de una especie de planta autógama [7].



## 1.3.3 POLINIZACIÓN ARTIFICIAL

Esta polinización de tipo manual o artificial se genera cuando el ser humano reemplaza a la naturaleza durante el proceso de polinización, para controlar la producción. Este método se utiliza por dos motivos: Si hay presencia de escasez de agentes polinizadores naturales en un cultivo, o si se desea evitar cambios en las características específicas de una determinada planta. Para garantizar esté método, se embolsan las flores para con ello evitar la presencia de otros agentes, luego se procede a recoger el polen del estambre para luego trasladarlo hacia el estigma, por último, se vuelva a cubrir la flor hasta que se efectúe la fecundación [8].



*Figura 1. 4. Método de polinización artificial [8]*

## 1.3.4 POLINIZACIÓN CRUZADA

Polinización cruzada se genera cuando el polen es transportado de una planta a otra a través de un agente externo de tipo biótico o abiótico, tales como abejas, mariposas, avispas, colibríes o murciélagos. Dicha polinización es necesaria cuando los órganos femeninos y masculinos no se encuentran en la misma especie, o cuando aparecen en diferentes etapas del crecimiento. Algunos ejemplos son el girasol, los melones y el almendro [8].



## **1.4 TÉCNICAS DE POLINIZACIÓN**

Las técnicas de polinización principalmente varían dependiendo del tipo de siembra del cultivo, por ejemplo, si el cultivo es a campo abierto, el viento es un buen aliado ya que puede impulsar los granos de polen entre las plantas; sin embargo, si el cultivo es en invernadero, este proceso requiere alguna intervención de un ente externo, debido al poco viento y a la humedad relativa en la que se da el crecimiento de la planta [9].

### **1.4.1 USO DE ABEJORROS**

Para este tipo de técnica los abejorros son excelentes polinizadores, en especial para cultivos de tomate de invernadero, debido a que ellos saben cuándo salir a polinizar. Primeramente, agarran la flor con las partes de la boca para alimentarse, haciendo vibrar la flor y por ende provoca que el polen caiga sobre el estigma, logrando una polinización eficaz [9][28].

### **1.4.2 USO DE SOPLADORAS**

En este tipo de técnica se implementan sopladoras que generalmente se usan para barrer hojas, que al combinarlas con una velocidad normal flujo de aire son útiles para polinizar las flores de las plantas de tomates. Dichas técnicas consisten en proporcionar una corriente de aire a los ramilletes de flores a una distancia de entre 2 a 2.5 metros de distancia para evitar que el aire disperse el polen por completo, el procedimiento se aplica durante 5 a 10 segundos. Se recomienda que el soplador se emplee de 4 a 7 veces por semana para garantizar que la calidad del fruto. Esta técnica es de fácil implementación ya que cualquier persona que pueda sostener y apuntar el soplador es apta para realizar la actividad. Se recomienda evitar el uso de sopladores que funcionen con gasolina para evitar la toxicidad por etileno en las plantas [9] [28].

### **1.4.3 POLINIZACIÓN MANUAL**

Esta técnica se refiere al uso de hilos o cables, en donde los trabajadores hacen vibrar por medio de los cables a las plantas y por ende los ramilletes de flores, permitiendo que el polen se desprenda y caiga sobre el estigma. En esta técnica es recomendable hacer el proceso diariamente o al menos 3 días por semana. Actualmente es la técnica más económica, ya que no implica el uso de equipos o insectos, pero se limita el uso solo a cultivos de pequeños productores [9][28].



## 1.4.4 VIBRADOR ELÉCTRICO

En esta técnica se utilizan vibradores alimentados por pilas los cuales se colocan en contacto con el tallo del ramillete de flores durante unos segundos. Dicha vibración genera que la flor pueda liberar suficiente polen para que pueda llegar hasta el estigma y por ende se fertilicen los óvulos. En la actualidad los vibradores se pueden comprar en tiendas de suministros para invernaderos, pero representan un costo extra en adquisición y en jornales extras. Se recomienda la implementación solo en cultivos de agricultores pequeños [9][28].

Por otra parte, en los cultivos bajo invernadero, los agricultores hacen una vibración de la planta golpeando el sistema de tutorado. Otros productores no toman ninguna medida para mejorar la calidad de la polinización. En una evaluación hecha en un invernadero de diseño tradicional en la Sabana de Bogotá con la variedad Boris, se encontró que el peso individual de frutos aumentó de 112 a 137 g con el sistema de vibración de las plantas comparando con un tratamiento sin polinización [29].

## 1.4.5 APLICACIÓN DE HORMONAS

En la aplicación de hormonas, principalmente, se utilizan de tipo auxinas. Las hormonas auxinas son empleadas comercialmente en la prevención de la caída de frutos y hojas, ayuda a la estimulación de la floración, la inducción de frutos partenocárpicos sin fertilización de los óvulos y al llenado de la fruta. Se recomienda que las aplicaciones se realicen cuando la planta presente de 2 a 3 flores abiertas en el primer ramillete, por otra parte, no es viable realizar más de tres aplicaciones durante el ciclo del cultivo, debido a que el exceso de hormonas puede provocar daños en la planta y por ende en el cultivo. Es importante conocer que los frutos que se generan como resultado de esta práctica con hormonas no tendrán presencia de semillas [9].

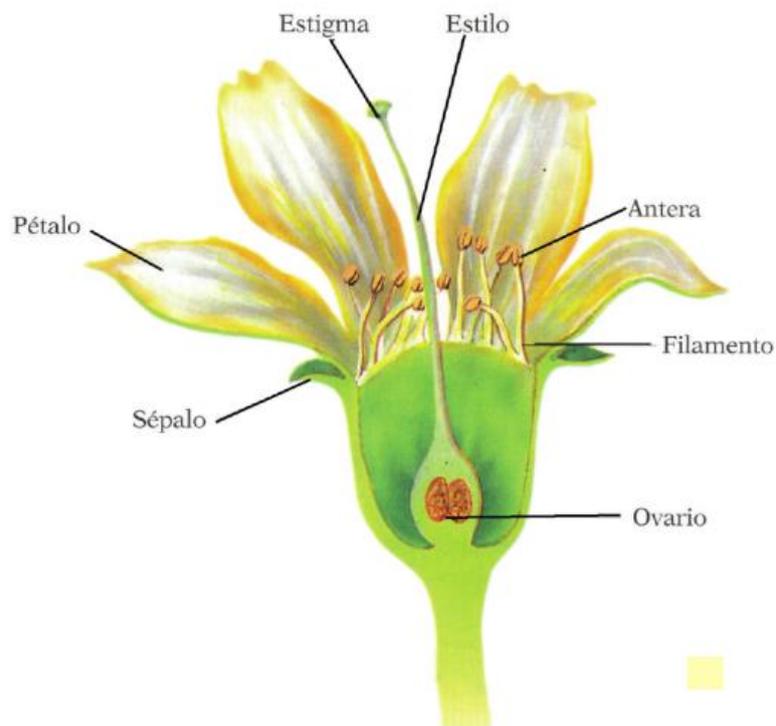
## 1.5 MORFOLOGÍA DE LA FLOR

En palabras generales la flor es el órgano de las plantas, encargada de la producción de células sexuales o gametos, es decir, de la reproducción gámica. Lo que la hace perfectamente adaptada en todo el sentido de la palabra. Se dice que no existe flor en el sentido estricto sin órganos sexuales. La flor es el indicio del fruto e indicadora en gran parte de las condiciones fitosanitarias de la planta. Comúnmente ocupa una posición periférica, o se hace visible fácilmente después de la defoliación natural de algunas plantas. “Es el rostro de la planta”.



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Por otra parte, a pesar de su breve y frágil estructura, la flor debe producir óvulos y polen, asegurar la fertilización y nutrir al embrión hasta la madurez de la semilla, equipándola para vivir en un nuevo medio. Todas las angiospermas desde los árboles hasta las hierbas más simples, producen flores; aunque muchas especies no lo parecen, o están se encuentran en medio o condiciones que no les son favorables para la floración. Algunas plantas florecen en determinadas etapas vegetativas, otras necesitan condiciones singulares de iluminación, temperatura y duración del día. La flor se desarrolla a partir de una yema florífera o florar, es por eso que se dice que la flor es un conjunto de antófilos u hojas modificadas las cuales cumplen funciones específicas para conservar la especie en la naturaleza y a asegurar su capacidad adaptativa durante el proceso evolutivo. Es importante saber que una flor es completa cuando dicha flor conste de cuatro partes tales como: El cáliz, la corola, el androceo y el gineceo. La Figura 1. 5 representa gráficamente las piezas de una flor hermafrodita completa en sección longitudinal, donde se muestran las principales estructuras que constituyen a una flor a partir del receptáculo en un orden de abajo hacia arriba, y de afuera hacia el centro de la flor [27].



*Figura 1. 5. Partes de la flor [27]*



### 1.5.1 PEDÚNCULO

El pedúnculo es el filamento que une la flor al tallo y el cual soporta en su extremo los verticilos (conjunto de ramas, hojas, flores o pétalos). Cuando la flor posee pedúnculo manifiesto se llama pedunculada, y cuando carece de él se llama sésil. El pedúnculo puede ser de forma redondeada como sucede en la gran mayoría de flores, o adquirir cualquier forma según a el tallo, debido a que se comporta como un entrenudo. Su solides generalmente es de tipo herbácea, aunque en algunas especies se torna semileñoso, generalmente cuando soporta frutos de gran tamaño. Por otra parte, la textura del pedúnculo frecuentemente es lisa con presencia de vellosidades que lo hacen piloso en diferentes grados, e hirsuto. En la Figura 1. 6 se observa el esquema de una flor de forma general en donde se destaca el pedúnculo, y en la Figura 1. 7 se observa el esquema de la flor de tomate en donde también se destaca el pedúnculo el cual empieza donde termina el receptáculo [27].



*Figura 1. 6. Esquema de la flor en donde se destaca el pedúnculo [27]*



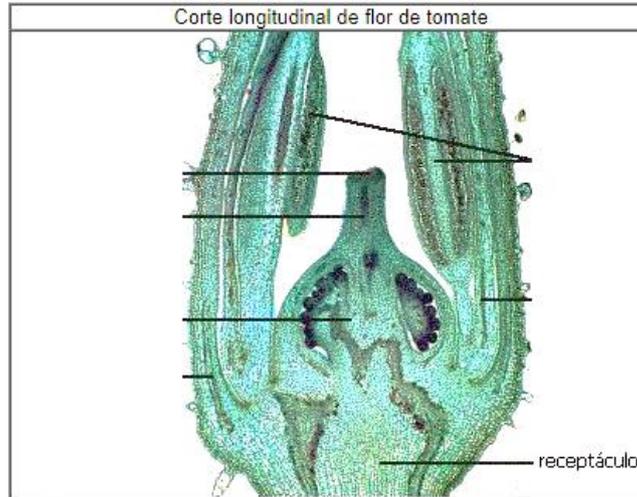


Figura 1. 7. Esquema de la flor en donde se destaca el pedúnculo el cual empieza donde termina el receptáculo [10]

### 1.5.2 EL CÁLIZ

El cáliz o comúnmente conocido como capullo o botón floral se compone de sépalos que son antófilos estériles, generalmente verdes y de consistencia herbácea, encargado de proteger la corola en particular en la yema, además de realizar la fotosíntesis o también ayudar a la corola a cumplir funciones de atracción de agentes polinizadores, especialmente cuando es grande, coloreado y llamativo. En la Figura 1. 8 se muestra donde se encuentra ubicado el cáliz en la flor de tomate [27].

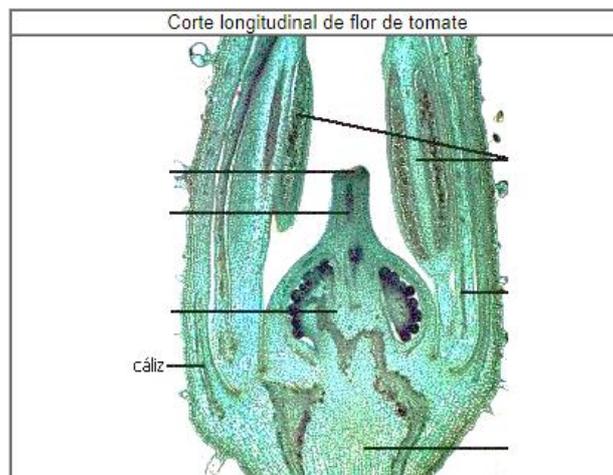


Figura 1. 8. Esquema de la flor de tomate en donde se destaca el cáliz [10].



## 1.5.3 COROLA

La corola o corona pequeña del latín (corolla) es el verticilo interno del perianto de flores heteroclamídeas, de textura más fina que el cáliz y de colores más brillantes y notablemente diferenciado, en especial en las flores entomógamas, es decir que se polinizan por medio de insectos. Por otra parte, la corola también sirve como órgano de protección de los estambres y el gineceo, en sus pétalos se producen sustancias azucaradas las cuales atraen agentes polinizadores [27].

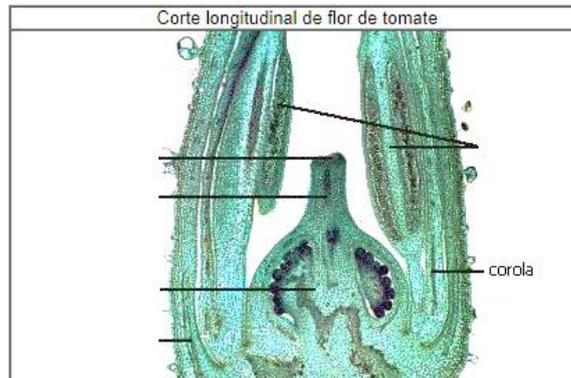


Figura 1. 9. Esquema de la flor de tomate en donde se destaca la corola [10]

## 1.5.4 EL ANDROCEO

El androceo es el conjunto de estambres y partes del mismo, y en una flor hermafrodita es el verticilo floral o el primer verticilo fundamental, el cual desempeña el papel masculino en la planta, debido a que es el órgano portador de los gametos masculinos o microsporas que reciben el nombre de corriente de polen. Por otra parte, cada estambre consta de dos partes: El filamento y la antera. En la Figura 1. 10 se muestra la ubicación del estambre dentro de la flor de tomate [27].

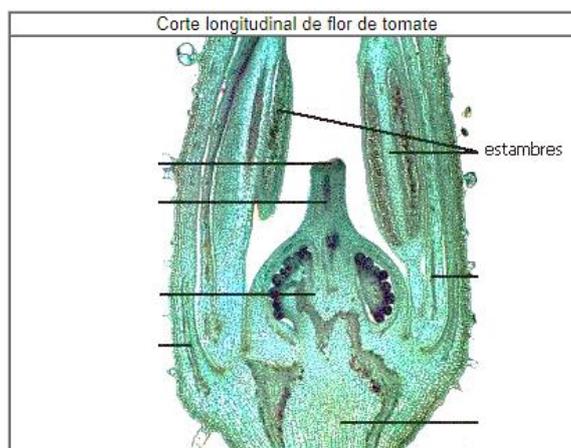


Figura 1. 10. Esquema de la flor de tomate donde se encuentra el estambre [10]



#### 1.5.4.1 EL FILAMENTO

Los filamentos de los estambres son ocasionalmente de forma acircular, pero en otras ocasiones toman una forma aplanada. Muchos filamentos poseen vellosidades de mayor a menor abundancia y toman el nombre de pilosos o pubescentes; otros llegan a transformarse en formaciones hojosas coloreadas semejantes a las de un pétalo de menor tamaño [27].

