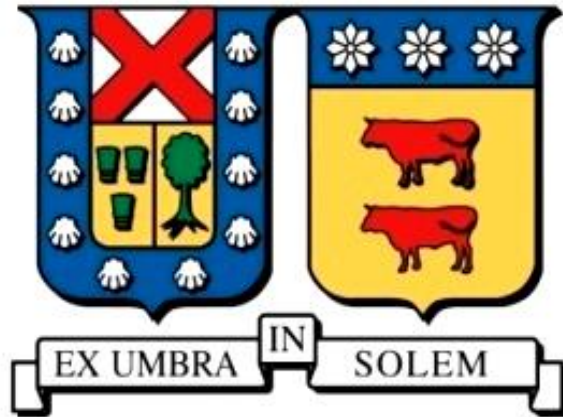


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“DESARROLLO DE UN MODELO PARAMÉTRICO PARA LA
FABRICACIÓN DE DRONES A TRAVÉS DE SISTEMAS DE
MANUFACTURA ADITIVA”**

CRISTOPHER ALEXANDER ROZAS UBILLA
TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSSEN

PROFESOR CORREFERENTE: DR. CHRISTOPHER NIKULIN CHANDÍA

ENERO – 2018

1 Agradecimientos

Viendo a la Universidad como una etapa inicial de consolidación en la educación para posteriormente enfrentarse al, comúnmente llamado, “mundo real”, puedo decir que este proceso fue el mayor reto dentro de la carrera, en donde intenté dar la mejor solución, en cuanto a ética profesional, racionalidad y aplicabilidad, adaptada al contexto país en el que vivimos.

Quiero escribir mis agradecimientos a las personas que me entregaron un aporte en esta etapa para cumplir mis objetivos:

En primera instancia, mis padres, los cuales siempre estuvieron para mi frente a cualquier necesidad y que pese a sentirme siempre un aprovechador de sus vidas, ellos intentan día a día dar lo mejor de sí mismos para que yo y mis hermanos podamos cumplir nuestras metas.

Hermanos, sin su apoyo incondicional, hubiese sido imposible poder avanzar y cruzar cada barrera, apoyándome y siendo partidarios de los procesos internos, qué, aunque más en contra de sus ideales estuve, siempre tuve sus manos de ayuda.

Amigos y amigas, que compartieron los momentos de crecimiento personal más importantes, entregaron la energía, la confianza y la compañía que todos necesitan en el camino.

Profesor guía, que siempre dedicó su tiempo, entendimiento y orientaciones profesionales en los momentos de indecisión para poder cumplir los objetivos propuestos.

Funcionarios del Departamento y la Universidad que me apoyaron en cada momento para ayudarme a solucionar los problemas. Además, me mostraron que el lugar de trabajo es donde te debes mostrar tal cual eres y debes dar lo mejor de ti haciendo lo que realmente te gusta.

A la vida que, en base a las emociones, me hizo madurar el crecimiento y concientizar que en ella todo esfuerzo vale la pena, que la mayoría de los esfuerzos que hagas, no te sentirás beneficiado, incluso a veces perjudicado, pero si no te esfuerzas por lo que quieres y lo que te hace bien, realmente no has tomado el gusto a vivir.

Finalmente, a esas personas que siempre me dijeron que yo era un “weon seco” que le iba a ir la raja, y que aún no me convencen.

Solo me queda decir que el camino recién empieza, y espero sea uno lleno de frutos para poder agradecer de alguna forma a todos los que me apoyaron en el camino, o que simplemente me hicieron ver el mundo con nuevas perspectivas.

2 Resumen

Los últimos avances en la tecnología de manufactura, han permitido la integración de sistemas que incentivan el desarrollo expedito y de bajo costo del prototipado de piezas conceptuales y funcionales para su utilización en los procesos de diseño. Junto con esto, las últimas tecnologías en el desarrollo de aeronaves, han permitido el acceso de esta al mundo civil e industrial, entregando una amplia variedad de utilidades con el fin de capturar información del entorno, como también de transportar cargamento y/o ser utilizado como herramienta para alguna tarea en específico.

Además, la unión de los procesos de diseño y las tecnologías de información permiten el acceso a prototipos para personas que, sin necesariamente tener conocimientos en el desarrollo de modelos 3D en software, puedan realizar la manufactura de piezas funcionales con la posibilidad de modificarlas y adecuarlas a sus propios requerimientos.

En el presente trabajo, se utiliza una metodología de etapas para el desarrollo de un modelo de estructura paramétrica de un Drone dependiente de los equipos que el usuario final desee instalar, utilizando las dimensiones de estos como parámetros que, al ser ingresados en una interfaz gráfica, generan un diseño CAD parametrizado, entregando al usuario la posibilidad de adecuarse a distintos tamaños dependiendo de los requerimientos iniciales. El archivo CAD generado posteriormente, se fabrica con la utilización de tecnología de manufactura aditiva para su posterior anclaje de piezas, entregando la posibilidad de realizar pruebas de vuelo.

En su desarrollo, se muestra un caso de estudio para la parametrización de dos sistemas generales, en donde las variables de diseño dependen de las características específicas de cada subsistema de estudio. Se desarrolla una metodología para la selección del equipamiento a utilizar, en cual se selecciona entregando los parámetros a usar en el futuro diseño.

Finalmente, se propone una opción de aplicación que muestra, en uno de los casos, la necesidad de experimentación para la comprobación de variables y realización de pruebas de vuelo.

Palabras clave: Diseño UAV, Prototipado Rápido, Manufactura avanzada, Rapid Tooling, Diseño Paramétrico

3 Abstract

The last advances in the manufacturing technology has allowed the integration of the systems that encourage a both fast development and low cost on the prototype of conceptual and functional pieces for use them in the design process. Furthermore, the last technology of UAV development has allowed the access of this on the civil and industrial world, giving a wide variety of uses with the purpose of capture the environment information, as well payload transport and/or be used like a tool for some specific tasks.

Further, the union of both design process and information technology allows access to prototype for people that, without knowledge in software development 3D models, can perform functional pieces for manufacturing with the possibility to adjust and adapt to their requirements.

In this work, we use a methodology of steps for the model's development of a parametric structure of a Drone (a method is disclosed, which comprises the development of a parametric model for a Drone's structure) depending of the equipment that the final customer wish to install, using the dimensions of this like parameters that can entering into graphical interface and after will generate a CAD parametric design, give to the customer the possibility to adapt to different dimensions depending of the first requirements. The generation of CAD (.STL file), it's made with the technology of additive manufacturing, doing the pieces anchorage and giving the possibility of performing flying test.

During the development, it shows a case of study the parameterization of two general systems, with the design variables depending of specific characteristic of each subsystem in study. In addition, it's developed a methodology for the selection of equipment to use that to be selected give the parameters to use in the future design.

Finally, is proposed an option of application that show, in one case, the needs of experimentation with both the testing of variables and perform of flying test.

Keywords: UAV Design, Rapid Prototyping, Advanced Manufacturing, Rapid Tooling, Parametric Design

4 Glosario

UAV	:	Vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle)
VTOL	:	Despegue y aterrizaje vertical (Vertical Take-Off Landing)
RPV	:	Vehículo de piloto remoto (Remotely Piloted Vehicle)
CAS	:	Sistemas asistidos por computador (Computer-Aided System)
CAD	:	Diseño asistido por computador (Computer-Aided Design)
CAE	:	Ingeniería Asistida por Computadora (Computer – Aided Engineering)
CBDM	:	Diseño de manufactura basada en la nube (Cloud-Based Design Manufacturing)
FEM	:	Método de Elementos Finitos (Finite Element Method)
CFD	:	Dinámica de Fluidos Computarizado (Computational Fluid Dynamics)
CBM	:	Manufactura basada en la nube (Cloud Based Manufacturing)
RP	:	Prototipado Rápido (Rapid Prototyping)
VP	:	Prototipado Virtual (Virtual Prototyping)
CAM	:	Fabricación Asistida por Computadora (Computer – Aided Manufacturing)
NC	:	Control Numérico (Numerical Controlled)
PWM	:	Modulación por ancho de pulsos (Pulse-Width Modulation), es una técnica utilizada en las señales de voltaje para enviar información o para modificar la cantidad de energía que se envía a una carga.
ESC	:	Controlador Electrónico de Velocidad (Electronic Speed Controller)
BEC	:	Eliminador de Circuito de Batería (Battery Eliminator Circuit)
SLA	:	Estereolitografía (Stereolithography)
SLS	:	Sinterizado Selectivo por Láser (Selective laser sintering)
FDM	:	Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling)
LOM	:	Fabricación de Objetos por Laminado (Laminated Object Manufacturing)
CNC	:	Control Numérico Computarizado (Computer Numerical Control)
PDB	:	Tablero de Distribución de Poder (Power Distribution Board)

5 Índice de contenido

1	AGRADECIMIENTOS	2
2	RESUMEN	3
3	ABSTRACT	4
4	GLOSARIO	5
5	ÍNDICE DE CONTENIDO	6
6	ÍNDICE DE TABLAS	8
7	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	9
8	ÍNDICE DE GRÁFICOS	11
9	INTRODUCCIÓN	12
10	OBJETIVOS.....	15
10.1	OBJETIVO GENERAL.....	15
10.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
11	ALCANCE	16
12	MARCO DE REFERENCIA.....	17
12.1	AERONAVES AÉREAS NO TRIPULADAS	17
12.1.1	<i>Un poco de historia.....</i>	17
12.2	EVOLUCIÓN DEL DISEÑO Y LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA	21
12.2.1	<i>Ingeniería de Diseño.....</i>	21
12.2.2	<i>Sistemas de Manufactura.....</i>	22
12.3	DISEÑO PARAMÉTRICO.....	24
12.4	DRONE COMO UN SISTEMA TÉCNICO	24
13	METODOLOGÍA PROPUESTA.....	26
14	CASO DE ESTUDIO.....	29
14.1	ESTUDIO COMPARATIVO.....	29
14.2	CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA TÉCNICO DRONE.....	31
14.3	CARACTERIZACIÓN DE SUBSISTEMAS DRONE	32
14.3.1	<i>Subsistema de Control</i>	32
14.3.2	<i>Subsistema de Transmisión.....</i>	35
14.3.3	<i>Subsistema de Trabajo</i>	37
14.3.4	<i>Subsistema de Energización</i>	40
14.3.5	<i>Subsistema de Captura/Carga.....</i>	42
14.3.6	<i>Subsistema de Soporte.....</i>	43
14.4	VARIABLES PARA SELECCIÓN DE EQUIPOS	44
14.4.1	<i>Variables para la selección de equipos en ala</i>	45

14.4.2	<i>Variables para la selección de equipos en base</i>	<i>48</i>
14.5	SELECCIÓN DE EQUIPOS DRONE	48
14.5.1	<i>Selección de equipos en ala</i>	<i>48</i>
14.5.2	<i>Selección de equipos en base</i>	<i>49</i>
14.6	REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS PARA DISEÑO CONCEPTUAL	50
14.6.1	<i>Características para diseño de ala.....</i>	<i>50</i>
14.6.2	<i>Características para diseño de base.....</i>	<i>51</i>
14.7	DESARROLLO DE MODELO CAD	51
14.8	PARAMETRIZACIÓN	53
14.9	APLICACIÓN COMPUTACIONAL ASISTIDA	53
14.9.1	<i>Funcionamiento de interfaz de usuario.....</i>	<i>54</i>
14.10	PROTOTIPO ASISTIDO POR COMPUTADOR.....	56
14.10.1	<i>Anclaje de piezas y prototipo final.....</i>	<i>58</i>
15	OPCIÓN DE APLICACIÓN.....	62
16	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	65
17	REFERENCIAS	67
18	ANEXOS.....	69
18.1	GLOSARIO ESTUDIO COMPARATIVO	69
18.2	ESTIMACIÓN TEÓRICA DE POTENCIA EFECTIVA.....	70
18.3	ESTIMACIÓN TEÓRICA DEL DIÁMETRO DE HÉLICE.....	72
18.4	SELECCIÓN DE HÉLICES SEGÚN RECOMENDACIONES DE FABRICANTES	73
18.5	EQUIPOS PARA MONTAJE EN ESTRUCTURA	74
18.6	CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO	77
18.7	CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES PARA ULTIMAKER 2+.....	78
18.8	REQUERIMIENTOS DIMENSIONALES DE DISEÑO CONCEPTUAL.....	80
18.9	INFORMACIÓN TÉCNICA ULTIMAKER 2+	81
18.10	COTIZACIONES.....	84

6 Índice de tablas

TABLA 1: RESUMEN DE ESTUDIO COMPARATIVO REALIZADO PARA EVALUACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE DISEÑO DE DRONES. ELABORACIÓN PROPIA.....	30
TABLA 2: VALORES DE KV SEGÚN EL VIENTO QUE SOPORTARÁ EN VUELO EL DRONE.	46
TABLA 3: VALORES ESTIMADOS EN SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA AMBOS MONTAJES.	49
TABLA 4: CANTIDAD DE MATERIAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE DRONE.	57
TABLA 5: CANTIDAD DE MATERIAL UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE DRONE, POSTERIOR A MODIFICACIONES.	61
TABLA 6: GLOSARIO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO COMPARATIVO DE DRONES.....	69
TABLA 7: EQUIPOS A MONTAR EN ALAS DE ESTRUCTURA DRONE. MONTAJE 1.	74
TABLA 8: EQUIPOS A INSTALAR EN ALAS DE ESTRUCTURA DRONE. MONTAJE 2.	75
TABLA 9: EQUIPOS A INSTALAR EN BASE DE AMBOS MONTAJES.....	76
TABLA 10: CARACTERÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE MATERIALES A UTILIZAR EN LA MANUFACTURA DEL PROTOTIPO. INFORMACIÓN DE ENTREGADA POR ULTIMAKER.....	79
TABLA 11: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE POSIBLES MATERIALES A UTILIZAR EN LA MANUFACTURA DEL PROTOTIPO. INFORMACIÓN DE CARTAS TÉCNICAS ENTREGADAS POR ULTIMAKER.....	79
TABLA 12: REQUERIMIENTOS DIMENSIONALES PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL DRONE.	80

7 Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: AEROPLANO HEWITT SPERRY (IZQUIERDA) Y KETTERING BUG (DERECHA), AMBOS PROYECTOS DESARROLLADOS COMO MISILES AÉREOS CON CONTROL PREESTABLECIDO Y SIN PILOTAJE HUMANO DURANTE LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL (1914-1918).....	18
ILUSTRACIÓN 2: AERONAVES TIPO LIGHTNING BUGS UTILIZADAS EN MODO ESPIONAJE DURANTE LA GUERRA DE VIETNAM.....	18
ILUSTRACIÓN 3: MODELOS DE AERONAVES NO TRIPULADAS, AQUILA RPV A LA IZQUIERDA, PRAEIRE AL CENTRO Y FIREBEE A LA DERECHA.	19
ILUSTRACIÓN 4: AERONAVES NO TRIPULADAS, MODELO MQ 1 PREDATOR A LA IZQUIERDA Y MQ 9 REAPER A LA DERECHA.	20
ILUSTRACIÓN 5: DISEÑOS DE DRONES ACTUALES, MODELO QUADCOPTER.	20
ILUSTRACIÓN 6: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR. FUENTE: "CLOUD-BASED DESIGN AND MANUFACTURING: A NEW PARADIGM IN DIGITAL MANUFACTURING AND DESIGN INNOVATION".....	22
ILUSTRACIÓN 7: EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA Y ENFOQUES DE DESARROLLO. FUENTE: "CLOUD-BASED DESIGN AND MANUFACTURING: A NEW PARADIGM IN DIGITAL MANUFACTURING AND DESIGN INNOVATION".....	23
ILUSTRACIÓN 8: DRONE COMO UN SISTEMA TÉCNICO.....	25
ILUSTRACIÓN 9: DRONE COMO UN SISTEMA TÉCNICO.....	25
ILUSTRACIÓN 10: SUBSISTEMAS DE DRONE, REPRESENTADOS SEGÚN PRIMERA LEY TRIZ DE INTEGRACIÓN DE PARTES DE UN SISTEMA TECNOLÓGICO.....	31
ILUSTRACIÓN 11: METODOLOGÍA PROCESO DE DISEÑO UAV.....	28
ILUSTRACIÓN 12: DISTINTOS DISPOSITIVOS PARA CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DEL DRONE, IMÁGENES DE DRONERUSH.COM.	33
ILUSTRACIÓN 13: TECHBOY TB-802, CONTROL REMOTO MANUAL CON GIROSCOPIO.	33
ILUSTRACIÓN 14: RECEPTORES DE SEÑAL DE DRONES, IMAGEN DE JOYPLANES RC.	34
ILUSTRACIÓN 15: PLACAS RASPBERRY PI 3 Y ARDUINO, DE IZQUIERDA A DERECHA.....	34
ILUSTRACIÓN 16: ALGUNAS CONTROLADORAS DE VUELO, DE IZQUIERDA A DERECHA APM, PIXHAWK Y NAZA, UNAS DE LAS MÁS USADAS SEGÚN DESARROLLADORES.....	35
ILUSTRACIÓN 17: EJEMPLO DE ESC, MARCA TURNIGY MULTISTAR 32BIT 30 ^a 2~4S (OPTO).....	37
ILUSTRACIÓN 18: PDB CON CUATRO CONEXIONES A ESC.	36
ILUSTRACIÓN 19: FUNCIONAMIENTO DE MOTORES BRUSHED Y BRUSHLESS DC. IMAGEN DE APRENDIENDOARDUINO.COM.....	38
ILUSTRACIÓN 20: DISPOSICIÓN ELECTROIMANES EN MOTORES INRUNNER Y OUTRUNNER, IMAGEN DE ELECRONOOBS.COM.....	39
ILUSTRACIÓN 21: ESQUEMA DE GIRO DE HÉLICES MONTADAS EN LAS ALAS DEL QUAD.....	40
ILUSTRACIÓN 22: EJEMPLO DE BATERÍA LI-PO MARCA TURNIGY 2200 MAH 3S 40C.....	41
ILUSTRACIÓN 23: EJEMPLO DE CONECTOR XT60, MACHO Y HEMBRA PARA BATERÍA LI-PO.	42
ILUSTRACIÓN 24: CONFIGURACIONES DE MODELOS QUAD EN "X", "+" Y "H", DE IZQUIERDA A DERECHA...	43
ILUSTRACIÓN 25: DEPENDENCIA DE SUBSISTEMAS DE DRONE, INFLUENCIA EN DISEÑO DE ESTRUCTURA...	45
ILUSTRACIÓN 26: ERLE-BRAIN3 CON GPS INCLUIDO. IMAGEN DE ERLERBOTICS.COM.	50
ILUSTRACIÓN 27: IMAGEN DISEÑO CAD DE ALAS Y BASE DE DRONE PARAMÉTRICO.....	52
ILUSTRACIÓN 28: IMAGEN DE CONJUNTO DE PIEZAS DISEÑADAS EN CAD PARA EL DRONE PARAMÉTRICO..	52

ILUSTRACIÓN 29: INFLUENCIAS DE DIMENSIONES INGRESADAS POR EL USUARIO EN EL DISEÑO DEL MODELO CAD.....	54
ILUSTRACIÓN 30: VENTANA PRINCIPAL DE INTERFAZ DE USUARIO.	55
ILUSTRACIÓN 31: VENTANA PARA EL INGRESO DE VARIABLES E IMÁGENES DE INFLUENCIA EN EL DISEÑO..	55
ILUSTRACIÓN 32: DISEÑO FINAL DE ALA DRONE PARA CASO DE ESTUDIO.	58
ILUSTRACIÓN 33: DISEÑO FINAL DE BASE DRONE PARA CASO DE ESTUDIO.	58
ILUSTRACIÓN 34: DISEÑO FINAL SOPORTES UNIDAD DE CONTROL DRONE PARA CASO DE ESTUDIO.	59
ILUSTRACIÓN 35: DISEÑO FINAL SOPORTES CONJUNTO DRONE PARA CASO DE ESTUDIO.	59
ILUSTRACIÓN 36: DISEÑO FINAL SISTEMA DRONE PARA CASO DE ESTUDIO.....	60
ILUSTRACIÓN 37: DIAGRAMA DE FLUJO PARA APLICACIÓN PERSONA A Y PERSONA B.....	64
ILUSTRACIÓN 38: REPRESENTACIÓN DE UNA SUPERFICIE DE CONTROL DE UNA HÉLICE.	70
ILUSTRACIÓN 39: SELECCIÓN DE HÉLICE PARA MONTAJE 1.....	73
ILUSTRACIÓN 40: SELECCIÓN DE HÉLICE PARA MONTAJE 2.....	73
ILUSTRACIÓN 41: CONSIDERACIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DEL DRONE.	77
ILUSTRACIÓN 42: INFORMACIÓN TÉCNICA DE ULTIMAKER 2+. MAYOR INFORMACIÓN EN WWW.ULTIMAKER.COM.	83
ILUSTRACIÓN 43: COTIZACIÓN DE EQUIPOS A MONTAR EN ALA MONTAJE 1. WWW.GETFPV.COM.	84
ILUSTRACIÓN 44: COTIZACIÓN DE EQUIPOS A MONTAR EN ALA MONTAJE 2. WWW.HOBBYKING.COM.....	85
ILUSTRACIÓN 45: COTIZACIÓN DE ERLE BRAIN 3 CON GPS Y CÁMARA INTEGRADA. ERLEROBOTICS.COM. ..	85
ILUSTRACIÓN 46: COTIZACIÓN DE RECEPTOR Y UBEC DE AMBOS MONTAJES. WWW.HOBBYKING.COM.....	86
ILUSTRACIÓN 47: COTIZACIÓN DE BATERÍA PARA AMBOS MONTAJES. WWW.GETFPV.COM.	86

8 Índice de gráficos

GRÁFICO 1: ENSAYOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES PARA ULTIMAKER 2+, EN BASE A LA INFORMACIÓN RECOPIADA DE WWW.ULTIMAKER.COM.	56
GRÁFICO 2: MÓDULOS DE ELASTICIDAD EN TRACCIÓN Y FLEXIÓN ENTREGADOS POR ULTIMAKER PARA LOS MATERIALES POSIBLES A UTILIZAR EN SU MODELO DE IMPRESORA ULTIMAKER 2+. INFORMACIÓN DE WWW.ULTIMAKER.COM.	57

9 Introducción

El desarrollo de software ha sido una herramienta de gran ayuda para ingenieros y diseñadores en la manufactura de prototipos. Dos conceptos ampliamente utilizados en los procesos de fabricación de prototipos son: el Rapid Prototyping (RP) y Virtual Prototyping (VP) (C. K. Chua, 1999). El primer concepto, se refiere a la manufactura de un modelo físico basado en un modelo computacional sin la necesidad de una plantilla, accesorio o programación de control numérico, el cual, en las últimas décadas, ha potenciado su desarrollo utilizando distintos tipos de materiales en la producción de prototipos y dando variadas técnicas de contracción, acabado superficial y precisión. Esta tecnología, también es mencionada como fabricación por capas (layer manufacturing), por depósito de material (material addition manufacturing), fabricación de formas libres (freeform manufacturing) e impresión 3D (three-dimensional printing).

El segundo, se define como el análisis y simulación posterior a un modelo sólido en CAD, como un sustituto del prototipo físico, sin incluir su construcción en un modelo 3D. Esta también se refiere a la ingeniería asistida por computador (Computer Aided Engineering, CAE) o ingeniería de análisis de simulaciones, incluyendo el análisis de elementos finitos (FEM), simulación de fluidos dinámicos computacionales (CFD), simulación mecánica, aplicaciones de realidad virtual, entre otros.

Ambas tecnologías de prototipado son ampliamente utilizadas en la toma de decisiones, durante el diseño y fabricación de productos y piezas, para dar solución a problemas en sus características físicas y cambios de formas que entregan mejores características para confrontar su entorno (A.K. Matta, 2015). Sin embargo, RP es preferido sobre VP para los casos de simulaciones rápidas, pruebas de ensamblajes, ajustes e interferencia; ya que, como pieza física, también permite al usuario una mejor estimación del tamaño del prototipo y poder efectuar una evaluación ergonómica del mismo.

