

Diseño de un mecanismo de aleteo para elevación, como primera fase, de un prototipo mecatrónico bioinspirado en el vuelo del colibrí para una posible alternativa de apoyo en la polinización del cultivo de Gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*)

**Laura Paola Daza Buitrago
Adriana Samira Jasbón Mutis
Diana Marisol Núñez Chaparro**

Trabajo de grado en modalidad de producto presentado para optar al título de Bioingeniero.

Tutor académico:

Brayan Alfonso Valencia Vidal

Cotutor académico:

Willington Jaime Arcos Legarda

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE.
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE BIOINGENIERÍA.
BOGOTA D.C. 2020**

Diseño de un mecanismo de aleteo para elevación, como primera fase, de un prototipo mecatrónico bioinspirado en el vuelo del colibrí para una posible alternativa de apoyo en la polinización del cultivo de Gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*)

**Laura Paola Daza Buitrago
Adriana Samira Jasbón Mutis
Diana Marisol Núñez Chaparro**

Trabajo de grado en modalidad de producto presentado para optar al título de Bioingeniero.

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE.
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE BIOINGENIERÍA.
BOGOTA D.C. 2020**

NOTA DE SALVEDAD

La Universidad El Bosque, ni el jurado serán responsables por las ideas propuestas por los autores de este trabajo de grado. Acuerdo 017 de 14 de diciembre de 1989. Art. 37.

Resumen

La producción de frutos de calidad de los cultivos de gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*) depende en gran medida de los polinizadores naturales, sin embargo, por el uso desmedido de plaguicidas, la deforestación y el cambio climático, la población de polinizadores naturales ha disminuido en dichos cultivos. Es por ello que para mantener la producción de frutos se han implementado métodos de polinización manual que sirven de apoyo en los procesos de la polinización de la gulupa.

Con el propósito de complementar los métodos de polinización manual, se propone como alternativa tecnológica, el uso de un dispositivo mecatrónico bioinspirado en el vuelo del colibrí para la captura del polen de la flor de la gulupa. Teniendo en cuenta la complejidad del desarrollo tecnológico de la solución planteada, este trabajo de grado presenta una primera fase enfocada al diseño de un mecanismo de elevación replicando el aleteo del colibrí y se presenta un instrumento de captura de polen de la flor de la gulupa, que pueda ser incorporado al mecanismo de aleteo. Además, se evalúa la fuerza de elevación que pueden generar las alas por medio de la construcción de un modelo del mecanismo de aleteo.

Como resultado se consiguió, un mecanismo de aleteo que logra imitar las características de vuelo del colibrí y transmitir el movimiento rotacional de un motor a unas alas batientes con las que se consigue generar fuerza de elevación. Por otro lado, se pudo identificar que las cerdas de pincel son el material que mejor captura el polen de la flor de la gulupa.

Palabras claves: Mecanismo de aleteo, vuelo de colibrí, fuerza elevación, gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*), recolección de polen.

Abstract

The production of quality fruits from gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*) crops depends on natural pollinators, however, due to the excessive use of pesticides, deforestation and climate change, the population of natural pollinators has decreased in such crops. That is why, to maintain fruit production, manual pollination methods have been implemented that support the gulupa pollination processes.

In order to complement the methods of manual pollination, it is proposed as a technological alternative, the use of a bioinspired mechatronic device in the flight of the hummingbird to capture the pollen of the gulupa flower. Taking into account the complexity of the technological development of the proposed solution, this undergraduate project presents a first phase focused on the design of an elevation mechanism replicating the hummingbird fin and a pollen capture instrument of the gulupa flower is presented, that can be incorporated into the flutter mechanism. In addition, the lifting force that the wings can generate is evaluated through the construction of a model of the flutter mechanism.

As a result, a flutter mechanism was achieved that imitates the flight characteristics of the hummingbird and transmit the rotational movement of an engine to swinging wings with which it is possible to generate lifting force. On the other hand, it was possible to identify that the brush bristles are the material that best captures the pollen of the gulupa flower.

Keywords: Flutter mechanism, hummingbird flight, lifting force, gulupa (*Passiflora edulis F. edulis Sims*), pollen collect.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 18 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 20 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 24 |
| 4. OBJETIVOS | 28 |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL..... | 28 |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 28 |
| 5. ALCANCE DEL PROYECTO | 29 |
| 6. ANTECEDENTES | 31 |
| 7. MARCO TEORICO | 40 |
| 8. METODOLOGIA | 62 |
| 8.1. Fase 1. Fundamentación y análisis funcional | 62 |
| 8.2. Fase 2. Diseño conceptual..... | 63 |
| 8.2.1. Mecanismo de aleteo..... | 63 |
| 8.2.2. Instrumento de captura de polen | 64 |
| 8.2.2.1. Prueba de materiales para captación de polen | 64 |
| 8.3. Fase 3. Diseño ingenieril..... | 68 |
| 8.3.1. Diseño mecanismo de aleteo | 68 |
| 8.3.1.1. Cinemática mecanismo de aleteo | 68 |
| 8.3.1.2. Simulación dinámica del mecanismo de aleteo | 69 |
| 8.3.1.3. Selección y construcción del ala | 69 |
| 8.3.1.4. Componentes electrónicos: estimación de peso componentes..... | 70 |
| 8.3.1.4.1. Selección de materiales del diseño..... | 70 |
| 8.3.1.4.2. Posibles componentes electrónicos..... | 71 |
| 8.3.1.5. Cálculos fuerza de elevación teórica del mecanismo de aleteo..... | 71 |
| 8.3.1.6. Construcción del mecanismo y montaje para prueba de elevación. . | 73 |
| 8.3.2. Diseño instrumento de captura de polen..... | 76 |
| 8.3.3. Diseño final | 76 |
| 9. RESULTADOS Y ANALISIS | 78 |
| 9.1. Levantamiento de requerimientos..... | 78 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| 9.2. | Mecanismo de aleteo..... | 80 |
| 9.2.1. | Diseño conceptual | 80 |
| 9.2.2. | Diseño mecanismo de aleteo | 87 |
| 9.2.2.1. | Cinemática mecanismo de aleteo | 88 |
| 9.2.2.2. | Simulación dinámica del mecanismo de aleteo | 93 |
| 9.2.2.3. | Diseño del ala | 95 |
| 9.2.2.1. | Construcción mecanismo de aleteo..... | 98 |
| 9.2.2.2. | Selección de material del diseño. | 100 |
| 9.2.2.3. | Componentes electrónicos: estimación peso de componentes electrónicos. | 102 |
| 9.2.2.3.1. | Sistema de comunicación..... | 103 |
| 9.2.2.3.2. | Sistema de navegación..... | 106 |
| 9.2.2.3.3. | Actuador | 113 |
| 9.2.2.3.4. | Sistema de alimentación | 115 |
| 9.2.2.3.5. | Unidad de procesamiento | 117 |
| 9.3.2.5. | Cálculos fuerza de elevación | 121 |
| 9.3.2.6. | Medición fuerza de elevación de las alas | 122 |
| 9.3.2.7. | Diseño mecanismo de aleteo | 123 |
| 9.3. | Instrumento de captura de polen..... | 125 |
| 9.3.1. | Diseño conceptual | 125 |
| 9.3.1.1. | Prueba de materiales instrumento de captación de polen. | 128 |
| 9.3.1.2. | Generación de conceptos | 131 |
| 9.3.1.3. | Diseño instrumento de captura | 136 |
| 9.4. | Descripción del dispositivo final..... | 138 |
| 9.5. | Análisis y discusión mecanismo final | 143 |
| 10. | CONCLUSIONES..... | 147 |
| 11. | RECOMENDACIONES | 148 |
| 12. | BIBLIOGRAFÍA..... | 149 |
| 13. | ANEXOS..... | 161 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Resumen de los mecanismos basados en diferentes tipos de vuelo y sus especificaciones hasta el día de hoy. | 32 |
| Tabla 2. Comparación de dispositivos aéreos no tripulados con las características de vuelo del colibrí. | 35 |
| Tabla 3. Desarrollos tecnológicos actuales para polinización artificial. | 37 |
| Tabla 4. Comportamiento del mercado internacional de la gulupa (<i>Passiflora edulis Sims f. edulis</i>) | 42 |
| Tabla 5. Densidades de siembra más utilizadas en el cultivo de la gulupa en Colombia. | 47 |
| Tabla 6. Lista de alas diseñadas y probadas en el mecanismo de aleteo propuesto por autor Karasek. | 59 |
| Tabla 7. Materiales utilizados para realizar la prueba de captura de polen. | 66 |
| Tabla 8. Mecanismo aleteo de 4 barras doble: double crank-rocker. | 83 |
| Tabla 9. Características mecanismo planar manivela deslizante-balancín acoplado a mecanismo de cuatro barras. | 84 |
| Tabla 10. Mecanismo de aleteo espacial de 6 barras. | 85 |
| Tabla 11. Matriz de decisión Pugh mecanismo de vuelo. | 87 |
| Tabla 12. Dimensiones alas construidas (mm). | 96 |
| Tabla 13. Características de alas utilizadas para pruebas de sustentación. | 97 |
| Tabla 14. Evolución mecanismo de aleteo. | 99 |
| Tabla 15. Materiales usados en prototipado rápido. | 100 |
| Tabla 16. Matriz de selección de materiales mecanismo de aleteo para captura de polen. | 101 |
| Tabla 17. Características módulos radio de radio frecuencia. | 105 |
| Tabla 18. Características transmisor/receptor de datos XBee 3 PRO Zigbee 3.0 | 106 |
| Tabla 19. Características generales módulos GPS usados por micro vehículos aéreos. | 107 |
| Tabla 20. Comparación características módulos GPS. | 107 |
| Tabla 21. Características generales GPS (ZOE-M8 series). | 108 |
| Tabla 22. Características generales IMUs comúnmente utilizados para drones. | 109 |
| Tabla 23. Comparación de características generales de IMUs utilizados comúnmente en drones. | 110 |
| Tabla 24. Características generales IMU. | 110 |
| Tabla 25. Características generales de cámaras utilizadas por micro vehículos aéreos. | 112 |
| Tabla 26. Comparación cámaras con sensor CMOS. | 112 |
| Tabla 27. Características de funcionamiento y peso de componentes. | 115 |
| Tabla 28. Capacidad de batería de acuerdo a diferentes tiempos de funcionamiento. | 116 |
| Tabla 29. Características generales de baterías LiPo de 3,7V. | 116 |
| Tabla 30. Elección batería del mecanismo. | 117 |
| Tabla 31. Resultados prueba de captura de polen para los materiales seleccionados. | 129 |
| Tabla 32. Tabla de combinación de conceptos para instrumento de captura de polen para gulupa. | 131 |
| Tabla 33. Matriz pugh: materiales prueba de captura de polen. | 134 |
| Tabla 34. Matriz pugh: determinación de concepto. | 136 |
| Tabla 35. Materiales mecanismo de aleteo para captura de polen. | 141 |
| Tabla 36. Peso componentes del mecanismo de aleteo para captura de polen. | 141 |
| Tabla 37. Parámetros cinemáticos y aerodinámicos de las alas probadas involucrados en la fuerza de elevación. | 144 |

Índice de ilustraciones

| | |
|---|----|
| <i>Ilustración 1. Método de árbol para la identificación de la problemática. Fuente: Elaboración propia.</i> | 23 |
| <i>Ilustración 2. Wowwee's Flytech Dragonfly. Fuente: (Robles Gebauer, 2012)</i> | 31 |
| <i>Ilustración 3. Nano Hummingbird, desarrollado por DARPA. Fuente: (Keennon M., Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012).</i> | 31 |
| <i>Ilustración 4. Insecto volador micromecánica (MFI). Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 32 |
| <i>Ilustración 5. Microbat. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 32 |
| <i>Ilustración 6. The mentor. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 32 |
| <i>Ilustración 7. Delfly I. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 33 |
| <i>Ilustración 8. Delfly II. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 33 |
| <i>Ilustración 9. MAV construido por Petter Muren. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 33 |
| <i>Ilustración 10. Delfly Micro. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 33 |
| <i>Ilustración 11. Microrobotic Fly. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 34 |
| <i>Ilustración 12. DAHS+Wings. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 34 |
| <i>Ilustración 13. BOLT. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</i> | 34 |
| <i>Ilustración 14. Nano Hummingbird. Fuente: (Keennon M. , Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012) ...</i> | 35 |
| <i>Ilustración 15. Sistemas de polinización automatizado B-Droid. Fuente: (Warsaw University of Technology, 2016).</i> | 37 |
| <i>Ilustración 16. Prototipo polinizador como alternativa para polinizar- Plan bee. Fuente: (Chang, 2017).</i> | 38 |
| <i>Ilustración 17. Mecanismo de transporte de polen. Consta de un dispositivo de descargas y gel iónico líquido con pelos. Fuente:(Eijiro Miyako, 2017).</i> | 38 |
| <i>Ilustración 18. Micro-drone bioinspirado en la abeja- Robobee (EDeconomíaDigital, 2017).</i> | 38 |
| <i>Ilustración 19. Esquema tipos de polinización. Fuente: Elaboración propia.</i> | 41 |
| <i>Ilustración 20. Morfología floral de la gulupa. Estructuras de la flor. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).</i> | 43 |
| <i>Ilustración 21. Dimensiones de la flor de la gulupa en milímetros (mm). (a) Medida del espacio entre la antera y el tubo floral. (b) Medidas de antera, diámetro del tubo floral, ancho de flor. Elaboración propia</i> | 44 |
| <i>Ilustración 22. Fenología floral de la gulupa. Fuente: (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011)</i> | 44 |
| <i>Ilustración 23. Polinizador efectivo flor de gulupa: abeja Xylocopa. a) Abeja Xylocopa polinizando flor de gulupa. b) Forma dorso de la abeja Xylocopa. c) Visión detallada vellosidades dorso Xylocopa. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Lawrence, 2015)</i> | 46 |
| <i>Ilustración 24. Modelo del sistema de siembra en espaldera sencilla para el cultivo de la gulupa. Fuente: (Jhon Ocampo Perez, 2012)</i> | 47 |
| <i>Ilustración 25. Modelo del sistema de siembra en emparrado para el cultivo de la gulupa. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012)</i> | 48 |
| <i>Ilustración 26. Sistema de espaldera sencilla en cultivo de gulupa. Fuente: (TV agro, 2015)</i> | 49 |
| <i>Ilustración 27. Distribución de la planta en el cultivo y la disposición de los frutos por rama. Fuente: (TV agro, 2015).</i> | 49 |
| <i>Ilustración 28. Flor abierta (antesis). Fuente: (TV agro, 2015).</i> | 50 |
| <i>Ilustración 29. Sistema musculo esquelético del colibrí. Fuente: (Zhang, 2017).</i> | 51 |
| <i>Ilustración 30. Vista dorsal sistema esquelético del ala del colibrí. Fuente: (Kenneth Welch, 2009).</i> | 51 |

| | |
|---|----|
| <i>Ilustración 31. Posición y orientación del hombro del colibrí y los huesos proximales del miembro superior en un ciclo completo de apertura en un vuelo estacionario a) inicio movimiento descendente b) mitad movimiento descendente, c) final del movimiento descendente, d) mitad del ascendente. Fuente: (Tyson L. Hedrick, 2011).</i> | 52 |
| <i>Ilustración 32. Colibrí realizando el movimiento de elevación. Fuente: (Universidad CESI, 2015) ..</i> | 54 |
| <i>Ilustración 33. Características cinemáticas vuelo del colibrí: a) Características geométricas del ala, b) Fases ciclo de batida y patrón formado por el movimiento de las alas, c) Ángulo de batida de las alas. Fuente:((KARÁSEK, 2014))</i> | 56 |
| <i>Ilustración 34. Características morfológicas ala micro vehículos aéreos bioinspirados. Elaboración propia</i> | 58 |
| <i>Ilustración 35. Mecanismo Biela Manivela. Fuente: (Gutierrez, 2010)</i> | 60 |
| <i>Ilustración 36. Mecanismo de cuatro barras. Fuente: (askix.com, 2020).</i> | 61 |
| <i>Ilustración 37. Diagrama de método inicial para el diseño de dispositivo, fundamentación y análisis funcional. Elaboración propia.</i> | 63 |
| <i>Ilustración 38. Sistema de conducción espaldera sencilla cultivo de gulupa ecofinca El paraíso. Fuente: Elaboración propia.</i> | 65 |
| <i>Ilustración 39. Prueba para la captación de polen en flor de gulupa. Fuente: Elaboración propia...</i> | 66 |
| <i>Ilustración 40. Parámetros geométricos del ala. Fuente: (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink, 2014).</i> | 72 |
| <i>Ilustración 41. Montaje realizado prueba de fuerza de elevación. Fuente: Elaboración propia.</i> | 74 |
| <i>Ilustración 42. Esquema de fuerzas involucradas para prueba de sustentación del mecanismo. Fuente: (Nakata, y otros, 2011)</i> | 74 |
| <i>Ilustración 43. Esquema electrónico medición fuerza de elevación. Elaboración propia.</i> | 76 |
| <i>Ilustración 44. Casa de la calidad para el mecanismo de aleteo. Elaboración propia.</i> | 81 |
| <i>Ilustración 45. Diagrama de funciones mecanismo de vuelo. Elaboración propia.</i> | 82 |
| <i>Ilustración 46. Mecanismo aleteo de 4 barras doble. Fuente: (Keennon M. , Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012)</i> | 83 |
| <i>Ilustración 47. Mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela-balancín: slider crank rocker. Fuente: (KARÁSEK, 2014)</i> | 84 |
| <i>Ilustración 48. Mecanismo de aleteo espacial de 6 barras. Fuente: (Wang & McCarthy, 2017)</i> | 85 |
| <i>Ilustración 49. Modelo CAD mecanismo espacial de seis barras. Fuente: Elaboración propia.</i> | 86 |
| <i>Ilustración 50. (A) Esquema mecanismo de barras basado en propuesta (KARÁSEK) (B) Esquema de lazo vectorial cerrado del mecanismo. Fuente: (KARÁSEK, 2014).</i> | 88 |
| <i>Ilustración 51. Análisis de desplazamiento del mecanismo. Eslabón de entrada r_2 (línea azul) es el punto de referencia. Eslabón de salida (línea verde). Fuente: Elaboración propia.</i> | 90 |
| <i>Ilustración 52. Desplazamiento y velocidad lineal eslabón r_1 y desplazamiento y velocidad angular de r_3 respecto al desplazamiento angular de entrada (θ_2).</i> | 91 |
| <i>Ilustración 53. Desplazamiento y velocidad angular (θ_5) y desplazamiento y velocidad lineal eslabón r_5 vs. desplazamiento angular de entrada (θ_2).</i> | 91 |
| <i>Ilustración 54. Desplazamiento y velocidad angular eslabón r_8 y r_9 vs. desplazamiento angular de entrada (θ_2).</i> | 92 |
| <i>Ilustración 55. CAD mecanismo de aleteo, basado y modificado de (KARÁSEK, 2014).</i> | 93 |
| <i>Ilustración 56. Desplazamiento angular de la salida del mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.</i> | 94 |
| <i>Ilustración 57. Resultados simulación dinámica mecanismo de aleteo: a) Velocidad angular del eslabón de entrada (r_2) y salida (r_9) con respecto al tiempo, b) Torque necesario para mover mecanismo de aleteo. Elaboración propia.</i> | 95 |

| | |
|--|------------|
| <i>Ilustración 58. Molde con medidas del ala usada por (KARÁSEK, 2014). Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Ilustración 59. Evolución mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.</i> | <i>100</i> |
| <i>Ilustración 60. Diagrama de bloques a partir de las funciones del mecanismo de aleteo para captura de polen. Elaboración propia.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Ilustración 61. Conexiones módulo de comunicación por radio frecuencia Xbee 3 Zigbee Micro. Elaboración propia.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Ilustración 62. Módulo GPS (ZOE-M8 series). Fuente: (Ublox).</i> | <i>108</i> |
| <i>Ilustración 63. Esquema de modulo GPS ZOE-M8. Elaboración propia.....</i> | <i>109</i> |
| <i>Ilustración 64. IMU TSS Nano. Fuente: (Open Impulse)</i> | <i>110</i> |
| <i>Ilustración 65. Esquema de conexión de módulo para navegación inercial: 3-Space Nano. Elaboración propia.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Ilustración 66. Módulo de cámara, sensor CMOS. Fuente: (Connecting Buyers with Chinese Suppliers, s.f.)</i> | <i>113</i> |
| <i>Ilustración 67. Conexiones modulo cámara. Elaboración propia.</i> | <i>113</i> |
| <i>Ilustración 68. Motor sin escobillas y ESC seleccionados. Fuente: (AliExpress)</i> | <i>114</i> |
| <i>Ilustración 69. Esquema de conexión sección motores del dispositivo. Elaboración propia.</i> | <i>115</i> |
| <i>Ilustración 70. Esquema de conexión del sistema de alimentación. (a) Batería de 3,7 V conectada a elevador de 5 V. (b) Conexión convertidor 3,3 V.....</i> | <i>117</i> |
| <i>Ilustración 71. Diagrama de bloques y conexión de componentes electrónicos del mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.</i> | <i>118</i> |
| <i>Ilustración 72. Microcontrolador STM32H753BIT6 - MCU, ARM CORTEX-M7. Fuente: (Newark AN AVNET COMPANY)</i> | <i>119</i> |
| <i>Ilustración 73. Esquema de conexión sección microcontrolador mecanismo de aleteo. Elaboración propia.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Ilustración 74. Diseño de la placa del circuito impreso: ubicación e interconexión de los componentes electrónicos del mecanismo. Fuente: Elaboración propia.</i> | <i>120</i> |
| <i>Ilustración 75. Resultado cálculos fuerza de elevación. Fuente: Elaboración propia.</i> | <i>121</i> |
| <i>Ilustración 76. Resultados prueba fuerza de elevación para las alas construidas. Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Ilustración 77. Modelo CAD: Detalles sistema de desplazamiento mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Ilustración 78. Construcción del modelo CAD diseñado: a) Amplitud de batida de las alas. b) Vista parte interna mecanismo (eslabones). Elaboración propia.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Ilustración 79. Casa de la calidad para el diseño del instrumento de captura de polen ( alta relación = 9;  relación moderada = 3;  baja relación = 1).....</i> | <i>126</i> |
| <i>Ilustración 80. Diagrama de funciones del instrumento de polen para generación de conceptos. .</i> | <i>128</i> |
| <i>Ilustración 81. Diseño CAD instrumento de captura de polen. Elaboración propia.....</i> | <i>137</i> |
| <i>Ilustración 82. Centro de masa para el ensamblaje del instrumento de captura respecto al mecanismo de aleteo. a) Ubicación centro de masa del mecanismo de aleteo e instrumento de captura b) Instrumento de captura ubicado en la parte superior. c) Instrumento de captura ubicado al nivel del mecanismo de aleteo. d) Instrumento de captura ubicado en la parte inferior. Fuente: Elaboración propia.....</i> | <i>139</i> |
| <i>Ilustración 83. Explosionado diseño final mecanismo de aleteo para captura de polen. Elaboración propia.....</i> | <i>140</i> |
| <i>Ilustración 84. Porcentaje peso componentes electrónicos para su distribución en el mecanismo. Elaboración propia.....</i> | <i>142</i> |

Ilustración 85. Diseño mecanismo de aleteo para captura de polen de la flor de gulupa. Elaboración propia..... 142

Glosario

Aerodinámica: Estudio del movimiento de los gases sobre los cuerpos estacionados y el comportamiento de los cuerpos que se mueven en el aire (Cañas, 2009) (Alarcon, 2015).

Aleteo: tipo de vuelo que permite el desplazamiento mediante el movimiento de las alas, en este punto las alas describen una figura geométrica, en el caso del colibrí un ocho (Standish, 2013).

Ángulo de Ataque: es el ángulo agudo formado por el filamento del ala y la dirección del viento (Lopez, 2011).

Balanceo: En un cuerpo en vuelo es el movimiento hacia arriba o abajo respecto al ala, moviéndose en un eje longitudinal, y se logra cambiando el ángulo de ataque (Portocarrero, 2012) (Standish, 2013).

Biomecánica: es la disciplina que estudia el movimiento de un cuerpo en diferentes condiciones, es decir, analizar la actividad de cualquier organismo vivo ante las diferentes circunstancias (Izquierdo, 2008).

Biomimética: es la innovación inspirada por la naturaleza, replicar el movimiento, apariencia o comportamiento de un ser vivo (Rangel, 2010).

Cabeceo: movimiento que se realiza sobre el eje horizontal, mediante la variación en el ángulo de las alas (Keennon & Klingebiel, 2012).

Centro de Presiones: punto donde se concentran todas las presiones de un cuerpo (National Aeronautics and space administration) (García-Cuevas González, Carreres Talens, & Tiseira Izaguirre).

Condiciones ambientales: factores que se encuentran en un ecosistema determinado, parámetros para tener en cuenta en la modelación de un sistema aéreo.

Elevación: resultado de la velocidad del aire sobre una superficie, convirtiéndose en una fuerza de elevación la cual supera el peso del cuerpo en cuestión (Arilla, 2016).

Empuje: fuerza de reacción, presente en cuerpos con la habilidad de moverse hacia adelante, es generada por el movimiento de las alas en un ave, y es perpendicular al flujo (Hewson, 1990).

Envergadura del ala: Extensión máxima a través de las alas de un ave, medida de punta a punta del ala (Roncero & Gavilan, 2010).

Estabilidad dinámica: habilidad de un cuerpo para mantener la estabilidad que pasa de un estado dinámico a un estado estático (Wikstrom, Tillman, Smith, & Borsa, 2005).

Estabilidad estática: capacidad de un cuerpo en mantenerse sobre un mismo punto (Sampietro, 2013) (Colby, RA, & JR., 1999).

Fuerza de Apoyo: fuerza ejercida por el punto de rotación sobre la palanca. Su magnitud al no tener en cuenta el peso de la barra, es igual a la suma de las anteriores, pero en dirección opuesta, lográndose mantener la palanca sin desplazamiento en el punto de apoyo, sobre el que rota libremente.

Giro: movimiento rotacional sobre el mismo eje (National Aeronautics and Space Administration).

Mecanismo de Aleteo: tipo de movimiento que realiza un cuerpo con alas para avanzar o sostenerse en el aire (Cervantes & Castillo, 2013).

Mecanismo de Transmisión: Mecanismos en los cuales el elemento motriz y el receptor presentan el mismo tipo de movimiento, en estos mecanismos se recibe energía o movimiento del elemento motriz y se transmite o traslada hasta el elemento receptor. (Universidad Nacional)

Mecanismo de Transformación: Mecanismos en los cuales el elemento motriz y el receptor presentan diferentes tipos de movimiento, en esto se recibe energía o movimiento del elemento motriz y se presenta una transformación o adecuación del movimiento antes llegar al receptor.

Momento Flector: El momento flector o momento de flexión, es un momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma mecánico flexionado o una placa que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del que se produce la flexión. El momento flector puede aparecer cuando se someten estos elementos a la acción de un momento (torque) o también de fuerzas puntuales o distribuidas (Berrocal)

Número de Reynolds: número adimensional que se utiliza en mecánica de fluidos, donde relaciona las variables de densidad, velocidad y viscosidad de un fluido (MEseguer, Sans, Perales, & Pindado, 2002).

Palanca: Una palanca es una máquina simple compuesta por una barra rígida que puede girar alrededor de un punto de apoyo o rotación. Su funcionamiento se basa en la aplicación de una fuerza a una distancia cualquiera para lograr superar una fuerza resistiva (Correa, Diseño de una secuencia didáctica para la enseñanza-aprendizaje del concepto de torque a partir de las máquinas simples, 2014).

Potencia: es la fuerza que se aplica con el fin de obtener un resultado; ya sea manualmente o por medio de motores u otros mecanismos (Suchoki, 2012).

Resistencia: es la fuerza que se va a vencer, se ejerce sobre la palanca por el cuerpo a mover (Suchoki, 2012).

Rotación: movimiento de un cuerpo que gira alrededor de su mismo eje (RAE).

Sustentación: fuerza resultante sobre un cuerpo perpendicular a la velocidad que incide sobre el objeto (Cañas, 2009).

Traslación: desplazamiento de un cuerpo de un punto A, a un punto B.

Vida Útil: tiempo durante el cual está en funcionamiento óptimo un dispositivo.

1. INTRODUCCIÓN

La polinización es indispensable para la producción global de alimentos; sin embargo, la población de polinizadores ha disminuido debido principalmente a prácticas agrícolas intensivas, cambios en el uso de la tierra y uso de plaguicidas, entre otros. A nivel nacional se ha empezado a reconocer la importancia que tienen los polinizadores en la producción de alimentos, teniendo en cuenta que al menos 90 cultivos de frutas y verduras son polinizados por distintas especies de abejas, moscas, mariposas, polillas, escarabajos y murciélagos (Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2018).

La gran mayoría de las especies de plantas con flores sólo producen semillas si un polinizador natural transporta polen de las anteras a los estigmas de las flores. Algunas plantas dependen de polinizadores efectivos para conservar la calidad genética y producir frutos de calidad. En Colombia uno de los productos de exportación en auge es la gulupa (*Passiflora edulis f. edulis Sims*) con alrededor de 8000 toneladas exportadas; no obstante, la producción de esta fruta depende de un polinizador especializado, y debido a la baja presencia de polinizadores se han implementado, en algunas zonas del país, métodos de polinización artificial para complementar la polinización natural.

Los desarrollos aéreos bioinspirados son una alternativa tecnológica potencial para aplicar en la polinización artificial, puesto que, tienen la ventaja de operar en diferentes terrenos, además, sirven como asistencia en el proceso de polinización, en conjunto con los polinizadores naturales. Por lo anterior, se propone desarrollar una alternativa, a partir del vuelo de aleteo del colibrí, para asistir en el proceso de polinización de la flor de la gulupa.

Este trabajo presenta un mecanismo de aleteo para elevación como primera fase de un prototipo mecatrónico bioinspirado en el colibrí para una posible alternativa de apoyo en la polinización de gulupa (*Passiflora edulis f. edulis Sims*). Se desarrolla un mecanismo para aleteo, al que se le hace un estudio del movimiento. Se realiza

una prueba para determinar la fuerza de elevación que pueden generar unas alas, en conjunto con un modelo del mecanismo de aleteo. Además, se realiza un diseño de una herramienta para captura de polen de la flor de gulupa. Se hace una integración de estos diseños.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los servicios de polinización son un componente esencial de la biodiversidad, ya que contribuyen en la conservación de diversidad biológica; el mantenimiento de la estructura y función de los ecosistemas; la producción de alimentos, y la economía mundial (Van der Sluijs & Vaage, 2016; Universidad Nacional de Colombia, 2016; Vanbergen & The Insect Pollinators Initiative, 2013). A nivel mundial, 87% de los principales cultivos alimentarios de la humanidad dependen de la polinización animal (Kluser, y otros, 2010).

Los agentes polinizadores se han visto afectados por la pérdida y fragmentación del hábitat (García, 2011), así como por el uso desmedido de plaguicidas y herbicidas, la deforestación y el cambio climático (Haddad, y otros, 2015). Además, el desconocimiento de la importancia de los polinizadores en los agroecosistemas, ha puesto en peligro la existencia de las abejas polinizadoras y por lo tanto el funcionamiento de los ecosistemas (Universidad Nacional de Colombia, 2016). La disminución de las abejas polinizadoras afecta la calidad de los frutos, ya que de la polinización depende el número de semillas y su peso total (Klatt, y otros, 2014; Pinilla Gallego & Nates Parra, 2015). Para el caso particular de la *Passiflora edulis*, la reducción de las poblaciones de abejas del género *Xylocopa*, polinizador eficaz de este cultivo por su gran tamaño en comparación con las dimensiones de la flor, ha traído como consecuencia una disminución en la producción de frutos y simultáneamente un efecto negativo en la rentabilidad del cultivo (Calle, Guariaguata, Giraldo, & Chará, 2010).

Colombia se encuentra entre los diez principales productores de frutas exóticas en el mundo, muchas de estas aún no explotadas comercialmente, pero con un gran potencial para el desarrollo económico, como es el caso del cultivo de Gulupa (*Passiflora edulis f edulis sims*) (López Vásquez & Rodríguez Gómez, 2017; Universidad Nacional de Colombia, 2016). El fruto comestible de la gulupa (*Passiflora edulis f edulis sims*) ha generado una demanda en los mercados

internacionales, ocupando el tercer renglón dentro de las frutas exportadas de Colombia hacia el mercado europeo, debido a sus buenas características nutricionales y organolépticas de sabor y aroma (Miranda , y otros, 2009; Franco, 2013; Castilla, 2019). Sin embargo, a pesar de la creciente demanda en el mercado internacional, existen problemas en su producción interna que afectan la rentabilidad del productor; esto puede ser consecuencia de la falta de implementación de tecnologías y de un control ambiental con estándares internacionales (Castilla, 2019).

La exportación de la gulupa exige frutos de calidad, lo que significa que estos sean de mayor tamaño y produzcan mayor cantidad de semillas. Para esto, la *Passiflora edulis f edulis sims* requiere de agentes polinizadores, ya que, a pesar de ser una planta auto compatible solo se puede reproducir por autopolinización espontanea en un 28% (Angel Coca, Natesparra, Ospina Torres, Melo Ortiz, & Amaya Márquez, 2011; Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Medina Gutierrez, Ospina Torres, & Nates Parra, 2012). Además, debido a que el grano de polen es pesado y pegajoso, es difícil que este sea transportado a través del viento (Angel Coca, Natesparra, Ospina Torres, Melo Ortiz, & Amaya Márquez, 2011).

El abejorro *Xylocopa* es el polinizador más eficaz de este cultivo debido a su gran tamaño, lo que le permite un menor número de visitas a la flor, en comparación con las abejas *Apis mellifera L* las cuales contribuyen en la polinización pero su eficiencia individual es baja debido a su tamaño reducido con respecto a las dimensiones de la flor (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012). Sin embargo, cuando no existe una buena polinización natural por los insectos y el porcentaje de cuajamiento (formación de frutos) es inferior al 30%, se realiza la polinización artificial o manual aumentando el porcentaje de polinización (82-91%) y el número de óvulos fecundados (Medina Gutierrez, Ospina Torres, & Nates Parra, 2012), para que de esta manera se produzcan más semillas con mayor cantidad de jugo y mayor tamaño de los frutos. A pesar de esto, este tipo de polinización presenta problemas relacionados con la eficiencia y eficacia en el proceso, debido a la variabilidad

genética del polen empleado y el número de veces que la flor debería ser polinizada para verse reflejada la efectividad (Torres Núñez, 2018).

Otra alternativa utilizada para la polinización es la práctica de introducir especies de polinizadores al cultivo, pero actualmente se presentan inconvenientes para conseguir que el proceso sea exitoso, debido a la disminución de la población de estos polinizadores silvestres, junto con la degradación de su hábitat por prácticas e intervenciones humanas insostenibles, y los pocos estudios sobre su comportamiento de nidificación y biología reproductiva, que aún son un área en exploración (Gonzalez, Gonzalez, & Cuellar, 2009; Pinilla Gallego & Nates Parra, 2015; Universidad Nacional de Colombia, 2016). Actualmente en Colombia no se han implementado dispositivos tecnológicos (polinización mecánica) para asistir el proceso de polinización en el cultivo de gulupa (*Passiflora edulis f edulis sims*) (Universidad Nacional de Colombia, 2016).

De acuerdo a lo mencionado, se presenta una problemática en el sector agrícola asociada a la disminución y poca eficacia de los polinizadores naturales en los cultivos de gulupa (*Passiflora edulis f edulis sims*) lo que afecta la calidad y cantidad de los frutos, limitando la productividad y rentabilidad del cultivo; en la Ilustración 1 se muestran las causas y efectos de esta. Por ende, es importante asistir en el proceso de polinización realizado por agentes naturales con tecnologías de asistencia que permitan mitigar el impacto generado por la disminución de polinizadores y el servicio que ellos proveen, mientras se consigue restaurar el ecosistema.

Por lo tanto, se propone el diseño de un prototipo de aleteo bioinspirado en el colibrí como una alternativa tecnológica para la asistencia en el transporte del polen entre flores y su posible fecundación en el cultivo de gulupa (*Passiflora edulis f edulis sims*), y así mantener la productividad del cultivo y en consecuencia aprovechar la oportunidad de mercado dada por la demanda mundial de este fruto ayudando en pro del sustento económico que representa para comunidades locales e industrias.

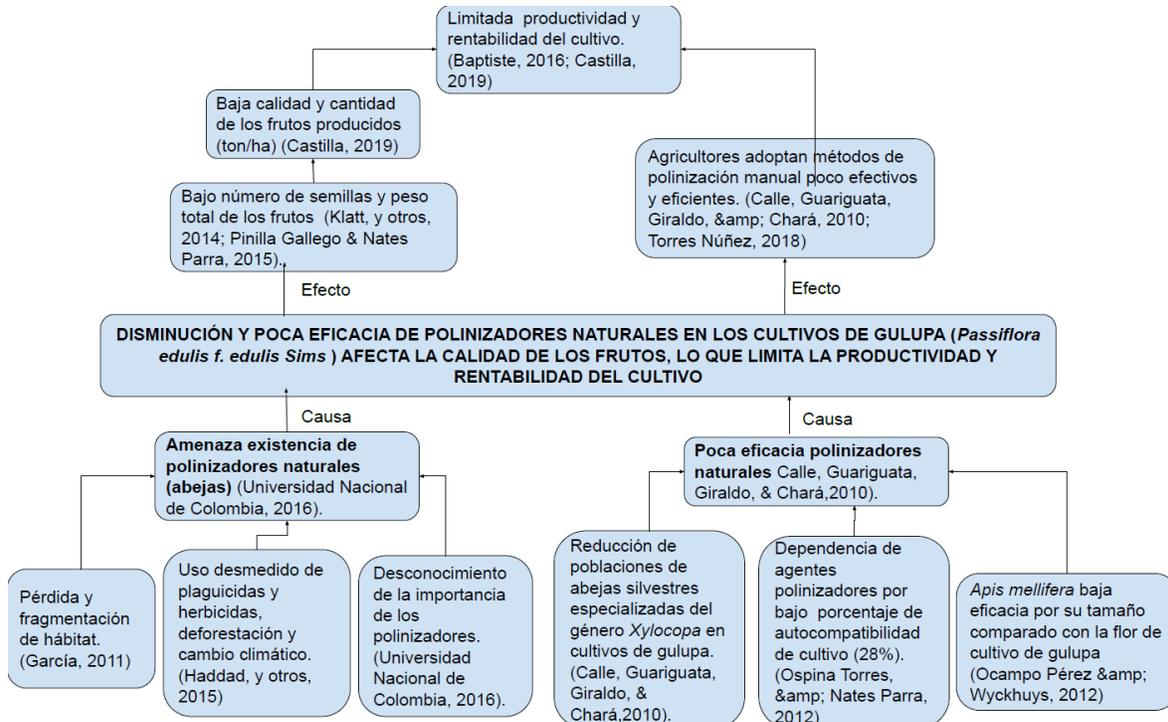


Ilustración 1. Método de árbol para la identificación de la problemática. Fuente: Elaboración propia.

3. JUSTIFICACIÓN

La polinización es un proceso esencial para un correcto funcionamiento de los ecosistemas y la producción de alimentos. A nivel global, el 87% de las especies cultivadas, que representan un 35% del suministro global de alimentos, se ven beneficiadas por este proceso; esto representa un valor económico de más de 568 mil billones de pesos colombianos o al 9,5% del total de la producción agrícola. Igualmente, alrededor del 78% de plantas con flor en climas templados y del 94% en climas tropicales se benefician del proceso de polinización mediada por animales (García García, Rios Ozorio, & Alvares del Castillo, 2016).

A pesar de este servicio importante de polinización, un colapso de este traería crisis alimentaria, reducción de ingresos comerciales del sector agropecuario y pérdida de competitividad en el mercado (Baptiste, 2016). La expansión e intensificación del uso agropecuario depende de altos niveles de insumos químicos, los cuales son las principales causas de pérdida de la diversidad de polinizadores, en especial las abejas (FAO, 2018). Actualmente, más de un tercio de las colmenas colombianas colapsaron en 2014 y 2017 debido al uso excesivo de agroquímicos (López Cubillos, y otros, 2019).

A partir de las percepciones de los agricultores con cultivos de pasifloras en departamentos de Colombia, quienes valoran la importancia del servicio de polinización y, debido a la baja presencia de los agentes polinizadores en los cultivos se ha implementado la polinización artificial para complementar esta ausencia; esta alternativa de polinización se presenta con mayor frecuencia en cultivos que están aislados de vegetación nativa, tienen mayor densidad y están sometidos a aplicaciones de plaguicidas (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Pantoja, Pardo, García, Saez, & Rojas, 2014). Además, estudios realizados sobre cultivos de importancia económica, donde se menciona la polinización como servicio ambiental, se refieren al cultivo de la gulupa (*Passiflora edulis f. edulis sims*), afirmando que esta especie de planta necesita de polinizadores para producir una

buena cosecha, pues solo el 33% de los frutos se forman sin el acceso a estos (Angel Coca, Natesparra, Ospina Torres, Melo Ortiz, & Amaya Márquez, 2011; Torres Núñez, 2018).