#### 1.5.4.2 LA ANTERA

La antera es la parte abultada del estambre, la cual se encuentra en el extremo del filamento y contiene el polen. Cada antera es una agrupación de sacos portadores de microsporas. En otras palabras, la mayoría de las plantas posee anteras divididas en dos lóbulos, en donde cada lóbulo es llamado teca [27].

#### 1.5.5 EL GINECEO

El gineceo es agrupación de órganos femeninos de la flor, formado por los carpelos, los cuales son megasporofilos plegados longitudinalmente de forma que en su interior contienen uno o más primordios seminales. Por otra parte, el gineceo está formado por una o varias hojas carpelares libres o unidas entre sí. En ocasiones el gineceo puede carecer de estilo, entonces el estigma actúa directamente sobre el ovario y se le denomina estigma sésil. Dentro del gineceo se pueden encontrar diferentes elementos: Estigma, estilo y ovario [11]. En la Figura 1. 11 se observa donde se encuentra ubicado el gineceo dentro de una flor de tomate.

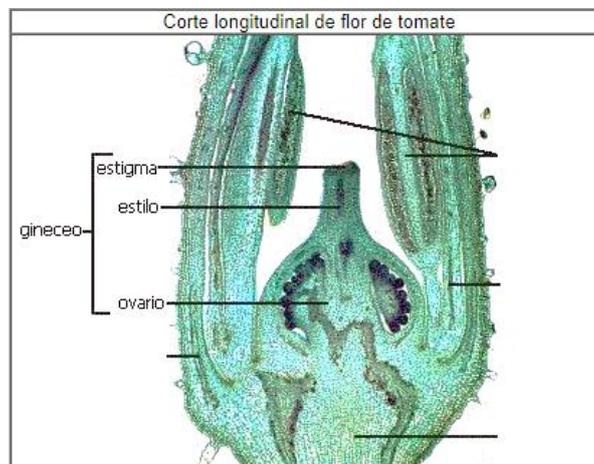


Figura 1. 11. Esquema de la flor de tomate donde se encuentra el gineceo [10]



### 1.5.5.1 ESTIGMA

Es el encargado de captar el polen y donde se va formando el tubo polínico el cual actúa como un transporte de los gametos masculinos desde el grano de polen hasta el óvulo. El estigma puede presentar en ocasiones modificaciones como pelos o superficies pegajosas para ayudar a la captación del polen [12].

### 1.5.5.2 ESTILO

Es la estructura tubular formada por el pliegue de un carpelo o por fusión de varios carpelos. Es el encargado de unir el estigma con el ovulo y su longitud puede variar desde muy corto a muy largo, e incluso en ocasiones puede no existir en algunas especies. Cuando no existe el estilo se dice que el estigma es sécil (carece de pedúnculo). La función del estilo es permitir el paso del tubo polínico, el cual se genera cuando el polen se adhiere al estigma que luego de germinar produce dicho tubo polínico [12].

### 1.5.5.3 OVARIO

Es una porción de la base de un carpelo único, o de varios carpelos fusionados, el cual puede contener uno o más óvulos. Dentro del ovario ocurre la polinización y los óvulos que son fecundados se transforman en semillas. Luego de la polinización el ovario crece y se transforma para luego convertirse en el fruto o en una parte del mismo [12].

## 1.6 SENSOR ULTRASÓNICO (SONAR- BERO- 3RG6012-3AD00)

El sensor ultrasónico es un dispositivo el cual realiza medición mediante el uso de ondas ultrasónicas y basándose en principios acústicos. Dicho sensor emite pulsaciones acústicas cortas a través del aire y de esta forma detecta objetos que después reflejará. En otras palabras, el sensor mide el tiempo entre la emisión del pulso y la recepción del mismo. Los sensores ultrasónicos abarcan sectores tales como: Alimentación y bebidas, materiales de construcción, agricultura, medición de nivel, entre otros. En el caso del sonar-Bero, este detecta sin contacto objetos a distancias hasta 300 mm. trabaja sólo en el aire y permite detectar objetos con diferentes formas, colores, superficies y materiales. Los materiales pueden ser sólidos, líquidos o pulverulentos (sólo el reflector debe reflejar el sonido). Para poder funcionar, el sensor requiere un reflector que refleje el sonido y cuya distancia puede registrarse en el modo de aprendizaje, formando una tolerancia de 20 mm de ancho alrededor del reflector. La distancia



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

del reflector (valor Teach) menos el ancho de la tolerancia da como resultado la zona de detección aprovechable. Los objetos que caen dentro de dicha zona provocan un cambio en la salida. No es necesario habilitar ninguna zona muerta. El color y la luminosidad ambiental carecen de efecto [13].

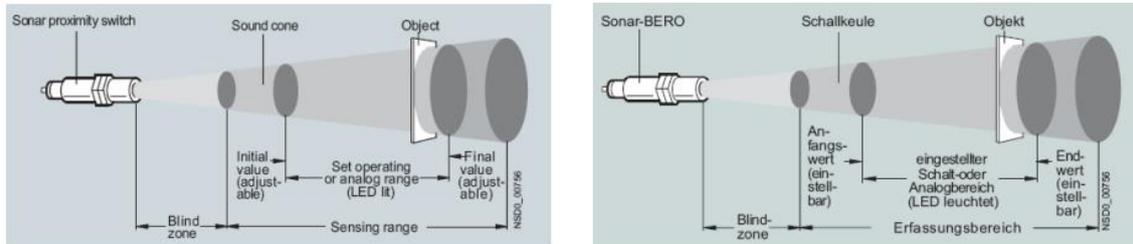


Figura 1. 12. Zonas de operación del sonar-BERO [14].

### 1.7 OPTO ACOPLADOR

Un opto acoplador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción, el cual funciona como interruptor activado por medio de luz que es emitida por un diodo led el cual satura el componente opto electrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. Combinándose en un solo dispositivo semiconductor, en donde se encuentra un foto emisor y foto receptor, cuya conexión entre ambos es óptica. Generalmente estos elementos se encuentran en un capsulado del tipo DIP y se usan para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles. El PC817B es un opto acoplador fototransistorizado con salida de transistor tipo NPN de 1 canal y 4 pines ópticamente acoplados a un diodo emisor de infrarrojos de arseniuro de galio el cual debido a sus especificaciones es ideal para la etapa de control del sonar y la etapa de potencia. En la Figura 1. 13 se muestra el encapsulado del pc817 junto con su diagrama general [15].

- Tipo salida opto acoplador: Transistor NPN
- Número de canales: 1
- Tensión de aislamiento: 5 kV
- Corriente directa  $I_f$  máxima: 50 mA
- Voltaje colector-emisor  $V_{(br) ceo}$ : 35 V
- Temperatura de operación mínima: -55 °C
- Temperatura de operación máxima: 100 °C
- CTE mínimo: 100 %
- Encapsulado: DIP
- Número de pines: 4



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

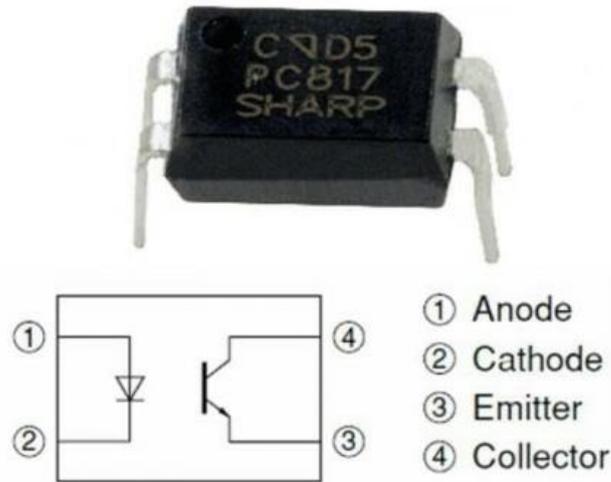


Figura 1. 13. Pc817 con su diagrama general a salida opto transistor [16]

## 1.8 TRANSISTOR DARLINGTON

En electrónica, el transistor Darlington es como un dispositivo semiconductor, el cual combina dos transistores bipolares en una configuración de tipo Darlington integrado, en ocasiones es llamado par Darlington. Dicha configuración de transistores permite que la corriente amplificada por el primer transistor ingrese a la base del segundo transistor para luego ser amplificada nuevamente. Por otra parte, el transistor Darlington se comporta como un transistor ordinario, es decir, también posee base, colector, emisor y puede ser considerado como un único transistor con una ganancia de corriente equivalente  $\beta_{\text{Darlington}}$ . La ganancia del transistor Darlington es aproximadamente el producto de las internas de los transistores que lo componen [17].

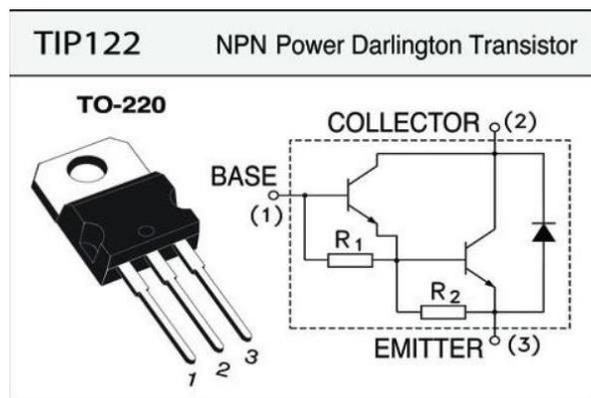


Figura 1. 14. Esquema de transistor Darlington integrado Tip122 [17]



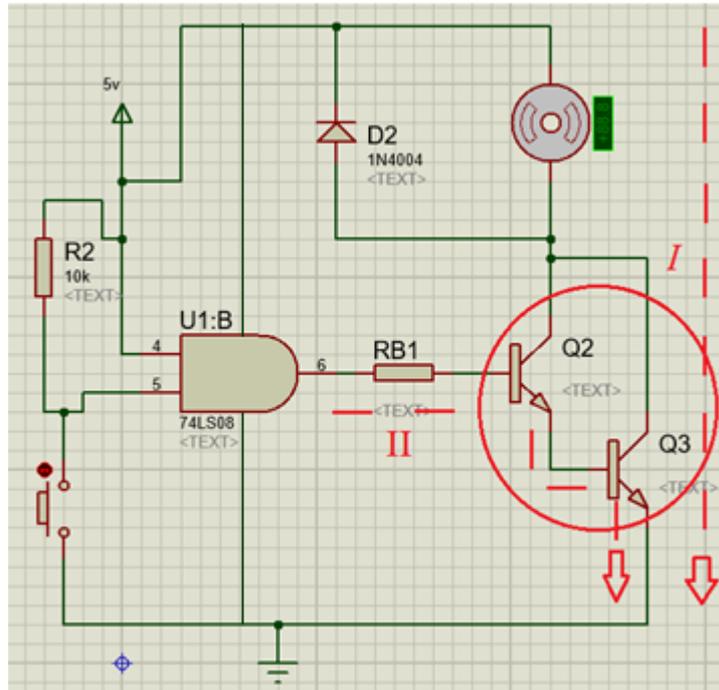


Figura 1. 15. Conexión transistor Darlington integrado Tip122 [Autor].

## 1.8.1 CÁLCULOS: DARLINGTON TIP122

En la Figura 1. 15 se observa la conexión que normalmente se realiza en el transistor Darlington, cuya conexión es importante para realizar los respectivos cálculos de sus ecuaciones características.

Principalmente se realiza un LVK en la malla 1: El transistor trabaja en modo saturación

- $-V^+ + V_m + V_{CE} = 0$  Ecuación 1.1
- $V_{CE} = V^+ - V_m$  Ecuación 1.2
- $0 V \leq V_{CE} < V_{CEsat}$  Ecuación 1.3

Luego se realiza una LVK en la malla II:

- $-V_{OH} + I_B R_B + V_{BE} = 0$  Ecuación 1.4
- $I_B = \frac{V_{OH} - V_{BE}}{R_B}$  Ecuación 1.5



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Debido a que el transistor conduce en saturación se obtiene:

- $\frac{I_a}{I_B} < B$  Ecuación 1.6

- $\frac{I_a}{\frac{V_{OH}-V_{BE}}{R_B}} < B$  Ecuación 1.7

- $I_a < B \left[ \frac{V_{OH}-V_{BE}}{R_B} \right]$  Ecuación 1.8

- $0 \Omega < R_B < B \left[ \frac{V_{OH}-V_{BE}}{I_a} \right]$  Ecuación 1.9

### 1.9 BATERÍAS DE IONES DE LITIO

Las baterías de iones de litio, o también conocidas como baterías de Li-Ion, son dispositivos diseñados para el almacenamiento de energía, las cuales utilizan sal de litio como electrolito para así garantizar los iones necesarios para la reacción electroquímica que se origina entre el cátodo y el ánodo. Debido a que las baterías de litio en su mayoría son costosas y en general la referencia de 24 voltios, se utilizaron celdas 18650 recicladas que provienen de baterías de portátiles que “tienen obsolescencia programa”, y se agruparon en una configuración de 6s, lo que significa que se agruparon 6 pares de 2 celdas en paralelo, para luego conectar los 6 pares en serie y así conseguir un voltaje máximo de 24.5 V con aproximadamente 3000 mAh como se observa en la Figura 1. 17.



Figura 1. 16. Celda de Li-Ion ICR18650 a 3.7v nominales y 2600 mAh nominales [Autor].



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez

**Director:** Diego Alfonso Peláez

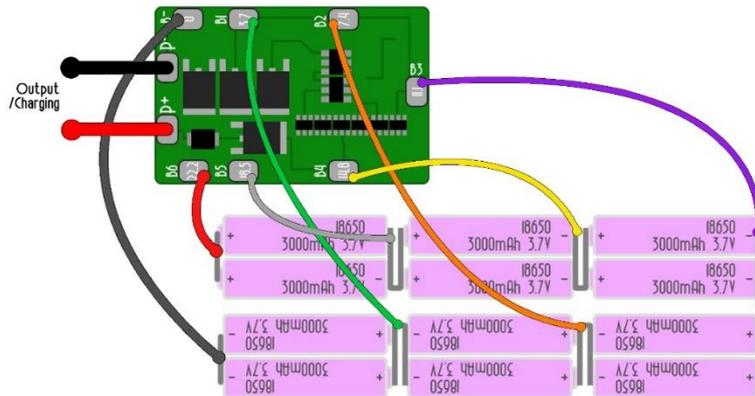


Figura 1. 17. Esquema de conexión para la configuración 6s 24.5 Vmax con Bms balanceador [18].

