

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE DRON TELEOPERADO PARA
EL SERVICIO DE *DELIVERY* DE PRODUCTOS
FARMACÉUTICOS EN ENTORNOS INFECCIOSOS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Jorge Antonio Bendezu Ledesma

ASESOR:

MSc. Ing. Pablo Cárdenas Cáceres

Lima, Marzo, 2022

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el diseño de un dron teleoperado para el *delivery* de productos farmacéuticos en entornos infecciosos. La razón del mismo es la problemática que implica la inmovilización social en una pandemia, así como la creciente demanda de productos farmacéuticos debido al contexto nacional. De ese modo, el objetivo general del trabajo es presentar el diseño original de un dron que pueda realizar las labores del servicio a domicilio.

La estructura del trabajo y el logro de los objetivos se trabajan con base en la metodología adaptada de la norma VDI 2206, abordando un marco problemático correspondiente al Capítulo 1. Luego, en el Capítulo 2, se presenta un análisis del estado de la tecnología y un marco teórico, con el fin de lograr los objetivos específicos planteados, los cuales involucran el diseño de la estructura mecánica y eléctrica del dron, la simulación de sus algoritmos de control y el desarrollo conceptual de un mando que permita su teleoperación. Después, se procede con el diseño del concepto de solución del dron en el Capítulo 3, utilizando un modelo de caja negra para la abstracción de la idea y elaborando una lista de exigencias, así como una matriz morfológica que permite visualizar los componentes requeridos para distintas alternativas del diseño conceptual.

En adelante, se selecciona el concepto más óptimo, realizando una evaluación técnico-económica, para diseñar el proyecto preliminar. Así, el Capítulo 4 desarrolla dicho proyecto al seleccionar los componentes eléctricos, diseñar las carcasas y componentes mecánicos y simular el algoritmo de control y lógica del dron y su depósito. Finalmente, el Capítulo 5 presenta los resultados de las simulaciones y la estimación de costos, concluyendo que la fabricación del producto es viable y cumple con las exigencias planteadas.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
MARCO PROBLEMÁTICO	2
1.1 Justificación	4
MARCO DE REFERENCIA	6
2.1 Estado de la tecnología.....	6
2.1.1 Prototipo de Robot autónomo de <i>Delivery</i>	6
2.1.2 Hayka.....	7
2.1.3 Starship Robots	8
2.1.4 Wing	8
2.1.5 Drones de Zipline	9
2.1.6 Horsefly	10
2.1.7 Boeing CAV.....	11
2.1.8 Drones de Flytrex	11
2.1.9 Drones de Amazon Prime Air.....	12
2.2 Objetivos.....	15
2.3 Alcance.....	15
2.4 Marco teórico.....	16
2.4.1 Teleoperación.....	16
2.4.2 Sistemas de comunicación.....	17
2.4.2.1 Arquitectura de las redes de comunicación.....	17
2.4.2.2 Tecnologías de comunicación	18
2.4.3 Clasificación de drones.....	19
2.4.3.1 Tipos de multicopteros.....	20
2.4.4 Modelo matemático de un dron.....	21
2.4.5 Modelo dinámico de un rotor.....	25

2.4.6 Algoritmos de control en drones	26
2.4.7 Métodos de desinfección	26
2.5 Marco metodológico	27
DISEÑO CONCEPTUAL DEL DRON TELEOPERADO	29
3.1 Elaboración de la lista de exigencias	29
3.2 Elaboración de la estructura de funciones	31
3.2.1 Modelo de Caja Negra	31
3.2.2 Principios tecnológicos	33
3.2.3 Secuencia de operaciones	33
3.2.4 Fijación de procesos técnicos	34
3.2.5 Aplicación de sistemas técnicos y sus limitaciones	34
3.2.6 Agrupación de funciones	35
3.2.7 Estructura de funciones	36
3.3 Concepto de solución	38
3.3.1 Matriz morfológica	38
3.3.2 Alternativas de solución	42
3.3.2.1 Alternativa 1 para el mando de control	42
3.3.2.2 Alternativa 2 para el mando de control	42
3.3.2.3 Alternativa 3 para el mando de control	43
3.3.2.4 Alternativa 1 para el dron teleoperado	44
3.3.2.5 Alternativa 2 para el dron teleoperado	45
3.3.2.6 Alternativa 3 para el dron teleoperado	45
3.3.3 Evaluación técnico-económica de las alternativas	47
DISEÑO DEL PROTOTIPO DE DRON TELEOPERADO	49
4.1 Diseño eléctrico	49
4.1.1 Selección de componentes eléctricos del dron	49
4.1.1.1 Motores	49
4.1.1.2 Baterías	51
4.1.1.3 Hélices y variadores de velocidad	53
4.1.1.4 Placa distribuidora de poder o PDB	53
4.1.1.5 Cámara y transmisor de video	54
4.1.1.6 Servomotor	54
4.1.1.7 Tarjeta controladora de vuelo	55
4.1.1.8 Sensores de presión y posición	55
4.1.1.9 Receptores	56
4.1.2 Selección de componentes eléctricos del depósito	57
4.1.2.1 Microbombas	57

4.1.2.2	Servomotor	58
4.1.2.3	Interruptor de contacto momentáneo	58
4.1.2.4	Tarjeta de desarrollo con microcontrolador	59
4.2	Diseño mecánico	60
4.2.1	Selección del material del dron	60
4.2.2	Modelo 3D del ensamble final	61
4.2.3	Modelo 3D del dron teleoperado.....	62
4.2.4	Modelo 3D del depósito.....	63
4.3	Diseño de software.....	64
4.3.1	Algoritmo del depósito de desinfección	64
4.3.2	Control de orientación del dron.....	66
4.3.2.1	Aproximación de la constante del motor	67
4.3.2.2	Aproximación de los coeficientes de empuje y de arrastre.....	67
4.3.2.3	Algoritmo de control PID.....	69
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO		74
5.1	Análisis del diseño mecánico.....	74
5.1.1	Simulación de los esfuerzos en el soporte lateral del depósito	74
5.1.2	Simulación de los esfuerzos en el brazo de soporte del motor	75
5.1.3	Simulación de los esfuerzos en la carcasa del dron.....	77
5.2	Análisis del diseño de software	77
5.2.1	Simulación del algoritmo del depósito de desinfección	78
5.2.2	Simulación del lazo de control.....	79
5.2.2.1	Ecuación de diferencias.....	82
5.3	Estimación de costos del prototipo	83
5.4	Validación de la lista de exigencias	85
CONCLUSIONES		87
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES		88
BIBLIOGRAFIA		89
A N E X O S.....		99
Anexo 1	.....	100
Anexo 2	.....	101
Anexo 3	.....	103
Anexo 4	.....	104
Anexo 5	.....	112
Anexo 6	.....	120

Anexo 7	159
Anexo 8	161
Anexo 9	163
Anexo 10.....	167
Anexo 11.....	174
Anexo 12.....	175



INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Establecimientos a los que acude la población para su atención por problemas de salud a nivel nacional.....	4
Tabla 1.2: Gasto per cápita y porcentaje de consumo de mercado según nivel económico	5
Tabla 2.1: Tabla comparativa entre los robots dedicados al servicio de <i>delivery</i> de diversos productos	14
Tabla 2.2: Principales características de las tecnologías de comunicación	19
Tabla 3.1: Sistemas técnicos y sus limitaciones.....	35
Tabla 3.2: Matriz morfológica del mando de control	38
Tabla 3.3: Matriz morfológica del dron teleoperado	39
Tabla 3.4: Evaluación técnico-económica del mando de control.....	47
Tabla 3.5: Evaluación técnico-económica del dron teleoperado.....	47
Tabla 4.1: Comparación de alternativas para los motores	50
Tabla 4.2: Comparación de alternativas para las baterías.....	52
Tabla 4.3: Comparación de alternativas para la placa distribuidora de poder	53
Tabla 4.4: Comparación de alternativas para la cámara	54
Tabla 4.5: Comparación de alternativas para los servomotores.....	55
Tabla 4.6: Comparación de alternativas para los módulos GPS	55
Tabla 4.7: Comparación de alternativas para los receptores.....	56
Tabla 4.8: Comparación de alternativas para las microbombas.....	57
Tabla 4.9: Comparación de alternativas para los interruptores.....	59
Tabla 4.10: Comparación de alternativas para los microcontroladores.....	59
Tabla 4.11: Comparación de alternativas para el material.....	60

Tabla 4.12: Datos para modelar el dron teleoperado	69
Tabla 5.1: Constantes del controlador	79
Tabla 5.2: Resumen de costos	85
Tabla 5.3: Verificación de la lista de exigencias	85
Tabla A1.1: Lista de exigencias	100
Tabla A3.1: Reporte de pruebas	103
Tabla A6.1: Lista de los planos presentados	120
Tabla A12.1: Costos del aspecto eléctrico	175
Tabla A12.2: Costos del aspecto mecánico.....	175
Tabla A12.3: Estimación de la longitud de las conexiones eléctricas	176
Tabla A12.4: Costos del aspecto de conexiones	177
Tabla A12.5: Costos del aspecto de materiales: Plástico y Fibra de carbono.....	177
Tabla A12.6: Características de las piezas de metal requeridas.....	178
Tabla A12.7: Costos del aspecto de materiales: Aluminio y Acero Galvanizado....	179
Tabla A12.8: Procesos de fabricación requeridos por pieza del dron	179

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Prototipo de Robot autónomo de <i>Delivery</i>	7
Figura 2.2: Robot Hayka.....	7
Figura 2.3: Robot de Starship.....	8
Figura 2.4: Wing, dron de X Development LLC.....	9
Figura 2.5: Dron de Zipline.....	10
Figura 2.6: Dron de Workhorse: Horsefly.....	10
Figura 2.7: Dron de Boeing NeXt.....	11
Figura 2.8: Hexacóptero de Flytrex.....	12
Figura 2.9: Dron de Amazon Prime Air.....	12
Figura 2.10: Elementos principales de un sistema teleoperado.....	16
Figura 2.11: Diagrama de bloques de un sistema de teleoperación.....	17
Figura 2.12: Arquitectura de las redes de comunicaciones.....	18
Figura 2.13: Esquema de los movimientos de un dron.....	21
Figura 2.14: Esquema de un sistema de referencia fijo y un sistema de referencia relativo a un objeto.....	22
Figura 2.15: Rangos del espectro electromagnético.....	27
Figura 3.1: Modelo de caja negra del dron.....	32
Figura 3.2: Modelo de caja negra del mando del dron.....	33
Figura 3.3: Agrupación de funciones.....	36
Figura 3.4: Estructura de funciones del sistema maestro-esclavo.....	37
Figura 3.5: Bosquejo de la alternativa 1 para el mando de control.....	42
Figura 3.6: Bosquejo de la alternativa 2 para el mando de control.....	43

Figura 3.7: Bosquejo de la alternativa 3 para el mando de control	43
Figura 3.8: Bosquejo de la alternativa 1 para el dron teleoperado	44
Figura 3.9: Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 1.....	44
Figura 3.10: Bosquejo de la alternativa 2 para el dron teleoperado	45
Figura 3.11: Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 2.....	45
Figura 3.12: Bosquejo de la alternativa 3 para el dron teleoperado	46
Figura 3.13: Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 3.....	46
Figura 4.1: Modelo 3D del dron teleoperado con depósito de desinfección.....	61
Figura 4.2: Modelo 3D del dron ensamblado.....	62
Figura 4.3: Modelo 3D del depósito de desinfección (Cerrado)	63
Figura 4.4: Modelo 3D del depósito de desinfección (Abierto).....	63
Figura 4.5: Diagrama de flujo del funcionamiento del dron teleoperado con depósito de desinfección (Parte 1 de 2)	64
Figura 4.6: Diagrama de flujo del funcionamiento del dron teleoperado con depósito de desinfección (Parte 2 de 2)	65
Figura 4.7: Torque vs. Corriente	67
Figura 4.8: Empuje vs. Acelerador	68
Figura 4.9: Arrastre vs. Acelerador	68
Figura 4.10: Velocidad angular al cuadrado vs. Acelerador	69
Figura 4.11: Estructura de control PID para el ángulo roll.....	70
Figura 4.12: Velocidad angular al cuadrado vs. Voltaje medio	71
Figura 4.13: Diagrama de bloques del lazo cerrado de control PID.....	73
Figura 5.1: Simulación de esfuerzos en el soporte lateral del depósito.....	75
Figura 5.2: Simulación de desplazamientos en el soporte lateral del depósito	75

Figura 5.3: Simulación de esfuerzos en el brazo de soporte del motor	76
Figura 5.4: Simulación de desplazamientos en el brazo de soporte del motor	76
Figura 5.5: Simulación de esfuerzos en la carcasa del dron	77
Figura 5.6: Simulación de desplazamientos en la carcasa del dron.....	77
Figura 5.7: Modelado virtual para la simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección	78
Figura 5.8: Gráfica de las respuestas de las variables Roll, Pitch, Yaw y Altura respectivamente (Referencia en rojo y Real en azul)	80
Figura 5.9: Gráfica de la velocidad en el eje X.....	81
Figura 5.10: Gráfica de la velocidad en el eje Z.....	81
Figura 5.11: Gráfica del vector de voltajes medios	82
Figura A2.1: Esquema de conexiones eléctricas del dron con depósito de desinfección	102
Figura A4.1: Bosquejo del soporte lateral del depósito.....	104
Figura A4.2: Simplificación de la pieza a flexión (izquierda) y a torsión (derecha)	104
Figura A4.3: Ecuaciones de equilibrio (arriba), Diagrama de fuerzas cortantes (izquierda) y Diagrama de momentos flectores (derecha).....	105
Figura A4.4: Procedimiento para hallar la inercia de la sección crítica	105
Figura A4.5: Procedimiento para hallar el esfuerzo en la sección crítica.....	106
Figura A4.6: Procedimiento para hallar el esfuerzo equivalente	106
Figura A4.7: Bosquejo del brazo de soporte del motor	107
Figura A4.8: Modelo simplificado y Ecuaciones de equilibrio (arriba), Diagrama de fuerzas cortantes y Diagrama de momentos flectores (izquierda), Secciones críticas (derecha).....	107
Figura A4.9: Procedimiento para hallar la inercia de la sección crítica	108

Figura A4.10: Bosquejo de la carcasa del dron.....	109
Figura A4.11: Ecuaciones de equilibrio (arriba), Diagrama de fuerzas cortantes (izquierda) y Diagrama de momentos flectores (derecha).....	109
Figura A4.12: Procedimiento para hallar la inercia de la sección crítica (arriba) y cálculo del esfuerzo de tracción (abajo).....	110
Figura A4.13: Modelo simplificado de la unión (arriba) y Ecuaciones de equilibrio (abajo)	110
Figura A4.14: Procedimiento para determinar el esfuerzo equivalente.....	111
Figura A5.1: Modelo 3D de la estructura de apoyo.....	112
Figura A5.2: Modelo 3D de la tapa de la carcasa del dron.....	112
Figura A5.3: Modelo 3D de la tapa posterior del depósito	113
Figura A5.4: Modelo 3D del portapilas	113
Figura A5.5: Modelo 3D de la carcasa de la cámara (Perspectiva frontal)	114
Figura A5.6: Modelo 3D de la carcasa de la cámara (Perspectiva posterior).....	114
Figura A5.7: Modelo 3D del soporte para carcasa de la cámara.....	114
Figura A5.8: Modelo 3D del brazo de soporte del motor	115
Figura A5.9: Perspectiva frontal de la carcasa del dron	115
Figura A5.10: Perspectiva posterior de la carcasa del dron.....	115
Figura A5.11: Modelo 3D del soporte para GPS	116
Figura A5.12: Modelo 3D del soporte para receptor	116
Figura A5.13: Modelo 3D del soporte para transmisor	116
Figura A5.14: Modelo 3D de la canasta del depósito.....	117
Figura A5.15: Modelo 3D de la parte móvil de la guía	117
Figura A5.16: Modelo 3D de la parte fija de la guía	117

Figura A5.17: Modelo 3D del conjunto de bolillas de rodamiento	117
Figura A5.18: Modelo 3D del soporte lateral izquierdo	118
Figura A5.19: Modelo 3D del soporte lateral derecho	118
Figura A5.20: Modelo 3D del soporte posterior	119
Figura A5.21: Modelo 3D de la tapa del depósito.....	119
Figura A5.22: Modelo 3D del seguro del depósito	119
Figura A6.1: Plano: Dron con depósito	121
Figura A6.2: Plano: Patas de apoyo.....	122
Figura A6.3: Plano: Tubo de conexión Dron-Depósito	123
Figura A6.4: Plano: Tubo de soporte.....	124
Figura A6.5: Plano: Tubo de apoyo.....	125
Figura A6.6: Plano: Codo superior.....	126
Figura A6.7: Plano: Codo inferior.....	127
Figura A6.8: Plano: Tapa de carcasa del dron.....	128
Figura A6.9: Plano: Tapa posterior del depósito.....	129
Figura A6.10: Plano: Dron teleoperado.....	130
Figura A6.11: Plano: Conjunto Motor-Hélice.....	131
Figura A6.12: Plano: Conjunto PDB-Tarjeta.....	132
Figura A6.13: Plano: Portapilas	133
Figura A6.14: Plano: Carcasa de cámara	134
Figura A6.15: Plano: Carcasa frontal para microcámara.....	135
Figura A6.16: Plano: Carcasa posterior para microcámara	136
Figura A6.17: Plano: Soporte de carcasa para microcámara	137

Figura A6.18: Plano: Brazo de soporte de motor	138
Figura A6.19: Plano: Carcasa del dron	139
Figura A6.20: Plano: Soporte para GPS	140
Figura A6.21: Plano: Soporte para transmisor	141
Figura A6.22: Plano: Soporte para receptor.....	142
Figura A6.23: Plano: Depósito de desinfección.....	143
Figura A6.24: Plano: Canasta.....	144
Figura A6.25: Plano: Rejilla soldada.....	145
Figura A6.26: Plano: Pared lateral izquierda de depósito.....	146
Figura A6.27: Plano: Pared lateral derecha de depósito.....	147
Figura A6.28: Plano: Pared frontal/posterior de depósito.....	148
Figura A6.29: Plano: Guía telescópica - Parte móvil	149
Figura A6.30: Plano: Guía telescópica - Parte fija	150
Figura A6.31: Plano: Conjunto de bolillas de rodamiento.....	151
Figura A6.32: Plano: Bolilla de rodamiento	152
Figura A6.33: Plano: Guía de rodamiento	153
Figura A6.34: Plano: Soporte lateral izquierdo.....	154
Figura A6.35: Plano: Soporte lateral derecho	155
Figura A6.36: Plano: Soporte posterior	156
Figura A6.37: Plano: Tapa del depósito.....	157
Figura A6.38: Plano: Seguro de depósito	158
Figura A7.1: Diagrama de flujo del funcionamiento del mando del dron (Parte 1 de 2)	159

Figura A7.2: Diagrama de flujo del funcionamiento del mando del dron (Parte 2 de 2)	160
Figura A9.1: Estructura interna del subsistema ‘Controlador’	163
Figura A9.2: Estructura interna del subsistema ‘Controlador PID’	163
Figura A9.3: Estructura interna del subsistema ‘Tabla de conversión’	164
Figura A9.4: Estructura interna del subsistema ‘Planta’	164
Figura A9.5: Estructura interna del subsistema ‘Modelo no lineal del motor’	164
Figura A9.6: Estructura interna del subsistema ‘Modelo aerodinámico del dron (1/3)’	165
Figura A9.7: Estructura interna del subsistema ‘Modelo aerodinámico del dron (2/3)’	165
Figura A9.8: Estructura interna del subsistema ‘Modelo aerodinámico del dron (3/3)’	166
Figura A9.9: Estructura interna del subsistema ‘Señales del mando’	166
Figura A10.1: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 1 (1/2)	170
Figura A10.2: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 1 (2/2)	170
Figura A10.3: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 2	171
Figura A10.4: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 3 (1/3)	171
Figura A10.5: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 3 (2/3)	172
Figura A10.6: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 3 (3/3)	172
Figura A10.7: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 4	173

Figura A10.8: Simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección – Etapa 5 173

Figura A11.1: Gráfica de las respuestas de las variables (Referencia en rojo y Real en azul) 174

Figura A11.2: Gráfica del vector de voltajes medios 174



LISTA DE SÍMBOLOS

Ψ	: Ángulo de guiñada o Yaw [rad]
θ	: Ángulo de elevación o Pitch [rad]
Φ	: Ángulo de alabeo o Roll [rad]
F_B	: Fuerza resultante sobre el dron [N]
m	: Masa del dron [kg]
v	: Vector de velocidades lineales en el sistema fijo a tierra [m/s]
g	: Gravedad [m/s ²]
Ω_i	: Velocidad angular del motor i [rad/s]
w	: Vector de velocidades angulares [rad/s]
I	: Matriz de inercia [kg.m ²]
τ_B	: Torque resultante sobre el dron [N.m]
J_R	: Momento de inercia rotacional del motor [kg.m ²]
τ_A	: Pares de fuerza sobre el eje del dron [N.m]
V	: Voltaje del motor [V]
R	: Resistencia del motor [Ω]
i	: Corriente del motor [A]
w_M	: Velocidad angular del motor [rad/s]
J_{TM}	: Inercia total del motor [kg.m ²]
J_M	: Inercia del motor [kg.m ²]
J_P	: Inercia de la carga [kg.m ²]
J_{TP}	: Inercia total de la carga [kg.m ²]
T_L	: Torque de la carga a mover [N.m]
E_M	: Empuje por motor [kg]
E_T	: Empuje total [kg]
r	: relación peso/empuje
V_S	: Voltaje de celda [V]
Cap_B	: Capacidad de la batería [Ah]
P_M	: Potencia de un motor [W]
T_v	: Tiempo de vuelo [min]
T_d	: Tiempo de despegue [min]
T_m	: Tiempo de desplazamiento o movimiento [min]
T_a	: Tiempo de aterrizaje [min]
P_{mm}	: Potencia media de un motor [W]
P_d	: Potencia de despegue [W]
P_m	: Potencia de desplazamiento o movimiento [W]
P_a	: Potencia de aterrizaje [W]

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo y uso de los drones dejó de ser un pasatiempo para convertirse en la aplicación de una herramienta tecnológica novedosa que permite una mayor versatilidad y el incremento de la eficiencia en ciertas tareas de distintos aspectos de la industria 4.0. Ya sea por medio de un control teleoperado o uno autónomo, los drones permiten, por lo general, realizar las labores de inspección en distintos aspectos como la agricultura, la infraestructura, las redes eléctricas, las zonas petroleras, entre otras. Incluso, los drones pueden apoyar en áreas como la logística, permitiéndole a una empresa realizar desde la gestión de sus almacenes hasta la entrega y el transporte de productos (Dynatec, 2021).

Ello se debe a las ventajas que presentan el uso de drones en la industria 4.0, tales como mayor seguridad laboral, disminución del impacto ambiental, disminución de costos, versatilidad y mayor operatividad y maniobrabilidad (Dynatec, 2021). Es partiendo de dichas ventajas y la posibilidad de aplicar la tecnología de los drones en servicios de entrega de productos que, en el presente trabajo, se abordará su uso como una alternativa de solución al contexto actual de pandemia, la cual puede categorizarse como un entorno infeccioso.

CAPÍTULO 1

MARCO PROBLEMÁTICO

“[...] desde que el ser humano empezó a organizarse en sociedad y a crear núcleos de personas que convivían juntos en un mismo espacio territorial, las enfermedades contagiosas tomaron un especial protagonismo” (Huguet, 2020). Partiendo de la peste negra, pasando por la gripe española y la viruela, hasta el Covid-19; todas las enfermedades surgen de manera muy sutil y terminan generando una crisis a nivel económico debido a la inmovilización social. Es por ello que durante el brote de Covid-19, los diferentes sectores buscaron de diversas formas mitigar estos efectos empleando herramientas que antes no existían: las telecomunicaciones y la robótica. Fue así como hoy en día, las soluciones tecnológicas al contexto que nos compete fueron el teletrabajo, asistentes robóticos en el sector médico y el desarrollo de aplicativos móviles para los servicios de *delivery*.

Aun así, es importante ahondar en la problemática que conlleva una pandemia. El 11 de marzo de 2020 el director general de la Organización Mundial de la Salud [OMS] decretó el estado de pandemia (Arroyo, 2020); y, a partir de ese momento, cada gobierno implementó una serie de medidas centradas en el aislamiento social. Básicamente, las personas debían evitar en la medida de lo posible salir de sus casas; y como ya se mencionó, la inmovilidad absoluta afecta al sector económico, sobre todo a países como Perú, donde el 70% del sector económico se basa en el trabajo informal según BBC News Mundo (2020). Sin embargo, existe una alternativa de solución que puede afrontar el aspecto de la informalidad, así como el de la inmovilización: el servicio de *delivery*; medida que en Perú fue incorporada para los restaurantes dentro de un intervalo de horas y para las farmacias y boticas durante las 24 horas del día (Decreto Supremo 058-2021-PCM, 2021, Artículo 4). Suena contradictorio, considerando que el fin de la inmovilización es limitar el contacto humano lo mayor posible, que una solución sea un servicio que consiste en que otro humano se acerque para entregarte las cosas que solicitas; por ende, para que el servicio de *delivery* pueda ser una solución completamente efectiva se debe cambiar el intermediario humano por

un robot, el cual no es susceptible a las enfermedades y también puede realizar la tarea de transportar un pedido de un lugar a otro.

Partiendo de esa premisa, diversos países han ideado la manera de que el servicio de *delivery* reduzca el contacto humano. Por ejemplo, Gamarra (2020) menciona que “[...] Rappi ha lanzado su programa piloto de robots en la Ciudad de Medellín, de la mano de KiwiBot. Hasta el momento, han realizado cerca de 120 órdenes al día con 15 robots”. En ese sentido, Colombia optó por incorporar robots que realicen el trabajo de llevar comida al domicilio de sus clientes obteniendo como resultados el ahorro del recurso humano, la reducción de emisiones contaminantes que podría generar un vehículo realizando el mismo trabajo y la minimización del contacto humano para evitar la propagación del virus. Por su parte, Perú también tiene en desarrollo un proyecto que emplea robots para el servicio de *delivery* de productos agrícolas. “Hasta la fecha, van 100 repartos, y nuestra proyección es llegar a las 1000 entregas en este primer semestre utilizando el robot” (Cruzado, 2021, como se citó en Fernández, 2021). Con ello, el proyecto obtiene como resultado que la labor de los trabajadores del sector agrícola se vea simplificada y que, en un futuro, el robot pueda ser empleado para reactivar el servicio de *delivery* de restaurantes.

Por su parte, Estados Unidos desarrolló soluciones orientadas a mejorar la velocidad del servicio de *delivery*. Por un lado, Wing es un dron diseñado para realizar entregas a domicilio de comida o medicamentos en cuestión de minutos. En una entrevista realizada a Alexa Dennett, jefa de Marketing y Comunicaciones de la compañía desarrolladora, se hace mención a los diversos resultados positivos que implicaban el uso del dron Wing, tales como el incremento de ventas de pequeñas empresas que tuvieron que cerrar debido al contexto de la pandemia, la facilidad para el transporte de productos farmacéuticos y el uso eficiente del tiempo y la energía, involucrados en el servicio del *delivery*, al evitar el tráfico vehicular y reducir las emisiones de carbono (Aviation International News, 2020, 1m27s-4m33s).