En cuanto al ámbito económico, la fruta del cultivo de gulupa (*Passiflora edulis f. edulis sims*) ocupa el tercer renglón dentro de las frutas exportadas de Colombia hacia el mercado europeo (Miranda , y otros, 2009; Franco, 2013; Castilla, 2019). Para el año 2017 el volumen de exportación fue de 6587 toneladas, representando un monto de USD \$27,7 millones, mientras que para el año 2018 fueron exportadas 8109 toneladas que representan un monto de USD \$32 millones (Castilla, 2019). El precio de compra en el mercado internacional por kilogramo para el año 2018 fue de USD \$4 y nacional fue de COP \$2500 (Asociación Nacional de Comercio Exterior, 2018; DANE, 2019). La producción promedio por hectárea de cultivo de gulupa es de 14 toneladas y según Álvaro Palacio, presidente de Asohofrucol, una hectárea es económicamente rentable si produce 20 toneladas (Castilla, 2019). Estas cifras son una muestra de la creciente oportunidad económica para el agricultor y el potencial desarrollo social y económico potencial que podría brindar la producción y comercialización de este fruto; sin embargo, todo esto depende de una producción de frutos de alta calidad.

A partir de lo expuesto, la dependencia de agentes polinizadores y su inminente disminución, además de la necesidad de aumentar el rendimiento (toneladas por hectárea) de los cultivos, son factores que resaltan la importancia de adoptar métodos de polinización artificial o manual combinados con la polinización natural y de esta manera beneficiarse de la diversidad de abejas silvestres (intensificación ecológica) en lugar de degradarlas (intensificación convencional) (Universidad Nacional de Colombia, 2016; Silveira, Abot, Nascimento, Rodrigues, Rodrigues, & Puker, 2012).

En Colombia, en el cultivo de gulupa es poco el conocimiento técnico existente (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Castilla, 2019). Además, las técnicas de

polinización actuales y naturales, utilizadas para mantener una buena producción no están siendo del todo eficaces. A nivel global, la disminución de polinizadores ha llevado a buscar alternativas tecnológicas y se vienen desarrollando varios proyectos de ingeniería que buscan favorecer la polinización mediante el apoyo a los servicios ecosistémicos (Calle, Guariguata, Giraldo, & Chará, 2010; Chintala, 2019), como la polinización mecánica terrestre y aérea (Courtney, 2019; Bukowska, 2016; Helmer, 2018). Las tecnologías terrestres son de gran tamaño y están pensadas para polinizar árboles frutales o plantas pequeñas espolvoreando el polen; sin embargo, este método no transfiriere el polen directamente a los estigmas de la flor; por consiguiente, no son dispositivos que se puedan aplicar para polinización del cultivo de gulupa.

Los desarrollos aéreos son una potencial alternativa, pero en algunos casos no son apropiados para polinizar el cultivo de gulupa. Por ejemplo, algunos prototipos bioinspirados en el tamaño de la abeja *A. Mellifera*, no serían útiles por su reducido tamaño. En el caso de drones de ala rotatoria, cuando las hélices giran a gran velocidad al aire libre, sin ninguna protección, generan peligro al entrar en contacto con ellas (Díaz Cantos, 2015), ya que generalmente, este tipo de drones operan a una altura específica del cultivo sin estar en contacto directo con este (Ojada Bustamante, Gonzalez Sánchez, Mauricio Pérez , & Flores Velázquez, 2017), por tanto, este tipo de dispositivos no es adecuado para realizar tareas específicas, como la polinización.

Cuando se realiza la polinización artificial o manual, el porcentaje de polinización puede ser de 82-91%, aumentando el número de óvulos fecundados y la cantidad de semillas (Medina Gutierrez, Ospina Torres, & Nates Parra, 2012; Flores Riatiaga, 2013). Por este motivo, la aplicación de este método para diseñar herramientas tecnológicas y así asistir en la polinización de cultivos, combinado con las tecnologías aéreas, es una opción adecuada para ser implementada en diferentes tipos de terrenos y tiene un uso potencial en la agricultura.

Por lo tanto, se propone el diseño de un dispositivo de aleteo bioinspirado como posible alternativa en la polinización artificial de la gulupa (*Passiflora edulis*). Proponemos utilizar las características del vuelo del colibrí para diseñar un dispositivo que permita transportar el polen y asistir en el proceso de polinización conjuntamente con los polinizadores naturales, aprovechando su eficiencia de generación de fuerza de elevación durante ambas carreras de batida del ala (Roccia B. A., 2013). Adicional a esto, el tamaño y proporción del colibrí puede permitir diseñar un dispositivo con una mayor capacidad de carga, comparado con un insecto. Este diseño sería el propósito de una primera fase, para un futuro desarrollo e implementación de micro-vehículos aéreos de aleteo para asistencia en la polinización, que puedan entrar al cultivo como lo hacen los agentes biológicos, acercándose a la planta y/o flor sin dañarla. El bioingeniero está en la capacidad de realizar este proyecto ya que contribuye a la automatización y optimización de ambientes de producción biológica, a través de la aplicación de sistemas de la naturaleza en el desarrollo de tecnologías en pro de un desarrollo social y teniendo en cuenta soluciones sostenibles.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- ∞ Diseñar un mecanismo de aleteo para elevación, como primera fase, de un prototipo mecatrónico bioinspirado en el vuelo del colibrí para una posible alternativa de apoyo en la polinización del cultivo de Gulupa (*Passiflora edulis f.edulis Sims*).

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ∞ Diseñar un mecanismo de aleteo a partir de las características de vuelo del colibrí que pueda generar elevación del mismo hacia la flor para su polinización.
- ∞ Diseñar un instrumento de captura de polen de la flor de gulupa, que pueda ser incorporado al mecanismo de aleteo.
- ∞ Evaluar el movimiento de aleteo mediante un análisis cinemático y una simulación dinámica del mecanismo.
- ∞ Evaluar la fuerza de elevación del mecanismo de aleteo, mediante una prueba realizada a partir de la construcción de un modelo del mecanismo.

5. ALCANCE DEL PROYECTO

Con el desarrollo del proyecto propuesto se obtendrá el diseño de un mecanismo de aleteo que pueda generar fuerza de elevación para desplazamiento vertical (como primera fase de un prototipo mecatrónico bioinspirado en el vuelo del colibrí), integrado a un instrumento para capturar polen de la flor de gulupa. De esta manera, se proporciona un método alternativo de polinización artificial, que se pueda aplicar en los cultivos con sistema de conducción de espaldera sencilla, para asistencia en el proceso, en conjunto con polinizadores naturales.

El desarrollo del proyecto comprende el estudio de mecanismos para conseguir el aleteo, teniendo en cuenta características cinemáticas del vuelo del colibrí: movimientos y forma del ala, frecuencia de aleteo y amplitud de batida. Se desarrollan simulaciones con el programa Matlab para el estudio cinemático que comprende los cambios de posición y velocidad de las partes del mecanismo en movimiento.

La evaluación del mecanismo de aleteo se limita a una prueba de fuerza de elevación a partir de la construcción de un modelo del mecanismo. El modelo únicamente se construye con la finalidad de analizar el movimiento de aleteo producido y para medir la fuerza vertical generada por las alas durante el aleteo, no incluye simulaciones de dinámica de fluidos computacionales.

Se realiza el diseño de un instrumento de captura de polen, comprendido por una combinación de elementos que incluyen un material adecuado para capturar el polen de las anteras de la flor; este será una extensión del dispositivo, no incluye partes mecánicas ni electrónicas. El diseño se hace estableciendo requerimientos a partir de la caracterización del entorno, específicamente: las características de conducción o tutorado del cultivo, las características morfológicas de la flor, su ubicación y distribución en la rama y adicionalmente, la interacción básica entre polinizador y flor. El diseño comprende la forma del instrumento, dónde estará ubicado este en el diseño global y una prueba de materiales. La prueba únicamente demuestra el material que más cantidad de polen recoja.

Para el desarrollo de este mecanismo, como primera fase, se establece un conjunto de posibles elementos electrónicos de acuerdo a los requerimientos, con el propósito de hacer una estimación del peso del dispositivo, así como también la capacidad de la fuente de alimentación. Solo se presenta un esquemático donde se evidencia las conexiones entre los elementos seleccionados. No se realizan pruebas o simulaciones electrónicas.

Los resultados del proyecto comprenden:

Resultados de simulación cinemática del mecanismo de aleteo que comprenden el análisis de las posiciones y velocidades de las partes del mecanismo en movimiento. Simulación dinámica del diseño CAD propuesto.

- Resultados de fuerza de elevación teórica del mecanismo de aleteo que relacionan la forma del ala con la velocidad de aleteo del mecanismo.
- Resultados de prueba de fuerza de elevación del mecanismo de aleteo que evidencie que la fuerza generada es igual o superior al peso del mecanismo.
- Resultados de prueba de materiales para captura de polen de gulupa que evidencien el mejor material a utilizar para capturar el polen de la flor de gulupa.
- Un diseño asistido por computador que evidencie el diseño del mecanismo de aleteo y su integración con el instrumento de captura de polen de flor de gulupa.
- El plano de conjunto que muestra la visión general del dispositivo a construir para hacer posible el montaje; con este se puede ver la situación de las distintas piezas que lo componen, la relación y las concordancias existentes entre ellas. Adicionalmente, los planos que dimensionan cada una de las piezas que componen el mecanismo.

6. ANTECEDENTES

Se han realizado estudios del diseño e implementación de robots bioinspirados como: Hummingbird Nano Air Vehicle (NAV) (Ilustración 3), avión ultraligero controlado remotamente y desarrollado por AeroVironment. El Hummingbird NAV se desarrolla bajo el programa de desarrollo de vehículos aéreos Nano (NAV), patrocinado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA). El Hummingbird NAV está diseñado según las características del colibrí. El dispositivo se asemeja a las características de vuelo de un colibrí, tiene una longitud de aproximadamente 15 cm y un peso de solo 19 gramos. Posee una envergadura de 16 cm y está equipado para llevar consigo su propia fuente de energía mientras vuela. Las alas unidas al NAV ayudan a rotar y girar hacia cualquier ángulo y posición según lo indique el equipo de control. El NAV lleva todo el equipo requerido para volar, incluye motores, baterías, control, sistema de comunicación y una cámara de video para fines de vigilancia e inspección.

Otro estudio relacionado con diseño e implementación de dispositivos bioinspirados de alas batienetes es el “Wowwee's Flytech Dragonfly” (Ilustración 2), capaz de volar de cabeza abajo utilizando video a bordo y puede mantener un vuelo estacionario. Tiene la capacidad de volar transiciones desde un entorno exterior a un ambiente interior y viceversa. Presenta características físicas como: masa total 19 g, frecuencia de aleteo de 30 Hz, envergadura 26,5 cm, longitud del ala 7,4 cm. La velocidad de planeado es de 6,7 m/s (~ 15mph), tienen una resistencia de 4 minutos, es un mecanismo de vuelo liviano, eficiente duradero, fácil de mantener y fácil de fabricar.

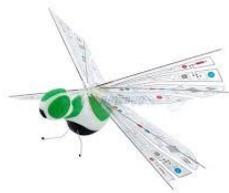


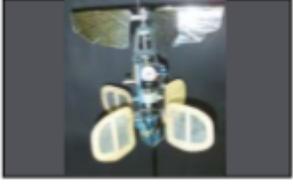
Ilustración 2. Wowwee's Flytech Dragonfly. Fuente: (Robles Gebauer, 2012)

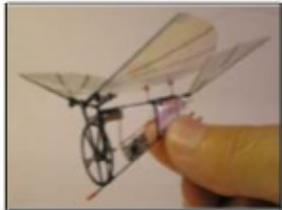


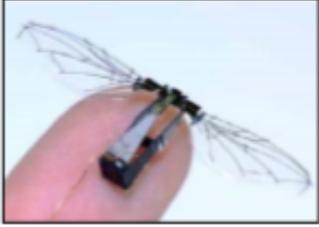
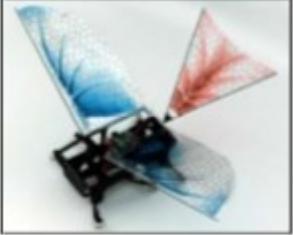
Ilustración 3. Nano Hummingbird, desarrollado por DARPA. Fuente: (Keennon M., Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012).

En síntesis, con lo descrito anteriormente se presenta un resumen (Tabla 1) desde el primer dispositivo hasta el modelo más actual del mecanismo de vuelo de un colibrí.

Tabla 1. Resumen de los mecanismos basados en diferentes tipos de vuelo y sus especificaciones hasta el día de hoy.

| NOMBRE | CARACTERÍSTICAS | MAV |
|---|---|---|
| <p>Insecto volador micro mecánico (MFI) (1998-2007)</p> | <p>Estudia la aerodinámica de alas batientes y permaneció activo hasta el año 2007 logrando grandes resultados</p> |  <p>Ilustración 4. Insecto volador micromecánica (MFI). Fuente: (Roccia B. A., 2013)</p> |
| <p>Microbat (2000)</p> | <p>Aerovironment y Caltech diseñaron el Microbat, primer micro vehículo aéreo.</p> |  <p>Ilustración 5. Microbat. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</p> |
| <p>The mentor (2002)</p> | <p>Primer MAV equipado con un sistema de radio control capaz de realizar vuelo estacionario (envergadura = 356 mm).</p> |  <p>Ilustración 6. The mentor. Fuente: (Roccia B. A., 2013)</p> |
| <p>Delfly I (2005)</p> | <p>Prototipo construido por la Universidad de Delf y la Universidad de Wageningen. Fue equipado con una cámara de video a bordo y tiene la capacidad de cambiar entre dos configuraciones</p> |  |

| | | |
|---|--|--|
| | de vuelo diferente, vuelo hacia adelante y vuelo estacionario. | Ilustración 7. Delfly I. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013) |
| Delfly II (2006) | Pesa 16 gramos y presenta una envergadura de 280 milímetros, 50% más pequeño que el Delfly I. Tiene una mejor autonomía (15 minutos para vuelo hacia adelante u 8 minutos para vuelo suspendido, un lazo de control entre el MAV y una estación de monitoreo fija. |  Ilustración 8. Delfly II. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013) |
| MAV construido por Petter Muren (2007) | Presenta una envergadura de 100 milímetros, un peso de solo 1.1 gramos, y una autonomía menor a un minuto. Es el micro vehículo aéreo a radio control más pequeño del mundo. |  Ilustración 9. MAV construido por Petter Muren. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013) |
| Delfly Micro (2008) | El Delfly micro, tiene una envergadura de 10 cm, un peso de 3,07 gramos y una autonomía cercana a los 3 minutos. Hasta la fecha es el vehículo volador equipado con una cámara de video más pequeño construido en el mundo. |  Ilustración 10. Delfly Micro. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013) |
| Microrobotic Fly (2010) | El Laboratorio de Micro robótica de Harvard presentó un diseño innovador del tórax de un insecto volador, capaz de mover las alas asimétricamente. La primera | |

| | | |
|------------------------------|--|--|
| | <p>generación del micro robot desarrollado por el laboratorio de Harvard utiliza una viga cantiléver con material piezoeléctrico como actuador, pesa solo 60 miligramos y tiene una envergadura de tres centímetros</p> |  <p>Ilustración 11. Microrobotic Fly. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013)</p> |
| <p>DAHS+Wings (2011)</p> | <p>Pequeño robot que utiliza alas batientes para mejorar su desempeño en ambientes terrestres complejos.</p> |  <p>Ilustración 12. DAHS+Wings. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013)</p> |
| <p>BOLT (2011)</p> | <p>Presenta un peso de 13 gramos y posee la habilidad de cambiar entre modos de locomoción para desplazarse efectivamente por aire o por tierra. Mediante el uso de las alas puede alcanzar una velocidad máxima de 2.5 m/seg, mientras mantiene contacto con el suelo</p> |  <p>Ilustración 13. BOLT. <i>Fuente:</i> (Roccia B. A., 2013)</p> |

| | | |
|---|---|--|
| <p>Nano Hummingbird (2005-2012)</p> | <p>Pequeño ornitóptero flotante, bioinspirado, que desarrolló el programa Nano Air Vehicle (NAV), que presenta una masa de 19 gramos, una envergadura de 16,5 cm, la capacidad de flotar durante varios minutos, volar hacia adelante 6,7 m/s, y transmitir videos en vivo a una estación terrestre remota. El dispositivo, tiene la capacidad de realizar un vuelo controlado a partir de sus alas batientes</p> |  <p>Ilustración 14. Nano Hummingbird. Fuente: (Keennon M. , Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012)</p> |
|---|---|--|

Fuente: *Elaboración propia (Basada en literatura) (Roccia B. A., 2013).*

A continuación, se muestra una comparación de las características de vuelo de los dispositivos aéreos no tripulados existentes y las características del vuelo del colibrí.

Tabla 2. Comparación de dispositivos aéreos no tripulados con las características de vuelo del colibrí.

| Características del vuelo del colibrí | Dispositivos aéreos |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Características aerodinámicas eficientes: los colibríes presentan un 20% más de eficiencia con respecto a los drones de última tecnología, en términos de la energía que necesitan para alzar su peso en el aire (Gill, 2014). • Alta maniobrabilidad: según la universidad de California, Berkeley, estas aves son capaces de sacudir sus cuerpos extremadamente rápido, con la particularidad de hacerlo en pleno vuelo sin mostrar pérdida de control aerodinámico. Realizan oscilaciones de cuerpo, cabeza y cola, sincronizadas con las alas, que se mueven en dirección opuesta con una aceleración 14 veces | <ul style="list-style-type: none"> • Drones alas fijas: no presentan vuelo estacionario. Para producir suficiente empuje deben mantenerse en movimiento a una velocidad mínima, lo que los limita a uso solo en exteriores. El impulso hacia adelante generalmente es producido por una o varias hélices. Los diseños con alas de cola son pasivamente estables; sin embargo, los Microvehículos aéreos más pequeños requieren un aumento de estabilidad mediante una computadora a bordo. El vuelo autónomo requiere una planificación sofisticada de la trayectoria, ya que todas las maniobras deben permanecer dentro del |

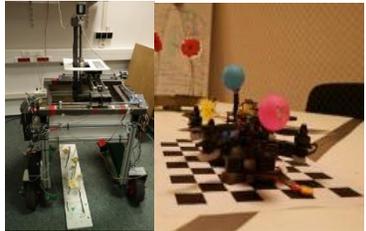
| | |
|--|--|
| <p>mayor a la que experimenta una persona en caída libre (Ortega, 2012)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Libertad de movimiento por estructura anatómica: las alas de los colibríes están adheridas a los hombros, hecho que les otorga mayor libertad de movimiento. Los músculos encargados del batido alar están hipertrofiados, es decir, muy grandes y desarrollados en comparación con los de otras aves (BioExpedition Publishing, 2014). • Vuelo estacionario: los colibríes son los únicos vertebrados capaces de mantener el vuelo sostenido en un mismo sitio, poseen una gran carga alar, la cual, es la relación entre el peso y la superficie de las alas. La superficie del ala del colibrí es reducida, lo que evita el exceso de fricción en el aire. Mueven sus alas de abajo hacia arriba formando vórtices en los espacios traseros y delanteros del aire y después se forma un solo vórtice que crea un área de baja presión, lo que facilita el ascenso del colibrí y el mantenimiento de su posición semifija (BioExpedition Publishing, 2014). | <p>sobrevuelo de la aeronave (KARÁSEK, 2014).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Drones ala rotatoria: presentan vuelo estacionario, pero tienen poca maniobrabilidad en caso de ser grandes. Generan la elevación mediante uno o varios rotores con álabes rotativos. Hoy en día, existen diseños de rotor conocidos como cuadricópteros y multicópteros. Estos diseños son inherentemente inestables y requieren un piloto automático a bordo para controlar la actitud. Esto, sin embargo, hace que los diseños sean muy maniobrables y ágiles, pero relativamente insensibles a las perturbaciones. Sin embargo, el Microvehículo aéreo (MAV) profesional más pequeño disponible comercialmente, el Black Hornet de Proxdynamics, utiliza un diseño tradicional de helicóptero con un rotor principal y un rotor estabilizador de cola. <p>Están limitados por la velocidad máxima y comparados con los de ala fija son menos eficientes debido a que su tiempo de vuelo es limitado (KARÁSEK, 2014).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Drones de alas batientes: Los diseños existentes todavía son inmaduros y su rendimiento es, por el momento, peor en comparación con los dos grupos anteriores. Sin embargo, los aviadores naturales con alas batientes exhiben largos tiempos de vuelo (sin ningún ingreso de energía) junto con habilidades acrobáticas que son muy superiores a cualquier avión hecho por el hombre, especialmente a pequeña escala. Los primeros desarrollados son |
|--|--|

| | |
|--|---|
| | MAV estabilizados a la cola y pasivamente estables y otros MAV controlados por el movimiento del ala (KARÁSEK, 2014). |
|--|---|

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta las características de vuelo del colibrí, es posible que estas se puedan aplicar en un dispositivo aéreo de elevación, como una posible alternativa en la polinización artificial. Actualmente se han realizado estudios de varios drones destinados a la polinización área, sin embargo, estos solo se encuentran en etapa de estudio y no han podido ser implementados. En la Tabla 3 se describen algunos desarrollos de tecnologías para polinización.

Tabla 3. Desarrollos tecnológicos actuales para polinización artificial.

| NOMBRE | CARACTERÍSTICAS | TECNOLOGÍA |
|---------|---|---|
| B-Droid | <p>Desarrollado por La Universidad Tecnológica de Varsovia. Dos versiones de sistemas automatizados. Una con ruedas que con un computador análisis del terreno, mapeo y detección de flores para establecer rutas para alcanzarlas. cuenta con un cepillo para manipular el polen, recolectándolo y moviéndolo hacia la próxima flor que se detecte.</p> <p>El B-Droid volador es un quadcopter, Las operaciones que este realiza son supervisadas por una computadora externa, pero, cuenta con circuitos destinados al análisis de imágenes para planificar la ruta hacia las flores y trazar el vuelo. Por su batería solo puede realizar un par de minutos de vuelo. (Warsaw University of Technology, 2016).</p> |  <p><i>Ilustración 15. Sistemas de polinización automatizado B-Droid. Fuente: (Warsaw University of Technology, 2016).</i></p> |

| | | |
|---|--|---|
| <p>Plan Bee</p> | <p>Diseñado por Anna Haldewang, presenta un dron en fase de prototipo de polinización cruzada. El dron está hecho de un plástico liviano y cubierto con espuma en el exterior y una propela en la parte superior (Chang, 2017). Este dispositivo está pensado para operar en lugares como cultivos hidropónicos, donde no hay insectos sobrevolando por el lugar. El dron utiliza su hélice para movilizarse y realizar simultáneamente la acción de polinización, liberando el polen a través de unos pequeños agujeros en la parte inferior.</p> <p>Se utiliza luz ultravioleta para detectar las flores (bioinspirado en abejas) (Jurkiewicz, 2017; Chang, 2017; Porter, 2017).</p> |  <p>Ilustración 16. Prototipo polinizador como alternativa para polinizar-Plan bee. Fuente: (Chang, 2017).</p> |
| <p>Diseño de material para polinizadores artificiales</p> | <p>Usando un dron comercial, por medio de pelos animal cargados y untados un gel iónico líquido el polen se logra adherir. Se logró polinización exitosa del lirio japonés (<i>Lirium japonicum</i>) (Eijiro Miyako, 2017).</p> |  <p>Ilustración 17. Mecanismo de transporte de polen. Consta de un dispositivo de descargas y gel iónico líquido con pelos. Fuente:(Eijiro Miyako, 2017).</p> |
| <p>Robobee</p> | <p>El Instituto Wyss y la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de Harvard han trabajado en un prototipo de robot polinizador, desde el 2009. Son microdrones bioinspirados en la abeja, pesan alrededor de 80 mg, tiene alas finas con las que este aletea alrededor de 120 veces por</p> |  <p>Ilustración 18. Micro-drone bioinspirado en la abeja-</p> |

| | | |
|--|--|--|
| | <p>segundo; misma velocidad del vuelo de abejas.</p> <p>Se fabrica con láminas de cerámica, fibra de carbono, titanio y plástico, elementos cortados con láser, que luego son unidos con bisagras microscópicas.</p> <p>Limitaciones: suministro energético y y el peligro que representa el flujo de viento al empujar los drones.</p> <p>(EDeconomíaDigital, 2017)</p> | <p><i>Robobee</i> (EDeconomíaDigital, 2017).</p> |
|--|--|--|

7. MARCO TEORICO

Polinización

La polinización es el proceso por el cual una planta puede desarrollar semillas o frutos, mediante su reproducción. Este proceso tiene lugar cuando el polen (granos microscópicos producidos por los órganos masculinos de las plantas) es transferido desde el estambre (órgano floral masculino) hasta el estigma (órgano floral femenino), lo cual produce la germinación y fecundación de óvulos de la flor (Syngenta; Casa de miel. ; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2005).

Durante el proceso de polinización, existen intermediarios encargados del transporte del polen de los órganos masculinos a los femeninos, denominados agentes polinizadores, vectores de polinización o polinizadores. Estos pueden ser agentes abióticos o bióticos. Entre los agentes bióticos se encuentran las abejas, polillas, mariposas, moscas, escarabajos y murciélagos, que son consideradas como las especies polinizadoras más importantes (Syngenta).

Existen dos tipos principales de polinización, la polinización natural que se presenta en un entorno sin intervención del humano y la polinización artificial que se da cuando el humano altera el proceso natural de polinización. La polinización puede ser cruzada y/o directa (autopolinización o autofecundación). En la Ilustración 19 se pueden observar las subdivisiones de la polinización. (Syngenta; Casa de miel. ; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2005).

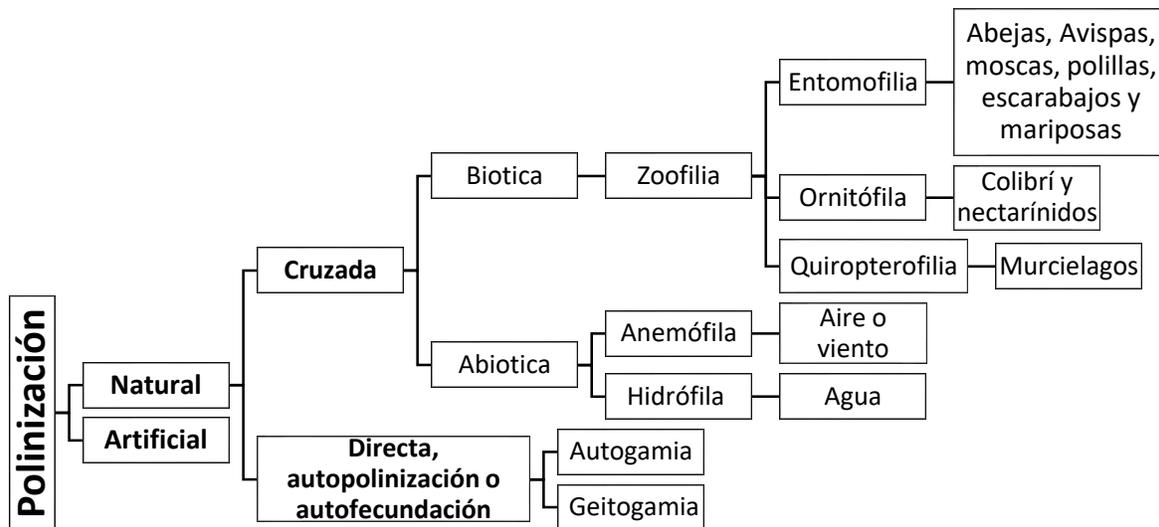


Ilustración 19. Esquema tipos de polinización. Fuente: Elaboración propia.

La polinización cruzada o heterógama se presenta cuando el polen es transportado de una flor a otra por un agente abiótico como aire o agua (anemófilia e hidrofília) o biótico, como es el caso de la polinización zoofilia, dada por animales como insectos (entomofilia), aves (ornitofilia) o murciélagos (Quiropterofilia) o abiótico (anemófilia e hidrofília), mientras que la polinización directa se presenta sin la necesidad de agentes polinizadores, por transferencia del polen de las anteras de una flor hacia los estigmas de la misma flor: autogamia y geitogamia (Syngenta; Casa de miel. ; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2005).

Gulupa

En la familia de la *Passiflora L.* encontramos frutos que han generado un gran interés en el mercado extranjero en los últimos años. El grupo más popular de esta familia, es la especie de la *Passiflora edulis Sims*, que comprende dos variedades: maracuyá (*Passiflora edulis Sims f. flavicarpa Degener*) y gulupa (*Passiflora edulis Sims f. edulis*), ambas muy apreciadas por sus frutos comestibles. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011).

La gulupa, fue introducida en Colombia alrededor de 1950 y actualmente crece de forma silvestre o cultivada en un rango de los 1100 y 2750 m de elevación, en las regiones Andina, Pacífica y Amazónica en un rango de elevación entre 1100 y 2750 m (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011).

La demanda que genera la gulupa la ha llevado a ocupar el tercer renglón dentro de las frutas exportadas de Colombia hacia el mercado europeo. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011). En 2018 en el balance del sector horticultor, se presentó un aumento en las tasas de expansión de la gulupa, la cual presentó un aumento de 26% en su valor de exportación y un 23% en volumen, con una exportación total de 8109 miles de toneladas y 2013 hectáreas sembradas. (Agro, 2019; ASOHOFrucOL, 2018).

En cuanto a la producción, se evidencia un crecimiento del 11% para 2019, al pasar de 3460,25 toneladas en 2018 a 3854,27 en 2019. Este comportamiento indica que bajó el precio de la gulupa en el mercado internacional durante el periodo comprendido entre enero y mayo (ANALDEX, 2019). En la Tabla 4, se puede observar el comportamiento del mercado internacional de la Gulupa.

Tabla 4. Comportamiento del mercado internacional de la gulupa (Passiflora edulis Sims f. edulis)

| País | USD FOB Millones | Peso Ton. | País | USD FOB Millones | Peso Ton. |
|--------------|-----------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|------------------|
| Países bajos | 12,91 | 2.762 | Países bajos | 13.08 | 3.251 |
| Bélgica | 0,69 | 312 | Bélgica | 0.72 | 191 |
| Alemania | 0,31 | 69 | Alemania | 0.56 | 145 |
| Reino Unido | 0,33 | 55 | Reino Unido | 0.32 | 83 |
| Canadá | 0,84 | 210 | Canadá | 0.22 | 52 |
| Italia | 0,19 | 45 | Italia | 0.18 | 46 |
| Francia | 0,29 | 81 | Francia | 0.12 | 33 |

Fuente: (ANALDEX, 2019).

Se puede evidenciar que los Países Bajos y Bélgica que los principales consumidores, han mostrado un interés creciente en 2017 y 2018, mientras el interés en esta fruta ha aumentado en el Reino Unido y España.

Actualmente se presentan problemas en la productividad de las pasifloras en el departamento del Huila, debido al mal uso de agroquímicos, que ha llevado a la disminución de polinizadores, obligando a comenzar procesos de polinización manual (Parra, 2019).

Morfología floral de la Gulupa.

Las flores de la gulupa miden alrededor de 4,5-6,5 cm, son perfectas y completas, están conformadas por ocho o nueve verticilos: cáliz, corola, androceo, gineceo, y entre cuatro y cinco verticilos de filamentos. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011). En la Ilustración 20 se pueden observar las partes de la flor.



Ilustración 20. Morfología floral de la gulupa. Estructuras de la flor. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

El polen se encuentra en las anteras de la flor, estructura masculina de esta, que mide un largo de 10 mm y un ancho de 3 mm como se indica en la Ilustración 21.

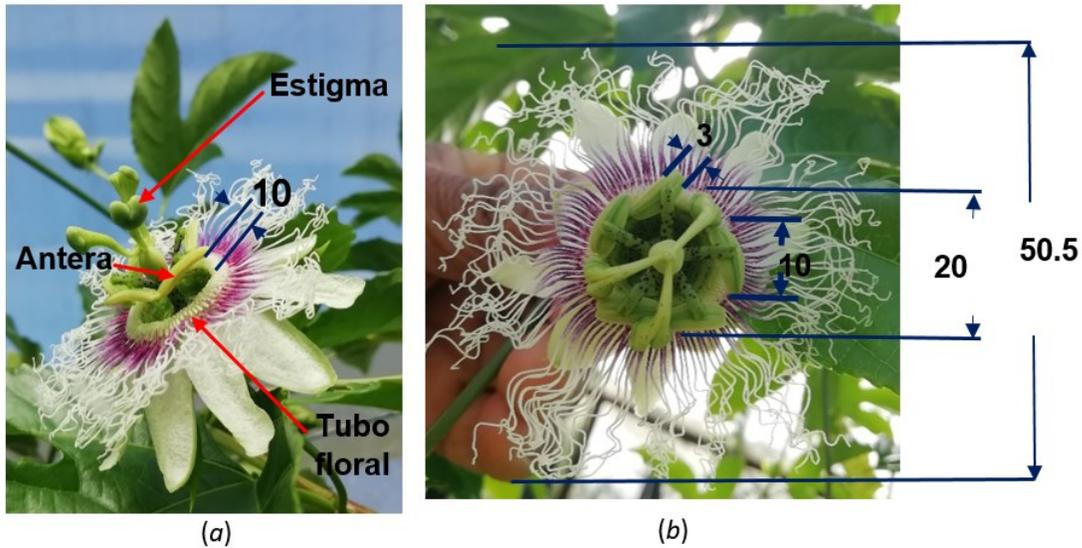


Ilustración 21. Dimensiones de la flor de la gulupa en milímetros (mm). (a) Medida del espacio entre la antera y el tubo floral. (b) Medidas de antera, diámetro del tubo floral, ancho de flor. Elaboración propia

Fenología floral

La flor de la gulupa pasa por un total de 5 fases desde la apertura de la flor hasta el cierre de la flor para producción del fruto. Las fases son: pre-antesis (F0), flor femenina con hercogamia (F1), flor homogama con hercogamia (F2), Flor homogama sin hercogamia (F3) y Flor senescente (F4). (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011) En la Ilustración 22 se puede visualizar el aspecto de las fases de la gulupa.

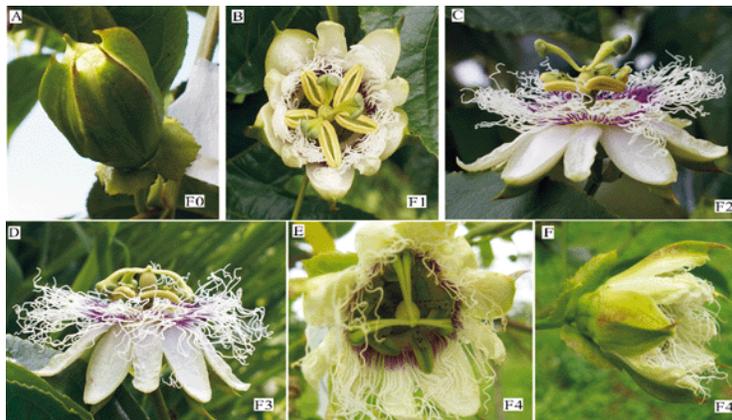


Ilustración 22. Fenología floral de la gulupa. Fuente: (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011).

La flor es receptiva a la polinización en todas sus fases, desde la apertura floral hasta el cierre, indicando que sus estigmas son receptivos y se presenta formación de tubos polínicos en todas las fases, aunque estos se encuentran en su mayor etapa de formación durante las fases 2 y 3. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011). Sin embargo, la viabilidad del polen varía significativamente durante las fases fenológicas, siendo mayor en F2, seguida por F3 y F4. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011).

Esta fruta requiere de la polinización y la fecundación para reproducirse, debido a que no produce frutos por agamospermia. Es autocompatible, y aunque es capaz de realizar autopolinización espontánea, necesita de vectores de polen para producir un mayor número de frutos, debido a que obtiene entre 28% y 33% de eficiencia por polinización espontánea, mientras que, para polinización cruzada por polinizadores insectos, alcanzó un 39%. (CATALINA ÁNGEL-COCA, 2011; Universidad Nacional de Manizales, 2014). En conjunto la polinización natural y polinización manual alcanzan una formación de frutos mayor al 93% (Universidad Nacional de Manizales, 2014; NUÑEZ, 2018).

Los polinizadores efectivos de esta planta son las abejas de gran tamaño, como los géneros *Epicharis* y *Xylocopa* que miden aproximadamente entre 15-30 mm de longitud y 8-9,5 mm de ancho, tamaño adecuado con respecto a las dimensiones de la flor (Universidad Nacional de Colombia, 2016; Gonzalez, Gonzalez, & Cuellar, 2009). Estas abejas, logran capturar grandes cantidades de granos de polen con la forma y apariencia de su dorso que se ajusta a la distancia entre el tubo floral y la antera de la flor. El dorso de estas abejas presenta una forma esférica (Ilustración 23 (b)) y está desprovisto de vellosidades con apariencia plumosa (Ilustración 23(b-c)) (Lawrence, 2015).



a)



b)



c)

Ilustración 23. Polinizador efectivo flor de gulupa: abeja Xylocopa. a) Abeja Xylocopa polinizando flor de gulupa. b) Forma dorso de la abeja Xylocopa. c) Visión detallada vellosidades dorso Xylocopa. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Lawrence, 2015)

Las abejas de *Apis mellifera* también son polinizadores naturales de esta planta, sin embargo, por su tamaño deben visitar la flor un mayor número de veces para conseguir una polinización cruzada (Pinilla Gallego & Nates Parra, 2015). De acuerdo a lo anterior, debido al tamaño de esta flor son necesarios abejas de gran tamaño o muchos individuos pequeños (*Apis mellifera*) por flor para lograr polinizarla, motivo por el cual la polinización de esta planta se ha visto afectada como consecuencia de la desaparición de sus polinizadores naturales.

Sistemas de conducción o tutorado

Para el cultivo de gulupa existen varios métodos para la selección de las distancias de siembra que varían según la región y el manejo técnico del cultivo. Existen dos sistemas de soporte para los cultivos de gulupa, los cuales son el de espaldera sencilla y el emparrado, los cuales se rigen por distancias diferentes entre surcos y plantas. En la siguiente Tabla 5 se puede observar una recopilación de distancias

comúnmente utilizadas para los parámetros entre siembras y el número de plantas correspondientes (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

Tabla 5. Densidades de siembra más utilizadas en el cultivo de la gulupa en Colombia.

| Sistema de soporte | Distancias de siembra entre | | No. Plantas/ha |
|--------------------|-----------------------------|-------------|----------------|
| | Surcos (m) | Plantas (m) | |
| Espaldera sencilla | 2,5 | 5 | 800 |
| | 2,5 | 6 | 666 |
| | 2,5 | 7 | 572 |
| | 2,5 | 8 | 500 |
| Emparrado | 5,0 | 4 | 500 |
| | 5,0 | 5 | 400 |
| | 6,0 | 6 | 277 |
| | 7,0 | 7 | 204 |

Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

Como se observa en la tabla anterior (Tabla 5), se puede lograr una mayor producción por medio de la implementación del sistema de espaldera sencilla en comparación con el emparrado; y las dimensiones por las cuales se logra una mayor producción es el sistema de espaldera sencilla con surcos de 2,5m y distancia de 5m entre plantas (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012). El sistema de espaldera sencilla es el más utilizado a nivel nacional para el cultivo de gulupa (75%), debido a que este permite una mayor cantidad de plantas por hectárea y por su funcionalidad es posible intercalarlo con otros cultivos. En la Ilustración 24, se puede observar un modelo del sistema de siembra de espaldera (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

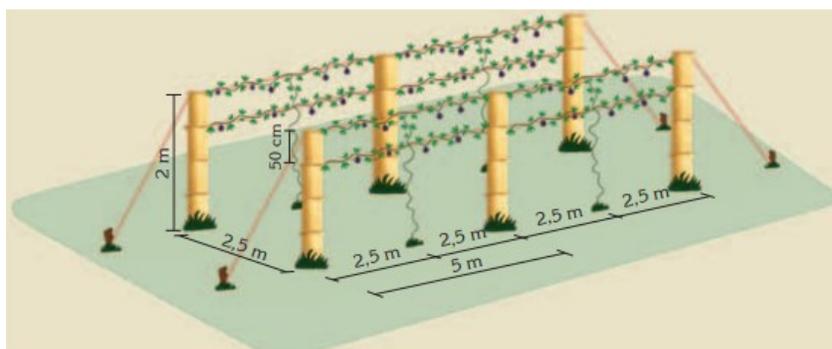


Ilustración 24. Modelo del sistema de siembra en espaldera sencilla para el cultivo de la gulupa. Fuente: (Jhon Ocampo Perez, 2012)

Este sistema consiste en instalar postes de 2,6 m de largo y 12-15 cm de diámetro, enterrados a una profundidad 60cm. Como se observa en la figura anterior, los postes están ubicados en hileras cada 5m o 6m y se les coloca 2 alambres galvanizados en la parte superior en forma paralela y distanciados 50cm uno del otro. Las ramas de la gulupa se ubican sobre los alambres para que la enredadera crezca y se sostenga (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

Para el método de emparrado, al igual que el método de espaldera sencilla necesita la instalación de postes de 2,6m de largo y 12-15 cm de diámetro, enterrados a una profundidad 60cm, sin embargo, la distancia y estructura de este método es diferente. En la Ilustración 25 puede observarse el diseño del sistema de emparrado (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

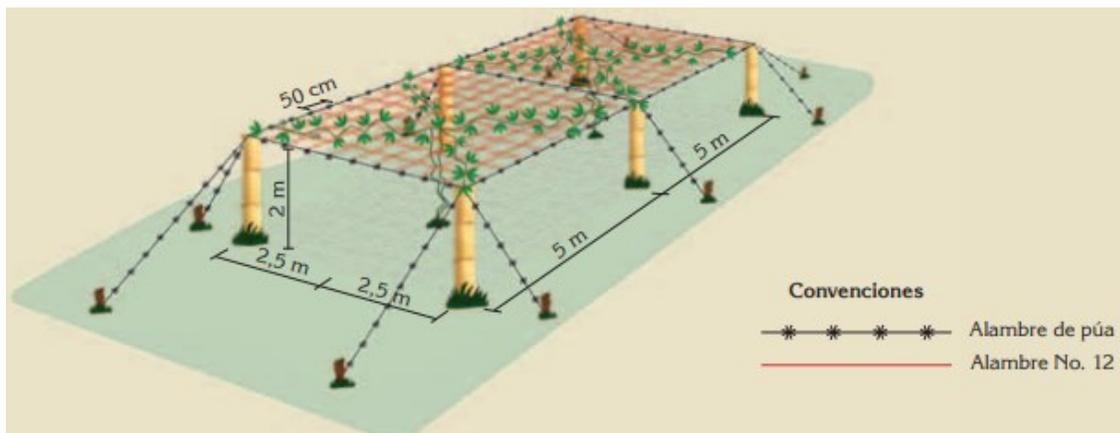


Ilustración 25. Modelo del sistema de siembra en emparrado para el cultivo de la gulupa. Fuente: (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

Los postes instalados deberán ser instalados en cuadrado para instalar un alambre de púas para cerrar el cuadrado y a partir de ese se forma una red con alambre cada 50cm. Las plantas se siembran en medio de los postes y se dejan caer hasta el alambre de púas para distribuir las ramas sobre el enmallado (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

Debido a la ubicación vertical de la gulupa en el sistema de espaldera sencilla, el movimiento principal para alcanzar las flores sería un movimiento de elevación y el

espacio disponible dado por la distancia entre surcos, se facilita el desplazamiento en el cultivo y acceso a la flor de la gulupa.