## 1.10 BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)

Un sistema de gestión de baterías (BMS) es un dispositivo electrónico indispensable en el uso de baterías de litio para auto consumo, el cual controla las cargas y descargas en base a estos parámetros: 1. Puede apagar o desconectar la carga cuando la tensión de alguna celda de la batería cae por debajo de 2.5 V. 2. Detiene el proceso de carga cuando la tensión de alguna celda sobrepasa los 4.2 voltios. 3. Es capaz de apagar el sistema si la de temperatura de las celdas excede los 50° C [21].

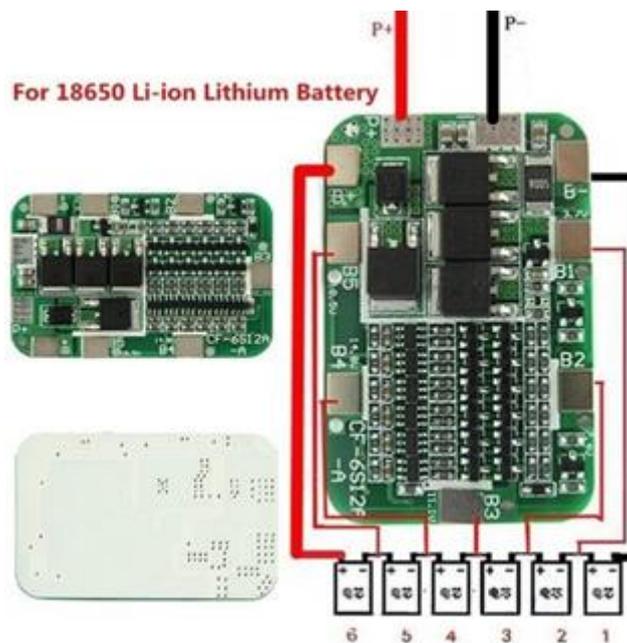


Figura 1. 18. Esquema BMS para celdas 18659 Li-Ion 6s [21]



## 1.11 COOLER

En el campo informático el cooler para pc es una pieza indispensable, ya que este se encarga de mantener la temperatura del equipo en un estado ideal, con el objetivo de que las altas temperaturas que producen los ordenadores no afecten con la estabilidad de los componentes internos. En este trabajo no se pretende utilizar el cooler como un componente de usos informático. Por ende, su uso está enfocado a utilizarlo como un dispositivo dispersor el cual se encargará de focalizar el polen de flor hacia el estigma de la misma, para así efectuar el proceso de fertilización [22].



Figura 1. 19. Esquema de un cooler común [22]

## 1.12 ARDUINO NANO

El Arduino Nano es una pequeña placa pequeña, completa y compatible con la placa de pruebas basada en ATmega328. Posee más o menos la misma funcionalidad del arduino de Duemilanove, pero en un paquete diferente. Las características de la placa son: Es pequeña, flexible y de fácil uso, esencial para la implementación del prototipo. Posee Una tensión de alimentación de 5v, pero la tensión de entrada puede variar de 7 a 12V. Posee 14 pines digitales, 8 analógicos, 2 pines de reinicio y 6 pines de potencias (Vcc y GND). Con respecto a los pines analógicos y digitales, estos poseen varias funciones extras tales como `pinMode()`, `digitalWrite()` y `analogRead()` para los analógicos. Su consumo



# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

de energía es de 19 mA y su tamaño e de 18x45mm con un peso ideal de solo 7 gramos [23].

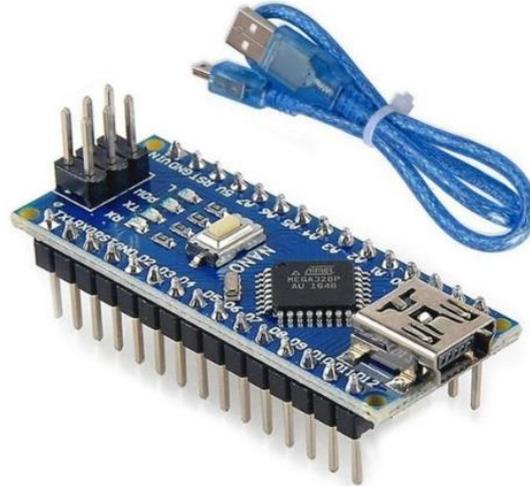


Figura 1. 20. Esquema de Arduino Nano [23]

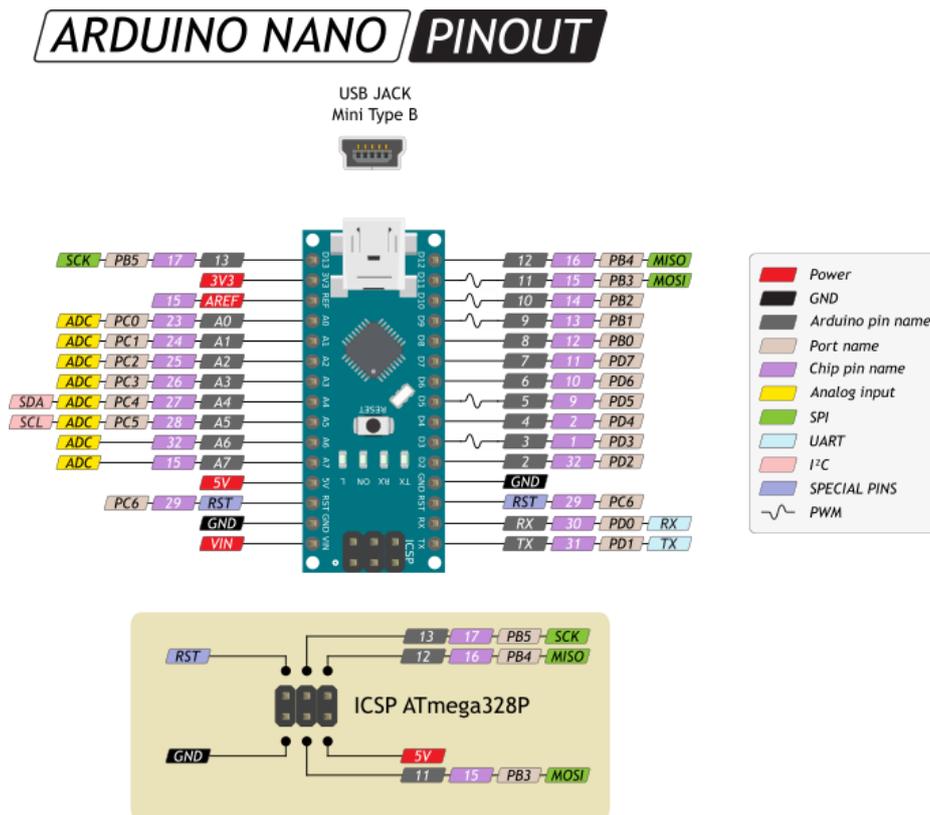


Figura 1. 21. Esquema Pinout y Datasheet [23]



### 1.13 BASTÓN CANADIENSE DE CODERA INTEGRAL

Es un dispositivo el cual sirve para facilitar la movilidad, aumentando la estabilidad y con ellos mejorando el equilibrio, además ayuda a reducir la carga sobre la extremidad inferior. Actualmente en el mercado existen diversos modelos de bastones, de los cuales se eligió el bastón tipo codera integral el cual tiene unas características ideales tales como: caña de aluminio ligero, posee un diseño ergonómico que facilita una adecuada sujeción y confort, cuenta con una abrazadera y manigueta de plástico integrados en una sola pieza, tiene una altura la cual es regulable hasta 3 tallas [24].



Figura 1. 22. Bastón de codera integral [25]

### 1.14 TP4056

El TP4056 potente cargador lineal de corriente constante ideal para baterías de iones de litio de una sola célula. Su paquete SOP y el bajo número de componentes externos lo convierten en un dispositivo útil para aplicaciones portátiles. Éste componente no requiere un diodo de bloqueo, debido a su arquitectura interna se evitan las cargas de corriente negativa. Posee una retroalimentación térmica que regula la corriente de carga de las celdas. El voltaje de corte es fijado a 4.2V y la corriente de carga puede ser programada externamente con una sola resistencia [19].

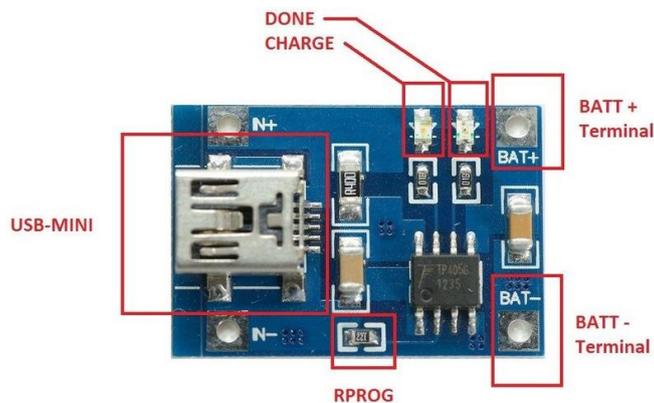


Figura 1. 23. Esquema del TP4056 sus partes [20]



## 1.15 REGULADOR DE TENSIÓN 7812

El regulador de tensión 7812 está diseñado principalmente para proveer una tensión fija. Estos reguladores pueden ser utilizados con componentes externos para adquirir voltajes y corrientes ajustables. Una característica de este elemento es que dispone de protección térmica y restricción de corriente por si se producen cortocircuitos, esto hace que si en algún momento se sobrepasen las características constructivas el regulador de tensión queda protegido [26].

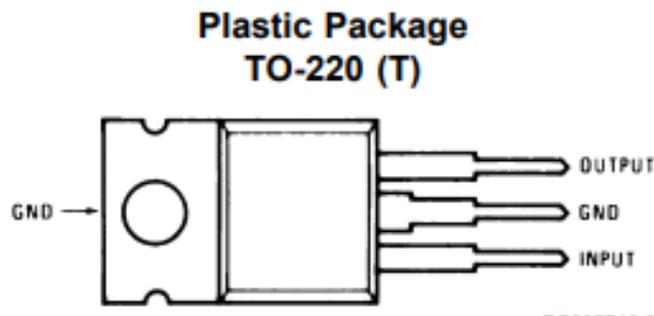


Figura 1. 24. Encapsulado del regulador 7812CT [26]

## 1.16 ESTADO DEL ARTE

### 1.16.1 Polinización de manzana: Una vista

En el artículo los autores Fernando Ramírez y Thomas Lee hablan sobre la polinización de manzanas con irradiación de polen y la polinización artificial, en la cual el polen es espolvoreado sobre la parte superior del árbol de manzana el cual cae sobre una corriente ascendiente producida por un actuador que cumple la función de rociador de aire. Por otra parte, se habla de que algunos productores usan helicópteros para aplicar el polen por el aire luego de mezclarlo con un diluyente adecuado [31].

### 1.16.2 Polinizadores artificiales diseñados materialmente

En este artículo los autores Svetlana A. Chechetka, Yue Yu, Masayoshi Tange y Eijiro Miyako hablan sobre la crisis de polinización a nivel global ya que es un tema crítico para el medio ambiente natural y nuestras vidas. Advierten que es urgente desarrollar una herramienta innovadora de polinización que no requiera tiempo y esfuerzo para lograr la polinización con una alta tasa de éxito. Es por eso que para demostrar uso de esas nuevas herramientas utilizaron



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

funcionalidades en la polinización, utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV) como polinizador artificial de ingeniería material. También se utilizó un pequeño UAV comercialmente controlable de forma inalámbrica (longitud, 42 mm; ancho, 42 mm; distancia al centro, 32 mm; altura, 22 mm; y peso, 14,8 g) el cual que estaba equipado con un sensor giroscópico de seis ejes y cuatro hélices. Los pelos de los animales fueron alineados verticalmente uniéndolos a la parte posterior del UAV con cinta adhesiva de doble cara. Estos pelos no impidieron el lanzamiento del polinizador artificial. De hecho, el polinizador podría despegar fácilmente verticalmente desde una plataforma de lanzamiento a base de vidrio. El movimiento del polinizador artificial podría controlarse fácilmente con un simple controlador de ondas de radio [32].

### 1.16.3 Polinización asistida en palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores

En el artículo los autores hablan sobre un proyecto realizado en el llano colombiano, dirigido a la palma de aceite. Particularmente la opción de polinización se realizó mecánicamente a partir de un polinizador robotizado desarrollado en el laboratorio de micro robótica de la Universidad de Harvard. Por otra parte, debatió el tema debido a que cualquier alternativa similar implica costos o externalidades no calculadas, que tendrán implicación en el bienestar humano por el alto valor que probablemente deberán asumir los consumidores para la adquisición de los productos obtenidos de estos procesos de polinización artificial, si acaso la población tiene cómo pagarlos o está dispuesta a hacerlo [33].

### 1.16.4 Desarrollo del sistema de polinización de fresa mediante presión de radiación ultrasónica

En este artículo los autores Hiroshi Shimizu y Taito Sato hablan sobre el desarrollo de una investigación en la cual proponen un sistema de polinización artificial usando el ultrasonido y una cámara 3D como un nuevo método de polinización para resolver los problemas de polinización acusa de las pérdidas de colmenas de abejas. Por otra parte, explican que las ondas sonoras generan presión a través de la radiación acústica permitiendo ejercer fuerzas sobre los objetos. En el caso de las flores de la planta, permite generar vibraciones ayudando a desprender el polen y mejorando la polinización. Gracias a esa a esas propiedades desarrollaron un dispositivo de enfoque ultrasónico.

Dicho dispositivo se constituía por una cámara 3D la cual recolectaba información de la distancia, además de una imagen en color. Luego combinando la cámara 3D con el dispositivo ultrasonido de enfoque, lograron crear un



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez

**Director:** Diego Alfonso Peláez

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

dispositivo que irradia ondas ultrasónicas a coordenadas específicas en el espacio y vibra. Como resultado el sistema desarrollado se logró reconocer las flores de fresa con la cámara 3D para luego irradiar la onda ultrasónica del dispositivo de enfoque ultrasónico a la información de posición obtenida y así poder hacer vibrar las flores y polinizarlas [34].