Además, RP es usado como insumo en los procesos de fabricación, con el cual un equipo multifuncional puede valorar el prototipo con el fin de evaluar los requerimientos propios de cada especialidad. No obstante, VP entrega una rápida iteración del proceso de diseño, en donde los problemas pueden ser corregidos inmediatamente cuando se identifican en el análisis, ayudando a reducir los costos y el tiempo del prototipo físico. Sin embargo, VP tiene un alto costo en la inversión inicial de un hardware y software, necesitando grandes habilidades de diseñadores y operadores para extraer el máximo beneficio del software. A su vez, la transferencia de información entre distintos sistemas VP es débil y los vendedores, a menudo, recomiendan la reconstrucción total de las piezas (C. K. Chua, 1999).

En las últimas décadas, la utilización de RP ha provocado un amplio desarrollo de tecnologías en los procesos de manufactura, tales como: estereolitografía (SLA), sinterizado selectivo por láser (SLS), modelado por deposición fundida (FDM), fabricación de objetos por laminado (LOM), impresión 3D de archivos .STL, control numérico computarizado (CNC), etc. En estas, se combina la programación de los procesos de manufactura, con el fin de evitar requerir de intervención humana. Esto ha llevado a que muchos países menos industrializados

busquen con gran ímpetu el desarrollo de nuevas tecnologías, herramientas y procesos para competir efectivamente con el mercado internacional, sin necesariamente ser conocidos por bajos salarios y bajos costos de producción, sino que por su arduo trabajo y rapidez para provocar el impulso de nuevas industrias de alta tecnología, haciéndolos más competitivos y acelerando sus capacidades en ingeniería y manufactura, reduciendo los tiempos por producto y componente comercializado, reduciendo costos de fabricación y mejorando la calidad (S. O. Onuh, 1999).

Además del desarrollo de tecnologías en industrias de manufactura e ingeniería, la utilización del RP se convierte en un modelo relevante y potenciador de los procesos de aprendizaje y conocimiento de variables en las investigaciones. Tripp, 1990, presenta los eventos que caracterizan el desarrollo de un RP como un proceso de diseño instruccional (los cuales se pueden superponer por el hecho de que éstos no poseen una dependencia lineal) de la siguiente manera: Evaluación de Necesidades y Análisis de Contenidos, Declaración de Objetivos, Construcción del Prototipo (Diseño), Utilización del Prototipo (Investigación), Instalación del Sistema y Mantenimiento del Sistema.

Utilizando esta caracterización, se da una evidencia del cómo se trabajan los procesos de diseño. Conjuntamente, se muestra como parte crucial del mismo, la etapa de *Utilización del prototipo*, la cual muestra el potencial de enseñanza enfocando a que el observador desarrolle habilidades cognitivas y aprendizaje de contenidos, compartidos de forma paralela con el diseñador en su análisis (Tripp, 1990).

Junto con esto, el desarrollo rápido de productos es un enorme y relativamente no explorado recurso, que las empresas líderes en el mundo, han descubierto desde comienzos de siglo XXI como una ganancia competitiva, especialmente en los que no existen de forma previa (Alain Bernard, 2002).

Si un producto puede ser introducido de forma temprana, este gana más clientes y es capaz de mantener la lealtad de los mismos debido a los costos de cambios por otros. Esta introducción temprana genera un apalancamiento que puede no solo incrementar las ventas, sino también incrementar su promoción en el futuro. Los beneficios del desarrollo acelerado de productos pueden ser sutiles y menos tangibles, sin embargo, tales desarrollos pueden ofrecer una ganancia competitiva poderosa para la percepción de una empresa, que es altamente conducida por la tecnología y apunta a lograr una excelencia continua.

Actualmente, se han visto desarrollos para la mejora de eficiencia en las investigaciones médicas, incremento de velocidad y reducción de costos en la fabricación de partes complejas de metal y plástico, y extensiones a posibles técnicas micromecánicas (MEMS), que en conjunto con la rapidez en la transferencia de datos y el mejor acceso a la información (económica y técnica), dirigen con un gran potencial las evoluciones tecnológicas de un futuro cercano; creando un entorno conducido por el desarrollo de productos, como en algunos casos que: las aplicaciones de herramientas rápidas conducen a proveer nuevas soluciones industriales para la producción en masa (Levy, 2001); más compañías hacen uso de partes fabricadas con máquinas de manufactura por capas (Levy G., 2001); las herramientas CAD se han desarrollado para uso personal; la información y distribución de sistemas de trabajo colaborativo básico usa diferentes herramientas y entornos de software al mismo tiempo; tele-ingeniería de

manufactura para entregar a las empresas individuos con capacidades y procesos que actualmente son demasiado costosos y complicados para ser ofrecidos (Fischer, 2001).

Integrando las técnicas de prototipado rápido y manufactura (RP&M), se muestra un gran potencial al reducir el ciclo y costos de desarrollo de un producto, que unificado a los sistemas CAD/CAM RP&M, se desarrollan y emplean para realizar partes remotas fabricadas en prototipado rápido y mejoran la capacidad en el desarrollo de productos rápidos a pequeñas y medianas empresas.

La implementación de un sistema remoto de RP&M involucra como elementos y herramientas clave: (1) CAD/CAM/CAE, (2) Modelamiento y Optimización, (3) Algoritmos, (4) Mediciones de fuerzas anisotrópicas, (5) STEP/XML, (6) Aplicación de nuevas tecnologías y conceptos a los sistemas de prototipado rápido. En el desarrollo de estos sistemas, el RP está evolucionando hacia un nuevo concepto de Rapid Tooling (RT), que transforma los patrones de RP en partes de metal o plástico, ofreciendo un método rápido y de bajo costo para producir moldes y piezas funcionales, promoviendo la implementación de *Ingeniería Concurrente*¹ en el desarrollo estratégico de las empresas (A.K. Matta, 2015).

En este trabajo, se plantea una metodología de diseño para la fabricación de la estructura de un Drone, utilizando métodos de prototipado rápido y técnicas de RT en la parametrización de variables de diseño según los requerimientos del usuario, usando herramientas de programación y almacenamiento de datos dentro de una base de datos integrada a la modelación en CAD Inventor, para posteriormente generar un archivo en formato .STL que se fabrica en impresora 3D.

¹ Método de integración paralela del diseño de productos y procesos, utilizado por las empresas en la búsqueda de la excelencia continua.

10 Objetivos

10.1 Objetivo General

Desarrollar una solución paramétrica integrando software CAD e interfaces simples de usuario para la creación de Drones modulares a través de manufactura aditiva.

10.2 Objetivos Específicos

1. Analizar sistemas de drones y su estructura para la manufactura aditiva.
2. Analizar el funcionamiento (principales componentes, controladores eléctricos, motores, etc.); Características generales y capacidades de los drones.
3. Desarrollar modelo paramétrico del Drone.
4. Generar un modelo virtual de Drones, además de su parametrización para su manufactura con sistemas de impresiones 3D.
5. Crear una interfaz simple de usuario para gestionar la manufactura del Drone paramétrico.

11 Alcance

En este trabajo se busca investigar la estructura, funcionamiento y variables de diseño de un Drone, con el fin de diseñar un modelo conceptual básico cuya estructura esté parametrizada con respecto a los equipos electrónicos que el usuario desee instalar. Además, se busca realizar una interfaz gráfica amigable para el usuario que permita ingresar las dimensiones necesarias de los equipos electrónicos seleccionados para así obtener un diseño acorde a ellos, conectando esta interfaz con el modelo básico diseñado en software CAD. Posteriormente, el diseño es entregado para su uso en formato físico con la utilización de tecnología de manufactura aditiva 3D.

Junto con esto, se busca aplicar un método de etapas y posibles modificaciones mediante el uso de metodología instruccional aplicada al diseño para lograr el concepto final esperado. Dentro del proceso, se investigan los conceptos relevantes para adecuar el producto a los desarrollos de tecnología actual.

12 Marco de referencia

12.1 Aeronaves aéreas no tripuladas

Existen diversos tipos de diseño de naves aéreas no tripuladas (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), con distintas configuraciones y cantidad de hélices, tamaños, estructuras y diferentes utilidades que han hecho a estas aeronaves muy requeridas en la actualidad. Esto, con el fin de ser utilizadas, en algunos casos, junto a cámaras fotográficas de última tecnología para capturar información del entorno, realizando grabaciones de videos en alta calidad para: eventos deportivos, investigaciones de terrenos, investigación de animales y vida silvestre, proveer de seguridad a una comunidad, realizar mantención en lugares de difícil acceso; y muchos usos más relacionados con el uso civil e industrial.

Los distintos diseños de este tipo de aeronaves tienen un amplio rango de aplicaciones, gracias a su despegue y aterrizaje vertical (VTOL, "Vertical Take-Off Landing") con capacidad de mantener y disminuir la velocidad de vuelo en la misma posición geográfica. Estas aeronaves no requieren pistas de aterrizaje ni grandes instalaciones, las cuales han sido utilizadas con aeronaves de ala fija para investigaciones de universidades e institutos en el área de robótica aérea. Es así como, la creatividad se ha reforzado por el nacimiento y rápida expansión de proyectos de desarrollo de UAVs, reduciendo costos y riesgos, comparado con aeronaves comandadas (P.-M Basset, 2014).

12.1.1 Un poco de historia

Más de 160 años han pasado desde el primer desarrollo de Drones en el mundo, comenzando desde los primeros conceptos que existieron respecto al mismo, utilizados por la inteligencia militar en el desarrollo de aeronaves no tripuladas que pudieran entregar información de terreno enemigo y bombardear en caso de ser necesario.

Los primeros indicios de aeronaves no tripuladas, se muestran a mediados del siglo XIX con bombardeos mediante bombas acarreadas en globos aerostáticos en la ciudad de Venecia; pero uno de los grandes hitos fue en 1898, cuando Nikola Tesla patentó y demuestra sobre un estanque en la ciudad de New York el control de una nave acuática con mando a distancia (o radio control), la cual se considera la cuna del desarrollo de la robótica moderna (Hernando, 2016).

A principios del siglo XX, los proyectos de las fuerzas armadas de Estados Unidos apuntaban a la investigación del uso de esta tecnología para la carga de explosivos, como lo muestran los proyectos de las fuerzas armadas de EEUU ("Hewitt Sperry" y "Kettering") que se enfocaban a desarrollar torpedos aéreos, sin piloto y guiados por controles preestablecidos,

utilizando tecnología de giroscopios. Estas misiones lograron éxito, en donde las aeronaves eran capaces de recorrer más de 75 km con carga explosiva incluida. Así es como el desarrollo de tecnología de estas aeronaves, se vio ampliamente impulsada.

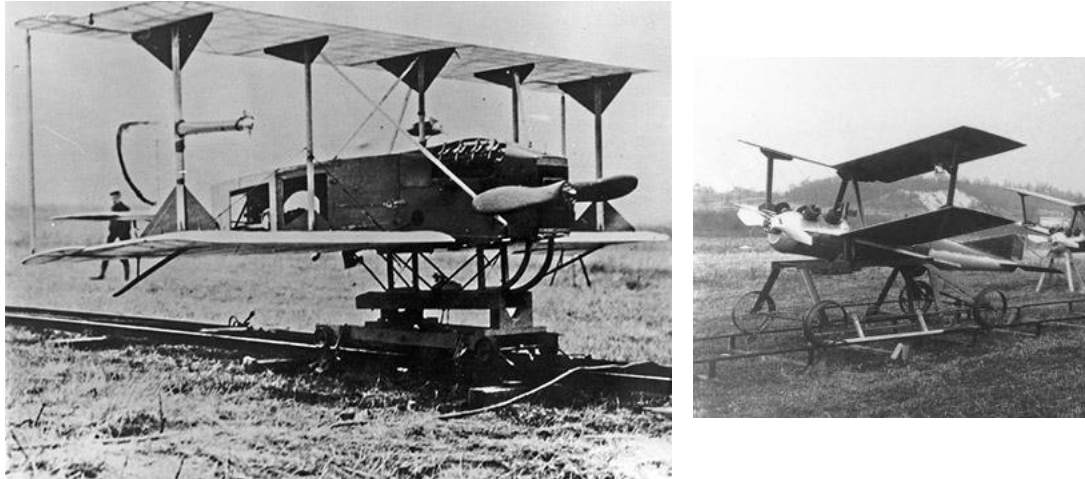


Ilustración 1: Aeroplano Hewitt Sperry (izquierda) y Kettering Bug (derecha), ambos proyectos desarrollados como misiles aéreos con control preestablecido y sin pilotaje humano durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918).

Durante la Segunda Guerra Mundial esta tecnología no tuvo mucho desarrollo, con el intento y la prueba de pilotos dentro de las naves torpedo, los cuales eran eyectados fuera del avión antes de llegar al objetivo. Con este sistema, las fuerzas estadounidenses perdieron muchas vidas humanas y naves, lo cual posteriormente, los llevó a avanzar en el desarrollo de aeronaves no tripuladas.

Luego, durante la Guerra Fría y la Guerra de Vietnam, la tecnología en estas aeronaves se mejoró hasta llegar a los niveles más sofisticados de vigilancia, incluyendo cámaras en estos sistemas (fotografía y video). Además, se consideró la guerra de Vietnam como la primera “guerra tecnológica” de la historia: llevada a cabo de acuerdo a principios técnicos, modelos estadísticos y principios electrónicos (Hernando, 2016) con aeronaves más pequeñas que tenían sistemas de guiado, cargas de peso, e incluso modificación de ruta en pleno vuelo. En este tiempo, el ejército de Estados Unidos se vio envuelto en variadas noticias al estar utilizando aeronaves no pilotadas en modo de espionaje.

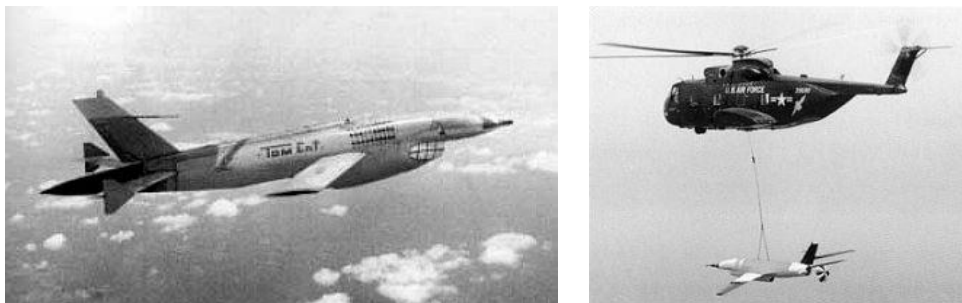


Ilustración 2: Aeronaves tipo Lightning Bugs utilizadas en modo espionaje durante la guerra de Vietnam.

Los periodos de guerra provocaron el avance en la tecnología de aeronaves no piloteadas, demostrando, además, su gran utilidad no solo en combate, sino también en la investigación de terreno, lo que provoco posteriormente el interés en el desarrollo de nuevas ciencias.

Ya en los años 70's, se desarrollan aeronaves no piloteadas teledirigidas (RPVs), las cuales cumplen con características de larga duración de vuelo y alcance de gran altitud. Estos proyectos de las compañías Boeing y Ryan fueron unos de los más ambiciosos de la Fuerza Aérea, siendo capaces de volar más de 24 horas, siendo piloteados desde una central. Al mismo tiempo, se desarrollaban versiones "mini-RPV" (*Praeire*) capaces de llevar láser y cámaras, siendo utilizados para vigilancia, y modelos *Firebees* experimentales que se cargaban con armamento.

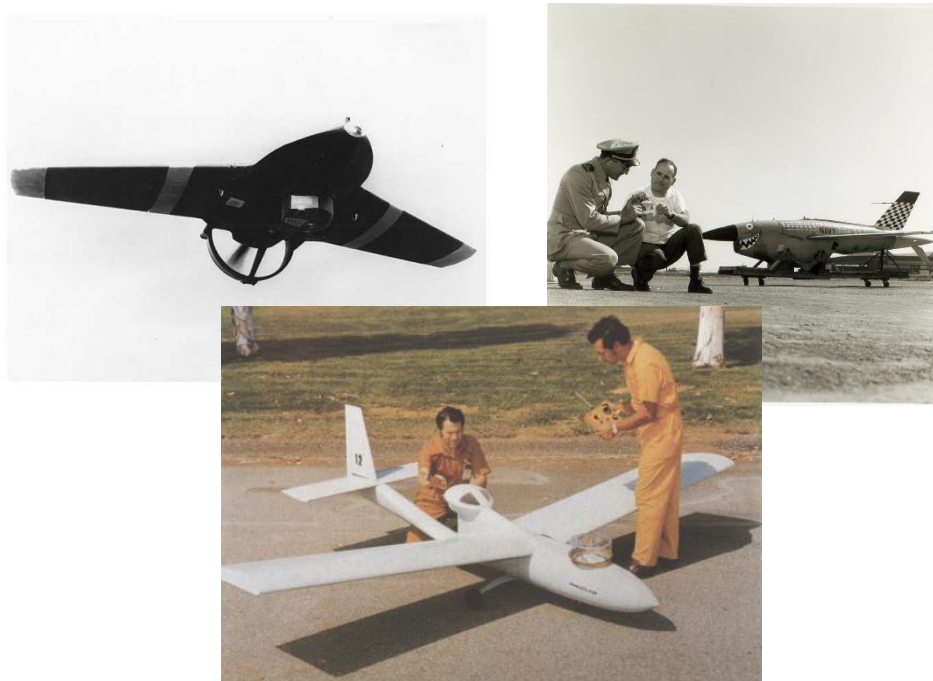


Ilustración 3: Modelos de aeronaves no tripuladas, Aquila RPV a la izquierda, Praeire al centro y Firebee a la derecha.

La tecnología UAV durante los años 80's se consolida como completamente fiable luego de un enfrentamiento entre este tipo de aeronaves contra un piloto de elite Top Gun, John Smith, y su aeronave tripulada F-4 Phantom. Luego en los años 90's, con el avance en la tecnología de computación y sistemas de control electrónico, los drones comenzaron a tener la forma y utilización contemporánea, en el uso militar de armamento y de inteligencia con tecnología cartográfica y de vigilancia. Estas épocas y la siguiente, se caracterizan por la expansión en el uso de estos modelos en ataques entre fuerzas estadounidenses y Afganistán, incluyendo otros ataques entre países que marcan la gran expansión de esta tecnología como una fuerza muy potente en las filas militares.

Se estima que, en el año 2013, el departamento de defensa estadounidense tenía 237 modelos Predator y 112 modelos Reaper, operados remotamente en el planeta.



Ilustración 4: Aeronaves no tripuladas, modelo MQ 1 Predator a la izquierda y MQ 9 Reaper a la derecha.

En los últimos años, junto con el desarrollo militar, se ha sumado la fabricación de Drones para uso civil, comercial y para aficionados, que buscan darle uso a estas aeronaves en rubros distintos al militar, como en investigación de terrenos, vida salvaje, agricultura, grabaciones de eventos, inspección, entregas de paquetes, y otros usos que siguen aumentando el desarrollo y uso de esta tecnología de manera pacífica, utilizando nuevos diseños que le entregan facilidad de manejo al usuario con control mediante control remoto o aplicaciones de teléfonos móviles, agilidad a la aeronave en el despegue y vuelo, junto a otras características que se enfocan en el servicio final que se entrega, ya siendo considerado un producto. Modelos de despegue vertical, con propulsión de cuatro y seis sistemas motor hélice de distintos tamaños y tecnologías son los más utilizados.



Ilustración 5: Diseños de Drones actuales, modelo Quadcopter.

12.2 Evolución del diseño y los sistemas de manufactura

12.2.1 Ingeniería de Diseño

La ingeniería de diseño es un proceso social y técnico en el cual los productos se diseñan por equipos de personas (Dazhong Wu, 2015). Durante el transcurso del tiempo, se han ido desarrollando distintos conceptos y métodos para lograr estandarizar el proceso de diseño de productos mediante etapas o fases.

Sin volver a los inicios, uno de los modelos más conocidos es el propuesto por Pahl y Beitz (Pahl G, 1984), en el cual se describe el proceso de diseño de un producto en cuatro etapas: *(1) Planificación del producto y clarificación de tareas, (2) diseño conceptual, (3) realización del diseño, y (4) diseño en detalle*. En las dos primeras, se recopila la información acerca de los requerimientos que deben ser considerados en la solución; se establecen las estructuras de las funciones; se buscan los principios de solución adecuados y se combinan estos elementos con diferentes conceptos. En los siguientes, partiendo del concepto, el ingeniero determina el diseño y las formas para crear el producto, de acuerdo a las consideraciones técnicas y económicas, y se definen formas, dimensiones y propiedades de la superficie de todas las piezas individuales, materiales específicos, viabilidad técnica y económica, además de planos y otros documentos de producción. De la misma forma, Ulrich y Eppinger (Ulrich KT, 1995), detallan aún más el proceso de diseño descrito por Pahl y Beitz, incorporando etapas de testeo de prototipos, refinamiento e incremento de producción (Dazhong Wu, 2015).

Actualmente, ingenieros de distintas industrias y áreas de la ciencia utilizan TRIZ para la solución de problemas de inventiva en el diseño de productos, el cual proviene de la información empírica del desarrollo de patentes. Genrick Altshuller analizó cientos de patentes a nivel mundial desde los principales campos de la ingeniería, estudiando las soluciones más efectivas a los problemas. Con este trabajo, provee del primer entendimiento de las tendencias o patrones de evolución de los sistemas técnicos, marcando el inicio para el desarrollo de aproximaciones analíticas al resolver problemas de inventiva. Más tarde, se convierte en una fundación TRIZ con su teoría para resolver problemas de inventiva, utilizando este axioma: *“La evolución de todo sistema técnico es gobernado por leyes objetivas”*, (Langevin, 2013).

Estas leyes revelan que, durante la evolución de un sistema técnico, las mejoras de alguna parte del sistema que tiene ya alcanzada su cumbre de características funcionales, mostrará un conflicto con otra parte y se dirigirá a una eventual mejora de las partes menos evolucionadas. Este continuo proceso de “auto nutrido” empuja al sistema a estar cada vez más cerca de su estado ideal. El entendimiento de este proceso de evolución permite prever las tendencias futuras en el desarrollo de un sistema técnico.

Con el paso de 40 años, TRIZ ha desarrollado un conjunto de herramientas prácticas para inventar y resolver problemas técnicos de distintas complejidades. Hoy, se pueden identificar varias herramientas básicas TRIZ tan bien como otros métodos y técnicas que se combinan para compensar lo que se conoce como Innovación Sistemática (Langevin, 2013).

Cabe destacar que, junto con el progreso en los procesos de diseño, también se ha desarrollado mayor tecnología para facilitar los sistemas asistidos por computador (CAS, “Computed-Aided Systems”) que ayudan a diseñadores en la creación, análisis y optimización de productos. Desde los años 60’s, los ingenieros han usado las herramientas de diseño asistido por computador (CAD, “Computer-Aided Design”): desde SKETCHPAD, desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) cerca del año 1960, hasta los últimos avances tecnológicos en esta materia, frecuentemente referidos como diseños basados en la nube (CBD, “Cloud-Based Design”), que emergen a comienzos del año 2010, creados en base a: las características de computación en la nube, virtualización, tenencia múltiple, acceso ubicuo, software como un servicio, pago por uso de un modelo de negocios, y pronto teniendo el potencial de volverse en un juego de intercambio para la distribución y diseño colaborativo de las siguientes generaciones (Dazhong Wu, 2015). En “Ilustración 6” se muestra un resumen de las características en la evolución de los sistemas de diseño CAS.

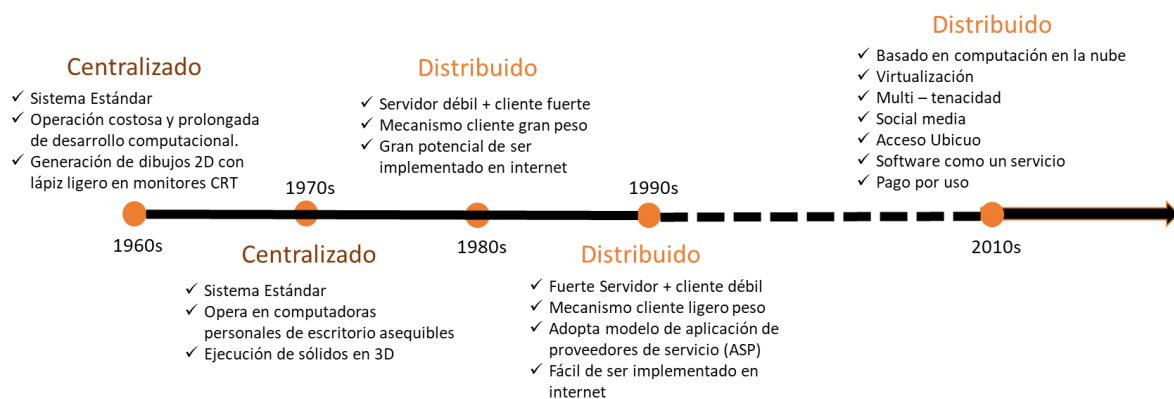


Ilustración 6: Evolución de los sistemas de diseño asistidos por computador. Fuente: "Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation".