Cultivo de gulupa

A continuación, se muestran imágenes de un cultivo de gulupa con un sistema de espaldera sencilla (Ilustración 26), la distribución de la planta en el cultivo y la disposición de los frutos por rama (Ilustración 27). También se muestra la flor del cultivo de gulupa en anthesis (apertura de la flor) (Ilustración 28).



Ilustración 26. Sistema de espaldera sencilla en cultivo de gulupa. Fuente: (TV agro, 2015)



Ilustración 27. Distribución de la planta en el cultivo y la disposición de los frutos por rama. Fuente: (TV agro, 2015).



Ilustración 28. Flor abierta (antesis). Fuente: (TV agro, 2015).

Anatomía del colibrí

Con el fin de lograr un diseño que presente un buen desempeño de vuelo, se presentan las características de vuelo del colibrí que influyen en la producción de fuerza de elevación.

Todo el sistema musculo esquelético del colibrí (Ilustración 29), prescinde del exceso de músculos y ligamentos, esto permite que el ave sea mucho más liviana, sin embargo, no abstiene al sistema de proteger a los órganos vitales del colibrí (Mayntz, 2018).

Los músculos pectorales proporcionan la capacidad del vuelo del colibrí, son estos músculos (Ilustración 29) los que representan el 25% del peso corporal del organismo (Mayntz, 2018).

Así mismo, los huesos alargados y fuertes (Ilustración 30), mantienen las alas estables con cada aleteo, esto permite que los movimientos de las alas sean más precisos con el fin de controlar la dirección del vuelo (Defenders of wildlife, s.f.) (Mayntz, 2018).

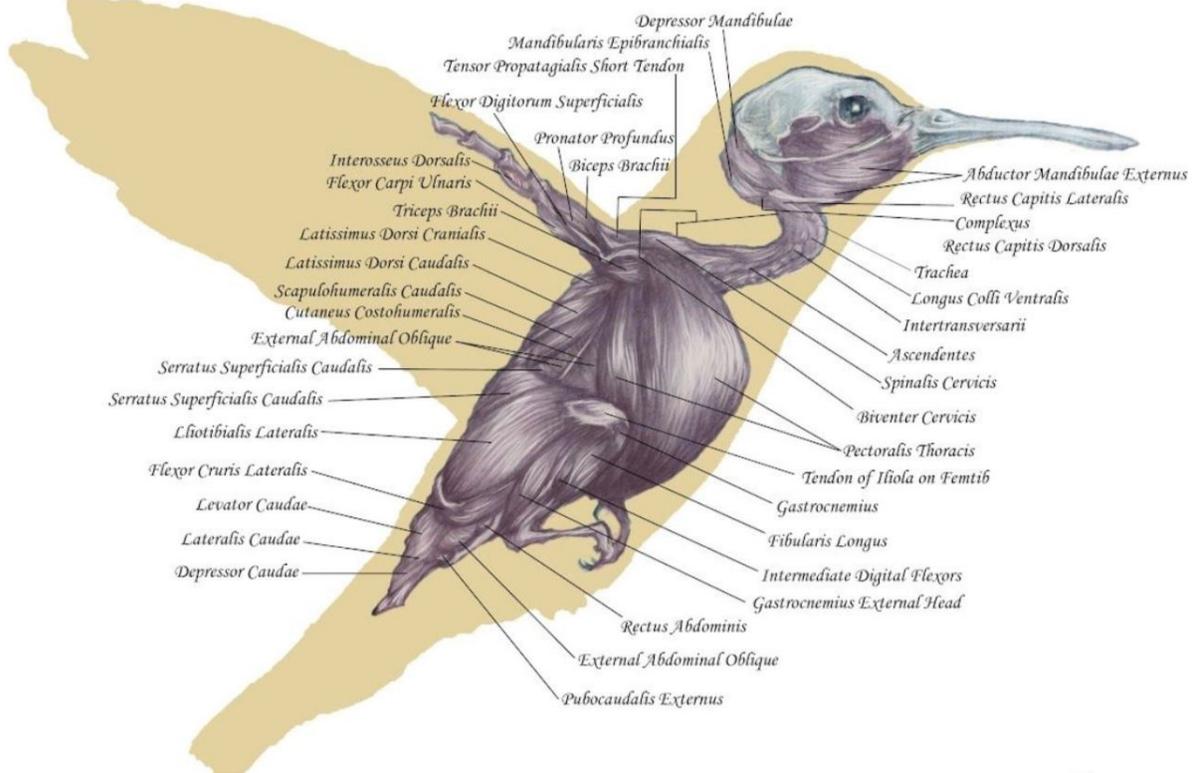


Ilustración 29. Sistema musculo esquelético del colibrí. Fuente: (Zhang, 2017).

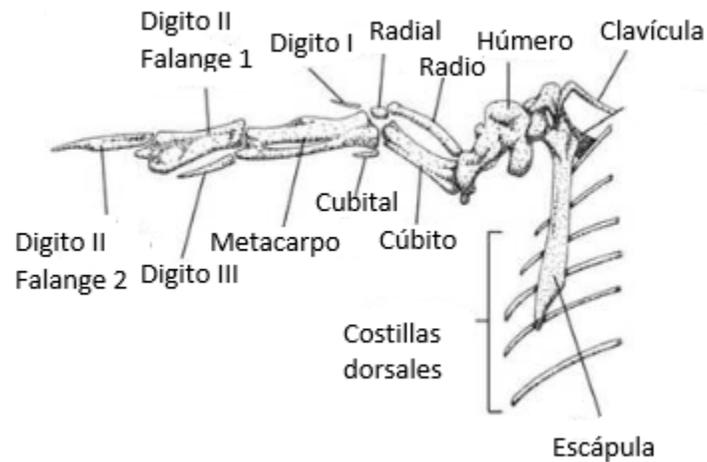


Ilustración 30. Vista dorsal sistema esquelético del ala del colibrí. Fuente: (Kenneth Welch, 2009).

Los movimientos del colibrí se logran gracias al sistema cardiovascular que poseen, pues de allí es de donde todo el sistema se hace eficiente, un corazón agrandado permite que el bombeo de sangre sea mayor, soportando así latidos más rápidos y una distribución de oxígeno más eficiente a los músculos. Como consecuencia de la velocidad de los latidos del corazón logran tener un batido de alas de 8 a 200 veces por segundo (Defenders of wildlife).

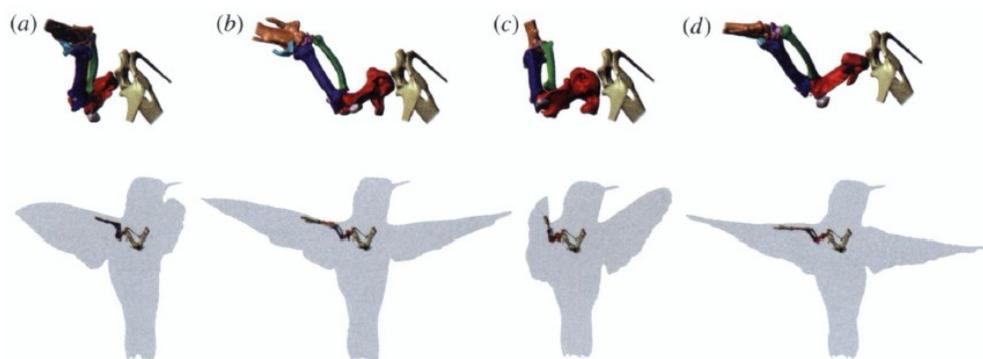


Ilustración 31. Posición y orientación del hombro del colibrí y los huesos proximales del miembro superior en un ciclo completo de apertura en un vuelo estacionario a) inicio movimiento descendente b) mitad movimiento descendente, c) final del movimiento descendente, d) mitad del ascendente. Fuente: (Tyson L. Hedrick, 2011).

En varios estudios se demuestra que el colibrí es capaz de mitigar alteraciones en el flujo de viento que los rodea mediante la variación de la amplitud media del trazo del ala, el ángulo del plano de trazo, orientación y ángulo de abanico de la cola, que lo ayudan a mejorar su estabilidad, además de su inherente capacidad para alcanzar grandes velocidades (Sridhar Ravi, 2015).

Características de vuelo del colibrí

Para que el colibrí consiga volar utiliza los músculos supracoracoideos, e invierte sus alas para producir una fuerza aerodinámica útil que soporte el peso. La mayor parte de la inversión del ala se produce por supinación del antebrazo, que invierte los huesos (y plumas) de la mano, esta inversión produce fuerzas aerodinámicas, que se utilizan tanto en el soporte de peso como en las maniobras durante el vuelo a baja velocidad. Sin embargo, esta rotación del eje largo del antebrazo solo invierte

las plumas de vuelo primarias. El colibrí tiene unas alas primarias excepcionalmente largas, que forman el 75% o más del área del ala, por lo que, con este movimiento consiguen una superficie de sustentación más invertida durante la carrera ascendente; durante este movimiento los robustos huesos tienen que permitir este amplio rango de movimiento soportando altas cargas de torsión. El húmero hace parte importante del vuelo estacionario del colibrí, este hueso es considerablemente más corto que el de otras aves, se sostiene casi perpendicularmente al borde anterior del ala y gira fuertemente alrededor de su eje durante la mitad de la carrera ascendente y descendente. En esta postura, lo que se produce es un torque por el pectoral y el supracoracoideo sobre el eje longitudinal del húmero logrando incrementar la velocidad de translación y el movimiento de excursión del ala (Tyson L. Hedrick, 2011; Warrick, Hedrick, Fernández, Tobalske, & Biewener, 2012).

Tipo de vuelo del colibrí

El colibrí tiene la capacidad de realizar diferentes tipos de vuelo con el movimiento de sus alas: suspensión, traslación, giro y elevación. El aumento en la frecuencia de batimiento de las alas le permite una mayor velocidad de las mismas y, por ende, generar mayor sustentación. El presente trabajo tiene como finalidad realizar una primera fase de un mecanismo de aleteo que genere fuerza de elevación y se centra solo en este tipo de movimiento.

Para conseguir elevación el colibrí mantiene una ligera inclinación de las alas, produciendo que el aire se desvíe hacia abajo, es decir, el aire fluye más rápido sobre el ala que debajo de esta, generando un aumento de la presión de aire debajo de las alas y la reducción de presión por encima de ellas. La elevación se produce por esta diferencia de presión. El aleteo crea una fuerza adicional hacia adelante y hacia arriba, que contrarresta el peso y el "arrastre" de la resistencia del aire.

Durante el vuelo de los colibríes se presenta la aparición de vórtices en el borde de ataque, estos vórtices son el resultado de la separación de flujo en el borde de ataque del ala, debido a la delgada superficie aerodinámica y los altos ángulos de

ataque del ala. El vórtice se produce en el espacio entre el flujo y el borde de ataque del ala, produciendo un aumento en la sustentación (y también arrastre, dependiendo de la orientación del ala). Además, el colibrí hace uso de un mecanismo conocido como “clap and fling” (aplauso y lanzamiento), durante un tiempo limitado para generar una mayor elevación; por ejemplo, durante la fase de despegue. Lo hacen aumentando el trazo del ala a tal punto que las alas se tocan entre sí durante la inversión del trazo. Durante la palmada, los bordes anteriores de las alas se tocan antes de que los bordes posteriores lo hagan. Cuando el espacio entre las alas se cierra progresivamente, la circulación de ambas alas se cancela entre sí. El aire entre las alas es expulsado hacia abajo en la forma de un ascensor que mejora el chorro de impulso (Díaz, 2012).

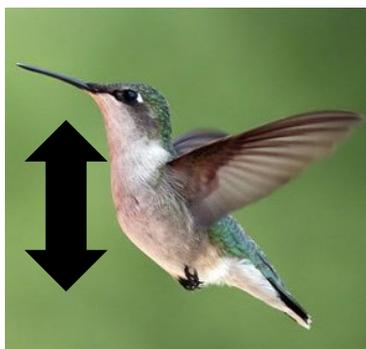


Ilustración 32. Colibrí realizando el movimiento de elevación. Fuente: (Universidad CESI, 2015)

Cinemática de vuelo colibrí

El colibrí agita sus alas de lado a lado en un plano horizontal, dibujando un patrón en forma de ocho con la punta de las alas. Las alas tienen una longitud de alrededor de 35-152 mm, presentan un ángulo de batida (θ) de aproximadamente 120° a una frecuencia de aleteo promedio de 20-50 Hz y tienen una relación de aspecto del ala promedio de 3-4.5 (relación entre la longitud del ala y la longitud de la cuerda) (KARÁSEK, 2014; Roccia, Preidikman, & Massa, 2010).

Existen cuatro fases en las que puede ser dividido el ciclo de batida de las alas del colibrí (Ilustración 33).

Carrera descendente de batida: Primera etapa de traslación en la que el ala realiza un movimiento descendente, desde la parte dorsal hacia el vientre del colibrí; también llamada *downstroke*.

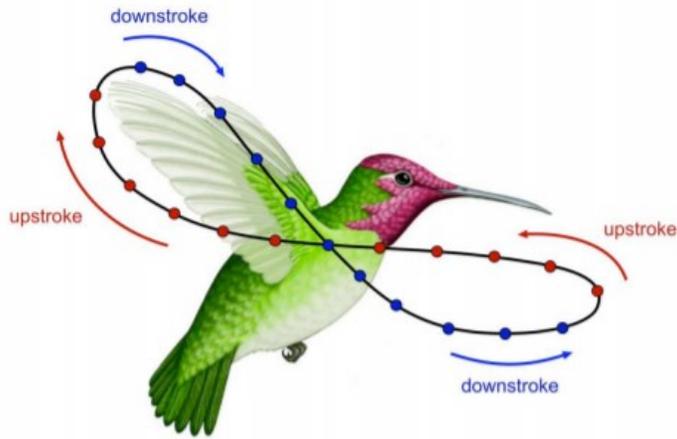
Supinación: Finalizando el downstroke el ala gira rápidamente alrededor de su eje longitudinal e invierte su dirección de movimiento.

Carrera ascendente de batida: Segunda etapa de traslación donde el ala realiza un movimiento ascendente desde el vientre hacia la parte dorsal del colibrí; también llamada *upstroke*.

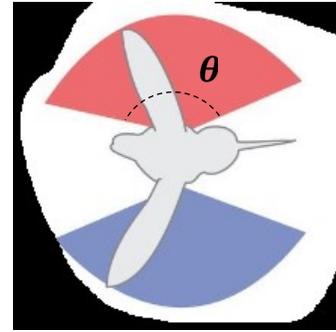
Pronación: Finalizando el upstroke el ala vuelve a girar alrededor de su eje longitudinal e invierte nuevamente la dirección de su movimiento.



a)



b)



c)

Ilustración 33. Características cinemáticas vuelo del colibrí: a) Características geométricas del ala, b) Fases ciclo de batida y patrón formado por el movimiento de las alas, c) Ángulo de batida de las alas. Fuente: (KARÁSEK, 2014))

Aerodinámica del vuelo

Las alas del colibrí son pequeñas, estrechas y extremadamente delgadas en el borde delantero. El borde agudo de ataque crea un flujo que produce una mayor sustentación que el flujo laminar típico de alas grandes con bordes de ataque redondeados. En los colibríes, el diferencial de presión alrededor del borde agudo de ataque domina la circulación alrededor del ala, creando un vórtice, unido y circulando completamente alrededor de la cuerda del ala. Este patrón de flujo permite que el ala gire, alrededor de su eje largo, dentro del vórtice sin interrumpirlo.

Por lo tanto, la producción de fuerza aerodinámica creada por los movimientos traslacionales del ala durante el recorrido ascendente y descendente se mantiene, cuando las alas vuelven a su posición para el próximo golpe ascendente o descendente, y sólo finaliza brevemente cuando la parte traslacional de la siguiente media carrera comienza. La breve interrupción (~2 ms) en la producción de fuerza aerodinámica, resulta en pequeños movimientos corporales que se compensan fácilmente con el movimiento del cuello del colibrí; lo que estabiliza la posición de la

cabeza (Douglas R. Warrick, 2005) (Warrick, Hedrick, Fernández, Tobalske, & Biewener, 2012).

Los colibríes tienen una simetría cinemática en el movimiento ascendente y descendente que sugiere que estos medios ciclos del aleteo contribuyen de igual manera al soporte del peso durante el vuelo estático, este supuesto se ha usado para desarrollo de modelos aerodinámicos. Un estudio que muestra la asimetría de la fuerza en el ciclo del aleteo durante el vuelo estacionario, en donde en el movimiento ascendente se produce un 75% de fuerza de elevación que soporta el peso y en el descendente se produce solo un 25% lo que se podría explicar por la curvatura de sus alas (Douglas R. Warrick, 2005).

Un aspecto importante para el diseño de microvehículos aéreos bioinspirados, es la fuerza de elevación suficiente para mantenerse en vuelo y el empuje necesario para desplazarse a través del aire. Para analizar estas fuerzas, se utiliza el *modelo casi-estable para alas giratorias*, que estudia la fuerza vertical (elevación) y horizontal (arrastre) que actúan sobre las alas a lo largo de la longitud del ala para un ciclo de batida de las alas (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink; Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink, 2014). Para el análisis de la fuerza vertical este modelo relaciona las características cinemáticas y geometría del objeto en movimiento, con las características del fluido. También incluye el coeficiente de elevación que expresa la resistencia al movimiento de un objeto a través del fluido debido a su forma (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink, 2014).

Así mismo, estudios realizados de diseño de alas para microvehículos aéreos de alas batientes bioinspirados en el ala de un colibrí natural, como el Nano Hummingbird (Keennon & Klingebiel, 2012) y el Delfly (de Croon, de Clercq, Ruijsink, Remes, & de Wagter, 2009) (Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, 2017), muestran los resultados de la optimización experimental de la forma del ala. Los diseños estudiados, por los autores mencionados, parten de las características morfológicas y aerodinámicas del ala de un colibrí natural. A partir de estos aspectos, los investigadores diseñan diferentes tipos de alas variando parámetros

geométricos como la longitud, superficie del ala, la relación de aspecto y la holgura del ala (definida por un ángulo de curvatura) (Ilustración 34).

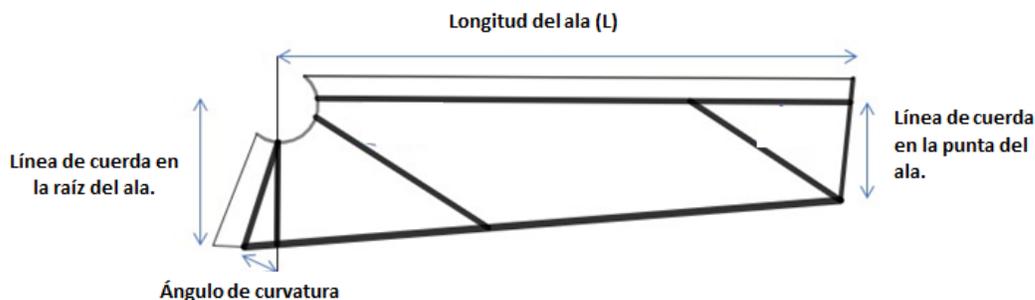
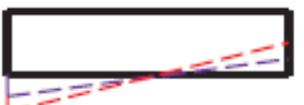
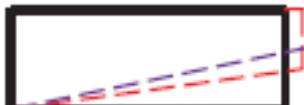
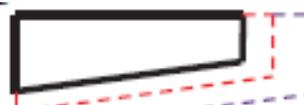


Ilustración 34. Características morfológicas ala micro vehículos aéreos bioinspirados. Elaboración propia.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros de las alas construidas y probadas por dispositivos bioinspirados como el Nano Hummingbird (Keennon & Klingebiel, 2012) y el Delfly (de Croon, de Clercq, Ruijsink, Remes, & de Wagter, 2009) (Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, 2017). Estas se dividieron en 5 familias; inicialmente se evaluó el efecto de curvatura del ala óptimo (16°) que posteriormente fue usado para las familias restantes.

Para la familia 2, se varió la relación de aspecto y la forma general se mantuvo rectangular. A diferencia de la familia 3, en la cual se dejó fija la relación de aspecto y se disminuyó el ancho de la línea de cuerda en la raíz del ala y el ancho de la línea de cuerda en la punta del ala. En la familia 4, se varió tanto la relación de aspecto como el ancho de la línea de cuerda en la punta del ala, mientras se mantuvo constante el ancho de la línea de cuerda en la raíz del ala. Por último, en la familia 5 se fijaron tanto la relación de aspecto como la relación de estrechamiento (línea de cuerda en la punta del ala / línea de cuerda en la raíz del ala) a los valores óptimos, identificados por los experimentos previos, y se estudió el efecto del área de superficie.

Tabla 6. Lista de alas diseñadas y probadas en el mecanismo de aleteo propuesto por autor Karasek.

| | Longitud (mm) | Ancho de la línea de cuerda en la raíz del ala (mm) | Ancho de la línea de cuerda en la punta del ala (mm) | Relación de aspecto | Ángulo de curvatura (°) | Área de superficie (mm ²) |
|---|---------------|---|--|---------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Familia 1  | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 5 | 1750 |
| | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 10 | |
| | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 16 | |
| | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 18 | |
| | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 20 | |
| | 70 | 25 | 25 | 5,6 | 22 | |
| Familia 2  | 75 | 23,3 | 23,3 | 6,4 | 16 | |
| | 80 | 22 | 22 | 7,3 | | |
| | 85 | 20,6 | 20,6 | 8,3 | | |
| | 90 | 19,4 | 19,4 | 9,3 | | |
| | 95 | 18,4 | 18,4 | 10,3 | | |
| | 100 | 17,5 | 17,5 | 11,4 | | |
| Familia 3  | 70 | 30 | 20 | 5,6 | | |
| | 70 | 32,5 | 17,5 | 5,6 | | |
| | 70 | 35 | 15 | 5,6 | | |
| | 70 | 40 | 10 | 5,6 | | |
| Familia 4  | 75 | 25 | 21,7 | 6,4 | | |
| | 80 | 25 | 18,8 | 7,3 | | |
| | 85 | 25 | 16,2 | 8,3 | | |
| | 90 | 25 | 13,8 | 9,3 | | |
| | 95 | 25 | 11,8 | 10,3 | | |
| | 100 | 25 | 10 | 11,4 | | |
| Familia 5  | 70 | 19,4 | 10,8 | 9,3 | 1059 | |
| | 75 | 20,2 | 11,6 | 9,3 | 1215 | |
| | 80 | 22,2 | 12,4 | 9,3 | 1383 | |
| | 85 | 23,6 | 13,1 | 9,3 | 1561 | |
| | 90 | 25 | 13,8 | 9,3 | 1750 | |
| | 95 | 26,4 | 14,7 | 9,3 | 1950 | |
| | 100 | 27,8 | 15,4 | 9,3 | 2161 | |

Fuente: (Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, 2017).

Finalmente, los resultados del estudio realizado por los autores Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, indicaron que el mejor rendimiento se obtuvo con un ala de forma trapezoidal, con un borde delantero recto y una relación de aspecto de 9.3, ambos parámetros muy similares a los del ala de un colibrí típico.

Ahora bien, estudios relacionados con dispositivos bioinspirados en alas batientes han demostrado que hay una gran relación entre las alas y el mecanismo de transmisión de movimiento para conseguir imitar el vuelo bioinspirado y generar elevación (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink, 2014).

Los mecanismos transmisores de movimiento son elementos de máquinas y sistemas mecánicos que transmiten el movimiento de giro gracias a la fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto, lo que se denomina transmisión por fricción (González, 2003). Existen varios tipos de mecanismos transmisores de movimiento (Torres Búa, 2014):

Mecanismo Biela manivela: Es un mecanismo por medio del cual se transforma un movimiento giratorio continuo en un movimiento rectilíneo en el pie de la biela. Este mecanismo está compuesto por el eje de un elemento giratorio, la manivela y la biela.

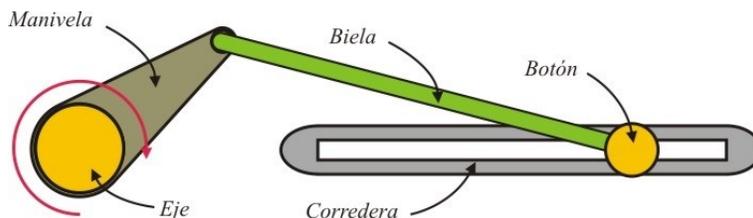


Ilustración 35. Mecanismo Biela Manivela. Fuente: (Gutierrez, 2010)

Para el funcionamiento de este mecanismo el eje produce el movimiento rotatorio que se transmite a la manivela, en la cual el movimiento rotatorio se transmite al eje con el cual esta se encuentra unida a la pieza giratoria, convirtiendo el movimiento giratorio en uno circular en su eje, al cual está unido la cabeza de la biela, finalmente la cabeza de la biela arrastra el pie de biela, que sigue un movimiento lineal alternativo. (González, 2003)

Mecanismo de 4 barras: es un mecanismo formado por 3 barras móviles unidas mediante pivotes y una cuarta barra que se encuentra fija. El primer eslabón del mecanismo es el eslabón de entrada, encargado que generar el movimiento, luego está el acoplador que une al de entrada al seguidor que es el encargado de seguir el movimiento. (Norton, R., 1995)

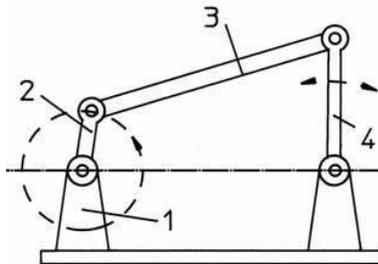


Ilustración 36. Mecanismo de cuatro barras. Fuente: (askix.com, 2020).

En la Ilustración 36 se observa un mecanismo de 4 barras. La barra 1 corresponde a la barra fija sobre la cual están unidas las barras 2 y 4, la barra 2 es la entrada del mecanismo, la barra 3 es el acoplador y finalmente la barra 4 es el seguidor.

8. METODOLOGIA

Para realizar el diseño del mecanismo de aleteo como posible alternativa en la polinización artificial de la gulupa, el diseño se dividió en dos componentes principales, el instrumento de captación de polen y el mecanismo de aleteo.

Como punto de partida, para cada uno de los componentes principales, se hizo una recopilación de las tecnologías existentes, posteriormente, se realizó el levantamiento de requerimientos a partir de la caracterización del entorno de trabajo del cultivo de gulupa y características del movimiento de aleteo durante el vuelo del colibrí. A partir de esto, se desarrolló el diseño y evaluación de las partes principales. Para evaluar el mecanismo de aleteo se realizó el estudio de la cinemática y simulaciones del movimiento, y para el instrumento de captación de polen, se realizó una prueba de materiales que permitieran la captación del polen.

8.1. Fase 1. Fundamentación y análisis funcional

El desarrollo de esta fase se hace a partir del planteamiento del problema. Se identifican los requerimientos con los que se hace un análisis funcional (despliegue de función de calidad) para determinar las especificaciones de ingeniería con las que el diseño debe cumplir (Ullman, 2010) (GEO Tutoriales, 2015). En la Ilustración 37 se muestra el diagrama con el proceso para establecer las especificaciones del diseño.

La problemática está asociada a la disminución y poca eficacia de polinizadores naturales en los cultivos de gulupa que afecta la calidad de los frutos y limita la productividad y rentabilidad del cultivo. Por lo tanto, se tuvieron en cuenta características del entorno de trabajo, como los aspectos generales y fisiológicos del cultivo, las condiciones agroecológicas, los sistemas de establecimiento y manejo del cultivo y los métodos actuales de polinización. Además de las características principales del vuelo del colibrí para el desplazamiento vertical dentro del cultivo y la cinemática del método de aleteo del colibrí para el diseño del dispositivo.

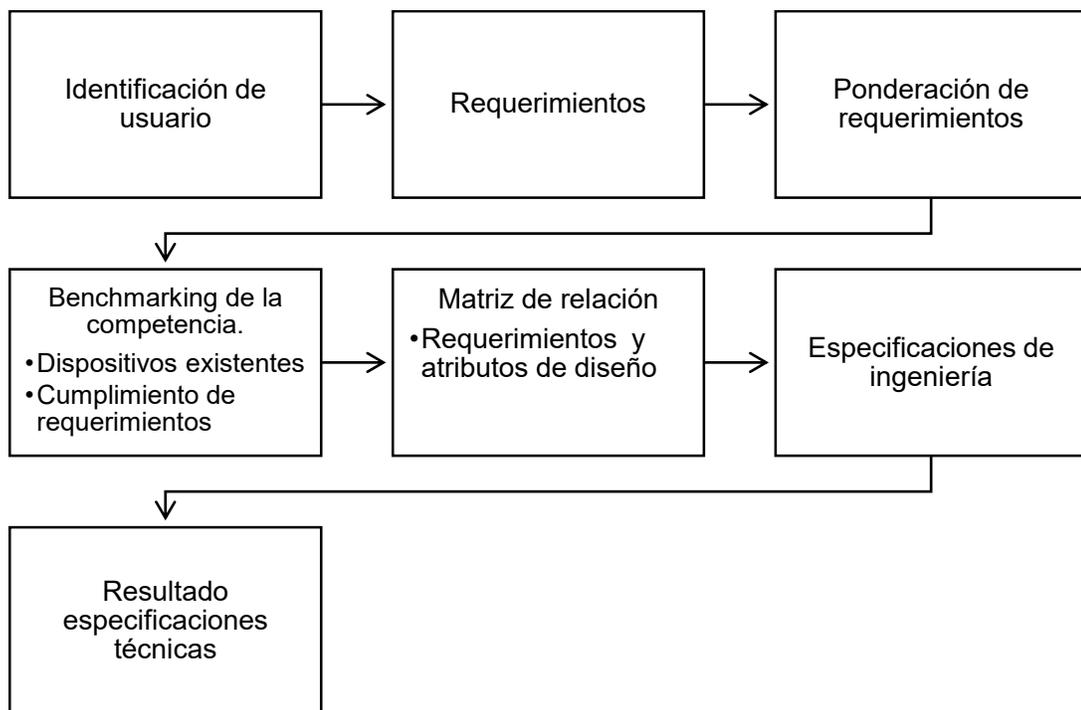


Ilustración 37. Diagrama de método inicial para el diseño de dispositivo, fundamentación y análisis funcional. Elaboración propia.

8.2. Fase 2. Diseño conceptual

El diseño conceptual se desarrolla estableciendo un diagrama de funciones a partir de los requerimientos de calidad determinados para cada uno de los componentes principales, el instrumento de captura de polen y el mecanismo de aleteo. Con este diagrama de funciones se generaron conceptos para proporcionar la funcionalidad requerida.

8.2.1. Mecanismo de aleteo

Después de establecidos los requerimientos, el diseño del mecanismo de aleteo se desarrolló a partir de un diagrama de funciones; para cada una de estas funciones se analizaron alternativas de solución con una matriz PUGH.

Con el fin de conseguir un mecanismo de aleteo similar al del colibrí se evaluaron tres mecanismos de transmisión planares y espaciales, desarrollados por trabajos previos para generar el movimiento de aleteo, que permiten una transmisión de

movimiento rotacional a oscilatorio. Los mecanismos evaluados son dos planares: el mecanismo de aleteo de 4 barras doble usado por Nano-hummingbird (Keennon M. , Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012) y el mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela-balancín: slider crank-rocker (KARÁSEK, 2014); y uno espacial, mecanismo de aleteo espacial de 6 barras (Wang & McCarthy, 2017). Se destacaron las ventajas y desventajas de cada uno de estos. Además, las alas para implementar en el dispositivo final se evalúan de acuerdo al tamaño y forma, para este tipo de vuelo por batimiento de alas.

8.2.2. Instrumento de captura de polen

A partir de las especificaciones funcionales más importantes determinadas por la casa de la calidad, se realiza un diagrama de funciones para establecer las acciones generales que se deben tener en cuenta para la generación de conceptos. Inicialmente, se determinó el material para capturar el polen por medio de una prueba donde se seleccionaron materiales a partir de las características de los polinizadores naturales de la gulupa. A partir de posibles conceptos para cada una de las funciones se realizó un análisis comparativo con el método de PUGH a partir de una matriz de decisión (Ullman, 2010).

8.2.2.1. Prueba de materiales para captación de polen

La prueba se desarrolló en un cultivo gulupa en la ecofinca El paraíso, ubicada en el municipio de Sylvania, en el departamento de Cundinamarca, a una altura de 2400 m.s.n.m. El cultivo tiene una hectárea y media con 1500 plantas de gulupa, y presenta un sistema de conducción de espaldera sencilla, con espacios de 2 m entre surcos, 4 m entre plantas y una altura de 2 m (Ilustración 38).



Ilustración 38. Sistema de conducción espaldera sencilla cultivo de gulupa ecofinca El paraíso. Fuente: Elaboración propia.

El objeto de esta prueba consistió en observar el polen que podía ser recolectado con diferentes materiales elegidos, teniendo en cuenta las características de los polinizadores naturales de la gulupa: vellosidades del cuerpo de la abeja y las dimensiones de esta, posteriormente se compararon diferentes materiales que tuvieran características similares, como superficie rugosa, suave, con apariencia plumosa o fibras, elástico, de fácil adquisición en el mercado y bajo costo (Tabla 7).

El objeto que estará en contacto con las anteras de la flor será una esfera de un tamaño de 1,5 x 1,5 cm, acorde con los polinizadores y se estableció un área de contacto de dimensiones iguales (1 x 1 cm) para todos los materiales, con el propósito de hacer una comparación visual del polen capturado.

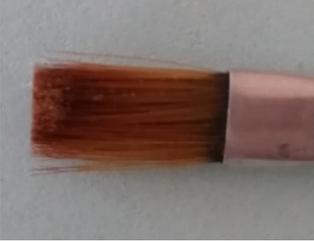
A partir de la morfología de la flor y la posición de las anteras, se estableció que la mejor manera para acercarse a la flor y recolectar las muestras de polen es en dirección paralela a la parte inferior de la antera de la flor. Para recolectar el polen se frotó suavemente la parte inferior de la antera con cada material (Ilustración 39). Se tomaron fotografías de cada muestra al finalizar el proceso de captura de polen.



Ilustración 39. Prueba para la captación de polen en flor de gulupa. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Materiales utilizados para realizar la prueba de captura de polen.

| | | |
|----------------------------------|---|--|
| <p>Algodón siliconado</p> |  | <p>Fibra hueca siliconada, 100 % poliéster. Es hipoalergénica, antiestática y antibacteriana. (Relleno de algodón sintético, s.f.)</p> |
| <p>Lanilla</p> |  | <p>Filamento continuo entrelazado fino. (Identificación de telas para ropa, s.f.)</p> |

| | | |
|--|---|--|
| Plumas |  | Microestructura de bárbulas (filamentos de las plumas de aves), estructura queratinizada (López Michelena & Denis Avila, 2016). |
| Algodón natural |  | Sus fibras son blandas, aislantes, resisten la rotura, absorbentes. Transpirabilidad absorbe el líquido y lo libera en la superficie al permitir que el aire fluya libremente (Las múltiples propiedades del algodón, 2019). |
| Cerdas de pincel |  | Plano sintético con fibras suaves, pelos de cerdo y la punta del pelo tiene una fisura (punta abierta). Pelo de superficie rugosa (Pinceles para pintar oleo, s.f.). |
| Limpia pipas, escobillones o chenilla |  | Alambre fino cubierto por tela deshilada, flexible (Requena, 2011). |
| Algodón siliconado con fibras de plástico |  | Fibra hueca siliconada con fibras de plástico. (Relleno de algodón sintético, s.f.) |

Fuente: (Identificación de telas para ropa, s.f.; Las múltiples propiedades del algodón, 2019; Relleno de algodón sintético, s.f.; Pinceles para pintar oleo, s.f.; Requena, 2011; López Michelena & Denis Avila, 2016)

8.3. Fase 3. Diseño ingenieril.

Tras determinar el concepto que más se ajusta a los requerimientos y especificaciones de ingeniería, se tuvo en cuenta cómo el diseño iba a cumplir con la función deseada a partir de la evolución de los componentes; es decir, como se forman y como estos se configuran y conectan entre sí.

8.3.1. Diseño mecanismo de aleteo

Para la selección del tamaño y capacidad del conjunto de: mecanismo de aleteo, ala y potencia del motor, se tuvieron en cuenta los requerimientos establecidos de tamaño, peso y función a cumplir del instrumento de captura de polen.

El mecanismo seleccionado se basó en la propuesta de (KARÁSEK, 2014), un mecanismo planar que permite obtener un ángulo de salida de aproximadamente 120°. Este mecanismo está compuesto por tres etapas: dos mecanismos deslizantes con los que se consigue un movimiento de baja amplitud y, un mecanismo de cuatro barras con el cual se amplifica el movimiento para conseguir el ángulo de salida deseado. Se analizó el movimiento de este mecanismo para comprobar que el movimiento se asemejara a las características cinemáticas del vuelo del colibrí, a partir de las dimensiones propuestas por el autor.

Se hizo una simulación y un análisis de movimiento en el programa Solidworks para comprobar que la transmisión y ángulos de salida fueran los adecuados. Para conseguir una frecuencia de aleteo de 50 Hz, frecuencia promedio de aleteo del colibrí, la simulación se realizó utilizando un motor de 3000 RPM.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02 \text{ s}} = 50 \text{ Hz} \quad \text{Ecuación 1}$$

8.3.1.1. Cinemática mecanismo de aleteo

Se realizó un análisis cinemático del mecanismo de aleteo que comprende los cambios de posición y velocidad de las componentes del mecanismo durante su

movimiento, con el propósito de analizar la salida del mecanismo (desplazamiento y velocidad angular del eslabón de salida). El mecanismo se analiza por medio del método de lazo vectorial cerrado, el cual consiste en unir las juntas de cada eslabón por medio de un vector.