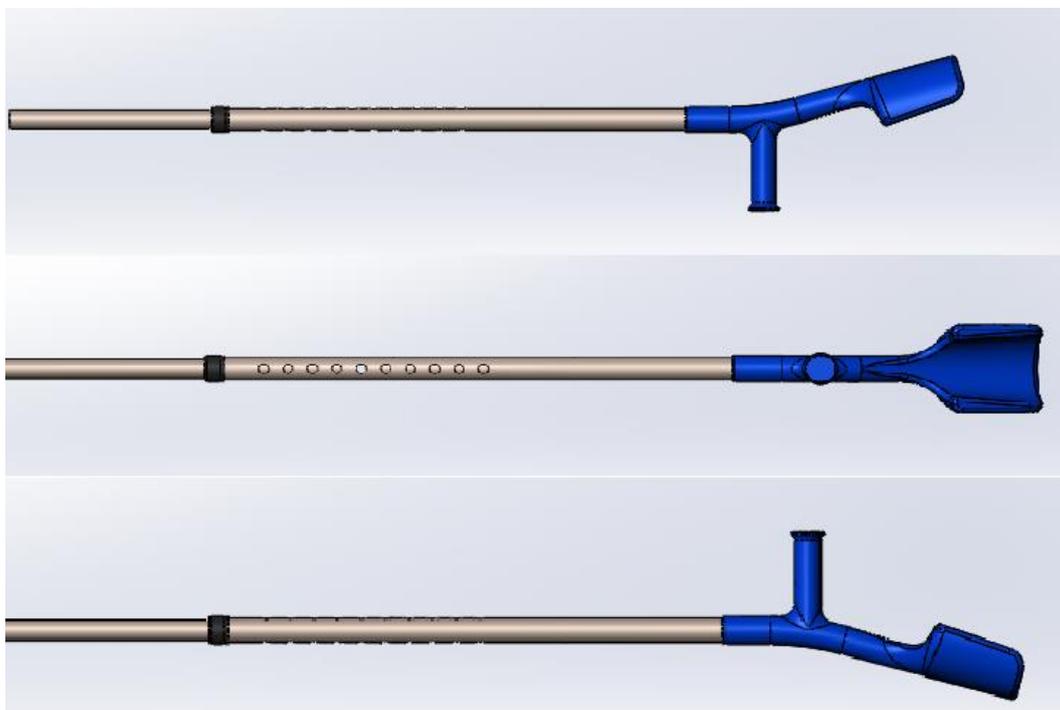
# CAPÍTULO 2



## 2 Diseño del sistema polinizador en cultivos de tomate mediante radiación ultrasónica.

En este capítulo se describen las etapas necesarias para el diseño del prototipo polinizador, partiendo desde la selección de la columna vertebral del sistema, el diseño de la etapa de control, diseño del Power Bank y el diseño del soporte del sonar y los coolers con el respectivo diseño del acople.

En el diseño del prototipo la recopilación de información sobre las técnicas de polinización utilizadas es de vital importancia, debido a que con esa información se inicia el dimensionamiento del diseño. Partiendo de la necesidad de crear un dispositivo ergonómico, liviano, capaz de brindar buenas prácticas de manejo y capaz de mejorar la técnica de polinización, impulsando el agro Colombia hacia la industria 4.0. En la búsqueda de un sistema que fuese ergonómico y liviano se encontró que el bastón de codera integral era ideal ya que cumplía con los requerimientos. Su sistema ergonómico permite al usuario apoyar la parte inferior del ante brazo y gracias a su empuñadura de plástico permite buena sujeción y confort, por ende, se procedió a plasmar un diseño del mismo en el software Solidworks. En la Figura 1. 25 se observa el diseño del bastón realizado en el software. Dicho prototipo posee un sonar ultrasónico el cual puede contralorar la distancia de aplicación y simula la frecuencia de zumbido que emite las abejas o abejorros al posarse sobre una flor, para luego accionar un banco de Coolers encargados de esparcir el polen y llevarlo hacia el estigma de la flor. En la Figura 1. 26 se observa la composición en general del sistema. El prototipo es de acción no invasiva.



*Figura 1. 25. Bastón de codera integral visto desde tres perfiles [Autor].*





Figura 1. 26. Bastón de codera integral visto desde tres perfiles con el acople del sonar y el banco de coolers [Autor].

## 2.1 DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL

El diseño de la etapa de control se dividió en tres etapas: Simulación en el software Proteus, Conexión del diagrama Schematic en el software Eagle y por último el diseño de la PCB en el software Eagle. La etapa de control para la conexión del sonar Bero fue acondicionado utilizando un opto acoplador de referencia PC817 el cual permite separar la conexión del sonar alimentado con una tensión de 24V de la etapa de potencia del sistema. Para la etapa de potencia se utilizó un transistor Darlington integrado de referencia TIP122 el cual al entrar en modo saturación permite el flujo de corriente y así accionar los Coolers por un tiempo de 5 a 10 segundos controlado por el arduino Nano.

### 2.1.1 CÁLCULOS TRANSISTOR DARLINGTON

Tabla 1. Especificaciones Darlington Tip122

Especificaciones Transistor TIP122	
$\beta(\max)$	1.000
$V_{BE(on)}$	2.5 V
$V_{CE(Sat)}$	2 V
$I_C(\max)$	5 A
$T_{jmax}$	150° C
$R\theta_{ja}$	62.5
PD	0.52 W
$T_a$	25° C



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Tabla 2. Especificaciones del motor (Coolers)

Especificaciones del motor	
IA	196 mA
IN	175 mA
Vm	12 V

Tabla 3. Especificaciones de la salida digital

Especificaciones de la salida digital	
VOH	4.5 a 5 V
IOH	0.8 mA

- Utilizando las ecuaciones de la LVK en la malla I ubicados en la sección 1.8.1 se obtiene: El transistor trabaja en modo saturación.

$$-V^+ + V_m + V_{CE} = 0$$

$$-12 V + 12 V + V_{CE} = 0$$

- ✓ Se despeja VCE

$$V_{CE} = 12 V - 12 V$$

$$V_{CE} = 0 V$$

$$0 V \leq V_{CE} < V_{CEsat}$$

- Luego con las ecuaciones de la LVK en la malla II de la sección 1.8.1 se obtiene:

$$-V_{OH} + I_B R_B + V_{BE} = 0$$

- ✓ Se despeja IB

$$I_B = \frac{V_{OH} - V_{BE}}{R_B}$$

- ✓ Como el Bjt conduce en saturación entonces:

$$\frac{I_a}{I_B} < B$$

$$\frac{I_a}{\frac{V_{OH} - V_{BE}}{R_B}} < B$$

$$I_a < B \left[ \frac{V_{OH} - V_{BE}}{R_B} \right]$$



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

$$0 \Omega < R_B < B \left[ \frac{V_{OH} - V_{BE}}{I_a} \right]$$

$$0 \Omega < R_B < 1000 \left[ \frac{5V - 2.5V}{196 \text{ mA}} \right]$$

$$0 \Omega < R_B < 12.7 \text{ K}\Omega$$

✓ Se estima  $R_B$  5,4 k $\Omega$  según el rango.

✓ Luego se debe cumplir que  $I_B > 0 \text{ A}$ .

$$I_B = \frac{5 \text{ V} - 2.5 \text{ V}}{5400 \Omega}$$

$$I_B = 0,46 \text{ mA}$$

➤ Condiciones para la selección del diodo.

$$V_{RD} > V_m$$

$$I_{Dmax} > I_a$$

✓ Con respecto las condiciones de selección se utilizó el diodo 1N4004 el cual cumple con los parámetros.

$$V_{RD} = 400 \text{ V}$$

$$I_{Dmax} = 1 \text{ A}$$

➤ Condiciones para la selección del transistor Darlington:

$$I_{Cmax} > I_a$$

$$V_{CEo} > V_m$$

➤ Con respecto a las condiciones del transistor Darlington se utilizó el TIP122.

$$I_{Cmax} = 5 \text{ A}$$

$$V_{CEo} = 100 \text{ V}$$

Otra razón del porque se utilizó el transistor Darlington integrado fue porque a pesar de existir variedad en las referencias del integrado el TIP122 este cuenta con un diodo adicional y un par de resistencias con pines de protección. Además de que ocupa menos espacio.

➤ Criterios para decidir que el componente electrónico no requiera disipador:

$$0 \leq \frac{T_j}{T_{jmax}} \leq 0,5$$



---

**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez

**Director:** Diego Alfonso Peláez

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

$$0 \leq \frac{T_a + P_d R_{\theta ja}}{T_{jmax}} \leq 0,5$$

$$0 \leq \frac{25 + (0.52 * 62.5)}{150} \leq 0,5$$

$$0 \leq 0.383 \leq 0,5$$

- Con respecto al resultado obtenido se deduce que el transistor no necesita disipador de calor.

A pesar de que en la actualidad existen otros softwares de simulación como Altium y proteus, se optó por utilizar proteus y no Altium. La razón de no utilizar Altium se basa en que es un software pago y requiere de muchos requisitos de hardware como memoria RAM y tarjeta gráfica. Por otra parte, Proteus al contar con una versión demo y al estar enfocado en la parte académica de simulación de circuitos genera una buena experiencia entre el usuario y su interfaz además permite la instalación de diversas librerías entre ellas la librería de arduino, ayudando a que la simulación sea completa. Gracias a la librería de arduino es posible adjuntar el código programado dentro del microcontrolador ATmega328 a través del archivo Hex.

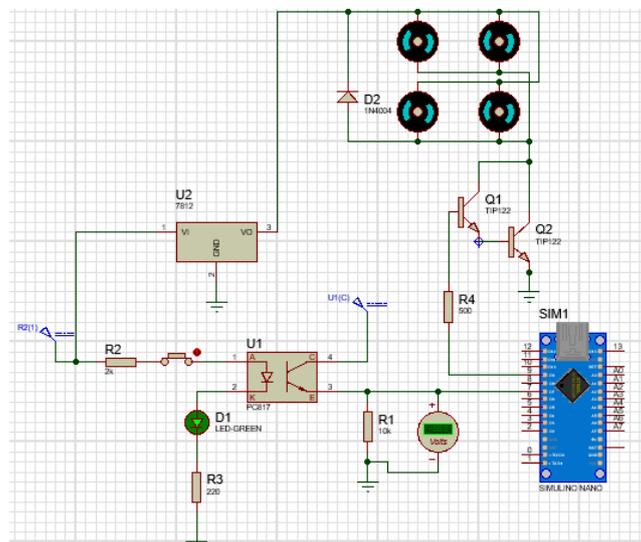


Figura 1. 27. Simulación [Autor].





## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Luego de tener el diseño de la placa PCB se optó por realizar el diseño en SolidWorks de la caja contenedora del circuito con el fin de aislar la placa de futuras fallas ocasionadas por el sudor, el polvo, entre otros factores. En primera instancia el diseño de la PCB se hizo con el fin de que las conexiones con el sensor, los coolers y la fuente de alimentación se realizara a través de borneras soldadas directamente a la PCB, pero luego de varias pruebas se observó que con el tiempo las conexiones con las borneras se soltaban o los cables se cortaban debido al movimiento. Es por eso que en el diseño de la caja se instalaron borneras de tipo banana para garantizar la estabilidad de las conexiones. La implementación de las borneras de tipo banana fue con el fin de generar orden en el cableado. Un ejemplo es la ubicación de las borneras de entrada del sonar y las borneras de salida a los coolers cuya finalidad es separar los cables provenientes del extremo final del bastón con los cables de la fuente de alimentación y así prevenir conexiones erróneas que causen fallas en la placa. El interruptor ON/OFF se colocó para tener un control de la descarga de la batería en caso de que el prototipo no se utilizando.

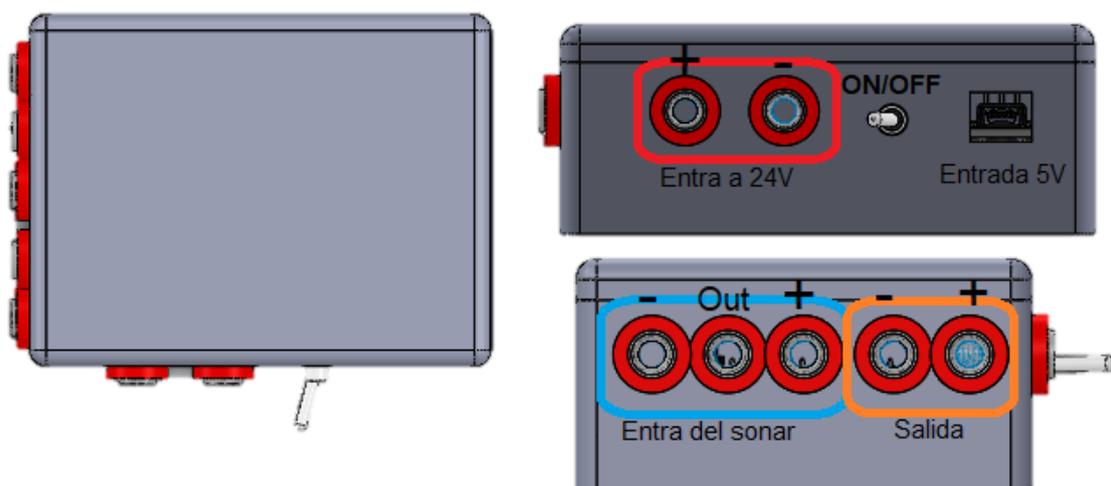


Figura 1. 30. Diseño del contenedor del circuito [Autor].

### Tabla 4. Diferencias entre softwares

DIFERENCIAS ENTRE SOFTWARES		
SOFTWARE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Livewire/PCB wizard</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interfaz muy amigable.</li> <li>• Incluye cantidad de ejemplos.</li> <li>• Cuenta con tutoriales bien explicados.</li> <li>• Simulación interactiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Librerías muy limitadas.</li> <li>• A pesar de que cuenta con variedad de componente y ruteado automático, es muy ineficaz.</li> <li>• Simulación y visualización 3D de baja calidad.</li> </ul>
<b>KiCad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funciona en todos los sistemas operativos.</li> <li>• Open Source.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interfaz muy básica, dificultando encontrar alguna función en específico.</li> </ul>



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la creación de diagramas hasta con 16 capas.</li> <li>• Cuenta con Bitmap2component que ayuda a crear componentes esquemático a partir de una imagen bmp.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La transformación del plano esquemático a PCB es compleja.</li> </ul>
<b>DipTrace</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuenta con buena calidad en sus diagramas.</li> <li>• Auto-ruteo y auto-posicionamiento de componentes.</li> <li>• Calidad del visor 3D aceptable.</li> <li>• Sencillo editor de componente y librerías.</li> <li>• Excelente relación entre calidad y precio.</li> <li>• Cuenta con versión libre capaz de cubrir los requisitos de un diseñador de nivel medio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su interfaz en desactualizada.</li> <li>• La interacción usuario interfaz no es muy agradable.</li> <li>• La simulación no es propia del programa, necesita un software externo para lograrlo, dificultando el proceso.</li> </ul>
<b>Eagle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un software que tiene buena relación en cuanto a calidad y precio</li> <li>• Interfaz ordena.</li> <li>• Cuenta con una enorme base de librerías.</li> <li>• Es universal.</li> <li>• Cuenta con una versión Free capaz de suplir los requisitos básicos de cualquier diseñador.</li> <li>• Cuenta con actualizaciones frecuentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No cuenta con simulación propia.</li> <li>• No cuenta con visualización en 3D.</li> </ul>
<b>Proteus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuenta con simulación avanzada que soporta incluso la simulación de microcontroladores.</li> <li>• Sencilla personalización para mejor la calidad de los diagramas.</li> <li>• Visualización 3D muy realista.</li> <li>• Cuenta con tutoriales bien explicados.</li> <li>• Integra un visor de eventos que muestra el estado actual de la simulación, ayudando a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo cuenta con la versión DEMO (por ahora).</li> <li>• No se pueden guardar los diagramas en la versión DEMO.</li> <li>• Las versiones anteriores no cuentan con la visualización 3D.</li> </ul>