12.2.2 Sistemas de Manufactura

Desde los primeros trabajos de manufactura en las fábricas, se han tenido que idear sistemas que optimicen los procesos de producción para lograr los objetivos con las menores fallas posibles, de una manera eficiente y eficaz, y que permitan desarrollar un mejor modelo de negocios. En el tiempo, estos han evolucionado, cambiando o mejorando algunos objetivos, como también, agregando nueva tecnología a estos.

En la investigación de esta evolución, Dazhong Wu (2015), muestra un resumen de los paradigmas en la evolución de la manufactura en las líneas de ensamblaje (Ver “Ilustración 7”), incluyendo los sistemas de producción de Toyota (Toyota production systems, TPSs), los de manufactura flexible (Flexible manufacturing systems FMSs), de manufactura reconfigurable (Reconfigurable manufacturing systems, RMSs), los de manufactura basados en agentes y web, finalizando, con manufactura basada en la nube (Cloud Based Manufacturing, CBM), mostrando las configuraciones y características de cada uno de estos.

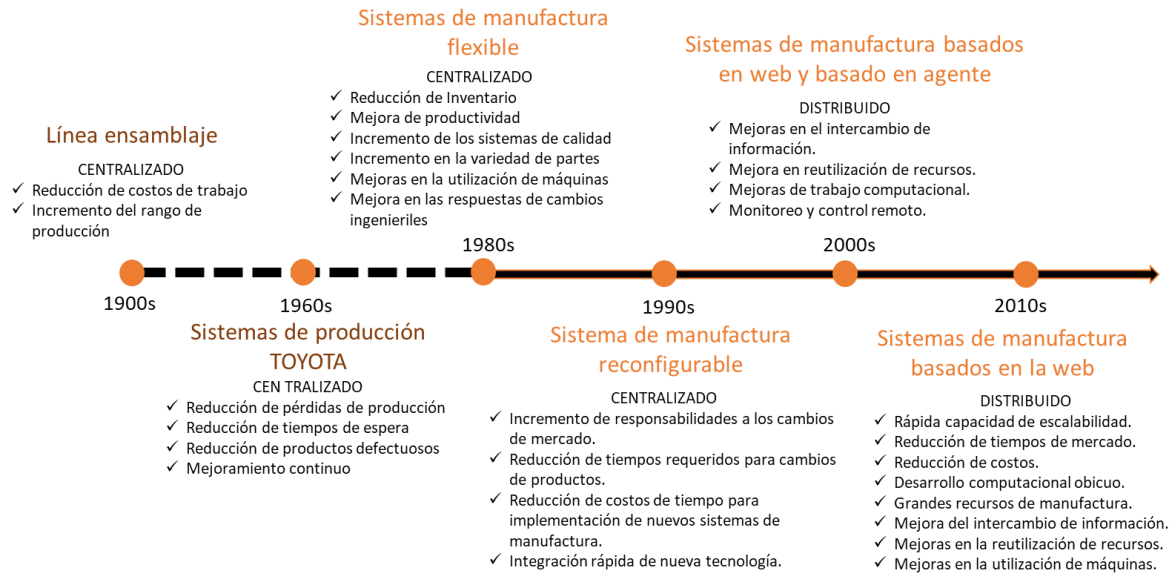


Ilustración 7: Evolución de los sistemas de manufactura y enfoques de desarrollo. Fuente: "Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation".

Los estados previos de los sistemas de manufactura, convocaron en una categoría centralizada con cambios significantes en las herramientas de máquinas, layout de plantas y modelos de negocios. Con el desarrollo de internet, los sistemas de manufactura distribuida se han ido adoptando cada vez más en las industrias. Dos de los mayores enfoques son los basados en web y agente, que usan la arquitectura cliente-servicio con internet para proveer una plataforma de ligero peso a equipos de trabajo dispersos geográficamente, con acceso y colaboración de información relacionada con la manufactura vía navegadores web (Fuh JY, 2005). Igualmente, con el incremento estructural y complejidad funcional de los sistemas de manufactura basados en la web, los mismos, basados en los agentes, apuntan a mejorar la comunicación y actuación del uso de agentes (Shen W, 2006). Estos agentes (por ejemplo, celdas de manufactura, herramientas de máquinas, y robots), exhiben autonomía y comportamiento inteligente en tareas como buscar, razonar, y aprender. Por ejemplo, un agente es un solucionador de problemas independiente capaz de tomar decisiones para interactuar con otros agentes y su entorno (Monostori L, 2006).

12.3 Diseño paramétrico

El diseño paramétrico involucra el encontrar valores para las características que definen un objeto en estudio. Esto puede verse suficientemente fácil solo encontrando algunos valores, que entregan los requerimientos, pero al existir infinitas opciones en los valores de las variables de estudio que cumplen con estos, ¿cuáles deben ser elegidos? Para dar respuesta a esto, las compañías deben desarrollar un conjunto de ecuaciones y reglas para orientar a diseñadores en el desarrollo de documentos, y usando esta información, son capaces de generar valores para los parámetros en nuevos productos (Ullman, 2010).

La aprobación de productos impresos en 3D por los clientes sugiere que, el acoplamiento de las tecnologías de fabricación digital y las metodologías de diseño paramétrico, presentan oportunidades y desafíos para los modos tradicionales de manufactura. La definición paramétrica de las limitaciones de los componentes se realiza para mantenerlas conforme a las limitaciones del mundo real. Por tanto, el desafío para diseñadores es usar definiciones paramétricas usando software CAD convencionales y lenguajes de programación visual para describir la geometría lógica de un producto permitiendo conservar los parámetros de forma definidos por el usuario (Yanagawa, 2015).

Por otro lado, para el desarrollo de un proceso de prototipado rápido (Tripp, 1990), es necesario contar con las definiciones físicas y lógicas del sistema, una oportunidad para ejecutar el prototipo y un software que permita la rápida construcción y modificación del mismo. Se pueden incluir y requerir una base de datos, módulos principales del programa u objeto, visualización por pantalla, y, además, de entradas y salidas para interconectar la información.

La realización de un diseño paramétrico de una aeronave autónoma no tripulada (UAV) se sustenta en la capacidad actual de utilizar tecnologías de prototipado rápido, en este caso la impresión 3D, lo cual ayuda de manera rápida y efectiva en el análisis de las características ergonómicas, funcionales, estéticas, e incluso físicas, en los procesos de diseño del Drone.

12.4 Drone como un Sistema Técnico

Actualmente, para lograr un desarrollo de calidad, los investigadores e ingenieros de diseño deben desarrollar distintos métodos de estudio (análisis numérico para el diseño de la estructura y el comportamiento durante el vuelo, análisis ergonómico, estético, etc.), como también plantear distintas distribuciones del equipamiento electrónico, distintos tamaños de motores, hélices, etc., para lograr la inercia necesaria para la estabilización de la aeronave. Esto se convierte en un sinnúmero de elementos y consideraciones a tomar en el proceso de diseño.

Siendo considerado un sistema técnico y utilizando las Leyes de Evolución de Sistemas de TRIZ, como modelo EMS (Pahl G. a., 1996), un Drone, o aeronave no tripulada, se diseña para funcionar dentro de un medio natural, ya sea para volar por los aires o sumergirse dentro del

mar, con el fin de obtener información del entorno que se quiere investigar y/o analizar, utilizando energía eléctrica para realizar el trabajo de propulsión de las hélices y generar el movimiento.

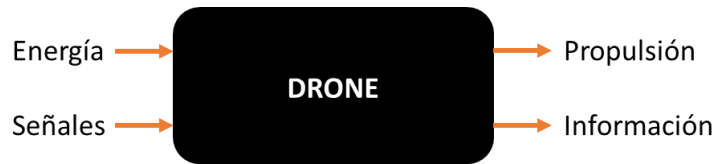


Ilustración 8: Diagrama EMS Drone.

Las funciones del Drone, se controlan a distancia, por medio de aplicaciones de celular, control remoto u otro para entregar las señales a la unidad de control que las procesa convirtiéndolas en pulsos eléctricos que generan, dentro del aeronave, el accionamiento de motores y hélices para el movimiento, utilizando energía eléctrica como base para esta acción, lo que se representa utilizando el modelo de un Sistema Técnico Mínimo (Altshuller, 1984).

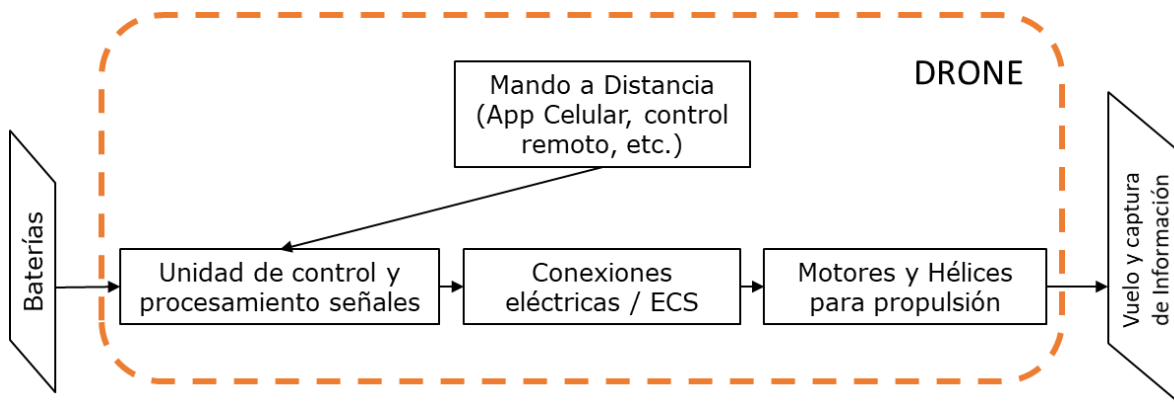


Ilustración 9: Diagrama STM Drone.

13 Metodología propuesta

La metodología que se propone para el desarrollo del Drone paramétrico, se resume en un diagrama dividido en cinco etapas generales, subdivididas en tareas específicas para lograr el diseño requerido de la estructura paramétrica, el cual se muestra en “Ilustración 11” y se explica a continuación:

Etapas 1: Realizar una descripción de los distintos modelos de UAV existentes mediante el uso de un estudio comparativo, en donde se identifica la diversidad actual de los diseños existentes. Se realiza una selección de modelo a trabajar y los equipos electrónicos a utilizar. Esta etapa es esencial para identificar la función que debe cumplir el diseño a desarrollar.

Paso 1.1: Relacionar los componentes electrónicos, eléctricos y mecánicos del UAV con el funcionamiento del mismo y su influencia en el diseño.

Paso 1.2: Identificar las variables necesarias para la selección del equipamiento electrónico a utilizar, relacionando las variables físicas para la selección de equipos electrónicos y dimensionales según el modelo estructural a desarrollar.

Paso 1.3: Seleccionar equipamiento electrónico a utilizar según las variables encontradas en el paso anterior y los requerimientos del usuario, dependiendo si este quiere realizar una selección propia o adecuar la selección a un modelo realizado por el diseñador.

Etapas 2: Desarrollar un diseño conceptual del UAV que relacione la primera etapa con una estructura física virtual, según los requerimientos generales del usuario final. En esta etapa se desarrolla un modelo CAD parametrizado que cumpla con distintos requerimientos dimensionales del usuario.

Paso 2.1: Identificar las influencias dimensionales de los equipos electrónicos en el diseño de la estructura. Esta etapa se puede trabajar en paralelo con la “Etapa 1.3”.

Paso 2.2: Desarrollar modelo CAD que cumpla con los objetivos especificados en la etapa anterior.

Paso 2.3: Parametrizar las dimensiones estructurales que darán un uso ampliado a distintas opciones de equipamientos electrónicos dependiendo de las necesidades del usuario.

Etapas 3: Desarrollar una interfaz gráfica amigable para el usuario, en donde este pueda ingresar las variables iniciales de las dimensiones de los equipos electrónicos a utilizar y se genere una solución física según el modelo CAD.

Paso 3.1: Desarrollar una interfaz simple y generalizada para un usuario, en donde se ingresan los requerimientos dimensionales del UAV desarrollado en la “Etapa 2”.

Paso 3.2: Unir la interfaz gráfica realizada en el “Etapa 3.1” con el modelo CAD desarrollado en el “Etapa 2”.

Etapla 4: Ejecutar la manufactura del modelo virtual desarrollado del UAV, utilizando un proceso manufactura aditiva en 3D, y acoplar con los equipos electrónicos seleccionados.

Paso 4.1: Realizar la impresión en 3D del modelo virtual desarrollado con la finalidad de dar satisfacción a los requerimientos del usuario final.

Paso 4.2: Acoplar estructura con equipamiento electrónico seleccionado.

Etapla 5: Evaluar el funcionamiento del UAV desarrollado. Se realiza una prueba de funcionamiento del equipamiento electrónico utilizado y su funcionamiento en la estructura desarrollada. En caso de fallas, se deben identificar y clasificar para posibles modificaciones posteriores.

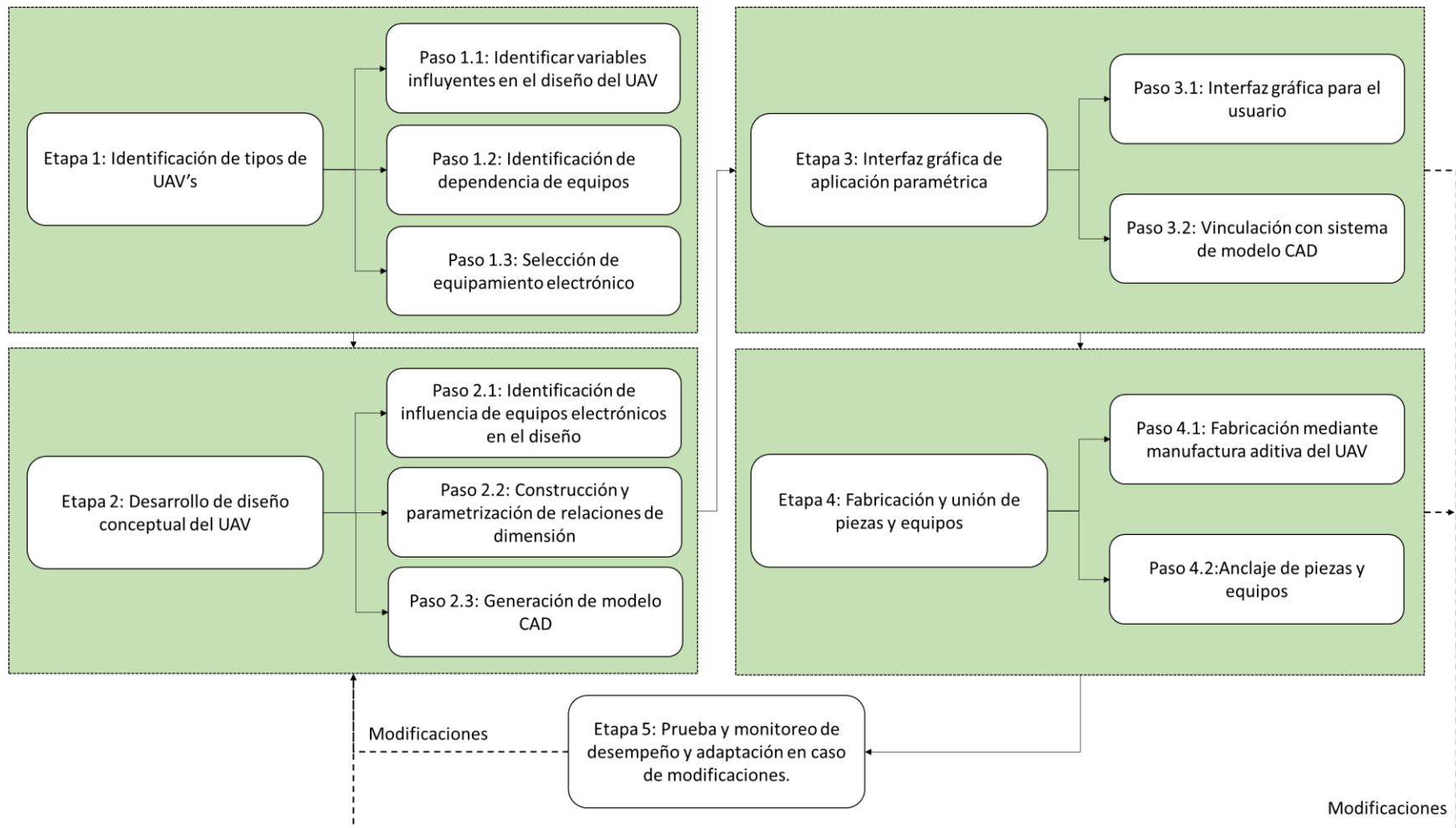


Ilustración 10: Metodología proceso de diseño UAV.

14 Caso de estudio

Se describe, como caso de estudio, el desarrollo de una aeronave no tripulada, fabricada con métodos avanzados de manufactura (impresión 3D) y adaptable a distintas situaciones de vuelo, susceptible a cambios de rumbo y con gran variedad de utilizaciones ampliando el rango de distribución a posibles usos que se necesiten en la actualidad. Junto con esto, se propone el desarrollo de una interfaz amigable para el usuario, que entregue una solución para individuos que no posean conocimientos en el desarrollo de sólidos 3D virtuales.

14.1 Estudio Comparativo

Muchas empresas a nivel mundial se han dedicado a la investigación de tecnologías UAV, tanto a su uso final, como a facilitar su manufactura, una de ellas es Drone Industry Insights (Drone Industry Insights, s.f.), que revela constantemente un análisis del mercado actual de Drones y clasificaciones de las tendencias actuales en el desarrollo según su estructura, utilización y preferencias de usuarios. Esta fuente se utiliza como base de información para comenzar la investigación a nivel mundial del mercado actual, de la cual se distinguen características esenciales que permiten evaluar las opciones de diseño.

En “*Tabla 1*”, se realiza una clasificación de UAV según su estructura y cantidad de hélices:

- QUAD: Quad-Copter, o helicóptero multirrotor de cuatro rotores. Helicóptero propulsado por cuatro conjuntos motor-hélice horizontales.
- HEXA: Hexa-Copter, o helicóptero multirrotor de seis rotores. Helicóptero propulsado por seis conjuntos motor-hélice horizontales.
- HELI: Heli-Copter, o helicóptero. Aeronave sustentada por un conjunto hélice-motor dispuesto de forma horizontal.
- MALE: Medium Altitude Long Endurance. Aeronave de ala fija que alcanza una mediana altura y larga resistencia.
- HALE: High Altitude Long Endurance. Aeronave de ala fija que alcanza gran altura y larga resistencia.

Las dos últimas designaciones, MALE y HALE, son conceptos relacionados con el rango, resistencia, altitud, carga a soportar, rapidez y seguridad, que se utilizaron para el estudio del diseño de CAPECON “Civil UAV APlications & Economic Effectivity of Potential CONfiguration solutions”, proyecto europeo que unió a 20 organizaciones de 8 países, desarrollado entre el año 2001 al año 2005 (P.-M Basset, 2014).

² En Anexo 18.1 se agrega un glosario de los términos utilizados en el Estudio Comparativo mostrado en Tabla 1.

DISEÑO DRONE	CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIÓN
QUAD 	Naves Aéreas no tripuladas de 4 alas, impulsado por 4 hélices que reciben la energía de rotación desde motores eléctricos (brushless), su peso total máximo aproximado puede alcanzar los 3 kg, sus dimensiones máximas van desde los 120 mm a los 130 mm, alcanzando velocidades de hasta 140 km/h, con autonomía de vuelo de hasta 30 min. Utilizan energía eléctrica para impulsarse almacenada en baterías de hasta 3.000 mAh, las cuales dependen de las dimensiones y requerimientos de la nave. Existen quadcopter que alcanzan radios de distancia desde el controlador de hasta 10 km y pueden cargar hasta 2 kg extra dependiendo de la utilización.	Las usos para este tipo de naves son: [R/H] - [V&F] - [I/C/T] - [D&S] - [MA&VS] - [SP] - [E/T] - [I]
HEXA 	Naves Aéreas No Tripuladas de 6 alas impulsado por el mismo número de hélices que reciben su energía de rotación desde el eje de los motores eléctricos. Su peso puede alcanzar hasta los 3,5 kg (pueden incluir carga externa de hasta 2,5 kg dependiendo de su utilización) y sus dimensiones máximas van desde los 0,43 m a los 1.5 m. La velocidad máxima encontrada es de 120 km/h, con una autonomía de vuelo de hasta 2 hr. La energía eléctrica utilizada es almacenada en baterías LiPo de hasta 12.000 mAh. Además, estos alcanzan un radio de distancia desde el controlador de hasta 2 km.	Algunas utilidades encontradas de este tipo de naves son: [V&F] - [I/C/T]
HELI 	Como Nave Aérea No Tripulada, el formato HELI puede requerir de energía eléctrica proveniente tanto de un motor eléctrico como de un motor de combustión, el empuje para levantar el cuerpo de esta nave es entregado por la rotación de una hélice propulsada por el eje del motor. Las dimensiones máximas de estas naves varían entre los 1,5 m y los 7,5 m (incluyendo la hélice), con velocidades de hasta 160 km/h y autonomía de vuelo alcanzable de más de 6 hr. La energía principal utilizada puede provenir de un generador o desde una batería. Es posible alcanzar un radio de 30 km desde el controlador y puede cargar hasta 350 kg extra.	Utilizaciones para este tipo de aeronaves son: [SP] - [MA&VS] - [D&S] - [I/C/T]
MALE 	Este tipo de aeronave tiene un despegue horizontal, las alas provocan la sustentación del mismo. Sus dimensiones máximas son de 2,3 m aproximadamente, su peso máximo encontrado es de 3,8 kg y su velocidad máxima vista es de 90 km/h. Poseen una hélice en su parte posterior la cual recibe la fuerza de rotación desde el eje de un motor eléctrico (máximos notados son de 1,4 kW), alcanzando una autonomía de vuelo de hasta 2,5 hr. Puede alcanzar hasta 60 km de radio de distancia desde el controlador.	Algunas utilidades para este tipo de aeronaves son: [I/C/T] - [A] - [I] - [D&S] - [SP] - [E/T]
HALE 	Este tipo de aeronave no tripulada tiene las características de diseño de un avión, con despegue horizontal y alas que dan la sustentación al mismo. Sus dimensiones máximas encontradas son de 3,3 m, peso de hasta 10 kg y velocidad máxima de hasta 110 km/h. Se energiza principalmente por motores eléctricos de hasta 2 kW que almacenan su energía en baterías o por motores de combustión. Pueden llegar a alcanzar 150 km de distancia desde el controlador con autonomía de vuelo de hasta 20 horas. Además, algunos pueden transportar cargas de hasta 130 kg.	Utilizaciones para este tipo de naves: [A] - [I/C/T] - [MA&VS] - [V&F] - [I] - [SP]

Tabla 1: Resumen de Estudio Comparativo realizado para evaluación de distintos tipos de diseño de Drones. Elaboración Propia.

Para el progreso de este método, *se elige el desarrollo de un Drone modelo QUAD*, el cual entrega variadas posibilidades de uso y tiene características estructurales que entregan un rango amplio de posibilidades de construcción, tanto en dimensiones estructurales como en la elección de equipos electrónicos, por lo tanto, permite una variación en el rango de velocidades de vuelo. Junto con esto y debido a sus dimensiones, se permite una fabricación de piezas que pueden ser parametrizadas y fabricadas con la utilización de manufactura aditiva 3D. Además, se tiene un despegue vertical sin la necesidad de una pista de vuelo y la posibilidad de adicionar cargas a la estructura, ya sea una cámara fotográfica, de video, u otro tipo de carga según los requerimientos del usuario.