Por otro lado, Zipline es una empresa que desarrolló drones con el fin de ayudar a un transporte más rápido de materiales médicos y bolsas de sangre en Rwanda, un país de África oriental que tiene problemas de acceso vial debido a que, de los 14000 km de superficie del país, solo 2600 km están pavimentados (Real Engineering, 2019, 0m24s-0m59s). Gracias a esto, diversos centros médicos dentro del rango de trabajo del dron pueden acceder a suministros médicos como sangre y vacunas en cuestión de minutos al alcance de un mensaje de texto. De ese modo, el uso de drones de Zipline resultaron en una reducción significativa de costos de almacenaje y adquisición de artículos médicos para emergencias debido a que permiten que dichos suministros se almacenen en un solo centro médico y solo se despachen las unidades necesarias en el momento que se requieran en otro lugar (Real Engineering, 2019, 10m06s-10m28s).

Por ende, resulta pertinente abordar el uso de robots para el servicio de *delivery* como alternativa de solución a la necesidad de minimizar lo más posible la interacción humana presencial en un contexto de pandemia. Igualmente, resulta necesario enfocarse en el tipo de servicio que brindan las farmacias y boticas en vista del incremento de la demanda de productos de desinfección y aseo, la cual ha aumentado de 10 a 20 veces a nivel mundial según el director gerente de Laboratorios Hersil, José Luis Silva Martinot (RPP Noticias, 2020).

1.1 Justificación

Como ya se mencionó anteriormente, el uso de tecnología para mejorar el servicio de *delivery* tiene un potencial latente. Aun así, es importante ahondar el por qué las farmacias y boticas son un sector del servicio que es necesario abordar. Por encima del evidente incremento en la demanda de algunos productos de desinfección debido al contexto actual, se debe considerar que en años previos ya se observaba un incremento en la demanda de servicios de farmacias y boticas, presentado a continuación en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 *Establecimientos a los que acude la población para su atención por problemas de salud a nivel nacional*

Se atendió en:	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Farmacia o botica	11.8	10.8	13.2	15.5	16.6	17.7	17.7
Establecimiento de salud del MINSA o Gobiernos regionales	17.1	17.1	17.5	18.5	18.7	17.4	16.9
Establecimiento privado	5.5	6.4	7.3	7.6	8.7	8.8	8.3
Establecimiento de EsSalud	6.6	6.3	6.1	6.1	6.5	6.7	7.1
Establecimiento de sanidades	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4
Otros	1.3	1.0	1.2	1.3	1.3	1.5	1.3
No buscó atención	57.9	58.6	55.2	51.6	48.7	48.9	49.6

Nota. Esta tabla muestra el porcentaje de la población, a nivel nacional, que acude para su atención por problemas de salud según el tipo de establecimiento desde el año 2005 hasta el 2011. Adaptado de *Mercado farmacéutico y acceso a medicamentos en el Perú* [Archivo PDF], por M. Crisante, 2013, PAHO (https://www1.paho.org/per/images/stories/FtPage/2013/Mercado_farmaceutico-acceso_medicamentos-Peru.pdf).

Como se puede apreciar, desde el año 2005 hasta el 2011, el porcentaje de la población que acude a las farmacias y boticas para atención incrementó un 5.9% en ese lapso de tiempo, lo que implicaría un aumento promedio de 1% por año. Del mismo modo, en el año 2019 “[...] la división de consumo de la consultora Kantar realizó un estudio donde se observa que el consumo en valor, dentro de los hogares, a través de este canal este año crecería en más de 5% versus el 2018” (Perú Retail, 2019). Por ende, se concluye que con o sin la pandemia, el crecimiento de la demanda de los servicios que ofrecen las farmacias y boticas es una situación que eventualmente requerirá de mayor mano de obra y menor tiempo de respuesta.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que, en cuestión de normativa, “El Estado promueve el acceso universal a los productos farmacéuticos, dispositivos médicos y productos sanitarios como componente fundamental de la atención integral en salud, particularmente en las poblaciones menos favorecidas económicamente” (Ley N° 29459, 2009, Artículo 27). Sin embargo, en la práctica, tanto el sector pobre como el pobre extremo presentan un porcentaje de mercado consumido mucho menor al sector no pobre, como se presenta a continuación en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 *Gasto per cápita y porcentaje de consumo de mercado según nivel económico*

Nivel económico	Porcentaje de la Población	Porcentaje de Mercado consumido	Gasto per cápita/año (dólares)		
			Total	Urbano	Rural
Pobre extremo	20.7	4.7	3.9	5.0	3.4
Pobre	31.3	18.6	10.1	10.9	8.8
No pobre	48.0	76.7	27.2	28.7	21.0

Nota. Esta tabla muestra el porcentaje de mercado consumido y el gasto per cápita anual en dólares, dividido en sector rural y urbano, con respecto al nivel económico de la población. Adaptado de *Evaluación de los potenciales efectos sobre acceso a medicamentos del tratado de libre comercio que se negocia con los Estados Unidos de América* (p. 118), por Ministerio de Salud del Perú, 2005, RedGE (http://www.redge.org.pe/sites/default/files/MINSA-TLC-salud-Peru_0.pdf).

Esto implica, como se menciona en el mismo informe, que una cuarta parte de la población no tenga acceso al consumo de medicamentos que ofrece la ley (Ministerio de Salud del Perú [MINSA], 2005, p. 118). Este problema se debe a la exclusión del país sobre las zonas rurales y la centralización que existe en Perú; evidenciado en el hecho de que la incidencia de la exclusión en la salud se debe a fallas en el sistema en un 46% y por barreras de acceso en un 54% (Crisante, 2013, p. 11). Es por ello, que el desarrollo de la tecnología dentro del campo del servicio a *delivery* en farmacias y boticas ayudaría en el desarrollo de futuras herramientas para que las zonas rurales tuvieran acceso a una parte del servicio de salud que les ofrece la ley.

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1 Estado de la tecnología

A continuación, para la evaluación del estado de la tecnología, se revisarán proyectos y empresas que exploran el uso de robots para su aplicación en el servicio general de *delivery*.

2.1.1 Prototipo de Robot autónomo de *Delivery*

En vista del contexto actual de la pandemia, los ingenieros Abrar, Islam y Shanto (2020) propusieron un prototipo de robot móvil autónomo de 4 ruedas que pudiera realizar el servicio de *delivery*. Este robot emplearía un método de ubicación por GPS para dirigirse desde su “base” hasta el destino deseado para realizar la entrega, lo cual le permite desplazarse dentro de un rango ilimitado de distancia con respecto a su “base”. Cuenta con un depósito de plástico de 22 cm x 12 cm x 13 cm, protegido por una contraseña que activa un servomotor para abrirlo en caso sea correcta, o un buzzer que suena en caso sea incorrecta. Además, se busca que el diseño sea lo más económico posible, por lo que sus componentes son fáciles de obtener; siendo compuesto por: un microcontrolador Arduino Mega 2560, una batería de 7.4V 2200 mAh de polímero de litio que le permite operar entre 30 a 45 minutos, un módulo GPS Ublox Neo-M8N, un kit 4WD Smart Car que se emplea como chasis del robot y le permite transportar hasta 1 kilogramo de carga, un driver para motor L298N que controla los 4 motores DC del chasis, un módulo de teclado numérico de 4x3 con números del 0 al 9 para el ingreso de la contraseña, un servomotor Tower Pro MG996R para el sistema de apertura del depósito de plástico y un módulo de Bluetooth HC-05 para la transmisión de la información recibida por el GPS del robot.



Figura 2.1. *Prototipo de Robot autónomo de Delivery*. Adaptado de Abrar, Islam y Shanto, 2020, p. 2.

2.1.2 Hayka

Hayka es un robot móvil de 4 ruedas creado dentro de un startup asesorado por la 1551 Incubadora de Empresas Innovadoras de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Hayka, junto con otro robot diseñado para desinfectar productos por medio de tecnología ultravioleta, son parte de un proyecto en colaboración con Juzto, “una plataforma web que promueve la distribución de súper alimentos [...] de pequeños agricultores y productores de todo el Perú” (Fernández, 2021). Su funcionamiento, en palabras de su creador Rolando Cruzado (2021, como se citó en Fernández, 2021), es el siguiente:

Un piloto que está a cinco metros maneja a Hayka. Tiene una compuerta que se abre automáticamente, la persona recoge el producto y el robot regresa hasta la “nave nodriza” o vehículo que se encarga de trasladarlo. Puede llevar productos de hasta 15 kilos y estar en funcionamiento hasta 8 horas seguidas.



Figura 2.2. *Robot Hayka*. Adaptado de Fernández, 2021.

2.1.3 Starship Robots

Son robots móviles autónomos orientados al servicio de *delivery* de comida. Por medio de un aplicativo, el usuario puede acceder a un catálogo de productos que el área puede ofrecerle; tras realizar su orden, en la pantalla se le indicará un lugar de encuentro con el robot, así como el tiempo estimado de llegada de su orden. Una vez que el robot llega al punto de encuentro, el aplicativo envía una notificación al usuario para que proceda a recoger su pedido. En cuestión de los aspectos técnicos del robot, este dispone de 6 ruedas y una geometría cúbica que le permite transportar alrededor de 10 kilogramos de forma segura, puesto que, al recibir el encargo, el depósito del robot se bloquea con un seguro de modo que solo el usuario que realizó el pedido puede abrirlo por medio del aplicativo. Por otro lado, su alcance está limitado a 6 kilómetros a la redonda del lugar donde fue instalado; por lo que pedidos fuera de ese rango no pueden ser procesados. En cuanto a la velocidad del servicio, el robot puede moverse a una velocidad peatonal, alrededor de 6.5 km/h. Por último, cabe mencionar que su capacidad de control autónomo se debe a una combinación de visión por computadora y ubicación por GPS para conocer su ubicación; aunque en caso de necesitar apoyo humano, tiene la capacidad de cambiar a un modo de control remoto. Por otra parte, su sistema de detección de obstáculos, según BGSU Dining (s.f.), es por medio de una “burbuja de conciencia situacional” en la cual emplea cámaras, sensores de ultrasonido y redes neuronales para la detección.



Figura 2.3. *Robot de Starship*. Extraído de Starship Technologies, 2018, 1m55s.

2.1.4 Wing

Wing es un dron autónomo desarrollado por la organización de Google, X Development LLC. Al inicio de su desarrollo, por el año 2014, se realizaron vuelos y servicios de prueba en Australia, siendo la principal tarea del dron dedicarse al servicio de *delivery* de comida. Sin embargo, en vista del contexto de pandemia, Google decidió contemplar la posibilidad de transportar artículos de higiene como el papel higiénico y medicamentos como parte del servicio; lo cual fue un éxito en Estados Unidos. En cuestión del funcionamiento del servicio, es similar a los productos expuestos anteriormente; se emplea un aplicativo móvil que realiza el pedido y el dron se encarga de transportarlo. Este está diseñado con una envergadura de 1 metro aproximadamente, posee 12 rotores para mantenerse elevado y 2 rotores para avanzar, su peso es de 4.5 kg y es capaz de cargar 1.5 kg por un viaje de aproximadamente 10

km. Una vez que llega al destino, el cliente solo recoge su producto sin interactuar con el dron; pues este se posiciona a 40 metros de altura y baja el encargo por medio de una cuerda. El servicio es rápido con respecto a los medios convencionales, debido a que la velocidad de vuelo del dron puede alcanzar los 113 km/h.

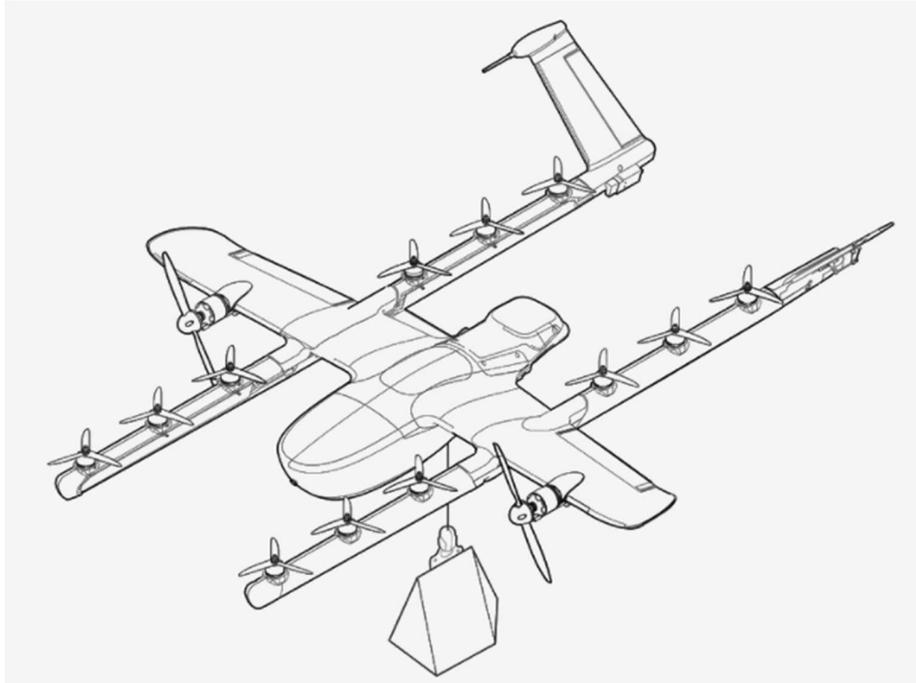


Figura 2.4. *Wing*, dron de X Development LLC. Extraído de X Development LLC, s.f.

2.1.5 Drones de Zipline

Drones autónomos diseñados por la empresa Zipline para el transporte de material médico y sangre. Debido a que su campo de trabajo son dispensar a los centros médicos, es imprescindible que se despegue en el menor tiempo posible. Para ello, varios aspectos fueron considerados en el diseño; primero, se cuenta con plataforma de lanzamiento que le permite al dron acelerar hasta los 100 km/h en 0.3 segundos; segundo, el dron tiene una forma de avioneta hecha con fibra de carbono y unas alas de poliestireno y material 3D impreso que lo hacen más liviano y le dan mejor desempeño aerodinámico; tercero, el dron se ensambla por partes con el fin de ahorrar tiempo en caso una de las partes esté dañada; cuarto, posee una de batería de ion litio de 1.25 kW.h que incorpora el circuito de GPS con el fin de no necesitar calibrarlo antes de cada vuelo; y quinto, la calibración de las alas no necesita un vuelo previo porque emplea un aplicativo móvil que usa visión por computadora para analizar la posición de códigos QR en las alas. Sus dimensiones son de 3 metros de envergadura, 2 metros de largo y 0.6 metros de alto, pesa alrededor de 10 kg y es capaz de transportar 1.6 kg dentro de un paquete atado a un paracaídas que suelta desde una altura de vuelo de 120 metros, evitando perder tiempo durante el aterrizaje. Por último, se resalta su hardware redundante (incluye un doble de actuadores y motores que funcionan de repuesto durante el vuelo) para asegurar la seguridad del producto.



Figura 2.5. *Dron de Zipline*. Extraído de Real Engineering, 2019, 6m25s.

2.1.6 Horsefly

Es un dron autónomo desarrollado por Workhorse para el servicio de *delivery* en general. El método empleado para realizar pedidos es un aplicativo móvil y las entregas se realizan de forma similar a como se opera el robot Hayka. El dron es transportado por medio de un vehículo hasta un punto cercano al destino y se libera con el paquete; luego, el cliente es avisado por medio de la app; finalmente, el paquete se baja con una cuerda y el dron regresa al vehículo que funciona como centro de control. El dron pesa 10.4 kg, puede cargar hasta 4.5 kg y viaja a una velocidad de 40 nudos, que es aproximadamente 75 km/h. Funciona con una batería de 40000 mAh que alimenta sus 4 rotores y el resto de sus sistemas; además, emplea una comunicación LTE Onboard Data Connection, la cual emplea tecnología de banda ancha inalámbrica para la transmisión de datos y el acceso a internet (SoftwareLab, s.f.). Cabe resaltar que inicialmente las pruebas del producto se realizaron con un modelo de 8 rotores, el cual demostró la capacidad de realizar vuelos autónomos por un tiempo de 30 minutos.



Figura 2.6. *Dron de Workhorse: Horsefly*. Extraído de Workhorse, s.f.

2.1.7 Boeing CAV

Es un proyecto de dron autónomo desarrollado por Boeing NeXt con el fin de explorar las posibilidades del transporte de personas y el servicio de *delivery* vía aérea. El proyecto inició el 2018 y desde entonces el concepto y diseño del dron ha evolucionado a medida que pasaba por pruebas en ambientes controlados y simulaciones de vuelo. El último diseño del dron consta de 6 rotores en tándem y 12 hélices que le permiten ejecutar rutas programadas de 3 minutos con despegue y aterrizaje. Sus dimensiones son de 6.1 metros de envergadura, 5.33 metros de largo y 1.52 metros de alto, pesa aproximadamente 500 kg, puede cargar hasta 227 kg y viaja a una velocidad de 20 nudos, que es aproximadamente 37 km/h.



Figura 2.7. Dron de Boeing NeXt. Extraído de Boeing, 2019.

2.1.8 Drones de Flytrex

Flytrex es una compañía de Islandia que desarrolló un dron hexacóptero orientado a brindar el servicio de *delivery* de restaurantes y tiendas pequeñas. El método empleado para solicitar el servicio es similar al presentados en Wing, se emplea un aplicativo móvil para realizar una orden y el dron volará a una ubicación cercana para descender a una altura de 2.5 metros y bajar el paquete por medio de una cuerda. Además, su sistema de navegación por GPS y sensores le permite al usuario mantener un seguimiento constante de su pedido por medio del aplicativo. En lo que respecta a las especificaciones técnicas, el rango de trabajo para el dron de Flytrex es de 10 km por viaje de ida y vuelta a una altura de vuelo de 70 metros aproximadamente. Sus dimensiones son de 1.3 metros de largo y de ancho y su alto es de 0.8 metros. A parte, pesa alrededor de 10 kg, puede cargar hasta 3 kg y viaja a una velocidad aproximada de 50 km/h. Por último, se resalta que aplica la misma estrategia que el dron de Zipline al emplear redundancia en su hardware para asegurar la seguridad del entorno y del producto transportado.



Figura 2.8. *Hexacóptero de Flytrex*. Extraído de Flytrex, s.f.

2.1.9 Drones de Amazon Prime Air

Amazon Prime Air es un servicio de la compañía de comercio electrónico Amazon el cual emplea drones autónomos para brindar un servicio de *delivery* que ayudaría a la empresa en reducir los costos de planilla y las emisiones atmosféricas del combustible usado en el transporte de sus productos. El método empleado para la solicitud de los productos enviados por dron es similar al de los otros drones presentados anteriormente: se emplea el sitio web de Amazon para solicitar un envío por Amazon Prime Air, con la política de espera no mayor a 30 minutos. El dron es capaz de llevar cargas de hasta 2.2 kg en un rango de 24 km a una velocidad de 60 nudos, lo cual es equivalente a 111 km/h. Manteniéndose a 121 metros sobre el suelo, el sistema de GPS y su estructura de hardware redundante le aseguran al cliente que su producto llegará de forma segura. Una vez llegado a su destino, el dron baja hasta el suelo, deja el paquete y vuelve a la central de donde partió. Por último, con respecto a las dimensiones del dron, tiene 3 metros de ancho, 1.6 metros de largo y 1.16 m de alto.



Figura 2.9. *Dron de Amazon Prime Air*. Extraído de Amazon, s.f.

De ese modo, se observa que varias empresas y proyectos pueden afrontar un mismo problema desde distintos puntos de vista. Ya sea para transportar comida o instrumentos médicos, los robots pueden recorrer tanto tierra como aire para cumplir el servicio de *delivery* que se les encarga. Por ende, se aprecia que dependiendo del medio por el cual se desplaza el robot, las especificaciones como el peso, la geometría, la energía requerida o la velocidad pueden variar entre cada producto como se observa en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1 Tabla comparativa entre los robots dedicados al servicio de delivery de diversos productos

Características físicas del robot	Prototipo de robot autónomo	Hayka	Starship Robots	Wing	Zipline	Horsefly	Boeing CAV	Flytrex	Amazon Prime Air
Tipo de robot	Terrestre	Terrestre	Terrestre	Aéreo	Aéreo	Aéreo	Aéreo	Aéreo	Aéreo
Tipo de control	Autónomo	Teleoperado	Autónomo / Teleoperado	Autónomo	Autónomo	Autónomo	Ruta preprogramada	Autónomo / Teleoperado	Autónomo
Apoyo externo	Ninguno	Vehículo como nave nodriza	Ninguno	Ninguno	Plataforma de despegue	Vehículo como nave nodriza	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Peso del robot	No especificada	No especificada	No especificada	4.5 kg	10 kg	10.4 kg	500 kg	10 kg	No especificada
Dimensiones del robot	22 cm x 12 cm x 13 cm	No especificada	No especificada	1 metro de envergadura	3 m de envergadura, 2 m de largo y 0.6 m de alto	No especificada	6.1 m de envergadura, 5.33 m de largo y 1.52 m de alto	1.3 m x 1.3 m x 0.8 m	3 m x 1.6 m x 1.16 m
Cantidad de ruedas/hélices	4 ruedas	4 ruedas	6 ruedas	14 hélices	2 hélices	4 hélices	12 hélices	6 hélices	5 hélices
Fuente de energía	Batería de polímero de litio de 7.4V 2200 mAh	No especificada	No especificada	No especificada	Batería de ión-litio de 1.25 kW.h	Batería de 40000 mAh	No especificada	No especificada	No especificada
Material que compone al robot	Principalmente plástico	Principalmente plástico	No especificada	No especificada	Fibra de carbono, poliestireno y material 3D impreso	No especificada	No especificada	No especificada	No especificada
Altura de vuelo	No aplica	No aplica	No aplica	40 metros sobre el suelo	120 metros sobre el suelo	No especificada	No especificada	70 metros sobre el suelo	121 metros sobre el suelo
Velocidad del robot	No especificada	No especificada	6.5 km/h	113 km/h	100 km/h	75 km/h	37 km/h	50 km/h	111 km/h
Método de ubicación	GPS / Bluetooth	No especificada	GPS / Visión por computadora	GPS	GPS	LTE Onboard Data Connection	No especificada	GPS y sensores	GPS
Medio de transporte de la carga	Depósito de plástico con contraseña	Depósito de plástico	Depósito desbloqueado por el cliente	Caja bajada por cable	Caja con paracaídas	Caja bajada por cable	No especificada	Caja bajada por cable a 2.5 m del suelo	El dron deja la caja en el suelo
Rango de la distancia de trabajo	Ilimitado	5 metros del operador	Radio de 6 km	Distancias de 10 km	Radio de 80 km	No especificada	No especificada	10 km por viaje de ida y vuelta	Rango de 24 km
Material transportado	Productos en general	Productos agrícolas	Comida y bebidas	Comida, medicamentos y papel higiénico	Bolsas de sangre y material médico	Productos en general	Productos en general y personas	Comida	Productos en general
Peso de la carga	Hasta 1 kg	15 kg	10 kg	1.5 kg	1.6 kg	4.5 kg	227 kg	3 kg	2.2 kg
Tiempo de operación	De 30 a 45 minutos seguidos	Hasta 8 horas seguidas	Delivery en 15 minutos o menos	Delivery entre 7 a 8 minutos	No especificada	30 minutos de vuelo autónomo durante pruebas	3 minutos en vuelos de prueba	No especificada	Envío no mayor a 30 minutos

Nota. Tabla comparativa de los aspectos físicos, técnicos y de servicio que presenta cada robot. Elaboración propia.

Por último, basándose en el análisis previo del estado de la tecnología referente al uso de robots dentro del campo de *delivery*, se concluye que el presente trabajo estará orientado al diseño de un prototipo de dron teleoperado y no al de un robot terrestre. Esto se debe a que la cantidad de drones desarrollados para el servicio de *delivery* en general, con respecto a la de robots móviles, es mayor, por lo que se dispone de más referencias al momento de diseñar. Del mismo modo, se denota que cuando se trata de transportar artículos provenientes de farmacias o boticas u objetos del ámbito médico en general, los drones suelen ser la opción preferida en vista de la velocidad a la que transportan los pedidos y del peso de la carga con la que trabajan.

Por otro lado, en vista de la necesidad que aborda el contexto de la pandemia actualmente y la importancia de que el prototipo no solo sea útil y efectivo para la solución de la problemática, sino que también sea competente en un mercado emergente como lo es el de los drones, se buscará orientar a que el prototipo sea el primer paso para desarrollar un producto de precio económico. Además, se le diseñará un depósito de desinfección con la finalidad de que el prototipo sea funcional en escenarios como la pandemia del Covid-19 o similares.

2.2 Objetivos

De esa manera, partiendo de la conclusión anterior y la justificación establecida en el marco problemático, el objetivo general del presente trabajo es: Diseñar un prototipo de dron teleoperado para el servicio de *delivery* de productos farmacéuticos en entornos infecciosos. Este prototipo será capaz de realizar el transporte de dichos productos, y del depósito y artículos de desinfección, donde los últimos servirán para desinfectar los productos a enviar. Para ello, se desarrollarán los siguientes objetivos específicos:

- Establecer los parámetros y características del dron y el depósito de desinfección para elaborar una lista de exigencias que guíe el posterior diseño.
- Formular el concepto de solución del dron y de su mando con el fin de establecer un control teleoperado.
- Diseñar el sistema eléctrico y electrónico seleccionando las fuentes de energía, controladores, sensores y actuadores que cumplan con el funcionamiento del dron.
- Elaborar el diseño mecánico del dron y su depósito para que ejecute las funciones de volar y almacenar los productos para desinfectarlos.
- Diseñar y simular el algoritmo de control de orientación para comprobar la facilidad de maniobrar el dron por un operador humano.
- Estimar los costos del dron diseñado.

2.3 Alcance

El alcance de este trabajo abarca el diseño de un prototipo de dron teleoperado para el servicio de *delivery* de productos farmacéuticos en entornos infecciosos, como pandemias, brotes virales o epidemias. Además, parte del diseño del dron incluye un depósito de desinfección donde se colocarán los productos para que el robot los desinfecte y transporte. Por otra parte, debe resaltarse que los requisitos para el proyecto planteados a lo largo de la investigación corresponden a un ambiente de uso urbano y genérico, partiendo de los distritos de Lima Metropolitana en Perú como referencia. Cabe mencionar que el prototipo apunta a un nivel 4 de madurez tecnológica (TRL4); con simulaciones que se realizarán a nivel de software y no de forma física en un ambiente de laboratorio controlado.

2.4 Marco teórico

El marco teórico partirá de los objetivos planteados para presentar los conceptos que serán útiles para el desarrollo del prototipo planteado en el presente trabajo. Por ello, a continuación, se abordarán las bases teóricas de la teleoperación, arquitectura de las redes de comunicación, conceptos generales de los drones, modelos matemáticos sobre el funcionamiento de dichos robots y los métodos de desinfección existentes.

2.4.1 Teleoperación

El concepto de teleoperación hace referencia a la ejecución de tareas a distancia (Azorín, 2003). Partiendo de ello, se establece que para un sistema de teleoperación se requiere, como mínimo, de un sistema que actúe de entrada para las instrucciones dadas por el operador, denominado maestro, y un sistema que realice dichas instrucciones en un entorno alejado, denominado esclavo; ambos comunicados por un canal específico para la transmisión de datos. De ese modo, es que se obtiene el modelo general “maestro-esclavo” de las partes involucradas en la teleoperación, las cuales se presentan en la Figura 2.10.