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez

**Director:** Diego Alfonso Peláez

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

	<p>vigilar las acciones que se estén llevando a cabo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La simulación y la visualización vienen integrada dentro del software.</li> </ul>	
<b>OrCad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuenta con modelado y simulación de alta tecnología.</li> <li>• Cuenta con una interfaz organizada.</li> <li>• Ideal para proyectos que requieren gran precisión.</li> <li>• Cuenta con PSpice A/D y análisis avanzado de señales analógicas o mixtas.</li> <li>• Cuenta con un nivel profesional.</li> <li>• Cuenta con una versión DEMO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran tamaño y consumo de muchos recursos de Hardware.</li> <li>• Su precio es elevado.</li> </ul>
<b>Altium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el software mas completo del mercado.</li> <li>• Cuenta con paquetes de diseño CAD, PCB, FPGA, diseño lógico, etc.</li> <li>• Incluye mejoras en las etapas de diseño esquemático y de PCB para facilitar la creación.</li> <li>• Cuenta con una personalización avanzada de objetos, componentes y librerías.</li> <li>• Soporta hipervínculos en los diagramas esquemáticos.</li> <li>• Soporte de componente capacitivos mTouch de Microchio.</li> <li>• Cuenta con un ambiente de desarrollo robusto para proveer de todas las herramientas posibles al diseñador</li> <li>• Cuenta con simulación precia de señales analógica y digitales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran tamaño y consumo de recursos de Hardware.</li> <li>• Precio de licencia elevado.</li> <li>• Al ser un software muy robusto puede resultar complejo manejo en diseñadores con un nivel bajo.</li> </ul>



## **2.2 DISEÑO DE LA BATERÍA DEL CIRCUITO**

Para la alimentación de voltaje en el circuito, se diseñó una batería recargable de 24 V de alimentación para el sonar y 12 V derivados por medio de un regulador 7812. Dicha batería se diseñó con celdas de Li-ion recicladas, debido a que las baterías de 24 V en el mercado cuentan con un precio elevado, aumentando el precio del prototipo. Las ventajas de utilizar celdas recicladas son: Reducir el precio de la construcción del prototipo, ayudar al medio ambiente al darle una vida útil a dichas celdas donde su único destino son los rellenos sanitarios al estar presuntamente dañadas, aumentando la contaminación ambiental. Es importante tener presente que, para el diseño de la batería, las celdas a utilizar fueron sometidas a un peritaje para garantizar su buen funcionamiento. Dicho peritaje se dividió en las siguientes etapas:

### **2.2.1 MEDICIÓN DEL VOLTAJE INICIAL**

Este proceso consiste en medir el voltaje de la celda luego de ser removida de la carcasa en la que se encuentra como se observa en Figura 1.30. Dicho voltaje se recomienda que en la mayoría de los casos se encuentre ente 1.65V a 4.2V. Un voltaje bajo en las celdas indica dos factores: Ha estado descargada durante mucho tiempo o presentó alguna falla la cual hizo que la celda se descargara por completo. En la Figura 1.31 se observa el respectivo voltaje medido al momento de desmontar las celdas de la carcasa. Este primer voltaje medido es de vital importancia ya que con dicho valor se pueden tomar estimaciones al respecto sobre utilizar o descartar la celda por completo.



*Figura 1. 31. Extracción de celdas [Autor].*



ICR18650 26C

ICR18650 22F

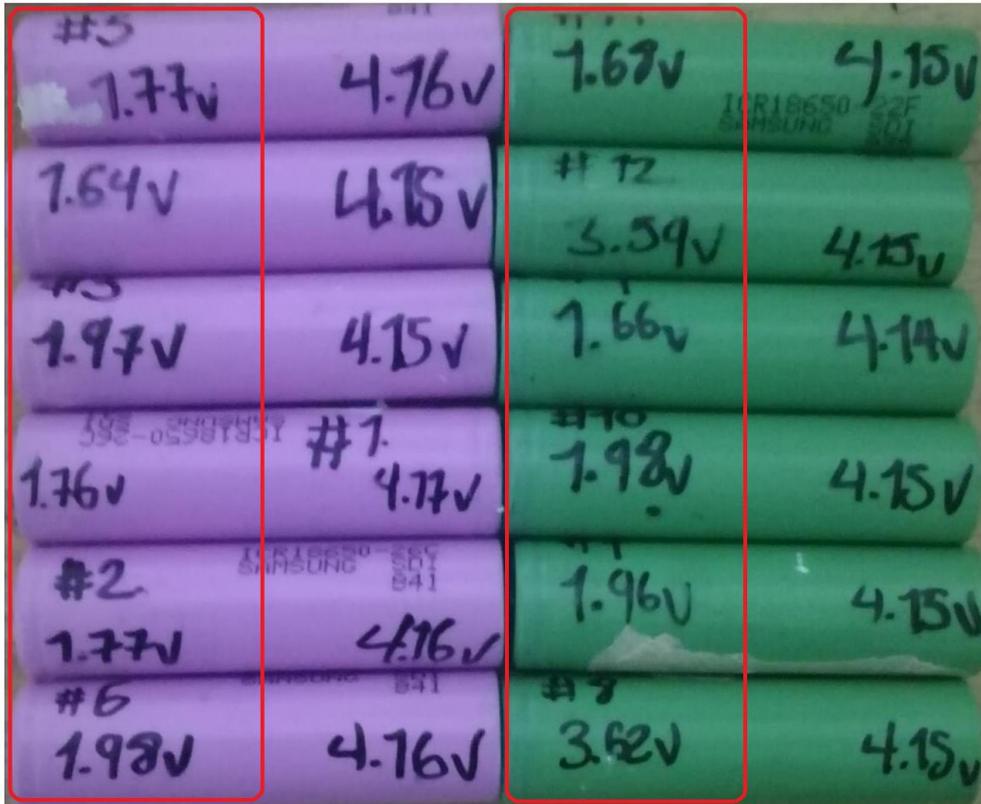


Figura 1. 32. Medición de voltaje inicial al costado izquierdo de cada celda [Autor].

## 2.2.2 CARGA COMPLETA DE LA CELDA

En esta etapa luego de medir el voltaje inicial, se procede a cargar completamente las celdas que se van a utilizar. Se pueden cargar utilizando un TP4056 o cualquier cargador convencional para la carga de celdas de Li-ion. La carga de la celda debe llegar a una tensión de corte de 4.2V pero no necesariamente debe tener ese valor para indicar que la celda se encuentre totalmente cargada. Con valores de 4.15V a 4.2V se puede estimar que la celda completo su carga. El tiempo de carga de las celdas varía dependiendo del fabricante. En este caso las celdas que se utilizaron son de marca Samsung de referencia ICR18650 26C (2600 mAh nominales) y ICR18650 22F (2200 mAh nominales), tardan entre 3 horas a 3 horas y media. En caso tal de que el tiempo de carga de la celda sea mayor significa que la celda presenta problemas graves indicando un mal indicio al ser utilizada. Por otra parte, se recomienda que la carga de las celdas se realice una a una como se observa en la Figura 1. 33, al utilizar el TP4056, ya que al colocar al cargar varias celdas en paralelo el tiempo de carga duraría más tiempo de lo esperado. El módulo TP4056 cuenta con dos entradas de alimentación (Conexión de entrada a 5v a través de una fuente



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

externa ATX y conexión a 5v a través de una entrada USB) y sus respectivas salidas de conexión a la celda. Cuando las celdas lleguen a su voltaje de corte se recomienda dejarlas estabilizar por un periodo de 24 horas. En la Figura 1. 34 se observa el voltaje medido en cada celda luego de haber sido cargada completamente, en la imagen se observa que las 12 celdas cuentan con un promedio de carga entre 4.15 V a 4.17 V.

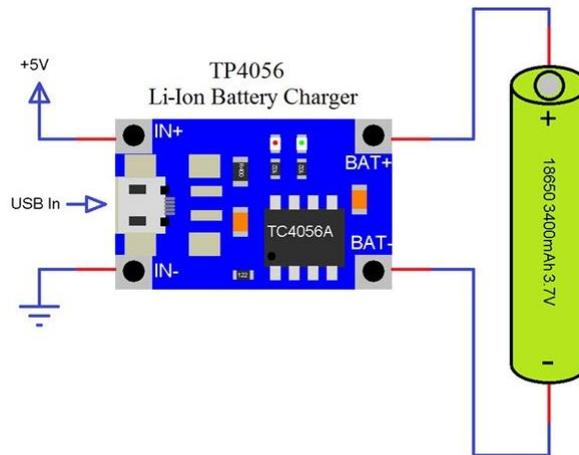


Figura 1. 33. Esquema de conexión para la carga de celdas [20].

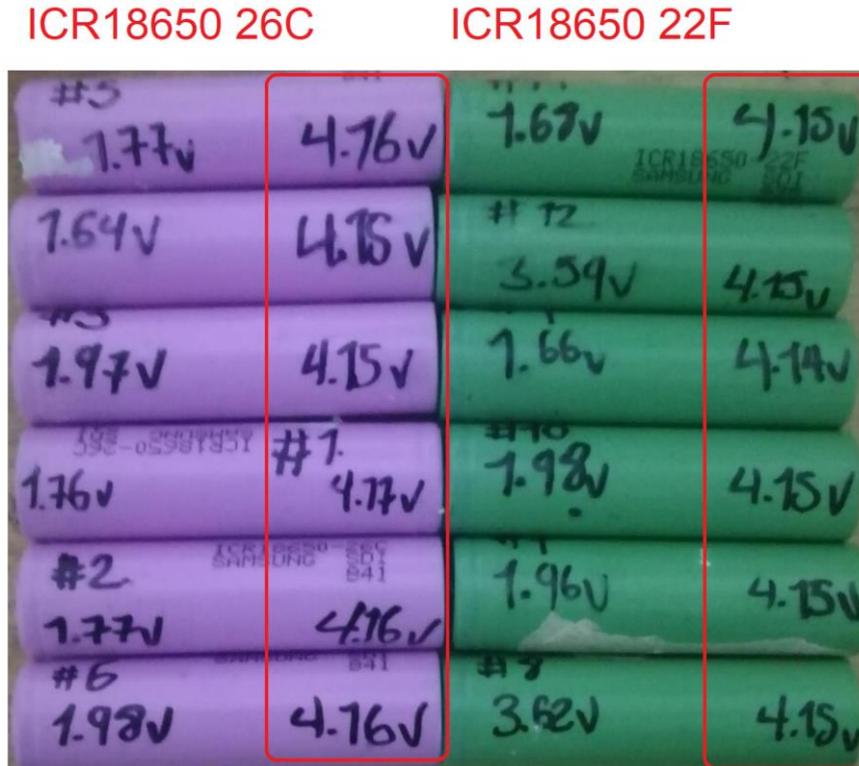


Figura 1. 34. Medición de voltaje de corte máximo de las 12 celdas [Autor].



Autor: Carlos Eduardo Abril Pérez  
Director: Diego Alfonso Peláez

### 2.2.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Durante la carga completa de la celda es importante realizar una revisión de la temperatura, la cual debe estar por debajo de 45°. En caso dado que la temperatura de la celda supere los 45° lo recomendable es descartar la celda ya que si se utiliza afectara el funcionamiento total de la batería.

### 2.2.4 PRUEBA DE DESCARGA

Esta prueba se realiza con el fin de conocer el tiempo de vida útil de la celda reciclada. El proceso consiste en tener la celda en su voltaje de corte máximo para luego descargarla, la descarga se puede realizar con un cargador balanceador de baterías lipo de como el Imax B6, el cual indicara visualmente la cantidad de mAh de la celda. Es importante que la celda cuente con un 70% o más de capacidad de carga. Dicha retención de carga se calcula con la capacidad nominal de la celda multiplicada por el 70%. Si el resultado de la descarga es inferior al 70% de carga es recomendable no utilizar dichas celdas en proyectos de magnitud grande.

### 2.2.5 AUTO DESCARGA

Luego de descargar las celdas, se procede nuevamente a cargarlas totalmente, para luego dejarlas estabilizar durante una semana. Luego de estabilizarse por una semana, se les mide nuevamente el voltaje máximo para comprobar el tiempo de retención que tienen las celdas. Las celdas que su voltaje se encuentre por debajo de 4V son descartadas debido a que indican que no son aptas para retener cargas por un tiempo moderado. Las celdas utilizadas presentaron voltajes luego de una semana en un rango de 4.15V y 4.17V de carga almacenada. Por ende, esto implica que las celdas seleccionadas cumplieron con todas las etapas, permitiendo agilizar el tiempo de la construcción de la batería.

**Tabla 5. Mediciones en celdas ICR18650 26C**

ICR18650 26C				
N°	Voltaje inicial	mAh	Voltaje de corte	Temperatura
1	1.77 V	1950	4.16 V	27 °C
2	1.64 V	1945	4.15 V	28 °C
3	1.97 V	1900	4.15 V	26 °C
4	1.76 V	1895	4.17 V	27 °C
5	1.77 V	1910	4.16 V	25 °C
6	1.98 V	1900	4.16 V	30 °C



Tabla 6. Mediciones en celdas ICR18659 22F

ICR18650 22F				
N°	Voltaje inicial	mAh	Voltaje de corte	Temperatura
1	1.68 V	1600	4.15 V	28 °C
2	3.59 V	1609	4.15 V	26 °C
3	1.66 V	1621	4.14 V	24 °C
4	1.98 V	1620	4.15 V	29 °C
5	1.96 V	1625	4.15 V	25 °C
6	3.62 V	1610	4.15 V	29.5 °C

### 2.3 DISEÑO DEL SOPORTE DEL SONAR Y COOLERS

El diseño del soporte para el sonar y los coolers cumple una función muy importante con respecto al diseño del prototipo, debido a que es el responsable de contener estratégicamente 4 coolers, los cuales se encargan de la dispersión del polen luego de ser desprendido por el sonar. En la selección de los componentes para el soporte se tomaron aspectos tales como: La rigidez del material, el peso, el fácil manejo con respecto a los cortes que se realicen en el soporte y el costo, entre otros. El material que cumplió con dichas características fue el acrílico, específicamente el que cuenta con un grosor de 5mm. En la Figura 1.35 se puede observar el diseño del soporte. Los cuatro orificios ubicados en las esquinas del soporte son para que los coolers puedan absorber viento y ser expulsado por la parte frontal, el orificio más pequeño es para el sonar.