14.2 Caracterización de Sistema Técnico Drone

Existen distintos estilos de aeronaves no tripuladas, los cuales con el tiempo han mejorado su tecnología en instrumentos de control y vuelo, acceso de energía, disposición de motores y hélices, entre otros, y aunque los subsistemas inmersos dentro de él funcionalmente se han mantenido en el tiempo, se han añadido nuevos instrumentos electrónicos y se han desarrollado nuevas estructuras de soporte que permiten al usuario mayor diversidad en su uso. Realizando una clasificación en subsistemas, se hace la separación de las funciones de cada uno de estos:

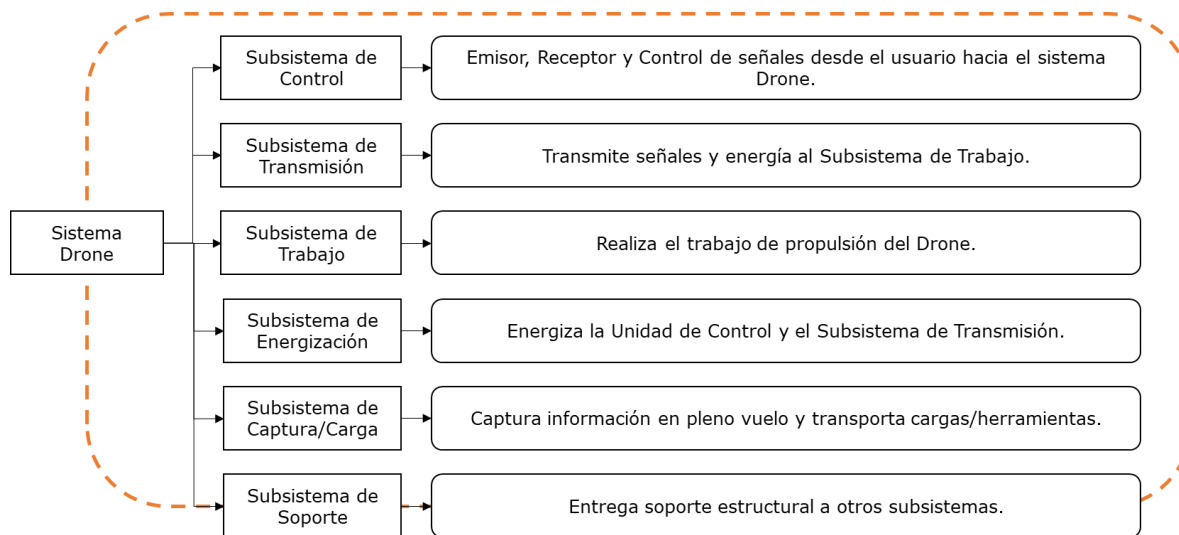


Ilustración 11: Subsistemas Drone, representados según primera ley TRIZ de integración de partes de un sistema tecnológico.

14.3 Caracterización de Subsistemas Drone

Un sistema Drone modelo QUAD entonces, estará compuesto por seis subsistemas que al funcionar de forma sinérgica realizan las funciones técnicas principales de volar y capturar información del entorno: Subsistema de Control, Subsistema de Transmisión, Subsistema de Trabajo, Subsistema de Energización, Subsistema de Captura/Carga y Subsistema de Soporte.

14.3.1 Subsistema de Control

El subsistema de control es el que conecta directamente al usuario con el Drone, recibiendo los mandos desde el usuario, transformándolos a señales que se entregan al subsistema de transmisión.

14.3.1.1 Unidad Emisora

La conexión existente entre el Drone y su usuario se hace efectiva gracias a la transmisión de datos que realiza la, denominada para este trabajo, *Unidad Emisora*. Esta se comunica por radio frecuencia y consta de algún dispositivo que percibe los movimientos que el usuario quiere que realice el Drone, transformándolo en señales y enviándolos a la *Unidad Receptora*. Actualmente se pueden utilizar distintos dispositivos y canales de transmisión, como:

- Control Remoto, transmisión de datos con Radiocontrol (RC) o Radio Telemetría (RT).
- Transmisión por app celular o tablet, vía Wifi con transmisor FPV (First Person View), pudiendo utilizar dispositivo con visión de Realidad Virtual (Virtual Reality, VR) o Realidad Aumentada (Augmented Reality, AR)
- Transmisor de datos desde PC, vía wifi o bluetooth para bajos rangos de distancia.
- Control manual con sensor gravitacional.



Ilustración 12: Distintos dispositivos para control del funcionamiento del Drone, imágenes de DroneRush.com.



Ilustración 13: TECHBOY TB-802, control remoto manual con giroscopio.

14.3.1.2 Unidad Receptora

Los receptores son los encargados de recibir la señal de los transmisores y las procesan para el funcionamiento de los motores del Drone. En su funcionamiento, se disponen dentro de la estructura del Drone, por lo que se deben tener en consideración para el Diseño.

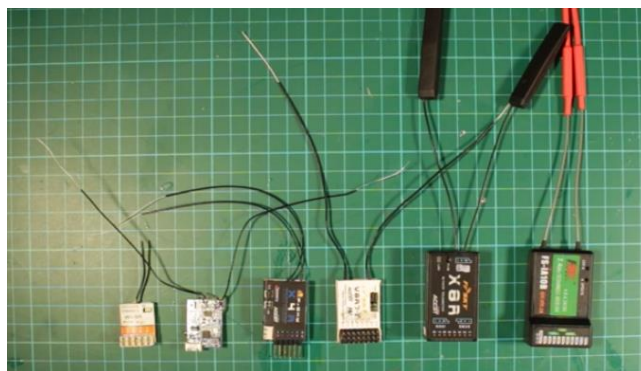


Ilustración 14: Receptores de señal de Drones, Imagen de Joyplanes RC.

Con el avance en la tecnología de los dispositivos electrónicos también existen otros tipos de receptores (RC o RT) y procesadores que cumplen con la tarea de recibir las señales, e integrar las funcionalidades de los distintos dispositivos dentro del Drone, como es el caso de utilizar un Raspberry Pi o Arduino, que reciben las señales vía Wifi a través de antenas y las procesan para entregarlas a la Unidad de Control de motores.



Ilustración 15: placas Raspberry Pi 3 y Arduino, de izquierda a derecha.

14.3.1.3 Unidad de Control de motores

Las señales recibidas desde los receptores se procesan para entregar la energía necesaria a los motores y cumplir con las indicaciones iniciales del usuario, ya sea un giro como el desplazamiento o algún tipo de maniobra específica. Existen distintos tipos de controladores para entregar señales a los motores, dependiendo de los requerimientos necesarios para la utilización de estos equipos. Algunos utilizados actualmente son: APM, Pixhawk, NAZA, CC3D, NAZE32, SP RACING F3, KISS, entre otros.



Ilustración 16: Algunas controladoras de vuelo, de izquierda a derecha APM, Pixhawk y NAZA, unas de las más usadas según desarrolladores.

Otro tipo de controladores, han sido desarrollados para ser utilizados en conjunto con una Raspberry Pi, integrando las funciones de recepción y procesamiento de señales para entregar, en este caso, al Subsistema de Transmisión.

14.3.2 Subsistema de Transmisión

Dentro de este, se considera la transmisión de energía desde el Subsistema de Energización hacia los motores, y la transmisión de señales desde la Unidad de Control hacia los mismos.

14.3.2.1 Tablero de distribución de poder (Power Distribution Board, PDB)

El PDB distribuye la potencia entregada por la batería a los ESC's, que entregan la señal a los motores, con una forma más sencilla y ordenada de conexión. Algunos PDB vienen incluidos en el diseño de la estructura del Drone, debiendo hacer la soldadura de los cables directamente a esta.

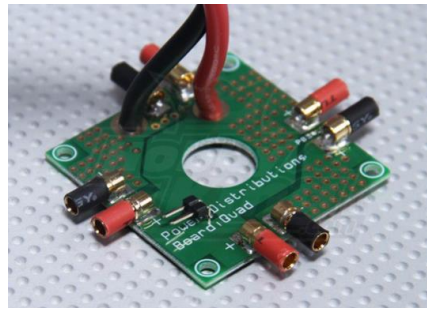


Ilustración 17: PDB con cuatro conexiones a ESC.

14.3.2.2 Controlador electrónico de velocidad (Electronical Speed Controller, ESC)

Es un componente electrónico que recibe la energía desde una fuente (baterías) y que es capaz de conmutar la salida de corriente para variar la velocidad de giro de un motor, es decir, convierte la corriente continua en corriente alterna. Este activa las bobinas del motor que rodean sus imanes mediante pulsos, los cuales son controlados y distribuidos en PEPS. Estos son de distintos amperajes y se seleccionan dependiendo de las necesidades del motor a instalar. Además, se debe acordar si este controlador tendrá BEC (Battery Eliminator Circuit) o no y que procesador de carga de firmware se utilizará.

i. **Battery Eliminator Circuit (BEC)**

Es un regulador de voltaje, el cual convierte el voltaje principal recibido desde la batería a voltajes bajos para alimentar a servos y unidad de control. Con su utilización se elimina la necesidad de utilizar otra batería, y así mismo, no aumentar el peso total de la aeronave. Al momento de su elección, se tienen tres opciones:

- a. Lineal:** reducen el voltaje de la batería a un nivel apropiado al receptor por medio de resistores, los cuales producen mucho calor y consumen parte del amperaje disponible si es sobrecargado.
- b. Switching:** este variador regula el voltaje recibido de la batería mediante pulsos, para bajarlo de una manera más efectiva y sin perder calor.

- c. **OPTO:** Es la opción de utilizar un controlador de velocidad de motores sin la utilización de BEC, es decir, que las señales se reciben directamente desde la unidad de mando. Al utilizar esta opción, es necesario utilizar un BEC no incluido en el ESC para alimentar con energía la unidad de control.

ii. Procesador de carga firmware

- a. **Simon K:** está preconfigurado para multirrotores, pero con un tiempo alto de respuesta.
- b. **BL Heli:** Además de estar preconfigurado, puede poseer sistema one-shot para mejorar a respuesta del controlador de velocidad con respecto a la unidad de mando. El controlador de velocidad se puede configurar a través del computador con el uso de la interfaz BLHeli Suite.



Ilustración 18: Ejemplo de ESC, marca Turnigy Multistar 32bit 30^a 2~4S (OPTO).

14.3.3 Subsistema de Trabajo

El subsistema de trabajo es el que ejecuta la propulsión del sistema, en este caso se compone de un conjunto de motores y hélices.

14.3.3.1 Motores eléctricos

Son máquinas eléctricas rotatorias que transforman la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, debido a los campos magnéticos que afectan las bobinas de su núcleo.

i. Motores con escobilla (Brushed)

Los motores con escobillas transforman la energía eléctrica, recibida desde un cable conductor hacia los bobinados del rotor, en energía mecánica de rotación. Este tipo de motores de corriente continua posee 4 componentes principales que generan su movimiento:

- Carcasa: es el cuerpo principal del motor que, por su parte interior, posee un par de imanes fijos que genera un campo magnético estacionario, rodeando al rotor.
- Rotor: es una pieza con polos magnéticos alrededor de los cuales se enrollan un cable, el cual es llamado bobinado, cuando se energiza el motor se producen campos electromagnéticos que provocan el movimiento del rotor, transmitiendo el movimiento hacia el exterior por medio de un eje.
- Conmutador: es un interruptor que provoca una transición entre los polos (+) y (-): Este se conecta a un conjunto de láminas de cobre, aisladas entre sí que giran solidariamente con el rotor, las que se conectan eléctricamente al rotor y a las escobillas, permitiendo el paso de energía desde la fuente exterior.
- Escobillas: permanecen fijas al estator y están en contacto permanente con el conmutador, permitiendo el paso de corriente eléctrica desde el exterior al conmutador.

ii. Motores sin escobilla (Brushless)

Los motores sin escobilla son motores eléctricos que funcionan con corriente alterna (en equipos electrónicos se utilizan pulsos de ancho modulado, PWM³). Estos se caracterizan porque permiten un gran rendimiento y potencia, pero también un gran consumo. Los motores Brushless están compuestos por:

- Carcasa: parte fija del motor sobre la cual van dispuestos los bobinados del cable conductor.
- Rotor: parte móvil del motor que contiene imanes permanentes que giran bajo el efecto de los campos magnéticos generados en los bobinados de la carcasa, es así como se produce el giro del eje del motor.

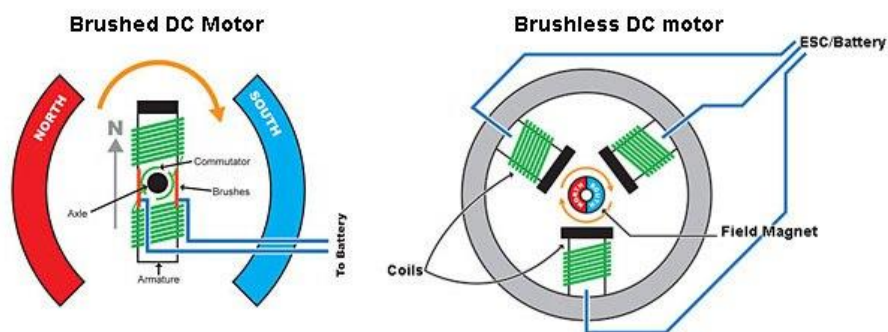


Ilustración 19: Diagrama de funcionamiento de motores Brushed y Brushless DC. Imagen de aprendiendoarduino.com.

³ Modulación por ancho de pulsos (Pulse-Width Modulation), es una técnica utilizada en las señales de voltaje para enviar información o para modificar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Las principales características de este tipo de motores, es que la velocidad es variada dependiendo de la cantidad de energía que se aplica al mismo, se mide en kV, que se define como la capacidad del motor de transformar la energía eléctrica en velocidad, o par, los cuales pueden variar según las indicaciones entregadas al controlador de velocidad electrónico (ESC).

Dentro de los motores Brushless existen dos tipos de motores utilizados para la construcción de UAV's, los Inrunner y Outrunner.

a. Inrunner

Los motores inrunner tienen su núcleo de rotación dentro del motor, al igual que los motores brushed. Estos tienen la capacidad de girar excepcionalmente rápido, pudiendo llegar a velocidades de más de 11.000 kV (revoluciones por minuto, rpm, por cada Volt aplicado), pero tienen poca transmisión de torque. Para reducir la velocidad del mismo e incrementar el torque se utiliza una caja de cambios unida al eje en el ensamblaje.

b. Outrunner

Los motores brushless outrunner hacen girar la carcasa fuera de sus devanados. Estos giran más lento que los inrunner, pero producen más torque en su funcionamiento, lo que hace que sea una opción para eliminar los excesos de peso, las pérdidas de eficiencia y el ruido de una caja de cambios. En sus aplicaciones, se han visto favorecidos por su relación peso-potencia.

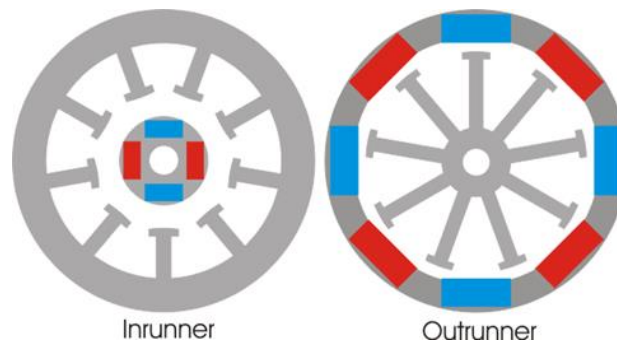


Ilustración 20: Disposición electroimanes en motores Inrunner y Outrunner, imagen de Elecronoobs.com.

14.3.3.2 Hélices

Las hélices están ancladas al eje del motor, mediante hilo o ajuste a presión, siendo las que provocarán el impulso del Drone para ejecutar el vuelo debido a la presión de aire generada por el giro del eje del motor. Estas están fabricadas en plástico o fibra de carbono y poseen forma aerodinámica para generar el impulso. Según las necesidades del usuario, se seleccionarán sus dimensiones y paso, siendo necesario, además, tener en cuenta la simetría

de construcción de ellas debido a que si existe cambio en peso se producirán vibraciones en el funcionamiento, que generan pérdidas de energía y desestabilización en pleno funcionamiento.

Al momento de hacer el montaje de las hélices, se debe tener en cuenta que en el modelo QUAD, deben ir dos hélices en un sentido (horario) y otras dos en sentido inverso (antihorario). Esto permite la correcta maniobra del Drone en movimiento.

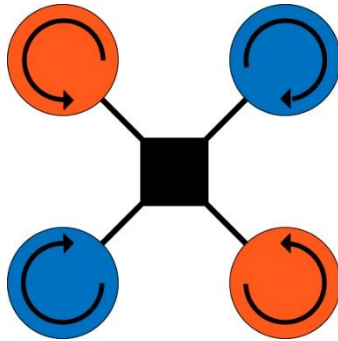


Ilustración 21: Esquema de giro de hélices montadas en las alas del QUAD.

14.3.4 Subsistema de Energización

Es el encargado de entregar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema, en este caso se entrega la energía a la *Unidad de Control* y al Subsistema de Transmisión. Actualmente, la energización se realiza mediante baterías.

14.3.4.1 Baterías

Las baterías son dispositivos que almacenan energía de forma electroquímica, entregándola a los equipos conectados a ella. Básicamente, existen dos tipos de baterías: primarias, con reacción electroquímica irreversible, y secundarias, con reacción electroquímica reversible y eficiencias en su ciclo de carga y descarga del 70%-80%⁴.

Su funcionamiento se basa en la utilización de celdas electroquímicas con dos electrodos: el ánodo, donde se lleva a cabo la oxidación, y el cátodo, donde se efectúa la reducción. Ambas se conectan por un puente salino, haciendo fluir una corriente eléctrica desde el ánodo al cátodo debido a la diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos.

⁴ Documento "Tecnología de Baterías" del Departamento de Electrónica UTFSM.

Las características principales al momento de elegir una batería son:

- La cantidad de energía que puede almacenar.
- La máxima corriente que puede entregar en descarga.
- La profundidad de descarga que puede sostener.

Existen distintos tipos de baterías, siendo las más comunes de: Plomo-ácido (Pb-ácido), que son utilizadas en automóviles e instalaciones fotovoltaicas, entre otros; Nickel-cadmio (NiCd), utilizadas en juguetes, equipos estéreos, máquinas fotográficas, entre otros; Nickel-hidruro metálico (NiMH), para vehículos de propulsión eléctrica e híbridos; Ion-litio (Li-ion), en teléfonos móviles, notebooks y lectores de música; Aire-Zinc, para prótesis de oídos, aparatos electrónicos portátiles, entre otros; Celdas de combustible; Polímero-litio (Li-Po), en computadores portátiles de Apple, autos eléctricos y aeronaves no pilotadas.

En Drones, es común el uso de baterías Li-Po, que están compuestas de varias celdas de 3,7 V dispuestas en paralelo para entregar mayor capacidad de corriente en la descarga, tienen una mayor duración en número de cargas, y en donde el factor relevante para su elección es el mayor tiempo de autonomía de vuelo. Para lograr esa característica, es necesario tener en consideración el peso del equipo completo, el consumo de corriente de los equipos electrónicos, las características dimensionales de la batería, su capacidad para entregar corriente en la descarga, la velocidad de descarga y el número de celdas.



Ilustración 22: Ejemplo de batería Li-Po marca Turnigy 2200 mAh 3S 40C.

14.3.4.2 Conectores

Los conectores de batería dependen del flujo de corriente que este debe suministrar a los equipos electrónicos. En el mercado existen varias marcas, como JST, Bananas Gold, XT, etc., con amplio rango de amperaje ($\sim 5\text{ A}$ - 200 A). Este se debe elegir según la cantidad de energía que debe proveer la batería.



Ilustración 23: Ejemplo de conector XT60, macho y hembra para batería Li-Po.

14.3.5 Subsistema de Captura/Carga

Es el encargado de capturar la información del entorno en el cual se mueve el Drone o realizar un trabajo en él, ya sea con toma de imágenes, como utilización de sensores y transporte de cargas/herramientas.

14.3.5.1 Sensores y cámaras

Es necesario que el Drone, en su estructura, incluya sensores que permitan una mejor maniobra de vuelo, controlando las características de estabilidad, giro y desplazamiento del mismo. Actualmente, algunos sensores se hacen indispensables, como:

- **IMU (Inertial Measurement Unit)**, es la unidad de medición inercial, la cual se encarga de realizar mediciones que determinan la posición relativa con respecto al estado inmediatamente anterior, conociendo sus aceleraciones, desplazamientos y posiciones en cada momento mediante acelerómetros, giroscopios o magnetómetros.
- **Acelerómetro**, que detecta el movimiento lineal, detectando el movimiento a lo largo de los ejes espaciales *X*, *Y* y *Z*.
- **Giroscopio**, que detecta el movimiento rotacional del Drone, midiendo el movimiento alrededor de los ejes espaciales *X*, *Y* y *Z*.
- **GPS**, para comunicar la posición vía satélite a una aplicación móvil o computador, como también para pre programar rutas. La precisión depende de la calidad de la unidad GPS del sistema que preste el servicio.
- **Magnetómetro**, para medir la intensidad de campo magnético en 3 ejes.
- **Ultrasonidos**, para detectar la altitud de desplazamiento.

Además, se hace necesaria la captura de información del entorno y su rápida transmisión al usuario, para lo cual se utilizan cámaras capaces de fotografiar y grabar imágenes en pleno vuelo. Existen distintos tipos de cámara según la aplicación final que se dará al Drone, algunas de ellos son:

- **HD y Wifi**, para captura de imágenes y grabación de videos de forma instantánea, con tecnología FPV.

- **Termográficas**, para capturar imágenes de cuerpos con variaciones de temperatura.
- **Multiespectrales**, para capturar ondas electromagnéticas que no son percibidas por el ojo humano.
- Otros sistemas que pretenden aumentar la capacidad del ojo humano y así ayudar a la mejor captura de información.

14.3.5.2 Otros

Algunas empresas han utilizado los Drones como herramientas para la distribución de paquetes, ya sea por medio de encargos por compras o como entrega de equipamiento de emergencia en zonas de difícil acceso por vía terrestre. Incluso, existen utilizaciones de estas aeronaves que, junto con equipamiento u herramientas adecuadas, pueden llegar a generar nuevas e innovadoras utilizaciones en un futuro cercano. Para hacer posible esto, en pleno vuelo se debe lograr el soporte de la carga extra, como también adecuarse a los movimientos generados por la misma.

14.3.6 Subsistema de Soporte

Es el que une todos los dispositivos eléctricos y electrónicos del Drone entregándoles soporte y funcionalidad. Su diseño se ve afectado por las dimensiones de los equipos que se desean instalar y sus configuraciones de anclaje, debiendo soportar de forma rígida y estable las maniobras a realizarse durante el vuelo, para lo cual existen distintas configuraciones y materiales de construcción.

Algunas configuraciones actuales se enfocan en la necesidad de espacio de los dispositivos electrónicos a utilizar y en la simetría de su inercia para provocar un vuelo estable. Configuraciones en x, en + y en H son algunas comunes en modelos QUAD.

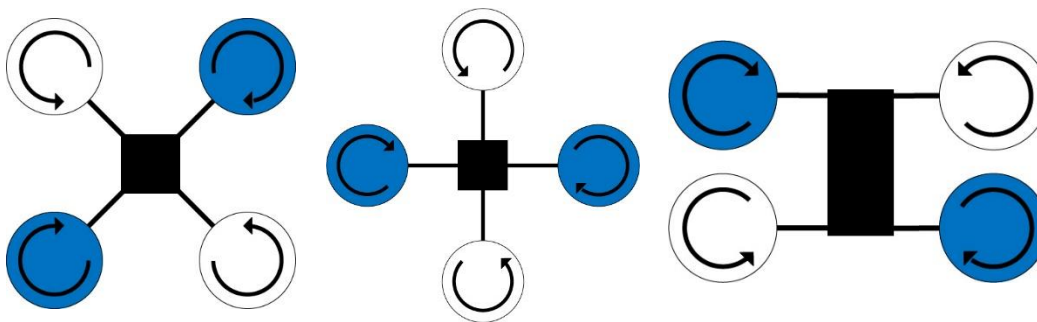


Ilustración 24: Configuraciones de modelos QUAD en "x", "+" y "H", de izquierda a derecha.