8.3.1.2. Simulación dinámica del mecanismo de aleteo

La simulación dinámica se realizó por medio de las herramientas de simulink y Simscape Multibody, utilizando un modelo CAD en el programa Solidworks para comprobar los resultados obtenidos del movimiento del mecanismo. La simulación se realizó considerando: el peso de los eslabones y el movimiento debido a las variables angulares, se utilizó como parámetro de entrada una velocidad constante del motor de 314.16 rad/s

8.3.1.3. Selección y construcción del ala

La selección de las alas del mecanismo de aleteo se basó en estudios y desarrollos previos de microvehículos aéreos bioinspirados (Keennon & Klingebiel, 2012) (de Croon, de Clercq, Ruijsink, Remes, & de Wagter, 2009). Estos estudios parten de las características morfológicas y aerodinámicas del ala de un colibrí natural, en los que se diseñaron diferentes tipos de alas variando parámetros geométricos como la longitud y superficie del ala, la relación de aspecto (Relación entre la longitud y ancho del ala), y la holgura del ala (Definida por un ángulo de curvatura) (Ilustración 40).

Teniendo en cuenta el estudio de los parámetros y el desempeño del ala previamente descrito, se seleccionó el ala para el mecanismo de aleteo teniendo en cuenta las siguientes razones:

- El mecanismo de aleteo propuesto, tiene como requerimiento tener un vuelo bioinspirado en el colibrí, por tanto, el enfoque de este estudio fue adecuado para implementar y probar en la propuesta de este trabajo.
- Los parámetros del ángulo de curvatura y la relación de aspecto tienen un impacto crítico en la producción de fuerza y eficiencia (Nan, Karásek, Lalami,

& Preumont, 2017). El análisis de estas características en los estudios de los autores Nan, Karásek, Lalami, y Preumont para determinar un ala con un buen desempeño y que genere fuerza de elevación, sirve como punto de partida para ensayos de empuje de ala que permitan elegir un diseño que cumpla con el requerimiento de fuerza de elevación de este proyecto.

De acuerdo con esto se construyeron alas con diferentes dimensiones, realizadas con una película de poliéster de 0,010 mm de grosor y bordes en Nylon para proporcionar mayor rigidez. Todas se construyeron a partir de un molde para que estas fueran replicables y precisas.

Se tuvieron en cuenta características aerodinámicas como la carga alar (Ecuación 2) y la relación de aspecto (Ecuación 3) las cuales se relacionan con la fuerza de elevación generada por los colibríes, estos parámetros sirvieron como base para mejorar el diseño de cada ala y buscar conseguir una mayor fuerza de elevación.

$$Carga\ alar = \frac{Masa_{(dispositivo)}}{Área_{(ala)}} \quad Ecuación\ 2$$

$$Relación\ de\ aspecto = \frac{2 * (Longitud_{(ala)})^2}{Área} \quad Ecuación\ 3$$

8.3.1.4. Componentes electrónicos: estimación de peso componentes.

Con el objetivo de determinar el empuje mínimo necesario que debían generar las alas se realizó la estimación del peso de los materiales y de los componentes electrónicos del diseño.

8.3.1.4.1. Selección de materiales del diseño.

La selección de los componentes y materiales se hizo teniendo como parámetros los cálculos, simulaciones previas y los requerimientos y especificaciones ya establecidos. Para el diseño del mecanismo es necesario que el material tenga

características de baja densidad, alta resistencia y un costo bajo; por esto, se realizó una recopilación de materiales de prototipado rápido, puesto que, este método de fabricación y los materiales que se usan cumplen con estas propiedades requeridas.

8.3.1.4.2. Posibles componentes electrónicos.

Se hizo una selección de los componentes electrónicos, teniendo en cuenta los requerimientos de funcionamiento del dispositivo planteado; por esto se eligieron posibles elementos que estuvieran involucrados en el movimiento de elevación del mecanismo, de bajo peso y adecuados para funcionamiento en exteriores. De acuerdo con esto, se estableció que, para una apropiada operación en el entorno, es necesario incluir componentes para la navegación, la comunicación, el control y alimentación del dispositivo.

Se hizo un diagrama de bloques para cada función central. Las interconexiones entre los distintos bloques, los protocolos de comunicación y los niveles de voltaje conocidos. Con base en este diagrama se determinaron las especificaciones técnicas para seleccionar un controlador. Se hizo un cálculo del consumo de potencia total de los componentes en el caso de que operaran al tiempo para determinar la capacidad de la batería. Finalmente, se realizó un esquema electrónico para evidenciar las conexiones de los elementos electrónicos que componen el sistema.

8.3.1.5. Cálculos fuerza de elevación teórica del mecanismo de aleteo

Basado en el modelo de ala giratoria empleado por (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink) que estudia las fuerzas vertical (elevación) y horizontal (arrastre) que actúan sobre las alas, se calculó la fuerza de elevación del mecanismo de aleteo.

$$L = \int_0^R C_l(r, t) \frac{1}{2} \rho [\dot{\phi}(t)r]^2 c(r) dr \quad \text{Ecuación 4}$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho[2\pi f]^2 R_2^2 S}$$

Ecuación 5

La Ecuación 4 relaciona la elevación con el coeficiente de elevación, C_L , la densidad del aire ρ , la velocidad angular de batida $\dot{\phi} = 2\pi f$, la cuerda del ala $c(r)$, la frecuencia f , el segundo momento de área del ala R_2 , y la superficie S , a lo largo de la longitud del ala R .

Para relacionar los valores obtenidos de las posiciones de θ_9 y velocidades instantáneas de $\dot{\theta}_9$, con la geometría del ala, se usaron las ecuaciones:

$$\Delta A = \Delta r \cdot c(\Delta r) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\Delta v = \Delta r \cdot \dot{\theta} \quad \text{Ecuación 7}$$

La geometría del ala se describió con los siguientes parámetros: Longitud total del ala R , Δr diferencial del radio local, la cuerda (c) como la distancia entre el borde de ataque y el borde de salida del ala dependiente de r (Ilustración 40).

El área instantánea ΔA es cada diferencial a lo largo de la longitud del ala R . La velocidad instantánea Δv se obtiene de la multiplicación de la velocidad angular obtenida ($\dot{\theta}_9$) por cada Δr a lo largo de la longitud del ala R . Estas ecuaciones se reemplazan en la ecuación de elevación para determinar la fuerza generada durante el movimiento del mecanismo.

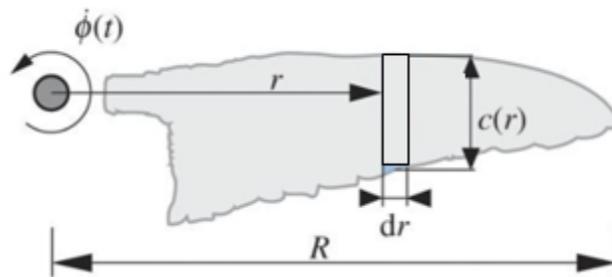


Ilustración 40. Parámetros geométricos del ala. Fuente: (Kruyt, Quicazán Rubio, Heijst, Altshuler, & Lentink, 2014)

8.3.1.6. Construcción del mecanismo y montaje para prueba de elevación.

Para probar el empuje de las alas, se elaboró un prototipo basado en el mecanismo propuesto por (KARÁSEK, 2014), con mayores dimensiones y manteniendo las proporciones dadas por el autor.

Los eslabones fueron cortados en impresora láser utilizando acrílico de 2 mm de grosor y conectados entre sí a la base mediante bujes. La medición de frecuencia de oscilación de la salida del mecanismo, se hace con un encoder óptico. Para la construcción del prototipo se utilizaron dos engranajes, un engranaje pequeño de 14 dientes y uno más grande de 29 dientes, se obtuvo una relación de transmisión de 2,07.

La relación de transmisión es obtenida a partir de la siguiente ecuación, en la cual se relacionan tanto el número de dientes de los engranajes como las revoluciones de los mismos.

$$n_1 z_1 = n_2 z_2 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Relación de transmisión} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde n_1 representa el número de dientes del engranaje conductor y n_2 el número de dientes del engranaje conducido. Así mismo, z_1 representa el número de RPM del engranaje conductor y z_2 el número de RPM del engranaje conducido.

La prueba para medir la fuerza de elevación de las alas se basó en la propuesta usada en el artículo titulado Aerodinámica de micro-vehículo aéreo bioinspirado en alas batientes (Nakata, Liu, Tanaka, Nishihashi, Wang, & Sato, 2011).

Para este proyecto, la prueba desarrollada consistió en medir la fuerza con una galga extensiométrica (rango de trabajo máximo de 5kg) por medio de un mecanismo de balancín. El montaje comprende una barra ubicada sobre un pivote. Sobre esta barra se ubicó, en un extremo, el mecanismo de aleteo y en el otro extremo un contrapeso para equilibrar la barra, simultáneamente, este extremo se encuentra levemente en contacto con la galga (Ilustración 41). La lectura de la galga muestra la fuerza contraria a la gravedad generada por la acción del batimiento de las alas.

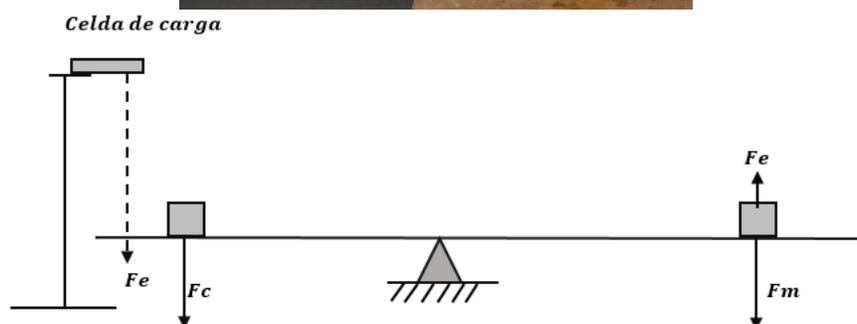
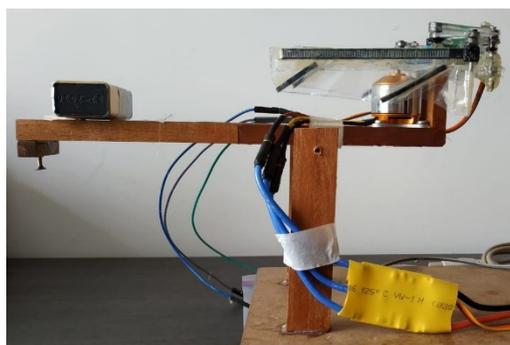


Ilustración 41. Montaje realizado prueba de fuerza de elevación. Fuente: Elaboración propia.

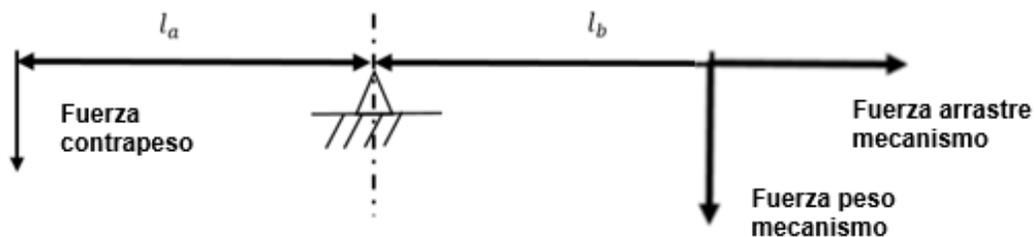


Ilustración 42. Esquema de fuerzas involucradas para prueba de sustentación del mecanismo. Fuente: (Nakata, y otros, 2011)

En el anterior esquema (*Ilustración 42*), se pueden observar las fuerzas involucradas en la prueba de sustentación. Por una parte, las fuerzas generadas por el batimiento de alas (Fuerza de arrastre y fuerza del peso del mecanismo), y, por otro lado, la fuerza debida al contrapeso.

Para determinar la distancia a la que se debe ubicar el contrapeso, de tal manera que el centro de masa del sistema quedara ubicado sobre el pivote (área de sustentación) y conseguir que los torques estuvieran en equilibrio, se usó la fórmula del centro de masa del eje x.

$$C_{mx} = \frac{m_d * X_d + m_c * X_c}{m_d + m_c} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$X_c = \frac{C_{mx}(m_d + m_c) - m_d * X_d}{m_c} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde, C_{mx} es el centro de masa del eje X , m_d la masa del dispositivo, X_d la distancia del dispositivo al pivote, m_c la masa del contrapeso, y X_c la distancia del contrapeso al pivote.

Como el origen se encuentra ubicado en el pivote, la Ecuación 11 se reduce a la siguiente ecuación.

$$X_c = \frac{-m_d * X_d}{m_c} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para realizar la prueba de fuerza de sustentación fue necesario conseguir una frecuencia de aleteo similar a la del colibrí (50 aleteos/segundo), por lo qué, se realizó la medición de la frecuencia de aleteo generada por el movimiento del mecanismo utilizando un encoder óptico y un Microcontrolador Arduino para la adquisición y visualización de los datos.

En la Ilustración 43, se observa el esquema electrónico usado para la medición de la fuerza de elevación.

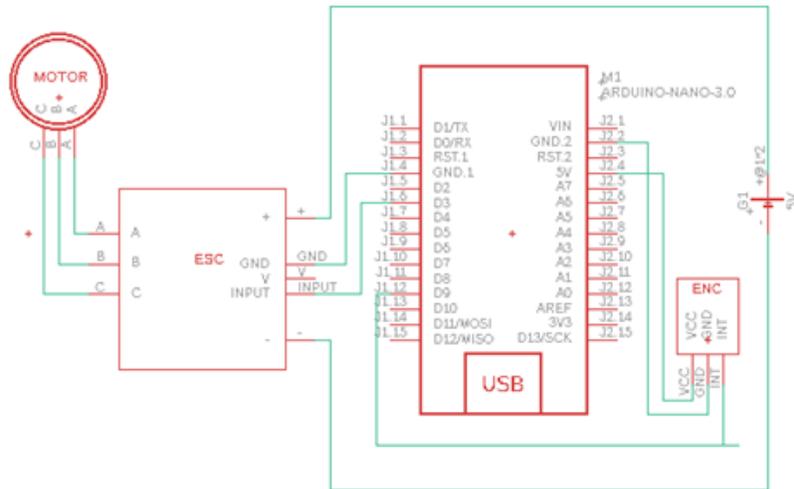


Ilustración 43. Esquema electrónico medición fuerza de elevación. Elaboración propia.

8.3.2. Diseño instrumento de captura de polen

El concepto del elemento de captura seleccionado se diseñó a partir de los requerimientos funcionales, de esta manera se establecieron las dimensiones, los materiales y limitaciones para cumplir la función de captura de polen. Se determinó el tamaño, la forma y el material de captura de polen a partir de las dimensiones del espacio entre la antera y el tubo floral de la flor de gulupa, la forma del dorso de la abeja *Xylocopa* y las características de sus vellosidades que le permiten capturar el polen al acercarse a la flor.

Para determinar las dimensiones generales del instrumento de captura se tuvo en cuenta el área de trabajo de las alas con el fin de evitar obstruir su movimiento y las dimensiones de la flor y el cultivo para poder operar dentro del entorno.

8.3.3. Diseño final

El diseño final comprende la integración del diseño del mecanismo de aleteo, el instrumento de captura de polen y los elementos electrónicos. Para la integración del instrumento de captura se realizaron cálculos con el fin de determinar las dimensiones del instrumento considerando: el cultivo de gulupa (entorno de trabajo),

la función de recolección de polen, el margen de funcionamiento, y el acople con el mecanismo de aleteo.

Seguidamente, se determinaron los porcentajes de masa de los componentes para elegir la distribución de estos dentro del mecanismo final, y de esta manera, ubicar el centro de masa de forma que el sistema estuviera equilibrado. Se determinó la ubicación del instrumento de captura de polen respecto al mecanismo de aleteo. Para procurar la durabilidad, se hace un diseño de carcasa para proteger y ubicar los elementos del mecanismo.

9. RESULTADOS Y ANALISIS

9.1. Levantamiento de requerimientos

A continuación, se relacionan los requerimientos necesarios para dar cumplimiento a los objetivos y por ende al proyecto.

Requerimientos del cliente

- Los materiales establecidos en el diseño del mecanismo deben ser de bajo costo para facilidad de implementación y reemplazo.
- El dispositivo no debe generar un daño físico en la estructura de la planta y el cultivo.
- El instrumento de captación de polen debe ser capaz de capturar el polen de la flor de gulupa.

Requerimientos funcionales

- El mecanismo de vuelo deber ser capaz de realizar movimientos de aleteo para generar fuerza de elevación.
- Los elementos establecidos en el diseño del mecanismo deben tener densidad o peso reducido, con el objetivo de minimizar el peso que debe levantar el mecanismo de aleteo.
- La masa del sistema que incluye: mecanismo de vuelo, componentes electrónicos, e instrumento de captura de polen, no debe exceder la fuerza de elevación generada por el aleteo.
- El material que va a estar en contacto con las estructuras de la flor debe ser capaz de capturar polen de la flor.

Requerimientos de calidad

- La parte del instrumento de captación de polen que estará en contacto con la flor estará definida por el tamaño de los polinizadores efectivos del cultivo de Gulupa: 15-30 mm de longitud y 8-9,5 mm de ancho (Universidad Nacional de Colombia, 2016; Gonzalez, Gonzalez, & Cuellar, 2009).
- El material que va a estar en contacto con las estructuras de la flor debe ser de superficie suave y elástica y de estructura firme para evitar que la flor se dañe durante la captación de polen.
- Las dimensiones del dispositivo deben permitir que este se acerque a la planta de gulupa y a la flor, sin dañar la planta.

Las dimensiones del dispositivo no deben exceder la distancia de siembra entre surcos y plantas para el cultivo de gulupa (2,5m a 7m entre surcos y de 5 a 7m entre plantas) (Guerrero López, Potosí Guampe, Melgarejo, & Hoyos Carvajal, 2012).

El instrumento de captura de polen debe tener en cuenta las dimensiones de la flor de gulupa en el momento de acercarse a la flor, para evitar dañarla. Dimensiones: longitud 4,5-6,5 cm y un ancho de 4-5 cm (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012).

- El mecanismo de aleteo debe ser capaz de operar en las condiciones ambientales óptimas del cultivo de gulupa: Temperatura 10-24° y humedad relativa de 60-84% (Ocampo Pérez & Wyckhuys, 2012; Melgarejo, 2012).
- El mecanismo de aleteo debe contener un mecanismo de transmisión que permita conseguir el movimiento y genere elevación, con una amplitud de batida similar a la del colibrí y vehículos aéreos inspirados en el colibrí entre 110-120°

(KARÁSEK, 2014) y una frecuencia de aproximadamente 50 Hz (Mark, 2000; KARÁSEK, 2014).

- El dispositivo debe presentar una distribución de los elementos de tal forma que los componentes de mayor peso estén en el centro del mecanismo para aumentar la estabilidad del mismo (Anderson, 2010; Redondo, 2016).
- El diseño del mecanismo debe tener un consumo energético bajo de tal manera que pueda tener mayor autonomía (Beekman, 2010).

9.2. Mecanismo de aleteo

9.2.1. Diseño conceptual

El diseño del mecanismo de aleteo se inició seleccionando los requerimientos a cumplir para después analizar con el método de la casa de la calidad las características que se debían añadir al diseño del mecanismo de aleteo. Se le asignó un valor de importancia (peso) de acuerdo a la función principal del diseño:

Dentro del proceso de diseño del mecanismo de aleteo, el primer paso fue llevar a especificaciones de ingeniería los requerimientos del usuario, para esto se usó la metodología de la casa de la calidad. Se definieron los requerimientos del usuario y a cada uno se le asignó un valor de importancia (peso) de acuerdo a la función principal del diseño: generar fuerza de elevación para alcanzar la flor en el cultivo de gulupa.

1. Conseguir elevación para alcanzar la flor. Esta es la función principal que incluye el mecanismo de aleteo, geometría de ala y fuerza elevación.
2. No dañar el cultivo. Durante el funcionamiento no debe hacerle daño a la estructura de la flor ni la planta.
3. Materiales de bajo costo: Selección de materiales comerciales.
4. Facilidad de mantenimiento: piezas fáciles de ensamble y/o reemplazo, piezas replicables.
5. Mecanismo sea larga durabilidad. Resistencia a la intemperie.

6. Operar en condiciones óptimas del cultivo: Materiales resistentes a condiciones en exteriores (temperatura y humedad).

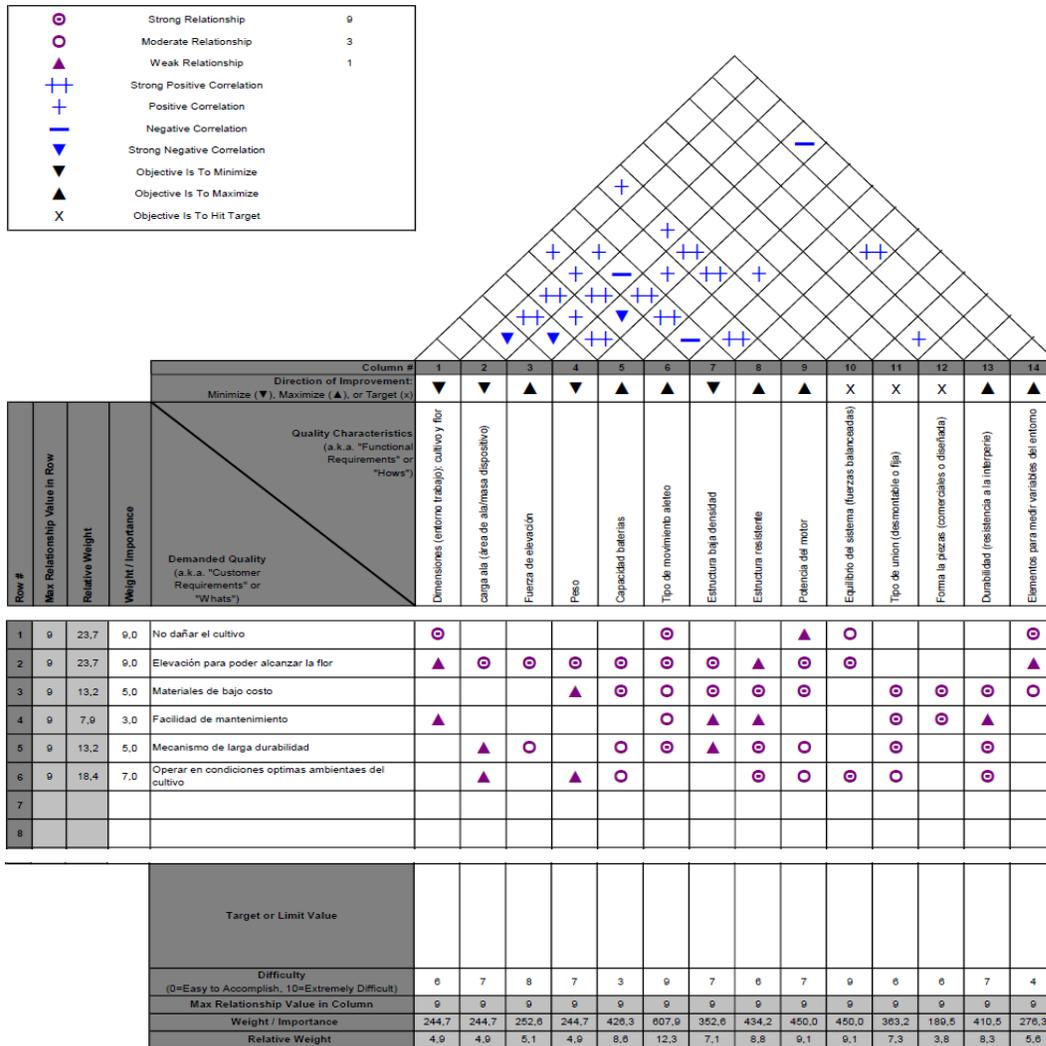


Ilustración 44. Casa de la calidad para el mecanismo de aleteo. Elaboración propia.

Para el desarrollo de la solución propuesta, en lo referente al mecanismo de aleteo, con la casa de la calidad, se evaluaron las especificaciones técnicas del vuelo para satisfacer los requerimientos (Anexo 1). Los resultados arrojan que los aspectos técnicos más importantes son el movimiento de aleteo, la potencia del motor, el equilibrio del sistema y la durabilidad.

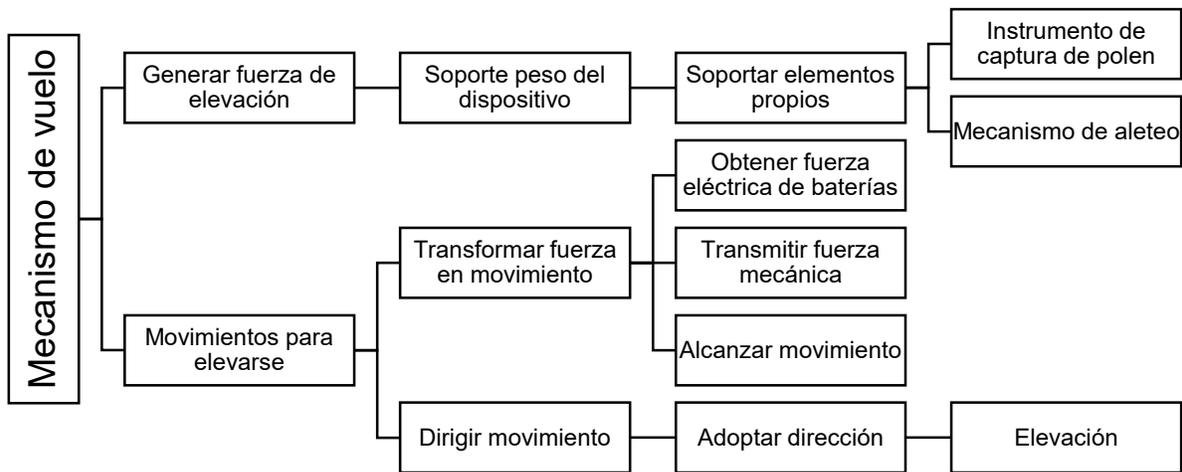


Ilustración 45. Diagrama de funciones mecanismo de vuelo. Elaboración propia.

A partir del diagrama de funciones se determinaron los componentes que relacionan las especificaciones técnicas con las funciones principales del mecanismo

Mecanismo de transmisión: Mecanismo que permite conseguir el movimiento oscilatorio de aleteo.

Alas: Se refiere a la forma y geometría de las alas que debe tener el mecanismo de vuelo

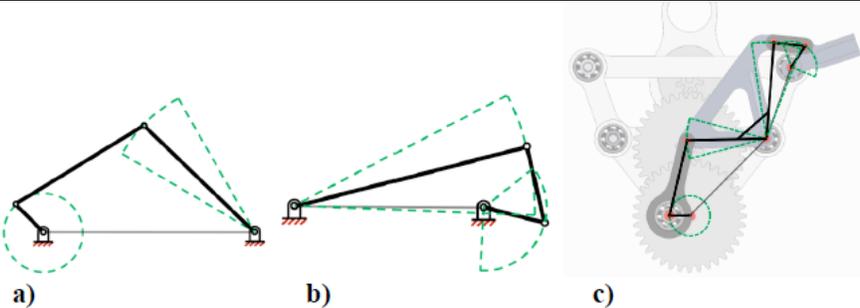
Estructura aerodinámica: Forma y materiales utilizados para la construcción del mecanismo de aleteo.

En cuanto a los componentes de funcionamiento referentes al vuelo, se decidió trabajar con mecanismos de eslabones de transmisión de movimiento. Para esto, realizó la evaluación de tres diferentes mecanismos, escogidos a partir de los requerimientos más relevantes, como resultado de la casa de la calidad. El diseño se basa en el mecanismo de aleteo para imitar el vuelo estacionario del colibrí, para ello se evalúan los mecanismos de aleteo planares y espaciales, los cuales permiten una transmisión de movimiento rotacional a oscilatorio como posibles soluciones.

Como primer mecanismo planar, se presenta el mecanismo de cuatro barras doble, descrito en la Tabla 8, desarrollado para en Nanohummingbird (Keennon M. ,

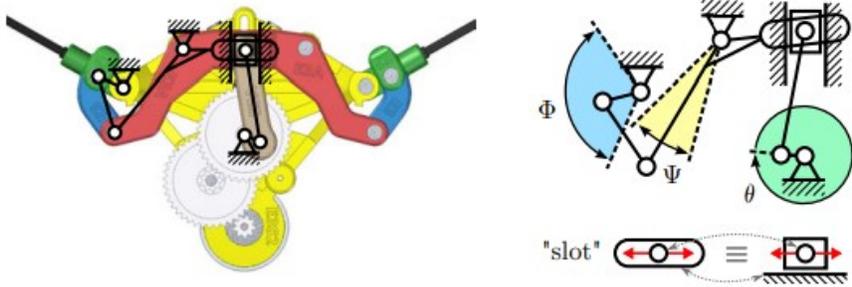
Klingebl, Won, & Andriukov, 2012). Como segunda opción, está el mecanismo planar de aleteo oscilatorio con manivela- balancín, presentado para un robot colibrí (KARÁSEK, 2014) (Tabla 9) y como tercera opción, el desarrollo de un mecanismo espacial que combina un enlace de cuatro barras planas con un RSSR espacial adjunto a los enlaces de entrada y salida (Wang & McCarthy, 2017) descrito en la Tabla 10.

Tabla 8. Mecanismo aleteo de 4 barras doble: double crank-rocker.

| Mecanismo aleteo de 4 barras doble: double crank-rocker | |
|---|---|
|  <p>Ilustración 46. Mecanismo aleteo de 4 barras doble. Fuente: (Keennon M. , Klingebiel, Won, & Andriukov, 2012)</p> | |
| Ventajas | Desventajas |
| <ul style="list-style-type: none"> • Permite realizar un mecanismo de aleteo con una frecuencia y amplitud determinadas por la relación entre las barras. • Es resistente y aporta estructura al mecanismo. | <ul style="list-style-type: none"> • El mecanismo solo permite un movimiento en un solo plano. • Las barras que lo componen aportan peso. • El movimiento entre barras afecta la durabilidad por desgaste. • El mecanismo al estar compuesto de dos mecanismos, aumenta la dificultad de movimiento dinámico del mismo. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Características mecanismo planar manivela deslizante-balancín acoplado a mecanismo de cuatro barras.

| Mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela-balancín: slider crank rocker | |
|---|--|
|  | |
| <p>Ilustración 47. Mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela-balancín: slider crank rocker. Fuente: (KARÁSEK, 2014)</p> | |
| Ventajas | Desventajas |
| <ul style="list-style-type: none"> • Permite un vuelo asimétrico para realizar movimiento en los tres ejes (x,y,z). • El mecanismo es robusto debido a las uniones que presenta. • El mecanismo presenta dos etapas, con el fin de lograr un movimiento simétrico en las alas. Un mecanismo basado en una manivela deslizante que genera una baja amplitud de salida, está unido a un mecanismo de cuatro barras que amplifica el movimiento de salida deseado (aleteo). | <ul style="list-style-type: none"> • Es un mecanismo complejo que requiere de precisión para su construcción. • El mecanismo presenta un mayor desgaste debido a la fricción entre las piezas. |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Mecanismo de aleteo espacial de 6 barras.

| Mecanismo de aleteo: Espacial 6 barras | |
|---|--|
| | |
| <p><i>Ilustración 48. Mecanismo de aleteo espacial de 6 barras. Fuente: (Wang & McCarthy, 2017)</i></p> | |
| Ventajas | Desventajas |
| <ul style="list-style-type: none"> • El mecanismo presenta una curva de salida que describe un movimiento en forma de ocho al igual que el vuelo del colibrí natural. • El mecanismo presenta más robustez dadas las uniones que presenta en las barras. • Al estar controlado por un solo motor permite una simetría en el movimiento de aleteo de ambas alas. • El mecanismo puede moverse en más de un plano en el espacio, lo que le permite establecer el movimiento de salida, en lo referente a la amplitud de batida y el trazo de la punta del ala. Así, se consigue controlar y mantener el mismo movimiento repetidamente. | <ul style="list-style-type: none"> • Es un mecanismo complejo que requiere de precisión para su construcción. • El mecanismo es controlado por un solo motor, lo cual impide el control individual de las alas. • El mecanismo tiene una construcción compleja que requiere de ángulos de movimiento específicos. Esto hace, que los rangos de movimiento sean limitados. |

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar cuál de los mecanismos anteriormente descritos era el que mejores características presentaba y poder usarlo en el mecanismo de aleteo, inicialmente se realizó un estudio del mecanismo espacial de seis barras (Ilustración 49)

realizando un modelado y simulación del movimiento en el programa Solid Works. Con este mecanismo se logró conseguir un movimiento en forma de ocho, semejante al movimiento de las alas del colibrí, sin embargo, este impedía el control de las alas de manera individual y no era posible modular la amplitud de aleteo.

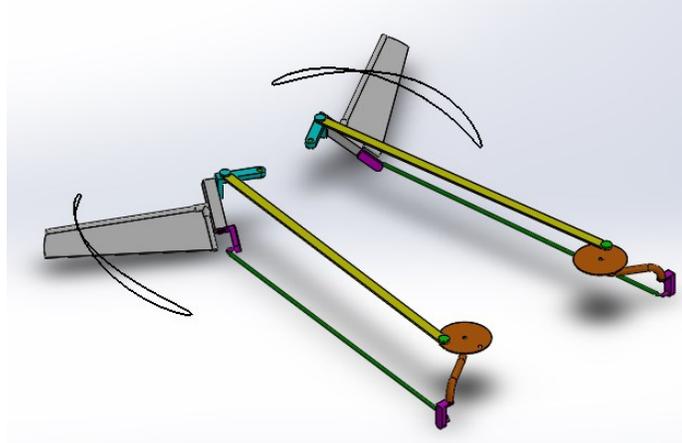


Ilustración 49. Modelo CAD mecanismo espacial de seis barras. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la evaluación de los otros dos mecanismos propuestos, el mecanismo doble de cuatro barras y el mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela- balancín. El primer mecanismo, tenía incorporado un sistema para controlar las maniobras del movimiento, sin embargo, este presentaba un mecanismo de transmisión con muchos engranajes, lo que lo hacía más difícil de implementar, ya que requería más precisión para el ensamblado de todo el sistema.

Finalmente, se realizó un análisis del mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela- balancín, con este mecanismo se consiguió un ángulo de salida similar al ángulo que presenta el colibrí natural, debido a las dos etapas que presenta este mecanismo de transmisión. De igual manera, este mecanismo conseguía el movimiento de ocho del colibrí a partir de la curvatura que presentaba el ala.

Además, se hizo la evaluación de estos tres mecanismos a partir de una matriz de decisión Pugh.

Tabla 11. Matriz de decisión Pugh mecanismo de vuelo.

| | Peso | Mecanismos aleteo | | | Alas | |
|--|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | | Mecanismo 1 | Mecanismo 2 | Mecanismo 3 | Alas planas | Alas con curva |
| Costos de dispositivo | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Funcionalidad | 10 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| Costos de operación y mantenimiento | 6 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Fácil manejo del dispositivo | 6 | 1 | -1 | 1 | 0 | 0 |
| Resistencia a condiciones ambientales del dispositivo en la zona operativa | 8 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 |
| Evitar daños en el cultivo | 10 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 |
| Vida útil del dispositivo | 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| Total | | 3 | -4 | 3 | -3 | 1 |
| Peso | | 24 | -28 | 26 | -28 | 10 |
| Total + | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total - | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la matriz de decisión (Tabla 11) y la evaluación de las ventajas y desventajas descritas anteriormente, y se determinó que el mecanismo más adecuado para cumplir con los requerimientos planteados es el propuesto por (KARÁSEK, 2014) (Mecanismo de aleteo oscilatorio con manivela- balancín).

9.2.2. Diseño mecanismo de aleteo

Para desarrollar el concepto seleccionado, a continuación, se evalúa el movimiento de aleteo del mecanismo mediante un análisis cinemático y una simulación dinámica. A partir de los resultados se hace la selección de un ala, estimaciones de

peso de componentes y una prueba experimental de la fuerza de elevación generada por las alas.

9.2.2.1. Cinemática mecanismo de aleteo

Para el análisis del movimiento se analizaron cada uno de los eslabones del mecanismo de aleteo y se obtuvo como resultado el desplazamiento y velocidad angular de estos. El análisis cinemático del mecanismo está compuesto por, una primera etapa de un mecanismo de biela manivela (color azul), un segundo mecanismo deslizante (color rojo), y una etapa final comprendida por un mecanismo de cuatro barras (color verde) (Ilustración 50). Para establecer las ecuaciones de posición cada etapa el sistema se resolvió por medio de un lazo vectorial cerrado, donde cada barra está representada como un vector. Los vectores r_6 y r_{10} se establecieron como ayuda para resolver el sistema.

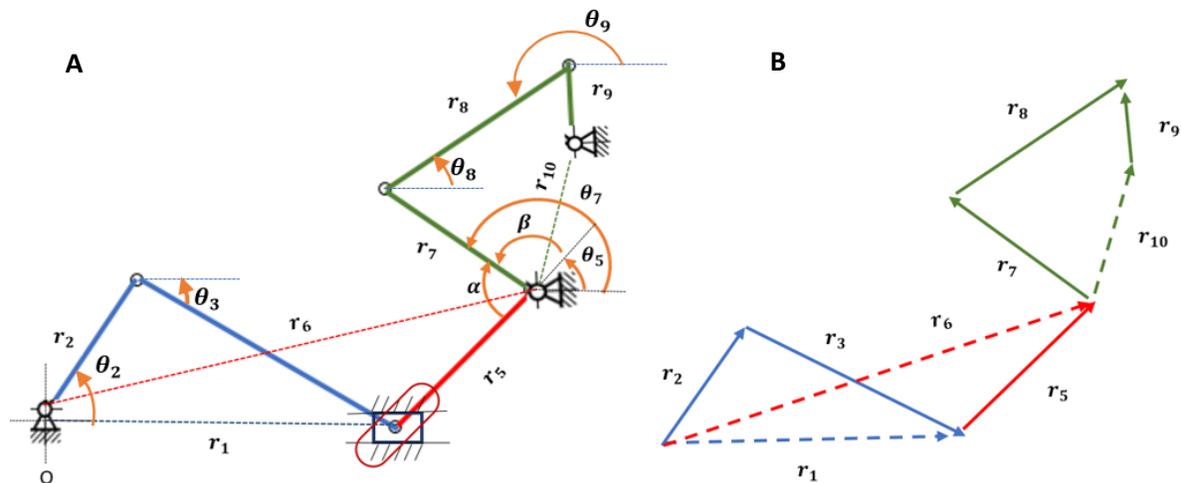


Ilustración 50. (A) Esquema mecanismo de barras basado en propuesta (KARÁSEK) (B) Esquema de lazo vectorial cerrado del mecanismo. Fuente: (KARÁSEK, 2014).

Dimensiones del mecanismo en mm:

| R2: | R3: | R6: | R7: | R8: | R9: | R10: | α : |
|-----|------|-----|-------|------|------|-------|------------|
| 5.7 | 30,4 | 136 | 35.46 | 19.1 | 9.04 | 23.30 | 118° |

A continuación, se presentan las tres ecuaciones de posición para cada etapa del mecanismo, con las que se pudo determinar analíticamente el ángulo de salida (θ_9).

$$\vec{r}_2 + \vec{r}_3 - \vec{r}_1 = 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_5 - \vec{r}_6 = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$-\vec{r}_{10} - \vec{r}_9 + \vec{r}_7 - \vec{r}_8 = 0 \quad \text{Ecuación 15}$$

La Ecuación 13, describe la posición del primer mecanismo deslizante. El ángulo θ_1 fue definido igual a 0° y el ángulo θ_2 estuvo determinado por la entrada del motor. Se despejó el cambio de posición del eslabón r_1 y el cambio del ángulo θ_3 que fueron reemplazados en la Ecuación 14.

A partir de la Ecuación 14 se obtuvieron los cambios de la posición del eslabón r_5 y del ángulo θ_5 , estos se reemplazaron en la ecuación que describe la etapa final del mecanismo (Ecuación 15). Debido a la disposición de los eslabones en el mecanismo, θ_7 y θ_5 se relacionaron como $\theta_7 = \theta_5 + \beta$.

Finalmente, a partir de la Ecuación 18, se despejó θ_8 y θ_9 , para determinar las posiciones de salida del mecanismo.

$$|r_2| \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix} + |r_3| \begin{bmatrix} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{bmatrix} - |r_1| \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$|r_1| \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} + |r_5| \begin{bmatrix} \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 \end{bmatrix} - |r_6| \begin{bmatrix} \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$-|r_{10}| \begin{bmatrix} \cos \theta_{10} \\ \sin \theta_{10} \end{bmatrix} - |r_9| \begin{bmatrix} \cos \theta_9 \\ \sin \theta_9 \end{bmatrix} + |r_7| \begin{bmatrix} \cos \theta_7 \\ \sin \theta_7 \end{bmatrix} + |r_8| \begin{bmatrix} \cos \theta_8 \\ \sin \theta_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 18}$$

Resolviendo las ecuaciones de posición se pudo determinar la evolución de los eslabones del mecanismo durante un ciclo completo (360°), representándose una posición cada 30° (Ilustración 51).