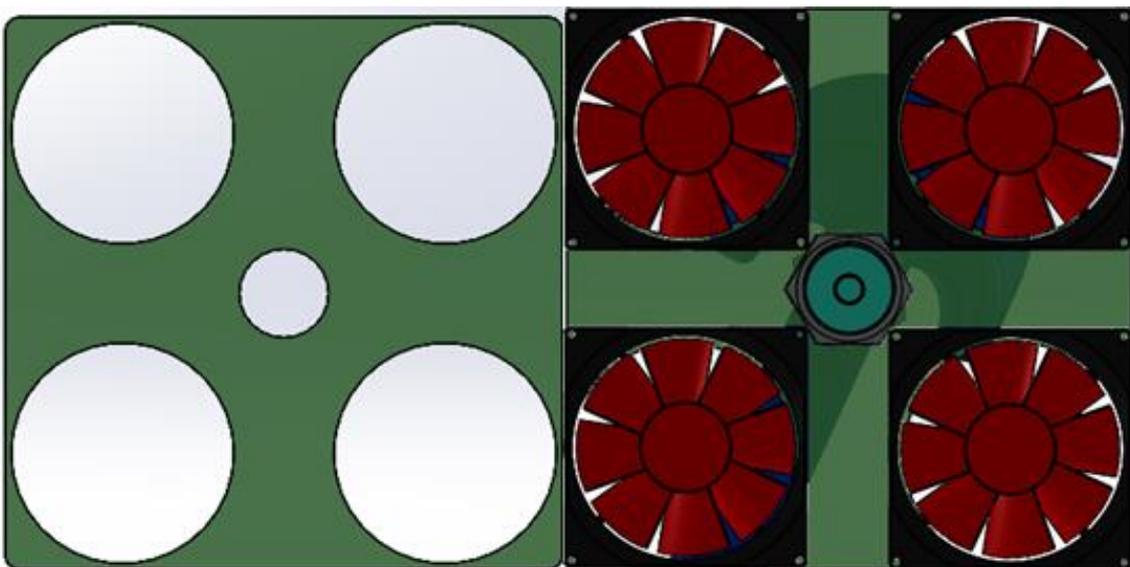
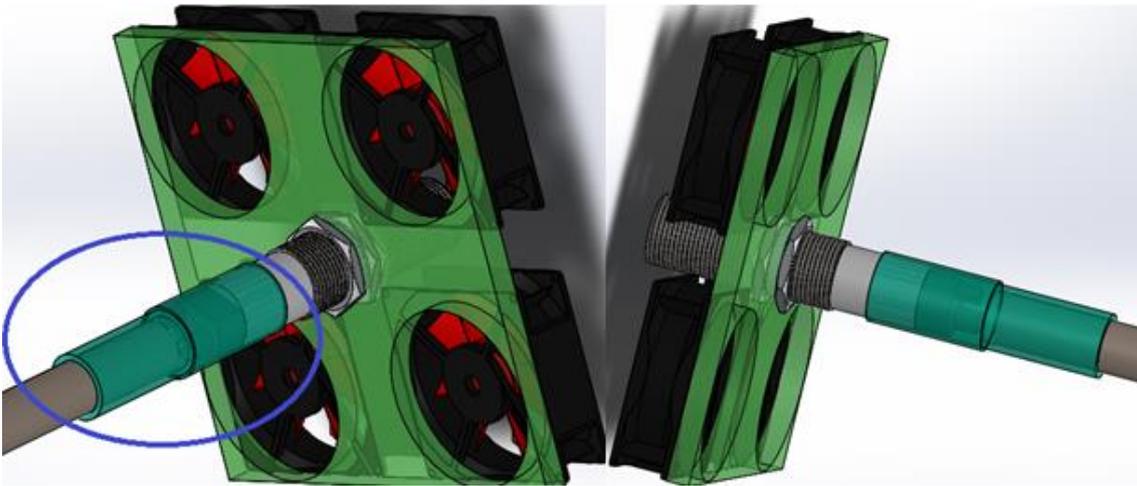


Figura 1. 35. Diseño del soporte del sonar y coolers [Autor].



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Por otra parte, se observa de una forma más gráfica la forma en que son colocados los coolers junto con el sonar. El sonar fue ubicado en esa posición para brindar un punto de centro de equilibrio entre el soporte y la caña del bastón, además para generar una mayor radiación. Los coolers fueron ubicados con el fin de que, al momento del sonar emitir la radiación ultrasónica hacia la flor, se accionen y garanticen que el polen pueda ser esparcido de forma uniforme entre el racimo de flores de la planta. Además, dentro del diseño fue necesario realizar un sistema de acople como se observa en la Figura 1.36, el cual ayudara a unir el soporte junto con la caña del bastón, debido a que el diámetro del sonar es mayor al diámetro de la caña, dificultando el ensamble de todo el sistema. Con el diseño del acople se dio solución al problema inicial del ensamble, permitiendo obtener un prototipo resistente.



*Figura 1. 36. Esquema del acople entre el soporte y la caña del bastón [Autor].*



# CAPÍTULO 3

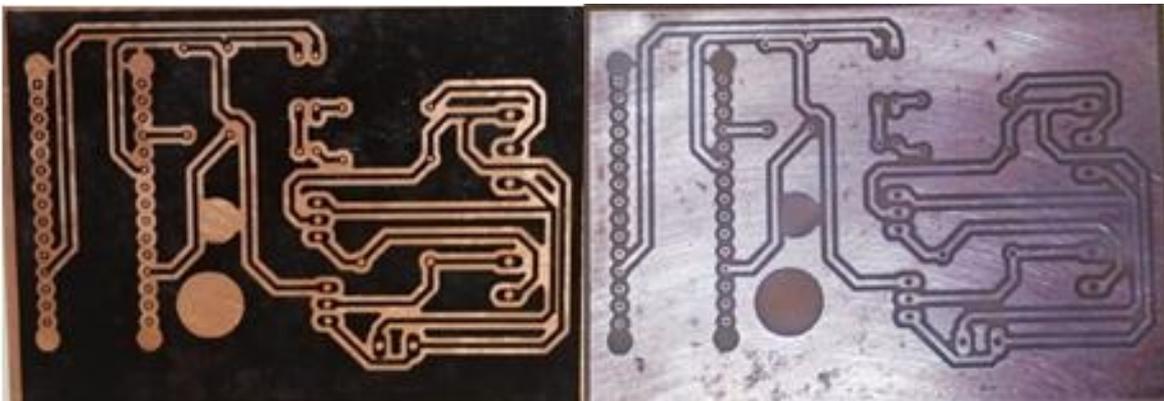


### 3 CONSTRUCCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROTOTIPO ULTRASÓNICO PARA LA POLINIZACIÓN.

En este capítulo se expone de forma clara y concisa la construcción de las etapas influyentes en el desarrollo del proyecto.

#### 3.1 CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE POTENCIA

A partir del diseño mostrado en la Figura 1.29. Se procedió a implementar el circuito potencia como se observa en la Figura 1.37, luego de ese proceso se procede al ensamble y soldadura de los componentes con su respectiva caja contenedora partiendo del diseño mostrado en la Figura 1.30, como se observa en la Figura 1.38.



*Figura 1. 37. Proceso de plancho y quemado [Autor].*

Por otra parte, actualmente existen dos formas de ensamblar circuitos electrónicos, a través de componentes PTH (Pasador por agujero) y SMD (Dispositivo montado en superficie). En el caso del circuito de potencia del prototipo se procedió a su ensamble utilizando componentes PTH debido a que con dichos componentes es más fácil realizar el montaje manualmente, ya que no requieren de mucha habilidad y no es necesario la implementación de herramientas especiales para el proceso de soldadura. También permiten realizar pruebas en protoboards, además son más robustos que los componentes SMD y por su tamaño aportan ciertas ventajas tales como: la capacidad de disipar mucho más calor y la facilidad de poder ser removidos en casado de fallas.



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

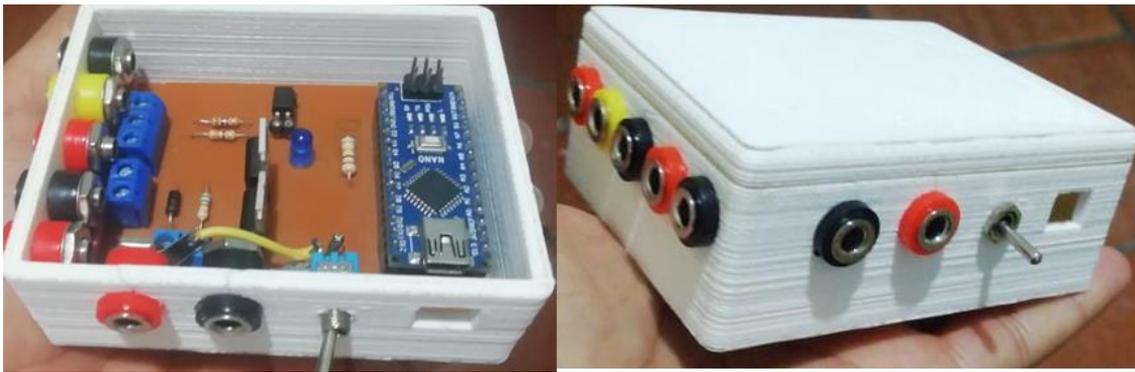


Figura 1. 38. Esquema final de la implementación del circuito de potencia [Autor].

Tabla 7. Ventajas y desventajas entre componentes PTH Y SMD.

Componentes	PTH	Componentes	SMD
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su manipulación es más fácil al momento de realizar un montaje manual, ya que no requiere mucha habilidad para soldar.</li> <li>• Se pueden utilizar directamente en protoboards.</li> <li>• Son más robustos que los componentes SMD.</li> <li>• Por su tamaño aportan ciertas ventajas: son capaces de disipar más calor y integran condensadores con altos valores de capacitancia y voltaje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son más difíciles de ensamblar mediante maquinas.</li> <li>• Debido a su tamaño no son ideales para diseñar circuitos compactos</li> <li>• Debido al avance tecnológico algunos componentes ya no son fabricados en formato PTH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son más fáciles de ensamblar mediante maquinas.</li> <li>• Gracias a su tamaño son ideales para diseñar circuitos compactos.</li> <li>• Su precio es más barato en comparación con los componentes en formato PTH.</li> <li>• En la actualidad la mayoría de los circuitos integrados solo existen en formato SMD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su manipulación es más compleja al ser utilizados en montajes manuales, debido a que requiere más habilidad y cuidado para soldar y acomodar los componentes.</li> <li>• No se pueden utilizar directamente en protoboard</li> <li>• Debido a su tamaño son menos robustos con respecto a la disipación de calor</li> </ul>



### 3.2 CONSTRUCCIÓN DEL POWER BANK

En esta sección luego de haber realizado el peritaje de las celdas se procede a construir el power bank partiendo de la Figura 1.16.



Figura 1. 39. Esquema de conexión de las celdas [Autor].

En la Figura 1.39 se muestra la conexión de 6 pares de celdas. Esta conexión en paralelo entre dos celdas se realiza con el fin de aumentar los mAh del power bank. Cada par de celdas tiene un voltaje máximo de corte de 4.2 V y 3000 mAh, por ende, al conectar los 6 pares en serie se obtiene un total de 25.2 V finales. Es importante que al realizar la conexión en serie entre cada terminal positivo-negativo se habilite un cable balanceador el cual se conectara al controlador Bms como se observa en la Figura 1. 40. Se recomienda que las celdas que son conectadas en paralelo se aíslen para evitar futuros cortos entre las demás celdas a causa del deterioro del material de fábrica.

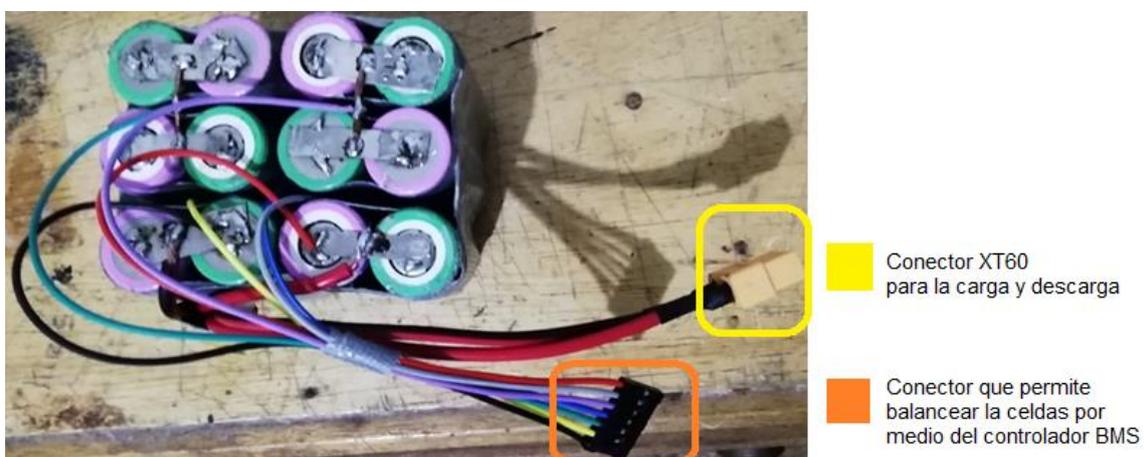


Figura 1. 40. Esquema de conexiones entre celdas [Autor].





*Figura 1. 41. Esquema final del Power Bank [Autor].*

### 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE DEL SONAR Y LOS COOLERS

Partiendo del diseño planteado en la Figura 1.34, se procedió a cortar la pieza encargada del soporte para su debido ensamble como se observa en la Figura 1.42. La pieza en acrílico cuenta con dimensiones de 19x19 cm y un grosor de placa de 5mm, los orificios de absorción de aire de los coolers tienen un radio de 7.5 cm, el orificio para el sonar tiene un radio de 3 cm.

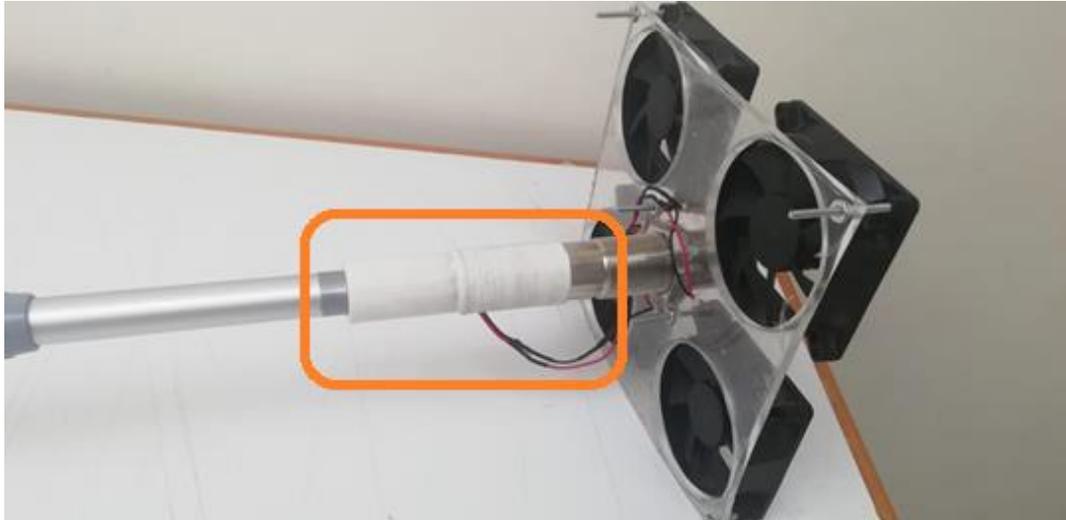


*Figura 1. 42. Esquema del ensamble final del soporte [Autor].*



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Por otra parte, a partir del diseño que se plantea en la Figura 1.36, se realizó el acople entre el soporte y la caña del bastón de codera integral como se muestra en la Figura 1.43. El acople fue impreso en PLA color blanco, sus propiedades físicas con: 27.5 mm de radio para la unión con el sonar y 22.05 mm para la unión con la caña del bastón.