Otro factor son los materiales utilizados en la fabricación que dependen en la actualidad del desarrollo de la tecnología, siendo los más utilizados fibra de carbono y plástico (ABS, PLA, PETG), moldeado y fabricado con manufactura aditiva, respectivamente. Otros materiales también utilizados son nylon, policarbonato y aluminio.

En la elección del material adecuado es necesario considerar el medio ambiente en el que actuará, las cargas externas, los esfuerzos que debe soportar y posibles modos de falla, así como también se debe considerar que el peso propio debe afectar lo mínimo posible, todo esto para entregar las mejores características físicas, menores costos, mayor duración, y facilidad y acceso en su fabricación. Para el diseño en detalle de las características físicas es posible realizar simulaciones utilizando tecnología de VP.

En este caso, se selecciona una configuración “+” para el diseño, compuesto de 5 piezas estructurales: 4 alas que soporta los conjuntos motor-hélice y su respectivo ESC, y una base que entrega el soporte de todo el equipamiento electrónico de control y baterías.

14.4 Variables para selección de equipos

Para el diseño de la estructura, se considera la relación existente entre cada uno de los subsistemas descritos. Se observa la influencia existente entre estos hacia el Subsistema de Soporte, en específico, desde el Subsistema de Control, con su unidad receptora y controladora de motores, el Subsistema de Energización (baterías), y en casos el Subsistema de Transmisión (ESC), que condicionan al diseño de la base; y el Subsistema de Trabajo (motores y hélices), y casos en que el Subsistema de Transmisión (ESC), condicionan el diseño de las alas del Drone. Junto con esto, el Subsistema de Captura/Carga puede estar inmerso dentro de la estructura base, como también puede pertenecer a una pieza externa. La dependencia de los Subsistemas se muestra esquemáticamente en “Ilustración 25”.

Para hacer efectivo el funcionamiento del Drone, se debe tener en consideración cómo se seleccionarán los equipos a montar y cómo afectan en el diseño de la estructura cada uno de ellos. Como se mencionó anteriormente, el Subsistema de Trabajo y el Subsistema de Transmisión son los que afectan en las características físicas de las alas del Drone, mientras que el Subsistema de Control/Receptor, el Subsistema de Transmisión igualmente, y el Subsistema de Energización, influyen en las características dimensionales y físicas de la base.

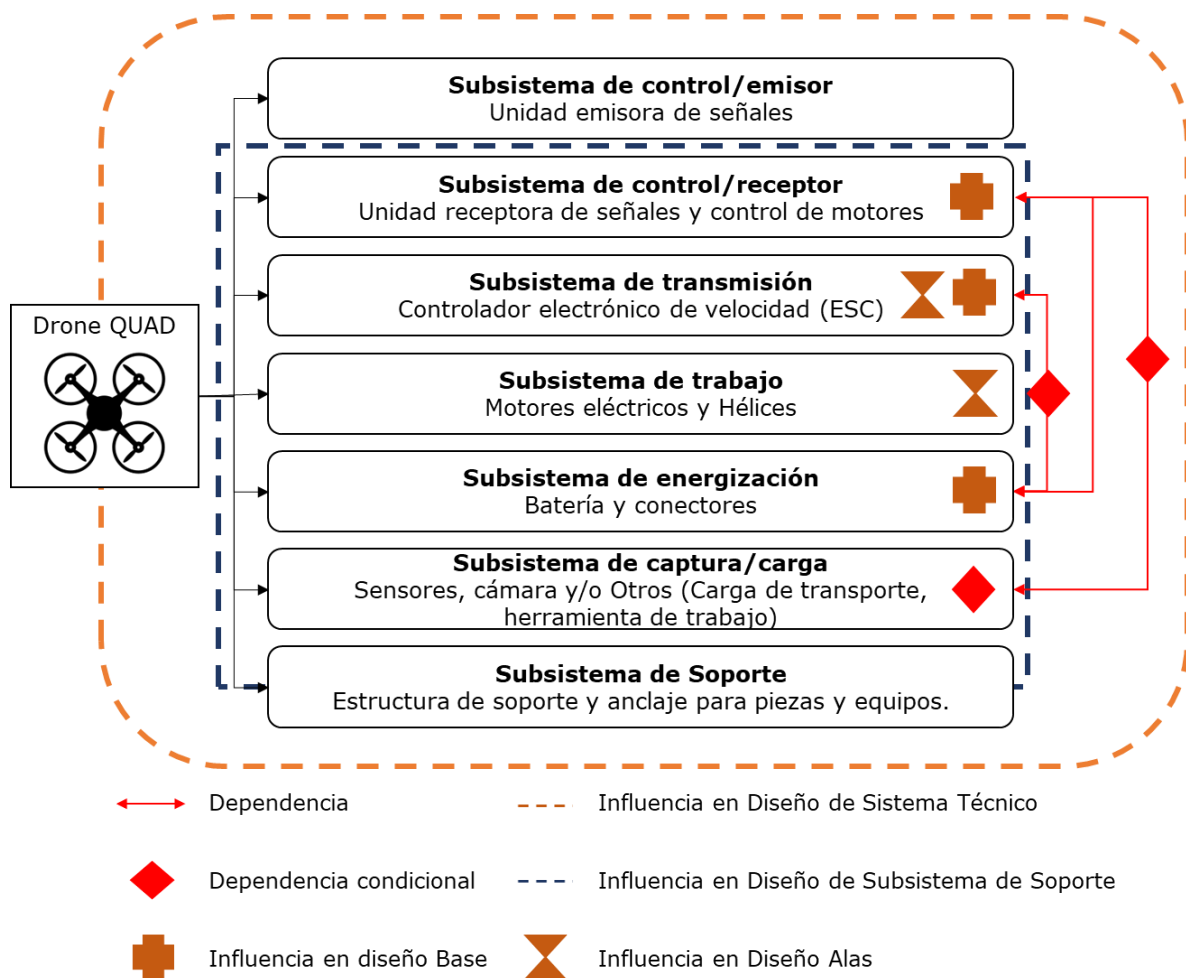


Ilustración 25: Dependencia de Subsistemas de Drone, influencia en Diseño de estructura.

14.4.1 Variables para la selección de equipos en ala

Para seleccionar equipos electrónicos que influyen en el diseño del ala, se utiliza un modelo teórico-práctico, el cual se explica a continuación:

1. **Estimación de masa/peso del Drone**, según requerimientos del usuario. Como recomendación, se debe sobreestimar el peso para la selección de equipos y se debe tener en cuenta las posibles cargas extras (cámaras o cargas adicionales a equipos de control, procesamiento, energización y propulsión). Esta estimación depende

específicamente de la utilización que se dará al Drone y debe ser revisada luego de la selección final de equipos para definir si esta es correcta o debe ser modificada.

2. **Definición de relación Empuje/Peso (R_{EP})**, según rango de velocidad esperado en el ascenso, desplazamiento horizontal y la agilidad para estas variaciones. Esta relación define una forma inicial del movimiento del Drone. Para la construcción de un modelo Quad, se debe considerar la relación Empuje/Peso que proporcionarán los cuatro sistemas motor-hélice, los cuales impulsarán el peso total de la aeronave. Para cada motor, se considera un porcentaje mayor de un 50% que el peso del equipamiento estimado en el “Paso 1”, por ende, su valor será siempre mayor a 1 para hacer efectivo el vuelo. Esta relación se designará como R_{EP} .
3. **Cálculo de Empuje estimado o fuerza de propulsión (F_{PR})**, con los pasos anteriores, es posible obtener una aproximación al Empuje necesario que deben entregar los motores del Quad para provocar el ascenso:

$$F_{PR} = \frac{Peso_{DRONE}}{4} \cdot R_{EP} [N] \quad (ec. 1)$$

4. **Estimación de la velocidad media del Drone**, según velocidad esperada, se considerarán velocidades entre los 50 y los 260 km/h, haciendo una aproximación al movimiento del Drone.
5. **Elección de Kv según movimiento del Drone**, según tipo de velocidad esperada, los Kv del motor representan la velocidad de giro del eje del motor (rpm) por cada voltio (volt) aplicado, por tanto, para una baja velocidad del Drone se necesitan bajos valores de Kv, actuando de forma proporcional. Recomendaciones de desarrolladores actuales entregan algunas aproximaciones para esta selección, las cuales se muestran a continuación:

Kv	Velocidad del aire km/h
1000	70
2000	140
3000	210
4000	280

Tabla 2: Valores de Kv según el viento que soportará en vuelo el Drone.

6. **Estimación de Potencia Efectiva (P_{EFT})**⁵, considerando el movimiento del Drone. En esta etapa se tiene una estimación teórica de la potencia que puede ser considerada

⁵ Ver Anexo 18.2: “Estimación teórica de Potencia efectiva”.

para seleccionar un motor de catálogo, en conjunto con el valor de K_v , indicado anteriormente.

7. **Relación de Potencia/Empuje**, se realiza el cálculo de esta relación desde una ecuación empírica⁶ dependiente de manera proporcional a los K_v del motor y de la *potencia* que necesita el motor para que genere el *empuje* necesario.

$$\frac{Potencia}{Empuje} = 0,17 \cdot \frac{K_v}{1000} + 0,09 \quad (ec. 7)$$

La “ec. 7” se obtiene de realizar en un ensayo en donde se mide la potencia y el empuje generado por distintos motores (distintos K_v), en donde se pueden variar las dimensiones de hélices para analizar su comportamiento.

Nota: esta queda plasmada como una ecuación a evaluar en el futuro, luego de las pruebas de los equipos seleccionados para comprobar el comportamiento empírico encontrado en otros desarrolladores.

8. **Otro Cálculo de Potencia**, con el cálculo del **paso 3** en unidades de gramos y la relación calculada en el **paso 7**, es posible obtener un valor aproximado de *potencia* del motor que se seleccionará según catálogos de fabricantes:

$$P_{EFE} = Empuje[gramos] \cdot \frac{Potencia}{Empuje} \quad (ec. 8)$$

Nota: se recomienda utilizar potencias de un 40% o 50% más alto al momento de realizar la selección de motores.

9. **Selección de Hélice**, según recomendaciones de catálogo de motores entregadas por los fabricantes y tomando en cuenta el empuje necesario según el “Paso 3”. Por otra parte, es posible realizar una estimación teórica a partir de la elección de la velocidad de vuelo (“Paso 4”) y la estimación del empuje señalada anteriormente⁷. Se debe tener en consideración que, junto con la elección del motor, se selecciona una hélice con diámetro acorde al eje del motor.

10. **Selección de ESC**, según recomendaciones, se debe elegir un ESC de corriente de 1 a 5 A mayor a la necesitada por el motor seleccionado de catálogo.

⁶ Utilizada en la selección de motores dependiendo de la velocidad que pueden entregar los motores según los Volt que se le entregan a un motor. Ecuación empírica de desarrolladores.

⁷ Ver Anexo 18.3: “Estimación teórica del diámetro de hélice”.

11. Selección de PDB, según la corriente necesaria para el funcionamiento de los ESC, la cantidad de conectores y el tipo de conector para la batería.

14.4.2 Variables para la selección de equipos en base

La selección de equipos electrónicos que se anclarán en la base de Drone son los pertenecientes al Subsistema de Control/Receptor, al Subsistema de Transmisión, al Subsistema de Energización y al Subsistema de Captura/Carga.

En primer lugar, se escoge el **sistema receptor** que procesará las señales recibidas desde el usuario y el Subsistema de Control/Emisor. Para esto, se debe **acordar el canal de comunicación** entre emisor y receptor, ya sea por señal wifi, bluetooth o radiofrecuencia.

Luego, se elige el **sistema de conexión entre ESC y baterías**. Para su selección, es necesario tener en cuenta cual es la corriente necesaria para el funcionamiento de cada uno de los ESC, la cantidad de conexiones y el tipo de conector que se anclará a la batería.

Además, se necesita realizar la **conexión entre receptor y sensores** a la unidad de control del Drone, que procesará todas las señales recibidas y las direccionará para su correcto funcionamiento. Para estas unidades se desarrolla tecnología avanzada cada año, por tanto, es necesario elegir al momento de su construcción considerando los voltajes y corrientes necesarios y permitidos, además, de sus dimensiones.

Cuando se tienen en cuenta todos los equipos, se selecciona la **batería que entregue energía al sistema completo**, que cuente con las características de voltaje y corriente necesarios para entregar la energía necesitada, por el mayor tiempo posible, utilizando el menor espacio y produciendo una carga mínima.

14.5 Selección de equipos Drone

Se realiza la selección de equipos para 2 montajes con distinta velocidad esperada de vuelo y distinta masa: una de 140 km/h y 0,5 kg, y otra para alcanzar los 70 km/h con 2 kg de masa. Para cada uno, se escogen los dispositivos a instalar en alas y base del Drone.

14.5.1 Selección de equipos en ala

Con la estimación inicial de peso y velocidad para ambos montajes, se realizan los cálculos señalados en la sección 14.3.1 para la selección de equipos, los cuales se muestran a continuación:

Característica física	Montaje 1	Montaje 2
Masa [kg]	0,5	2
Empuje/peso	1,5	1,5
F_{PR} [N]	1,84	7,35
v [km/h]	140	70
Kv	2000	1000
P_{EFT} [W]	128	255
Potencia/Empuje	0,43	0,26
P_{EFE} [W] + 50%	121	292
ϕ_{HELT} [mm]	100 ⁸	289 ⁹

Tabla 3: Valores estimados en selección de equipos para ambos montajes.

Con estas estimaciones, se seleccionan motores con características similares para dar cumplimiento a los requerimientos de cada montaje. Junto con esto se seleccionan las hélices para cada uno según tablas de selección entregadas por los fabricantes¹⁰, las cuales son ensayos realizados a los motores, para obtener valores empíricos de empuje. Además, se realiza la elección del ESC necesario para cada motor (4 por cada montaje)¹¹.

14.5.2 Selección de equipos en base

Para el control de señales dentro del Drone, se utilizará un sistema integrado de control y procesamiento de señales, recibiendo señales desde el Sistema de Control/Emisor, el Sistema de Transmisión y el Sistema de Energización. Actualmente, existe una posibilidad de integrar las conexiones de cada uno de ellos, de forma compacta, y será la que se instalará como cerebro del Drone en ambos casos, este es un Erle-Brain3, el cual integra una Raspberry Pi con conexión WiFi y Bluetooth, IMU con sensores para la estabilidad del Drone, PDB para la conexión de los ESC, cámara integrada, GPS, y otros sensores que entregan, de forma compacta, la mayoría las características necesarias para el funcionamiento del Drone.

⁸ Con Factor de Seguridad 1,8.

⁹ Con Factor de Seguridad 1,3.

¹⁰ Ver Anexo 18.4: “Selección de hélices según recomendaciones de fabricantes”

¹¹ Ver Anexo 18.5: “Equipos para montaje en estructura”



Ilustración 26: Erle-Brain3 con GPS incluido. Imagen de erlerobotics.com.

Además, se opta por utilizar un protocolo de comunicación RC, para lo cual se conectará un receptor de seis canales y antena, un UBEC, que transforma el voltaje de la batería para su utilización en el sistema Erle-Brain3, y, además, una batería de 11,1 V y energía disponible para su utilización aproximada de 15 a 20 min¹².

14.6 Requerimientos específicos para diseño conceptual

Se selecciona **el modelo QUAD en configuración “x”**, con el cual se trabaja para conseguir características de simetría en el anclaje de equipos y piezas, dando de esta forma un balance de inercia, entregando estabilidad al diseño. Para los equipos seleccionados, se realiza un diseño conceptual de una estructura soporte que se ajuste al tamaño y configuraciones de anclaje de los equipos escogidos, la cual dependa de parámetros dimensionales y/o físicos específicos que al modificar entreguen una solución conceptual idéntica, pero a distintas escalas.

14.6.1 Características para diseño de ala

Para el diseño de ala se realizan consideraciones ergonómicas, dimensionales y físicas, como su aerodinámica, material de fabricación, su resistencia a esfuerzos¹³, y densidad en la fabricación¹⁴. Se busca el cumplimiento de los requerimientos anteriores junto con la adaptación de esta a ambos montajes, es decir, un diseño que sólo cambie sus dimensiones manteniendo su forma original, considerando¹⁵:

¹² Ver Anexo 18.5: “Equipos para montaje en estructura”

¹³ Ver Anexo 18.7 “Selección de material en impresora Ultimaker 2+”.

¹⁴ Ver 14.9 Prototipo asistido por computador.

¹⁵ Esquema inicial con consideraciones de diseño se muestra en Anexo 18.6.

- **Diámetro de motores**, considerando que la estructura debe ser de 3 a 5 mm mayor al diámetro de los motores en su zona de anclaje.
- **Configuración para sujeción de pernos**, debido a que la configuración vista en los motores es en cruz y con distintas distancias desde el eje para el anclaje de tornillos, se debe tener un rango de amplitud para su correcta sujeción.
- **Longitud de hélices**, las cuales no deben sobrepasar en longitud al largo del ala, y tampoco tener intersección entre ellas en su funcionamiento.
- **ESC a través del ala y/o base**, considerando su posición y modo de sujeción a la estructura.
- **Anclaje de ala con base**, de una forma que asegure la estabilidad y
- **Otros criterios**, que entreguen una forma ergonómica y aerodinámica, adaptable al usuario al momento del anclaje de piezas, además, bajo peso y con posibilidades de anclar otro tipo de piezas, como protección de alas.

14.6.2 Características para diseño de base

Para el diseño de la base del Drone, se considera el modo de anclaje y las dimensiones de los equipos a instalar. Junto con esto, se hace necesario notar la posición correcta de estos para provocar un balance en las piezas, ayudando así a estabilizar la inercia del sistema completo y disminuir el consumo de energía de los motores. Además, es necesario que esta sea adaptable para el usuario al momento de su anclaje, y que tenga posibilidad de anclar otras piezas, como una estructura de soporte en su fijación o el posible uso de un sistema de cámara en suspensión.

14.7 Desarrollo de modelo CAD

Se modela la estructura del Drone en el software de modelación 3D Autodesk Inventor, según los requerimientos específicos de diseño, tomando en cuenta además algunas consideraciones aerodinámicas básicas como: bordes suaves, estructura de peso ligero y rígido, y, en caso de ser necesario, la realización de perforaciones en partes de material para mejorar el flujo de aire dentro de la estructura y eliminar peso; otras consideraciones para el anclaje de piezas y equipos, como perforaciones para pernos u otro estilo de anclaje de piezas que genere estabilidad en la estructura; junto con consideraciones ergonómicas y estéticas.

El requerimiento inicial para el diseño conceptual es la necesidad de adaptar este de forma modular, es decir, que se dé la posibilidad de fabricar un conjunto de piezas que al conectarse cumplan su función principal; y, debido a que se utilizará manufactura aditiva en su fabricación, que sea de dimensiones dentro de las posibles a fabricar en la impresora 3D.

Cumpliendo con lo anterior, se entrega una propuesta de diseño que depende dimensionalmente de cinco parámetros que entregan de forma inicial las dimensiones totales

de la aeronave. Estas son: **diámetro de motor**, **diámetro de pernos** de sujeción de motores y equipos electrónicos, **longitud de hélices**, el **largo máximo de la unidad de control** y el **ancho máximo de la misma**, los cuales se instalarán en la base. Con estas dimensiones se realiza una primera caracterización del modelo CAD. Junto con esto, se consideran las configuraciones que muestran los sistemas de sujeción a instalar para realizar las perforaciones pertinentes.

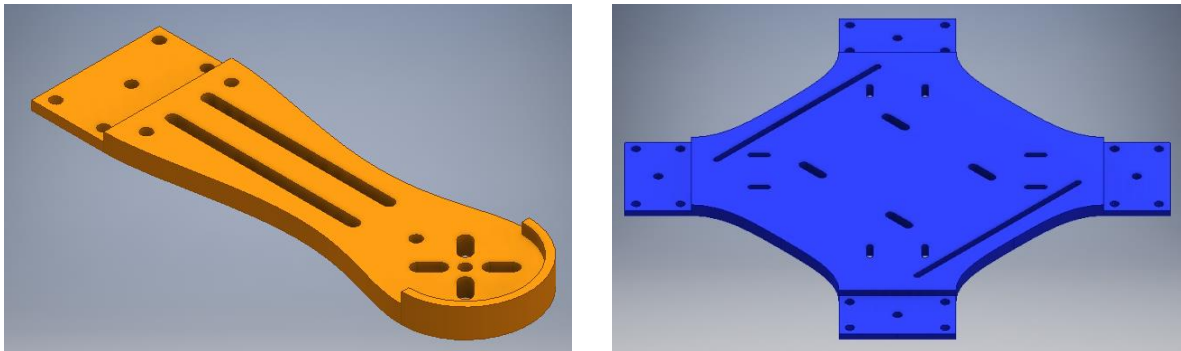


Ilustración 27: Diseño conceptual en CAD de alas y base de Drone.

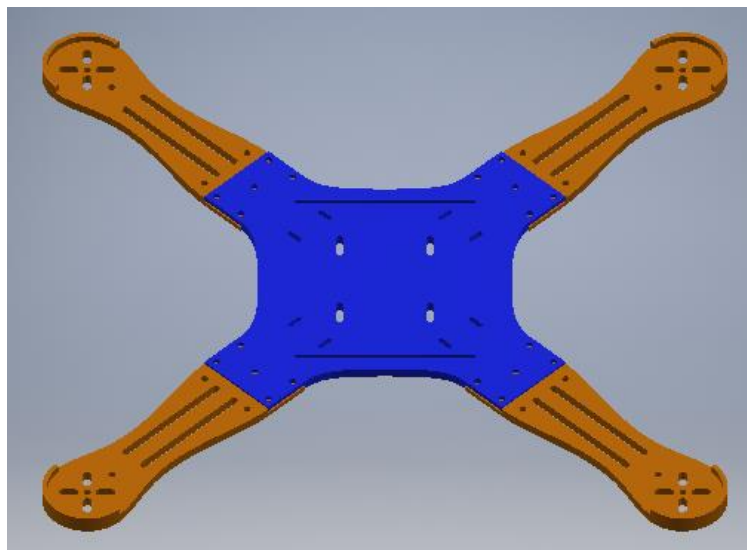


Ilustración 28: Conjunto de piezas, diseño conceptual en CAD del Drone.

14.8 Parametrización

Para el diseño paramétrico del Drone, se genera la dependencia de cada una de las dimensiones de la estructura, con respecto a *parámetros iniciales*¹⁶, los cuales van ligados a los requerimientos específicos del diseño, mostrados en la *sección 14.4*, generando así un proceso de diseño efectivo, versátil y con tiempos cortos de modificación.

Para realizar la parametrización de variables se utilizan las aplicaciones del software de modelación CAD Autodesk Inventor, ligado a los parámetros de diseño ingresados a una base de datos, en la cual se indican las dimensiones iniciales de los equipos que se instalarán en la estructura a diseñar. Los parámetros ingresados por el usuario dan la forma de ajuste para instalar los equipos a la estructura del Drone y pueden ser medidos con facilidad en ellos, o utilizar las medidas entregadas por los fabricantes para las dimensiones pedidas:

- i. **Diámetro de pernos motor (D_P):** Se debe indicar el diámetro de los pernos de sujeción del motor a la estructura, indicando sus medidas en milímetros [mm].
- ii. **Diámetro de motor (D_M):** El diámetro del motor lo entrega el fabricante en las hojas de información o puede ser fácilmente medido con una regla, se deben indicar las medidas en milímetros [mm].
- iii. **Diámetro o Longitud de Hélice (L_H):** Se debe indicar la longitud de la hélice, la cual genera el largo mínimo que deben tener las alas del Drone para no generar interferencia entre el movimiento de las hélices durante el funcionamiento.
- iv. **Longitud máxima unidad de control (L_B):** Para esta medida, se debe indicar el tamaño máximo de la unidad de control del Drone o de batería de energización, para generar una estructura que soporte estos equipos.
- v. **Ancho máximo unidad de control (A_B):** Se indica el ancho máximo de la unidad de control del Drone o de batería de energización.