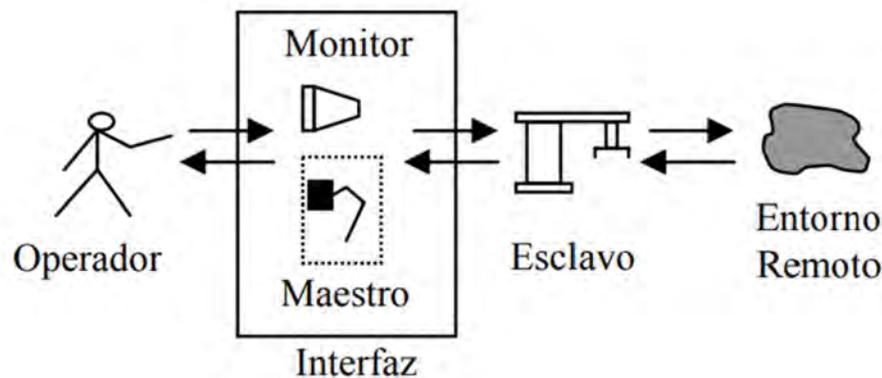


Figura 2.10. *Elementos principales de un sistema teleoperado.* Extraído de Azorín, 2003, p. 9.

A partir del modelo general es que se define la función de cada bloque presentado en la Figura 2.10. En primer lugar, el operador humano es aquel que realiza las acciones físicas y recibe la retroalimentación del sistema. En segundo lugar, el entorno remoto es aquel lugar o espacio con el que se desea interactuar de manera no presencial. En tercer lugar, el sistema denominado maestro es el instrumento que emplea el operador para realizar las acciones que busca ejecutar en el entorno, así como también es el medio por el cual el operador recibe la retroalimentación de sus acciones en el entorno. Y, por último, el sistema denominado esclavo es el encargado de interactuar con el entorno basándose en las acciones que realizó el operador y capturar los cambios en el entorno para elaborar la retroalimentación.

Otros autores, como Tafur (2015), plantean separar tanto el sistema maestro como el sistema esclavo en dos bloques funcionales: el manipulador y el controlador. Por un lado, el manipulador local es la parte del sistema maestro que es manejada de forma directa por el operador; mientras que, el controlador local se encarga de brindar la retroalimentación al humano. Por otro lado, el manipulador remoto es el sistema esclavo que replica las acciones del operador sobre el entorno; mientras que, el

controlador remoto se encargaría de procesar los cambios en el entorno para enviarlos al operario como retroalimentación. Del mismo modo, se enfatiza la presencia de un canal de comunicación que influye directamente en el tiempo de retardo que existe entre la transmisión de datos del sistema “maestro-esclavo”. Con base en lo explicado anteriormente, el modelo general “maestro-esclavo” de un sistema teleoperado sería como el diagrama de bloques presentado en la Figura 2.11.

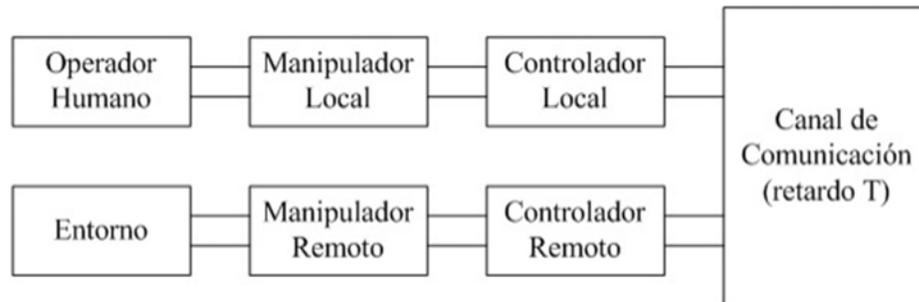


Figura 2.11. *Diagrama de bloques de un sistema de teleoperación.* Extraído de Tafur, 2015, p. 13.

Por último, es importante mencionar que la teleoperación también se clasifica en clases, pudiendo ser unilateral o bilateral. Dichos términos hacen referencia a la forma en la que los sistemas maestro y esclavo se comunican e interactúan entre sí. Como lo menciona Tafur (2015):

Por unilaterales se entiende que un robot está enviando datos a otro pero no recibe nada del otro robot; mientras que bilateral significa que los robots están realmente interactuando entre sí. Todos los robots en un sistema de teleoperación bilateral envían y reciben datos unos a otros. (p. 15)

2.4.2 Sistemas de comunicación

Un sistema de comunicación es aquel que permite recibir y/o transmitir información. Del mismo modo, las características del sistema influyen en aspectos tales como el tipo de información a intercambiar, la cantidad, la velocidad de transmisión, el costo del sistema y el alcance de comunicación. Partiendo de ello, se debe comprender que el principio de la comunicación en drones se da a través de ondas de radio (Mendivelso y Leon, 2020).

2.4.2.1 Arquitectura de las redes de comunicación

Como lo mencionan Mendivelso y Leon (2020), para la comunicación y el monitoreo de drones existen 3 tipos de arquitecturas: las redes de área doméstica o HAN (Home Area Network), las redes de áreas vecinas o NAN (Near-me Area Network) y las redes de área amplia o WAN (Wide Area Network).

Por un lado, la red HAN se emplea para las comunicaciones entre electrodomésticos y otros equipos eléctricos. Se caracteriza por su baja latencia, ser flexibles y un ancho de banda bajo (entre 10 y 100 kbps). Por otro lado, la red NAN permite un flujo intermedio de información, usualmente empleado en las empresas de servicios

eléctricos para recopilar datos. Se caracteriza por su ancho de banda entre 100 kbps y 100 Mbps. Por último, la red WAN se emplea para funciones de monitoreo, control y protección en tiempo real debido a su amplio rango y su alto ancho de banda que trabaja entre 10 y 100 Mbps (Mendivelso y Leon, 2020).

Cada una posee distintas características, como el rango y la velocidad de transmisión de datos, la cual se puede resumir a continuación en la Figura 2.12.

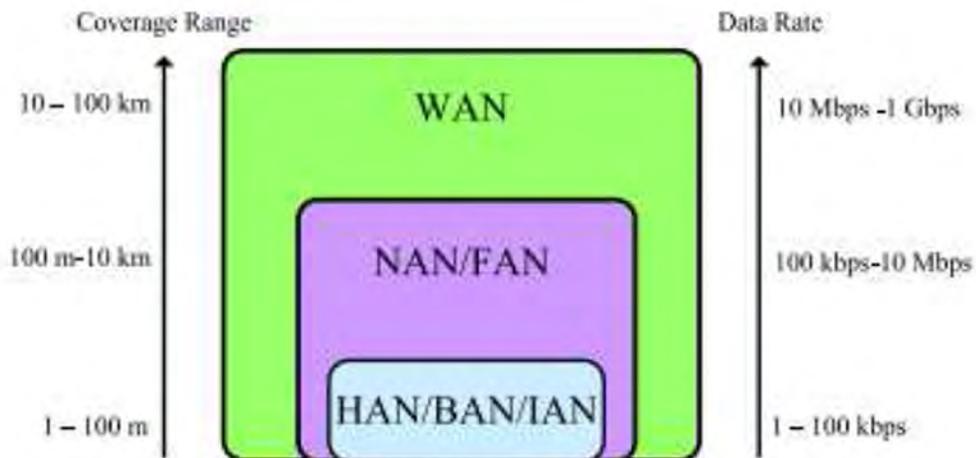


Figura 2.12. *Arquitectura de las redes de comunicaciones*. La imagen muestra la escala de las distintas arquitecturas de redes en cuestión de rango de cobertura y la velocidad de transmisión. Extraído de Mendivelso y Leon, 2020, p. 13.

2.4.2.2 Tecnologías de comunicación

Mendivelso y León (2020) resumen que se pueden emplear 4 tipos de tecnologías al momento de establecer una red de comunicación, las cuales son: Zigbee, LoRaWAN, Wi-Fi y LTE. Cada una de estas tiene características específicas que ayudan a distintas solicitudes; por ejemplo, Zigbee está basada en el estándar IEEE 802.15.4, lo que implica que su velocidad de transmisión de datos sea baja (entre 0.02 a 0.25 Mbps) y que sus frecuencias de trabajo serán entre los 868 MHz y los 2.4 GHz. También implica que su consumo de energía sea bajo y que tenga un rango de trabajo de máximo 1.5 km. Finalmente, se debe mencionar que la seguridad que ofrece en la red es baja y su compatibilidad se limita solo dispositivos que operen con la misma tecnología. De igual manera, la tecnología LoRaWAN está basada en el mismo estándar que Zigbee, con la diferencia de que su velocidad de transmisión de datos es alrededor de los 0.3 Mbps y su rango de trabajo sea 15 km, debido a que está diseñado para aplicaciones industriales. Además, cabe resaltar que posee un básico protocolo de seguridad y una compatibilidad limitada a dispositivos que empleen la misma tecnología.

Por otro lado, el Wi-Fi emplean el estándar IEEE 802.11ax, lo cual permite aumentar su velocidad de transmisión entre 54 y 600 Mbps, así como su rango de trabajo hasta aproximadamente 304 km. Trabaja a una frecuencia de 5 GHz, es compatible con varios dispositivos y su protocolo de seguridad WPA. Por último, está la tecnología LTE, la cual es la más presente para los dispositivos de tecnología móvil. Tienen la ventaja de tener un alcance global, así como una compatibilidad con la mayoría de

dispositivos. Posee un protocolo de encriptado NSA AES de 256 bits y un estándar que abarca desde el 2G hasta el 4G, lo que le permite trabajar a una frecuencia entre 0.47 y 2.3 GHz y transmitir datos a una velocidad entre 86 y 326 Mbps.

A continuación, en la Tabla 2.2, se presenta un resumen de las características mencionadas anteriormente con el fin de facilitar la evaluación de las ventajas y desventajas que implica el uso de cada tecnología.

Tabla 2.2 Principales características de las tecnologías de comunicación

Tecnología	Estándar	Frecuencia (GHz)	Alcance (km)	Velocidad (Mbps)	Seguridad	Compatibilidad
Zigbee	IEEE 802.15.4	0.868 a 2.4	1.5	0.02 a 0.25	Baja	Dispositivos Zigbee
LoRaWAN	IEEE 802.15.5	0.868 a 2.5	15	0.3	Básica	Dispositivos Lora
Wi-Fi	IEEE 802.11ax	5	304	54 a 600	WPA	Depende de la aplicación
LTE	2G - 4G	0.47 a 2.3	Global	86 a 326	NSA AES 256	Depende de la aplicación

Nota. Adaptado de *Diseño del sistema de comunicación entre un dron y una estación terrena para entrega de mercancía* [Tesis de grado] (p. 16), por R. Mendivelso y H. Leon, 2020, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

2.4.3 Clasificación de drones

Es importante recalcar que el término dron es una forma coloquial de llamar a un UAV (Ruipérez, 2016). Dichas siglas son referentes al término inglés para un vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle), por lo que el término dron puede abarcar una amplia gama de productos, cada uno con sus propias características y limitaciones. De ese modo, es que los drones se pueden clasificar bajo diferentes criterios como el método de control y su forma de sustentación.

En primer lugar, la clasificación por el método de control hace referencia a la presencia de algún operario o software que influya en el control del dron. De ese modo, se tiene las siguientes metodologías de control:

- Autónomo: Sin intervención humana. Controlado por medio de sus propios sensores y software.
- Monitorizado: Intervención indirecta de un operador humano. El dron recibe datos del operador humano sobre las acciones a realizar durante el vuelo.
- Supervisado: Intervención directa de un operador humano. El dron cuenta con ciertas acciones automáticas.
- Preprogramado: El dron recorre una ruta, programada con anterioridad, no alterable.
- Control remoto: Intervención directa y absoluta de un operador humano.

En segundo lugar, la clasificación por la forma de sustentación hace referencia al diseño y actuadores que el dron emplea para volar. De ese modo, se tiene los siguientes tipos de dron:

- De ala fija: Presenta un diseño similar a un avión en miniatura. Es capaz de alcanzar altas velocidades y trabajar en un amplio rango de vuelo.
- Multicóptero: Presentan más de un motor. Su diseño se orienta a brazos que sostienen los rotores y que se unen en una estructura que contiene el resto del hardware.

2.4.3.1 Tipos de multicóptero

Dependiendo del número de rotores que posea un multicóptero, estos pueden clasificarse en:

- Tricópteros: Emplea 3 rotores, dos en el frente y uno atrás, y es considerada la versión más compacta de los multicópteros. Internamente requiere un cuarto rotor para mantener el equilibrio de fuerzas durante el vuelo. Posee un servomotor en el rotor trasero para manejar los giros. Entre las ventajas de este producto está el hecho de ser el más económico y ligero, no requerir muchas piezas, tener un buen campo visual debido a la orientación de sus rotores y facilitar su almacenaje y transporte. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como el no tener mucha presencia en el mercado, carecer de buena estabilidad y capacidad de carga y ninguna redundancia en su diseño que priorice la seguridad del entorno en caso de fallas.
- Cuadricópteros: Emplea 4 rotores y es la versión más común y comercial de los drones. Tiene dos configuraciones posibles: la configuración en cruz orienta cada rotor en un punto cardinal de modo que el control de dirección se realice con un rotor, pero limita el campo de visión; y la configuración en x que resulta de rotar 45° la configuración en cruz, aumentando el campo de visión, pero requiriendo un control simultáneo de los rotores. Entre las ventajas de este producto está su rápida aceleración, mayor agilidad con respecto a los otros multicópteros y presentar una estructura sencilla. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como el poseer una velocidad y estabilidad limitadas y ninguna redundancia en su diseño que priorice la seguridad del entorno en caso de fallas.
- Hexacópteros: Emplea 6 rotores y su funcionamiento es similar al del cuadricóptero. También tiene dos configuraciones posibles: la configuración en cruz, con un rotor en frente, uno atrás y el resto dispuestos de forma simétrica al eje longitudinal, y en x, rotando 30° grados la configuración en cruz. Entre las ventajas de este producto está su mayor estabilidad con respecto al cuadricóptero y su diseño redundante. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como el requerir más energía para la alimentación de sus motores, poca compactibilidad y precio elevado.
- Octocópteros: Emplea 8 rotores y su funcionamiento es similar al del cuadricóptero. También tiene dos configuraciones posibles: la configuración en cruz, con un rotor en frente, uno atrás y el resto dispuestos de forma simétrica al eje longitudinal, y en x, rotando 22.5° grados la configuración en cruz. Entre las ventajas de este producto está su mayor potencia de vuelo, mayor capacidad de carga y su diseño redundante. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como el requerir más energía para la alimentación de sus motores, poca compactibilidad y el precio más elevado de todos los multicópteros.

2.4.4 Modelo matemático de un dron

Para abordar el modelo matemático de la cinemática y dinámica de un dron se deben tener en claro los movimientos que es capaz de realizar el robot en un espacio tridimensional y la relación matemática entre un sistema de referencia fijo y uno relativo a un objeto.

En primer lugar, el dron no está sujeto a ningún punto fijo o de apoyo, por lo que, si se plantea un eje de referencia tridimensional en el centro de masa del dron, este se comportará como un objeto con 6 grados de libertad. Esto significa que el dron tiene la posibilidad de desplazarse longitudinalmente en dirección de su eje Y, de su eje X y de su eje Z. Del mismo modo, el dron tiene la libertad de rotar sobre el eje Y, el eje X y el eje Z, sumando un total de 6 posibilidades de movimiento. En cuestión de terminología, los ángulos de rotación tienen nombres específicos cuando se trabaja con drones: el ángulo de rotación sobre el eje Z se denomina Yaw o Guiñada y se denota con la letra griega Ψ , el ángulo de rotación sobre el eje Y se denomina Pitch o Elevación y se denota con la letra griega θ y el ángulo de rotación sobre el eje X se denomina Roll o Alabeo y se denota con la letra griega Φ . A continuación, se presenta en la Figura 2.13 una visión más gráfica de lo expuesto anteriormente.

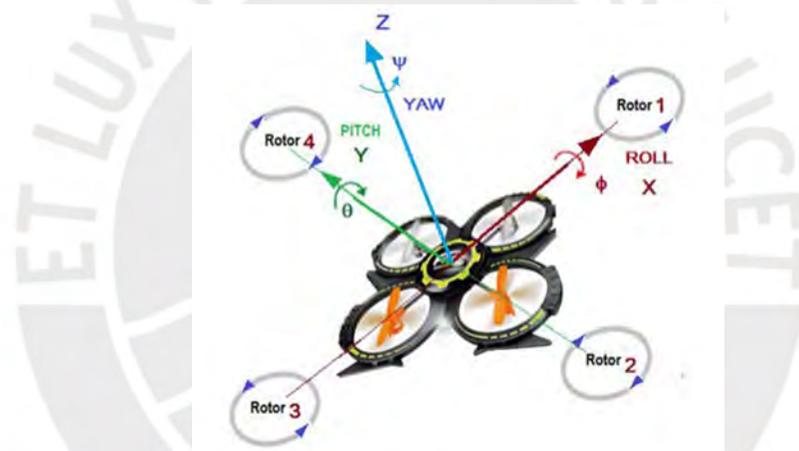


Figura 2.13. *Esquema de los movimientos de un dron.* Extraído de Nieto y Vaca, 2020, p. 334.

En segundo lugar, para explicar la relación entre un sistema de referencia fijo y uno relativo a un objeto, se empleará la Figura 2.14. Esta representa la existencia de dos sistemas de referencia: el sistema inercial I que actuará como el fijo a tierra y el sistema fijo al objeto rígido L, el cual tiene como origen el centro de masa del dron.

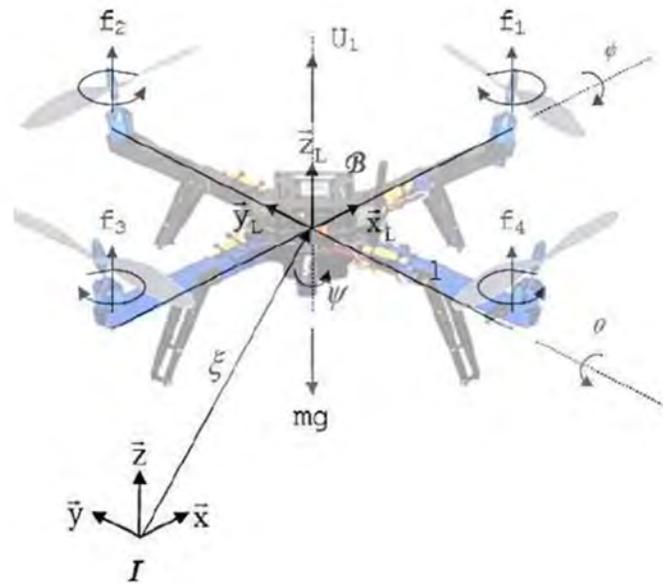


Figura 2.14. Esquema de un sistema de referencia fijo y un sistema de referencia relativo a un objeto. Extraído de Paiva, 2016, p. 7.

De ese modo, la relación parte de la premisa que dicta que existe una matriz R , llamada matriz de rotación, que puede transformar cualquier cambio de orientación que ocurra en el sistema L hacia el sistema I (Paiva, 2016). De esa forma, a partir de la expresión 2.1, se puede hallar la expresión 2.2.

$$\begin{bmatrix} \vec{X}_I \\ \vec{Y}_I \\ \vec{Z}_I \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \vec{X}_L \\ \vec{Y}_L \\ \vec{Z}_L \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \theta & \cos \Psi \sin \theta \sin \phi - \sin \Psi \cos \phi & \cos \Psi \sin \theta \cos \phi - \sin \Psi \sin \phi \\ \sin \Psi \cos \theta & \sin \Psi \sin \theta \sin \phi - \cos \Psi \cos \phi & \sin \Psi \sin \theta \cos \phi - \cos \Psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Por último, se procede a obtener el modelo matemático de un dron. Para ello, se debe resaltar que los ángulos Φ , θ y Ψ presentados en la expresión 2.2 y en las expresiones del modelo aerodinámico representan los ángulos con respecto a sus ejes del sistema de referencia fijo a tierra. Por lo tanto, no deben confundirse con los ángulos de Roll, Pitch y Yaw presentados anteriormente en la Figura 2.13. Las velocidades angulares correspondientes al sistema de referencia fijo al dron son representadas por las letras p , q y r . La relación de estos con los ángulos Φ , θ y Ψ , para valores muy pequeños, se presenta en la expresión 2.3.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Continuando con el modelo aerodinámico, la cinemática del sistema se basa en la expresión 2.4, donde m representa la masa del dron y \dot{v} representa el vector aceleración en el sistema de referencia fijo a tierra, lo cual se observa en la expresión 2.5. Del mismo modo, la variable F_B se multiplica a la matriz de rotación R , debido a que representa el peso del dron, las fuerzas aerodinámicas y las fuerzas de empuje en el sistema de referencia fijo al dron. Esta relación se aprecia en la expresión 2.6.

$$m\dot{v} = RF_B \quad (2.4)$$

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$RF_B = -mg \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(b \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \right) \quad (2.6)$$

Es importante recordar que en la expresión 2.6, la sumatoria representa las características del empuje que experimenta el dron para contrarrestar el peso del mismo. Estas fuerzas, presentadas a continuación en la expresión 2.7, también son conocidas como movimientos básicos y dependen de constantes como b y d , los cuales son los coeficientes de empuje y de arrastre de los rotores respectivamente. Igualmente, dependen de las variables Ω_i , las cuales representan las velocidades angulares de cada uno de los motores del dron, siendo este el caso de un cuadricóptero debido a que solo se presentan 4 velocidades.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ b(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Por otro lado, la dinámica del sistema se basa en la expresión 2.8, donde I representa la matriz de inercia presentada en la expresión 2.9 y \dot{w} representa el vector aceleración angular en la expresión 2.10, ambos con respecto al sistema de referencia fijo al dron.

$$I\dot{w} = -w \times Iw + \tau_B \quad (2.8)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\dot{w} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Nótese que en 2.8, aparece el termino τ_B , cuya fórmula se presenta en la expresión 2.11. Esta se conforma de la variable τ_a que representa los pares de fuerza aplicados a los ejes dron, como se aprecia en la expresión 2.12, y está en función de los movimientos básicos presentadas en 2.7 y una constante l , que equivale a la distancia

entre los motores y el centro de gravedad. Además, τ_B incluye el efecto giroscópico que se experimenta al momento de existir un desbalance en la suma de las velocidades angulas de los motores. En este efecto, J_R representa el momento de inercia rotacional del motor alrededor de su eje.

$$\tau_B = - \sum_{i=1}^4 J_R \left(w \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \Omega_i + \tau_a \quad (2.11)$$

$$\tau_a = \begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Una vez establecidas todas las expresiones anteriores, se puede obtener el modelo matemático simplificado, el cual brinda las aceleraciones lineales y angulares del dron con respecto al sistema de referencia fijo a tierra y la velocidad general del dron representada por la suma de las velocidades de cada rotor. Es pertinente enfatizar que el modelo presentado en las expresiones 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19 funciona tanto para un dron de 4 rotores con una configuración en cruz como un dron con una configuración en x. Sin embargo, se debe considerar que, para la configuración en x, los valores de los movimientos básicos son distintos y se presentan en la expresión 2.20.

$$\ddot{X} = (\sin \Psi \sin \phi + \cos \Psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.13)$$

$$\ddot{Y} = (-\cos \Psi \sin \phi + \sin \Psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.14)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \quad (2.15)$$

$$\ddot{\phi} = \dot{p} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} qr - \frac{J_{TP}}{I_{xx}} q\Omega + \frac{lU_2}{I_{xx}} \quad (2.16)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{q} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} pr + \frac{J_{TP}}{I_{yy}} p\Omega + \frac{lU_3}{I_{yy}} \quad (2.17)$$

$$\ddot{\Psi} = \dot{r} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} pq + \frac{U_4}{I_{zz}} \quad (2.18)$$

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ b(\Omega_4^2 + \Omega_3^2 - \Omega_1^2 - \Omega_2^2) \\ b(\Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_1^2 - \Omega_4^2) \\ d(\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.4.5 Modelo dinámico de un rotor

Para el modelo dinámico de un rotor se parten de las ecuaciones que relacionan la energía eléctrica suministrada con la energía mecánica generada por el rotor. De ese modo, la expresión 2.21 representa el circuito eléctrico básico de un motor considerando una inductancia casi nula debido a que los motores empleados en robots tienen un óptimo diseño. En esta ecuación V es el voltaje suministrado, R es una resistencia en serie al motor, i es la corriente que consume el motor, K_E es la constante del motor y w_M es la velocidad angular del mismo.

$$V = Ri + K_E w_M \quad (2.21)$$

De la misma forma, la expresión 2.22 representa la dinámica del motor, donde J_{TM} es el momento de inercia total del motor (considerando cargas), \dot{w}_M es la aceleración angular del motor, K_M es la constante del motor que relaciona la corriente i con el torque generado por el actuador y T_L es el torque generado por la carga a mover.

$$J_{TM} \dot{w}_M = K_M i + T_L \quad (2.22)$$

Además, se debe considerar la relación que existe entre los momentos de inercia totales del motor (J_{TM}) y de la carga (J_{TP}), que sería una hélice, presentada en la expresión 2.23. En esa ecuación, J_M es la inercia de solo el motor y J_P es la inercia de solo la carga. También se considera el uso de una reducción entre el motor y la carga que tiene una eficiencia n y una razón de transformación r , apreciada en la expresión 2.24.

$$J_{TP} = J_{TM} nr^2 = J_M nr^2 + J_P \quad (2.23)$$

$$r = \frac{w_M}{w_P} \quad (2.24)$$

Es a partir de dichas expresiones que se obtiene la expresión 2.25, en donde se considera que K_E y K_M son iguales en número para simplificar los términos y elevar uno de ellos al cuadrado. También aparece un factor de arrastre d y la velocidad angular de la carga w_P , expresada anteriormente en 2.24.

$$\dot{w}_P = -\frac{K_M^2}{RJ_{TP}} nr^2 w_P - \frac{d}{J_{TP}} w_P^2 + \frac{K_M}{RJ_{TP}} nr V \quad (2.25)$$

Por último, con el fin de poder aplicar algoritmos de control al modelo de un dron, se procede a linealizar la expresión 2.25 alrededor de un punto \dot{w}_o . Después, considerando que la ecuación corresponde solo a un rotor, se multiplican los términos constantes por una serie de vectores que son el vector de aceleraciones angulares de los 4 rotores $\left(\frac{d\vec{\Omega}}{dt}\right)$, el vector de velocidades angulares de los 4 rotores $(\vec{\Omega})$ y el vector de voltajes de entrada (\vec{V}) , obteniendo finalmente la expresión 2.26.

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = -\left(\frac{K_M^2 nr^2}{RJ_{TP}} + \frac{2dw_o}{J_{TP}}\right) \vec{\Omega} + \left(\frac{K_M nr}{RJ_{TP}}\right) \vec{V} + \left(\frac{dw_o^2}{J_{TP}}\right) \quad (2.26)$$

2.4.6 Algoritmos de control en drones

Como lo plantea Durán (2012), “[...] las aeronaves son sistemas multivariantes, no lineales y sujetos a restricciones con una dinámica rápida”. Esto significa que, para efectos de aplicar algoritmos de control, se deberán adaptar las ecuaciones a fin de que la técnica empleada pueda satisfacer las especificaciones requeridas. Es por ello que, de entre todas las técnicas de control existentes, se resaltan dos para su aplicación en drones: el control PID y el control predictivo.