*Figura 1. 43. Esquema del acople que integra el soporte y la caña del prototipo [Autor].*

### 3.4 ENSAMBLE DE TODAS LAS ETAPAS

Siguiendo con las etapas constructivas del prototipo, se obtuvo como resultado final el sistema que se observa en la Figura 1.44. En donde se puede apreciar la vinculación del circuito de potencia, la power bank, el soporte del sonar, el acople del soporte y la caña y por último la columna vertebral del prototipo que es el bastón de codera integral. El prototipo cuenta con una longitud en su estado graduable cero de 1 metro con 25 cm y un peso aproximado de 1 kg sin las baterías, las cuales pesan aproximadamente 460 gr.



*Figura 1. 44. Resultado del prototipo luego del ensamble de todas las etapas [Autor].*



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez

# CAPÍTULO 4



## **4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POLINIZACIÓN EN EL CULTIVO DE TOMATE.**

### **4.1 INSPECCIÓN DEL CULTIVO**

Luego del ensamble del prototipo se procede a realizar una inspección del cultivo a intervenir para conocer las condiciones de siembra, distanciamiento entre surco y surco entre otros. La selección del cultivo a intervenir se disputo entre dos cultivos: uno ubicado cerca del casco urbano del municipio de Pamplonita y el otro en la vereda el Salvador. El cultivo ubicado cerca de pamplonita fue descartado debido a que la siembra se encontraba a campo abierto y en época de recolección de cosecha, por estas razones el cultivo seleccionado fue el de la vereda el Salvador. El cultivo se encuentra ubicado en la vereda el Salvador a escasos 10 minutos de distancia del municipio de Pamplonita a una temperatura media de 20 °C y a 60 km de la capital del departamento. En la Figura 1.45 se observa una vista exterior del cultivo cubierto por un sistema invernadero. La inspección del cultivo en su parte exterior es clave para poder familiarizarse con las propiedades constructivas del cultivo tales como: El área del cultivo, los materiales de construcción del invernadero (pilares, apoyos y refuerzos) ya que pueden ser de madera, acero galvanizado hierro o aluminio. La forma de construcción de la cubierta superior (Techo) ya que según el diseño de la estructura se pueden resolver problemas tales como el descenso de la temperatura nocturna, la ventilación, los canales de recogida de agua los cuales son fundamentales en épocas de lluvias permitiendo recolectar el agua de lluvia para luego ser conducida a embalses para luego ser utilizadas en épocas de sequía. El recubrimiento de la cubierta el cual debe cumplir las características: como durabilidad, la capacidad de transmisión de luz y su rentabilidad. Entre los materiales más comunes para el recubrimiento se encuentran: El vidrio, láminas de acrílico, película de polietileno y el policarbonato.



*Figura 1. 45. Vista exterior del cultivo [Autor].*



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

Dentro de la inspección externa del cultivo se observó que el cultivo cuenta con poco tiempo de construcción, cuenta con pilares, apoyos y refuerzos en su totalidad de madera. La estructura de construcción del techo está con base a modelos en forma de capilla simétrica a dos aguas, hecho con madera tratada en forma cuadrada. El recubrimiento del techo utiliza película de polietileno debido a que es la opción más común en los agricultores ya que representa un bajo costo inicial en comparación con otros materiales, pero también porque tener una cubierta flexible capaz de soportar diversas condiciones climatológicas.

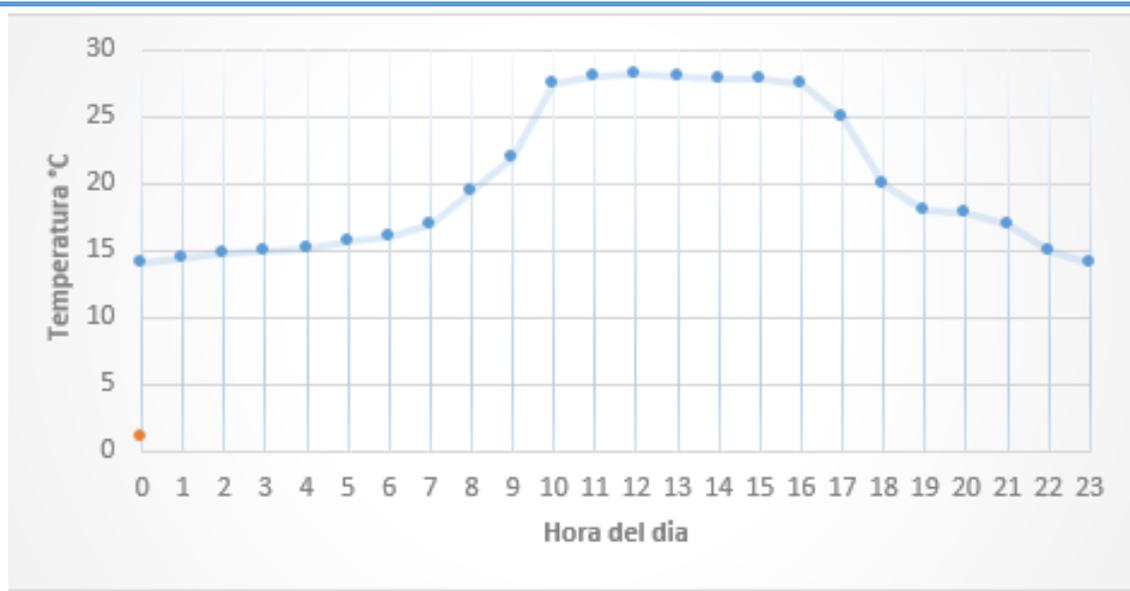
Seguidamente se procede a ingresar en el interior cultivo, en donde se inspecciona las condiciones de siembra y condiciones climatológicas. Las condiciones climatológicas del cultivo deben estar entre una temperatura diurna de 20 a 30 °C y una nocturna entre los 14 y 17 °C. Con respecto a dichas condiciones se observó que en el cultivo en horas de la mañana entre las 8 y 9 am se encontraba a una temperatura de 27 °C y entre las 9 a 11 am la temperatura aumentaba hasta llegar a unos 28.5 °C. La observación de la temperatura dentro del invernadero se realizó en días parcialmente despejados en donde se realizó un seguimiento minucioso del comportamiento de la temperatura durante un ciclo de 24 horas, con dicho seguimiento se obtuvieron gráficamente los cambios de temperatura hora tras hora, iniciando con una temperatura mínima de 14,5 °C en la hora cero, luego exponencialmente fue incrementando hasta llegar a un pico máximo de 28,5 °C en la hora del medio día, por últimos con el pasar de las horas la temperatura fue descendiendo hasta llegar nuevamente a una temperatura de 14.4 °C como se observa en la Figura 1.47. Luego de la inspección se procedió a realizar una charla con el agricultor encargado del cultivo como se observa en la Figura 1.46 y Figura 1.48.



*Figura 1. 46. Vista interior del cultivo [Autor].*



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA



*Figura 1. 47. Comportamiento de la temperatura en el transcurso del día [Autor].*



*Figura 1. 48. Conversatorio con el agricultor sobre las técnicas de polinización utilizadas en el cultivo [Autor].*

En la conversación con el agricultor encargado se habló sobre las técnicas de polinización utilizadas en el cultivo, donde él hace referencia que actualmente el cultivo no cuenta con ninguna técnica de polinización externa. Lo que se da entender de que el cultivo se poliniza con las pocas corrientes de aire que pueden entrar en el invernadero. Por otra parte, el agricultor hace énfasis en que debido a dicha polinización no controlada la cosecha se ve afectada en su producción, dando como resultado un fruto que no se desarrolla con los mejores estándares de calidad tales como el tamaño y sabor.

Luego de la conversación con el agricultor, se procedió a realizar la inspección del surco con la mayor presencia de flores abiertas, ya seleccionado el surco con mayor presencia de flores abiertas como se observa en la Figura 1.48. Se procedió a trabajar con el prototipo para realizar la respectiva polinización como se observa en la Figura 1.49 y Figura 1.51. Dicha labor se realizó por tres días, más específicamente los días martes, jueves y sábado en una sola semana.



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

En el primer día se polinizó con el prototipo en horas de la mañana aproximadamente a las 9:00 am por un tiempo de una hora de trabajo.



*Figura 1. 49. Selección del surco con presencia de flores abiertas [Autor].*

Durante la polinización del primer día, luego de una hora de trabajo transcurrida se observó que el esfuerzo realizado en la labor era mínimo gracias a la empuñadura y la codera integral del bastón, ayudando a generar un buen desplazamiento y evitando así el contacto físico con las plantas. Por otra parte, se realizó una observación previa de la temperatura del circuito, la cual resulto se optima a pesar de la temperatura interna del invernadero. También, gracias al diseño de la caja contenedora del circuito se evitaron fallas acusa del sudor y el polvo que se generaba en el invernadero a causa del constante movimiento.



*Figura 1. 50. Inicio de polinización [Autor].*



**Autor:** Carlos Eduardo Abril Pérez  
**Director:** Diego Alfonso Peláez



*Figura 1. 51. Polinización [Autor].*

En el segundo día se procedió a realizar la misma labor y en la misma hora para garantizar que la polinización fuese más efectiva. Es importante inspeccionar previamente que las flores se encuentren abiertas para poder realizar la fertilización. La segunda polinización se realiza con el fin de volver a repasar las flores polinizadas y también polinizar las que no habían florecido aun, debido a que generalmente los racimos de flores no se abren todas a la vez. Durante la polinización en ocasiones fue necesario inclinarse o agacharse dentro del surco debido a que la planta por su morfología produce flores tanto en la parte baja y parte superior de la misma, obligando adaptarse para garantizar que la polinización sea completa, como se observa en la Figura 1.53.



*Figura 1. 52. Segunda polinización [Autor].*



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA



*Figura 1. 53. Adaptación en la polinización [Autor].*

En el tercer y último día de polinización se buscó repotenciar la cantidad de polen que llega al estigma para así lograr que la calidad de la producción se vea reflejada en frutos con buenos estándares de calidad.



*Figura 1. 54. Tercer día de polinización [Autor].*



# CAPÍTULO 5



## 5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE POLINIZACIÓN RESPECTO A MÉTODOS TRADICIONALES UTILIZADOS EN LA REGIÓN.

### 5.1 RESULTADOS

Para el proceso de validación del prototipo es necesario tener en cuenta los ciclos fenológicos del cultivo partiendo de: el establecimiento de la planta el cual se basa en un tiempo de germinación de cuatro a siete días después de la siembra de la semilla, el tiempo puede variar dependiendo de la variedad que se siembre. Luego sigue el desarrollo y crecimiento vegetativo en el cual la planta crece, florece y desarrolla sus frutos, pero luego de 70 días el desarrollo vegetativo se reduce, aumentando la presencia y acumulación de materia seca en las hojas y tallos. Seguidamente aparece la primera floración y cuaja (Polinización) alrededor de 20 a 40 días después del trasplante para luego realizar la cuaja a través del sistema polinizador. Luego aparece la primera fase de desarrollo del fruto en la cual fruta en pieza a desarrollarse luego de la polinización.

En el cultivo la inflorescencia más corriente en las plantas de tomate está compuesta por racimos de cuatro a seis flores completamente (hermafroditas), en cada inflorescencia se observó que las flores se abren sucesivamente, por lo que es común observar flores como frutas en diferentes etapas de desarrollo en una misma inflorescencia.

Por otra parte, luego de haber realizado la implementación del prototipo durante los tres días previos a la polinización, se procedió a esperar durante una semana para hacer el seguimiento de los resultados. Luego de la semana se realizó un análisis de efectividad en la polinización comparando las parcelas polinizadas artificialmente con las parcelas que obtuvieron polinización natural sin la intervención de un ente externo.

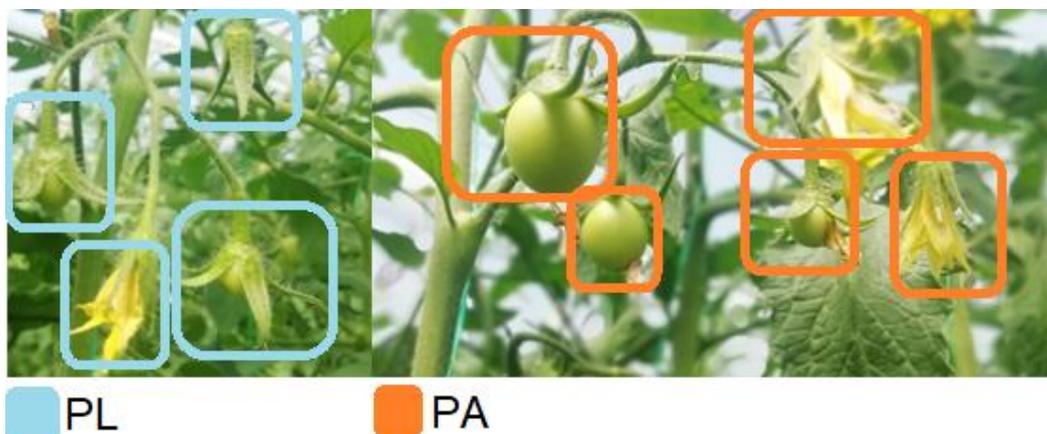


Figura 1. 55. Diferencia entre flores y frutos con respecto a los métodos de polinización artificial y natural [Autor].



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

Con respecto a la Figura 1.55 se puede observar en la parte izquierda de la imagen un racimo floral de 4 flores de las cuales solo dos presentan el correcto cuajado del fruto, la tercera flor no tuvo éxito en la cuaja y la cuarta y última flor se encontró en estado de espera, donde al pasar de los días se obtendrá el resultado de buena cuaja o cuaja del fruto fallida. . El racimo floral de la parte izquierda representa a las plantas que obtuvieron una polinización naturalmente. Seguidamente en la parte derecha de la misma imagen se observa un racimo floral, en donde 3 flores obtuvieron buena cuaja del fruto, también se observa que los frutos presentan una característica mucho mayor en cuanto a su tamaño en estado de desarrollo, por ultimo las dos flores restante del racimo, se encontraron en un estado de espera previamente a la polinización. El racimo floral de la parte derecha representa a las plantas polinizadas artificialmente.