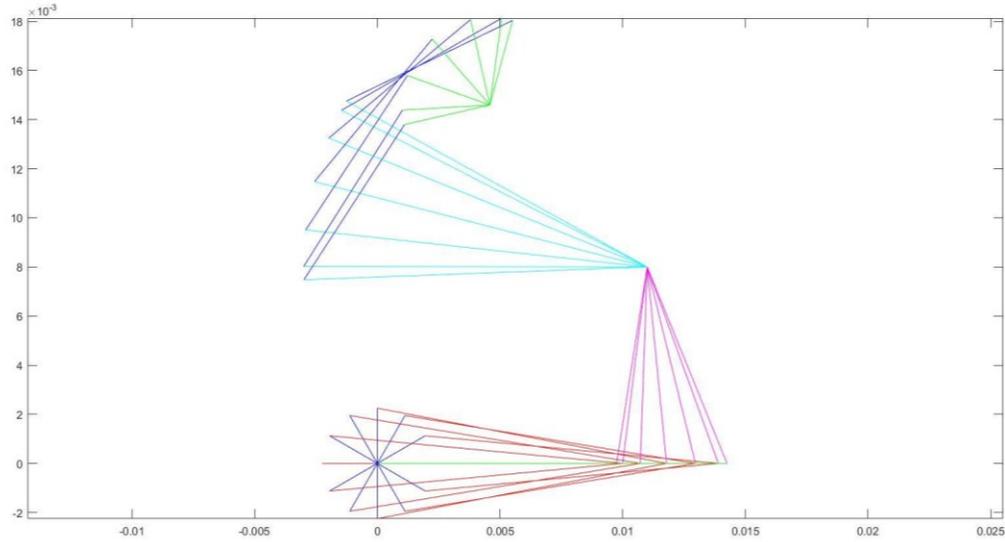


Ilustración 51. Análisis de desplazamiento del mecanismo. Eslabón de entrada r_2 (línea azul) es el punto de referencia. Eslabón de salida (línea verde). Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó un análisis de velocidad a partir de la derivada de las ecuaciones de posición descritas (Ecuación 16, Ecuación 17, Ecuación 18). Se definió una velocidad angular de entrada del motor (θ_2) de 3000 RPM o 100π rad/s, que representa una frecuencia de oscilación de 50 Hz (Frecuencia de aleteo promedio del colibrí) y se despejaron las velocidades \dot{r}_1 , $\dot{\theta}_3$, \dot{r}_5 , $\dot{\theta}_5$ y $\dot{\theta}_8$ para finalmente conseguir la velocidad angular del eslabón de salida $\dot{\theta}_9$. La velocidad de $\dot{\theta}_5$ y $\dot{\theta}_7$ es la misma dado que están relacionadas entre sí por un ángulo fijo $\alpha = 118^\circ$ (Ilustración 50).

$$|r_2|\dot{\theta}_2 \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \end{bmatrix} + |r_3|\dot{\theta}_3 \begin{bmatrix} -\sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} - \dot{r}_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\dot{r}_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} + |r_5|\dot{\theta}_5 \begin{bmatrix} -\sin \theta_5 \\ \cos \theta_5 \end{bmatrix} + \dot{r}_5 \begin{bmatrix} \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$-|r_9|\dot{\theta}_9 \begin{bmatrix} -\sin \theta_9 \\ \cos \theta_9 \end{bmatrix} + |r_7|\dot{\theta}_7 \begin{bmatrix} -\sin \theta_7 \\ \cos \theta_7 \end{bmatrix} + |r_8|\dot{\theta}_8 \begin{bmatrix} -\sin \theta_8 \\ \cos \theta_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 21}$$

A continuación, se muestran las gráficas de desplazamiento y velocidad de los eslabones del mecanismo versus el desplazamiento angular de entrada.

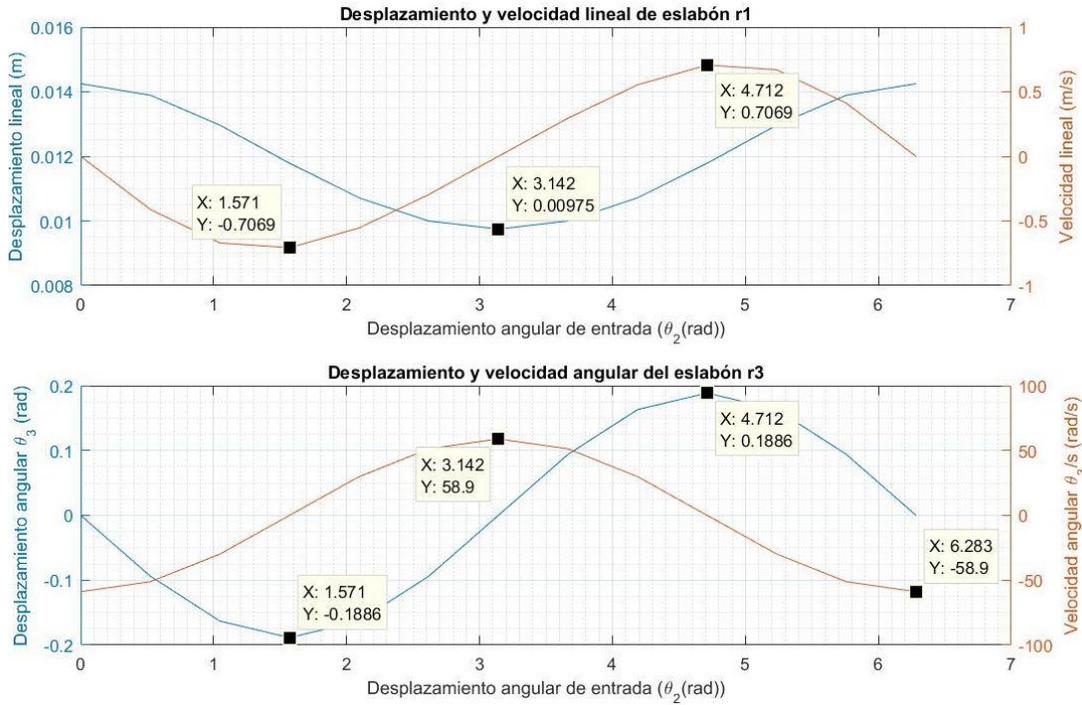


Ilustración 52. Desplazamiento y velocidad lineal eslabón r_1 y desplazamiento y velocidad angular de r_3 respecto al desplazamiento angular de entrada (θ_2).

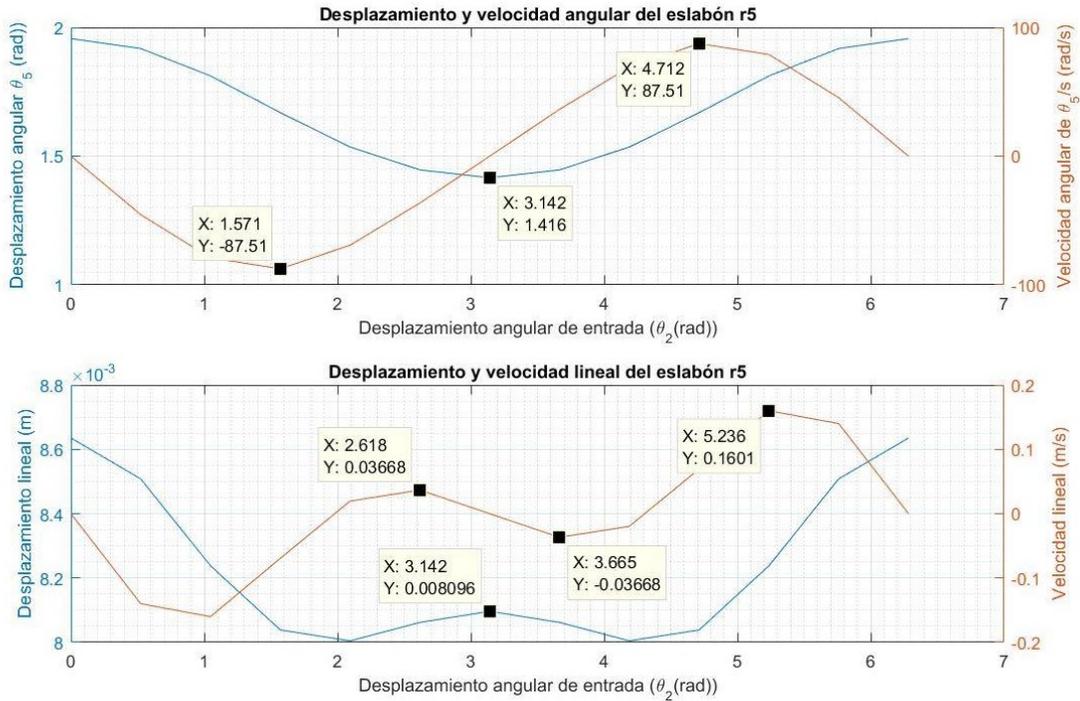


Ilustración 53. Desplazamiento y velocidad angular (θ_5) y desplazamiento y velocidad lineal eslabón r_5 vs. desplazamiento angular de entrada (θ_2).

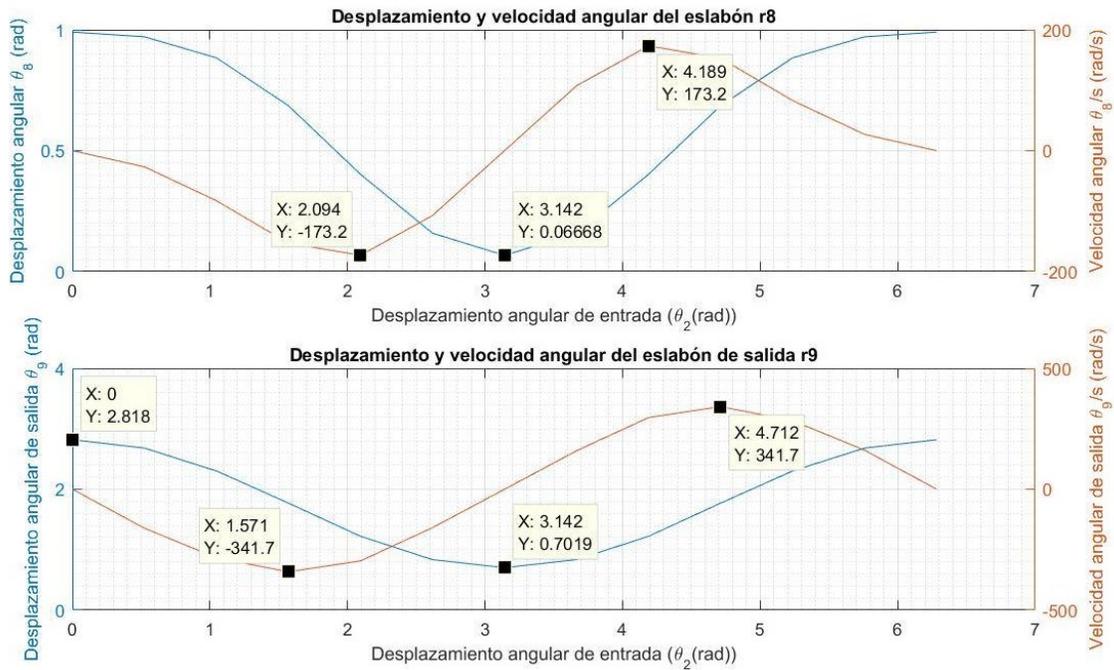


Ilustración 54. Desplazamiento y velocidad angular eslabón r_8 y r_9 vs. desplazamiento angular de entrada (θ_2)

La posición inicial del eslabón r_2 se estableció cuando la barra se encuentra horizontal en el punto de origen para $\theta_2 = 0^\circ$ (0 rad) (Ilustración 51). Así, la primera posición para el eslabón r_8 y eslabón de salida r_9 es de 56.75° (0.9905 rad) y 161.46° (2.818 rad) respectivamente, como se muestra en la Ilustración 54. Para cuando θ_2 se encuentra en la mitad del ciclo 180° (3.1416 rad), r_9 toma su posición máxima o límite 40.216° (0.7019 rad). Para la posición final del mecanismo, θ_2 tiene un valor de 360° (6.28 rad) y se evidencia que r_9 vuelve a su posición inicial 161.46° (2.818 rad). De acuerdo a la posición inicial y final de r_9 , el ángulo de salida del mecanismo de transmisión es 121.244° . Esto indica que durante un ciclo completo de 360° de θ_2 , el eslabón r_9 presenta un movimiento oscilatorio en el mismo periodo, lo que significa un batimiento de ala por giro del motor, es decir la velocidad de aleteo será la misma que la velocidad angular en θ_2 y por lo tanto su frecuencia es $\frac{\theta_2}{2\pi}$.

La velocidad angular de salida $\dot{\theta}_9$ presenta dos incrementos de velocidad hasta 341.7 rad/s, que representa un valor de frecuencia de aproximadamente 54.38 Hz. Se observan dos picos invertidos de velocidad durante el ciclo de θ_2 , estos picos se

encuentran ubicados en el medio de cada medio ciclo. Esto se relacionó con el aleteo ascendente y descendente durante el ciclo de batida del colibrí.

Considerando los valores de cinemática del vuelo del colibrí más relevantes para conseguir elevación: frecuencia aleteo (50 Hz) y amplitud de aleteo (120°), estos, comparados con los valores obtenidos analíticamente se asemejan de tal forma que, los parámetros de salida del mecanismo de transmisión cumplen los requisitos de funcionamiento para transmitir el movimiento deseado.

9.2.2.2. Simulación dinámica del mecanismo de aleteo

A partir de los resultados del análisis cinemático se realizó una simulación del movimiento del mecanismo.

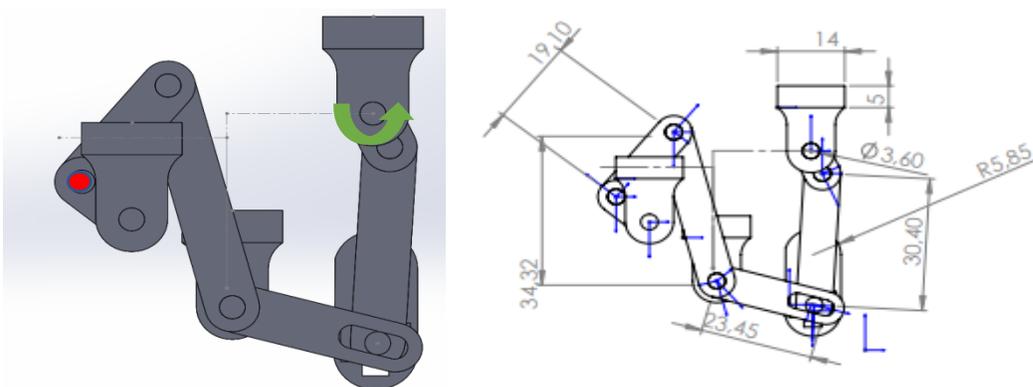


Ilustración 55. CAD mecanismo de aleteo, basado y modificado de (KARÁSEK, 2014).

En la Ilustración 55 se muestra el modelo en CAD realizado para simular el movimiento del mecanismo de aleteo de un ala, con sus respectivas dimensiones, presentadas en milímetros (mm). El punto rojo representa la salida del mecanismo en donde se acopla el ala y la flecha verde muestra la ubicación del motor.

En la Ilustración 56, se muestran los resultados obtenidos en la simulación del modelo CAD: desplazamiento angular de salida del mecanismo, periodo, y frecuencia de un ciclo de aleteo. Se observa una amplitud de salida de 113° que se asemeja al desplazamiento angular del mecanismo de referencia (120°); además, se muestra que un ciclo de aleteo completo (periodo indicado por el tiempo entre

los segmentos rojos), tiene una duración de 0,02 segundos, valor con el que se calcula la frecuencia de salida del mecanismo (50 Hz).

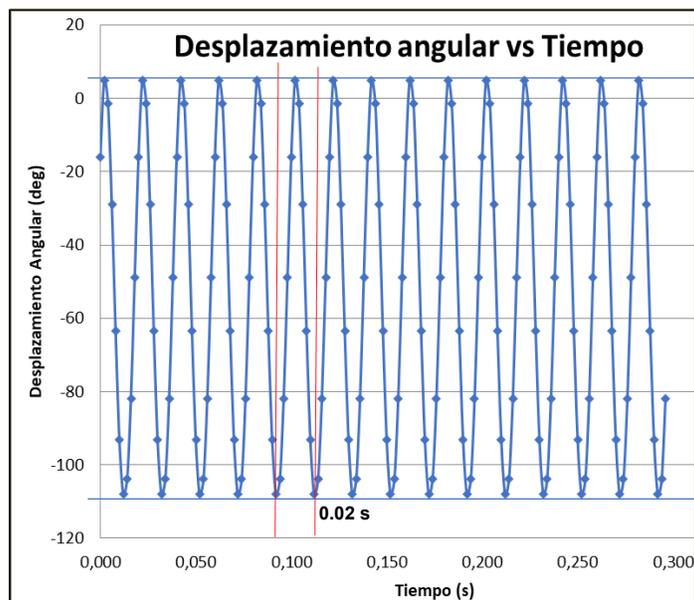
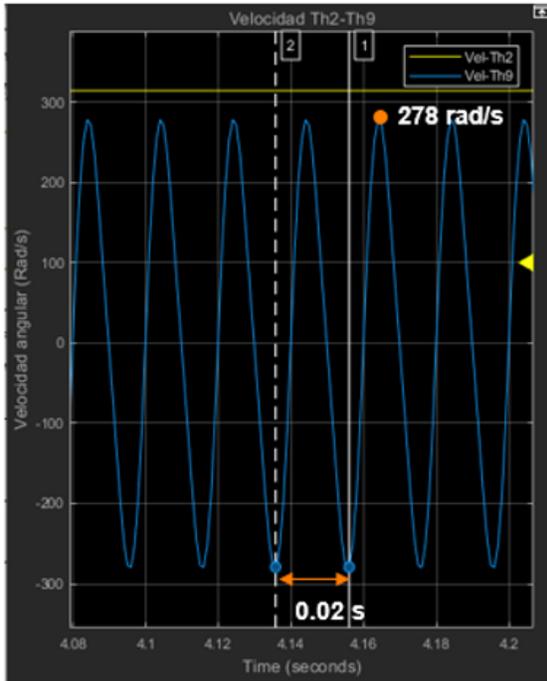
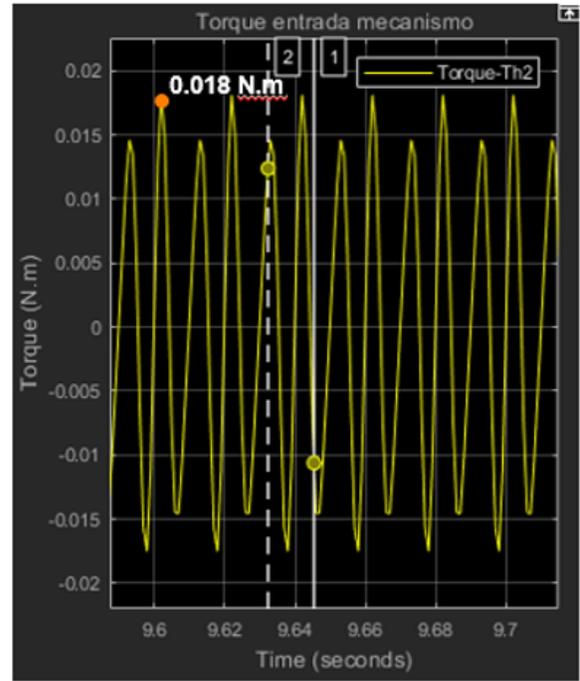


Ilustración 56. Desplazamiento angular de la salida del mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 57 (a) se muestra la velocidad angular del eslabón de entrada (línea amarilla) y el eslabón de salida (línea azul) respecto al tiempo. A una entrada de 314 rad/s constante, el cambio de posición angular del eslabón de salida es oscilatorio con una velocidad máxima de 278 rad/s. Este resultado oscilante se relaciona con la primera etapa del mecanismo (biela-manivela), como resultado de la transformación del movimiento rotatorio a oscilatorio. Los incrementos y disminuciones de velocidad se generan por la longitud del recorrido de la corredera y el cambio de dirección en los puntos límite; estos cambios de velocidad se presentan dos veces durante el ciclo, al igual que se encontró en el análisis cinemático.



a)



b)

Ilustración 57. Resultados simulación dinámica mecanismo de aleteo: a) Velocidad angular del eslabón de entrada (r_2) y salida (r_9) con respecto al tiempo, b) Torque necesario para mover mecanismo de aleteo. Elaboración propia.

El torque en el eslabón de entrada respecto al tiempo necesario para realizar el movimiento del mecanismo de aleteo y mantener la velocidad establecida (314 rad/s) se presenta en (Ilustración 57 (b)). La grafica es oscilatoria, al igual que la de velocidad, se debe a la etapa de transmisión de movimiento rotatorio a oscilatorio; la oscilación del valor máximo de los picos en la figura se debe a un error matemático del software dado por los valores que esta toma para generar los valores. El valor de torque máximo de la gráfica de 0.018 Nm indica el torque mínimo necesario que debe tener el motor a seleccionar para el adecuado movimiento del mecanismo.

9.2.2.3. Diseño del ala

A continuación, se muestra el molde del ala seleccionada para el diseño del mecanismo de aleteo (Ilustración 58). El ala presenta un ángulo mayor a 90° entre las estructuras rígidas ($+16^\circ$) con el fin de permitir que se forme una curvatura (de

manera pasiva) durante el ciclo de subida y bajada, con esto imitar la curvatura del ala generada durante el vuelo del colibrí.

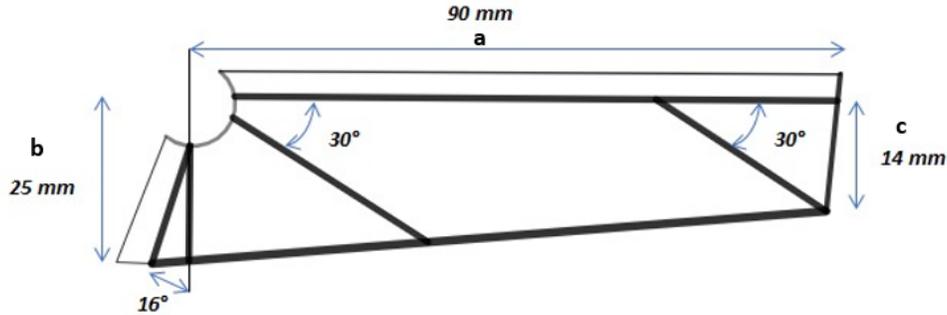


Ilustración 58. Molde con medidas del ala usada por (KARÁSEK, 2014). Fuente: Elaboración propia.

Se construyeron diferentes alas variando sus aspectos geométricos y físicos (materiales) con el fin de ver su comportamiento unidas al mecanismo de barras. A continuación, se muestran sus dimensiones (Tabla 12). La decisión de cambiar los parámetros geométricos de las alas fue tomada teniendo en cuenta los resultados de la prueba de fuerza de elevación. (Ver sección medición fuerza de elevación de las alas).

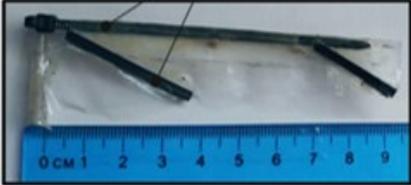
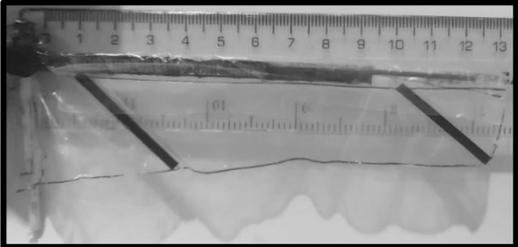
Tabla 12. Dimensiones alas construidas (mm).

| Ala 1 | Ala 2 | Ala 3 | Ala 4 |
|---|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • a= 90 • b= 25 • c= 14 | <ul style="list-style-type: none"> • a= 92 • b= 33 • c= 20 | <ul style="list-style-type: none"> • a= 110 • b= 60 • c= 20 | <ul style="list-style-type: none"> • a=130 • b=36 • c=20 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las dimensiones se calcularon parámetros cinemáticos de gran influencia en la generación de fuerza de elevación de las alas: área y relación de aspecto (Tabla 13).

Tabla 13. Características de alas utilizadas para pruebas de sustentación.

| | Área (mm ²) | Relación de aspecto |
|--|-------------------------|---------------------|
| <p>Ala 1</p> <p>Nylon</p>  | 1803 | 8.98 |
| <p>Ala 2</p> <p>Película de Poliéster Mylar</p>  | 2533 | 6.68 |
| <p>Ala 3</p>  | 4275 | 5.66 |
| <p>Ala 4</p>  | 3586.63 | 9.42 |

Fuente: Elaboración propia.

9.2.2.1. Construcción mecanismo de aleteo

La evolución de los mecanismos construidos se muestra en la Ilustración 59. Cabe resaltar que los mecanismos se construyeron únicamente con el objeto de generar el movimiento del ala, medir la fuerza de elevación, y con esto poder realizar posteriores estudios. De esta manera el mecanismo no está optimizado para tener un peso ligero, sin embargo, el diseño se mantiene lo más simple posible permitiendo un margen de mejora.

Se consideraron 3 tipos de motores para accionar el mecanismo, ver Tabla 14. Un motor de corriente directa con escobillas y dos motores *brushless* o sin escobillas. Los factores que limitan la velocidad máxima de los motores de DC pequeños suelen ser la temperatura (el motor se calienta por la corriente y la fricción) y, en el caso de los motores con escobillas, el desgaste de las escobillas limita la vida útil de los motores cepillados.

La mayor fuerza de elevación se obtuvo con un motor brushless, con una constante de revoluciones (KV) de 1400 revoluciones por voltio aplicado (RPM/V). Su ventaja es que consume menos corriente y por tanto menos consumo de energía con una mayor velocidad, pero necesita ser conducido por un controlador de velocidad que agrega más peso al mecanismo.

La relación de transmisión de los engranajes conectados entre sí fue de 2,07, cuando se completa un giro del engranaje conducido, el engranaje conductor o motriz completa 2,07 giros. Esta relación de transmisión permitió disminuir la velocidad de giro del motor y aumentar el torque del mismo.

El grosor de los eslabones que conforman el mecanismo fue modificado durante la evolución de los modelos, con lo que se consiguió mayor resistencia a la fractura ante las vibraciones. Así mismo, se modificaron los elementos de unión de los eslabones y se logró mayor firmeza de la estructura.

Para todos los mecanismos se utilizó acrílico como material de la estructura, sin embargo, la base del mecanismo de aleteo de la versión final (C) fue reforzada con

una lámina de aluminio de 1,5 mm y con esto se evitó el desajuste del mecanismo por vibraciones. El material utilizado originalmente para los bordes de las alas fue reemplazado por barras de aleación de aluminio, este fue más resistente mientras el mecanismo aleteaba.

Tabla 14. Evolución mecanismo de aleteo.

| Versión | Material estructura | Elementos de unión | Motor | Grosor eslabones |
|---------|--|--------------------|------------------------------|--|
| A | Acrílico | Puntillas | Motor DC con escobillas | Todos los elementos 2mm. |
| B | Acrílico | Tornillos | Motor brushless A2212-1400KV | Eslabones r_5 y r_7 4mm, los demás se mantuvieron con una medida de 2 mm |
| C | Acrílico y base reforzada con aluminio | Tornillos | Motor brushless A2212-1000KV | Eslabones r_5 y r_7 4mm, base 5mm, los demás se mantuvieron con una medida de 2 mm |

Fuente: Elaboración propia.

A



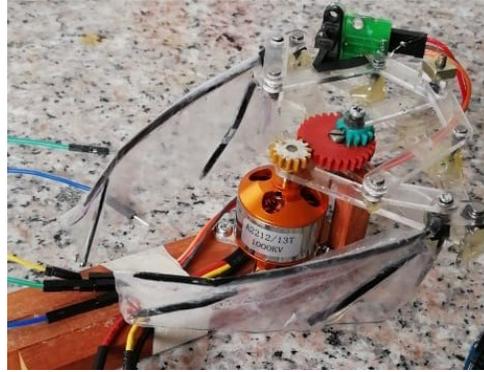
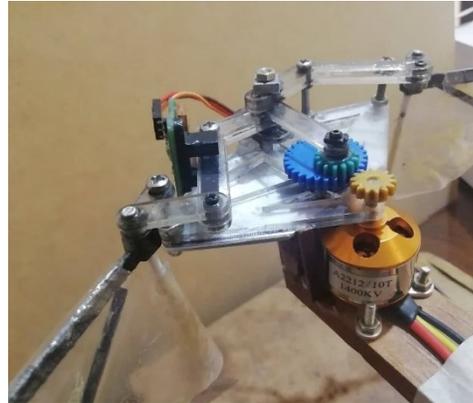
B**C**

Ilustración 59. Evolución mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.

9.2.2.2. Selección de material del diseño.

En la Tabla 15 pueden observarse algunos materiales para el diseño del mecanismo y sus respectivas características. Estos materiales se seleccionaron de acuerdo a lo expuesto en la metodología.

Tabla 15. Materiales usados en prototipado rápido.

| Material | Densidad | Módulo de elasticidad | Tensión de rotura | Costo (Pesos colombianos) |
|---|-------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| ABS | 1,06 g/cm ³ . | 22.1 - 49.0 MPa | 42.5 - 44.8 MPa | 59.197 |
| ABS-CFRP | 1,07 - 1,27 g/cm ³ | 17.1 GPa | 26.7MPa | 179.405 |
| Digital ABS Plus POLYJET SIMULATED ABS PLASTIC | 1.17-1.18 g/cm ³ | 2,600-3,000 MPa | 55-60 MPa | 1'484.736 |
| PLA | 1,24 g/cm ³ | 2.3 GPa | 35.9 MPa | 1'296.050 |
| PLA- CFRP | 1.3 g/cm ³ | 4.8 GPa | 45.5MPa. | 146.988 |
| PETG | 1,27 g/cm ³ | 2150 MPA | 50 MPA | 104.400 |

| | | | | |
|------|-------------------------|----------|---------|---------|
| HIPS | 1,05 g /cm ³ | 1550 MPA | 22 MPA | 60.777 |
| ASA | 1,07 g/cm ³ | 1800 MPA | 42 MPA | 75.391 |
| PEI | 1,27 g/cm ³ | 3200 MPA | 82 MPA | 71.793 |
| PP | 0,86 g/cm ³ | 1300 MPA | 214 MPA | 131.392 |

Fuente: (MatWeb)_ (sd3d)_ (sd3d)_ (Stratasys, 2008)_ (3DXTECH)_ (Michael Golub, 2016) (MatWeb)_ (prospector, 2019)_ (gsc, 2016)_ (BIO-TECH)_ (plasticbages industrial, S.L, s.f.) (plasticdream, s.f.)

Se llevó a cabo la selección del material del mecanismo mediante una comparación de las características de los materiales (Tabla 15), y se asignaron valores de los materiales evaluados frente a cada requerimiento: 1 para los materiales que cumplan mejor con el requerimiento evaluado, 0 cumplimiento medio o intermedio del requerimiento y -1 para los materiales que no cumplan con un requerimiento (Tabla 16).

Los resultados de la matriz de decisión fueron más altos para los materiales ABS, ASA y PP. Como criterio de selección se compara la densidad de los materiales debido a que esta es la característica que más relevancia tiene ya que se busca mantener un peso bajo en el mecanismo. Se selecciona el material Polipropileno (PP) que es el de menor densidad.

Tabla 16. Matriz de selección de materiales mecanismo de aleteo para captura de polen.

| | | Relevancia | Material | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|------------|----------|----------|------------------|-----|----------|------|------|-----|-----|----|
| | | | ABS | ABS-CFRP | DIGITAL ABS PLUS | PLA | PLA-CFRP | PETG | HIPS | ASA | PEI | pp |
| Requerimientos | Densidad baja | 10 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 1 |
| | Modulo de elasticidad | 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | tensión de rotura | 5 | 1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | costo bajo | 3 | 1 | -1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Total | | | 3 | 0 | 1 | -1 | -3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Peso | | | 15 | 4 | 5 | -10 | -18 | 10 | 5 | 15 | 3 | 15 |
| Total - | | | 0 | 0 | 3 | 5 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Total + | | | 5 | 6 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 |

Fuente: Elaboración propia

9.2.2.3. Componentes electrónicos: estimación peso de componentes electrónicos.

El diseño del mecanismo de aleteo se centra en una primera fase de vuelo que es la elevación, por tanto, el sistema electrónico adecuado para conseguir elevación y alcanzar la flor de gulupa debe contar con componentes que le permitan mantener un vuelo estable.

La elevación está relacionada con el peso del mecanismo. Se debe estimar el peso y tamaño de los componentes electrónicos teniendo en cuenta que, el peso de estos no debe exceder la fuerza de elevación generada por el aleteo y las dimensiones de estos componentes no superen las dimensiones del mecanismo.

El funcionamiento del mecanismo consiste en despegar desde el suelo, elevarse, llegar hasta el nivel de la flor para hacer contacto con las estructuras florales y capturar el polen, y volver a su posición de origen. Para conseguirlo se establecen los siguientes requerimientos para el sistema electrónico:

- Poder comunicarse de manera inalámbrica y poder transmitir datos a distancia de forma bidireccional entre el usuario y el mecanismo. De esta manera poder monitorear el mecanismo durante su funcionamiento.
- Se debe medir la posición del mecanismo durante su desplazamiento vertical para conseguir un vuelo estable, por medio de un sistema de coordenadas para el mecanismo.
- Poder obtener datos de posicionamiento que permitan monitorear su posición y desplazamiento en el espacio de trabajo.
- El mecanismo requiere tener la capacidad de identificar las flores y sus estructuras, principalmente los órganos reproductores masculino y femenino. Así mismo, identificar las características del su entorno.
- El actuador del mecanismo debe poder cumplir con el torque necesario para mover el sistema y brindar una velocidad necesaria para conseguir la frecuencia de aleteo de 50 Hz.

- Tener una unidad para el control de las operaciones de cada componente del mecanismo.

Los componentes deben poder operar en las condiciones ambientales del cultivo: altitud de 1700 – 2200 msnm, temperatura de 10-24° y humedad relativa de 60-84%; con un bajo consumo energético para mayor autonomía.

El diagrama de bloques (Ilustración 60) muestra los sistemas que componen la electrónica del mecanismo: Sistema de comunicación, sistema de navegación, sistema de actuación, unidad de procesamiento y sistema de alimentación.

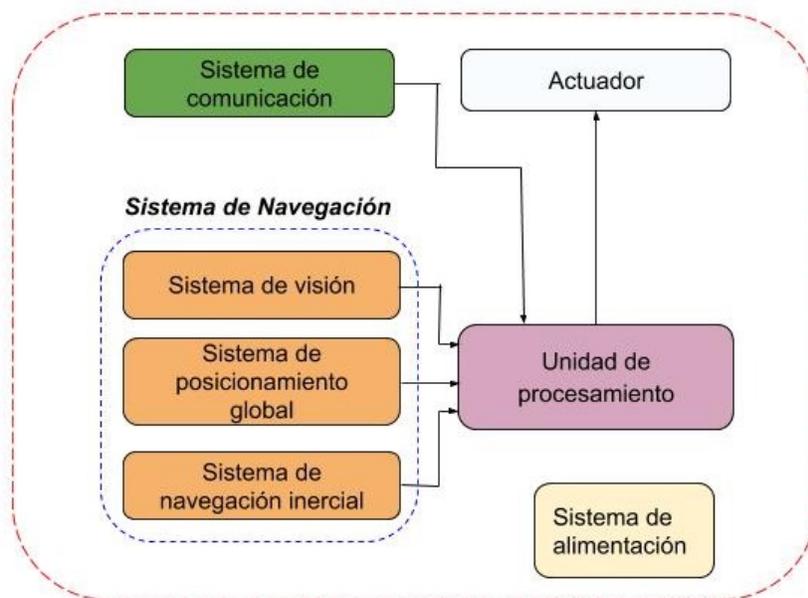


Ilustración 60. Diagrama de bloques a partir de las funciones del mecanismo de aleteo para captura de polen. Elaboración propia.

9.2.2.3.1. Sistema de comunicación.

En la selección del método de comunicación inalámbrico se tuvo en cuenta principalmente la capacidad de comunicación a distancia y la velocidad de transferencia de datos. A partir de esto, para determinar la mejor solución se analizaron tres tipos de comunicaciones inalámbricas para el sistema: Bluetooth, GMS, radio.

La comunicación bluetooth tiene ventajas por el bajo costo económico y bajo consumo de potencia. Además, tiene la facilidad para conectarse a dispositivos como computadores, tabletas, o celulares que vienen con un sistema bluetooth. Sin embargo, una gran desventaja es el poco rango de alcance que ofrece. La velocidad de transferencia de datos puede llegar a los 3 Mbit/s.

La comunicación por sistema GSM tiene como ventaja el poder establecer la comunicación al aprovechar la infraestructura GSM (Global satellite mobile). Se debe usar un módulo capaz de conectarse a la banda de frecuencias utilizada por los móviles; adicionalmente, tiene la posibilidad de conectarse a internet para tener acceso a la información disponible en tiempo real durante la ejecución. La comunicación a largas distancias es posible, mientras se encuentre dentro del área de cobertura. La que mejor cobertura de esta tecnología es GPRS, pero la velocidad no es mayor a 170 kbps.

La comunicación por sistema de radio con módulos de radiofrecuencia usa frecuencias ISM; las más utilizadas son las bandas 433 MHz, 900 MHz y 2,4 GHz. Permiten diferentes topografías de comunicación que pueden ser útiles para varias estaciones o para volar varios drones al mismo tiempo. Para este tipo de comunicación existen gran cantidad de módulos, con diferentes características de potencia de transmisión, velocidad de datos en el aire y protocolos de comunicación.

Como parámetro principal de selección, se tuvo en cuenta la capacidad de comunicación a largas distancias; por tal motivo, se descarta la comunicación bluetooth. Igualmente, se descarta la tecnología GSM ya que, a pesar de poder cubrir largas distancias, depende de la intensidad de la señal celular. En cuanto a la velocidad de transferencia de datos, el bluetooth y el radio pueden superar los 200 kb/s, dependiendo de la distancia, a diferencia de la tecnología GPRS que tiene una velocidad mucho menor. Por lo tanto, de acuerdo con la capacidad de velocidad y potencia de transmisión se determina que la tecnología más adecuada es un sistema de radio.

Para la selección del módulo de radio frecuencia más adecuado para la aplicación de comunicación se consideraron: la potencia de transmisión, velocidad de transferencia de datos, rango de transmisión (distancia). En la Tabla 17, se analizaron las características de diferentes módulos de radio.

Tabla 17. Características módulos radio de radio frecuencia.

| Característica | Xbee PRO 900HP | nRF24L01 | Digi Xtend 900MHz | Digi XBee 3 Zigbee 3 Pro |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Frecuencia | 902 - 928 MHz | 2,4 - 2,484 GHz | 900 – 928 MHz | 2.4 GHz |
| Potencia de transmisión | 250 mW (+24 dBm) | 100 mW (+20 dBm) | 100 mW (+30 dBm) | +19 dBm |
| Sensibilidad de recepción | -110 dBm | -90dB | -110 dBm | -103 dBm |
| Velocidad de transmisión de datos RF | 10kbps 200kbps | 250Kbps 1Mbps 2Mbps | 125kbps | 250 Kbps |
| Rango exterior | 14 km (10 kbps) | 100 m | 11 km | 3200 m |
| Voltaje de operación (V) | 2,1-3,6 | 1.9 / 3.6 | 2.8-5.5 | 2.1 - 3.6 |
| Interfaz de datos | UART SPI | UART | UART | UART, SPI, I ² C |

Fuente: (DIGI)

De acuerdo con las características de los módulos, en general, el Digi XBee 3 PRO Zigbee 3.0 es la mejor de las opciones dado que tiene una potencia y velocidad de transmisión intermedia. Además, ofrece ventajas de tamaño (13x19x2 mm) y peso (1.2 g) ideales para cumplir con la función de elevación del mecanismo de aleteo.

El Digi XBee 3 PRO Zigbee 3.0 es dispositivo programable, lo que permite establecer la comunicación bidireccional entre el mecanismo de aleteo y una estación base. Los parámetros de funcionamiento se muestran en la (Tabla 18).

Tabla 18. Características transmisor/receptor de datos XBee 3 PRO Zigbee 3.0

| | |
|--|-----------------------------|
| Voltaje de alimentación | 2.1 – 3.6V |
| Corriente de operación transmisor(max) | 135mA @ 19 dBm |
| Corriente operación (receptor) | 17mA |
| Sensibilidad receptor | -103 dBm |
| Interfaz serial | UART, SPI, I ² C |

Fuente: (DIGI).

Las conexiones del módulo de comunicación inalámbrica se muestran en la Ilustración 61. Por medio de un puerto de comunicación serial se conecta al dispositivo inteligente (microcontrolador), lo que permite comunicar y controlar inalámbricamente el dispositivo a través de este módulo, mientras este recibe y transmite datos. El voltaje para operar es de 3.3 V.