En lo que respecta al control PID, se resalta que es la técnica de control más extendida dentro de su campo de aplicación. El concepto base del PID es emplear tres parámetros para el ajuste de la señal de error de forma proporcional, integral y derivativa. Sin embargo, la técnica puede verse limitada a “[...] ser insuficiente para estabilizar sistemas lineales de orden mayor a dos o no lineales” (Durán, 2012). El procedimiento para incorporar un control PID comienza con el ajuste de los parámetros, lo que implica analizar la respuesta del sistema a distintas entradas y distintas configuraciones de las ganancias proporcional, integral y derivativa que actuarán sobre la señal de error. Luego de ello, enfocándose en el campo del control de una aeronave, se deberá considerar que los modelos matemáticos para el movimiento de un dron dan como resultado varios escenarios, lo cual se traduce como múltiples dinámicas para un mismo objeto, por lo que se producirán varias ganancias pertenecientes a cada escenario analizado. Aun así, con sus ventajas y desventajas, “el control PID se ha empleado con gran éxito al mundo de las aeronaves” (Pamadi, 2004, como se citó en Durán, 2012).

Por otro lado, el control predictivo “[...] tiene como objetivo resolver de forma óptima, problemas de control y automatización de procesos industriales que se caractericen por presentar un comportamiento dinámico complicado, multivariable, y/o inestable” (Díaz, 2006, como se citó en Durán, 2012). Tal como lo dice el nombre de la técnica, se empleará el modelo matemático del dron para predecir su comportamiento, lo cual le permitirá elaborar una señal para el control de la predicción. Del mismo modo, cuenta con la ventaja de ser una técnica intuitiva al permitir formular el control en el dominio del tiempo. Sin embargo, entre las limitaciones que presenta la técnica, esta su alto costo computacional, la necesidad de que el modelo matemático sea lo más preciso posible y que el ajuste del controlador emplee un método de prueba y error para la configuración de sus parámetros (Durán, 2012).

2.4.7 Métodos de desinfección

Partiendo del contexto en el cual se desarrolla este trabajo, resultante importante presentar los métodos de desinfección para superficies más conocidos. En primer lugar, se presenta el uso de alcohol diluido al 70%. Aunque su uso para la desinfección específica del SARS-CoV-2 aún se está investigando, Preevid (2020) menciona que “[...] de modo similar a lo que ocurre con otros coronavirus, el etanol al 62-71% también podría reducir la infectividad del SARS-CoV-2 en las superficies”. Los tipos de alcohol que se presentan son el etílico y el isopropílico, siendo el segundo el más potente de los dos. Su efecto a grandes rasgos es equivalente, pues ambos desnaturalizan las proteínas de las bacterias con el fin de limitar su propagación. Sin embargo, el alcohol presenta riesgos debido a que es volátil e inflamable y la inhalación de sus vapores puede causar mareos, vómitos y dolor de cabeza (Font, 2001).

Por otro lado, se tiene el método de desinfección por luz ultravioleta. La luz ultravioleta o luz UV es la parte del espectro electromagnético que se ubica entre la luz visible y los rayos X y tiene una longitud de onda entre 100 y 400 nm (Wright y Cairns, s.f.). Dentro de dicho rango, la luz UV se divide en tres subrangos llamados UVA, UVB y UVC presentados en la Figura 2.15.

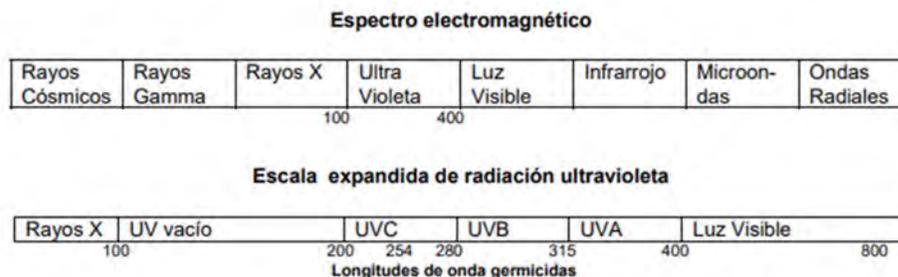


Figura 2.15. *Rangos del espectro electromagnético*. La imagen muestra el rango de la luz ultravioleta dentro del espectro electromagnético y también los subrangos dentro de la longitud de la luz UV. Extraído de Wright y Cairns, s.f., p. 3.

Este método aprovecha las propiedades que posee la UVC frente a los gérmenes, debido a que detiene la capacidad reproductiva de los microorganismos al realizar cambios fotoquímicos en sus ácidos nucleicos (Costa, s.f.). Sin embargo, trabajar con este tipo de luz conlleva ciertos riesgos para la salud humana debido a que su prolongada exposición directa puede causar quemaduras o problemas de visión.

Por último, se explora el uso de ozono para la desinfección. El ozono es un gas inestable compuesto de tres átomos de oxígeno, tiene la característica de ser incoloro, pero desprender un olor fuerte. Debido a estos atributos es que su uso para la desinfección se sigue explorando, ya que al ser un gas tiene la capacidad de llegar a cualquier rincón del lugar de aplicación, del mismo modo, su carácter inestable permite que no queden residuos tras su aplicación. Del mismo modo, su acción contra las bacterias y los virus se debe a su atributo de ser un agente fuertemente oxidante, permitiéndoles penetrar a través de la pared celular y dañar las bases de los ácidos nucleicos (Consejo General de Colegios Farmacéuticos, 2020). Sin embargo, presenta ciertas desventajas con respecto a los medios convencionales debido a que sus características requieren que el dispositivo de ozonización sea de acero inoxidable. Además, resulta más costoso y peligroso cuando se expone a las personas.

2.5 Marco metodológico

Para el desarrollo del presente trabajo se empleará una metodología basada y adaptada de la norma VDI 2206 para el diseño de sistemas mecatrónicos. Ello implica que la norma solo se tomará de referencia en cuanto al desarrollo general de los procesos y los resultados de las fases que la norma VDI 2206 presenta en su diagrama de flujo; sin embargo, la forma de abordar dichos procesos se realiza en base a un criterio propio y experiencia del asesor de este trabajo. Es importante recalcar que, en vista del contexto y de las limitaciones que presenta la modalidad virtual en la que se desarrolla este trabajo, la metodología no abarcará el proceso de verificación y validación del prototipo planteado.

De ese modo, el Capítulo 1 y 2 corresponden al proceso de comprensión de la solicitud. Por medio de la investigación de un marco problemático en el Capítulo 1 se presenta el problema identificado, los sectores a los que afecta y se define el alcance de la idea propuesta como solución. Por otra parte, al realizar una investigación del estado de la tecnología y los conceptos presentados en el marco teórico, el Capítulo 2 construye un marco de referencia que permitirá analizar y comprobar la viabilidad del proyecto. Es de esa manera que, partiendo de la investigación realizada, se logra el objetivo de establecer los parámetros y características del dron y el depósito de desinfección.

Posteriormente, en el Capítulo 3, se desarrollan los procesos de la metodología correspondientes a la elaboración de la estructura de funciones y del concepto de solución. Por ello, empleando la lista de exigencias se procede a la abstracción del problema, lo cual brinda una vista amplia de que posibles funciones se deben implementar con el fin de elaborar la estructura de funciones del sistema completo. Este proceso es el que permite encaminar los objetivos de diseño mecánico y eléctrico a grandes rasgos, visualizando la cantidad de actuadores o tipos de fuentes de energía que se requerirán para dichas funciones. Luego, partiendo de dicha estructura, se elabora una matriz morfológica que permite combinar varias alternativas de solución para finalmente concluir con el concepto de solución, definiendo de forma más concreta los objetivos de diseño e implementación.

Luego, en el Capítulo 4, se realizan el diseño eléctrico, mecánico y de software con el fin de lograr los objetivos específicos planteados anteriormente. Continuando con la metodología empleada, se procede al diseño y/o selección de los componentes de cada uno de los dominios independientes de la ingeniería mecatrónica. En paralelo, se van corrigiendo y orientando los diseños para que se logre una correcta integración de los mismos al final del capítulo, evidenciado en la consideración de las dimensiones de los componentes eléctricos para el diseño mecánico o en la elaboración de algoritmos generales que puedan ser implementados en cualquier procesador o controlador.

Finalmente, en el Capítulo 5, se presenta la simulación y el análisis de los resultados obtenidos del diseño mecánico y de software con el fin de corroborar el funcionamiento correcto de todos los aspectos que conforman al dron. Además, para concluir dicho capítulo, se realiza una estimación de costos y validación de la lista de exigencias que evidencie el cumplimiento de las características de producto planteadas para el presente trabajo.

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL DEL DRON TELEOPERADO

Primero que nada, es necesario recalcar el por qué se propone un diseño y no una integración de sistemas para el presente trabajo. Por un lado, como lo menciona Universidad Internacional de Valencia (2018), las ventajas de diseñar son la de ser una opción relativamente económica con respecto a los productos comerciales y permitirle al usuario la adquisición de mayor conocimiento con respecto a los drones. Esto debido a que durante el diseño se tiene la posibilidad de elegir las piezas o la estructura que presente el menor costo. Además, se posee la libertad de elegir y elaborar un diseño que incluya piezas comerciales en su entorno. Si a lo anterior se le agrega el hecho de que, para este proyecto, se debe implementar un depósito de desinfección y software de control para el servicio de *delivery*; en cuestión de costos, la opción de diseñar resulta más efectiva.

Y visto desde otro enfoque, el hecho de diseñar un prototipo, ayudaría al desarrollo tecnológico en el Perú. Según la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual et al. (2019) el Perú ocupa el puesto 69 en el índice de innovación de 2019, habiendo subido 2 puestos desde el año 2018, reflejando así un incremento en la actividad innovadora, considerado como un motor del desarrollo económico y social del país. Tomando en cuenta lo mencionado en el Capítulo 1, acerca del problema económico que supone el presente contexto, este trabajo de diseño permitiría seguir el ritmo ascendente establecido al tratarse del prototipo de un dron de producción nacional para su uso en un contexto específico y adaptado al entorno peruano.

3.1 Elaboración de la lista de exigencias

Continuando con la metodología planteada para el presente trabajo, siguiendo como referencia la norma VDI 2206, se procede a elaborar una lista de exigencias con base en toda la información recopilada en los capítulos anteriores. Para ello, primero se parte de una serie de requerimientos que expone de forma explicativa y sustentada las características que guiarán el diseño del dron. Dichos requerimientos se presentan a continuación:

- **Geometría:** Partiendo de las dimensiones exploradas en el estado de la tecnología, se usarán de referencia las dimensiones del dron de Amazon Prime Air y de Flytrex; puesto que son las más completas. De ese modo, el dron no debería superar las dimensiones de 2 m de largo x 2 m de ancho x 1 m de alto. Igualmente, el depósito de desinfección se dimensionará de forma que no sobrepase los 30 cm x 30 cm x 10 cm, usando como referencia las dimensiones de una botella de alcohol de 1 litro, uno de los productos más demandados y voluminosos que se pueden adquirir en una farmacia.
- **Cinemática:** Con base en lo presentado en el estado tecnología y la normativa establecida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2020) la altura de vuelo debe ser superior a los 110 m y su velocidad de vuelo no deberá superar los 40 km/h en zonas urbanas.
- **Fuerzas:** Partiendo de la capacidad de carga de los drones presentados en el estado de la tecnología y considerando el campo de aplicación del dron expuesto en el marco problemático, se establecerá que el robot podrá cargar hasta 3 kg.
- **Materia:** En lo que respecta a la función principal del dron, el prototipo debe ser capaz de transportar productos ofrecidos por las farmacias, desde ahí hasta la ubicación de destino.
- **Señales:** Partiendo de la investigación y conclusiones establecidas en el Capítulo 2, el dron debe recibir señales provenientes del mando de control que lo operará. Del mismo modo, el dron debe enviarle constantemente su posición actual, altura e imágenes del entorno al operador humano.
- **Control:** Partiendo de los tipos de control para un dron y el modelo aerodinámico del mismo expuestos en el marco teórico, se implementará un sistema de control para que el dron mantenga la estabilidad, que pueda realizar las acciones de despegar y aterrizar de forma simplificada y que tenga la capacidad de verificar si ya se llegó al destino.
- **Electrónica (Hardware):** Como fue establecido en el Capítulo 2, el dron será teleoperado desde la farmacia. De igual manera, partiendo del análisis del estado de la tecnología, el tiempo de vuelo estimado del dron no será superior a los 30 minutos.
- **Software:** Se emplearán el modelo matemático planteado en el marco teórico para simular un algoritmo que incorpore un control de orientación en el dron.
- **Seguridad:** En vista del constante énfasis que los productos presentados en el estado de la tecnología hacen sobre la seguridad del entorno y las personas, el dron se diseñará con un principio de hardware redundante.
- **Ergonomía:** Tomando en consideración los pesos de los drones presentados en el estado de la tecnología y la influencia de la masa en las ecuaciones del modelo aerodinámico, se diseñará el prototipo del dron de manera que no supere el peso, sin carga, de 10 kg.

- **Fabricación:** Se propone que el dron sea un cuadricóptero en vista de las ventajas y desventajas de los tipos de drones multirrotor exploradas en el marco teórico.
- **Control de calidad:** En vista de que se busca desarrollar un prototipo con un nivel de madurez tecnológica 4 (TRL4), se deben incorporar puertos o entradas para la conexión de los instrumentos de calibración que validarán la correcta toma de datos como los de posición o altura.
- **Montaje:** Se debe recalcar que el funcionamiento del depósito de desinfección solo es el de limpiar los productos de forma automática antes de su llegada al cliente. Previamente el operador debe colocar manualmente cada producto solicitado.
- **Uso:** Se empleará de referencia el ruido que produce un automóvil en vista de que no hay una regulación legal para el ruido de los drones en Perú. Por lo tanto, el rango del ruido debe estar entre 80 y 90 dBA. Por otra parte, con base en el análisis realizado en el estado de la tecnología y tomando en cuenta el tipo de uso del dron, se establece que la distancia de trabajo no será mayor a un radio de 5 km.
- **Mantenimiento:** Como ya se mencionó al inicio del Capítulo 3, una de las razones por las cuales es más ventajoso diseñar un dron es la libertad durante el proceso de selección de partes. Esto es lo que permite escoger las piezas más económicas, funcionales y comerciales. Por lo tanto, el diseño debe emplear piezas que sean comerciales en el mercado nacional.
- **Costos:** En vista de que se busca elaborar el prototipo de un producto que sea accesible y de bajo costo, se propone que, para la inversión inicial, el precio de diseño, elaboración y validación del prototipo no debe superar los 5000 dólares.

Luego, en la Tabla A1.1 ubicada en los Anexos, se presenta la lista de exigencias como una versión sintetizada de los requerimientos planteados previamente. Del mismo modo, tomando en cuenta el hecho de que se desarrollará un prototipo, se establecen cuáles de las características serán consideradas exigencias o deseos durante el desarrollo del trabajo.

3.2 Elaboración de la estructura de funciones

A continuación, siguiendo con la metodología planteada en el Capítulo 2, se elaborará una estructura de funciones. Para ello, se empezará por un proceso de abstracción de la idea con el fin de establecer las entradas y salidas involucradas en el proyecto.

3.2.1 Modelo de Caja Negra

En vista de que el proyecto planteado es un sistema teleoperado se plantearán dos modelos de cajas negras para los dos sistemas involucrados, tal como se explicó en las bases de la teleoperación del marco teórico. De ese modo, en la Figura 3.1 se presenta el modelo de caja negra del sistema esclavo, es decir el dron; mientras que, en la Figura 3.2 se presenta el modelo del sistema maestro, o sea, el mando de control. Cabe resaltar

que la metodología clasifica las entradas y salidas de la caja negra en tres aspectos: señales, energía y materia. Es por ello que, tanto en la Figura 3.1 como en la Figura 3.2, se aprecian tres tipos de líneas en donde las flechas delgadas representan las señales, las flechas gruesas son la energía y las flechas punteadas representan la materia.



Figura 3.1. *Modelo de caja negra del dron.* Elaboración propia.

Por un lado, en la Figura 3.1, se aprecia las entradas de señales como: información de geolocalización, la cual representa el ingreso de datos al GPS; información de destino, que se refiere a la ubicación desde donde se realizó el pedido; señales de movimiento, que representan las direcciones a las cuales el operario desea mover el dron; las instrucciones del mando, que controlan otras funciones del dron como las del depósito de desinfección; y los datos calibrados, que sirven para compararlos con información registrada por el dron gracias a sus sensores y obtener la señal de datos validados en la salida. Además, se tienen como salidas las señales de información del entorno (altura, posición e imagen) y de estados, que se enviarán al mando de control para brindarle al operario una retroalimentación de lo que experimenta el dron y facilitarle su control. Por otra parte, se tiene de entrada a los productos a enviar y el producto desinfectante que se juntarán y saldrán como productos desinfectados. Por último, se tiene la presión atmosférica, que permite obtener la información de altitud de vuelo del dron; y la energía eléctrica, que representa a la batería que alimentará todos los sistemas como los motores que moverán las hélices para producir energía térmica y cinética.



Figura 3.2. Modelo de caja negra del mando del dron. Elaboración propia.

En la Figura 3.2, como se mencionó anteriormente, se observan señales de entrada y salida en el mando correspondientes a las señales homónimas de salida y entrada del dron. Las señales visuales que salen del mando son la síntesis de toda la información que el dron percibe desde su ubicación con el fin de que el operario tome decisiones en base a dicha retroalimentación. Además, el mando también dispone de una fuente de energía eléctrica como entrada, así como las instrucciones de movimiento y trabajo que el operario introduce en el mando. Por último, la dirección del destino se introduce en el mando para ser enviada al dron y monitorear su trayecto con respecto al punto inicial.

3.2.2 Principios tecnológicos

Los principios tecnológicos hacen referencia a los métodos que permiten realizar la transformación de las entradas de las cajas negras en las salidas de las mismas. Todo ello se exploró previamente en el marco teórico y en el estado de la tecnología del Capítulo 2, de modo que se resaltan los conceptos sobre teleoperación para estructurar los dos modelos de cajas negras, las bases sobre sistemas de comunicación para la transmisión de las señales de estado, los modelos cinemáticos y dinámicos del dron y los motores para comprender la transformación de energía eléctrica en mecánica y los métodos de desinfección existentes para realizar la selección del alcohol como producto desinfectante. Esto último es debido a que, de entre los métodos presentados, el alcohol permite sistemas y actuadores más compactos a diferencia de la luz UV, así como requerir materiales más simples para contenerlo con respecto a los usados para contener y manipular el ozono.

3.2.3 Secuencia de operaciones

En lo que respecta a la secuencia de operaciones, se seguirán los siguientes procesos. Primero, la farmacia recibirá una orden de *delivery* por lo que procederá a encender tanto el dron como el mando de control. El operario del dron debe conocer dos datos de la orden solicitada por el cliente: la ubicación donde desea que se le entregue y la lista de productos solicitados. De ese modo, se colocarán los productos en el depósito de desinfección de forma manual y se introducirá la ubicación de destino en el mando de control. Una vez que la orden está dentro del depósito, se activarán los sistemas de desinfección, dejando limpios los productos. Después, el dron procederá a su despegue y viaje a través del entorno, guiado por las direcciones que emplee el operador humano en el mando de control. Debe resaltarse que, durante todo el viaje, el dron le enviará al operador su ubicación y altura actual, así como imágenes de lo que observa en su entorno, para facilitarle el control al piloto. Una vez llegado a su destino, el dron

aterrizará y abrirá su depósito para que el cliente extraiga los productos que solicitó. Esto implica que el dron le confirmará al operario que ya se llegó al destino y que ya se extrajeron los productos. Finalmente, el dron vuelve a despegar para volver a la farmacia. Cabe mencionar que el software del robot le permitirá al operador simplificar la maniobrabilidad del dron por medio de algoritmos que le brinden estabilidad y faciliten el despegue y aterrizaje.

3.2.4 Fijación de procesos técnicos

Partiendo de la secuencia de operaciones presentada anteriormente, se presenta a continuación los procesos efectuados agrupados en 4 etapas: previa, ejecución, control y final.

1) Etapa previa

- a) Encender el dron
- b) Encender el mando de control
- c) Verificar que el mando y el dron están conectados
- d) Verificar que el dron se conecte al GPS
- e) Introducir la ubicación de destino en el mando de control
- f) Colocar los productos pedidos en el depósito
- g) Verificar que el depósito de desinfección esté correctamente cerrado

2) Etapa de ejecución

- a) Desinfectar los productos en el depósito
- b) Despegar el dron
- c) Recibir instrucciones provenientes del mando
- d) Aterrizar el dron
- e) Abrir el depósito de desinfección

3) Etapa de control

- a) Mantener la estabilidad del dron
- b) Enviar imágenes de lo que observa el dron
- c) Enviar ubicación actual del dron con respecto a la ruta
- d) Verificar que el dron haya llegado a su destino
- e) Verificar que el cliente haya retirado los productos del depósito

4) Etapa final

- a) Cerrar el depósito de desinfección
- b) Regresar el dron a la farmacia

3.2.5 Aplicación de sistemas técnicos y sus limitaciones

Utilizando la lista de procesos técnicos, se procede a elaborar la Tabla 3.1 presentada a continuación. En dicha tabla, se le asignará a cada proceso un número de función que será empleará en los siguientes pasos de la metodología. También se le relacionará con un tipo de proceso que puede ser manual, automático o mecánico, dependiendo de sobre qué aspectos tiene influencia la función. Es a partir del tipo de proceso que se puede determinar la causa de las limitaciones presentadas en dicha tabla.

Tabla 3.1 *Sistemas técnicos y sus limitaciones*

Función	Descripción	Proceso	Limitación
1	Encender el dron	Manual	Falla humana
2	Encender el mando de control	Manual	Falla humana
3	Verificar que el mando y el dron están conectados	Manual	Falla humana
4	Verificar que el dron se conecte al GPS	Automático	Zona sin satélites
5	Introducir la ubicación de destino en el mando de control	Manual	Falla humana
6	Colocar los productos pedidos en el depósito	Manual	Falla humana
7	Verificar que el depósito de desinfección esté correctamente cerrado	Mecánico	Falla del mecanismo
8	Desinfectar los productos en el depósito	Mecánico	Falla del sistema de desinfección
9	Despegar el dron	Mecánico	Falla de los motores
10	Recibir instrucciones provenientes del mando	Automático	Falla del sistema de comunicación
11	Aterrizar el dron	Mecánico	Falla de los motores
12	Abrir el depósito de desinfección	Mecánico	Falla del mecanismo
13	Mantener la estabilidad del dron	Automático	Ninguna
14	Enviar imágenes de lo que observa el dron	Automático	Falla del sistema de comunicación
15	Enviar ubicación actual del dron con respecto a la ruta	Automático	Falla del GPS
16	Verificar que el dron haya llegado a su destino	Automático	Ninguna
17	Verificar que el cliente haya retirado los productos del depósito	Automático	Ninguna
18	Cerrar el depósito de desinfección	Mecánico	Falla del mecanismo
19	Regresar el dron a la farmacia	Automático	Falla del GPS

Nota. Elaboración propia.

3.2.6 Agrupación de funciones

Como se mencionó anteriormente, se emplearán los números asignados a cada proceso para organizarlos y agruparlos en un esquema de funciones que refleje la secuencia de operaciones descrita previamente. De ese modo, en la Figura 3.3, se presentan bloques de funciones con el nombre FX, donde X es el número de función asignado en la Tabla 3.2. Además, se emplea un lenguaje de colores para clasificar las funciones en las etapas declaradas en la fijación de procesos técnicos, siendo el gris para la etapa de preparación, el verde para las etapas de ejecución y control y el naranja para la etapa final.

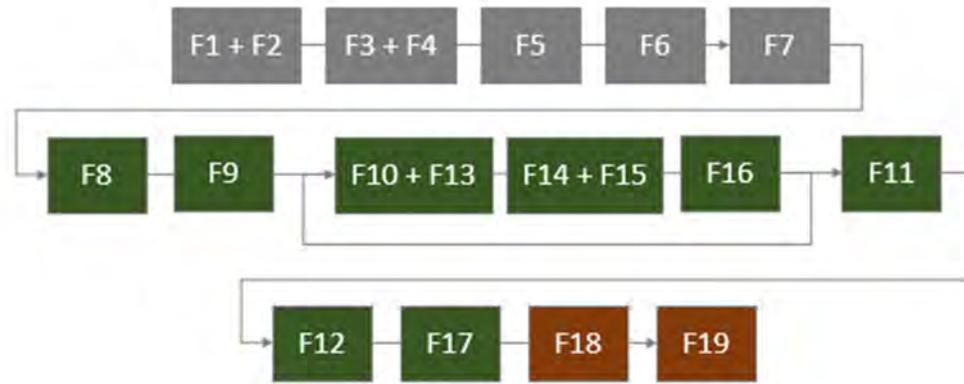


Figura 3.3. *Agrupación de funciones.* Elaboración propia.

3.2.7 Estructura de funciones

Finalmente, para elaborar la estructura de funciones, se establece la relación entre los sistemas esclavo (dron teleoperado) y maestro (mando de control) mediante bloques de función relacionados a las funciones establecidas anteriormente. Del mismo modo, se emplea un lenguaje de colores para agrupar los bloques de función en los dominios de un diseño mecatrónico, los cuales son: energía, sensores, actuadores, interfaz de entrada/salida, materia, comunicaciones y control. A continuación, en la Figura 3.4, se presenta dicha estructura de funciones con su respectiva leyenda.

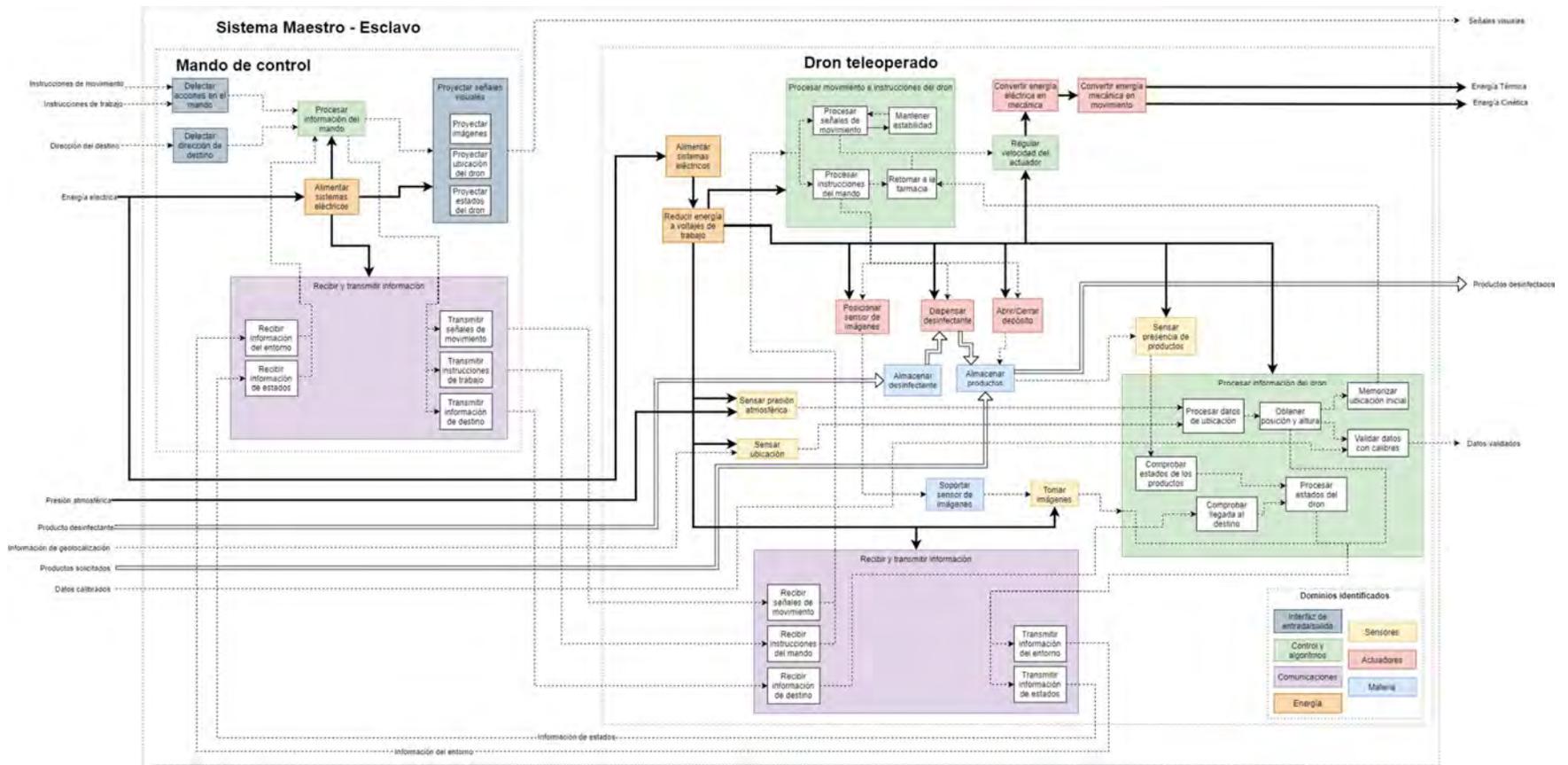


Figura 3.4. Estructura de funciones del sistema maestro-esclavo. Elaboración propia.