En la polinización artificial se utilizó una etiqueta de color verde para diferenciar el surco seleccionado. Dentro del surco polinizado se etiquetaron 50 plantas (PA:1 hasta PA:50) como se observa en la Figura 1.56. Luego en la polinización natural se utilizó una etiqueta de color roja, en donde también se etiquetaron 50 plantas (PL:1 hasta PL:50) como se observa en la Figura 1.57. De las 100 plantas etiquetadas entre los dos tipos de polinización, se analizaron dos variables: la cantidad de frutos presentes en la planta y el diámetro del fruto.



*Figura 1. 56. Etiquetado de las plantas polinizadas artificialmente (PA) [Autor].*



*Figura 1. 57 Etiquetado de las plantas polinizadas naturalmente (PL) [Autor].*

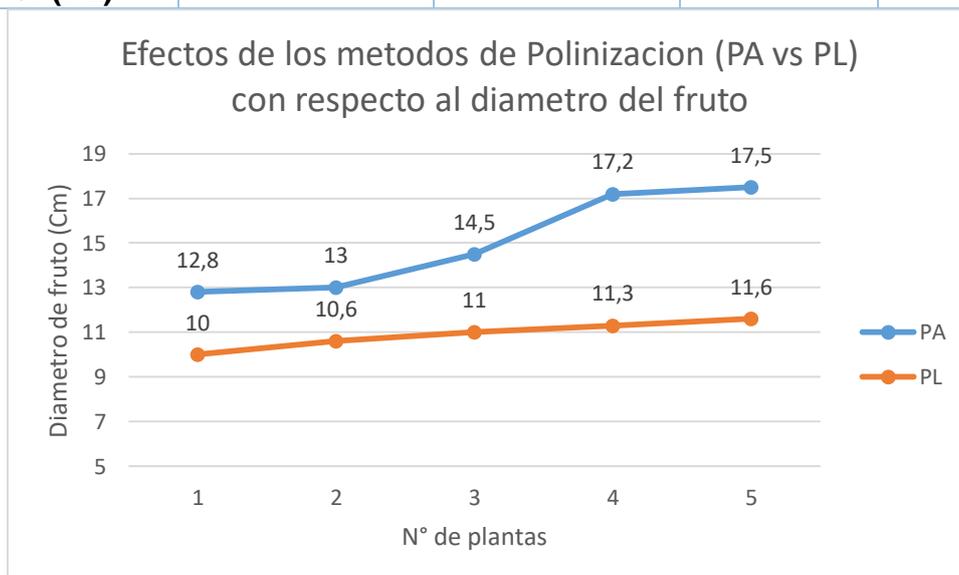


## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA

Con respecto al método de polinización artificial se observó que el número de frutos cuajados oscilaba en un promedio de 13 frutos por planta, indirectamente del número de flores presentes. A pesar que la diferencia no es considerablemente mayor al método de polinización natural el cual obtuvo un promedio de 9 frutos cuajados (Tabla 7). En el método de polinización artificial se obtuvo una diferencia mucho más considerable en el diámetro del fruto con respecto al método de polinización natural como se observa en la Figura 1.58.

**Tabla 8. Efecto de los métodos de polinización con respecto al número de flores polinizadas, frutos cuajados y el diámetro del fruto.**

Tipo de polinización	N° de racimos florales por planta	N° de flores por racimo floral	Frutos cuajados	Diámetro del fruto (Cm)
<b>Polinización artificial (PA)</b>	5	4 a 6	13	12.8 a 17.5
<b>Polinización natural (PL)</b>	5	4 a 6	10	10 a 11.5



**Figura 1. 58. Efectos de polinización con respecto al diámetro del fruto [Autor].**

Por otra parte, en la tabla 7 se observa que, aunque en los dos métodos de polinización, el número de racimos florales y la cantidad de flores en cada racimo se asemejan. Se observó que, sin importar el número de flores presentes en cada planta, existen factores que afectan el cuajado del fruto, dentro de esos factores especialmente en los dos métodos de polinización se ve afectado por la insuficiencia de luz o temperaturas altas.



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASONICA



*Figura 1.59. Efectos de la baja cuaja en los frutos [Autor].*

En la Figura 1.59 se observa la presencia un racimo de 6 flores, en donde solo 3 obtuvieron una buena cuaja del fruto, indicando que otro factor que afecta la cuaja del fruto es la presencia de demasiadas flores, causando que la planta no pueda nutrirlas a todas. Por ende, aunque todas se polinicen, fisiológicamente la planta realiza una especie de selección natural sobre la prioridad de frutos cuajados. Seguidamente en estas situaciones es recomendado realizar una desfloración manual con el fin de controlar la polinización de las mejores flores presentes en los racimos.

Diámetro de frutos Polinizados Naturalmente	Diámetro de frutos Polinizados Artificialmente

*Figura 1.60. Diámetro de los frutos polinizados naturalmente (PL) y artificialmente (PA) [Autor].*



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

En la Figura 1.60 se observa la comparación con respecto a los resultados de los frutos frente a los dos métodos de polinización. En la parte izquierda se observa que, de los frutos seleccionados en el surco polinizado naturalmente, el diámetro presente en cada fruto varía en un rango de 10 cm a 11,5 cm y su color es de un verde con tonos mucho más amarillos. Luego en la parte derecha se observa que, de los frutos seleccionados del surco polinizado artificialmente, el diámetro de cada fruto varía en un rango de 12,8 cm a 17,4 cm y su color es de un verde con tonos más fuertes y vivos como se observa en la Figura 1.61.



*Figura 1. 61. Frutos polinizados artificialmente con el prototipo [Autor].*



## 6 CONCLUSIONES

En Colombia existe un porcentaje considerable de agricultores independientes que desconocen la importancia y los beneficios en los que influye la polinización en la producción de sus cultivos y a pesar de su desconocimiento no se motivan a implementar nuevas prácticas, debido a que solo se basan en los métodos que en la mayoría de los casos fueron enseñados por sus padres de generación en generación.

La implementación de técnicas de polinización en cultivos bajo invernadero parte de la necesidad de aumentar la productividad y rentabilidad de la cosecha en relación con la calidad y la tasa de desarrollo del fruto. Sin la intervención de la polinización controlada o artificial, las cosechas pueden fertilizarse normalmente, pero los frutos carecerán de pocas semillas y por ende se reflejará en el peso final.

En la implementación de Power Bank con celdas nuevas o recicladas es importante contar con disponibilidad de un soldador de puntos para realizar conexiones en paralelos entre las mismas celdas. En caso de no contar con el soldador de puntos se recomienda utilizar el método tradicional de soldadura con cautín, pero evitando sobrecalentar la celda debido a que se puede alterar la composición interna de la misma y llegar a provocar que la celda estalle en el peor de los escenarios.

Al realizar el análisis del comportamiento promedio de la temperatura durante el día, se observó que las horas óptimas para realizar las prácticas de polinización oscilan entre las 7:30 y 9 am, momento en el cual la temperatura se torna optima favoreciendo la liberación del polen y la adherencia del polen al estigma. Sin embargo, es necesario recalcar que la polinización se realizó entre las 8:40 a 9:40 am.

Un pobre cuaje de frutas puede ser el resultado de que las flores no fueron polinizadas, aun realizando la polinización adecuada. Esto se debe a que existen otros factores que causan la caída de flores y un pobre cuaje de frutas. Entre los factores se encuentran el que previamente ya se hayan cuajado muchas flores en la planta, una polinización excesiva, luz insuficiente y temperaturas extremadamente altas.

Se logró realizar un prototipo de polinización artificial utilizando ultrasonido como técnica sustitutiva en relación a la polinización de las abejas para cultivos de tomate bajo invernadero, en donde se analizaron los resultados de producción en torno al diámetro del fruto, permitiendo demostrar que el prototipo puede mejorar los estándares de calidad de la producción. Sin embargo, no se logró analizar una relación precisa entre la frecuencia de modulación y el tiempo de irradiación que el sonar ejerce sobre la flor.



## 7 TRABAJOS FUTUROS

Como continuación de este trabajo de grado a continuación se plantean algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de esta investigación o que, por exceder el alcance del proyecto, no han podido ser tratados con la suficiente profundidad. Además, se sugieren algunos desarrollos específicos para mejorar el sistema en general. Entre los posibles trabajos futuros se destacan:

- Mejorar el diseño planteado inicialmente, ayudando a que sea más compacto para que en un futuro pueda llegar a comercializarse y optimizar el proceso de polinización en cultivos de tomate bajo invernadero.
- Realizar un estudio en cual el prototipo se pueda expandir en torno diversos tipos de cultivos, de esta manera se tendría un prototipo capaz de adaptarse a cualquier entorno, a cualquier tipo de cultivo, ya sea de manzanas, tomate de árbol, palma de aceite entre otros, ayudando a mejorar las técnicas de polinización actuales y con ello aumentado la producción de cultivo a través de polinización artificial.
- Investigar cómo influye la relación de la frecuencia de modulación y el tiempo de irradiación que debe ejercer un sensor ultrasónico directamente en cualquier tipo de flor. Para después controlar con exactitud el manejo del polen adecuado en cualquier polinización sin llegar a dañar la fisiología de la flor o incluso la planta.



## 8 REFERENCIAS

- [1] Hortoinfo, "Récord histórico en la producción mundial de tomate , superando los 177 . 000 millones de kilos," *Hortoinfo*, pp. 2015–2017, 2017.
- [2] C. ANDRES, "ANTIOQUIA Y NORTE DE SANTANDER SON LOS DEPARTAMENTOS LÍDERES EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE," Bogotá, 2018.
- [3] Cámara de Comercio de Bogotá CCB, "Manual Tomate," *Programa Apoyo Agrícola Y Agroindustrial Vicepresidencia Fortalec. Empres. Cámara Comer. Bogotá*, pp. 1–56, 2015.
- [4] T. P. M. Fijen, J. A. Scheper, C. Vogel, J. van Ruijven, and D. Kleijn, "Insect pollination is the weakest link in the production of a hybrid seed crop," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 290, p. 106743, Mar. 2020.
- [5] G. Nates-Parra, *Iniciativa Colombiana de Polinizadores: abejas ICPA*. 2016.
- [6] Sara Sánchez, "SaraSánchezLasPlantas," 2016. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/sarasanchezlasplantas/system/app/pages/recentChanges>.
- [7] G. Freire, "Especies alogamas y autogamas," 2016. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/especiesalogamasyautogamas/#:~:text=Las especies autógamas son aquellas,proceden de la misma planta>.
- [8] Syngenta, "Tipos de Polinización," 2018. [Online]. Available: <https://polinizadores.com/polinizacion/tipos-de-polinizacion/>.
- [9] Intagri S.C, "Técnicas de Polinización en Tomate bajo Invernadero," 2020. [Online]. Available: <http://www.intagri.com/index.php/articulos/horticultura-prottegida/tecnicas-de-polinizacion-en-tomate-bajo-invernadero>.
- [10] R. Sexual, "Tema 22 : Anatomía Floral," pp. 22–24, 2002.
- [11] M. VALDERREY, "El gineceo." [Online]. Available: <https://www.asturnatura.com/plantas/flor-gineceo.html>.
- [12] B. Ram, *Botánica . Generalidades , Morfología y Anatomía de plantas superiores*, no. July. 2016.
- [13] S. Teach-vorganges and E. T. Teach-in, "Sonar – BERO Kompaktreihe M18S Sonar – BERO Compact range M18S Order No .: 3ZX1012-ORG64-2AA1 Application : Anschlussbelegung : Connection : Beispiel : Instructions de service Sonar – BERO Serie compatta M18S Istruzioni di servizio."
- [14] G. Pradeep, "Ultrasonic proximity detector," no. December, pp. 88–89, 2006.
- [15] Carrod Electronica, "Optoacoplador PC817 Alta Densidad Salida Transistor NPN," 2014. [Online]. Available: <https://www.carrod.mx/products/optoacoplador-pc817-alta-densidad-salida-transistor-np>.
- [16] G. P. Photocoupler, "PC817X Series DIP 4pin General Purpose," *Current*, pp. 1–16, 2003.
- [17] E. Unicorn, "Transistor Darlington – ¿Qué es? Cómo Funciona?," 2016. [Online].



## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE POLINIZACIÓN ARTIFICIAL PARA CULTIVOS DE TOMATE UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRASÓNICA

---

- Available: <https://unicrom.com/transistor-darlington/>.
- [18] ElectroNoobs, "PAQUETE DE BATERÍAS 6S BMS - ESQUEMA," 2020. [Online]. Available: [https://www.electronoobs.com/eng\\_circuitos\\_tut31\\_sch1.php](https://www.electronoobs.com/eng_circuitos_tut31_sch1.php).
- [19] NanJing Top Power ASIC Corp, "TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8," *Data Sheet*, p. 3, 2019.
- [20] Hardwarelibre, "TP4056: el módulo para cargar baterías," 2020. [Online]. Available: <https://www.hwlibre.com/tp4056/>.
- [21] MathWorks, "Sistemas de gestión de baterías (BMS)," 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/battery-management-system.html>.
- [22] Ibertrónica, "El origen de los coolers," 2020. [Online]. Available: <https://blog.ibertronica.es/tutoriales/cooler-para-pc-mundo/>.
- [23] Store Arduino, "Arduino Nano," 2020. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>.
- [24] Kinefase, "Uso del baston canadiense." [Online]. Available: <https://www.kinefase.com/2019/02/07/kinefase-tips-uso-del-baston-canadiense/>.
- [25] Arcesw, "Elementos de autosuficiencia." [Online]. Available: <http://www.arcesw.com/eas3b.htm>.
- [26] STMicroelectronics, "L78xx -L78xxC L78xxAB -L78xxAC," no. March, p. 56, 2010.
- [27] JARAMILLO PLITT, J. (2006). La flor y otros organos derivados. Manizales, Universidad de Caldas.
- [28] J. Cuéllar, "POLINIZACION Increase of the productivity of a greenhouse tomato crop improving the pollination," vol. 18, pp. 7–13, 2001.
- [29] H. Escobar and R. Lee, *Manual de producción de tomate bajo invernadero*, vol. 1. 2009.
- [30] B. Tulio César Lagos, T. Bacca, P. Diana Milena Herrera, and T. Jenny Laura Delgado, "Reproductive biology and artificial pollination of the tamarillo (*Cyphomandra betacea* (cav.) sendt)," *Reprod. Biol. Artif. Pollinat. tamarillo (Cyphomandra betacea sendt)*, vol. 19, no. 2, pp. 60–73, 2015.
- [31] F. Ramírez and T. L. Davenport, "Apple pollination: A review," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 162, pp. 188–203, Oct. 2013.
- [32] S. A. Chechetka, Y. Yu, M. Tange, and E. Miyako, "Materially Engineered Artificial Pollinators," *Chem*, vol. 2, no. 2, pp. 224–239, Feb. 2017.
- [33] Á. Sánchez, D. Edison, R. Rodrigo, and R. Hernán, *Polinización asistida en palma de aceite. Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores*, no. 00086. 2011.
- [34] H. Shimizu and T. Sato, "Development of strawberry pollination system using ultrasonic radiation pressure," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 17, pp. 57–60, 2018.