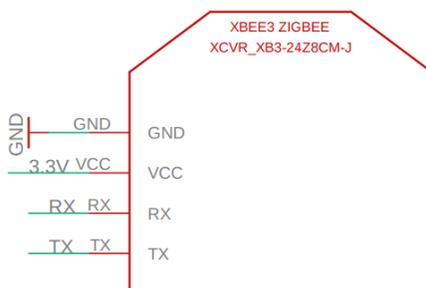


Ilustración 61. Conexiones módulo de comunicación por radio frecuencia Xbee 3 Zigbee Micro. Elaboración propia.

9.2.2.3.2. Sistema de navegación

Sistema de posicionamiento

El mecanismo debe contar con un módulo de tecnología de posicionamiento global que le permita obtener una referencia de localización mientras está en funcionamiento. Para la elección del GPS, se evaluaron tres módulos de localización que normalmente usan micro vehículos aéreos para su ubicación (Ohlckers, Grinde,

& Petricca, 2011). Se compararon características de: dimensiones, consumo energético y la precisión dada por el conjunto de sistemas de navegación por satélite (GNSS) (Tabla 19).

Tabla 19. Características generales módulos GPS usados por micro vehículos aéreos.

| Características | ZED- F9P Módulo GNSS | U- BLOX- ZOE-MB | Teseo- LIV3F | GPS (Nano Hornet ORG1411) |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------|
| Dimensiones (mm) | 17 x 22 x 2,4 | 4,5 x 4,5 x 1 | 9,7 x 10,1 x 2,3 | 10x10x3.8 |
| Consumo energético mínimo | 25mW | 12 mW | 72 mw | ≤ 11mW |
| Precisión | 4GNSS | 3 GNSS | 3 GNSS | 1 GNSS |
| Peso (g) | 4 | 0,04 | 7 | 1,35 |

Fuente: (Electronics- Lab) (U-blox)

De acuerdo a los módulos presentados en la Tabla 19, se realiza una tabla en la cual se evalúan y comparan parámetros de funcionamiento de estos elementos. Se dio una calificación dando un valor a cada uno de estos parámetros, siendo 1 la calificación más baja y 5 la más alta (Tabla 20).

Tabla 20. Comparación características módulos GPS.

| Características | ZED- F9D Módulo GNSS | U- BLOX-ZOE- MB | Teseo- LIV3F | GPS (Nano Hornet ORG1411) |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|---------------------------------|
| Dimensiones | 3 | 5 | 4 | 4 |
| Consumo energético mínimo | 3 | 4 | 2 | 5 |
| Precisión | 5 | 4 | 4 | 3 |
| Peso | 4 | 5 | 3 | 4 |
| Total | 12 | 18 | 13 | 16 |

Fuente: Elaboración propia.

El GPS con mejores características es el U- BLOX-ZOE-MB (Ilustración 62), con un sistema en paquete altamente integrado y ultra-pequeño de dimensiones (4,5 x 4,5 x 1 mm), teniendo en cuenta el tamaño del dispositivo.

Este módulo presenta un equilibrio entre el tamaño, bajo consumo de energía y buen rendimiento haciendo uso del modo Super Efficient (Supe-E). Esta tecnología desarrollada combina un bajo consumo de energía, mientras brinda alta precisión de posicionamiento al combinar una recepción concurrente de hasta 3 GNSS (Posicionamiento por satélite) y la optimización del uso de energía, tamaño portable y desempeño. Adicionalmente, brinda un posicionamiento confiable en condiciones difíciles gracias a que trabaja con una sensibilidad de 167 dBm. Este componente tiene un error de < 2 m. Para tener alta precisión y confiabilidad sobre los datos, se debe tomar varias veces el mismo valor de posición (Hexagon Positioning Intelligence, 2019)

Tabla 21. Características generales GPS (ZOE-M8 series).

| | |
|------------------------------------|-----------------------|
| Voltaje de alimentación: | Min: 2,7 V- Max: 3,6V |
| Consumo de corriente: | 25 mA @ 3,0 V |
| Comunicación Puerto Serial: | UART, SPI, DDC, SQI |

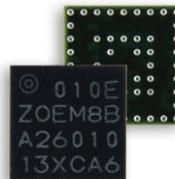


Ilustración 62. Módulo GPS (ZOE-M8 series). Fuente: (Ublox).

Fuente: Elaboración propia.

La conexión del módulo se presenta en la Ilustración 63. El voltaje de alimentación Vcc puede estar en un rango de 1,89 - 3,6 V y se hace uso de un circuito externo para usar el convertor DC/DC incluido en el módulo y alimentar V_CORE. Los pines de transmisión de datos se comunican al microcontrolador por el puerto de comunicación serial con la interfaz UART.

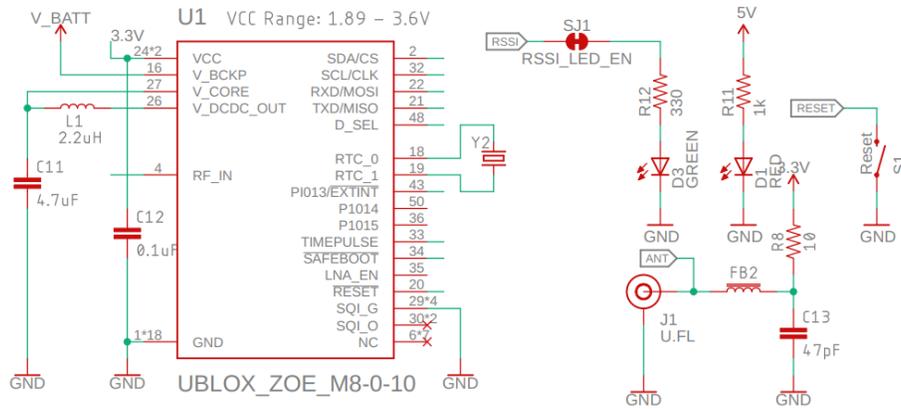


Ilustración 63. Esquema de modulo GPS ZOE-M8. Elaboración propia.

Sistema de navegación inercial

El mecanismo de aleteo debe contar con un dispositivo electrónico que permita obtener mediciones inerciales, como velocidad angular, aceleración lineal y campos magnéticos para así monitorear su posición durante el funcionamiento.

Se realizó la comparación de características generales de IMUs utilizados comúnmente en drones (Ohlckers, Grinde, & Petricca, 2011). Para esto se tienen en cuenta parámetros como los grados de libertad que permiten realizar mediciones más completas de las variables de posición, dimensiones y peso de los IMU (Tabla 22).

Tabla 22. Características generales IMUs comúnmente utilizados para drones.

| Características | MPU6050 IMU | Adafruit 9-DOF IMU Breakout | IMU 10 DOF | Adafruit 10-DOF IMU | TSS Nano |
|--|----------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Grados de libertad (A) Acelerómetro (G) Giroscopio (M) Magnetómetro (P) Sensor de presión | 6 DOF (A,G) | 9 DOF (A,G,M) | 10 DOF (A,G,M,P) | 10 DOF (A,G,M,P) | 9 DOF (A,G,M) |
| Dimensiones (mm) | 25x25x10 | 26 x17x 8 | 17,5x21x7 | 38 x 23 x 3 | 3,8x5,2x1,1 |
| Peso (g) | 2,4 | 2,5 | 2 | 2,8 | 0.01 |

Fuente: (Adafruit) (Vistronica) (Open Impulse).

De acuerdo a los IMUs presentados en la anterior tabla, se hizo una tabla de decisión para la elección del IMU que mejor cumple con los requerimientos de movimiento del dispositivo. Se realizó una calificación dando un valor a cada uno de estos parámetros como se observa en la Tabla 23, siendo 1 la calificación más baja y 5 la más alta.

Tabla 23. Comparación de características generales de IMUs utilizados comúnmente en drones.

| Características | IMU MEMS 3-DOF InertiaCube4™ | Adafruit 9-DOF IMU Breakout | IMU 10 DOF | Adafruit 10-DOF IMU | TSS Nano |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------|----------|
| Grados de libertad | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Dimensiones | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 |
| Peso | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 |
| Total | 10 | 11 | 13 | 11 | 14 |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 23, el elemento con mejores características fue el IMU de 10 grados de libertad TSS Nano (Ilustración 64), cuenta con acelerómetro, giroscopio, compas (sensores triaxiales) y un sensor de temperatura. Es un circuito integrado pequeño y liviano, de alta precisión y bajo consumo. En la Tabla 24, se presentan las características generales de este dispositivo electrónico.

Tabla 24. Características generales IMU.

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| Voltaje de alimentación | de Min: 3.3V- Max: 6V |
| Consumo de corriente | Corriente de operación 20 mA |
| Comunicación | SPI, I2C, serie asíncrona |
| Puerto Serial | |
| Dimensiones | 3.8x5.2x1.1mm |

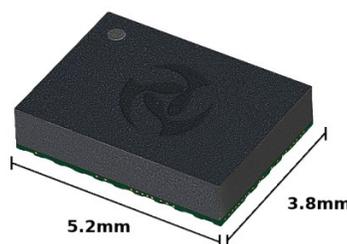


Ilustración 64. IMU TSS Nano. Fuente: (Open Impulse)

Fuente: (Yost Labs, s.f.).

El esquema de conexiones del módulo 3 Space Nano (TSS) se muestra en la Ilustración 65. La comunicación con el microcontrolador se hace con la interfaz de comunicación UART para intercambio de datos (TX, RX) y las interfaces I2C y SPI.

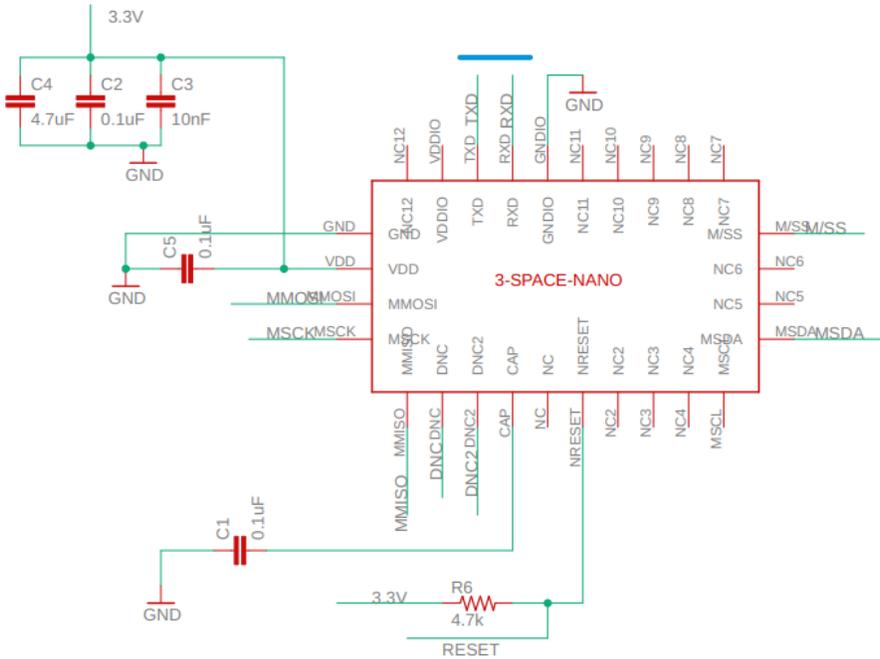


Ilustración 65. Esquema de conexión de módulo para navegación inercial: 3-Space Nano. Elaboración propia.

Sistema de visión (sensor de imagen)

El sistema de visión permite identificar el entorno para trasladarse (al evitar obstáculos) e identificar la flor. Para realizar la selección de del sensor de imagen se tuvieron en cuenta parámetros como la calidad de la imagen y la capacidad de captura.

La calidad de una cámara está dada por la tecnología del tipo de sensor que tenga; estos sensores determinan características tales como: la calidad de la imagen, el rendimiento con poca luz y el tamaño de la cámara. Por tanto, se evaluaron los dos tipos de sensores más utilizados para cámaras digitales. Los sensores CCD (Dispositivo acoplado cargado) y los CMOS (Metal-óxido-semiconductor

complementario). Los CCD ofrecen una calidad de imagen superior a la de los sensores CMOS; sin embargo, esta alternativa presenta un mayor consumo de energía. Con respecto a los sensores CMOS, la mayoría de cámaras usadas en la actualidad presentan este tipo de sensor ya que, consumen menos energía y permiten un procesamiento más rápido (Fernandez Gutierrez 2015).

A continuación (Tabla 25), se muestran diferentes opciones de cámaras utilizadas por micro vehículos aéreos, con sus características de operación.

Tabla 25. Características generales de cámaras utilizadas por micro vehículos aéreos.

| Características | MO-S408 | MO-S588 | MO-S988 | MC900 |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sensor de imagen | 1/4" B/W | 1/4" Color | 1/4" Color | 1/3" |
| Resolución (TV Lines) | 240 | 380 | 380 | 520 |
| Tamaño (mm) | 9 x 9 x 8 | 8 x 8 x 7 | 12 x 12 x 11 | 9.5 x 9.5 x 10 |

Fuente: (MISUMI).

Para la elección de la cámara, se evaluaron diferentes cámaras que utilizaban sensores CMOS. También se tuvieron en cuenta, características como la resolución y el tamaño. Se le dio un valor a cada uno de estos parámetros como se observa en la Tabla 26, siendo 1 la calificación más baja y 5 la más alta.

Tabla 26. Comparación cámaras con sensor CMOS.

| Características | MO-S408 | MO-S588 | MO-S988 | MC900 |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Sensor de imagen | 3 | 4 | 4 | 5 |
| Resolución (TV Lines) | 3 | 4 | 4 | 5 |
| Tamaño | 4 | 5 | 2 | 3 |
| Total | 10 | 13 | 10 | 13 |

Fuente: *Elaboración propia.*

Los resultados muestran que la mejor cámara es la MC900, que sobresale por sus dimensiones, comparada con el resto de las cámaras. Además de tener una

resolución alta y conseguir mayor detalle en la imagen, en conjunto con el sensor de imagen de 1/3" brindado una capacidad de ampliación de la fotografía.

El módulo de cámara y sensor CMOS (Ilustración 66) presentan unas dimensiones de 9.5 x 9.5 x 10 mm. El sensor CMOS le permite operaciones de bajo consumo de energía con un voltaje de operación de 3,6-5 V



Ilustración 66. Módulo de cámara, sensor CMOS. Fuente: (Connecting Buyers with Chinese Suppliers, s.f.)

Los pines de conexión del módulo de la cámara se muestra en la Ilustración 67, con un pin de salida de video de 1 V p-p/ 75 ohm; esta salida se conecta al microcontrolador. El voltaje de operación es de 5 V.

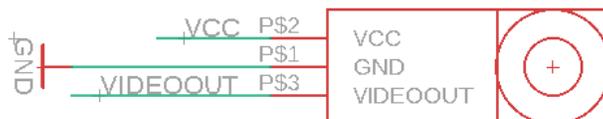


Ilustración 67. Conexiones modulo cámara. Elaboración propia.

9.2.2.3.3. Actuador

El movimiento de aleteo se consigue por medio del movimiento del mecanismo de transmisión, estudiado previamente. Para accionarlo es necesario un actuador que pudiera brindar un torque similar a los resultados obtenidos en la simulación dinámica. Se consideraron los siguientes aspectos para la selección del actuador encargado del movimiento de aleteo: el torque mínimo necesario (0.018 N.m), las RPM necesarias para alcanzar un aleteo de 50 Hz y las características de operación

del motor, dado que este debe estar sometido a un funcionamiento continuo, y no tenga un peso elevado.

Se utilizó un motor sin escobillas, ya que uno de los factores que limitan la velocidad máxima de los motores pequeños de corriente continua es la temperatura (el motor se calienta por la corriente y la fricción), lo que a su vez limita la vida útil de los mismos. Esto no sucede con los motores sin escobillas, estos tienen menor desgaste dado que funcionan a partir de campos magnéticos por lo que los componentes móviles no entran en contacto directo.

De acuerdo a lo anterior se seleccionó un motor sin escobillas pequeño Faulhaber series 0620006B; para una operación continua el motor presenta un torque de 0,28 mNm, con una corriente de 0,3 A. Este motor funciona en conjunto con un engranaje planetario (series 06/1) usado para aumentar el torque; el torque continuo que brinda el reductor es de 25 mNm. Ambos componentes tienen una longitud total de 29,2 mm y un diámetro de 6mm. Para el control de velocidad (ESC) de este motor sin escobillas, se propone utilizar el controlador de series MCBL 3002 P (sugerido por el fabricante), que cumple con los requisitos de funcionamiento del motor al brindar una máxima corriente continua de 2A (Micron radio control, 2019).

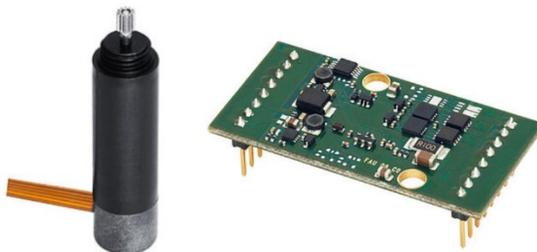


Ilustración 68. Motor sin escobillas y ESC seleccionados. Fuente: (AliExpress)

Se muestra el esquema de conexiones propuesto para el funcionamiento del motor brushless usado para el movimiento del mecanismo de aleteo. El motor se encuentra conectado a un driver ESC (controlador de velocidad) encargado del accionamiento del motor (Ilustración 69).

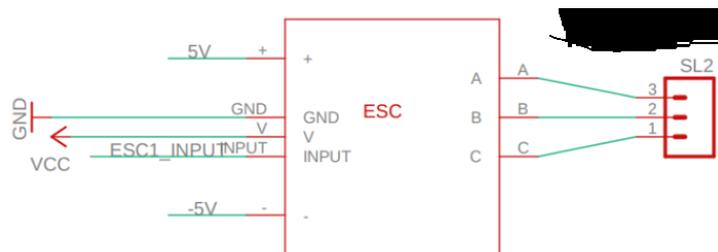


Ilustración 69. Esquema de conexión sección motores del dispositivo. Elaboración propia.

9.2.2.3.4. Sistema de alimentación

De acuerdo con los componentes seleccionados para el sistema electrónico, se determina la potencia total (Tabla 27). Con este valor, es posible hallar el consumo de potencia y así, poder calcular la capacidad de la batería adecuada para un tiempo determinado de funcionamiento autónomo. De acuerdo con los voltajes de operación de los componentes, entre un rango de 2,5V a 5V, se determina que el voltaje de la batería sea de 3.7 V, ya que en el mercado no se encuentran baterías de LiPo de 5V. Por lo tanto, es necesario agregar un elevador de tensión para el adecuado funcionamiento del motor seleccionado.

Tabla 27. Características de funcionamiento y peso de componentes.

| Elementos electrónicos | Consumo de Corriente (A) | Voltaje de alimentación (V) | Potencia (W) | Peso (g) |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|
| Digi XBee 3 Zigbee 3 Pro (2.1 - 3.6V) | 0,04 | 3,6 | 0,144 | 1,2 |
| U- BLOX-ZOE-MB | 0,025 | 1,8 | 0,045 | 0,04 |
| IMU (TSS Nano)(3,3-6V) | 0,02 | 3,6 | 0,072 | 0,01 |
| Cámara (MC900)(3,6-5) | 0,07 | 3,6 | 0,252 | 1 |
| Motor sin escobillas | 1,4 | 5 | 8,4 | 2 |
| ESC | | 4,2 | 0 | 0,7 |
| Regulador y elevador | | | | 0,5 |
| Microcontrolador | 0,14 | 3,6 | 0,504 | 3 |
| Total | 1,695 | | 9,417 | 8,45 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Capacidad de batería de acuerdo a diferentes tiempos de funcionamiento.

| Tiempo de operación (Horas) | Consumo de energía (Wh) | Capacidad de batería 3,7 V (mAh) |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 0,5 | 4,7085 | 636,2837838 |
| 1 | 9,417 | 1272,567568 |
| 1,5 | 14,1255 | 1908,851351 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 29, se presentan diferentes opciones de batería, se tuvieron en cuenta las características de operación de los elementos seleccionados. El consumo de potencia por hora del conjunto de elementos determina la capacidad necesaria de la batería para que el dispositivo pueda operar. Esta capacidad para el funcionamiento del dispositivo, estimada para un tiempo de funcionamiento de 30 minutos, es aproximadamente de 636 mAh (Tabla 28).

Tabla 29. Características generales de baterías LiPo de 3,7V.

| Características batería | Graphene LiPo Battery | Qsimily Li-Po | Tattu - Batería Lipo 1S | GoolMa II Li- Po | Gensace& Tattu Li-Po | Bateria Pila Para Drone Syma | Tattu - Batería Lipo con plug Molex |
|-------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Capacidad | 7,4 V 700 mAh | 7,4 V 1200 mAh | 7,4 V 1200 mAh | 7,4 V 1200 mAh | 7,4 V 1000 mAh | 3,7 V 700mAh | 3.7V 1S 600mAh |
| Dimensiones (mm) | 55x 23,5x 15 | 69x16, 5x 31 | 67x 18,5x 30,3 | 70x 40x 50 | 71,12x13x 36 | 22,86x43 ,18x 6,850 | 41x25 x 9 |
| Peso (g) | 37,6 | 32 | 77 | 70 | 68 | 13 | 16 |
| Capacidad de descarga | 30 C | 30 C | 25 C | 25C | 25 C | 20c | 25C |

Fuente: (Amazon).

Para la elección de la batería, se evaluaron baterías con capacidades de entre 600-1200 mAh (Tabla 29), teniendo en cuenta que baterías con mayor capacidad representan un mayor peso, estas se evalúan de acuerdo a las características de capacidad, dimensiones y peso. Se le dio valor a cada uno de estos parámetros como se observa en la Tabla 30, siendo 1 la calificación más baja y 5 la más alta.

Tabla 30. Elección batería del mecanismo.

| Características | Graphene LiPo Battery | Qsimily Li-Po | Blomiky Li- Po | GoolMall Li- Po | Gensace&Tattu Li-Po | Batería Pila Para Drone Syma | Tattu - Batería Lipo con plug Molex |
|-----------------|-----------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Capacidad | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Dimensiones | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 |
| Peso | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 |
| Total | 11 | 12 | 10 | 8 | 10 | 13 | 12 |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la mejor batería es la *Batería Pila Para Drone Syma*, que sobresale por su menor peso comparado con el resto de las baterías. Además de tener una buena capacidad de consumo de vatios por hora.

El sistema de alimentación, de acuerdo a las condiciones de operación de todos los elementos, cuenta con un elevador, un regulador y una batería. El circuito para el sistema de alimentación se muestra en la Ilustración 70.

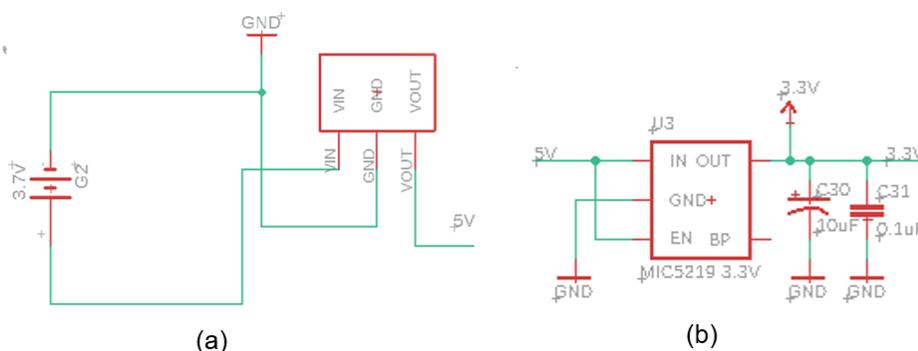


Ilustración 70. Esquema de conexión del sistema de alimentación. (a) Batería de 3,7 V conectada a elevador de 5 V. (b) Conexión convertidor 3,3 V.

9.2.2.3.5. Unidad de procesamiento

Para la elección de la unidad de procesamiento del mecanismo de aleteo para captura de polen, inicialmente se realizó un diagrama de bloques con los componentes electrónicos requeridos (Ilustración 71), para así establecer los

requisitos necesarios que debe tener el microcontrolador. Se tuvieron en cuenta el tipo de interfaz de comunicación, el voltaje de alimentación de cada elemento, la cantidad de sensores y actuadores que se deben controlar, y, los rangos de voltaje de operación de los componentes seleccionados.

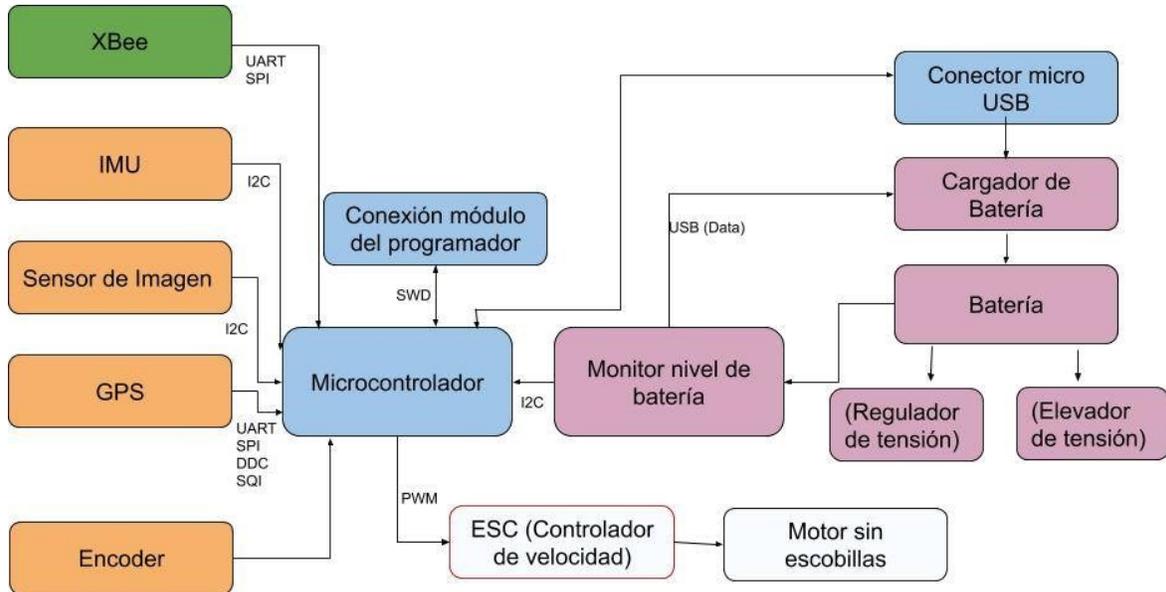


Ilustración 71. Diagrama de bloques y conexión de componentes electrónicos del mecanismo de aleteo. Fuente: Elaboración propia.

También, para la selección de un microcontrolador adecuado, se tuvo en cuenta el funcionamiento del mecanismo de acuerdo a los sistemas que lo componen. El sistema de navegación debe usar los sensores seleccionados para determinar la posición en el espacio, midiendo las coordenadas geodésicas: altitud, longitud y latitud. Además, establecer la posición, el movimiento lineal y el movimiento de rotación respecto a ejes coordenados (X, Y, Z) establecidos del mecanismo. Y, por medio del sensor de imagen conseguir identificar el entorno, y así, el mecanismo se pueda desplazar de acuerdo a la disposición del cultivo y de la ubicación de la flor. Durante el funcionamiento, de acuerdo al estado del mecanismo (mediciones del sistema de navegación), el actuador deberá funcionar para accionar el aleteo y poder generar elevación. El sistema de comunicación durante todo el proceso recibe

o envía datos (monitoreo del mecanismo). De esta manera se consigue cumplir con la función establecida para alcanzar la flor.

Igualmente, se tuvieron en cuenta los tipos de interfaz de comunicación requeridos por los elementos electrónicos que componen el mecanismo: I²C, UART, SIP, DDC, SQT, SWD, PWM y USB.

Con los anteriores aspectos mencionados, que definen los requerimientos técnicos del componente, se seleccionó el microcontrolador con procesador ARM Cortex-M7 (STM32H753BIT6 - MCU) (Ilustración 72) de 32 bits, con un tamaño de 14 x 14 mm que opera a una velocidad de 400 MHz, y una de alimentación de 1,62V a 3,6V. Al combinar la capacidad del procesador con periféricos, este microcontrolador presenta un alto rendimiento, capacidades en tiempo real, procesamiento de señales digitales y funcionamiento de baja potencia y bajo voltaje.

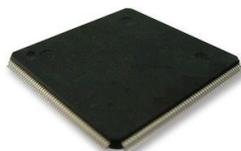


Ilustración 72. Microcontrolador STM32H753BIT6 - MCU, ARM CORTEX-M7. Fuente: (Newark AN AVNET COMPANY)

El microcontrolador se encuentra conectado a los pines de entrada y salida del driver, motor, elementos de navegación, comunicación y alimentación. Este cuenta con circuitos de protección y alimentación (Ilustración 73). En general, el sistema electrónico está conformado por un conjunto de sensores cuyas señales se acondicionarían y procesarían a través de un microcontrolador en el circuito de recolección de datos; un módulo de comunicación inalámbrica que permite enviar los datos del estado de mecanismo durante el proceso de captura de polen. El esquema electrónico completo se muestra en el Anexo 2.

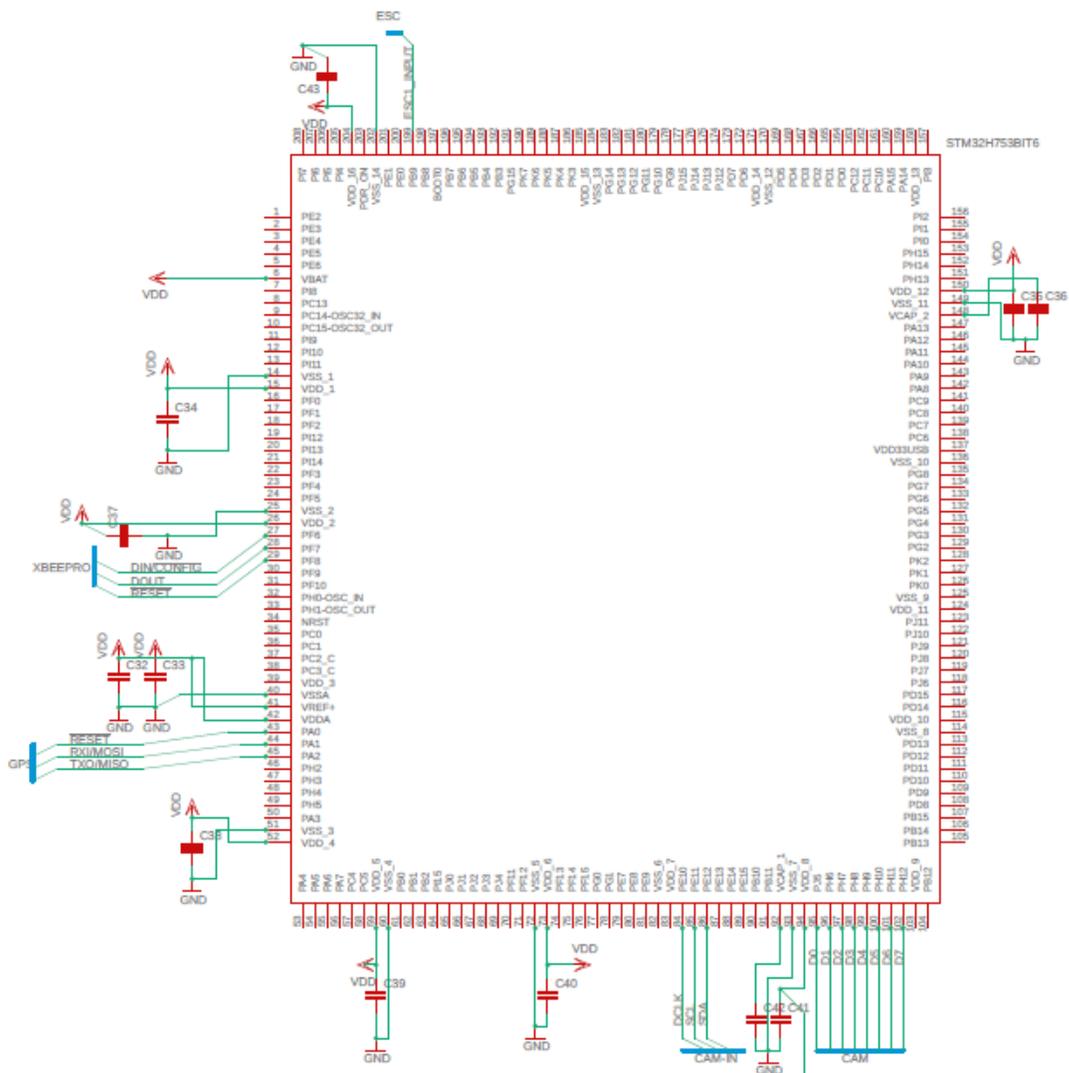


Ilustración 73. Esquema de conexión sección microcontrolador mecanismo de aleteo. Elaboración propia.

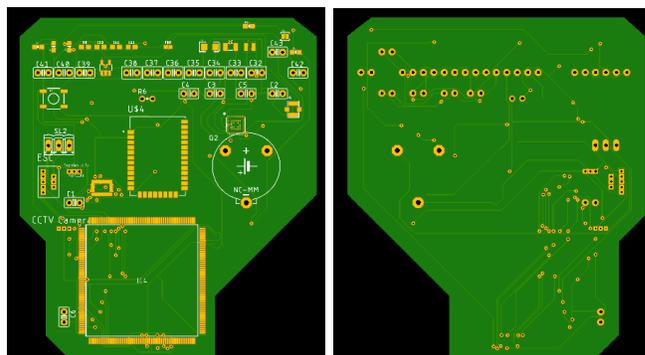


Ilustración 74. Diseño de la placa del circuito impreso: ubicación e interconexión de los componentes electrónicos del mecanismo. Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 74 se muestra el diseño de la placa del circuito impreso donde se evidencia la distribución e interconexión de los componentes. La placa tiene unas dimensiones de 83 de alto y 72 de ancho. En el anexo 3, se encuentra el plano de la PCB diseñada.

9.3.2.5. Cálculos fuerza de elevación

La fuerza de elevación es de gran importancia para el diseño del mecanismo dado que de esta depende que el dispositivo pueda elevar su propio peso.

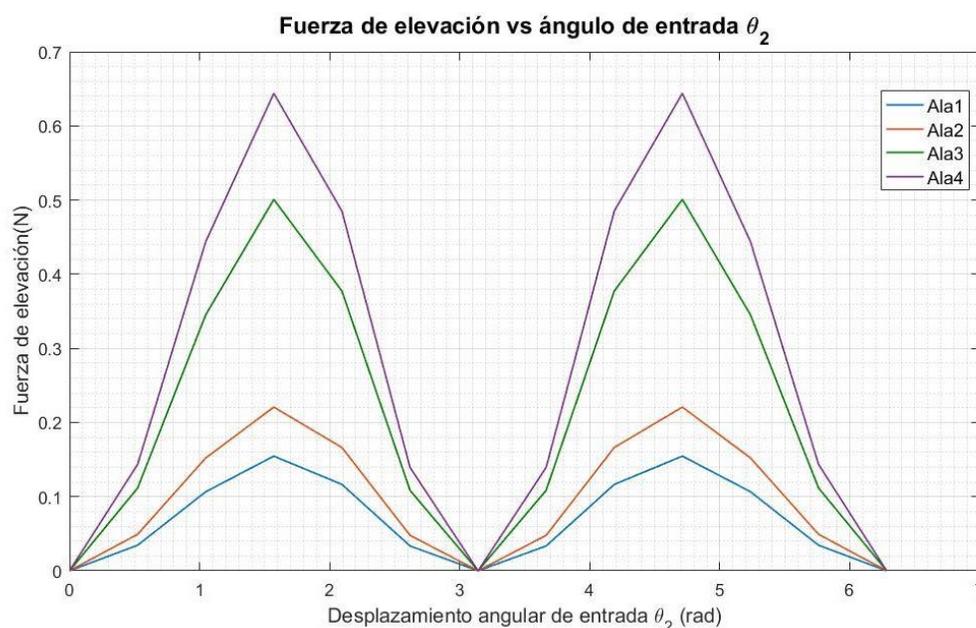


Ilustración 75. Resultado cálculos fuerza de elevación. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se muestra la fuerza de elevación generada por las alas con respecto al desplazamiento angular de entrada del mecanismo, que representa un ciclo de batida. Se genera la máxima elevación en los medios trazos de batida, tanto en el trazo ascendente como en el descendente en donde el colibrí realiza la torsión del ala y genera la mayor fuerza de elevación.

Se evidencia un incremento en la fuerza de elevación en alas con mayor relación de aspecto (mayor longitud de ala). El ala 4 presentó la máxima fuerza de elevación (0.644 N).

9.3.2.6. Medición fuerza de elevación de las alas

En la Ilustración 76, se muestra la comparación de la fuerza de elevación (mN), para las alas construidas a diferentes frecuencias de aleteo.

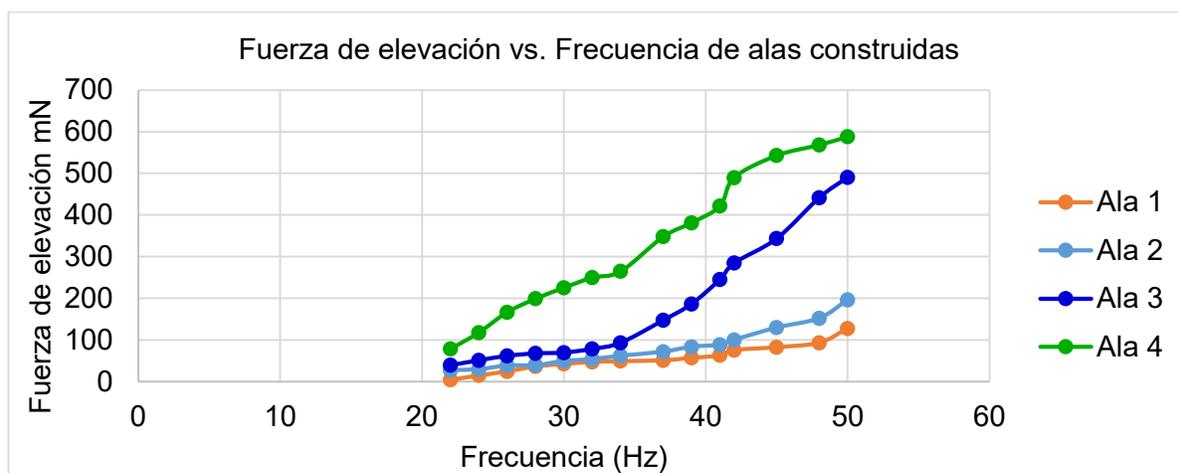


Ilustración 76. Resultados prueba fuerza de elevación para las alas construidas. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que, en general, a medida que aumenta la frecuencia aumenta la fuerza de elevación para las diferentes alas. El ala 1 consigue una fuerza de elevación máxima de 127.53 mN y se evidencian pequeñas variaciones en la fuerza de elevación a medida que se aumenta la frecuencia. A diferencia de las alas 2, 3 y 4 con las que se consigue un empuje máximo de 196.2 mN, 490.5 mN y 588 mN respectivamente, y se observa que, para valores de frecuencia altos, cercanos a los 50 Hz (frecuencia promedio de un colibrí natural), se evidencia un cambio significativo de la fuerza de elevación.

Durante la prueba se observó que el ala 1 se deformaba a altas frecuencias, el ala 2 presentó una leve deformación, mientras que para las alas 3 y 4 no se observó

esta deformación. Esta deformación puede ser consecuencia de la alta flexibilidad que presenta el material y del tamaño de los bordes de ala de las alas 1 y 2; es posible que la diferencia en los resultados de la elevación se haya dado como consecuencia de esta.

9.3.2.7. Diseño mecanismo de aleteo

El diseño CAD del mecanismo de aleteo se muestra en la *Ilustración 77*, con este se consiguió el movimiento de aleteo que impulsa las alas, por medio del accionamiento de un motor brushless. Los planos del mecanismo de aleteo pueden verse en el anexo (4). El mecanismo está compuesto por la unión de los eslabones y una base superior e inferior que le brindan soporte al mecanismo mientras este se encuentra en movimiento.