3.3 Concepto de solución

Se emplea la estructura de funciones planteada anteriormente para elaborar una matriz morfológica. En dicha matriz se presentan las funciones parciales extraídas de la Figura 3.4, las cuales se presentaron con un color correspondiente a su dominio identificado; además de algunas alternativas de solución, llamadas portadores de función, para cada una de estas. Luego, tras combinar varios portadores, se obtienen las alternativas de solución para los modelos de cajas negras presentadas anteriormente. Por último, se evalúan dichas alternativas basándose en aspectos técnicos y económicos para finalmente obtener un único concepto de solución.

3.3.1 Matriz morfológica

En vista de que se requiere realizar la propuesta de solución para un sistema de dos componentes (Dron y Mando de control), se optó por realizar dos matrices morfológicas en donde se presenten de forma independiente a los portadores de funciones para las alternativas de solución del mando de control y del dron teleoperado con su depósito de desinfección. A continuación, estas matrices se pueden apreciar respectivamente en la Tabla 3.2 y en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2 Matriz morfológica del mando de control

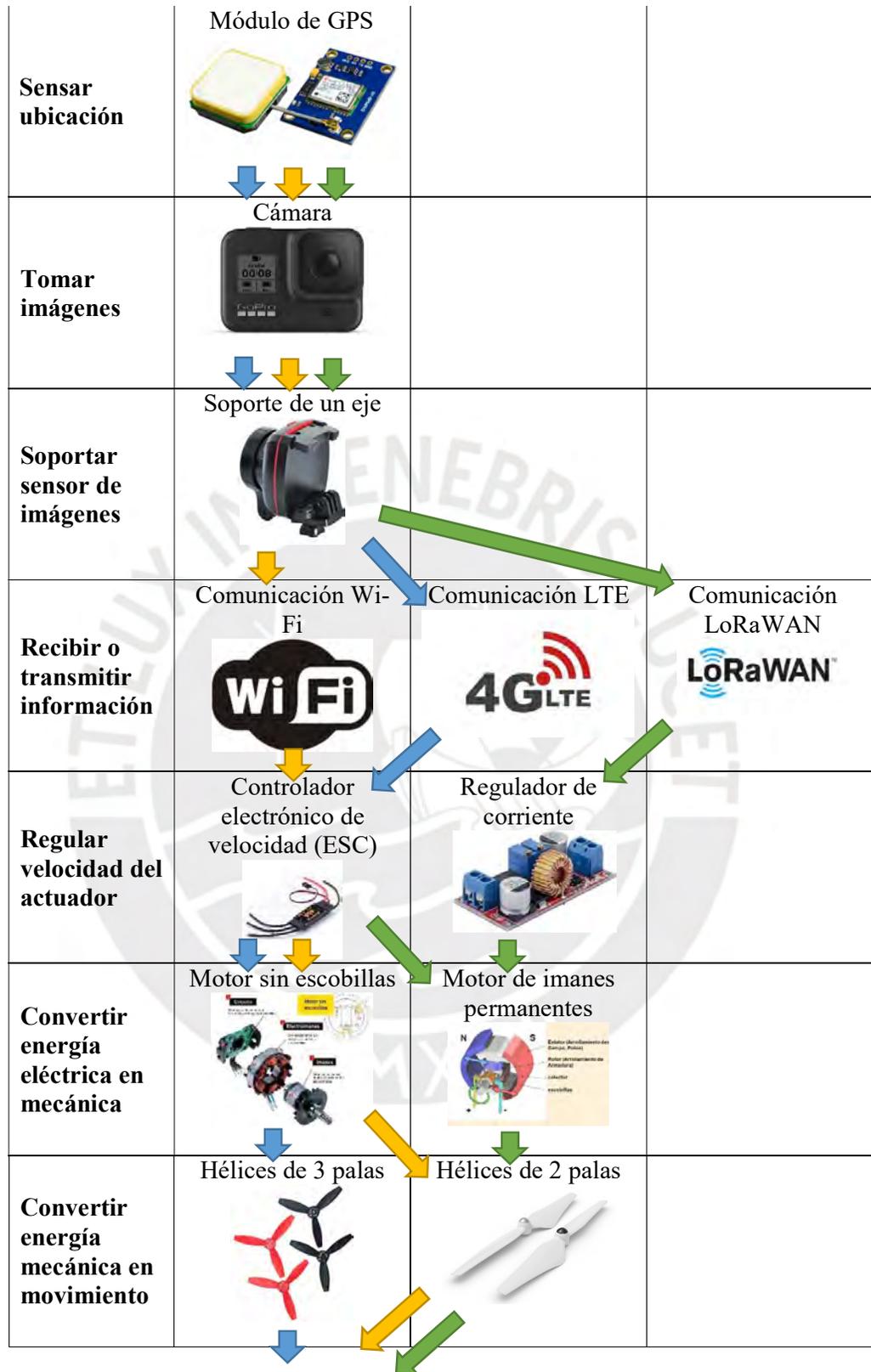
Funciones parciales	Portadores de funciones		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Detectar acciones en el mando 	Pantalla táctil 	Joystick y Botones 	Botones 
Detectar dirección de destino 	Pantalla táctil (teclado virtual) 	Teclado 	
Proyectar señales visuales 	Pantalla LCD 	Pantalla LED 	
Procesar información del mando 	Módulo transmisor de dron 		

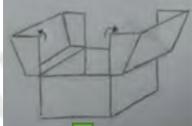
<p>Recibir o transmitir información</p>	<p>Comunicación Wi-Fi</p> 	<p>Comunicación LTE</p> 	<p>Comunicación LoRaWAN</p> 
<p>Alimentar sistemas eléctricos</p>	<p>Baterías</p> 		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.3 Matriz morfológica del dron teleoperado

Funciones parciales	Portadores de funciones		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<p>Procesar información del dron</p>	<p>Microcomputadora</p> 	<p>Microcontrolador</p> 	<p>FPGA</p> 
<p>Reducir energía a voltajes de trabajo</p>	<p>Placa distribuidora de voltaje (PDB)</p> 		
<p>Alimentar sistemas eléctricos</p>	<p>Baterías</p> 		
<p>Posicionar sensor de imágenes</p>	<p>Motor paso a paso</p> 	<p>Servomotor</p> 	



Procesar movimiento e instrucciones del dron	Tarjeta controladora de vuelo 		
Sensar presión atmosférica	Sensor de presión piezorresistivo 	Sensor de presión piezoeléctrico 	
Almacenar productos	Caja con tapa superior 	Canasta deslizante con riel 	
Abrir/cerrar depósito	Motor paso a paso y barras 	Servomotor y seguro de compuerta 	
Almacenar desinfectante	Envase de plástico 	Envase de metal 	
Dispensar desinfectante	Microbomba y boquillas de pulverización 	Atomizador 	
Sensar presencia de productos	Interruptor de contacto momentáneo 	Sensor infrarrojo 	

Nota. Elaboración propia.

3.3.2 Alternativas de solución

Partiendo de lo presentado en la Tabla 3.2 y en la Tabla 3.3, se obtienen en total 6 alternativas de solución, tres alternativas para el mando de control y tres para el dron teleoperado, que son independientes entre sí. Cada alternativa usa una serie de flechas de color azul (Alternativa 1), color amarillo (Alternativa 2) o color verde (Alternativa 3) para seleccionar los portadores de función empleados en su construcción. A continuación, se presentará una descripción de las alternativas generadas junto con un bosquejo de las mismas con el fin de posteriormente realizar una evaluación técnico-económica.

3.3.2.1 Alternativa 1 para el mando de control

La alternativa 1 consiste en una pantalla táctil que incluya toda la interfaz y comandos a ejecutar por el dron. La interfaz estaría formada por botones que le permitan moverse al dron hacia adelante y atrás y girar hacia la izquierda y derecha, botones para elevarse y aterrizar que moverían al dron en el eje vertical, botones que abren o cierran el mecanismo del depósito de desinfección y botones que permiten orientar la dirección de la cámara del dron. Del mismo modo, la pantalla dará la opción de un teclado virtual para ingresar la información del destino. Por otra parte, la pantalla LCD también será el medio por el cual se mostrará la información de estados en recuadros, por ejemplo, si ya se llegó al destino o si ya se retiraron los productos del depósito. Además, constantemente se visualizará en un recuadro la posición y altura del dron acompañado de la imagen enviada por la cámara y un mapa que marca su ubicación actual y la ubicación del destino. Por último, se plantea el uso de baterías para la alimentación y un módulo de transmisión de dron para control de todos los sistemas presentes, así como el uso de una red Wi-Fi para la transmisión y recepción de datos. A continuación, en la Figura 3.5 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita.

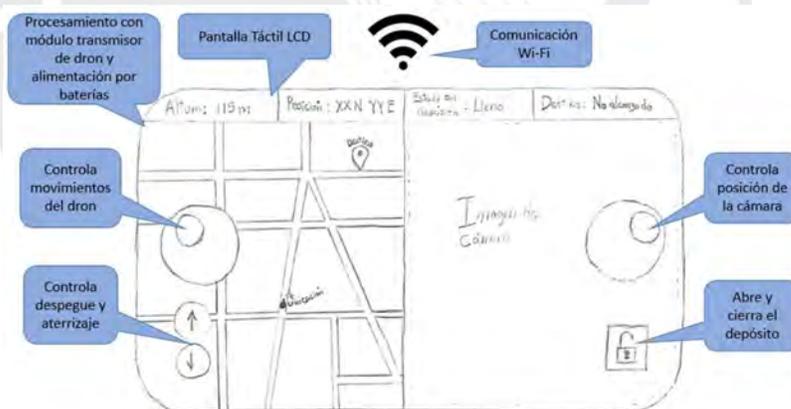


Figura 3.5. Bosquejo de la alternativa 1 para el mando de control. Elaboración propia.

3.3.2.2 Alternativa 2 para el mando de control

La alternativa 2 consiste en un conjunto de botones y joysticks que permitan ejecutar los movimientos del dron. Los joysticks permitirán el movimiento hacia adelante y atrás y girar hacia la izquierda y derecha, así como los movimientos de la cámara. Los botones permitirán ejecutar acciones tales como elevarse y aterrizar o abrir y cerrar el mecanismo del depósito de desinfección. Por otra parte, la pantalla LCD dará la opción de un teclado virtual para ingresar la información del destino. Además, igual que la alternativa 1, la pantalla será el medio por el cual se mostrará la información de estados

en recuadros y se visualizará la posición y altura del dron acompañado de la imagen percibida por este y un mapa con su ubicación actual y del destino. Por último, se plantea el uso de baterías para la alimentación, un módulo de transmisión de dron para control de todos los sistemas expuestos y el uso de una red inalámbrica LTE para la transmisión y recepción de datos. Con todo lo mencionado, en la Figura 3.6 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita.



Figura 3.6. Bosquejo de la alternativa 2 para el mando de control. Elaboración propia.

3.3.2.3 Alternativa 3 para el mando de control

La alternativa 3 consiste en un conjunto de botones que permitan operar los movimientos y acciones del dron. Consta de un arreglo que atribuye al movimiento hacia adelante y atrás y girar hacia la izquierda y derecha, así como los movimientos de la cámara. También permitirán ejecutar acciones tales como elevarse y aterrizar o abrir y cerrar el mecanismo del depósito de desinfección. Además, incluye un teclado físico para introducir la información del destino. Por otra parte, la pantalla LED será el medio por el cual se mostrará la información de estados en recuadros y se visualizará la posición y altura del dron acompañado de la imagen percibida por este y un mapa con su ubicación actual y del destino. Por último, se plantea el uso de baterías para la alimentación, un módulo de transmisión de dron para control de todos los sistemas expuestos y el uso de una red LoRaWAN para la transmisión y recepción de datos. Con todo lo mencionado, en la Figura 3.7 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita.

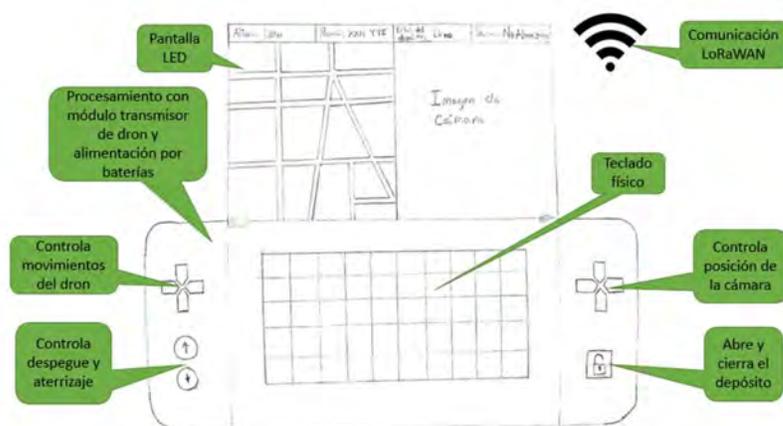


Figura 3.7. Bosquejo de la alternativa 3 para el mando de control. Elaboración propia.

3.3.2.4 Alternativa 1 para el dron teleoperado

Para la alternativa 1 se tendrá un depósito de desinfección compuesto por una canasta con riel que se cerrará y abrirá manualmente y que se asegurará con un servomotor. Se empleará alcohol almacenado en envases de plástico para alimentar los atomizadores que rociarán el producto desinfectante sobre los productos solicitados. Además, se usará un interruptor de contacto momentáneo para determinar si el depósito está cerrado o abierto y así confirmar si los productos fueron recogidos por el cliente o no. En cuanto a la circuitería del dron, estará compuesto de un sensor de presión piezorresistivo para determinar la altura, un módulo GPS para determinar la posición, el uso de comunicación inalámbrica LTE para la transmisión y recepción de datos, una tarjeta controladora de vuelo para procesar las instrucciones recibidas del mando de control, una microcomputadora para procesar las señales de los actuadores y unas baterías con su respectiva placa distribuidora de voltaje para adaptar la energía de entrada a los voltajes de trabajo de los actuadores. Además, la imagen sería proporcionada por una cámara sostenida por un soporte de un eje y un servomotor que oriente su posición. Por último, se emplearían motores sin escobillas conectados a hélices de 3 palas y a un controlador eléctrico de velocidad que permita regularlo. A continuación, en la Figura 3.8 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita y en la Figura 3.9, los detalles de su depósito de desinfección.

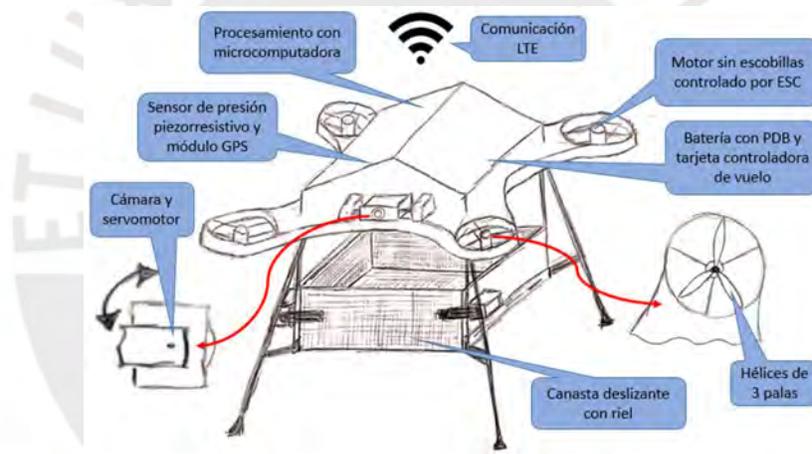


Figura 3.8. Bosquejo de la alternativa 1 para el dron teleoperado. Elaboración propia.

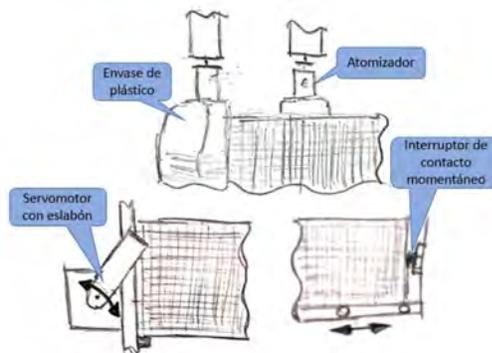


Figura 3.9. Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 1. Elaboración propia.

3.3.2.5 Alternativa 2 para el dron teleoperado

El depósito de desinfección de la alternativa de solución 2 es similar a la alternativa 1; salvo por la excepción de que se emplearán microbombas y boquillas de pulverización para dispensar el alcohol sobre los productos. En cuanto a la circuitería y mecanismos del dron, no se realizan muchos cambios, excepto por el uso de un microcontrolador para el procesamiento de las señales de los actuadores, el uso de comunicación inalámbrica Wi-Fi para la transmisión y recepción de datos y el uso de hélices de 2 palas. Con todo lo mencionado, en la Figura 3.10 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita y en la Figura 3.11, los detalles de su depósito de desinfección.



Figura 3.10. *Bosquejo de la alternativa 2 para el dron teleoperado.* Elaboración propia.

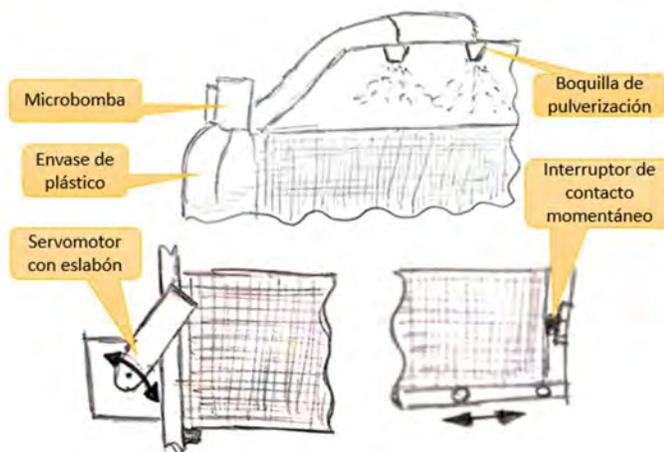


Figura 3.11. *Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 2.* Elaboración propia.

3.3.2.6 Alternativa 3 para el dron teleoperado

Para la alternativa 3 se tendrá un depósito de desinfección con tapas superiores que se abrirán por medio de un mecanismo de motores paso a paso y barras. Se empleará alcohol almacenado en envases metálicos para alimentar las microbombas y boquillas de pulverización que rociarán el producto desinfectante sobre los productos

solicitados. Además, se empleará un sensor infrarrojo para determinar la presencia de objetos dentro del depósito y así confirmar si fueron recogidos por el cliente o no. Debido a las características presentadas, el circuito y sistema de control del dron se ubicaría debajo del depósito para que este pueda abrirse sin dificultad. Dichos sistemas estarán compuestos de un sensor de presión piezoeléctrico para determinar la altura, un módulo GPS para determinar la posición, el uso de comunicación inalámbrica LoRaWAN para la transmisión y recepción de datos, una FPGA para procesar las señales de los actuadores del dron, una tarjeta controladora de vuelo para las instrucciones recibidas del mando de control y unas baterías con su respectiva placa distribuidora de voltaje para adaptar la energía de entrada a los voltajes de trabajo de los actuadores. Además, la imagen sería proporcionada por una cámara sostenida por un soporte de un eje y un motor paso a paso que oriente su posición. Por último, se emplearían motores de imanes permanentes conectados a hélices de 2 palas y a un regulador de corriente que permita controlar su velocidad. A continuación, en la Figura 3.12 se presenta un bosquejo de la alternativa descrita y en la Figura 3.13, los detalles de su depósito de desinfección.

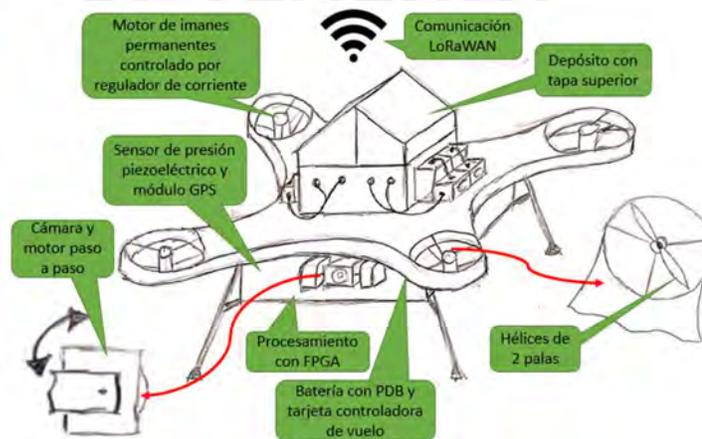


Figura 3.12. *Bosquejo de la alternativa 3 para el dron teleoperado.* Elaboración propia.

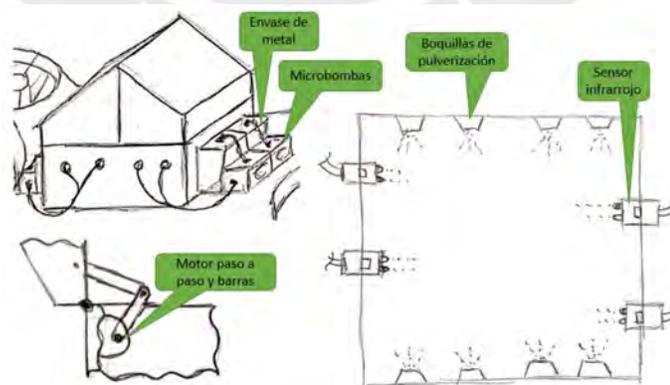


Figura 3.13. *Detalles del depósito de desinfección de la alternativa 3.* Elaboración propia.

3.3.3 Evaluación técnico-económica de las alternativas

A continuación, se presentarán en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5 la evaluación realizada las alternativas de solución del mando de control y del dron teleoperado respectivamente. Para ello, se empleó el sistema de evaluación planteado por la metodología propuesta, la cual consiste en puntuar desde el 0, que significa no satisfecho, hasta el 3, que significa bien, los criterios pertinentes del aspecto técnico y el aspecto económico de las alternativas. Luego de ello, se suman los valores asignados y se comparan con la suma correspondiente a una solución ideal, que posee puntuaciones de 4 en todos los criterios.

Tabla 3.4 Evaluación técnico-económica del mando de control

Nº	Criterio Técnico	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Solución óptima
1	Facilidad de manejo	3	3	2	4
2	Transportabilidad	3	2	1	4
3	Lista de exigencias	2	2	3	4
Nº	Criterio Económico				
1	Número de piezas	3	2	1	4
2	Fácil adquisición de materiales	3	3	2	4
3	Costos diversos	2	2	3	4
4	Fácil montaje	3	2	1	4
	Total	19	16	13	28

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.5 Evaluación técnico-económica del dron teleoperado

Nº	Criterio Técnico	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Solución óptima
1	Seguridad	3	3	3	4
2	Rapidez	2	3	1	4
3	Estabilidad	3	3	2	4
4	Facilidad de manejo	2	3	1	4
5	Transportabilidad	3	3	2	4
6	Complejidad	2	3	2	4
7	Lista de exigencias	3	3	3	4
Nº	Criterio Económico				
1	Número de piezas	3	2	2	4
2	Fácil adquisición de materiales	3	2	1	4
3	Costos diversos	2	2	2	4

4	Costo de tecnología	1	2	3	4
5	Fácil montaje	2	3	2	4
6	Fácil mantenimiento	2	3	1	4
	Total	31	35	25	52

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, se aprecia que, para el diseño del mando, la alternativa 1 resulta más adecuada; mientras que, para el diseño del dron teleoperado, la alternativa 2 es la mejor según el análisis realizado. Por un lado, el mando de control, con un resultado de 19 puntos sobre 28 puntos, alcanza una relación del 67.86% con respecto a la solución ideal. Por otro lado, el dron teleoperado cuenta con un resultado de 35 puntos sobre 52, obteniendo una relación de 67.31% con respecto a la solución ideal. Por último, cabe resaltar que tanto la alternativa seleccionada para el mando de control como para el dron teleoperado comparten el mismo tipo de comunicación inalámbrica (Wi-Fi), por lo que no se requiere adaptar ningún tipo de protocolo en lo que respecta a la recepción y transmisión de datos.



CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL PROTOTIPO DE DRON TELEOPERADO

Una vez delimitado cuál será el concepto solución a desarrollar, se procederá al diseño del proyecto preliminar. Este se abordará en los tres aspectos del diseño mecatrónico mencionados en los objetivos de este trabajo, los cuales son: el diseño eléctrico, el diseño mecánico y el diseño de control. Cabe resaltar que, en la práctica, el proceso de diseño es iterativo y, por lo general, requiere que el diseño eléctrico y mecánico se realicen en paralelo para ejecutar las correcciones necesarias. Sin embargo, ese proceso iterativo no se apreciará completamente en el documento, puesto que este se presentará de una forma más estructurada referente al resultado final del diseño.

4.1 Diseño eléctrico

Partiendo de las matrices morfológicas y la evaluación técnico-económica presentada anteriormente, el diseño eléctrico abarcará la selección de los componentes propuestos para el concepto solución seleccionado. Además, al finalizar esta sección, se presentará en la Figura A2.1 el esquema de conexiones eléctricas de los componentes seleccionados.

4.1.1 Selección de componentes eléctricos del dron

En primer lugar, se seleccionarán los elementos eléctricos que conforman solo al dron. Ello quiere decir que solo se abarcarán los componentes que permiten las acciones de vuelo y control del robot. Si bien el depósito de desinfección forma parte del dron, los componentes que lo forman se consideran como un comportamiento aparte y se seleccionarán más adelante en su respectivo apartado. De ese modo, los componentes a seleccionar en esta sección son: motores, hélices, variadores de velocidad, baterías, tarjetas controladoras de vuelo, placas distribuidoras de poder, cámaras, transmisores y receptores de las señales involucradas, módulos GPS y sensores de presión.

4.1.1.1 Motores

Para la selección de los motores se debe partir de un dato aproximado al inicio del diseño: el peso. Como ya se mencionó en la lista de exigencias, el peso del dron no debería exceder los 10 kg y la carga máxima que debería ser capaz de transportar eran de 3 kg. Además, considerando que se propuso emplear el modelo de un cuadricóptero,

se concluye que se requieren 4 motores que sean capaces de levantar 13 kg (en el caso más extremo).