14.9 Aplicación computacional asistida

Luego de la parametrización del diseño conceptual del Drone, se desarrolla una interfaz para el usuario que desee fabricar la estructura de la aeronave, en la cual este debe ingresar los parámetros dimensionales indicados en el ítem 14.7. Se considera que el usuario de esta interfaz no es necesariamente un experto en la utilización de herramientas de diseño de computador asistido para la fabricación de prototipos, por lo que esta se integra al trabajo de parametrización desarrollado, la cual, mediante una codificación en lenguaje VBA para Excel, entrega los parámetros necesarios al modelo CAD. La persona que lo utilice, debe guardar los

¹⁶ Ver Anexo 18.8 Requerimientos dimensionales de diseño conceptual

parámetros requeridos, abrir el dibujo en el software de modelación y exportar el sólido generado en formato .STL, para su posterior fabricación con impresión en 3D.

El funcionamiento de esta interfaz es simple. Al abrir el archivo, se ingresa a una pantalla con un diagrama explicativo de lo que se realiza automáticamente y al clicar el botón “INGRESAR DIMENSIONES”, se muestra una pantalla en donde el usuario debe ingresar las medidas solicitadas en milímetros. Además, se entrega una imagen demostrativa de la influencia que tendrán estos números en las dimensiones finales de cada pieza.

Al guardar el archivo, luego de ingresar las piezas, se actualiza el diseño del modelo CAD con las dimensiones ingresadas por el usuario. El esquema de influencias de diseño se muestra a continuación:



Ilustración 29: Influencias de dimensiones ingresadas por el usuario en el diseño del modelo CAD.

14.9.1 Funcionamiento de interfaz de usuario

Al ingresar a la interfaz de usuario, se muestra un diagrama explicativo de las influencias de las dimensiones de los equipos en el diseño de la estructura y la caja negra de transformación de parámetros al diseño CAD. El método de utilización es el siguiente:

- Abrir archivo .xlsm Interfaz.
- Clicar el botón “INGRESAR DIMENSIONES”.

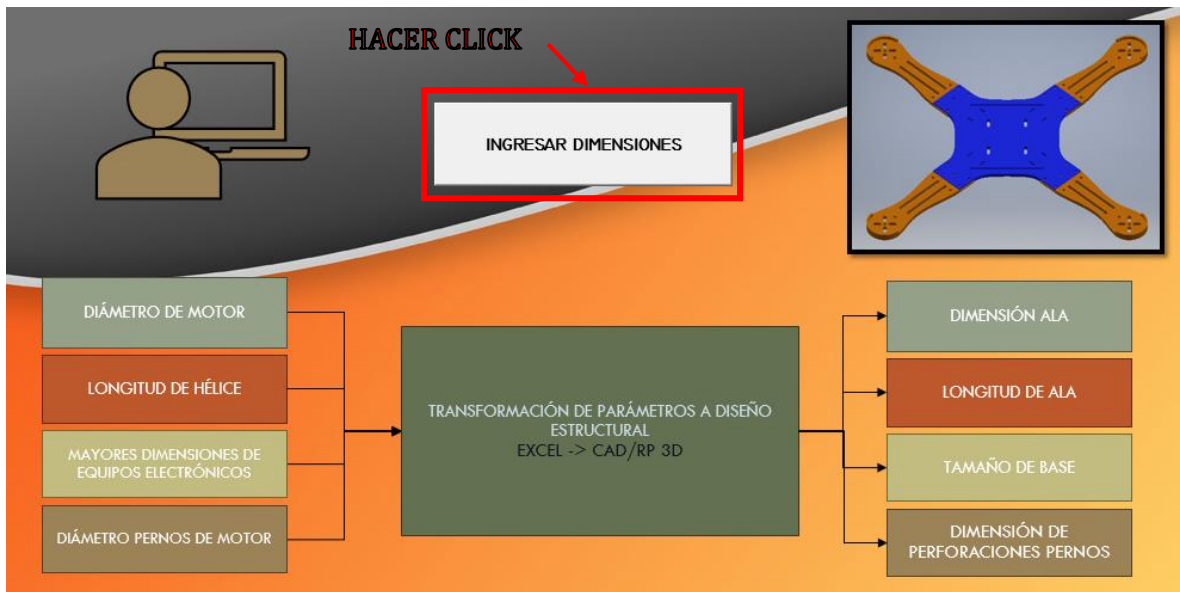


Ilustración 30: Ventana principal de interfaz de usuario.

- Al ingresar, se abrirá otra ventana de Dimensionamiento de la estructura del Dron (Ver “Ilustración 36”).
- Ingresar dimensiones en milímetros (según las entregadas por los fabricantes de los equipos o medidas por el usuario).
- Luego de ingresar las dimensiones, se hace click en el botón “VALIDAR DIMENSIONES”.
- Luego de validar las dimensiones es posible cerrar la interfaz, guardando el archivo antes de cerrar. Los parámetros están guardados.

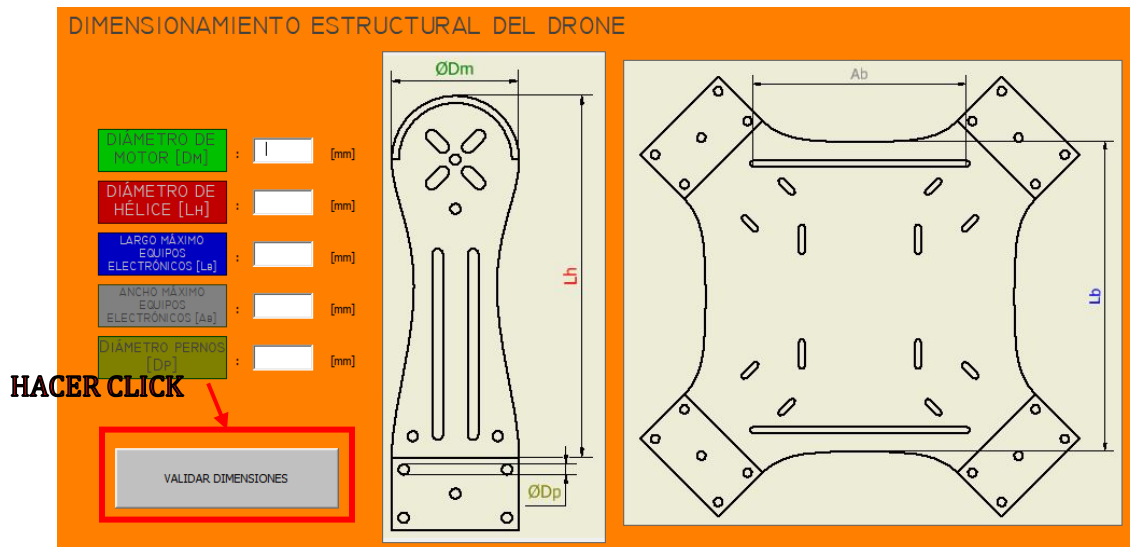


Ilustración 31: Ventana para el ingreso de variables e imágenes de influencia en el diseño.

14.10 Prototipo asistido por computador

Generado el archivo en formato .STL se obtiene lo necesario para poder hacer utilización de manufactura aditiva. En este caso, se realiza la manufactura en una impresora 3D¹⁷, con una variedad de materiales posibles a utilizar¹⁸ y tiene dimensiones acotadas para la fabricación en los planos “X”, “Y” y “Z” de 223x223x205 mm, respectivamente.

Dentro de la variedad de materiales posibles a utilizar en la fabricación con la impresora 3D, se elige el que tiene mayor resistencia a la flexión y resistencia al impacto (esfuerzos más recurrentes a los cuales se somete la estructura), entregando mayor rigidez y seguridad en caso de recibir impactos a grandes velocidades. Como se observa en “Gráfico 1”. Los mayores valores de resistencia a la flexión son de Policarbonato (95,5 [MPa]) y el Ácido Poliláctico (PLA, 103,3 [MPa]) y los mayores valores de resistencia al impacto son para el Poliuretano Termoplástico (TPU 95A, 34,4 [kJ/m²]) y Nylon (34,4 [kJ/m²]). De estos materiales, se elige el con mayor resistencia a la flexión (PLA), priorizando la rigidez de la estructura.

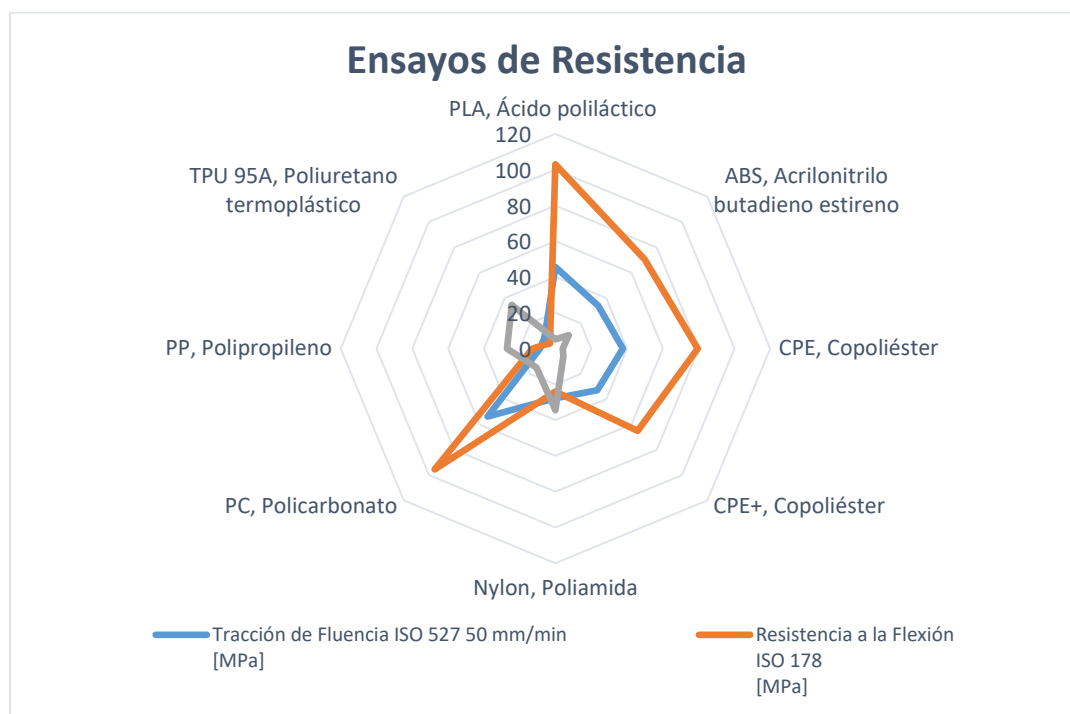


Gráfico 1: Ensayos de Resistencia de materiales para Ultimaker 2+, en base a la información recopilada de www.ultimaker.com.

¹⁷ Ver Anexo 18.9: “Información técnica Ultimaker 2+”.

¹⁸ Ver Anexo 18.7: “Características de materiales para Ultimaker 2+”.

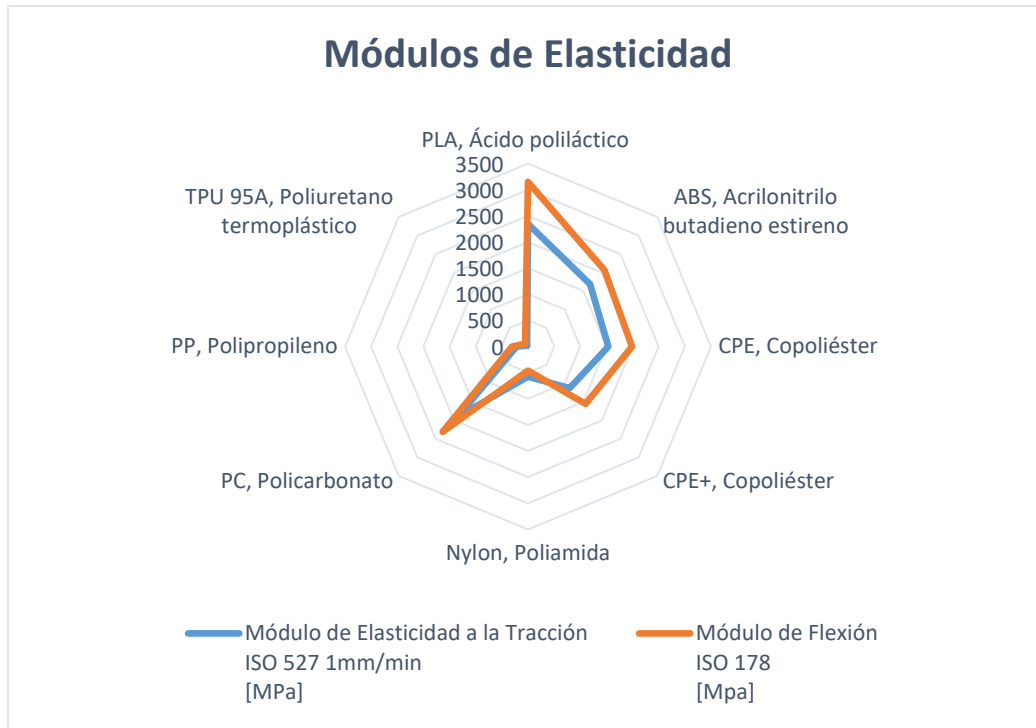


Gráfico 2: Módulos de Elasticidad en Tracción y Flexión entregados por Ultimaker para los materiales posibles a utilizar en su modelo de impresora Ultimaker 2+. Información de www.ultimaker.com.

En el proceso de manufactura aditiva, se consideran factores iniciales como: la temperatura de inyección, la dimensión de tobera de inyección, temperatura de placa y tobera; velocidades de inyección y la densidad de la estructura, la cual interviene en el tiempo total de fabricación de las piezas. Para los casos de estudio, se entregan los parámetros que definen la cantidad de material utilizado, y su peso aproximado.

Las piezas de la estructura se fabrican en PLA con inyector de 0,6 [mm]. Para las alas, se utiliza un 40% de relleno de material, utilizando un total de 7,04 [m] de filamento en su manufactura, y temperaturas de platillo e inyector de 60°C y 230°C, respectivamente. En la impresión de la base, se utiliza el mismo porcentaje de relleno que las alas, con 5,96 [m] de filamento, y temperaturas de platillo de 60°C y de inyector 240°C.

Pieza	Cantidad	Filamento utilizado [m]	Masa [g]	Tiempo fabricación [min]	Costo filamento ¹⁹ [\$ CLP]	% Relleno
ALA	4	7,04	52	352	\$864	40
BASE	1	5,93	46	314	\$782	40

Tabla 4: Cantidad de material utilizado para la fabricación de piezas de Drone.

¹⁹ El costo de filamento se estima con el porcentaje de masa de la pieza con respecto al costo por kilogramos de filamento en el mercado actual, aproximadamente \$17.000 CLP/kg.

14.10.1 Anclaje de piezas y prototipo final

Luego de modificaciones dentro del proceso de diseño, en donde se especificaron las configuraciones para los pernos de los motores, la posible fabricación de soportes para alas y base de la estructura, el cambio de dimensiones en la longitud de ala, y el espesor en la zona de sujeción de alas y base, se concluye una configuración para la estructura, la cual se muestra a continuación:

- **Alas de Drone**, en donde se consideran: el diámetro de motor, los agujeros que entregan la sujeción de pernos de motor y su configuración, la longitud de hélice, sujeción de cables, la forma del ala y la conexión con la base estructural. Además, se toma en cuenta para el diseño la posibilidad de adaptación a algún tipo de protección para las hélices conectadas.



Ilustración 32: Diseño final de Ala Drone para caso de estudio.

- **Base de Drone**, en la que se considera: la configuración de los pernos de sujeción con Ala, las dimensiones del controlador y batería que se utilizan en el Drone, la sujeción de ESC's a la base del Drone, y la conexión de la unidad de control de motores.

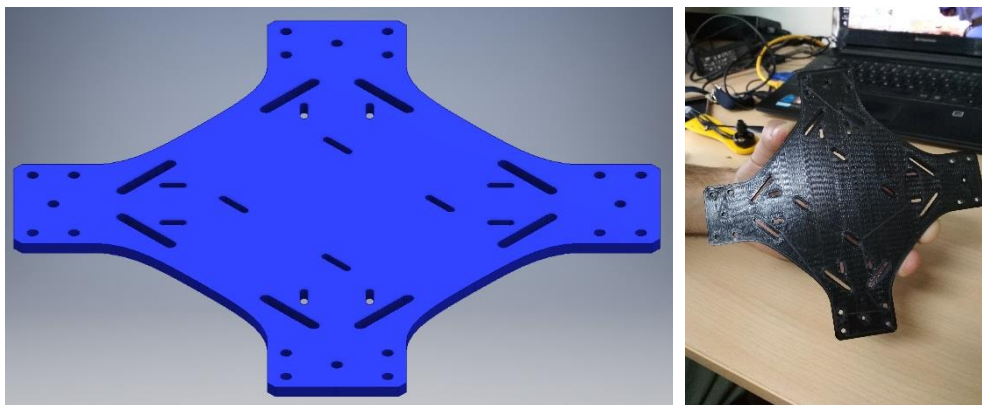


Ilustración 33: Diseño final de Base Drone para caso de estudio.

- **Soporte para controlador de vuelo**, en donde se utiliza la sujeción inicial de Erle Brain 3 adaptado a la estructura diseñada. Se desplaza la posición fija del controlador a una altura que entregue la posibilidad de manejar el conjunto de ESC, antenas y conexiones de cables, por debajo de la unidad de control.

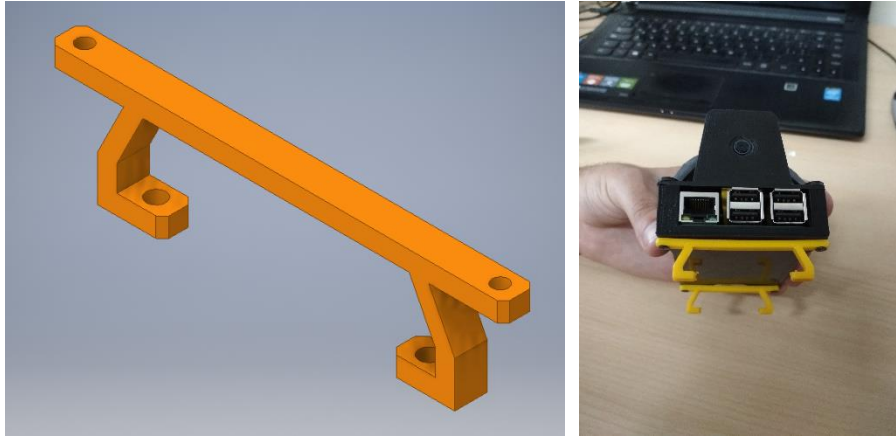


Ilustración 34: Diseño final Soportes Unidad de Control Drone para caso de estudio.

- **Soporte para estructura**, por seguridad de los equipos instalados bajo la estructura, para que no reciban impacto en momento de aterrizaje de la aeronave, además de entregar estabilidad cuando esta no se está utilizando. Su sujeción es a presión con la estructura Base del Drone.

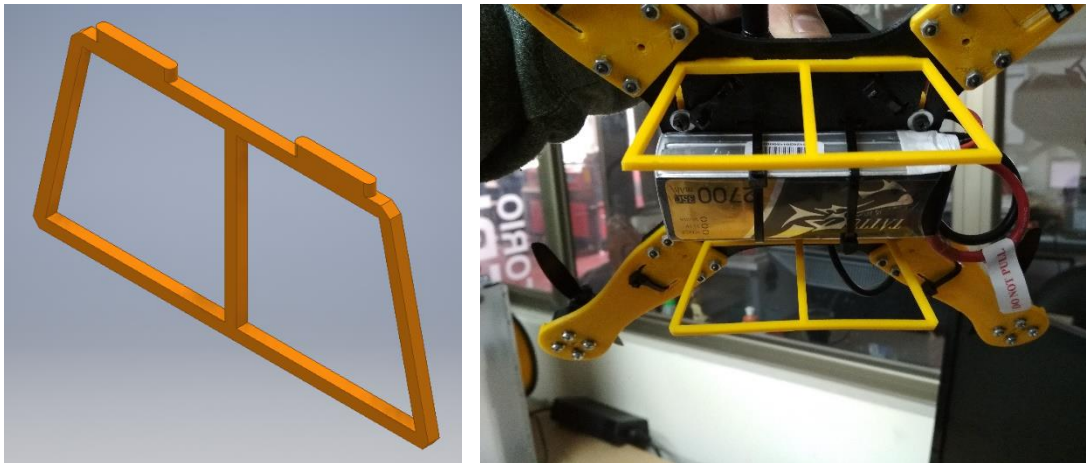


Ilustración 35: Diseño final Soportes Conjunto Drone para caso de estudio.

- **Conjunto Drone**, en el cual se plasman las consideraciones para cada pieza y equipos a ensamblar, para que en conjunto entreguen funcionamiento al sistema.

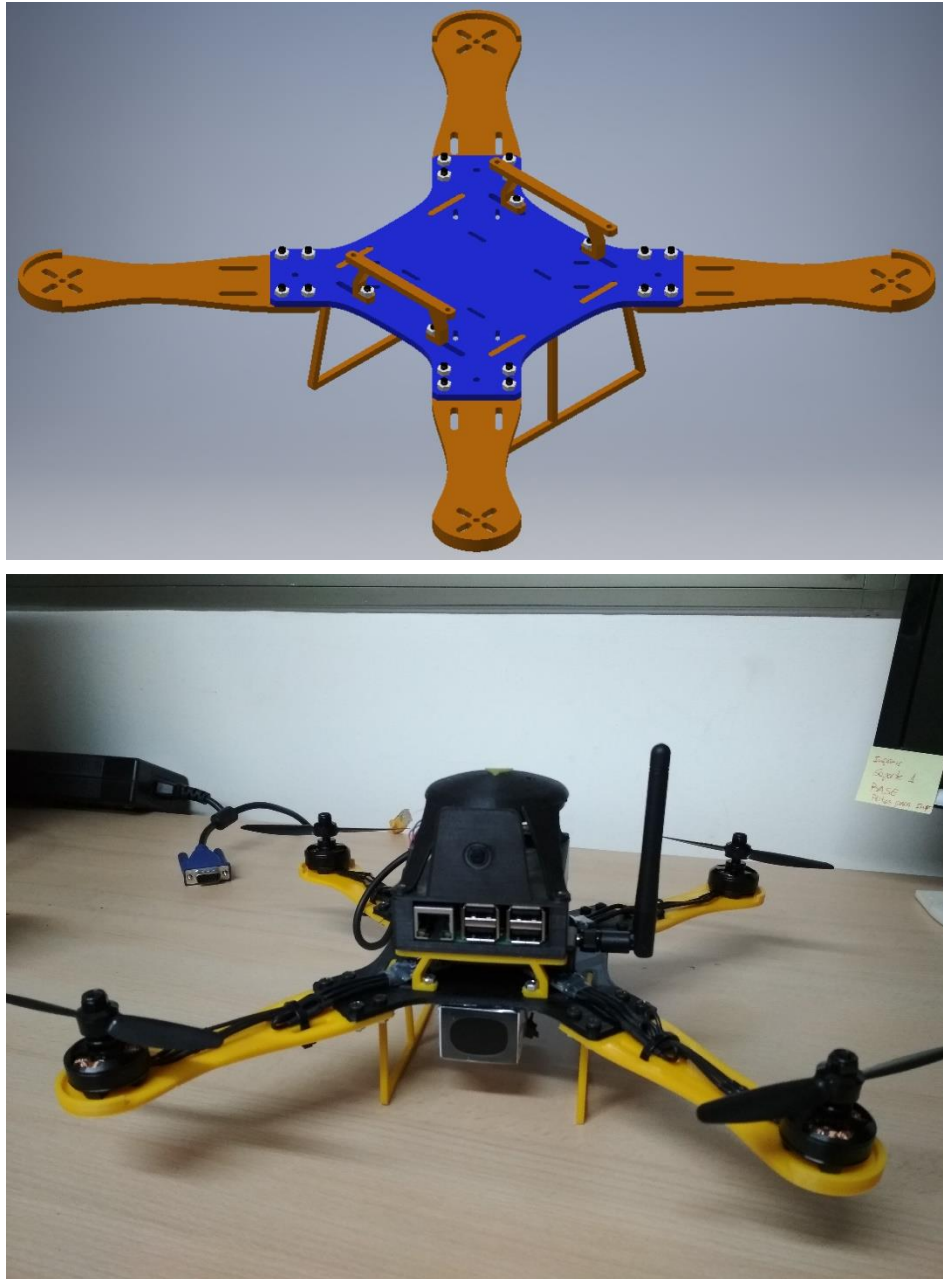


Ilustración 36: Diseño final Sistema Drone para caso de estudio.