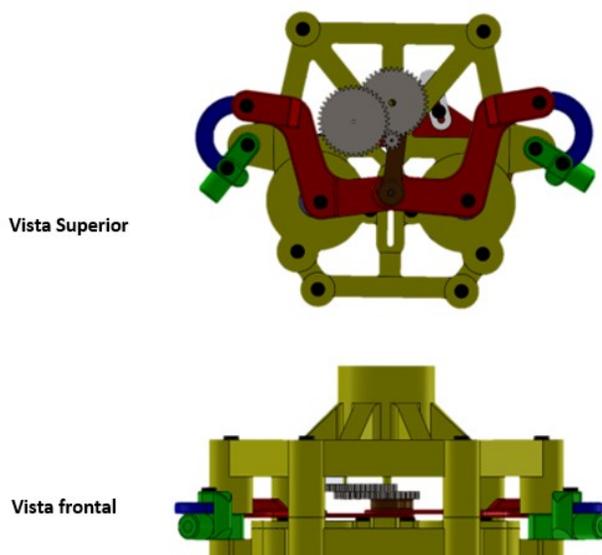


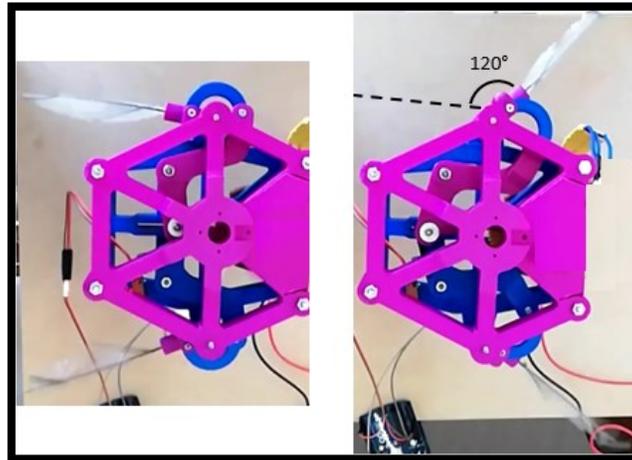
Ilustración 77. Modelo CAD: Detalles sistema de desplazamiento mecanismo de aleteo.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación (*Ilustración 78*), se muestra la construcción del modelo CAD diseñado; construido únicamente con el fin de comprobar el movimiento de transmisión del motor a las alas y la amplitud de batida de estas. Se muestra el mecanismo completo de ambas alas donde el mecanismo biela-manivela se encarga de transmitir el movimiento oscilatorio a cada una (*Ilustración 78 (b)*). Las

posiciones límite del ciclo de batida de las alas demuestran una amplitud de aleteo de 120° (Ilustración 78 (a)).

a)



b)

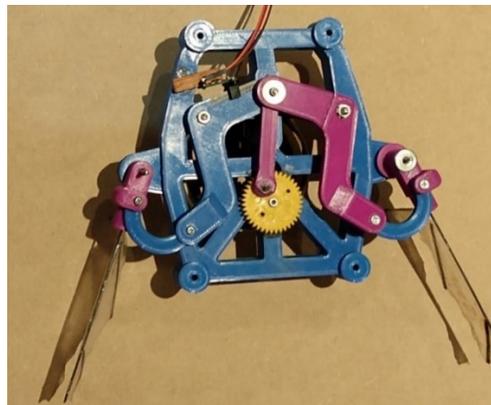


Ilustración 78. Construcción del modelo CAD diseñado: a) Amplitud de batida de las alas. b) Vista parte interna mecanismo (eslabones). Elaboración propia.

9.3. Instrumento de captura de polen

9.3.1. Diseño conceptual

Se determinaron las especificaciones de ingeniería más importantes para el diseño por medio de la casa de la calidad, relacionándolas con los requerimientos establecidos a cumplir para el diseño del instrumento de captura de polen. Los pesos o importancia asignada a cada requerimiento se hicieron de acuerdo a la relación de estos con la función de captura de polen:

1. Los materiales establecidos en el diseño del instrumento sean de bajo costo. (peso= 5, no es determinante para conseguir la captura)
2. El instrumento no genere un daño físico en la estructura de la planta y/o el cultivo. (peso =6 no está involucrado directamente con la captura, pero durante la acción no debe dañar la estructura vegetal)
3. El instrumento de captura de polen debe ser capaz de capturar el polen de la flor de gulupa. (Peso = 9, esta es la función principal).
4. El instrumento no interfiera con el funcionamiento del mecanismo de aleteo: lo obstruya o desestabilice. (peso = 6, no está directamente relacionado con la captura de polen, pero es importante que se acople adecuadamente)

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | Column # | | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------|---------------------|---|--|---|---|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x) | | | | | ▲ | X | ▼ | ▲ | ▲ | ▲ |
| Demedanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | | | | | Uso de elementos de bajo peso o densidad | Distribución de elementos en el dispositivo en el centro del mecanismo de vuelo | Unión desmontable con el mecanismo de vuelo | Capacidad para capturar polen | Facilidad para conseguir el material | Materiales de alta duración (resistente) |
| 1 | 9 | 19,2 | 5,0 | Los materiales establecidos en el diseño del instrumento sean de bajo costo. | | | | | ○ | ○ |
| 2 | 9 | 23,1 | 6,0 | El dispositivo no genere un daño físico en la estructura de la planta y el cultivo. | | | ○ | ○ | | ▲ |
| 3 | 9 | 34,6 | 9,0 | Capacidad del instrumento de capturar polen | ○ | ▲ | ○ | ○ | | |
| 4 | 9 | 23,1 | 6,0 | Las dimensiones del instrumento no afecten al mecanismo de aleteo | ○ | ○ | ○ | ▲ | | ○ |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| Target or Limit Value | | | | | | | | | | |
| Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | 5 | 4 | 6 | 9 | 9 | 5 |
| Max Relationship Value in Column | | | | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Weight / Importance | | | | | 311,5 | 242,3 | 519,2 | 542,3 | 173,1 | 265,4 |
| Relative Weight | | | | | 15,2 | 11,8 | 25,3 | 26,4 | 8,4 | 12,9 |

Ilustración 79. Casa de la calidad para el diseño del instrumento de captura de polen (○ alta relación = 9; ○ relación moderada = 3; ▲ baja relación = 1).

En la Ilustración 79 se muestra la matriz de la casa de la calidad (Anexo 6). Las especificaciones técnicas se escogieron teniendo en cuenta las características necesarias para cumplir con los requerimientos del cliente, en el centro de la matriz

se le asignó un valor de relación a cada aspecto técnico con cada requerimiento de la siguiente manera: ● alta relación = 9; ○ relación moderada = 3; ▲ baja relación = 1.

De acuerdo a los resultados, los dos aspectos técnicos más relevantes a desarrollar fueron los que mayor peso relativo obtuvieron (en la parte inferior): la capacidad de captura de polen y el tipo de unión desmontable.

Estos dos conceptos son los que tienen más puntos de alta relación con los requerimientos. Además, son los dos aspectos que no están correlacionados (se puede ver en la parte superior “techo”) pero estos, por su parte, si se correlacionan con los demás aspectos.

De acuerdo a los requerimientos establecidos para el diseño del instrumento de captura de polen y de las especificaciones a partir de la matriz de la casa de la calidad, se hizo un diagrama de funciones donde se tuvieron en cuenta dos funciones principales: alcanzar la flor (estructura de soporte) y ser capaz de capturar de polen, las funciones desglosadas se muestran en la Ilustración 80.

Para la captura del polen es necesaria la elaboración de un elemento con un material capaz de capturar polen y tocar la flor sin dañarla, lo cual conlleva a dos factores que son el material del elemento y su forma.

La estructura de soporte debe cumplir con las funciones de: llegar a la flor, sostener el elemento de captura y acoplarse en el mecanismo de aleteo.

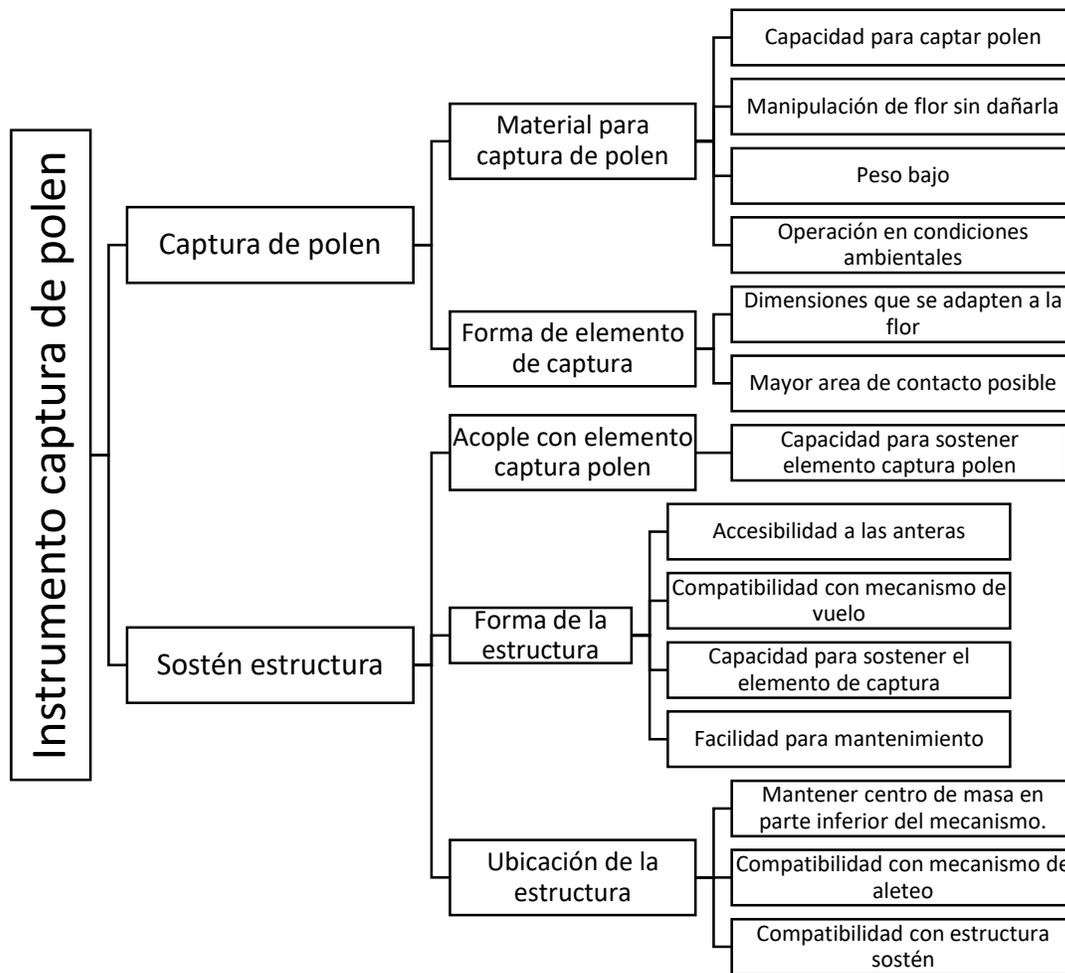


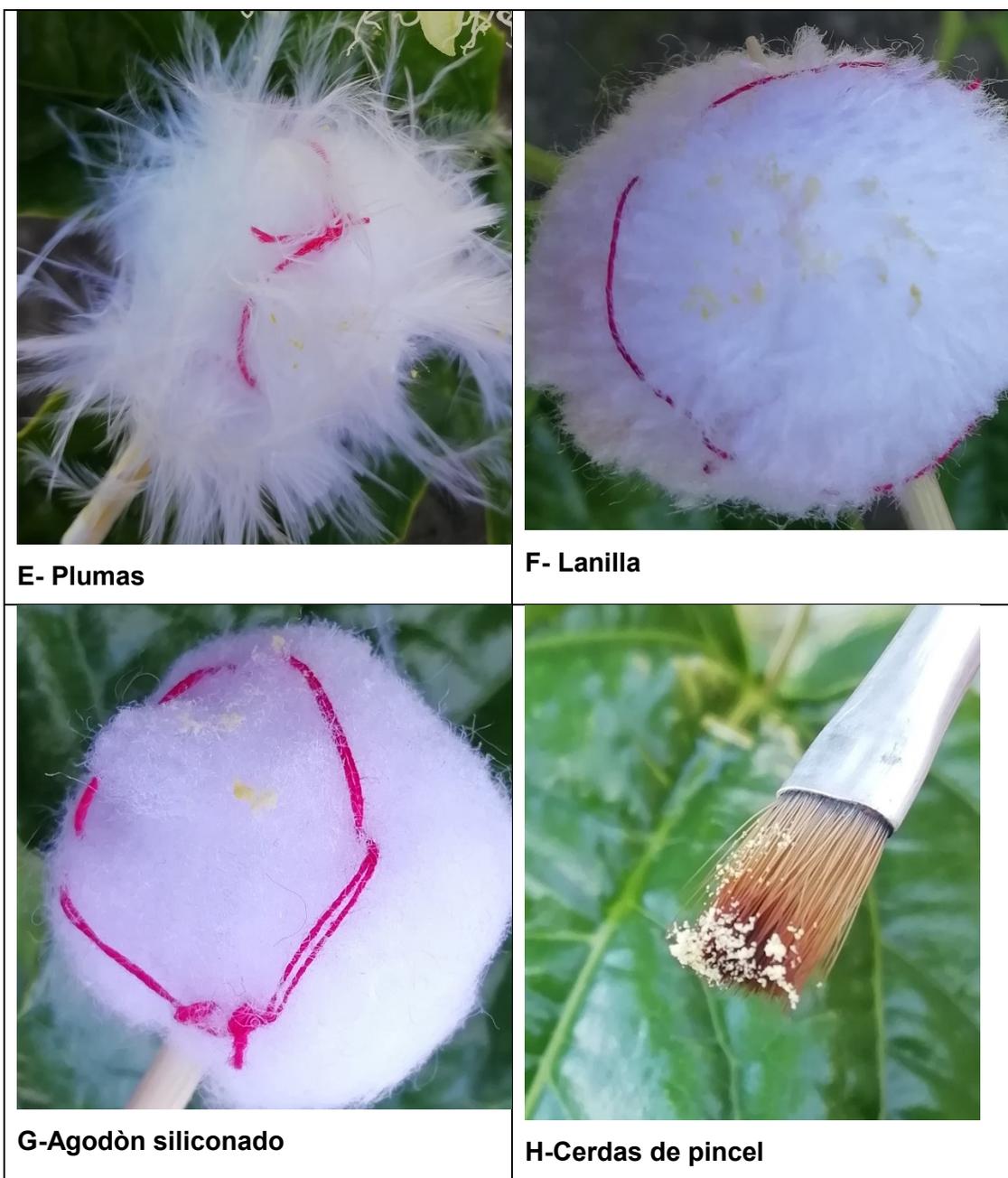
Ilustración 80. Diagrama de funciones del instrumento de polen para generación de conceptos.

9.3.1.1. Prueba de materiales instrumento de captación de polen.

Para empezar el desarrollo del diseño lo primero que se hizo fue estudiar los materiales para determinar el que más polen lograra capturar y la interacción de estos con la flor y la antera. A continuación, se muestra el resultado de la prueba de captura de polen de la flor de gulupa.

Tabla 31. Resultados prueba de captura de polen para los materiales seleccionados.

| | |
|--|---|
|  A close-up photograph of a flower with a red base and yellow center. The flower is covered with a dense layer of white, siliconated cotton fibers and green plastic fibers, which are used for pollen capture. |  A photograph showing a white, fuzzy brush-like material (chenilla) being held against a green leaf. The brush is used to collect pollen from the leaf's surface. |
|  A close-up photograph of a flower with a red base and yellow center. The flower is covered with a dense layer of white, natural cotton fibers, used for pollen capture. |  A close-up photograph of a flower with a red base and yellow center. The flower is covered with a dense layer of white, synthetic wool fibers, used for pollen capture. |
| <p>C- Algodón natural</p> | <p>D- Lana sintética</p> |



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 31 se muestran los resultados de la prueba de captura de polen para los materiales seleccionados. Visualmente el material que mayor cantidad de polen capturó fue el de las cerdas de pincel. Durante la prueba se observó que los materiales algodón natural, algodón siliconado, lanilla y, escobillones o chenilla (materiales C, G, F, B) lograron capturar polen al ponerlos en contacto con la antera

de la flor. Como se observa, el material con plumas (material E) no capturo gran cantidad de polen, además los granos de polen se caían con facilidad después de capturados. La lana sintética (material D) tuvo poca capacidad de adherencia. El algodón siliconado con fibras (material A) capturo polen al contacto con la flor, sin embargo, las fibras dificultaron que el polen se pegara fácilmente al material.

9.3.1.2. Generación de conceptos

La generación de conceptos (Tabla 32) se hace dividiendo por aspectos principales (funciones) y cada una de ellas se subdivide en características del instrumento para cumplir con las función. Todos estos aspectos conforman posibles conceptos para desarrollar.

Tabla 32. Tabla de combinación de conceptos para instrumento de captura de polen para gulupa.

| ELEMENTO DE CAPTURA DE POLEN | | ESTRUCTURA DE SOPORTE (BRAZO) | | |
|---|---|--|--|---|
| Material | Forma | Acople (Unión) a elemento captura polen | Forma | Ubicación |
| Algodón | Esfera material ubicado alrededor de esta. | Sujeción con tornillo , para sujetar el elemento de captura por medio de un alambre dulce unido a este. | Barra recta. | Sección superior Encima de las alas |
| Lanilla | | | | |
| Plumas | | | | |
| Cardas de pincel | Cilindro con material alrededor del cilindro. | Cadena Consiste en el uso de algunas argollas para sostener el elemento de captura. | Barra terminada en forma curva. Punta en forma de J. | Sección media Al nivel de las alas. |
| Escobillones | | | | |
| Algodón siliconado con fibras de plástico | | | | |

| | | | | |
|--|---|---|---|-----------------------|
| | Material ubicado en una dirección (como cerdas de pincel). Plano o redondo. | Consiste en insertar un elemento roscado que permita insertar enroscando el elemento de captura | Barra doblada con ángulo. Conseguir forma recta al final. | Por debajo del aleteo |
|--|---|---|---|-----------------------|

La tabla anterior sirvió como punto de partida para generar conceptos del instrumento de captura de polen. Igualmente, se tuvieron en cuenta los resultados y observaciones de la prueba realizada con los materiales, considerando la estructura, forma y desempeño durante la captura.

Concepto 1: Instrumento de captura con cerdas pincel plano. El elemento de captura consiste en la unión tupida de cerdas de pincel suaves de diferentes longitudes (dispuestas de forma unidireccional) que le permiten moldearse para tener mayor contacto con la antera, además, la suavidad de las cerdas evita que durante el contacto con la flor la dañe y/o genere resistencia al movimiento ascendente para el proceso de captura. Con las cerdas tupidas se consigue que los granos de polen queden atrapados entre estas. Acoplado por unión roscada a una barra recta de soporte. Esta unión permite mantener fijo el elemento con el que se recoge el polen y desmontarlo fácilmente. El elemento de soporte está ubicado en la parte media del mecanismo de aleteo de manera que el movimiento no se vea afectado por la estructura de soporte, así mismo, que los vórtices generados por el aleteo no dispersen los granos de polen.

Concepto 2: Instrumento de captura con escobillón. Este concepto se basa en aprovechar la forma cilíndrica de los escobillones. A lo largo de este se ubican fibras sintéticas entrecruzadas (tupidas) para que los granos de polen queden sujetos en la superficie. El brazo tiene una forma recta al final para facilitar el contacto con la antera. El acople del elemento de captura de polen se hace introduciendo el brazo dentro del escobillón y sujetando ambas piezas con un tornillo. La estructura de

soporte se ubica en el medio del mecanismo al igual que el anterior concepto. Para alcanzar el polen el instrumento se aproxima a la flor desde abajo por un lateral para lograr tocar las anteras por el lado.

Concepto 3: Instrumento de captura con elemento esférico. Este concepto consiste en un elemento de captura con forma esférica de pequeño tamaño para poder tocar la parte inferior de la antera. Se consigue agarrando cerdas sintéticas de pincel con lagunas de diferentes longitudes a una esfera pequeña; las cerdas suaves y tupidas capturan el polen entre los espacios. La esfera se sujeta con una argolla a la estructura de soporte (unión a manera de cadena) consiguiendo un pequeño movimiento libre que le permite adaptarse a la forma de la flor al contacto con esta y tener un leve movimiento que provoca un roce para capturar los granos de polen. La estructura de soporte tiene forma de “J” de tal manera que facilita ubicar el elemento en la parte inferior de la antera y se ubica en la sección inferior del mecanismo dada su forma.

Matriz de Pugh: material para captación de polen

Como criterios que se tuvieron en cuenta para la selección del material se encuentran que la capacidad para capturar polen en las condiciones donde se realiza la prueba de captura, la suavidad y flexibilidad del material, un peso bajo y facilidad para conseguir el material. A cada requerimiento se le otorgó un peso que representa su importancia de 1 a 6, siendo el 6 el requerimiento de mayor relevancia para la selección del material. En la siguiente tabla se puede observar la matriz de decisión de PUG con los requerimientos previamente mencionados, sus respectivos pesos y los conceptos de los materiales a evaluar.

Tabla 33. Matriz pugh: materiales prueba de captura de polen.

| | Relevancia | Materiales para captación de polen | | | | | |
|---|------------|------------------------------------|---------|--------|------------------|--------------|--|
| | | Algodón sintético | Lanilla | Plumas | Cerdas de pincel | Escobillones | Algodón siliconado fibras de plástico |
| Requerimientos El instrumento de captación de polen debe tener en cuenta las dimensiones de la flor de gulupa | 3 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| El material debe de suave y flexible para evitar dañar la flor durante el contacto necesario para la captación del polen. | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| El material deberá ser capaz de captar polen. | 6 | 0 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| El material de captación de polen deberá ser capaz de operar en las condiciones ambientales óptimas del cultivo de gulupa | 5 | 0 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| Facilidad para conseguir el material | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0 | -1 |
| Uso de elementos de bajo peso o densidad | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 |
| Total | | 2 | 4 | 0 | 3 | 3 | -3 |
| Peso | | 5 | 16 | -7 | 16 | 15 | -10 |
| Total - | | 0 | 0 | 3 | 5 | 1 | 0 |
| Total + | | 5 | 6 | 2 | 1 | 1 | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

Los criterios utilizados para la calificación de los materiales fueron las siguientes: Para el requerimiento de dimensiones aquellos materiales que fueron más fáciles de manipular para adaptar a las dimensiones de la flor, reciben el valor máximo, los materiales que necesitan un poco más de manipulación obtienen una nota media y los más difíciles de manipular obtienen la nota más baja.

Para el requerimiento de suavidad y flexibilidad del material, depende de las características físicas del material, aquellos que más suaves y flexibles recibirán una mejor calificación que aquellos más rígidos. El requerimiento del peso bajo,

relacionado con el peso que el mecanismo puede levantar, dio preferencia a los elementos de menor peso sobre los demás.

En lo referente a la facilidad para conseguir el material, los materiales más comunes obtienen la calificación máxima. La lanilla, plumas y algodón son materiales comunes, los escobillones se pueden encontrar en algunos lugares con el mismo material, pero sin ser tan comunes como los elementos anteriores, al tener que ser de un tamaño específico puede ser más difícil encontrar el pincel o en caso dado las cerdas solas para hacer una herramienta nueva, la especificidad del algodón siliconado con fibras de plástico puede implicar que sea difícil de encontrar.

Finalmente, para el requerimiento principal para la selección del material, que es la capacidad del material para captar polen, se les otorgó un mayor valor a aquellos que visualmente fueron capaces de captar mayor polen, un valor medio a los que fueron capaces de captar algo y el valor más bajo a aquellos que no capturaron polen.

La capacidad de captación de polen en las condiciones ambientales se refiere a la capacidad de los materiales para captar polen, este requerimiento se fundamenta en la posibilidad de que los materiales utilizados puedan ser utilizados para capturar polen en condiciones ambientales diferentes o con otro tipo de polen, diferente al de la gulupa.

Como se puede observar los requerimientos de mayor peso son el algodón y las cerdas de pincel, cada uno con un total de 16 puntos. Por lo cual la decisión de qué material se seleccionará para el mecanismo se toma por medio de cuál de estos es capaz de capturar más polen, debido a que este es el requerimiento principal para el material de captura de polen.

Teniendo en cuenta los resultados de la prueba de captura de polen realizada, las cerdas de pincel fue el material que capturó más de polen y contrario a otros, con la ventaja adicional de que este material no absorbió el polen capturado, motivo por el cual se seleccionó este concepto.

Partiendo de la selección de las cerdas de pincel como material para captar polen, se decidió utilizar este material para la selección de cada combinación de conceptos que se crea

Tabla 34. Matriz pugh: determinación de concepto.

| | | Relevancia | Materiales para captación de polen | | | |
|----------------------------|--|------------|------------------------------------|------------|------------|------------|
| | | | Concepto 1 | Concepto 2 | Concepto 3 | Concepto 4 |
| Requerimientos del cliente | Elementos de bajo peso o densidad | 1 | -1 | -1 | 1 | 0 |
| | El instrumento deberá ser capaz de manipular la flor sin dañarla | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | Facilidad para mantenimiento | 2 | 0 | 0 | 1 | -1 |
| | Las dimensiones deberán adaptarse a las de la flor de gulupa | 7 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Se debe ser posible el acceso a las anteras | 6 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | Capacidad para sostener el elemento de captura de polen | 5 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | Debe ser capaz de dar la mayor area de contacto posible | 3 | -1 | 0 | 1 | 1 |
| Total | | | -1 | 0 | 6 | 3 |
| Peso | | | 1 | 4 | 23 | 19 |
| Total - | | | 0 | 0 | 3 | 5 |
| Total + | | | 5 | 6 | 2 | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

9.3.1.3. Diseño instrumento de captura

Teniendo en cuenta que el mecanismo de aleteo debe elevarse hacia la flor y ubicarse frente a esta, el instrumento de captura debe estar a una distancia que permita el aleteo y no dañe la flor mientras hace contacto con las anteras. Para conseguirlo, el diseño del instrumento de captura se realizó por secciones: el elemento de captura de polen, el cual estará en contacto con la flor; la estructura de soporte del elemento de captura y; el soporte del instrumento de captura, que permite el ensamble con el mecanismo de aleteo (Ilustración 81).

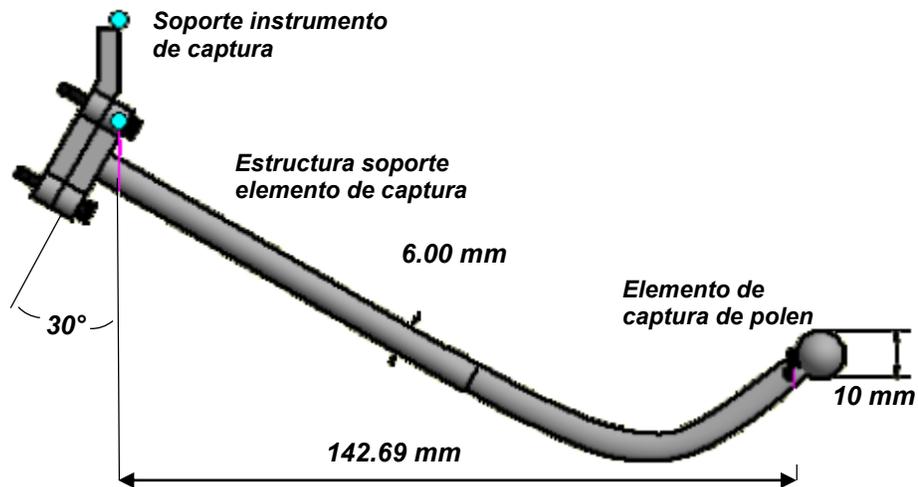


Ilustración 81. Diseño CAD instrumento de captura de polen. Elaboración propia.

La forma del elemento de captura de polen se estableció como una esfera recubierta con cerdas de pincel incrustadas de manera tupida alrededor de la superficie; la esfera tiene un diámetro de 10 mm.

La estructura de soporte se diseña considerando: la longitud de ala (13 mm), el espacio de trabajo de las alas, las dimensiones de la flor (longitud: 40,5-60,5 mm; ancho: 40-50 mm) y del cultivo de gulupa (distancia entre surcos: 2,5 m a 7m). De esta manera, se estableció que la estructura de soporte debe tener una longitud de 142.69 mm y un diámetro de 10 mm.

Se planteó una inclinación de 30° del brazo del instrumento de captura de polen de tal manera que por su forma curveada hacia arriba permitiera rozar la estructura floral con el material de captura (en la punta) y el posicionamiento del dispositivo respecto a la flor. Se utilizó este ángulo de inclinación, ya que, en caso de usar un ángulo de inclinación mayor, el brazo tendría que ser más largo para cumplir con el requerimiento anterior de la distancia mínima del brazo.

Los planos del instrumento de captura se pueden ver en el anexo 7.

9.4. Descripción del dispositivo final

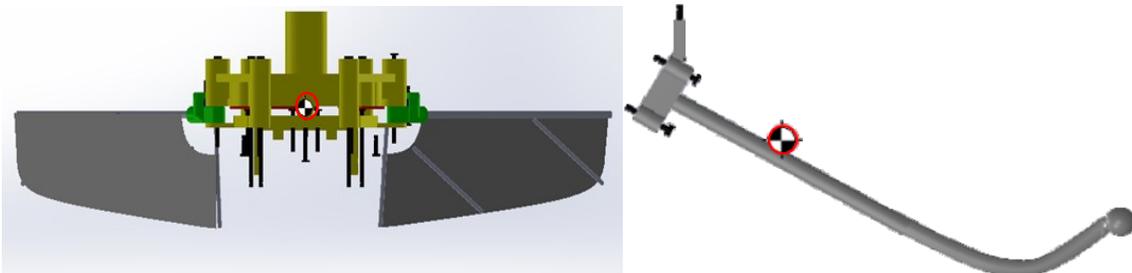
Ensamblaje instrumento de captura de polen y mecanismo de aleteo

Se realizó la integración del instrumento de captura de polen con el mecanismo de aleteo. Para la decisión de la ubicación del instrumento de captura de polen, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

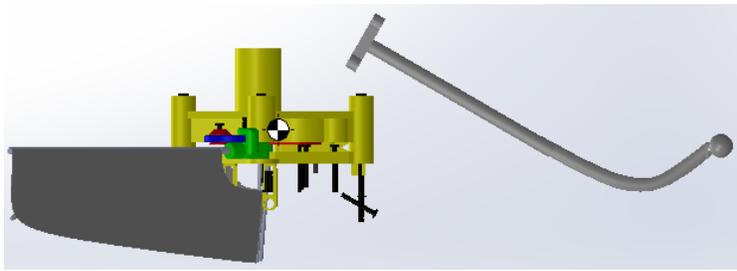
- Apoyo proporcionado por el lugar de ensamble: Ensamblaje en base mecanismo de aleteo para que el instrumento de captura de polen esté fijo a la estructura principal.
- Área que ocupa el aleteo del mecanismo y espacio necesario para un desempeño adecuado del elemento de captura de polen.
- Centro de masa de las estructuras: Para la ubicación del instrumento de captura en la estructura del mecanismo de aleteo se tuvieron en cuenta los centros de masa del mecanismo de aleteo y del instrumento de captura de polen mostrados en la Ilustración 82(a). El material utilizado para el modelado fue polipropileno.

En la Ilustración 82, se observa el cambio de posición del centro de masa de acuerdo a la ubicación del instrumento de captura con respecto al mecanismo de aleteo. Con el fin de tener un equilibrio de fuerzas y un vuelo estable, el centro de masa debe ubicarse debajo de alas, por tanto, la ubicación del instrumento de captura de polen se decidió en la parte inferior.

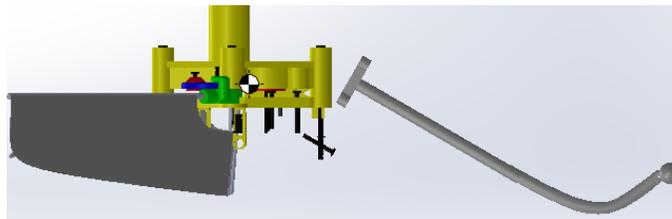
a)



(b)



(c)



(d)

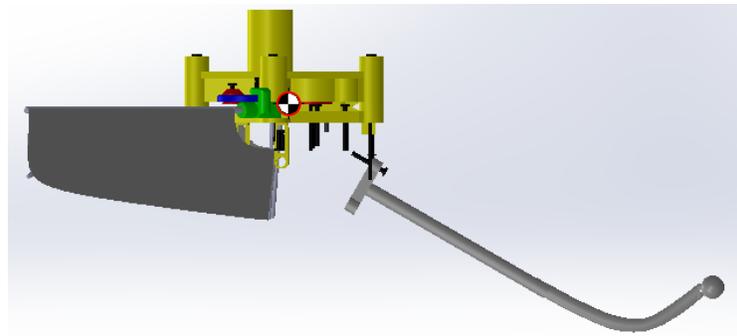


Ilustración 82. Centro de masa para el ensamblaje del instrumento de captura respecto al mecanismo de aleteo. a) Ubicación centro de masa del mecanismo de aleteo e instrumento de captura b) Instrumento de captura ubicado en la parte superior. c) Instrumento de captura ubicado al nivel del mecanismo de aleteo. d) Instrumento de captura ubicado en la parte inferior. Fuente: Elaboración propia.

Se diseñó una carcasa con el propósito de brindar protección y durabilidad a los componentes que integran el mecanismo, se tuvieron en cuenta las dimensiones y área de trabajo del mecanismo de aleteo y del instrumento de captura. La carcasa está dividida en dos secciones para poder abrir y cerrar de modo que sea posible acceder a los componentes internos y realizar mantenimiento. La carcasa presenta unos espacios en los laterales para la ubicación de las alas y con esto permitir el movimiento de aleteo. En la Ilustración 83 se muestra el explosionado del diseño final.

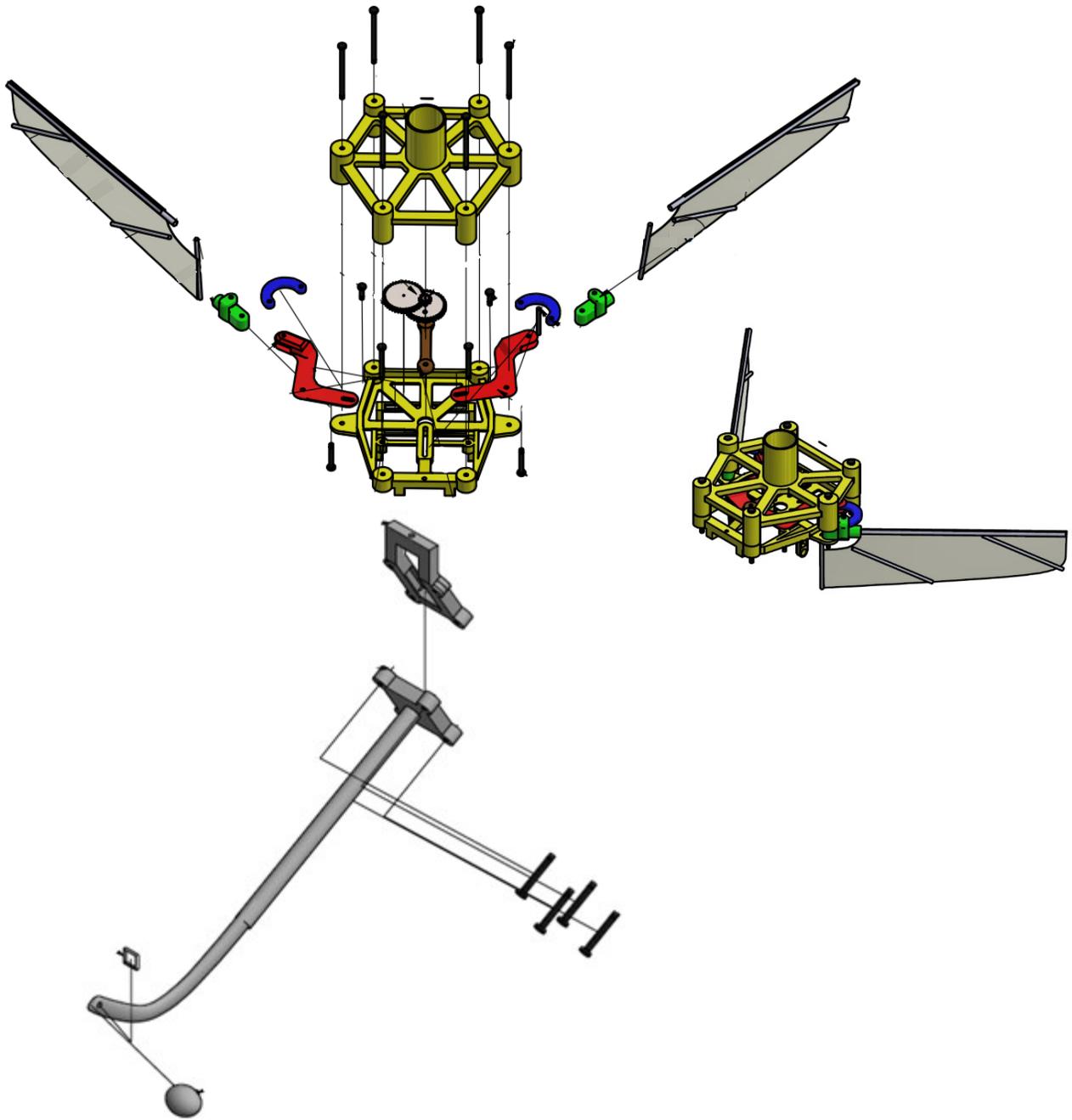


Ilustración 83. Explosionado diseño final mecanismo de aleteo para captura de polen. Elaboración propia.

El mecanismo estará unido por remaches de aleación de aluminio para la sujeción de los eslabones en movimiento y tornillos para la unión de las bases del mecanismo

de aleteo y el ensamble del instrumento de captura con este mecanismo. En la Tabla 35 se encuentran los materiales propuestos para el diseño final.

Tabla 35. Materiales mecanismo de aleteo para captura de polen.

| | Material |
|---|--|
| Alas | Película de poliéster – Aleación de aluminio |
| Piezas mecanismo de aleteo e instrumento de captura de polen | PP- Polipropileno |
| Carcasa | Polipropileno-Mylar |
| Sujeciones | Carcasa: Ensamble a presión. Mecanismo de vuelo: Remaches de aleación de aluminio para tapas del mecanismo de aleteo y tonillos |

Fuente: Elaboración propia.

Se estimó el peso total de los componentes que integran el mecanismo de aleteo para captura de polen y se determinó que el peso total del dispositivo es de 59.81 g, ver Tabla 36.

Tabla 36. Peso componentes del mecanismo de aleteo para captura de polen.

| Componentes | Peso (g) |
|--|-----------------|
| Digi XBee 3 ZigBee 3 Pro | 1.2 |
| GPS (Nano Hornet ORG1411) | 0.04 |
| IMU (TSS Nano) | 0.01 |
| Cámara (MC900) | 1 |
| Motor sin escobillas | 2 |
| ESC | 0,7 |
| Microcontrolador | 3 |
| Regulador-elevador | 0.5 |
| Alas | 1 |
| Batería | 13 |
| Carcasa Estructura mecanismo aleteo e instrumento de captura Elementos de unión (sujetadores) | 37.36 |
| Total | 59.81 |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los pesos de los componentes se establece su ubicación dentro del mecanismo, de tal manera que se consiga una distribución de masa que brinde

estabilidad a este. La batería es uno de los componentes de mayor peso, por tal motivo se ubica en la parte inferior del mecanismo para mantener el centro de masa por debajo de la línea de las alas. Los componentes de menor peso se ubicaron en la parte superior: motor brushless DC y la placa de circuito impreso (Ilustración 84).

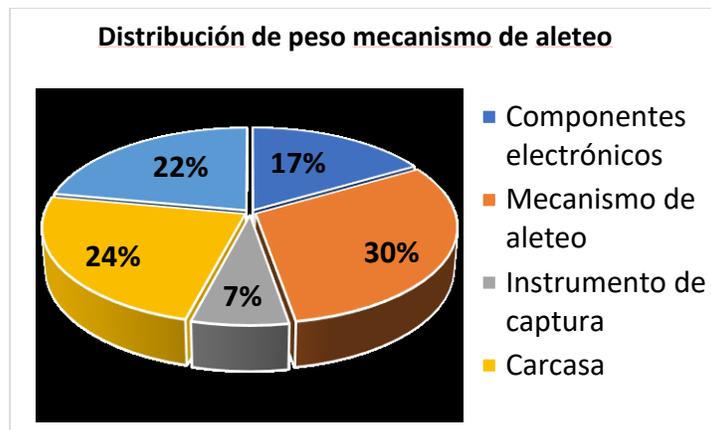
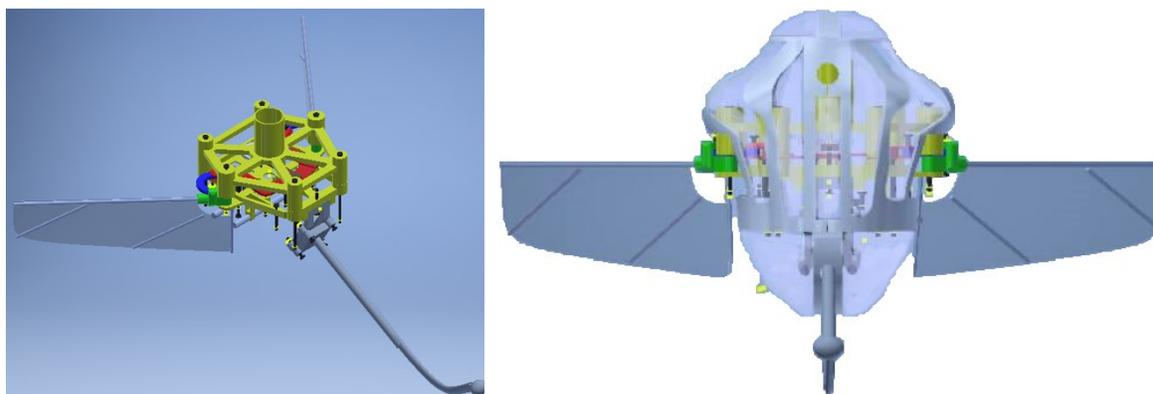


Ilustración 84. Porcentaje peso componentes electrónicos para su distribución en el mecanismo. Elaboración propia.