Para ello, se hace uso de un criterio en el diseño de drones en el cual se recomienda como factor de seguridad que la relación entre la fuerza de empuje del dron y el peso debe ser de 2 a 1 (Chávez-Arroyo y Rodríguez, 2018, p. 61). Partiendo de ello, se emplea la ecuación 4.1 para calcular el empuje por motor, representado por E_m , a partir de la relación empuje/peso r y el empuje total requerido E_T .

$$E_m = \frac{r * E_T}{4} \quad (4.1)$$

De ese modo, el empuje por motor requerido es de 6500 gramos. Los motores considerados en la selección se presentan en la Tabla 4.1 a continuación.

Tabla 4.1 Comparación de alternativas para los motores

	Requerimientos	T-MOTOR MN705-S	T-MOTOR MN605-S	T-MOTOR MN701-S	T-MOTOR P60 KV340
Voltaje / Celdas	6S	21.25V / 6S	22.61V / 6S	22.1V / 6S	24V / 6S
Hélice	Recomendada	26"x8.5	21"x6.3	24"x7.2	22"x6.6
Kv (RPM/V)	≤ 400	260	320	280	340
Corriente máxima (A)	< 80	77.1	50.5	60.6	57.8
Empuje Máximo (Kg)	≥ 6500	9720	6542	7618	6762
Peso (g)	≤ 500	450	316	355	379
Diámetro (mm)	≤ 80	79.2	68.8	79.2	69
Alto (mm)	≤ 50	42.4	39.9	37.4	40.8
Precio (dólares)	-	479.98	279.98	439.98	107.9

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, el actuador escogido es el T-Motor MN605-S. Para la elección se determinó que los criterios principales eran el peso y las dimensiones, porque en base a ello se elaborarían las dimensiones finales de la carcasa del dron. Luego, los criterios secundarios fueron el Kv y la corriente. Por un lado, se escogió la segunda alternativa sobre la tercera y la primera porque la diferencia de sus Kv no es significativa frente a sus precios y dimensiones. Por otro lado, la corriente consumida es la menor de las alternativas, por lo que el precio de la cuarta alternativa no se considera un criterio significativo. Esto es debido a que se emplearán 4 motores en el diseño, por lo que las diferencias entre características influyen el cuádruple.

4.1.1.2 Baterías

Para escoger la batería adecuada se partirá de los datos que el motor seleccionado presenta. Se sabe que una celda (1S) de una batería tiene una capacidad entre 3.7 voltios (nominal) a 4.2 voltios (máximo) (Chávez-Arroyo y Rodríguez, 2018, p. 47), por lo que el voltaje requerido es 6S o entre 22.2 y 25.2 voltios. Además, se puede hallar la potencia consumida por los motores escogidos al multiplicar los datos, presentes en la Tabla 4.1, de voltaje (22.61 V) y corriente máxima de trabajo (50.5 A), obteniendo que cada motor consume 1141.805 W.

De esa forma, el dato que faltaría calcular sería la capacidad de la batería en miliamperios hora (mAh). Para ello, se empleará el dato de tiempo de vuelo deseado que se propuso en la lista de exigencias en la Tabla A1.1, el cual era un periodo de vuelo no mayor a 30 minutos. Al multiplicar el voltaje de la batería con su capacidad se obtiene la potencia por hora que puede brindar. Luego, al dividirla por la potencia que consumen los 4 motores, da como resultado el tiempo aproximado que durará la batería. Es así como se obtiene la ecuación 4.2, donde Cap_B es la capacidad deseada de la batería en amperios hora, P_M es la potencia consumida por uno de los motores y V_S es el voltaje de una celda.

$$\frac{V_S * 6 * Cap_B}{P_M * 4} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = \text{Tiempo de duración de la batería} \quad (4.2)$$

Sabemos también que el tiempo de vuelo incluye el tiempo de despegue, el tiempo de desplazamiento y el tiempo de aterrizaje. Cada uno de estos tiempos requiere que los motores presenten un consumo distinto de potencia; por lo que, dicho de otra forma, el tiempo de duración de la batería es distinto en cada etapa. De ese modo, se obtiene la ecuación 4.3, donde T_v es el tiempo de vuelo, P_{mm} es la potencia media del motor, T_d es el tiempo de despegue, T_m es el tiempo de desplazamiento o movimiento, T_a es el tiempo de aterrizaje y P_d , P_m y P_a son sus respectivas potencias asignadas.

$$P_{mm} * T_v = P_d * T_d + P_m * T_m + P_a * T_a \quad (4.3)$$

Entonces, para el cálculo de la capacidad de la batería, se sabe que el tiempo de vuelo como máximo debe ser 30 minutos, el voltaje de las celdas en el caso más extremo es 3.7 V y la potencia durante el despegue será 1141.805 W. En cuanto a las potencias consumidas para el movimiento y el aterrizaje del dron, se empleará la tabla del reporte de pruebas del motor seleccionado que se encuentra en el Anexo 3. Es importante tener en cuenta que la potencia para el movimiento requiere que los motores ejerzan una fuerza que equivalga, como mínimo, al peso de la máquina. Como ya se había explicado en la selección de motores, este peso de trabajo de los 4 motores es de 13 kg, por lo que la potencia requerida de un motor será cuando ejerce un empuje de 3250 gramos. Además, la potencia para el aterrizaje estará relacionada a un empuje menor al requerido para el movimiento del dron. Por lo tanto, al consultar la Tabla A3.1, se observa que la potencia de movimiento será de 432 W, correspondiente a un empuje de 3262 gramos; mientras que la potencia de aterrizaje será de 404 W, con un empuje de 3100 gramos.

Por último, se considerará que tanto el despegue como el aterrizaje tienen una duración de 1 minuto, lo que para los cálculos implica un tiempo de movimiento de 28 minutos. Con ello, al combinar las ecuaciones 4.2 y 4.3, se obtiene la ecuación 4.4, en la cual

se reemplazan los datos correspondientes a cada variable para obtener la capacidad máxima de la batería para un tiempo de vuelo máximo de 30 minutos. Asimismo, se realiza un segundo cálculo con un tiempo de movimiento de 18 minutos con el fin de hallar una capacidad mínima para un vuelo de 20 minutos

$$\frac{V_s * 6 * Cap_B}{4} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \geq P_d * T_d + P_m * T_m + P_a * T_a \quad (4.4)$$

Es así como se obtiene que la batería debe tener una capacidad máxima de 40966 mAh y una mínima de 27993 mAh. En vista de que encontrar una batería tan específica sería complicado, se optó por baterías cuya capacidad estuviera alrededor de los datos hallados. También, es importante mencionar que un criterio de selección será la corriente de descarga máxima de la batería, representada por la letra C. Esta corresponde a una constante empleada para relacionar la corriente de descarga máxima con respecto a la capacidad de la batería; por ejemplo, para 1 Ah y una constante de 35C, la batería se descargará como máximo a 35 A (MIT Electric Vehicle Team, 2008). Es por ello que se busca para este criterio una batería que entregue la corriente para los 4 motores pero que no se descargue tan rápido. Las alternativas evaluadas se presentan a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Comparación de alternativas para las baterías

	Requerimientos	Tattu 28000 mAh	Tattu 30000 mAh	Tattu 40000 mAh
Voltaje / Celdas	6S	6S	6S	6S
Corriente de descarga continua	$\geq 7C$	25C	25C	10C
Capacidad (mAh)	≤ 40000	28000	30000	40000
Peso (g)	< 5000	3389	3505	4130
Dimensiones	$< 300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$	200 mm x 120 mm x 65 mm	217 mm x 120 mm x 65 mm	263 mm x 122 mm x 64 mm
Precio (€)	-	581.99	621.99	724.25

Nota. Elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla 4.2, la batería seleccionada es la Tattu de 28000 mAh. Si bien su capacidad es la más cercana al rango mínimo, no hay que olvidar que los cálculos son evaluaciones de casos críticos como el peso máximo o voltaje mínimo. Fuera de ese detalle, los demás criterios son los más óptimos en esa alternativa, puesto que es la opción más compacta, ligera y barata. Por último, considerando que cada motor consume 50.5 A como máximo; es decir, 202 A en total, se aprecia que la batería

cumple con los requisitos ya que su corriente de descarga continua (25C) multiplicada por la capacidad (28 Ah) da como resultado un máximo de 700 A de descarga.

4.1.1.3 Hélices y Variadores de velocidad

Con el motor escogido, se optó por seguir las recomendaciones del fabricante y emplear las hélices y variadores de velocidad que se mencionan en la ficha técnica del actuador seleccionado anteriormente. Como se estipula en la Tabla 4.1, la hélice a emplear sería la P21x6.3'' de la empresa T-Motor y los variadores de velocidad o ESC serían el modelo Flame 70A 6S, también de la misma empresa. Las características principales de la hélice son su peso de 58 gramos y su diámetro de 533.4 mm; mientras que del variador son sus dimensiones de 59 x 36.5 x 16 mm, su peso de 55 gramos y su límite de corriente pico de 80 A por 10 segundos.

4.1.1.4 Placa distribuidora de poder o PDB

Como ya se conocen el voltaje de trabajo y la corriente que consume cada motor, se puede escoger una placa distribuidora de poder o PDB. Este componente le permitirá al dron suministrar de energía tanto a los motores como a componentes que no requieran tanto voltaje. Por ello, en la Tabla 4.3, se analizaron dos opciones que cumplen con los requisitos.

Tabla 4.3 Comparación de alternativas para la placa distribuidora de poder

	Requerimientos	MatekSys PDB-HEX	MatekSys FCHUB-12S
Voltaje de entrada (V)	6S	2S a 12S	3S a 12S
Corriente de trabajo continua / máxima	> 101A / > 202A	140A / 264A	280A / 440A
Salidas a ESC	>= 4	6	4
Corriente de ESC continua / máxima	<= 70A / -	60A / 100A	70A / 110A
Salidas BEC	<= 3	1	2
Corriente de BEC continua / máxima	<= 5A / -	4A / 5A	4A / 5A
Peso (g)	< 25	12	21
Dimensiones	< 60 mm x 60 mm x 10 mm	49 mm x 40 mm x 6 mm	50 mm x 55 mm x 6 mm
Precio (\$)	-	19.99	29.99

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, la PDB escogida es la MatekSys FCHUB-12S. Para la elección se determinó que los criterios principales eran la cantidad de salidas BEC y las corrientes de sus salidas ESC. De ese modo, mientras más cercana la cantidad a los requerimientos, resulta más favorable para su elección. Si bien la primera alternativa presentaba mejores características de precio, dimensiones y peso, las diferencias de cada uno de esos criterios no llegan a ser significativas al compararse con la

versatilidad para la selección y alimentación de sensores y actuadores que le brinda a la PDB poseer 2 salidas BEC de distinto voltaje.

4.1.1.5 Cámara y transmisor de video

Por lo general, las cámaras para drones deben ser compactas y ligeras. Además, estas deben conectarse a un transmisor que permita enviar la señal de imagen al mando o receptor en tierra a una frecuencia que no interfiera con la transmisión de otros datos del dron, la cual es 5.8G. Para la selección se analizaron tres tipos de cámaras en base a los criterios de resolución de imagen y si el precio de venta incluía el transmisor. Dichas alternativas son analizadas en la Tabla 4.4 a continuación.

Tabla 4.4 Comparación de alternativas para la cámara

	Requerimientos	5.8G Micro FPV Camera	JJA- CM1200	Caddx Ant Lite
Voltaje (V)	5	5	4.7 a 15	3.7 a 18
Corriente (mA)	≤ 600	400	550	No especificada
Sensor de imagen	$\leq 1/2"$ CMOS	1/4" CMOS	1/3" CMOS	1/3" CMOS
Resolución	≤ 1500 TVL	700 TVL	1200 TVL	1200 TVL
¿Incluye transmisor?	-	Sí	Sí	No
Peso (g)	< 20	1.8	16	1.5
Dimensiones	$< 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$	11 mm x 11 mm x 6 mm	25 mm x 25 mm x 29 mm	14 mm x 14 mm x 12 mm
Precio (\$)	-	19.99	22.99	13.99

Nota. Elaboración propia.

De ese modo, se escogió la primera alternativa. Para la elección se determinó que los criterios principales eran el peso, la corriente y las dimensiones. Es debido a que es compacta y consume poca corriente que la diferencia de pesos y precios con la tercera alternativa no suponen un factor significativo en la elección. Además, esta cámara incluía su respectivo transmisor de nombre Tx06 Split el cual se alimenta con un voltaje de 5 V, pesa 3.9 gramos y sus dimensiones son de 18.5 x 9.9 x 3.5 mm.

4.1.1.6 Servomotor

Para la selección del servomotor se emplearán los datos obtenidos al escoger la cámara del dron. Inicialmente, se planeaba que el servomotor estuviera alineado con el centro de masa de la cámara y su soporte, de modo que el componente solo soporte una fuerza perpendicular a su eje de rotación. Sin embargo, como ese escenario es muy ideal, se está considerando un escenario donde el brazo de palanca de la cámara con el servomotor es de 1 cm. Con ello, se procede a calcular el torque a ejercer por el servomotor. Se sabe que el peso de la cámara es de 1.8g, por lo que al multiplicar

ambos datos se obtiene un torque requerido de 1.8 g.cm. A continuación, en la Tabla 4.5, se observa la comparación de las alternativas.

Tabla 4.5 Comparación de alternativas para los servomotores

	Requerimientos	SG51R	SG92R	SG90
Voltaje (V)	5	4.8 a 6	4.8 a 6	4.8 a 6
Torque (g.cm)	> 1.8	600	2500	1800
Dimensiones	< 25 mm x 15 mm x 30 mm	21.5 mm x 11.7 mm x 25.1 mm	23 mmx 12.2 mm x 27 mm	23 mmx 12.2 mm x 29 mm
Peso (g)	< 20	5	9	9

Nota. Elaboración propia.

Finalmente se selecciona el servomotor Tower Pro SG51R. En vista de que todas las alternativas cumplían con los requerimientos, la selección se redujo a evaluar qué opción era la más compacta y ligera.

4.1.1.7 Tarjeta controladora de vuelo

Para la selección de la tarjeta controladora de vuelo se recurrirá a las recomendaciones de compatibilidad que figuran en las especificaciones del fabricante de la PDB escogida anteriormente. En ese sentido, se tienen dos alternativas: el MatekSys F722-STD y el MatekSys F405-STD. Sin embargo, en la página del fabricante se encuentra un aviso que indica que la producción del modelo F722-STD será suspendida, por lo que la alternativa a emplear sería el modelo F405-STD.

Las características destacadas del modelo F405-STD son un LDO de 3.3 V y 300 mA, puertos UART para transmitir datos por PPM o SBUS, puertos I2C para las señales de un sensor GPS, dimensiones de 36 mm x 36 mm y un peso de 7g.

4.1.1.8 Sensores de presión y posición

Por lo general, las tarjetas controladoras de vuelo incluyen sensores de presión incorporados. Para el modelo escogido anteriormente, la empresa fabricante MatekSys (s.f.) menciona que se incorporará el sensor de presión Infineon DPS310 a la tarjeta para los nuevos lotes de producción. Este sensor posee un rango de operación de 300 hPa a 1200 hPa que funcionaría a la altura de trabajo propuesta en la lista de exigencias y una precisión de 0.002 hPa. Por otro lado, para el sensor de posición o módulo GPS se analizaron 3 alternativas que se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Comparación de alternativas para los módulos GPS

	Requerimientos	M8Q-5883	SAM-M8Q	M9N-5883
Voltaje (V)	5	4 a 5.5	4 a 5.5	4 a 5.5
Corriente (mA)	<= 50	40	40	50
Baudaje por defecto	-	9600	9600	38400

Dimensiones	< 40 mm x 40 mm x 20 mm	20 mm x 20 mm x 10 mm	26 mm x 16 mm x 7.5 mm	32 mm x 32 mm x 10 mm
Peso (g)	< 20	7	7	14.5

Nota. Elaboración propia.

Como resultado del análisis, se seleccionó el módulo M8Q-5883. Los criterios que determinaron la selección fueron la corriente de trabajo, el peso y las dimensiones, siendo la alternativa escogida la más compacta en cuestión de área.

4.1.1.9 Receptores

La selección de receptor requiere conocer los voltajes a los que puede trabajar la tarjeta controladora de vuelo, así como los puertos y tipos de datos que posee. Además, se necesita saber cuántos sensores se emplearán para determinar el número de canales requeridos. Partiendo de ello, se necesita que el componente trabaje con los datos que emplea el controlador de vuelo (SBUS y PPM) y que trabaje a 5 V. Además, el rango de operación debe ser hasta 5 km para cubrir un diámetro máximo de 10 km, propuesto en la lista de exigencias. De ese modo, en la Tabla 4.7 se evaluaron 3 alternativas de receptores cuyas características se acercan a lo deseado.

Tabla 4.7 Comparación de alternativas para los receptores

	Requerimientos	FS-iA10B	RX6R	RX4R
Voltaje (V)	5	4 a 8.4	3.5 a 10	3.5 a 10
Corriente (mA)	<= 200	No especificada	100	100
Protocolo	-	AFHDS 2A	ACCST	ACCST
Antenas	2	2	2	2
Canales	>= 8	10	16	16
Tipos de datos	SBUS ó PPM	PWM, PPM, i.BUS, SBUS	PWM, SBUS	PWM, SBUS
Rango de operación	<= 5 km	0.5 a 1.5 km	> 2 km	> 2 km
Dimensiones	< 50 mm x 50 mm x 15 mm	47 mm x 33.1 mm x 14.7 mm	21.1 mm x 17 mm x 7.3 mm	18 mm x 17 mm x 7 mm
Peso (g)	<= 20	19.3	2.9	2.4

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, el elemento seleccionado es el modelo RX4R de la empresa FrSky debido a que es compacto, ligero y posee una gran cantidad de canales. Si bien no trabaja con una amplia variedad de tipos de datos, ello no supone un problema para la tarjeta controladora de vuelo.

4.1.2 Selección de componentes eléctricos del depósito

En vista de que anteriormente se seleccionaron la mayoría de componentes que permiten la acción de vuelo y control del dron, los elementos eléctricos que conforman al depósito de desinfección se resumen en aquellos que permiten rociar con alcohol los productos, detectar la presencia de los mismos y controlar los actuadores involucrados. De ese modo, los componentes a seleccionar en esta sección son: microbombas y los elementos involucrados en su circuito de potencia, servomotores, interruptores de contacto momentáneo para detectar si el depósito está cerrado y el microcontrolador.

4.1.2.1 Microbombas

La microbomba es uno de los elementos principales del depósito de desinfección. Es por medio de este componente que el alcohol almacenado en recipientes plásticos llega a las boquillas sobre los productos almacenados en el dron. Para la selección de la microbomba se consideró que trabajara a voltajes pequeños que pudieran ser suministrados por la misma placa distribuidora de potencia. De igual manera, debe ser ligero, compacto y sobretodo, debe generar un caudal capaz de alimentar las mangueras en segundos, pero sin utilizar un exceso de alcohol. A continuación, las alternativas evaluadas se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Comparación de alternativas para las microbombas

	Requerimientos	Bomba sumergible 3V-6V	Bomba sumergible 12V
Voltaje (V)	5 ó 12	3 a 6	12
Corriente (mA)	< 500	100 a 200	350
Caudal máximo (L/h)	< 250	70 a 120	240
Dimensiones	< 60 mm x 60 mm x 60 mm	56 mm x 33 mm x 24 mm	36 mm x 26 mm x 55 mm
Peso (g)	< 100	30	72
Precio (S/.)	-	14.00	30.00

Nota. Elaboración propia.

De ese modo, se escogió la bomba sumergible de 3V-6V. Los criterios de la primera opción son más óptimos en todos los casos, siendo la alternativa más barata, compacta, ligera y con un consumo bajo de energía. Luego de ello, es necesario escoger los elementos que forman parte del circuito de potencia de la microbomba: la alimentación y los relés. En base al voltaje y corriente de trabajo, se propone que la alimentación sea por medio del BEC de 5 V que tiene la PDB. Además, se empleará un Módulo Relay de 2 canales con un peso de 40 gramos y dimensiones de 51 x 43 x 17 mm para el control de las microbombas. Esto se debe a que se contempla que el diseño del depósito de desinfección cuente con dos microbombas para poder repartir el alcohol en toda el área designada a los productos. Este módulo tiene incorporado, además de los relés, 4 entradas dedicadas a la alimentación del módulo y las señales de control.

Por último, si bien el envase de plástico, las boquillas de pulverización y los tubos no son componentes eléctricos, resulta importante mencionar los criterios involucrados

en su selección. De ese modo, partiendo del caudal máximo de la bomba, se sabe que el depósito utilizará 33.3 mililitros por segundo. También, se estima que el tiempo en el que las bombas estarán encendidas no superará los 5 segundos, por lo que el envase plástico debe tener una capacidad mayor a 166.5 ml. Es por ello que se seleccionó un frasco redondo de plástico PET con una capacidad de 300 ml, 76 mm de diámetro y 86 mm de alto, el cual cumple con la capacidad y dimensiones para transportar el alcohol y la bomba sumergible.

En cuanto a la boquilla de pulverización, se buscó que el ángulo al cual rociara el líquido fuera el más amplio posible y que el tipo de aspersion que empleara fuera de un cono lleno para así cubrir toda la superficie del depósito. De esa manera, se escogió una boquilla de pulverización BB09 de 120° de aspersion en cono lleno con una rosca de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Junto con este componente, resulta necesario emplear 5 conectores de manguera hembras de $\frac{1}{4}$ de pulgada, mangueras de plástico y 5 conectores Tee del mismo diámetro para transportar el alcohol desde los envases de plástico hasta las boquillas.

4.1.2.2 Servomotor

Los servomotores en el depósito de desinfección tienen la labor de limitar, en ambos extremos, el movimiento de la canasta con riel con el fin de que no se abra durante el vuelo. En ese sentido, el eje de los servomotores no será sometido a un torque excesivo, sino más bien a ligeras fuerzas de flexión ocasionadas por la inercia de la carga durante el transporte. El torque de trabajo es, en realidad, el eslabón a emplear para limitar el movimiento de la canasta como se propuso en los detalles del concepto solución del depósito en la Figura 3.11.

Más adelante, en el diseño mecánico de este trabajo, se presentarán las dimensiones y pesos de las partes del dron. Mientras tanto, se procede planteando que el peso del eslabón no superará los 30 gramos y su punto de aplicación no estará a más de 5 cm; por lo que, en el caso más crítico, se requiere un servomotor con 150 g.cm de torque. Es por ello que se decidió emplear las mismas alternativas y criterios presentadas en la Tabla 4.5; por lo tanto, los servomotores escogidos serían del mismo modelo seleccionado anteriormente: Tower Pro SG51R.

4.1.2.3 Interruptor de contacto momentáneo

El interruptor de contacto momentáneo es en esencia un botón que solo mantiene su estado cerrado mientras se le aplique una fuerza. Su función es detectar que la canasta ha sido retirada o devuelta. De ese modo, partiendo de la suposición de que el operador o el cliente no comete errores al cerrarla o abrirla, la lógica interna del controlador podrá saber si la canasta está con los productos o no.

Por ello, para la selección del interruptor, se compararon alternativas que tuvieran una altura del botón relativamente larga y su retorno se diera por resorte. Esto aseguraría que el botón se comportara de modo que no se tiene que presionar completamente el interruptor para que cierre el circuito, brindando un rango para que la canasta y los eslabones que la cierran tengan una especie de holgura entre sus partes. A continuación, en la Tabla 4.9 se presentan las alternativas comparadas.

Tabla 4.9 Comparación de alternativas para los interruptores

	Requerimientos	DS-644K-S-L-S-K-TG	DS-435-S-K	DS-430-K
Corriente máxima (A)	-	3	1	0.5
Forma	Cuadrada	Cuadrada	Cuadrada	Cuadrada
Altura del botón (mm)	≥ 2.5	2.5	3.8	3
Dimensiones	$< 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$	18.6 mm x 18.6 mm x 22.2 mm	14 mm x 14 mm x 27.6 mm	14 mm x 14 mm x 26 mm
Peso (g)	≤ 5	3.165	2.8	2.88
Precio (\$)	-	4.00	2.25	2.00

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, el botón escogido es de la compañía Miyama y su modelo es el DS-435-S-K. Como se puede apreciar de la Tabla 4.9 presentada anteriormente, el componente resulta ser el más ligero de las alternativas y uno de los más baratos; además, la altura de su botón es la mayor, siendo este criterio el más influyente para su elección.

4.1.2.4 Tarjeta de desarrollo con microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se debe tener en cuenta la cantidad y tipos de entradas, así como la corriente a la que trabajarán estas. Tomando en cuenta que se encargará de las señales digitales del botón y de los dos motores para las bombas, así como de las señales PWM de los servomotores, se espera que los puertos de entrada y salida puedan manejar corrientes mayores a 1mA. De igual manera, al considerar que se requiere una señal para el botón, 2 para el módulo Relay de las microbombas, una por cada servomotor y sus respectivas señales de voltaje, se obtiene finalmente que el mínimo de puertos I/O que requiere la tarjeta de desarrollo con microcontrolador es de 7 pines. De ese modo, las alternativas evaluadas se presentan a continuación en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Comparación de alternativas para los microcontroladores

	Requerimientos	Launchpad EK-TM4C123GXL	Arduino UNO	Arduino NANO
Voltaje de alimentación (V)	3.3 a 12	3.3	7 a 12	7 a 12
Puertos I/O	> 7	43 (16 PWM)	14 (6 PWM)	22 (6 PWM)
Corriente de puertos (mA)	> 1	2, 4 y 8	20	40

Dimensiones	< 80 mm x 80 mm	66 mm x 50 mm	68.6 mm x 53.4 mm	18 mm x 45 mm
Peso (g)	<= 30	No especificado	25	7
Precio (\$)	-	12.99	23.00	20.70

Nota. Elaboración propia.

Como selección final, se optó por emplear la tarjeta de desarrollo con microcontrolador Arduino NANO. Partiendo de los requerimientos presentados anteriormente, la selección se redujo a la importancia del peso y dimensiones con el fin de beneficiar al dron, por lo que se escogió la alternativa más compacta y ligera que cumplía con los demás criterios.

4.2 Diseño mecánico

Partiendo del diseño eléctrico presentado, el diseño mecánico abarcará la selección del material y el dimensionamiento de las piezas que soportarán a los componentes seleccionados anteriormente. Dicho dimensionamiento está presentado en el Anexo 4 por medio de 3 cálculos preliminares para las piezas más críticas: la carcasa del dron, el soporte lateral del depósito y el brazo de soporte del motor. Así como el proceso de diseño, los cálculos son realizados de forma simultánea, pero para efectos de la lectura de este trabajo se presentarán en un orden secuencial. Finalmente, la sección concluye con la presentación de los modelos 3D de las piezas ensambladas que conforman el dron. La descripción de cada pieza por separado se encuentra en el Anexo 5. Por último, cabe resaltar que para el modelado de las piezas se empleó el programa Inventor 2021 de la compañía Autodesk.

4.2.1 Selección del material del dron

Existe una amplia variedad de materiales con los que uno puede diseñar la carcasa de un dron. Estos, por lo general, están caracterizados por ser ligeros, resistentes y compactos. Fernández, Torres y Ramírez (2016) mencionan que para un dron cuadricóptero, los materiales suelen ser el plástico ABS, el plástico PLA, la fibra de carbono, la fibra de vidrio, la madera y el aluminio (p. 35). En ese sentido, se realizó una comparación entre los plásticos empleados en la impresión 3D y la fibra de carbono con el fin de seleccionar el material más adecuado para la mayoría de las estructuras que soportan los componentes del dron. Este análisis de alternativas se presenta en la Tabla 4.11 a continuación.