Para la fabricación de soportes, se utiliza el inyector de 0,4 [mm] con 50% de relleno, con filamento de PLA. El consumo de material para cada una de las piezas se muestra en la siguiente tabla:

Pieza	Cantidad	Filamento utilizado [m]	Masa [g]	Tiempo fabricación [min]	Costo filamento ²⁰ [\$ CLP]	% Relleno
ALA	4	7,04	52	352	\$864	40
BASE	1	5,93	46	314	\$782	40
SOPORTE UNIDAD DE CONTROL 1	1	0,32	2	28	\$34	50
SOPORTE UNIDAD DE CONTROL 2	1	0,28	2	25	\$34	50
SOPORTES CONJUNTO	2	1,12	8	96	\$136	50
TOTAL		14,69	110	815	\$1.850	-

Tabla 5: Cantidad de material utilizado para la fabricación de piezas de Drone, posterior a modificaciones.

²⁰ El costo de filamento se estima con el porcentaje de masa de la pieza con respecto al costo por kilogramos de filamento en el mercado actual, aproximadamente \$17.000 CLP/kg.

15 Opción de Aplicación

La aplicación se enfoca a dos personas tipo, las cuales serán clasificadas según sus necesidades al momento de solicitar el desarrollo de la estructura del Drone. Los dos modelos de personas a considerar son:



A: Persona que posee equipos electrónicos para el Drone y necesita una solución adaptada a sus requerimientos dimensionales y físicos. Este tipo de persona puede ser un investigador, desarrollador o simple experimentador en el desarrollo de aeronaves, ya sea por entretenimiento o algún fin de investigación científica.



B: Necesita fabricar estructura de Drone, pero no tiene equipos electrónicos definidos. Deben definir sus especificaciones, tales como: utilización de Drone, presupuesto, tamaño, carga, etc. Este tipo de persona puede necesitarlo solo por entretenimiento o ser un emprendedor que lo necesite para el desarrollo de su negocio.

▪ CASO PERSONA A

La solución para esta persona estaría completamente desarrollada con la interfaz y parametrización antes mostrada, en donde se utilizan como insumo las dimensiones de los equipos electrónicos a instalar, se desarrolla la solución y se entrega una estructura adaptada a los requerimientos para posteriormente realizar la instalación de los equipos a la estructura fabricada en impresión 3D. Con este tipo de usuario final se pueden planear posteriores pruebas y/o modificaciones necesarias para mejorar la sujeción y cumplir la finalidad requerida.

Si se cumple el objetivo, esta acción es la solución final, en cambio, si esto no se cumple, se deben buscar las posibles fallas del sistema y recomendar las opciones posibles que generarán el cumplimiento del objetivo, ya sea cambio de motores, controladores, hélices, etc.

▪ CASO PERSONA B

Para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de la persona B, es necesario realizar una definición de estos, tales como: velocidad, dimensiones aproximadas, la utilización de equipos de captura de información y/o carga, tecnología y presupuesto para su inversión. Luego de tener los requerimientos del usuario, se deben realizar pruebas en la combinación de equipos (motor-hélice) para generar prototipos adecuados.

Se hace necesario, para realizar las pruebas de combinaciones (motor-hélice), montar un laboratorio experimental para el desarrollo de pruebas de empuje v/s potencia efectiva del motor y ser probada con distintos diámetros de hélices, generando variaciones dimensionales

en los equipos finales a instalar. Esto con la finalidad de corroborar el producto realizado y tener la disponibilidad inmediata de realizar modificaciones si es necesario.

Luego de ejecutadas las pruebas, es posible realizar la selección de equipos y utilizar la interfaz desarrollada para realizar la manufactura de las piezas de la aeronave, entregando, finalmente, de forma envasada para su posterior armado por parte del usuario. Para esto último, se hace necesario realizar un manual didáctico de unión, precauciones y mantención de piezas para asegurar su funcionamiento.

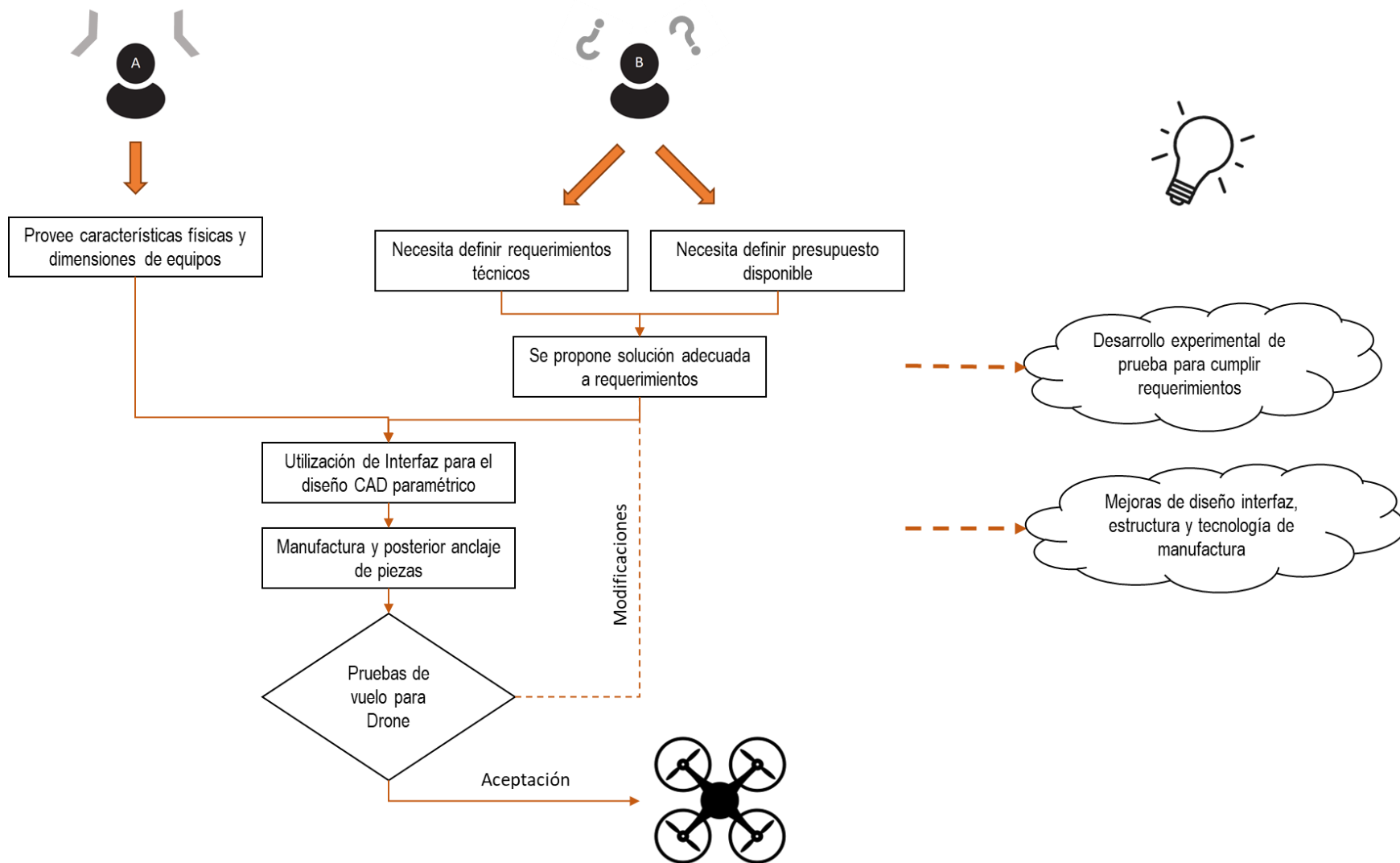


Ilustración 37: Diagrama de flujo para aplicación persona A y persona B.

16 Conclusiones y trabajos futuros

La utilización de técnicas de RP en el diseño de la estructura de un Drone hacen posible el estudio de características de forma, la realización de evaluaciones ergonómicas, facilita el dimensionamiento de piezas, y permite realizar pruebas de configuraciones y formas de ensamblaje. De esta manera, se logran efectuar pruebas y procesos de modificaciones de corta duración y bajo costo, acelerando los procesos de diseño y adecuándolos a las reales necesidades del usuario final. Además, en los casos de estudio, también permite la conexión a un conjunto de sistemas electrónicos para la realización de pruebas, obteniendo productos tecnológicos funcionales.

Otra característica a considerar, es la capacidad que entrega la técnica del RP al permitir el estudio de las características a evaluar en equipos multidimensionales de trabajo, con la cual es posible mejorar la conceptualización del diseño del producto a desarrollar en un tiempo menor, en comparación a otros tipos de prototipado, tales como moldes, en donde las modificaciones de piezas necesitan de la modificación de matrices, generando un mayor costo en tiempo y dinero. Es decir, con las técnicas de RP se logra una solución con mayor especificidad, abarcando más áreas de trabajo profesional, con menor costo y en un menor tiempo.

La utilización de técnicas de RT en la parametrización de variables y el desarrollo de una interfaz simple para el usuario, utilizada por personas que no necesariamente posean conocimientos en software de modelación de sólidos 3D, genera un proceso de manufactura rápido y de fácil acceso, de bajo costo y, en este caso, un prototipado funcional. Además, se da la posibilidad de transferir información, compartiendo en la nube, integrando las nuevas tecnologías informáticas disponibles y entregando la posibilidad de generar nuevos modelos de negocio.

La integración de los sistemas de RP y RT, hace posible una mejor competitividad en la productividad local, a nivel nacional y mundial, ayudando a potenciar las empresas, acelerando los procesos de producción, mejorando la calidad, reduciendo costos y disminuyendo los tiempos en la elaboración de prototipos y piezas funcionales.

La metodología de diseño utilizada es posible replicarla en otros procesos de investigación con la capacidad de trabajar con métodos de enseñanza en el aprendizaje de habilidades tecnológicas y retroalimentación de información con la utilización de prototipos para el conocimiento de variables.

El desarrollo actual de las tecnologías de prototipado ha sido potenciado en el desarrollo de piezas para el área de la salud, fabricando prótesis funcionales de articulaciones para animales y humanos, prototipos de implantes de columna, dientes y huesos en general, e integrando sistemas electrónicos se han desarrollado aparatos para personas con problemas de escucha.

Las etapas de modificación de las piezas diseñadas permiten entregar una solución cada vez más certera a los requerimientos iniciales acordados, en las cuales, además, se hace tangible

y de fácil desarrollo el proceso de trabajo multidisciplinario, realizando un proceso interno de enseñanza y aprendizaje, concretando el desarrollo de las nuevas tecnologías.

A futuro, y para un desarrollo efectivo del caso de estudio, se hace necesario un desarrollo experimental con equipos montados para la realización de pruebas de vuelo que entreguen la experiencia en su utilización y la posibilidad de generar un conocimiento más profundo de las variables de diseño. Junto con esto, es posible trabajar en grupos interdisciplinarios para realizar mejoras tanto en el diseño en detalle de la estructura, en términos de ergonomía, anclaje de piezas, configuración de soporte, condiciones externas u otro necesario, como en el diseño de la interfaz de usuario.

17 Referencias

- A.K. Matta, D. R. (2015). The integration of CAD/CAM and Rapid Prototyping in Product Development: A review. *Materials Today: Proceedings* 2, 3438 - 3445.
- Alain Bernard, A. F. (2002). New Trends in Rapid Product Development. *CIRP Annals*, 635-652.
- Altshuller, G. (1984). *Creativity as a Exact Science: The Theory of the Solution of Inventive Problems*. Gordon and Breach Science Publishers.
- C. K. Chua, S. H. (1999). Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 597-603.
- Dazhong Wu, D. W. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 1-14.
- Drone Industry Insights. (s.f.). *DRONEII*. Obtenido de www.droneii.com
- Fischer, A. B. (2001). Tele-design for manufacturing. *Annals of the CIRP*, 77-80.
- Fuh JY, L. W. (2005). Advances in collaborative CAD: the state of the art. *Comput Aided Des*, 37(5), 571-581.
- Hernando, V. D. (29 de Mayo de 2016). *ElDrone*. Obtenido de ElDrone: www.eldrone.es
- Komoski, P. K. (1974). An imbalance of product quality and instructional quality: The imperative of empiricism. *AV Communication Review*, 357-386.
- Langevin, R. (03 de Marzo de 2013). *Technical Innovation Center, Inc*. Obtenido de <http://www.triz.org/index.php/triz/triz>
- Levy, G. (2001). Layered-manufacturing: a powerful technology in the rapid product development cycle. *uRapid*. Amsterdam.
- Levy, G. S. (2001). Rapid tooling technologies enabling the integration of product design and production. *ISEM XIII*. Bilbao, España.
- Monostori L, V. J. (2006). Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Ann*, 55(2), 697-720.
- P.-M Basset, A. T. (2014). Rotary Wing UAV pre-sizing: Past and Present Methodological Approaches at Onera. *Journal AerospaceLab*.
- Pahl G, B. W. (1984). *Engineering design* (Vol. 984). (W. K, Ed.) London: Design Council.
- Pahl, G. a. (1996). *Engineering Design. A Systematic Approach*. Springer.
- Pahl, G. B. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer.
- S. O. Onuh, Y. Y. (1999). Rapid prototyping technology: applications and benefits for rapid product development. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 301 - 311.
-

- Shen W, H. Q. (2006). Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review. *Adv Eng Inform*, 20(4), 415-431.
- Tripp, S. D. (1990). Rapid Prototyping: An Alternative Instructional Design Strategy. 1-17.
- Ullman, D. G. (2010). *The Mechanical Design Process, Fourth Edition* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Ulrich KT, E. S. (1995). *Product design and development* (Vol. 384). New York: McGraw-Hill.
- Yanagawa, K. (2015). Confluence of Parametric Design and Digital Fabrication Restructuring Manufacturing Industries., (págs. 13-22). Daegu.

18 ANEXOS

18.1 Glosario Estudio Comparativo

Tipo	UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado	Unmanned Aerial Vehicle
	AAV	Vehículo Aéreo Autónomo	Autonomous Aerial Vehicle
Diseño	QUAD	Cuadricóptero	Quadcopter
	HEXA	Hexacóptero	Hexacopter
	MALE	altura media larga resistencia	medium altitude long endurance
	HALE	gran altura larga resistencia	high altitude long endurance
	HELI	Tipo helicóptero	
Aplicaciones	[A]	Agricultura	Salud de cultivos, densidad de suelos, riego de campos, etc.
	[V&F]	Video y Fotografía	entretenimiento y actividades de presentación al cliente, hobby
	[I/C/T]	Inspección/cartografía/topografía	detección de derrames de aceite/gas, evaluación de daños por derrames, tuberías, líneas de poder, antenas, puentes, GIS, 3D, modelación 2D, minería, construcción
	[SP]	Seguridad pública	seguridad, vigilancia, rescate, cumplimiento de leyes, lucha contra fuego
	[R/H]	Recreación/Hobbie	bajas alturas y operaciones ligeras, estilo de vida, características sígueme
	[E/T]	Entrega/Transporte	Transporte y entrega de bienes desde A a B
	[I]	Investigación	observación de la tierra, exploración de recursos, radiación nuclear, detección química
	[C]	Carreras	alta velocidad y bajas alturas de operación
	[MA&VS]	Medio ambiente y vida silvestre	actividades de conservación, pesca, monitoreo de especies en peligro de extinción, actividades anti caza, monitoreo de caminos de migración, análisis geológico y botánico y administración, monitoreo de línea costera y hielo marino, conteo de elefantes, monitoreo de ballenas
	[D&S]	Defensa y Seguridad	Misiones militares de espionaje, transporte de armas, seguridad civil

Tabla 6: Glosario utilizado para el Estudio Comparativo de Drones.

18.2 Estimación teórica de Potencia efectiva

Para estimar la potencia efectiva, se realiza un análisis de fluido a través de una hélice, para esto, se considera un volumen de control de una hélice en pleno vuelo, con movimiento constante a la velocidad del Drone, esquemáticamente:

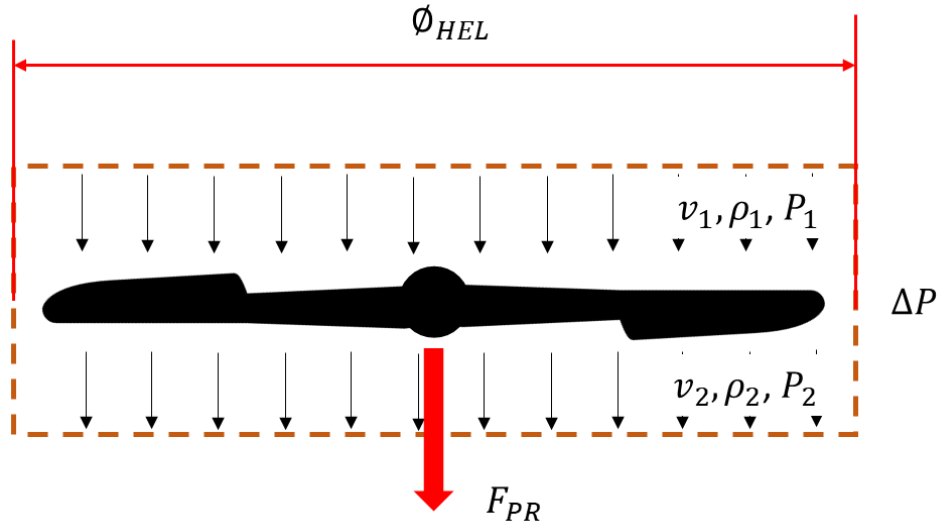


Ilustración 38: Representación de una superficie de control de una hélice.

En donde F_{RP} representa a la fuerza de propulsión, v_1 y v_2 las velocidades de entrada y salida del flujo a la superficie de control, ρ_1 y ρ_2 las densidades del fluido, en este caso aire a condiciones normales ($\rho_1 = \rho_2 = \rho = 1 \text{ kg/m}^3$ a 25°C y 1 atm), $\Delta P = P_2 - P_1$, es la variación de presión que se produce en el flujo antes y después de pasar por la hélice y ϕ_{HEL} el diámetro de la hélice.

En pleno vuelo, se considera que no existen fuerzas no conservativas, y que el flujo es estacionario e incompresible, por lo tanto, utilizando el principio de cantidad de movimiento en un flujo estacionario e incompresible, y conservación de la masa se tiene que:

$$F_{PR} = \dot{m}_2 \cdot v_2 - \dot{m}_1 \cdot v_1 \quad (\text{ec. 2})$$

En donde $\dot{m}$, representa el flujo másico del volumen de control el cual es continuo, es decir:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \rho \cdot v \cdot A \quad (\text{ec. 3})$$

En donde v representa la velocidad del Drone en vuelo y A , el área que atraviesa el flujo, si el diámetro de la hélice es ϕ_{HEL} , entonces:

$$A = \frac{\pi \cdot \phi_{HEL}^2}{4} \quad (\text{ec. 4})$$

Se puede observar que:

$$F_{PR} = \rho \cdot v \cdot A \cdot (v_2 - v_1) \quad (ec. 5)$$

Ahora, considerando la potencia efectiva definida por:

- La fuerza de propulsión, como una estimación del levantamiento de peso, explicado en la sección 13.3.1.,
- la velocidad media de la aeronave en metros por segundo,
- la eficiencia, por una parte, del motor eléctrico ($\eta_{MOTOR} \approx 80\%$), y por otra, la eficiencia mecánica del eje con la hélice ($\eta_{MEC} \approx 70\%$)

El cálculo de la potencia efectiva se puede representar de la siguiente forma:

$$P_{EFT} = \frac{F_{PR} \cdot v}{\eta_{MEC} \cdot \eta_{MOTOR}} \quad (ec. 6)$$

18.3 Estimación teórica del diámetro de hélice

Considerando la representación mostrada en el punto anterior (17.2), se aplica el principio de Bernoulli, para un flujo estacionario e incompresible, entre un punto 1, en donde el fluido tiene un comportamiento antes de atravesar la hélice, y el punto 2, en donde el fluido se ve modificado por la propulsión de la hélice. Utilizando la ecuación de continuidad, se muestra que la variación de presión existente entre ellos es:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (ec. 9)$$

Las velocidades v_1 y v_2 deben ser medidas de forma experimental, ya que corresponden a las velocidades del flujo antes y después de ser impulsadas por la hélice. Sin embargo, haciendo la suposición que el volumen de control está en reposo, que v_1 es nula y que v_2 es de la magnitud del supuesto movimiento del Drone, es decir $v_1 = v$, se puede tener un valor de ΔP . Junto con esto, con la utilización de:

$$F_{PR} = A \cdot \Delta P \quad (ec. 10)$$

Despejando, y utilizando la “ec.4” se obtiene:

$$\phi_{HELT} = \sqrt{\frac{4F_{PR}}{\pi \cdot \Delta P}} \quad (ec. 11)$$

A este cálculo, se le agrega un factor de 1 a 2 por los efectos de rebote que se produce en el aire al tener la estructura del motor bajo la hélice.

18.4 Selección de hélices según recomendaciones de fabricantes

Se selecciona hélice del motor para cada montaje, con un factor de seguridad para el empuje (F_{PR}) de 1,8 para montaje 1 y de 1,3 para montaje 2.

Cobra CM-2204/28 Motor Propeller Data										
Magnets 14-Pole	Motor Wind 28-Turn Delta	Motor Kv 2300 RPM/Volt		No-Load Current Io = 0.66 Amps @ 10v		Motor Resistance Rm = 0.084 Ohms		I Max 17 Amps	P Max (3S) 190 W	
Stator 12-Slot	Outside Diameter 27.0 mm, 1.063 in.	Body Length 14.2 mm, 0.559 in.		Total Shaft Length 32.5 mm, 1.146 in.		Shaft Diameter 3.00 mm, 0.118 in.		Motor Weight 24.6 gm, 0.87 oz		
Test Data From Sample Motor		Input Io Value	6.0 V 0.50 A	8.0 V 0.58 A	10.0V 0.66 A	12.0V 0.74 A	Measured Kv value 2190 RPM/Volt @ 10v	Measured Rm Value 0.084 Ohms		
Prop Manf.	Prop Size	Li-Po Cells	Input Voltage	Motor Amps	Input Watts	Prop RPM	Pitch Speed in MPH	Thrust Grams	Thrust Ounces	Thrust Eff. Grams/W
APC	5.25x4.75-E	3	11.1	16.14	179.2	18,222	82.0	481	16.97	2.68
APC	5.5x4.5-E	3	11.1	16.78	186.3	18,069	77.0	500	17.64	2.68
APC	6x4-E	3	11.1	18.04	200.2	17,530	66.4	673	23.74	3.36
FC	5x4.5	3	11.1	10.58	117.4	20,222	86.2	474	16.72	4.04
FC	5x4.5x3	3	11.1	15.05	167.1	18,618	79.3	578	20.39	3.46
FC	6x4.5	3	11.1	18.61	206.6	17,230	73.4	762	26.88	3.69
GemFan	5x3	3	11.1	8.00	88.8	21,190	60.2	431	15.20	4.85
GemFan	5x3x3	3	11.1	9.21	102.2	19,869	56.4	421	14.85	4.12
HQ	4x4.5-BN	3	11.1	9.14	101.5	19,478	83.0	355	12.52	3.50
HQ	5x3	3	11.1	5.74	63.7	20,381	57.9	330	11.64	5.18
HQ	5x4	3	11.1	8.39	93.1	19,705	74.6	431	15.20	4.63

Ilustración 39: Selección de Hélice para montaje 1.

SPECS for Turnigy Multistar 2216-800Kv 14Pole Multi-Rotor Outrunner V2

Battery	Prop Size	RPM	Thrust (g)	Current (A)	Power
11.1V (3Cell)	12" Slow Flier	5,500	907	17	185
	11" thin Style	7,200	908	11.7	128
	11" Slow Flier	6,000	908	16.2	171
	10" Slow Flier	7,440	771	10.8	120
	9" Slow Flier	8,000	544	8.9	105

Ilustración 40: Selección de Hélice para montaje 2.

18.5 Equipos para montaje en estructura

Se realiza la selección de equipos acorde a los requerimientos de cada uno de los montajes. En las siguientes tablas, se indican los equipos a posicionar en alas para cada uno y los que se instalan en la base, la cual es idéntica para ambos.