Finalmente se obtuvo el diseño final del mecanismo con un peso total de 59.81 g, una longitud de alas de 13 cm con una fuerza de elevación de 588mN que consigue elevar el peso del mecanismo completo (Ilustración 85).



Peso total dispositivo \cong 60 g

Longitud de ala 13 cm

Elevación \cong 588mN

Ilustración 85. Diseño mecanismo de aleteo para captura de polen de la flor de gulupa. Elaboración propia.

9.5. Análisis y discusión mecanismo final

El mecanismo de aleteo bioinspirado en el colibrí debe generar fuerza de elevación al agitar las alas con una frecuencia suficiente para vencer la fuerza de gravedad. Para ello se utilizó un mecanismo de transmisión que transforma el movimiento de rotación en un movimiento oscilatorio.

Los resultados del análisis cinemático mostraron que el mecanismo consigue posiciones angulares de alrededor de 120° en el eslabón de salida adecuadas para transmitir el movimiento a las alas, un valor similar a la amplitud de batida de los colibríes de mayor tamaño como *Rufus* o el colibrí gigante; de esta manera, en teoría, conseguir elevación.

La gráfica de velocidad angular del eslabón de salida muestra picos durante el recorrido completo, en ambas mitades del ciclo; los valores de los picos fueron similares. Este movimiento representa la carrera ascendente y descendente del movimiento de batida del ala.

En general, los resultados obtenidos del movimiento, demuestran que el mecanismo puede brindar un aleteo simétrico; es decir, tanto la batida ascendente como descendente genera la misma cantidad de fuerza y por lo tanto puede conseguir elevación.

El ángulo de batida está regido por una onda sinusoidal, la onda de salida que presenta el eslabón r_9 , lo que demuestra similitud con el ángulo de batida que presentan algunos colibríes. Además de un aleteo simétrico, para conseguir elevación, es necesario diseñar un ala teniendo en cuenta tres parámetros principales: frecuencia de aleteo, amplitud de aleteo y velocidad angular, dado que estos maximizan la generación de fuerza de elevación.

A continuación, se relacionan parámetros cinemáticos de las alas probadas (Tabla 37). Para las pruebas, la superficie del ala se aumentó, pero se mantuvo la forma planteada inicialmente.

Tabla 37. Parámetros cinemáticos y aerodinámicos de las alas probadas involucrados en la fuerza de elevación.

| Tipo Ala | Dimensiones (mm) | Área del ala (mm ²) | Frecuencia de Aleteo (Hz) | Carga alar (kg/m ²) | Relación de aspecto | Fuerza Elevación experimental (N) | Fuerza Elevación teórica (N) |
|----------|------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Ala 1 | 90 x 25 x14 | 1803 | 50 | 42.55 | 8.98 | 0.127 | 0.155 |
| Ala 2 | 92 x 33 x 20 | 2533.93 | | 30.27 | 6.68 | 0.196 | 0.221 |
| Ala 3 | 110 x 60 x20 | 4275 | | 17.95 | 5.66 | 0.490 | 0.501 |
| Ala 4 | 130x 36x20 | 3586.63 | | 21.39 | 9.42 | 0.588 | 0.644 |

Elaboración propia.

En la Tabla 37 se observa que a medida que aumenta el área del ala hay un incremento en la fuerza de elevación; esto está relacionado con un valor de relación de aspecto alto, dado que esto permite mayor elevación y poco arrastre.

En lo referente a la geometría del ala, la mayoría de los estudios que buscan geometría de ala óptima para MAVs bioinspirados asumen alas planas y rígidas dado que resultados sugieren que el ala con el mejor rendimiento debería tener bordes delanteros casi rectos con una gran área de superficie exterior. (Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, 2017). Uno de los aspectos geométricos del ala que determina la aerodinámica es la relación de aspecto se define entre la longitud del ala y la línea de cuerda (la distancia entre el borde principal y el posterior) del ala; otra manera de definirla la relación de aspecto es con el cuadrado de la longitud dividido por el área del ala. De acuerdo con la fórmula de relación de aspecto, las alas de alta relación de aspecto tienen envergaduras altas, como por ejemplo los planeadores, mientras que los que tienen aspecto de radio pequeño, las alas pueden ser de corta envergadura o tener una línea de cuerda más gruesa (NASA). En general, las alas con alta relación de aspecto permiten mayor elevación, mientras que las alas que tienen baja relación de aspecto son adecuadas para tener alta maniobrabilidad. Se debe tener en cuenta este aspecto a la hora de modificar las dimensiones del ala, evitando que la envergadura del ala sea muy grande o por el contrario, si el ala es muy ancha se genere un arrastre muy alto.

Adicionalmente, el arrastre inducido depende inversamente de la razón de aspecto; por tanto, un ala con alta relación de aspecto tiene poco arrastre y ligeramente tiene un poco más de elevación que un ala con baja relación de aspecto. Una baja relación de aspecto se refleja en efectos de alta velocidad y en consecuencia en muy baja capacidad de planeo.

Otro aspecto a tener en cuenta es la tendencia general de la variación del ala; se da cuando a medida que aumenta la amplitud de aleteo también lo hace la velocidad media del ala y la fuerza de elevación. Cuando el área del ala y la tendencia general de variación para toda el ala tienden a disminuir al largo de la supinación, la fuerza aerodinámica (que debería alcanzar su punto máximo en los trazos medios) es menor.

De acuerdo a los resultados obtenidos (*Ilustración 75. Resultado cálculos fuerza de elevación. Fuente: Elaboración propia.*), se evidenció que la fuerza de elevación más alta fue producida por el ala de mayor longitud. Esta ala presentó mayor fuerza de sustentación, debido a que las alas con mayor relación de aspecto producen una mayor elevación.

La fuerza de elevación de alas batientes puede ser aproximada a partir de la teoría clásica del modelo cuasi- estable para un ala fija en un flujo constante. Esta teoría supone un ala plana y rígida, y por simplicidad, el centro de presión se sitúa en la mitad de la longitud del ala. De acuerdo con esto, la fuerza de elevación puede ser calculada a partir de la Ecuación 4. Así se puede evidenciar que la fuerza de elevación depende de la geometría del ala, la frecuencia de aleteo y la amplitud del ángulo de batida. Con esta relación es posible demostrar los resultados obtenidos en las pruebas de empuje, ya que el ala con mayor longitud de ala y fabricada con un borde de ala que presenta poca deformación durante el aleteo, es el ala que mostró mayor fuerza de empuje, comparada con el ala de menor tamaño.

El aumento de la frecuencia de aleteo aumenta proporcionalmente la velocidad promedio del ala, lo que resulta en una mayor elevación.

El ala debe ser liviana al mismo tiempo que resistente a la fatiga para poder sostener la carga aerodinámica e inercial repetitiva. Por lo tanto, la elección del material del ala y la geometría del ala juega un papel importante (Nan, Karásek, Lalami, & Preumont, 2017). Por esto, el material elegido para la elaboración de las alas fue el polímero Mylar. Este es un material resistente a las condiciones ambientales y al ser delgado, de alrededor de $10\mu\text{m}$, es adecuado para usarse en este dispositivo que está pensado tener un uso constante en exteriores. Durante las pruebas de funcionamiento, las alas construidas no sufrieron daños debido al movimiento de aleteo continuo, demostrando resistencia y durabilidad. Igualmente, al ser tan delgado no representa una carga de peso significativa para el movimiento del mecanismo.

Tanto la fuerza vertical aerodinámica como la eficiencia mecánica aumentan a medida que el ala tiene el contorno más similar al del colibrí.

10. CONCLUSIONES

El mecanismo construido consigue imitar el aleteo del colibrí dado que con este prototipo se pueden alcanzar valores de frecuencia de aleteo de 50 Hz con una amplitud de salida de 120°.

La generación de fuerza de elevación está relacionada directamente con la velocidad angular y la geometría del ala, suceso observado en la prueba experimental donde hubo un aumento de fuerza de elevación a medida que aumentó la frecuencia de aleteo y la relación de aspecto.

Se comprueba que la fuerza de elevación no está directamente relacionada con el incremento de la superficie alar, dado que, la mayor fuerza de elevación se consiguió con un ala de área superficial media.

Con una deformación pasiva de las alas construidas se consiguió imitar el patrón en forma de ocho del colibrí, y con este, generar fuerza de elevación durante todo el ciclo de batida, que se evidencia con los picos de fuerza ubicados en cada mitad de los ciclos ascendente y descendente.

Se determinó experimentalmente que las fibras de los materiales influyeron significativamente en la captura de polen. Materiales con fibras tupidas, superficie rugosa y en una disposición uniforme, pueden recolectar más cantidad de polen que las fibras entrecruzadas de material absorbente. El material de las cerdas de pincel fue el material que visualmente capturó más polen, material que usualmente es utilizado en la polinización artificial de gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims).

Se sugiere que este mecanismo puede ser implementado para asistencia en la polinización de otras flores de la familia de las *Passifloras* o de flores con características similares, que presenten problemas en la polinización, como es el caso del maracuyá.

11. RECOMENDACIONES

Se sugiere la implementación de un mecanismo de maniobra para complementar el funcionamiento del diseño actual.

Para futuros trabajos se puede reducir el peso, disminuyendo los componentes a bordo del vehículo o realizando una nueva búsqueda de tecnologías más compactas y livianas.

A futuro será necesario la selección de un sistema de control para llevar a cabo de la mejor manera este proceso, se sugiere el uso de un sistema de control digital para evitar agregar más peso al sistema.

Si bien este tipo de tecnología aún no se implementará en campo, es un punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos de tecnologías en cultivos agrícolas. Así mismo, puede servir como alternativa para el proceso de automatización en la polinización artificial.

12. BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de Pinceles para pintar oleo:
<https://comopintarcuadrosconoleo.com/pinceles-para-pintar-al-oleo>
- 3DXTECH. (s.f.). *Amazon*. Obtenido de <https://www.amazon.com/CarbonX-Printing-Filament-3DXTECH-diameter/dp/B00RW2Y3K2>
- Adafruit. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de <https://learn.adafruit.com/adafruit-9-dof-imu-breakout>
- Agro. (2019). *Agronegocios*. Obtenido de <https://www.agronegocios.co/agricultura/la-exportacion-de-gulupa-supero-las-8109-toneladas-2881324>
- Alarcon, F. J. (2015). *Universidad de Málaga*. Obtenido de Universidad de Málaga:
<https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11044>
- AliExpress. (s.f.). Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/RC-hobby-accesorios-micro-motor-sin-escobillas-1-s-1005-7700KV-outrunner-3A-ESC-combo-para/32835276713.html>
- Amazon. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de https://www.amazon.com/Qsmily%C2%AE-1200mAh-Battery-Tarantula-Quadcopter/dp/B01CPGX73S#HLCXComparisonWidget_feature_div
- ANALDEX. (2019). *Comportamiento de la Gulupa – Exportaciones enero-mayo*. Obtenido de ANALDEX: <https://www.analdex.org/wp-content/uploads/2019/07/Exportaciones-gulupa-a-mayo-2019.pdf>
- Anderson, J. D. (2010). *AIRCRAFT PERFORMANCE AND DESIGN*. New Delhi: McGraw Hill.
- Angel Coca, C., Natesparra, G., Ospina Torres, R., Melo Ortiz, C., & Amaya Márquez, M. (2011). Biología floral y reproductiva de la gulupa *Passiflora edulis Sims f. edulis*. *Caldasia*, 33(2).
- Arilla, P. J. (2016). *Identificación Ecológica de Aves (Libro Digital)*. Aves.
- askix.com. (2020). *Diseño de autómatas*. Obtenido de askix.com:
https://www.askix.com/disenio-de-automatas_4.html
- Asociación Nacional de Comercio Exterior. (2018). *Exportación de Gulupa Enero-Agosto 2018*. Dirección de asuntos económicos.
- ASOHOFrucOL. (2018). *BALANCE DEL SECTOR HORTIFRUTICULTURA EN 2018*. Obtenido de ASOHOFrucOL:
http://www.asohofrucol.com.co/imagenes/BALANCE_DEL_SECTOR_HORTIFRUTICULTURA_2018.pdf
- Baptiste, B. (2016). *Agonía de polinizadores, una amenaza para Colombia*. Obtenido de Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt:

<http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/842-agonia-polinizadores>

- Beekman, D. W. (2010). Micro Air Vehicle Endurance vs Battery Size. *The International Society for Optical Engineering*.
- Bernal, J. L. (2012). *Diseño y simulación de un prototipo de prótesis de mano bioinspirada con cinco grados de libertad*. Colombia: Universidad Nacional.
- Berrocal, L. O. (s.f.). Resistencia de materiales 3D.
- BIO-TECH. (s.f.). *BIO-TECH*. Obtenido de <http://www.goecopure.com/biodegradable-hips-plastic.aspx>
- Bukowska, M. (2016). *Business. Innovation. Technology* . Obtenido de Warsaw University of Technology : <https://www.pw.edu.pl/engpw/Research/Business-Innovations-Technology-BIT-of-WUT/B-Droid-a-robot-that-s-busy-as-a-bee>
- Calle, Z., Guariaguata, M., Giraldo, E., & Chará, J. (2010). La producción de maracuyá (*Passiflora edulis*) en Colombia: Perspectivas para la conservación del hábitat a través del servicio de polinización. *Interciencia*, 35(3), 207-212.
- Calle, Z., Guariguata, M. R., Giraldo, E., & Chará, J. (2010). La producción de maracuyá (*Passiflora edulis*) en Colombia: perspectivas para la conservación del hábitat a través del servicio de polinización. . *Interciencia* , 35(3), 207-212.
- Cañas, J. A. (2009). Comportamiento aerodinámico de un dispositivo ahuyenta aves y estudio de campos de viento sobre topografía compleja. *Comportamiento aerodinámico de un dispositivo ahuyenta aves y estudio de campos de viento sobre topografía compleja*. Universidad de Granada.
- Casa de miel. . (s.f.). *Los tipos de Polinización*. Obtenido de Casa de miel. Unidad de valorización de productos agroalimentarios. Area de agricultura, ganadería y pezca.: <http://www.casadelamiel.org/es/los-tipos-de-polinizacion>
- Castilla, J. D. (2019). *LA EXPORTACIÓN DE GULUPA SUPERÓ LAS 8.109 TONELADAS Y 2.013 HECTÁREAS SEMBRADAS*. Agronegocios.
- CATALINA ÁNGEL-COCA, G. N.-P.-T.-M. (2011). BIOLOGÍA FLORAL Y REPRODUCTIVA DE LA GULUPA *PASSIFLORA EDULIS SIMS F. EDULIS*. *Caldasía*, 33(2). doi:10.15446/caldasía
- Cervantes, J. I., & Castillo, H. I. (2013). *Análisis cinemático, diseño y construcción de un primer prototipo de robot autónomo volador* . Hidalgo, Mexico.
- Chang, S. (22 de Marzo de 2017). *Innovative 'Plan Bee' Drone Artificially Pollinates Plants Like a Real Bee*. Obtenido de MY MODERN MET: <https://mymodernmet.com/plan-bee-drone/>
- Chintala, S. K. (2019). *Patente nº WO2019158913A1*.

- Colby, S., RA, H., & JR., S. (1999). Lower limb stability with ACL impairment. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 444-454.
- Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2018). *Iniciativa colombiana de polinizadores*. Obtenido de Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible: http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Planes-para-la-conservacion-y-uso-de-la-biodiversidad/INICIATIVA_COLOMBIANA_DE_POLINIZADORES_-_ICP_2018.pdf
- Connecting Buyers with Chinese Suppliers. (s.f.). *Smallest CMOS Analog Camera Module Car Rearview Camera*. Obtenido de <https://3rdeye-minicam.en.made-in-china.com/product/DXWmonLvYJhV/China-1g-520tvl-Smallest-CMOS-Analog-Camera-Module-Car-Rearview-Camera.html>
- Correa, J. C. (2014). Diseño de una secuencia didáctica para la enseñanza-aprendizaje del concepto de torque a partir de las máquinas simples. Universidad Nacional de Colombia.
- Correa, J. C. (2014). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de DISEÑO DE UNA SECUENCIA DIDÁCTICA PARA LA ENSEÑANA-APRENDIZAJE DEL CONCEPTO DEL TORQUE A PARTIR DE MÁQUINAS SIMPLES: <http://www.bdigital.unal.edu.co/49435/1/Tesis%20torque.pdf>
- Courtney, R. (21 de Marzo de 2019). *New technology explores pollination automation: Israeli tech company working to develop automated pollination*. Obtenido de Good Fruit Grower: <https://www.goodfruit.com/new-technology-explores-pollination-automation/>
- DANE. (2019). *Series históricas de precios mayoristas*. Bogotá: DANE.
- de Croon, G., de Clercq, K., Ruijsink, R., Remes, B., & de Wagter, C. (2009). Design, Aerodynamics, and Vision-Based Control of the Delfly. 1, 71 - 97.
- Defenders of wildlife. (s.f.). *Defenders of wildlife*. Obtenido de Defenders of wildlife: <https://defenders.org/hummingbirds/basic-facts>
- Díaz Cantos, O. (2015). *Drones y su aplicación en materia de seguridad y salud en el trabajo*. Universidad Miguel de Hernández.
- Díaz, J. M. (07 de 2012). *Formentí natura*. Obtenido de Formentí natura: <https://formentinatura.wordpress.com/2012/07/30/colibries-maravillas-de-la-fisiologia-animal-hummingbirds-astonishing-animal-physiology/>
- DIGI. (s.f.). Digi XBee 3 Zigbee 3. <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/2-4-ghz-modules/xbee3-zigbee-3#specifications>.
- EDeconomíaDigital. (13 de Julio de 2017). *Robobee, el mini dron que aspira a reemplazar a las abejas*. Obtenido de EDeconomíaDigital: economydigital.es/tecnologia-y-tendencias/mini-drones-polinizar-abejas_412179_102.html

- Eijiro Miyako, S. A. (2017). Materially Engineered Artificial Pollinators. *Chem CellPress*, 224-239.
- Electronic Inventory Online. (s.f.). Obtenido de <https://www.eio.com/toshiba-tcm8230md-cmos-camera-640x480.html#box-related-product>
- Electronics- Lab. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de <http://www.electronic-lab.com/tiny-gnss-module-by-stmicroelectronics-supports-gps-galileo-glonass-and-beidou/>
- Fallas Vega, J. P. (2016). *Enlace de comunicación para aplicaciones con vehículos aéreos no tripulados*. Cartago.
- FAO. (17 de Mayo de 2018). *Es hora de apreciar la labor de los polinizadores*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura: <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1129811/>
- Fernandez Gutierrez, F. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control asistido para plataforma aérea multirrotor*. Santiago de Chile.
- Festo. (26 de Septiembre de 2014). *Festo*. Obtenido de La empresa Festo: https://www.festo.com/cms/es_corp/14014.htm
- Flores Riatiaga, M. A. (2013). *Evaluación del efecto de la polinización manual en la fecundación de flores y cuaje de frutos en el cultivo de maracuyá (passiflora edulis) en vereda Espinal municipio de los Santos en el departamento de Santander*. Bucaramanga: Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente.
- Franco, G. (2013). *Caracterización fisiológica del fruto de gulupa (Passiflora edulis Sims), en condiciones del Bosque Húmedo Montano Bajo de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- García Álvarez, D. (2008). *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)*. Madrid.
- García García, I. (2017). *Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones*. Valladolid.
- García García, M., Ríos Ozorio, L. A., & Alvares del Castillo, J. (2016). La polinización en los sistemas de producción agrícola: Revisión sistemática de la literatura. *SciELO*, 34(3), 51-66.
- García, D. (2011). Efectos biológicos de la fragmentación de hábitats: nuevas aproximaciones para resolver un viejo problema. *Revista Ecosistemas*, 20(2-3).
- García-Cuevas González, L. M., Carreres Talens, M., & Tiseira Izaguirre, A. O. (s.f.). *Centro de presiones, centro aerodinámico y cuerda media aerodinámica*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/105209/Garc%C3%ADa-Cuevas%3BCarreres%3BTiseira%20-%20Centro%20de%20presiones%2C%20centro%20aerodin%C3%A1mico%20y%20cuerda%20media%20aerodin%C3%A1....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- GEO Tutoriales. (6 de 2 de 2015). *Gestion de calidad*. Obtenido de Qué es la Función de Despliegue de la Calidad (QFD) o Casa de la Calidad: <https://www.gestiondeoperaciones.net/gestion-de-calidad/que-es-la-funcion-de-despliegue-de-la-calidad-qfd-o-casa-de-la-calidad/>
- Gill, F. (1985). Hummingbird Flight speeds. *The academy of natural sciences*.
- González, F. L. (2003). *APLICACION MECANICA MECANISMO BIELA-MANIVELA*. Obtenido de Recursos TIC educación España: http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/Nociones_geometria_analitica/Geome_7.htm
- Gonzalez, V. H., Gonzalez, M. M., & Cuellar, Y. (2009). Notas biológicas y taxonómicas sobre los abejorros del maracuyá del género *Xylocopa* (Hymenoptera: Apidae, Xylocopini) en Colombia. *Acta biológica colombiana*, 14(2), 31-40.
- gsc. (2016). *gsc*. Obtenido de <http://store.gsc-3d.com/Digital-ABS-RGD515-531-535>
- Guerrero López, E., Potosí Guampe, C., Melgarejo, L., & Hoyos Carvajal, L. (2012). *MANEJO AGRONÓMICO DE GULUPA (Passiflora edulis Sims) EN EL MARCO DE LAS BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS (BPA)*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Gutierrez, A. J. (2010). *Transmisión por mecanismo Biela - Manivela*. Obtenido de 358-máquinas: <https://sites.google.com/site/358maquinas/transmision-por-mecanismo-de-biela-manivela>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., & ... Cook, W. M. (2015). Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., & ... Cook, W. M. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science advances*, 1(2).
- Helmer, J. (21 de Agosto de 2018). *The Race to Build a Better Bee*. Obtenido de Daily JASTOR: <https://daily.jstor.org/the-race-to-build-a-better-bee/>
- Hewson, P. (1990). La enseñanza de "Fuerza y Movimiento" como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 157-172.
- Hexagon Positioning Intelligence. (01 de 05 de 2019). *Hexagon Positioning Intelligence*. Obtenido de An Introduction to GNSS: <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/>
- HobbyKing. (s.f.). Obtenido de https://hobbyking.com/en_us/hobbykingtm-hk-5330-ultra-micro-digital-servo-0-17kg-0-04sec-1-9g.html
- Identificación de telas para ropa*. (s.f.). Obtenido de Todo telas: <http://www.todotelas.cl/definicion-telas.htm>
- Izquierdo, M. (2008). *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Madrid: Panamericana.

- Jhon Ocampo Perez, C. M. (2012). Establecimientos y zonas productoras del cultivo de la Gulupa. En J. O. Wyckhuy, *Tecnología para el cultivo de la Gulupa en Colombia* (págs. 33-36). Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Jurkiewicz, W. (21 de 03 de 2017). *Robotic Bee Drones Could Be The Future Of Agriculture*. Obtenido de PSFK: https://www.psfk.com/2017/03/robotic-bee-drones-could-be-the-future-of-agriculture.html?fbclid=IwAR1p-PV9ZnWCzj_U9rsWJgggVsHWn9jFp4MtrzejibLGZ7qzRV-AQu84FC4
- KARÁSEK, M. (2014). *Robotic hummingbird: Design of a control mechanism for a hovering flapping wing micro air vehicle*. Bruselas.
- Keennon, M., & Klingebiel, K. (2012). Development of the nano hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Keennon, M., Klingebiel, K., Won, H., & Andriukov, A. (2012). Development of the Nano Hummingbird: A Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 1-24.
- Kenneth Welch, D. L. (2009). *Fiber type homogeneity of the flight musculature in small birds. Comparative biochemistry and physiology. Part B, Biochemistry & molecular biology*, 324-321.
- Khan Academy. (2018). *¿Qué es el centro de masa?* Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/center-of-mass/a/what-is-center-of-mass>
- Klatt, B. K., Holzschuh, A., Westphal, C., Clough, Y., Smit, I., Pawelzik, E., & Tschardtke, T. (2014). Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *The Royal Society Publishing*, 281(1775).
- Kluser, S., Neumann, P., Chauzat, M. P., Pettis, J. S., Peduzzi, P., Witt, R., . . . Theuri, M. (2010). Global honey bee colony disorders and other threats to insect pollinators. *Université de Genève*.
- Kruyt, J. W., Quicazán Rubio, E. M., Heijst, G., Altshuler, D. L., & Lentink, D. (2014). Hummingbird wing efficacy depends on aspect ratio and compares with helicopter rotors. *The royal society*.
- Las múltiples propiedades del algodón*. (28 de 11 de 2019). Obtenido de Rizobasic: <http://rizobasic.com/rizobasic/las-multiples-propiedades-del-algodon/>
- Lawrence, T. (2015). Pollination and Protecting Bees and Other Pollinators. *Researchgate*.
- Lee, Y. J., Lua, K. B., Lim, T. T., & Yeo, K. S. (2016). A quasi-steady aerodynamic model for flapping flight with improved adaptability. *Bioinspiration & Biomimetics*, 11(3).
- López Cubillos, S., Suarez Castro, F., McDonald Madden, E., Biggs, D., Nates Parra, G., Guitierrez Chacon, C., & Runting, R. (10 de Septiembre de 2019). *Colombia short*

- on political will to protect pollinators.* Obtenido de Nature: <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02680-8>
- López Michelena, A., & Denis Avila, D. (2016). Valor taxonómico de las características morfométricas microscópicas de las plumas en 23 especies de aves rapaces presentes en Cuba. *ResearchGate*.
- López Vásquez, D., & Rodríguez Gómez, I. P. (2017). *Capacidad y Potencial Exportador de la Uchuva, Gulupa, Granadilla y Pitahaya en Colombia: 2012-2016*. Bogotá: Universida del Rosario.
- Lopez, G. L. (2011). Modelo aerodinámico no lineal de alto orden en el vuelo balístico de cuerpos esbeltos. *Dialnet*.
- Mark, L. (2000). *The Physics Factbook*. Obtenido de Frequency Of Hummingbird Wings: <https://hypertextbook.com/facts/2000/MarkLevin.shtml>
- MatWeb. (s.f.). *matweb*. Obtenido de *matweb*: <http://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>
- MatWeb. (s.f.). *matweb*. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=6d8e683a03604f8d9e6d2e40e5e8bdf6&ckck=1>
- Mayntz, M. (04 de 2018). *The Spruce*. Obtenido de The Spruce: <https://www.thespruce.com/how-hummingbirds-fly-386446>
- Medina Gutierrez, J., Ospina Torres, R., & Nates Parra, G. (2012). Efectos de la variación altitudinal sobre la polinización en cultivos de gulupa (*Passiflora edulis* F. *edulis*). *Acta Biológica Colombiana*, 17(2), 379-393.
- MEIXNER, M. (2010). historical review of managed honey bee populations in europe and the united states and the factors that may affect them. *Journal of Invertebrate Pathology*, 103, S80-S95.
- Melgarejo, L. M. (2012). *Ecofisiología del cultivo de la gulupa (Passiflora edulis Sims)*. (L. M. Melgarejo, Ed.) Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- MEseguer, J., Sans, A., Perales, A., & Pindado, J. (2002). Túneles aerodinámicos para aplicaciones de ingeniería civil. *Revista de Obras Publicas*, 35-43.
- Michael Golub, X. G. (2016). 3D Printed ABS and Carbon Fiber Reinforced Polymer Specimens for Engineering. *Rewas*, 281-285.
- Michelson, R. (2010). Overview of micro air vehicle system design and integration issues. *Encyclopedia of aerospace Engineering*.
- Micron radio control. (Abril de 2019). *User Manual of 3A ESC V2.1*. Obtenido de <http://www.micronradiocontrol.co.uk/docs/xq/xp-3a.pdf>

- Miranda , D., Fischer, G., Carranza, C., Magnitskiy, S., Casierra, F., Piedrahíta, W., & Flórez, L. E. (2009). *Cultivo, poscosecha y comercialización de las pasifloráceas en Colombia:maracuyá, granadilla, gulupa y curuba*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas.
- MISUMI. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de http://www.misumi.com.tw/pdf/2007/mo_sxx8.pdf
- Nakata, T., Liu, H., Tanaka, Y., Nishihashi, N., Wang, X., & Sato, A. (2011). Aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping-wing micro air vehicle. *Bioinspiration & Biomimetics*.
- Nan, Y., Karásek, M., Lalami, M. E., & Preumont, A. (2017). Experimental optimization of wing shape for a hummingbird-like flapping wing micro air vehicle. *Bioinspiration and biomimetics*, 12.
- NASA. (s.f.). *Wing geometry definitions*. Recuperado el Abril de 2019, de Glen research center: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/geom.html>
- National Aeronautics and space administration . (s.f.). *Center of pressure*. Obtenido de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/cp.html>
- National Aeronautics ans Space administration. (s.f.). *Aircraft Yaw Motion*. Obtenido de <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/yaw.html>
- Nazly Yolieth Martin-Culma, N. E.-S. (2018). Daño colateral en abejas por la exposición a pesticidas de. *Ciencias agricolas*, 232-240.
- Newark AN AVNET COMPANY. (s.f.). *Newark*. Obtenido de <https://www.newark.com/c/semiconductors-ics/microcontrollers-mcu/16-32-bit-microcontrollers-mcu-arm#>
- Norton, R. (1995). *Diseño de Maquinaria*. Mexico: McGraw Hill. Obtenido de https://www.wikiwand.com/es/Mecanismo_de_cuatro_barras
- NUÑEZ, P. D. (2018). *ESTRATEGIAS DE POLINIZACIÓN EN PASSIFLORAS, ESPECIES: MARACUYÁ, AMARILLO (Passiflora edulis f. flavicarpa), GRANADILLA (Passiflora ligularis Juss) Y GULUPA (Passiflora edulis Sims edulis)*. Bogotá D.C.
- Ocampo Pérez, J., & Wyckhuys, K. (2012). *Tecnología para el cultivo de la gulupa (Passifloraedulis f. edulis Sims) en Colombia*. (C. d. Bio-sistemas, Ed.) Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Ohlckers, P., Grinde, C., & Petricca, L. (2011). Micro- and Nano-Air Vehicles: State of the Art. *International Journal of Aerospace Engineering*.
- Ojada Bustamante, W., Gonzalez Sánchez, A., Mauricio Pérez , A., & Flores Velázquez, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4).

- Open Impulse. (s.f.). *Open Impulse*. Obtenido de <https://www.openimpulse.com/blog/products-page/product-category/10dof-imu-accelerometer-gyroscope-magnetometer-pressure/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2005). *La apicultura y los medios de vida sostenibles*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/3/y5110s/y5110s00.htm#Contents>
- Pantoja, A., Pardo, A., García, A., Saez, A., & Rojas, F. (2014). *Principios y avances sobre polinización como servicio ambiental para la agricultura sostenible en países de Latinoamérica y el Caribe*. Santiago Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Parra, G. N. (19 de Mayo de 2019). *Cambio climático, otra amenaza para las abejas*. Obtenido de Portafolio: <https://www.portafolio.co/tendencias/cambio-climatico-otra-amenaza-para-las-abejas-529713?fbclid=IwAR2Vxmf1zvAWDbapwP9L60PIA2WSeUK6CTDozrsRufyfFHfNt nJWVnO6Kj0>
- Piechocki, J. (2012). *SEDICI*. Obtenido de Estudio de la dinámica del vuelo de un decelerador aerodinámico basado en el concepto de pararrotor: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18371>
- Pinilla Gallego, M., & Nates Parra, G. (2015). Diversidad de visitantes y aproximación al uso de nidos trampa para *Xylocopa* (Hymenoptera: Apidae) en una zona productora de pasifloras en Colombia. *Actualidades biológicas*, 37(103).
- plasticbages industrial, S.L. (s.f.). *CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIPROPILENO*. Obtenido de plasticbages industrial, S.L.: <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspolipropileno.html>
- plasticdream. (s.f.). *Smartfil PP Filamento Polipropileno*. Obtenido de plasticdream: <https://plasticdreams.es/shop/producto/smartfil-pp-filamento-polipropileno/>
- Porter, K. (3 de abril de 2017). *Conoce a Anna Haldewang*. Obtenido de Study Breaks: <https://studybreaks.com/students/anna-haldewang/>
- Portocarrero, M. S. (08 de 2012). *Aves, Ecología y Medio Ambiente*. Obtenido de Asociación para la Investigación y Conservación de la Biodiversidad - AICB: avesecologiamedioambiente
- prospector. (2019). *prospector*. Obtenido de <https://plastics.ulprospector.com/generics/1/ct/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-properties-processing/sp/2>
- RAE. (s.f.). *RAE*. Obtenido de <http://www.wordreference.com/es/en/frames.aspx?es=maniobra>
- Rangel, E. R. (2010). Biomimética: de la naturaleza a la creación humana. *Revista de Cultura Científica*, 4-8.

- Redondo, M. I. (2016). *Diseño y construcción de un vehículo aéreo no tripulado para la teledetección agroforestal*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Relleno de algodón sintético. (s.f.). Obtenido de Espuma del sitio web: <https://www.espumaencasa.es/relleno-algodon-almohadones>
- Requena, A. (2011). *Materiales para la construcción de poliedros*. Obtenido de <https://www.fespm.es/IMG/pdf/poli.pdf>
- Robles Gebauer, S. I. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT VOLADOR BIO-INSPIRADO*. Santiago de Chile.
- Roccia, B. A. (2013). *Desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del vuelo de micro vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Roccia, B. A. (2013). *Desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del vuelo de micro vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Roccia, B., Preidikman, S., & Massa, J. (2010). AERODINÁMICA DE ALAS BATIENTES: INFLUENCIA DEL DESPRENDIMIENTO DE VORTICIDAD DESDE EL BORDE DE ATAQUE. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 15-18.
- RODRIGUEZ, D. (2011). *Evaluación de la presencia de residuos de plaguicidas en miel de abejas provenientes de los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Magdalena y Santander*. Bogotá. Tesis Maestría en: Universidad Nacional de Colombia.
- Roncero, S. E., & Gavilan, F. (2010). Aeronaves y vehículos espaciales. *Aeronaves y vehículos espaciales*. Departamento de ingeniería y mecánica de fluidos.
- Sampietro, L. M. (10 de 06 de 2013). *Physical Team*. Obtenido de G-SE: <https://g-se.com/estabilidad-estatica-y-estabilidad-dinamica-bp-e57cfb26d42edd>
- Science Learning Hub Pokapū Akoranga Pūtaiao. (13 de 09 de 2011). Obtenido de <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/301-wing-loading>
- sd3d. (s.f.). *sd3d*. Obtenido de Technical Data Sheet: https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf
- sd3d. (s.f.). *sd3d*. Obtenido de Tecnicl datasheet: https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-CFPLA_061417.pdf
- Sensor ae. (2018). Obtenido de <https://www.sensorae.com/es/inicio/1732-mini360-regulador-variable-lm2596-475v-23v-a-1v-17v-step-down-buck-converter-dc.html>
- Silveira, M., Abot, A., Nascimento, J., Rodrigues, E., Rodrigues, S., & Puker, A. (2012). Is manual pollination of yellow passion fruit completely dispensable? *Scientia Horticulturae*, 99-103.

- Sridhar Ravi, J. D. (2015). Hummingbird flight stability and control in freestream turbulent winds. . *Journal of Experimental Biology*, 1444-1452.
- Standish, T. (2013). *Geoscience Institute*. Obtenido de El Vuelo de las Aves. ¿Adquirido o Diseñado?: <http://grisa.org/espanol/ciencia-de-los-origenes/ciencia-2010-2014-new/ciencia-de-los-origenes-noviembre-2013-numero-85/el-vuelo-de-las-aves-adquirido-o-disenado/>
- Stratasys. (2008). *Stratasys*. Obtenido de DigitalABS Polyjet Material: <https://www.tth.com/wp-content/uploads/Digital-ABS-Polyjet-Material.pdf>
- Subbaraman, N. (17 de Junio de 2015). *The Boston Globe*. Obtenido de Beta Boston: <http://www.betaboston.com/news/2015/06/17/soft-robotics-octopus-inspired-robot-hands-delicate-enough-to-grasp-a-tomato/>
- Suchoki, H. (2012). *Conceptual Physical Science*. Pearson Education.
- Syngenta. (s.f.). *Polinización*. Obtenido de Polinizadores paisajes multifuncionales: <https://polinizadores.com/polinizacion/>
- Torres Búa, M. (2014). *Mecanismos de transmisión de movimiento*. Obtenido de https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/41_ruedas_de_friccin.html
- Torres Núñez, P. D. (2018). *Estrategias de pinización en Passifloras, especies: maracuyá amarillo (Passiflora edulis f. flavicarpa), granadilla (Passiflora ligularis Juss), y gulupa (Passiflora edulis Sims edulis)*. Bogotá: Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A.
- TV agro. (2015). *B.P.A. en cultivo de gulupa*. Obtenido de nativeproduce: www.nativeproduce.com
- U-blox. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de https://www.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P_ProductSummary_%28UBX-17005151%29.pdf
- Ublox. (s.f.). *Ublox*. Obtenido de <https://www.u-blox.com/en/product/zoe-m8-series>
- Ullman, D. (2010). *The mechanical design process*. Boston: Mcgraw-hill.
- Universidad CESI. (25 de 01 de 2015). Obtenido de Obtenido de http://www.icesi.edu.co/wiki_aves_colombia/tiki-index.php?page=Colibr%C3%AD+Collarejo+-+Florisuga+mellivora
- Universidad Nacional . (s.f.). *Mecanismos* . Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/151/3/62_-_2_Capi_1.pdf
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Iniciativa Colombiana de Polinizadores capítulo Abejas*. (G. Nates Parra, Ed.) Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- Universidad Nacional de Manizales. (10 de Febrero de 2014). *Polinización natural mejora rendimiento de la gulupa*. Obtenido de Eje21: eje21.com.co/2014/02/polinizacion-natural-mejora-rendimiento-de-la-gulupa/?fbclid=IwAR0A_aadISebaNZVmvkyUu5gS6Z9gp0uTJDJtUR-qA8IMqoxIK_EaoD2uyM
- Van der Sluijs, J., & Vaage, N. S. (2016). Pollinators and global food security: the need for holistic global stewardship. *Springer International Publishing*, 1(1), 75-91.
- Vanbergen, A. J., & The Insect Pollinators Initiative. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), 251-259.
- Vera Romero, C. A., Barbosa Jaimes, J. E., & Pabón González, D. C. (2015). Parametros de configuración en módulos Xbee-Pro S2B ZB para medición de variables ambientales. *Tecnura*, 19(45), 141-157.
- Vistronica. (s.f.). Recuperado el 10 de 06 de 2019, de <https://www.vistronica.com/sensores/imu/giroscopio-acelerometro-magnetometro-y-barometro-gy-801-detail.html>
- Wang, L. P., & McCarthy, J. M. (2017). Design of a spatial six-bar flapping mechanism for combined control of swing and pitch. *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- Warrick, D., Hedrick, T., Fernández, M. J., Tobalske, B., & Biewener, A. (2012). Hummingbird flight. *Current Biology*, 22(12), 472-477.
- Warsaw University of Technology. (12 de 2 de 2016). *B-Droid: un robot que está ocupado como una abeja*. Obtenido de Research University: <https://www.pw.edu.pl/engpw/Research/Business-Innovations-Technology-BIT-of-WUT/B-Droid-a-robot-that-s-busy-as-a-bee>
- WHITNEY, J. P. (2010). Aeromechanics of passive rotation in flapping flight. *Journal of Fluid Mechanics*, 660, 197-220.
- Wikstrom, E. A., Tillman, M. D., Smith, A. N., & Borsa, P. A. (2005). A new forceplate technology measure of dynamic postural stability. *Journal of Athletic Training*, 305-309.
- Yost Labs. (s.f.). *3-Space Nano IC*. Obtenido de <https://yostlabs.com/product/3-space-nano/>
- Zhang, Q. (11 de 1 de 2017). *Facial Expressions*. Obtenido de <http://www.garyfaigin.com/faigin-face-blog/facial-expressions-animals-part-3>