Tabla 4.11 Comparación de alternativas para el material

	Requerimientos	Plástico ABS	Plástico PLA	Fibra de carbono
Resistencia a la tensión (MPa)	<= 5000	45	57.4	3100
Elongación (%)	<= 5	2.6	1.9 a 3.2	1.7
Módulo de tensión (GPa)	<= 200	2.3	2.2 a 2.4	165

Densidad (g/cm³)	<= 1.7	1.06	1.24	1.6
Precio (S/. por Kg)	-	50	65	145

Nota. Elaboración propia.

De ese modo, el material seleccionado es el plástico ABS debido a que presenta una densidad y precio menor al de las demás alternativas. Por un lado, comparado con el plástico PLA, sus características son similares, por lo que el criterio de densidad y de precio fueron los más relevantes. Por otro lado, si bien la fibra de carbono es a simple vista el material con las mejores propiedades mecánicas, también es el más denso y caro de las tres alternativas. Además, para las fuerzas involucradas en la resistencia de las estructuras del dron, las propiedades del plástico ABS son suficientes.

4.2.2 Modelo 3D del ensamble final

En esta sección se presentará el modelo 3D del producto final el cual consta, principalmente, de la unión de dos ensambles realizados por separado: el dron teleoperado y el depósito de desinfección. Debe resaltarse que, con el objetivo de aproximar el peso del conjunto, se modelaron de forma simplificada los componentes eléctricos seleccionados en la sección del diseño eléctrico y el alcohol a emplear para la desinfección. Como se observa en la Figura 4.1, la tapa de la carcasa sostiene unas partes salientes correspondientes a los soportes de goma de la tarjeta controladora de vuelo, lo cual le permite mantenerse en su lugar. Además, partiendo de las medidas exactas y la lista de componentes presentadas en el plano de ensamble en el Anexo 6, se puede decir que se cumplió con el deseo de que las dimensiones finales del dron con depósito no fueran mayores a 2 metros x 2 metros x 1 metro.



Figura 4.1. *Modelo 3D del dron teleoperado con depósito de desinfección.* Elaboración propia.

Sin embargo, el peso del conjunto, aproximado por el programa empleado, es de 11.58 kg, excediendo el límite de peso deseado expresado en la lista de exigencias. Aun así, debe recordarse un aspecto importante del diseño de drones empleado al inicio del diseño eléctrico: la relación entre el empuje de los motores y el peso del dron. En primer lugar, recalcar que esta relación no es una regla sino una consideración que los diseñadores de drones utilizan como factor de seguridad. En segundo lugar, este criterio no contempla el peso extra que puede cargar un dron, solo considera el peso de su estructura en la relación.

En ese sentido, en vista de que para efectos de este trabajo se consideró el peso de la carga máxima de 3 kg como parte del peso del dron, los motores escogidos aún cumplen con la solicitud porque fueron seleccionados para trabajar con un dron que pesara 13 kg. De ese modo, recalculando el factor de seguridad con el peso final del modelo 3D, la ecuación 4.1 y el empuje real de los motores seleccionados, se obtiene que la relación empuje – peso es de 2.25.

4.2.3 Modelo 3D del dron teleoperado

En esta sección se presentarán los modelos 3D del ensamble correspondiente al dron que se mencionó en la sección del ensamble final. Entiéndase que, al igual que en el diseño eléctrico, se considera al dron como un ensamble independiente del depósito de desinfección, el cual será presentado más adelante en su respectiva sección.

Como se aprecia en la Figura 4.2, el dron carga con la mayoría de componentes eléctricos modelados como, por ejemplo, un servomotor simplificado, bloques negros que representan a los ESC, el conjunto de los motores con sus respectivas hélices, bloques grises que representan al sensor de GPS, al receptor del dron y al transmisor de video, el arduino NANO que controlará el depósito y el conjunto de tarjeta controladora y PDB. También es importante mencionar que el modelo 3D del motor MN605-S (Sanyong Lamsal, 2019) y del arduino NANO (Luong Dinh Phuc, 2017) fueron obtenidas de la página web GrabCAD Community. De ese modo, las listas de componentes involucrados pueden apreciarse en los planos de ensamble presentados en el Anexo 6.



Figura 4.2. *Modelo 3D del dron ensamblado.* Elaboración propia.

4.2.4 Modelo 3D del depósito

En esta sección se presentarán los modelos 3D del ensamblaje correspondiente al depósito de desinfección que se mencionó en la sección del ensamblaje final. Nótese en las Figuras 4.3 y 4.4 que, al igual que con el ensamblaje del dron, se modelaron de forma simplificada los componentes eléctricos seleccionados en la sección del diseño eléctrico. Es por ello que en las Figuras 4.3 y 4.4 se pueden observar simplificaciones de los servomotores, el botón, el módulo Relay, las microbombas y los envases plásticos. De ese modo, las listas de componentes involucrados pueden apreciarse en los planos de ensamblaje presentados en el Anexo 6.

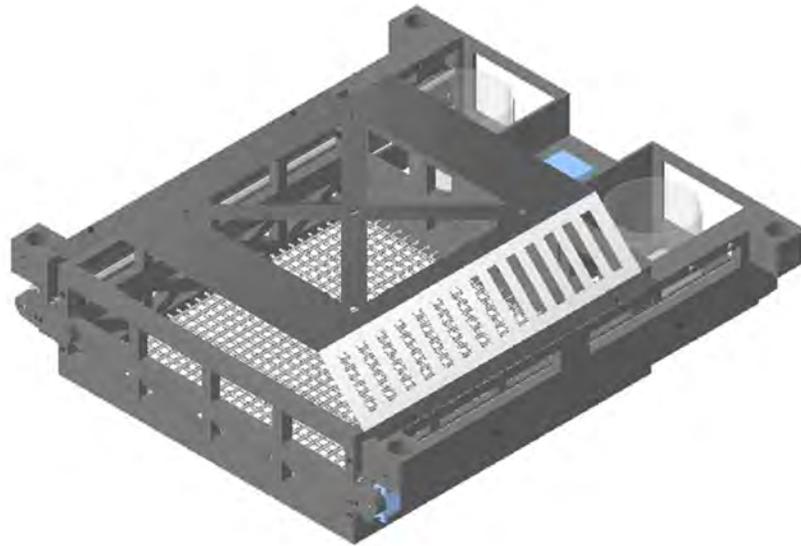


Figura 4.3. *Modelo 3D del depósito de desinfección (Cerrado)*. Elaboración propia.

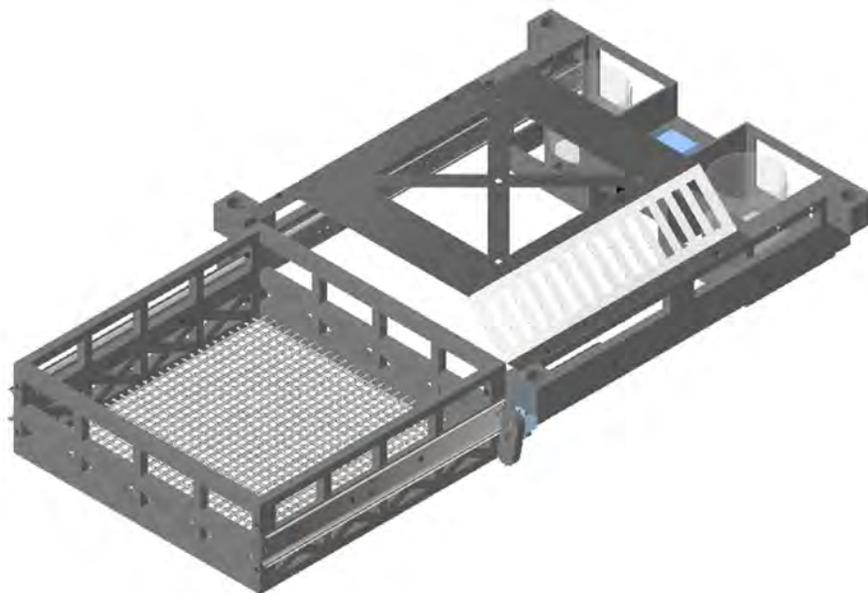


Figura 4.4. *Modelo 3D del depósito de desinfección (Abierto)*. Elaboración propia.

4.3 Diseño de software

Para el diseño del software se abarcarán dos aspectos: la lógica que debe seguir el Arduino NANO para que el depósito de desinfección funcione correctamente y el control que se implementará con el fin de regular la respuesta de los parámetros del dron como lo son los ángulos de orientación y la altura.

4.3.1 Algoritmo del depósito de desinfección

En la Figura 4.5 y la Figura 4.6 se puede apreciar el diagrama de flujo que rige el comportamiento del dron. Del mismo modo, si bien se planteó al inicio del trabajo que el diseño del mando solo se realizaría hasta el nivel conceptual, en el Anexo 7 se puede apreciar el diagrama de flujo correspondiente al comportamiento del mando. Esto se realizó con la finalidad de brindar una perspectiva más amplia del funcionamiento de un sistema teleoperado, además de justificar cómo se obtienen las señales de los canales del receptor en el dron.

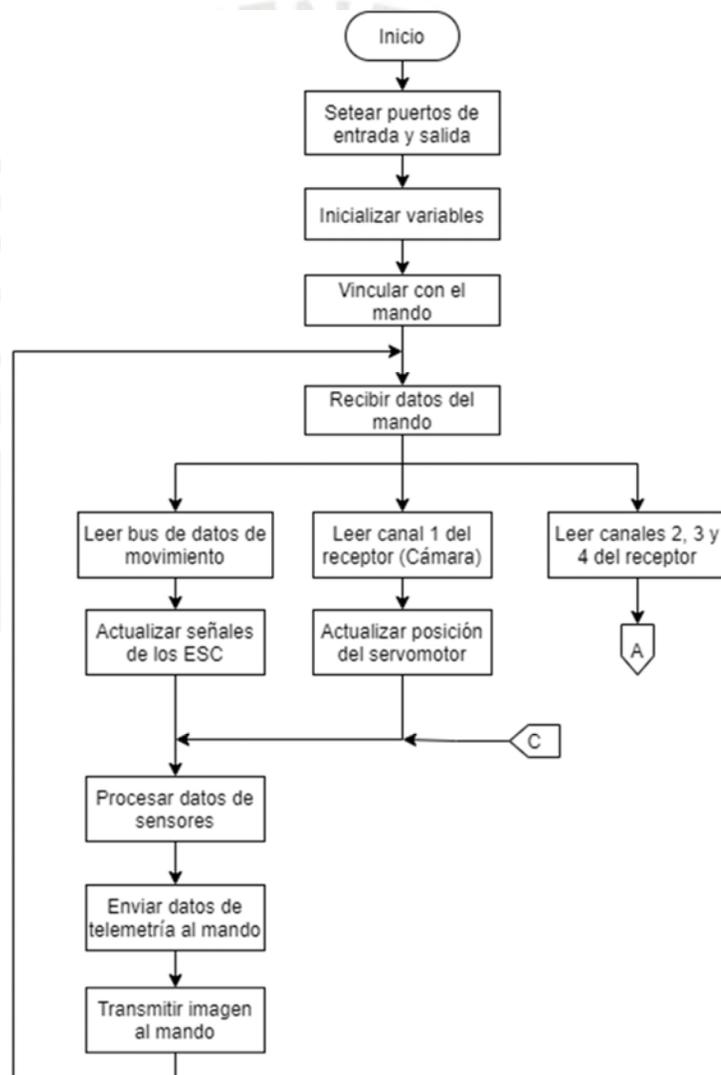


Figura 4.5. Diagrama de flujo del funcionamiento del dron teleoperado con depósito de desinfección (Parte 1 de 2). Elaboración propia.

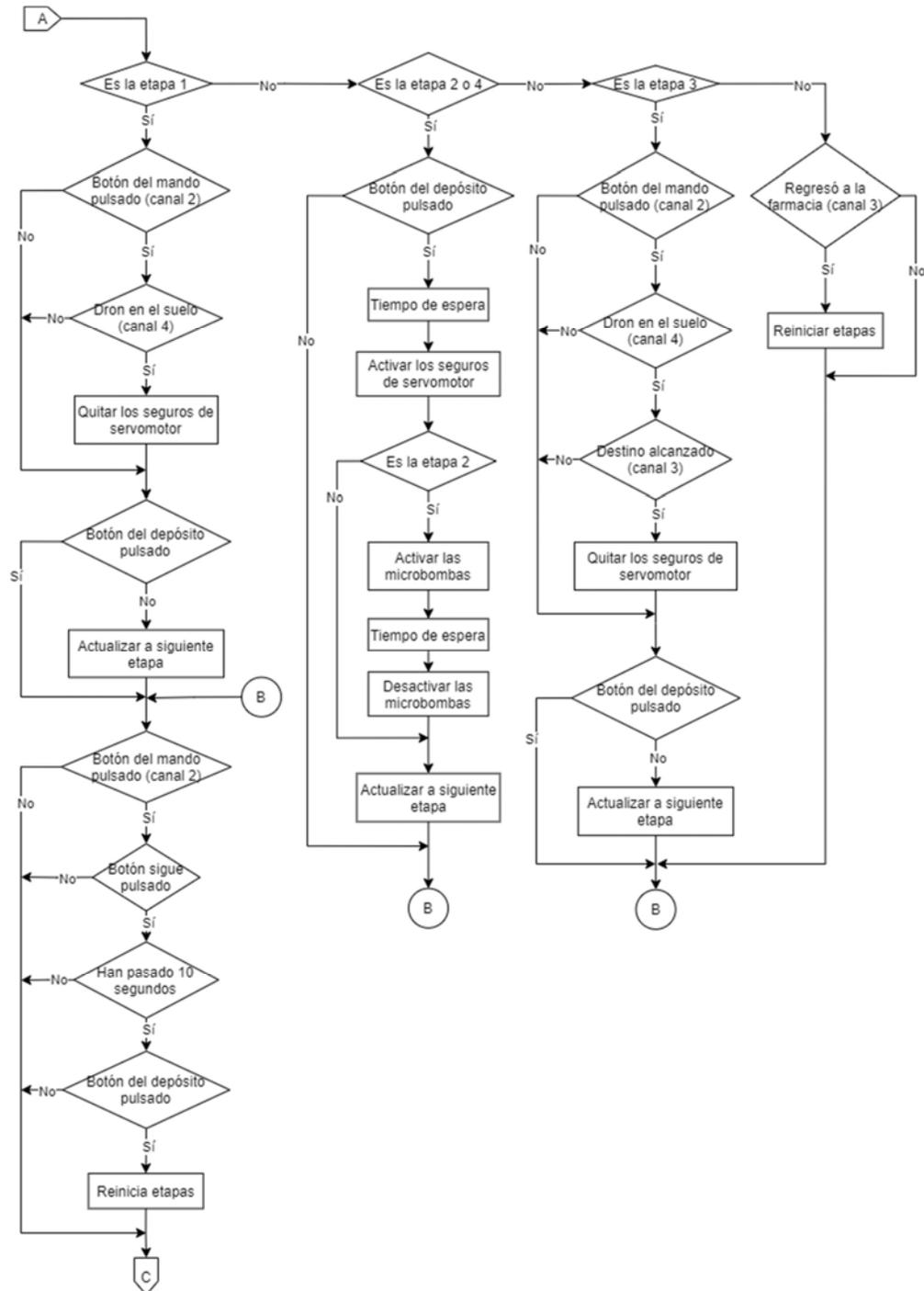


Figura 4.6. Diagrama de flujo del funcionamiento del dron teleoperado con depósito de desinfección (Parte 2 de 2). Elaboración propia.

De la Figura 4.6, se puede apreciar que la lógica del Arduino NANO parte desde el salto de página A del diagrama hasta el salto de página C. Nótese que no hay ciclos iterativos a simple vista debido a que el microcontrolador estará recibiendo constantemente señales del receptor que deben ser procesadas al instante mientras se realizan los otros procesos simultáneos presentados anteriormente. De esa forma, el

comportamiento del depósito se puede dividir en 5 etapas, las cuales se explicarán a continuación.

La primera etapa ocurre en la farmacia, mientras se alistan los productos solicitados por el cliente. El dron espera a que llegue la señal del canal 2 del receptor que le indica que se presionó el botón en el mando que le indica que debe abrir el depósito de desinfección. También, espera que el canal 4 le envíe una señal confirmando que el dron se encuentra en el suelo. Luego de ello, si ambas condiciones se cumplen, los servomotores se girarán de modo que los seguros del depósito liberen el movimiento de la canasta. Finalmente, el dron esperará a que se jale la canasta para que se abra el circuito del interruptor de contacto momentáneo o botón del depósito, actualizando su estado y pasando a la siguiente etapa.

La segunda etapa ocurre cuando los productos ya están en la canasta y el operario la desliza hacia el botón del depósito. Cuando el dron detecta que se volvió a presionar el botón de su depósito, espera un breve momento para girar los servomotores y asegurar el depósito. Luego, se activan las microbombas por unos segundos para dispensar el alcohol líquido sobre los productos a desinfectar. Finalmente, se actualiza el estado para pasar a la siguiente etapa.

La tercera etapa concluye con la llegada del dron a su destino. Al igual que en la etapa 1, el dron espera que se reciba la señal del canal 2 y 4 confirmando que se presionó el botón en el mando y que se encuentra en el suelo. Además, espera que el canal 3 le envíe la señal de confirmación de llegada al destino. De esa manera, si las condiciones se cumplen, los servomotores girarán liberando el movimiento de la canasta. Finalmente, el dron esperará a que se jale la canasta para que se abra el circuito del botón del depósito, actualizando su estado y pasando a la siguiente etapa.

La cuarta etapa, similar a la segunda, espera que el cliente deslice la canasta para presionar el botón y así cerrar el depósito al mover los servomotores. La única diferencia es que no se activan las microbombas nuevamente, por lo que se procede a actualizar el estado y pasar a la última etapa. Dicha etapa consiste en esperar que el canal 3 del receptor envíe la señal que confirme que el dron volvió a la farmacia para volver a empezar con el servicio.

Cabe resaltar que la lógica interna está diseñada considerando que el operario no intentará volar el dron mientras tiene la canasta abierta, al inicio de la etapa 2 o 4, o al final de la etapa 1 o 3 cuando se quitan los seguros del depósito. Aparte de ello, el algoritmo no permitirá abrir el depósito una vez se haya cerrado automáticamente, a menos que llegue a su destino y se encuentre en el suelo. Es por ello que se incorporó un último algoritmo al final de todas las etapas que permite al operario reiniciar el estado de las etapas, ya sea por un cambio en la solicitud de los productos o algún problema externo. Para esto se debe mantener presionado el botón del mando que controla al depósito por 10 segundos aproximadamente y el botón del depósito en el dron debe encontrarse pulsado, porque si no lo estuviera, significaría que el depósito está abierto y no habría problema para acceder y manipular los productos.

4.3.2 Control de orientación del dron

Para controlar la orientación del dron se deben modelar ecuaciones lineales de forma experimental que permitan obtener el voltaje medio que ingresa en los motores a partir

de los ángulos de orientación y la altura de vuelo. Luego de ello, se emplean las ecuaciones del modelo aerodinámico del dron y del rotor, mencionadas en el marco teórico, para traducir el voltaje de los motores a los ángulos de orientación y altura reales. Para eso, primero se deben recopilar por medio de datos del fabricante o experimentalmente los datos requeridos en las ecuaciones del marco teórico.

4.3.2.1 Aproximación de la constante del motor

La constante del motor K_M permite relacionar la corriente consumida por un motor con el torque que genera su eje. Por ello, en vista que el fabricante del motor MN605-S no brinda dicha constante, se procederá a emplear el reporte de pruebas presentado en el Anexo 3. En la Figura 4.7 se puede observar la relación que existe entre los datos de torque y corriente presentados en la Tabla A3.1. Si se realiza una línea de tendencia con los datos tabulados y se establece como punto de paso el origen, se obtendrá que su pendiente es 0.0335, valor que le corresponde a la constante K_M del motor.

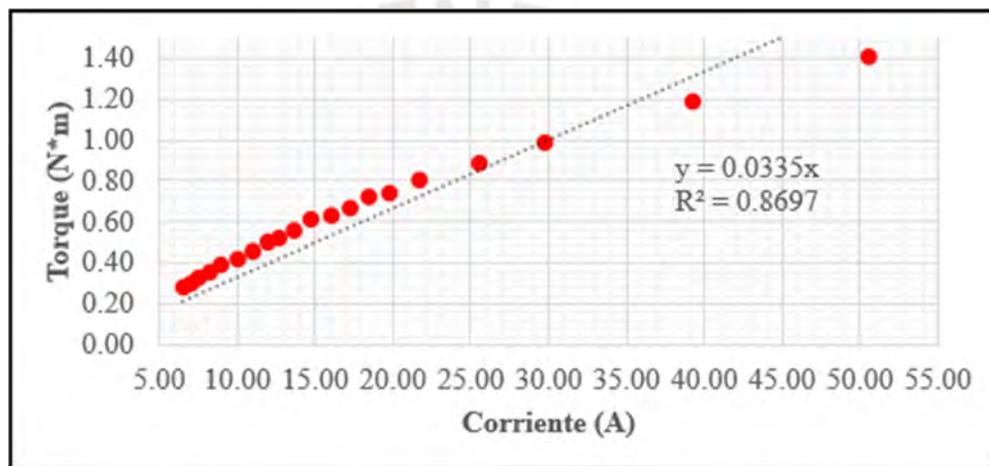


Figura 4.7. Torque vs. Corriente. Elaboración propia.

4.3.2.2 Aproximación de los coeficientes de empuje y de arrastre

El empuje es una de las componentes de la fuerza aerodinámica que se genera de forma paralela al eje de rotación de una hélice; mientras que, el arrastre es la fuerza que se opone al movimiento del perfil de la hélice a través de un fluido. Basándose en los procedimientos del trabajo de Paiva (2016), los coeficientes de estas fuerzas permiten relacionar la velocidad angular al cuadrado del motor con sus fuerzas correspondientes cuando se encuentra usando una hélice específica (p. 24). Es por eso que estos suelen calcularse de forma experimental por medio de la relación entre las ecuaciones de las rectas de tendencia del empuje, el arrastre y la velocidad angular al cuadrado con respecto a una variable medible del motor.

De ese modo, Paiva (2016) propone que los factores de empuje y de arrastre pueden calcularse por medio de las ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente (pp. 25-29), donde g es la aceleración de la gravedad, l es la distancia en el plano horizontal entre el centro masa y los ejes del rotor, b es el coeficiente de empuje, d es el coeficiente de arrastre, a_e es la pendiente de la recta de tendencia del empuje, a_a es la pendiente de la recta de tendencia del arrastre y a_Ω es la pendiente de la recta de tendencia de la velocidad al cuadrado.

$$b = \frac{a_e * g}{a_\Omega} \quad (4.5)$$

$$d = \frac{a_a * g * l}{a_\Omega} \quad (4.6)$$

Con todo ello, se emplean los datos de empuje, RPM y torque de la tabla A3.1 para hallar las rectas de tendencia requeridas. Para ello, se utilizó como variable independiente de las gráficas el porcentaje de acelerador correspondiente a cada dato. En la Figura 4.8 se puede observar la relación entre el empuje en kg y el porcentaje de acelerador empleado, obteniendo una línea de tendencia cuya pendiente es 8.4808, valor que le corresponde a la variable a_e .

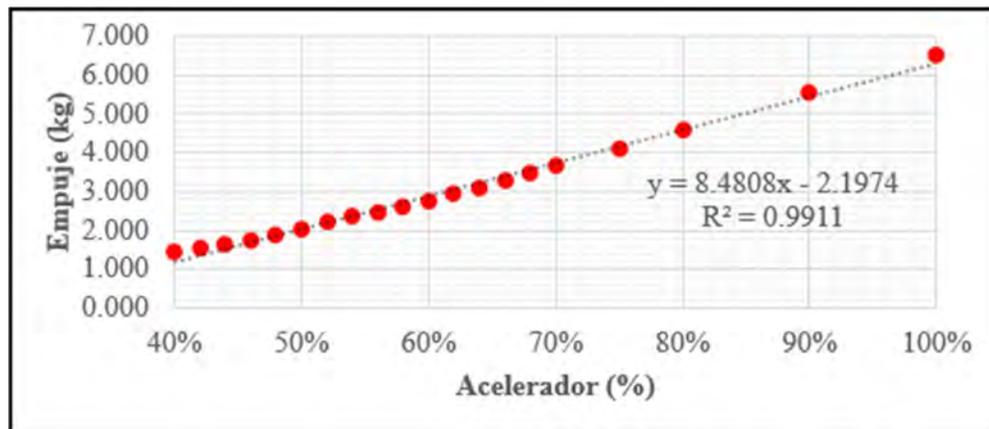


Figura 4.8. Empuje vs. Acelerador. Elaboración propia.

En la Figura 4.9 se puede observar la relación entre el arrastre en kg y el porcentaje de acelerador empleado, obteniendo una línea de tendencia cuya pendiente es 0.1919, valor que le corresponde a la variable a_a . Para este caso se tuvo que considerar que el torque indicado en la Tabla A3.1 fue medido utilizando un brazo de palanca de 1 metro, por lo que se puede obtener la fuerza proporcional en kg al dividir entre el brazo de palanca de 1 metro y la aceleración de la gravedad.

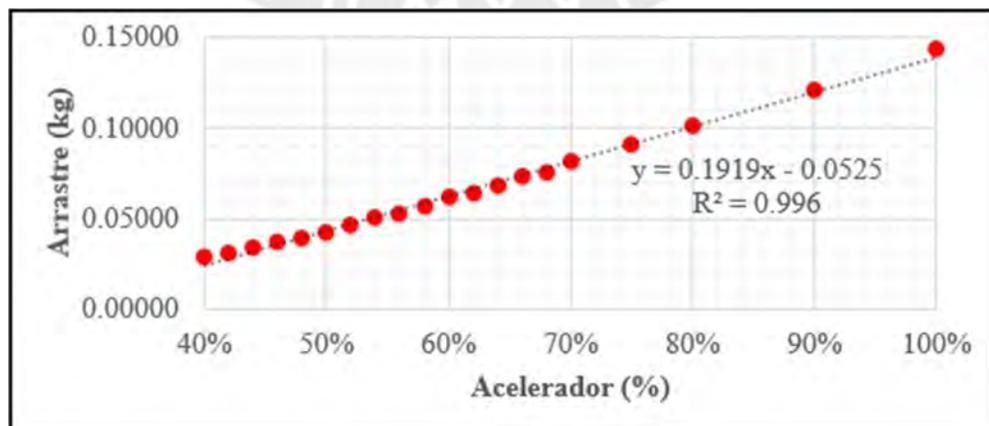


Figura 4.9. Arrastre vs. Acelerador. Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se puede observar la relación entre la velocidad angular al cuadrado y el porcentaje de acelerador empleado, obteniendo una línea de tendencia cuya pendiente es 548263, valor que le corresponde a la variable a_{Ω} . En este caso se tuvo que transformar la velocidad de la Tabla A3.1 de RPM a radianes por segundo y luego elevarla al cuadrado para después graficarla.