MONTAJE ALAS 1	
Equipos	Características
Motor Cobra 2204/2300 	Diámetro Stator: 22 mm Espesor Stator: 4 mm Valor Kv: 2300 RPM por Volt Máx. corriente: 17 A Máx. Potencia (3 celdas LiPo): 190 W Masa Motor: 24,6 g Frecuencia PWM: 8 KHz Diámetro eje propulsor: 5 mm Se toma en cuenta voltaje de 11,1 V de batería (3 celdas) para selección de hélice.
Hélices HQ Prop 4x4.5 	Largo: 4" – 101,6 mm Paso: 4,5 Aspas: 2 Material: Policarbonato Eje: 5 mm Masa: 1,72 g c/u
Lumenier ESC SimonK AutoShot Firmware 	Máx. corriente: 20 A Corriente puesta en marcha: 30 A/10 seg BEC: 5 V/1 A máx. Celdas LiPo: 2 a 4 celdas Masa: 8 g con conectores y cables Cables se conectan con hembra 2mm (bullet connectors)

Tabla 7: Equipos a montar en alas de estructura Drone. Montaje 1.

MONTAJE ALAS 2	
Equipos	Características
Motor Turnigy Multistar 2216-800Kv 	Diámetro Stator: 28 mm Valor Kv: 800 RPM por Volt Máx. corriente: 20 A Máx. Potencia (3 celdas LiPo): 222 W Masa Motor: 130 g Diámetro eje propulsor: 3 mm Conector: 3,5 mm bullet Se toma en cuenta voltaje de 11,1 V de batería (3 celdas) para selección de hélice.
Hélices Slowfly Propeller 11x4.5 Black (CW/CCW) 	Largo: 11" – 279,4 mm Paso: 4,5 Aspas: 2 Material: Nylon Eje: 3 – 6.5 mm (con adaptadores) Masa: 16 g c/u
Turnigy Multistar 20 A BLHeli y 4 A LBEC 2-6S 	Máx. corriente: 20 A BEC: 5 V/4 A máx. Celdas LiPo: 2 a 6 celdas Masa: 30 g con conectores y cables Cables se conectan con hembra 3,5 mm (bullet connectors)

Tabla 8: Equipos a instalar en alas de estructura Drone. Montaje 2.

MONTAJE BASE		
Equipos	Características	
Controlador y procesador de señales + sensores de estabilidad 	Procesador: Sensores: WiFi: I/Os: Cámara, video y Live Stream: Bluetooth: Potencia: Masa: Dimensiones:	1,2 GHz quad-core ARM Cortex-53 CPU, 1GB RAM, Broadcom VideoCore IV. gravedad, giroscopio, compás digital, presión y temperatura, ADC para sensor de batería. 802.11n, 2,4 GHz. 4 puertos USB, puerto Full HDMI, 10/100 Ethernet, Conector de audio 3,5mm. 8 MP Fixed focus lens, 2592x1944 pixel imagen estática, soporta 1080p30, 720p60 y 640x480p60/90 grabadora de video. Bluetooth 4.1 classic, baja energía y uso de consolas de juego a control remoto. 5 V conector DF13 6pins 130 g 95 x 70 x 59,8 mm
Receptor de señales 	Canales: Frecuencia: Potencia: Masa neta: Dimensiones:	6 2,4GHz Rango de frecuencia ISM 4,5 V ~ 6 V / <30mA 6,4 g 40,4 x 21,1 x 7,35 mm
UBEC KINGKONG 5V 3A 	Voltaje entrada: Voltaje Salida: Corriente: Dimensiones: Masa:	6 V ~ 28 V / DC (2~6S LiPo) 5 V 3 A 53 x 17 x 7 mm 12 g
Batería TATTU 2700mAh 3S 35C²¹ 	Tipo Batería: Capacidad: Voltaje: Máx descarga continua: Dimensiones: Peso: Plug balance: Plug descarga: Rango Carga:	Litio Polímero 2700 mAh 11,1 V 35C 105 x 36 x 25 mm 195 g JST-XH XT-60 1-3C Recomendado, 5C máx

Tabla 9: Equipos a instalar en base de ambos montajes.

²¹ Para la elección de la batería se toma en consideración que los motores necesitan de 11,1V y la máxima corriente de consumo para cada montaje es de 71 A y 83 A para los montajes 1 y 2, respectivamente (considerando en cada uno el consumo de los cuatro motores y el Subsistema de Control).

18.6 Consideraciones iniciales de diseño

Las formas y dimensiones que fueron consideradas inicialmente en el diseño, se determinaron con requerimientos de modularidad y la capacidad de poder realizar una parametrización de algunas variables iniciales de la estructura que permitan la utilización de montajes con equipos de distintas dimensiones. En el proceso, se fueron desarrollando distintas características que permiten satisfacer los requerimientos iniciales, algunas de ellas se muestran en el esquema a continuación:

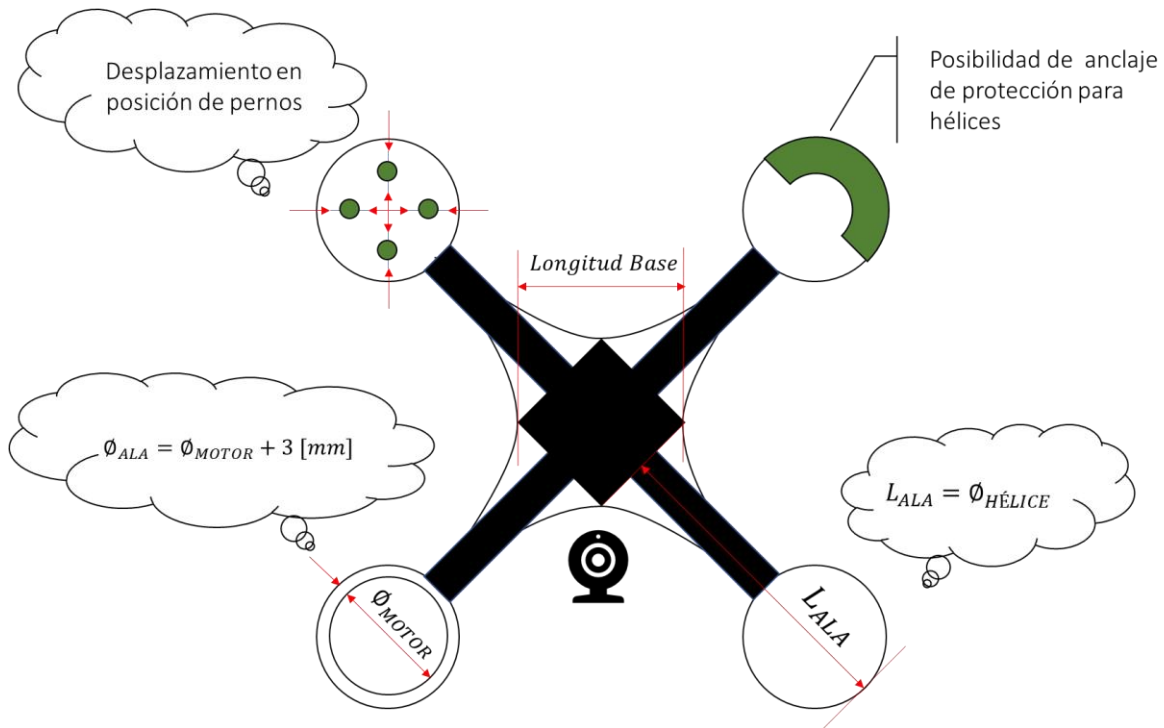


Ilustración 41: Consideraciones iniciales para el diseño del Drone.

18.7 Características de materiales para Ultimaker 2+

La marca Ultimaker, en su modelo de impresora 2+, entrega una variedad de materiales y colores para su utilización en distintas aplicaciones de fabricación 3D. En la tabla a continuación, se muestra un resumen de características descriptivas y físicas de cada material, las cuales se consideran al momento de producir un prototipo funcional que cumpla con los requerimientos iniciales del usuario.

Material para impresión 3D	Características principales	Aplicaciones	No adecuado para
PLA, Ácido poliláctico	Buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución	Herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos y también métodos de fundición a la cera perdida para crear piezas de metal.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Temperaturas mayores a 50 °C.
ABS, Acrilonitrilo butadieno estireno	Excelentes propiedades mecánicas y adhesión uniforme entre capas, buena estética, deformación mínima y adhesión fiable al lecho.	Prototipado visual, funcional y fabricación en series cortas.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Exposición prolongada a radiación UV. Temperaturas mayores a 85 °C.
CPE, Copoliéster	Excelentes niveles de resistencia química, dureza y estabilidad dimensional, buena adhesión entre capas y bajos niveles de partículas ultra finas (PUF) y compuestos orgánicos volátiles (COV)	Prototipado visual y funcional, fabricación en series cortas.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Uso prolongado en exteriores. Temperaturas superiores a 70 °C.
CPE+, Copoliéster	Excelentes niveles de resistencia química, dureza y estabilidad dimensional, buena adhesión entre capas, buena adhesión al lecho y bajos niveles de partículas ultra finas (PUF) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Permite la impresión de piezas traslúcidas con la opción de filamentos transparentes.	Prototipado visual y funcional, fabricación en series cortas.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Uso prolongado en exteriores. Temperaturas superiores a los 100 °C.
Nylon, Poliamida	Resistencia a impactos y abrasiones de calidad industrial, duradero, alta relación entre resistencia y peso, bajo coeficiente de fricción y buena resistencia a la corrosión por álcalis y compuestos orgánicos.	Prototipado visual, herramientas y modelado industrial.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Temperaturas mayores a los 80 °C.
PC, Policarbonato	Alta resistencia, resistencia a la temperatura, características retardantes de llama, estabilidad dimensional, fuerte adhesión entre capas, buena adhesión al lecho. Permite impresión de piezas traslúcidas con la opción de filamentos transparentes.	Iluminación, moldes, piezas de ingeniería, herramientas, prototipado funcional y fabricación en series cortas.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Temperaturas mayores a 110 °C.
PP, Polipropileno	Duradero, altos niveles de dureza y resistencia a la fatiga; baja fricción y superficies lisas; buena resistencia térmica; semiflexible; resistencia química a una amplia variedad de bases y ácidos, incluyendo productos de limpieza industrial; alta resistencia eléctrica; resistente a la humedad;	Prototipos funcionales, bisagras vivas, conectores, equipo de laboratorio, molduras, carpetas de papelería, envasado, cajas de almacenamiento,	Aplicaciones en contacto con alimentos. Radiación UV y/o humedad. Temperaturas mayores a 105 °C.

	traslúcido; baja densidad que permite obtener piezas ligeras; adhesión entre capas excelente; adhesión adecuada al lecho y baja deformación al utilizar láminas adhesivas.	cubiertas protectoras y pantallas.	
PVA, Alcohol polivinílico	Buena estabilidad térmica, mayor resistencia a la degradación respecto a otros filamentos de PVA; menos sensible a la humedad que otros filamentos de PVA; buena adhesión a PLA y Nylon; disolución segura en agua; biodegradable sin subproductos peligrosos.	Estructuras de apoyo hidrosolubles para materiales de construcción de PLA y Nylon. Moldes de PVA.	Estructuras de apoyo hidrosolubles para materiales de construcción de ABS o CPE.
TPU 95A, Poliuretano termoplástico	Resistencia al deterioro por uso, alta resistencia a impactos, dureza Shore A de 95, hasta un 580% de alargamiento a la rotura y buena resistencia a la corrosión por productos químicos y aceites industriales habituales.	Prototipado funcional, empuñaduras, guías, bisagras, manguitos, piezas de encaje a presión y carcasas protectoras.	Aplicaciones en contacto con alimentos. Radiación UV y/o humedad. Temperaturas mayores a 100 °C.

Tabla 10: Características descriptivas de materiales a utilizar en la manufactura del prototipo. Información de entrega por Ultimaker.

Material para impresión 3D	Tracción de Fluencia ISO 527 50 mm/min [MPa]	Módulo de Elasticidad a la Tracción ISO 527 1mm/min [MPa]	Resistencia a la Flexión ISO 178 [MPa]	Módulo de Flexión ISO 178 [Mpa]	Resistencia de impacto Izod, con mella a 23 °C ISO 180 [kJ/m^2]
PLA, Ácido poliláctico	45,6	2346,5	103,0	3150,0	5,1
ABS, Acrilonitrilo butadieno estireno	33,9	1681,5	70,5	2070,0	10,5
CPE, Copoliéster	37,7	1537,5	79,5	1990,0	4,0
CPE+, Copoliéster	33,0	1128,5	65,0	1555,0	6,2
Nylon, Poliamida	27,8	579,0	24,0	463,5	34,4
PC, Policarbonato	53,7	1904,0	95,5	2310,0	14,9
PP, Polipropileno	8,7	220,0	13,0	305,0	27,1
PVA, Alcohol polivinílico	-	-	-	-	-
TPU 95A, Poliuretano termoplástico	8,6	26,0	4,3	78,7	34,4

Tabla 11: Características físicas de posibles materiales a utilizar en la manufactura del prototipo. Información de cartas técnicas entregadas por Ultimaker.

18.8 Requerimientos dimensionales de diseño conceptual

Con base en las características de selección y los requerimientos del sistema, se entregan las dimensiones que serán las variables independientes dentro de la construcción del modelo CAD, utilizándose como base para determinar las longitudes del Drone. Estas se indican en la siguiente tabla:

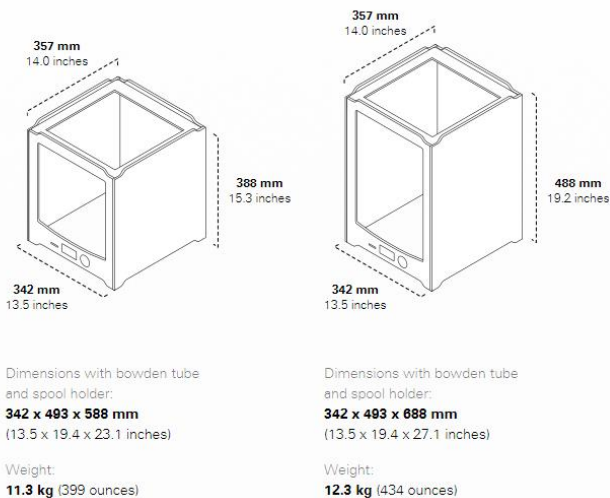
Requerimientos		Dimensión		Símbolo	Diseño CAD
BASE DRONE	Subsistema de Control/receptor	Unidad Control motores	Longitud máxima unidad de control	$[L_B]$	Máximo largo de controladores a instalar en base.
		Unidad Control motores	Ancho máximo unidad de control	$[A_B]$	Máximo ancho de controladores a instalar en base.
		Pernos de sistema	Diámetro de pernos	$[D_{PC}]$	Indica el diámetro de perforaciones para anclaje de pernos de equipos electrónicos de control y procesamiento a estructura basal del Drone.
		Anclaje de sistema	Configuración de pernos	-	Indica la distribución de perforaciones anclaje de pernos de equipos electrónicos de control y procesamiento a estructura basal del Drone
ALAS DRONE	Subsistema de Trabajo	Motor	Diámetro motor	$[D_M]$	Indica el diámetro de anclaje de motor con estructura
		Pernos de motor	Diámetro pernos	$[D_P]$	Indica el diámetro de perforaciones para anclaje de pernos a estructura
		Anclaje de motor	Configuración pernos	-	Indica la distribución de perforaciones para anclaje de pernos a estructura
		Hélice	Longitud de Hélice	$[L_H]$	Indica longitud mínima de ala del Drone
	Subsistema de Transmisión	ESC	Ancho de ESC	-	Indica la separación de ranuras en alas para sujeción de ESC

Tabla 12: Requerimientos dimensionales para el diseño conceptual del Drone.

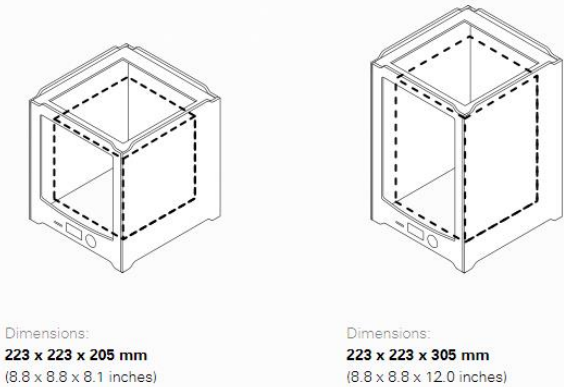
18.9 Información técnica Ultimaker 2+

Ultimaker es una empresa que tiene como misión empoderar e inspirar a la gente en el desarrollo de impresoras 3D y herramientas de código abierto. Uno de sus modelos de impresoras 3D es el Ultimaker 2+, el cual es utilizado para la construcción de la estructura del Drone. Un extracto de la información técnica se entrega a continuación:

Dimensions and weight



Build volume



Printer and printing properties	Assembly type	Pre-assembled
	Layer Resolution	0.25 mm nozzle: 150 to 60 micron 0.40 mm nozzle: 200 to 20 micron 0.60 mm nozzle: 400 to 20 micron 0.80 mm nozzle: 600 to 20 micron
	Build plate	50 °C to 100 °C heated glass build plate
	Build plate leveling	Assisted leveling process
	Print technology	Fused Deposition Modeling (FDM)
	Print head	Swappable nozzle
	Build speed	0.25 nozzle: up to 8 mm³/s 0.40 nozzle: up to 16 mm³/s 0.60 nozzle: up to 23 mm³/s 0.80 nozzle: up to 24 mm³/s
	Print head travel speed	30 to 300 mm/s
	Feeder type	Geared feeder
	XYZ accuracy	12.5, 12.5, 5 micron
	Nozzle diameter	Included are 0.25, 0.4, 0.6 and 0.8 mm nozzles
	Nozzle temperature	180 °C to 260 °C
	Nozzle heat up time	~ 1 minute
	Build plate heat up time	< 4 minutes
	Operating sound	50 dBA
Materials	System	Open filament system
	Filament diameter	2.85 mm
	Supported materials	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Nylon, TPU 95A, and PP
	Ultimaker filament	A spool of Ultimaker filament is 750 g
Requirements	Software	Cura, our free print preparation software
	Supported OS	Free on macOS, Windows and Linux
	Supported file types	STL, OBJ, X3D, and 3MF G and GCODE BMP, GIF, JPG, and PNG
	File transfer	Standalone 3D printing from SD card (included)
	Operating ambient temperature	15 °C to 32 °C (59 °F to 90 °F)
	Nonoperating temperature	0 °C to 32 °C (32 °F to 90 °F)
	Input	100 - 240V 4A, 50-60Hz 221 W max.
	Output	24 V DC, 9.2 A

Hardware components

Equal for the Ultimaker 2+ and Ultimaker 2 Extended+

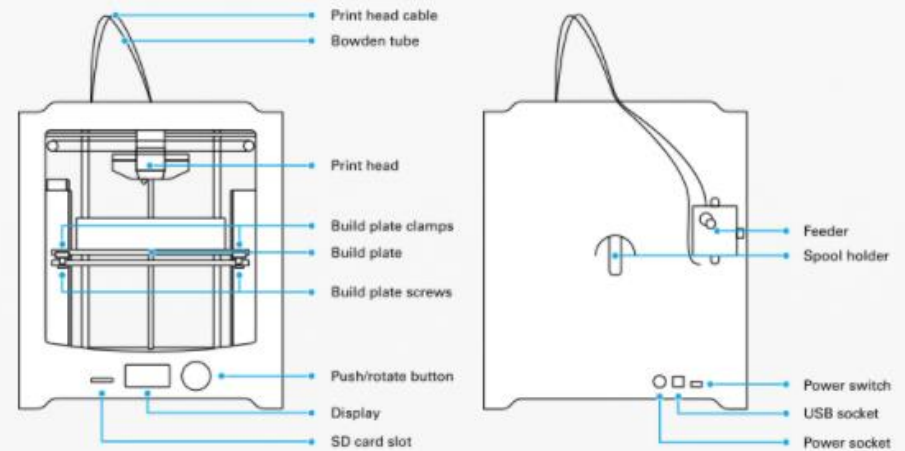


Ilustración 42: Información técnica de Ultimaker 2+. Mayor información en www.ultimaker.com.

18.10 Cotizaciones

En las siguientes ilustraciones, se muestran las cotizaciones realizadas para los equipos a montar en los casos de estudio.

	Product Name	Move to Wishlist	Unit Price	Qty	Subtotal
	Cobra CM-2204 2300kv Motor	Move	\$20.99	4	\$83.96
	HQProp 4x4.5 CW Propeller - 2 Blade (2 Pack - Black)	Move	\$2.38	1	\$2.38
	Lumenier Mini 20A ESC w/ SimonK AutoShot, 5V/1A BEC (2-4s)	Move	\$14.99	4	\$59.96
	HQProp 4x4.5 CCW Propeller - 2 Blade (2 Pack - Black)	Move	\$2.38	1	\$2.38

Continue Shopping

Clear Shopping Cart

Update Shopping Cart

ESTIMATE SHIPPING AND TAX

Enter your destination to get a shipping estimate.

Country*
Chile

State/Province

Zip/Postal Code*
2340000

Estimate

GetFPV Economy International

Economy - \$20.49

UPS Guaranteed

UPS Worldwide Expedited® - \$60.47

UPS Worldwide Saver® - \$62.46

UPS Worldwide Express® - \$94.92

Local Pickup

Free Pickup - \$0.00

Update Total

COUPON CODE

CART TOTALS

Subtotal	\$148.68
Grand Total	\$148.68

Proceed to Checkout

Ilustración 43: Cotización de equipos a montar en ala Montaje 1. www.getfpv.com.

Item	Qty	Warehouse	Stock	Product Description	Weight	Subtotal
From Europe (EU) Warehouse (1 Product)						
	- 4 +	Europe (EU)	OK	9192000201-0 Turnigy Multistar 2...	520g	\$85.00
From International (Hong Kong) Warehouse (2 Products)						
	- 4 +	International (Hong Kong)	OK	9351000059-0 Turnigy Multistar 2...	160g	\$53.92
	- 1 +	International (Hong Kong)	OK	125000081-0 Hobbyking8482 ...	95g	\$0.55
						CONTINUE SHOPPING
 Before you keep going We highly recommend you confirm the address details in the box below for the best shipping estimation.				Total Weight: 77 Grand Total \$119. Checkout with PayPal or Checkout		

Ilustración 44: Cotización de equipos a montar en ala Montaje 2. www.hobbyking.com.

PRODUCT	PRICE	QUANTITY	TOTAL
 Erle-Brain 3 Integrated camera (1080 HD, 8 MP): Camera + 50.00€ GPS: Erle-GPS + 90.00€ MicroSD card: 16 GB + 12.00€	351.00€	1	351.00€
 Cart Subtotal 351.00€ Order Total 351.00€			

Ilustración 45: Cotización de Erle Brain 3 con GPS y cámara integrada. Erlerobotics.com.

Item	Qty	Warehouse	Stock	Product Description	Weight	Subtotal
	- 1 +	Europe (EU)	OK	911400008-0 Turnigy iA8 Receiv...	13g	\$10.68
	- 1 +	Europe (EU)	OK	428000035-0 KINGKONG 5V 3A...	14g	\$3.50

[CONTINUE SHOPPING](#)

Before you keep going

We highly recommend you confirm the address details in the box below for the best shipping estimation.

Total Weight: 2

Grand Total \$14.

[Checkout with PayPal](#)
[Checkout](#)

Ilustración 46: Cotización de receptor y UBEC de ambos montajes. www.hobbyking.com.

Product Name	Move to Wishlist	Unit Price	Qty	Subtotal
 TATTU 2700mAh 3s 35c Lipo Battery	Move	\$33.76	- 1 +	\$33.76

[Continue Shopping](#)
[Clear Shopping Cart](#)
[Update Shopping Cart](#)

ESTIMATE SHIPPING AND TAX

Enter your destination to get a shipping estimate.

Country*
Chile

State/Province

Zip/Postal Code*
2340000

[Estimate](#)

Shipping Rates

This shipping method is currently unavailable due to batteries in your shopping cart. Please remove any batteries from your cart and try again.

[Update Total](#)

COUPON CODE

CART TOTALS

Subtotal	\$33.76
Grand Total	\$33.76

[Proceed to Checkout](#)

Ilustración 47: Cotización de batería para ambos montajes. www.getfpv.com.