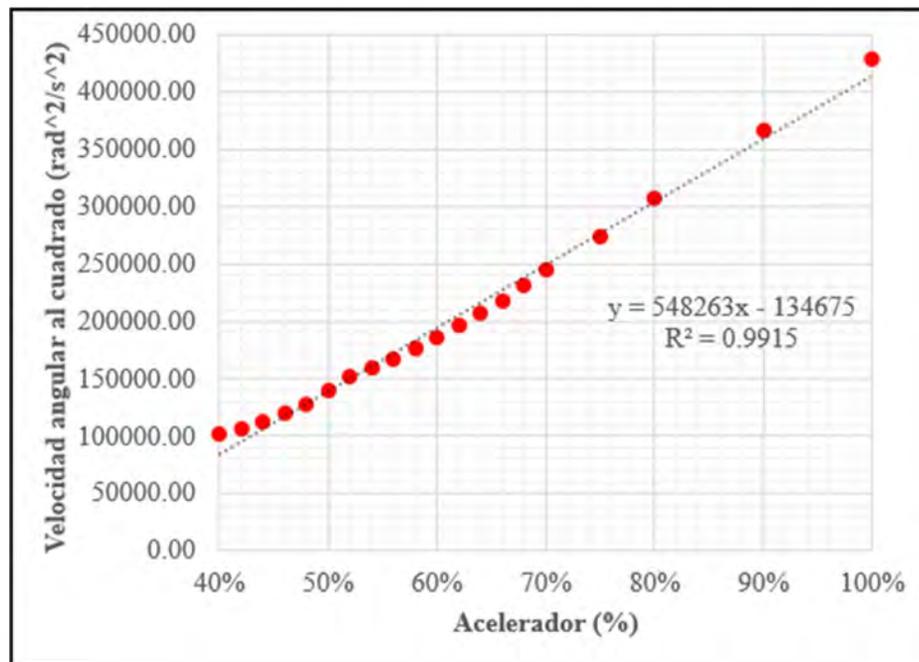


Figura 4.10. *Velocidad angular al cuadrado vs. Acelerador*. Elaboración propia.

Finalmente, con todos los datos hallados, se emplean las ecuaciones 4.5 y 4.6 para calcular los coeficientes. Considerando la aceleración de la gravedad como 9.81 m/s^2 y una distancia l de 0.41345 metros, se obtiene que b es igual a $1.5175 \cdot 10^{-4}$ y d es igual a $1.4196 \cdot 10^{-6}$.

4.3.2.3 Algoritmo de control PID

Con los datos hallados en las secciones anteriores, se presenta en la Tabla 4.12 una síntesis de todos los valores que serán empleados para estructurar el algoritmo PID. Cabe resaltar que datos como las inercias o la longitud del eje del rotor al centro de masa fueron obtenidos a partir de las estimaciones que presentaba el Inventor 2021 del modelo 3D y los cálculos que se realizaron en el código de Matlab, presentado en el Anexo 8, que recompila todos los valores de la tabla mencionada. Por otra parte, los datos correspondientes a la relación de transmisión del motor o la resistencia interna del mismo se obtuvieron a partir de la hoja de datos del fabricante.

Tabla 4.12 *Datos para modelar el dron teleoperado*

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Gravedad	g	9.81	m/s^2
Masa del dron (Con carga máxima)	m	14.58	Kg
Distancia del rotor al centro de masa	l	0.41345	m

Inercia en x	Ixx	0.536467	Kg.m ²
Inercia en y	Iyy	0.516916	Kg.m ²
Inercia en z	Izz	0.643312	Kg.m ²
Factor de empuje	b	1.52E-04	-
Factor de arrastre	d	1.42E-06	-
Constante del motor	Km	0.0335	N.m/A
Resistencia interna	R	0.021	Ohmios
Relación de transmisión	r	1	-
Eficiencia de transmisión	n	1	-
Inercia del motor y la hélice	Jtp	0.001427	Kg.m ²

Nota. Elaboración propia.

De esa manera, se procedió a modelar el lazo cerrado de control PID partiendo de las ecuaciones presentadas en el marco teórico. Para ello, primero se debe conocer una de las limitaciones que tiene el modelo tradicional de control PID frente al control de sistemas delicados como lo puede ser un dron y sus rotores. Con respecto a eso, Paiva (2016) menciona lo siguiente:

La acción derivativa se calcula a partir del error. Si la consigna presenta un cambio escalón, la salida del derivador presentaría un impulso. Este movimiento brusco puede saturar los actuadores y alejar el sistema de la zona lineal. Por estas razones la arquitectura PID presenta la acción derivada sólo de la salida del proceso (p. 36).

Es por eso que, para efectos del diseño del controlador, la acción derivativa será aplicada solo a la variable actual; mientras que las acciones proporcional e integral estarán destinadas a la señal de error entre la referencia y la variable actual, como en el modelo tradicional.

Dicho ello, para la estructura del controlador se deben relacionar los ángulos de orientación del dron Φ , θ y Ψ y la altura con los respectivos movimientos básicos del vector U . Para ello, se parte de la estructura PD abordada en el trabajo de Paiva (2016), y se adapta para un controlador PID obteniéndose la estructura presentada en la Figura 4.11, donde la salida final es uno de los movimientos básicos.

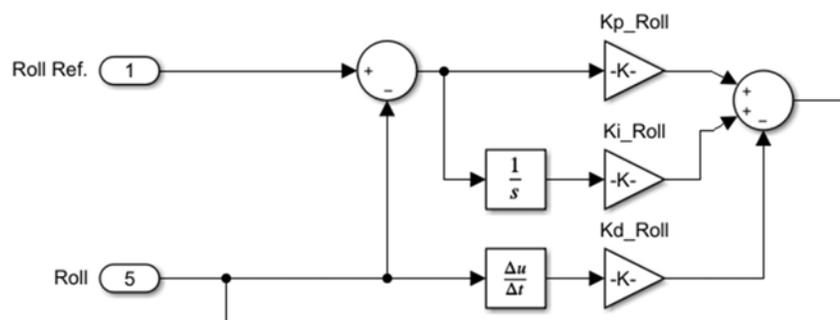


Figura 4.11. Estructura de control PID para el ángulo roll. Elaboración propia.

A partir de esa estructura se pueden obtener los movimientos U_2 , U_3 y U_4 a partir de los tres ángulos de orientación del dron, Φ , θ y Ψ respectivamente. Por otro lado, para obtener el movimiento U_1 a partir de la altura Z , se utiliza la propuesta de control presentada en el trabajo de Paiva (2016), la cual está regida por la ecuación 4.7 presentada a continuación.

$$U_1 = \frac{g + K_{pz} * (Z_{ref} - Z_{actual}) - K_{dz} * \dot{Z}_{actual}}{\cos \theta * \cos \Phi} \quad (4.7)$$

De esa forma, se obtiene la estructura del controlador PID que se puede apreciar en la Figura A9.2 en el Anexo 9, la cual está representada como el subsistema ‘Controlador PID’ que se observa en la Figura A9.1, que muestra la estructura interna del bloque ‘Controlador’ que se puede apreciar en la Figura 4.13. También, en la misma Figura A9.1, se observa una ganancia que relaciona la matriz de movimientos básicos con el cuadrado de las velocidades angulares Ω . Esta matriz de ganancia está declarada en el código de Matlab del Anexo 8 y es la inversa de la matriz compuesta por los factores b y d que se obtiene a partir de la ecuación 2.20 presentada en el marco teórico.

Por otra parte, la ‘Tabla de conversión’ se obtiene a partir del reporte de pruebas presentado en la Tabla A3.1. En la Figura 4.12 se puede observar la relación entre la velocidad angular al cuadrado y el voltaje medio empleado, obteniendo una línea de tendencia cuya pendiente es 24925 y su término independiente es -156715 . En este caso se tuvo que multiplicar el porcentaje de acelerador en la Tabla A3.1 por sus voltajes correspondientes para después graficarla. Los valores de pendiente y término independiente representan a las variables respectivas D y C declaradas en el código de Matlab del Anexo 8 que conforman la estructura del subsistema presentada en la Figura A9.3.

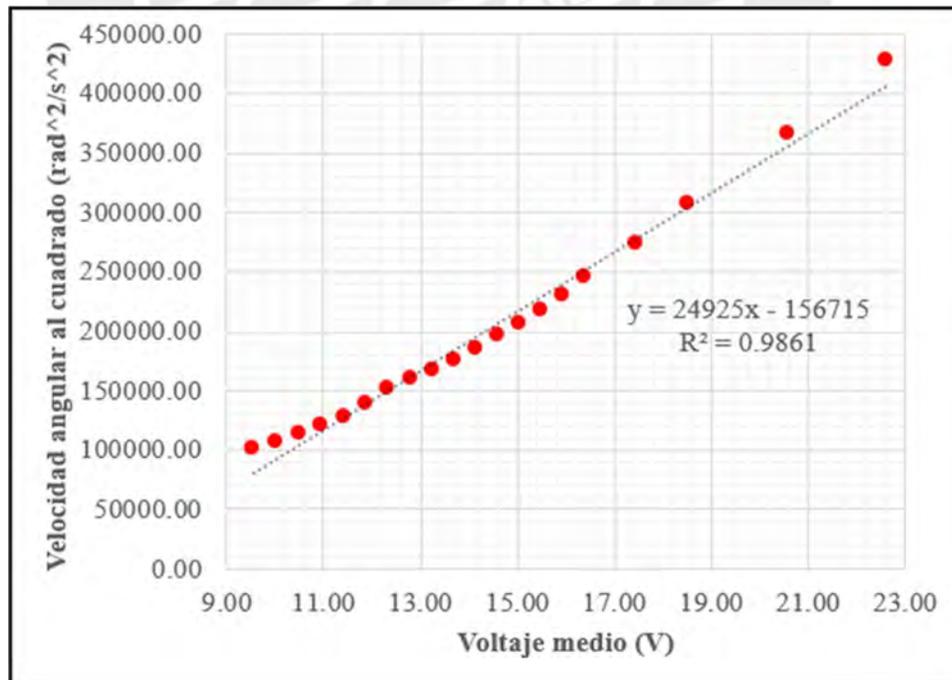


Figura 4.12. *Velocidad angular al cuadrado vs. Voltaje medio*. Elaboración propia.

Retomando los subsistemas de la Figura 4.13, el bloque ‘Planta’ representa todas las ecuaciones presentadas en el marco teórico que permiten relacionar la salida de voltajes del controlador con las señales a controlar y su estructura interna se presenta en la Figura A9.4. De esa figura, el bloque ‘Modelo no lineal del motor’ se obtiene a partir de la ecuación 2.25, permitiendo relacionar el vector voltaje medio de los actuadores con el vector de velocidades angulares Ω . El modelo está declarado en el código de Matlab del Anexo 8 a manera de 3 constantes que resumen la relación de los datos presentados en la Tabla 4.12 y la estructura del subsistema está presentada en la Figura A9.5.

Luego de ello se encuentran los tres subsistemas que representan el ‘Modelo aerodinámico del dron’, los cuales se obtienen a partir de las ecuaciones 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 presentadas en el marco teórico, permitiendo convertir el vector de velocidades angulares en el vector de movimientos básicos para después obtener los ángulos de rotación y las velocidades lineales del dron. Igual que con el modelo no lineal del motor, el modelo aerodinámico está declarado en el código de Matlab del Anexo 8 a manera de 8 constantes que resumen la relación de los datos presentados en la Tabla 4.12 y las estructuras de los subsistemas están presentadas en las Figura A9.6, A9.7 y A9.8.

Por último, el bloque ‘Señales del mando’ es un subsistema encargado de simular las orientaciones y altura objetivo del dron para poder simularlo más adelante en su respectiva sección. La estructura del subsistema está presentada en la Figura A9.9 y consta de señales escalón unitario para las orientaciones del dron y señales rampa para la altura del mismo. Cabe resaltar que el ángulo de roll se mantendrá como una señal en 0 en todo momento. Esto es debido a que, al plantear el concepto del mando, los movimientos que transmite uno de los joysticks táctiles solo abarcan el movimiento de adelante, atrás, giro a la izquierda y giro a la derecha, por lo que los movimientos controlados por roll (Izquierda y Derecha) no ocurrirán.

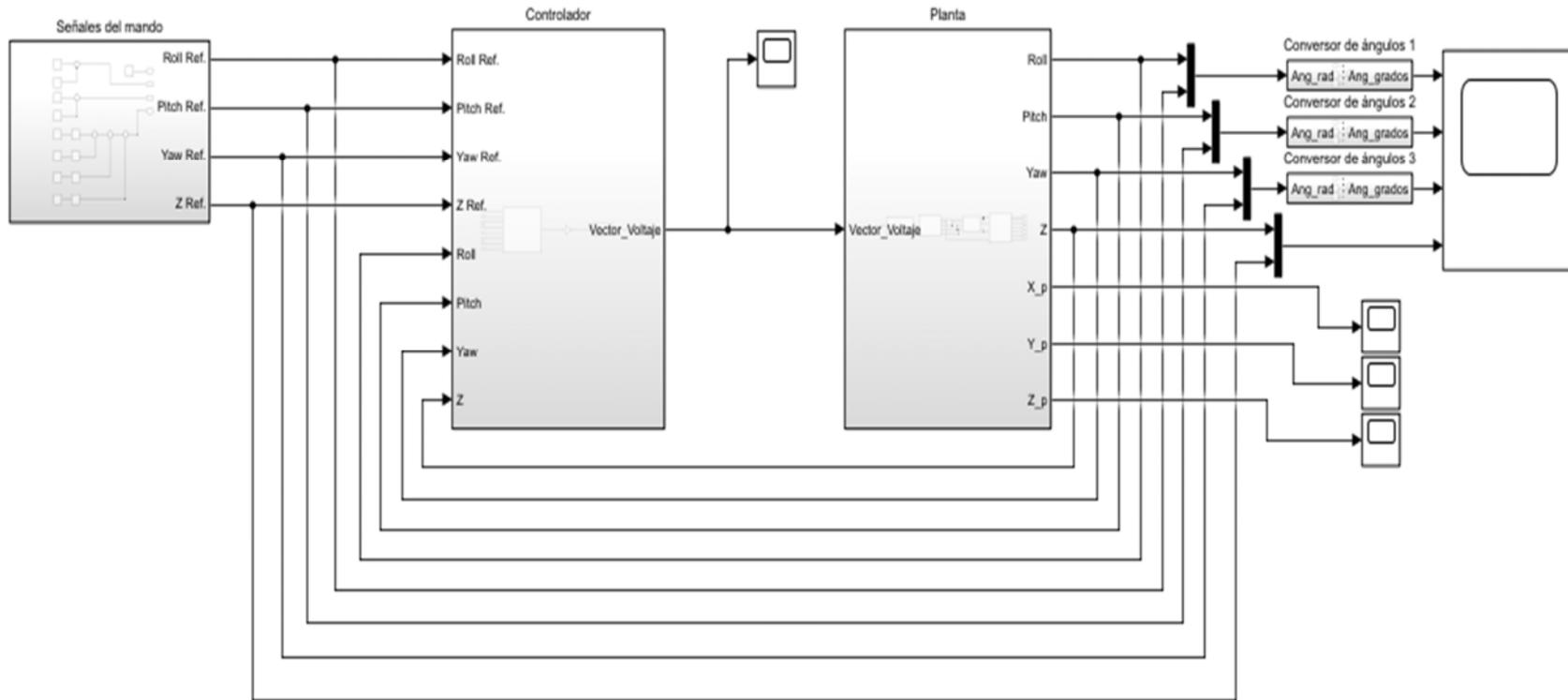


Figura 4.13. Diagrama de bloques del lazo cerrado de control PID. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

Con el diseño preliminar del prototipo desarrollado anteriormente, se procederá a la última etapa de la metodología abordada para este proyecto: el análisis y la evaluación del prototipo. Este se abordará desde las simulaciones de las piezas mecánicas principales y algoritmos de control presentados en el diseño preliminar. Por último, se procederá a estimar los costos de fabricación del prototipo para finalizar con la validación de las exigencias y deseos planteados en la lista de exigencias durante el desarrollo del diseño conceptual. Cabe resaltar que, debido a la naturaleza del diseño mecatrónico, la integración de los dominios eléctrico, electrónico, mecánico y de software no se presenta en un apartado de este capítulo, sino más bien se evidencia a lo largo del Capítulo 4 con la presentación del diagrama de conexiones que incluyen los actuadores eléctricos y electrónicos o con los planos de despiece y ensamble que presentan las medidas definitivas considerando las solicitudes mecánicas y las dimensiones de los elementos del sistema eléctrico/electrónico.

5.1 Análisis del diseño mecánico

En esta sección se utilizará la herramienta de análisis de esfuerzos que ofrece el programa de Autodesk Inventor 2021 para someter las piezas del dron, evaluadas previamente con cálculos preliminares, a las fuerzas definitivas que experimentan. Al igual que con los cálculos preliminares, se está considerando el escenario de mayor sollicitación, el cual sería el instante previo al despegue con motores a máxima potencia, donde se consideran como puntos de apoyo a las uniones atornilladas que transmiten las fuerzas de empuje a lo largo del dron. Como resultados se presentarán los esfuerzos y deformaciones, de forma exagerada para que se aprecie mejor, de las piezas mencionadas.

5.1.1 Simulación de los esfuerzos en el soporte lateral del depósito

Esta pieza conservó todas las medidas propuestas en el diseño preliminar, por lo que las fuerzas aplicadas no varían en cuanto a magnitud. Además de estas, se considera el peso de la pieza y la carga transmitida por el soporte posterior que carga con el alcohol para el depósito de desinfección. De ese modo, en la Figura 5.1 se puede apreciar que el esfuerzo máximo es 18 MPa y se ubica justamente en los puntos

considerados como apoyos. Como se preveía en los cálculos, la pieza no fallará y se observa que la simulación arroja un valor menor al estimado con el factor de seguridad en los cálculos preliminares.

Por otra parte, en la Figura 5.2, se observa que el desplazamiento que experimenta la pieza no supera los 1.196 mm, lo cual es aceptable. Se resalta que las mayores deformaciones ocurren justamente en los extremos de la pieza, pero al ser poco significativos se puede considerar que el seguro del depósito o el soporte posterior no se verán afectados en su funcionalidad. De esa manera, con estos resultados se puede asegurar que las otras piezas del depósito no fallarán, puesto que su geometría aplica espesores y dimensiones similares.

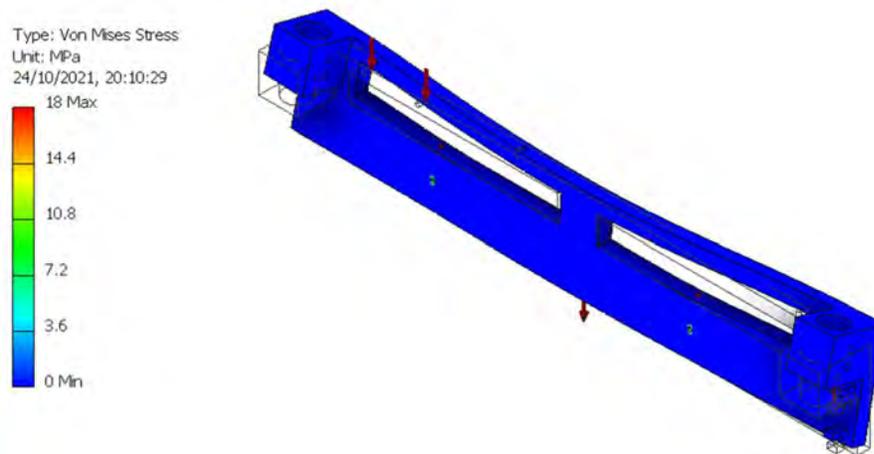


Figura 5.1. Simulación de esfuerzos en el soporte lateral del depósito. Elaboración propia.

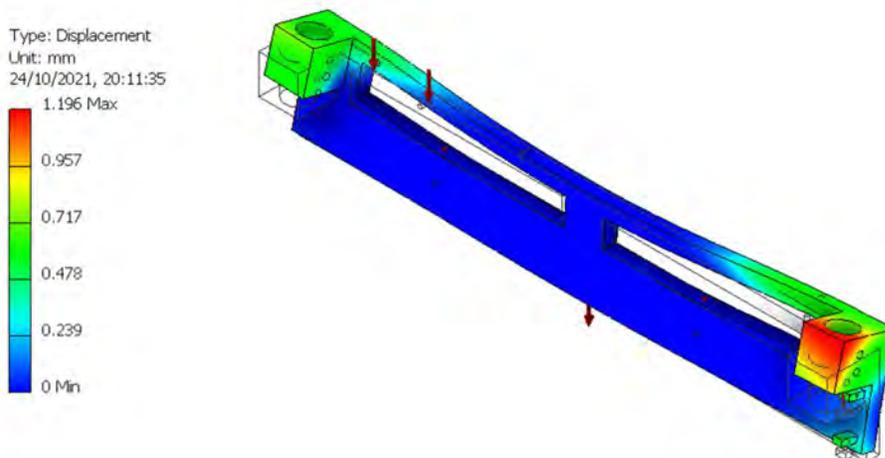


Figura 5.2. Simulación de desplazamientos en el soporte lateral del depósito. Elaboración propia.

5.1.2 Simulación de los esfuerzos en el brazo de soporte del motor

Esta pieza tuvo ligeras variaciones en cuanto a las medidas propuestas en el diseño preliminar, por lo que las fuerzas aplicadas fueron recalculadas partiendo de las dimensiones presentadas en el Anexo 6 en el plano de la pieza. De ese modo, se obtiene

que las fuerzas de R1 y R2 son 240.26 N y 174.09 N, respectivamente. Además de estas, se considera el peso de la pieza dentro de la simulación. De ese modo, en la Figura 5.3 se puede apreciar que el esfuerzo máximo es 32.54 MPa y se ubica en la sección hallada mediante los cálculos preliminares. Como se preveía, la pieza experimenta el mayor esfuerzo en el concentrador de esfuerzos, sin embargo, se observa que la simulación arroja un valor menor al estimado con los cálculos preliminares.

Por otra parte, en la Figura 5.4, se observa que el desplazamiento que experimenta la pieza no supera los 0.1556 mm, lo cual es aceptable considerando que los motores deben rotar lo más perpendicular posible al suelo. Es por ese motivo que, aunque la simulación indica que no fallaría al usarse plástico ABS, se seguirá utilizando fibra de carbono para la pieza. Esto debido a la deformación que presenta el plástico, siendo más flexible que la fibra de carbono como se deduce en base al porcentaje de elongación presentado en la Tabla 4.11.

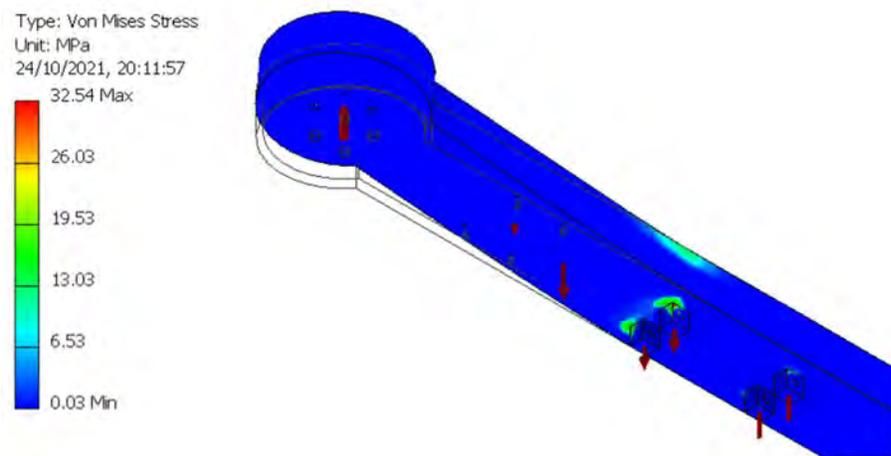


Figura 5.3. Simulación de esfuerzos en el brazo de soporte del motor. Elaboración propia.

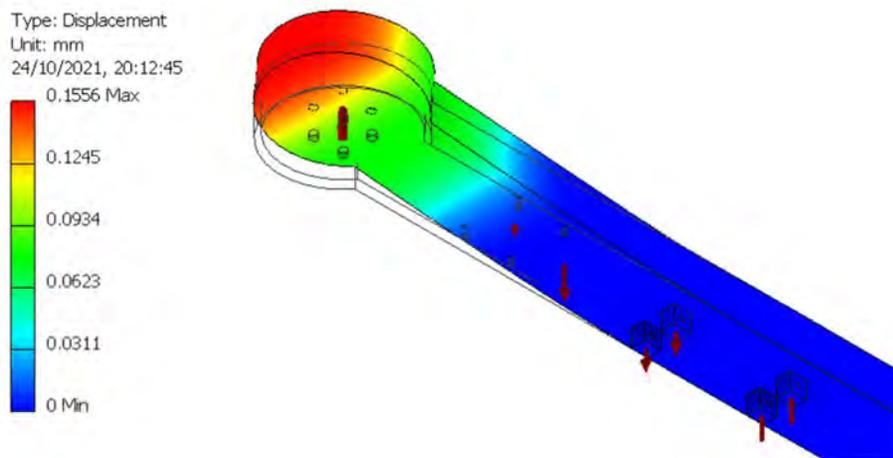


Figura 5.4. Simulación de desplazamientos en el brazo de soporte del motor. Elaboración propia.

5.1.3 Simulación de los esfuerzos en la carcasa del dron

Esta pieza tuvo ligeras variaciones en cuanto a las medidas propuestas en el diseño preliminar, por lo que las fuerzas aplicadas fueron recalculadas partiendo de las dimensiones presentadas en el Anexo 6 en el plano de la pieza. De ese modo, al transportar las fuerzas del brazo de soporte del motor, se obtienen que R1 y R2 son 240.26 N y 174.09 N, respectivamente. Además de estas, se considera el peso de la pieza y el peso del portapilas con la batería. De ese modo, en la Figura 5.5 se puede apreciar que el esfuerzo máximo es 32.16 MPa y se ubica en las uniones atornilladas más alejadas. Como se preveía, la sección crítica del voladizo experimenta un esfuerzo cercano al calculado y la pieza experimenta el mayor esfuerzo en el concentrador de esfuerzos, aun así, se comprueba que la pieza no fallará.

Por otra parte, en la Figura 5.6, se observa que el desplazamiento que experimenta la pieza no supera los 3.227 mm, lo cual es aceptable. Se resalta que las mayores deformaciones ocurren justamente en el centro de la pieza, debido a la acción del peso de la batería, pero al ser poco significativos se puede considerar que los brazos de soporte del motor y los componentes electrónicos no verán su funcionalidad comprometida.

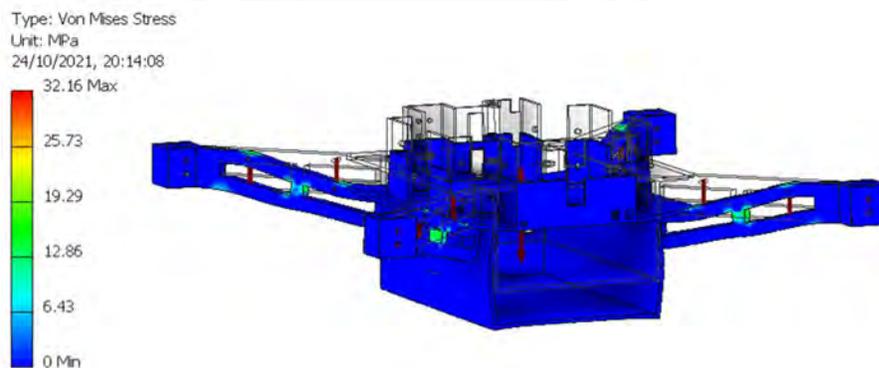


Figura 5.5. Simulación de esfuerzos en la carcasa del dron. Elaboración propia.

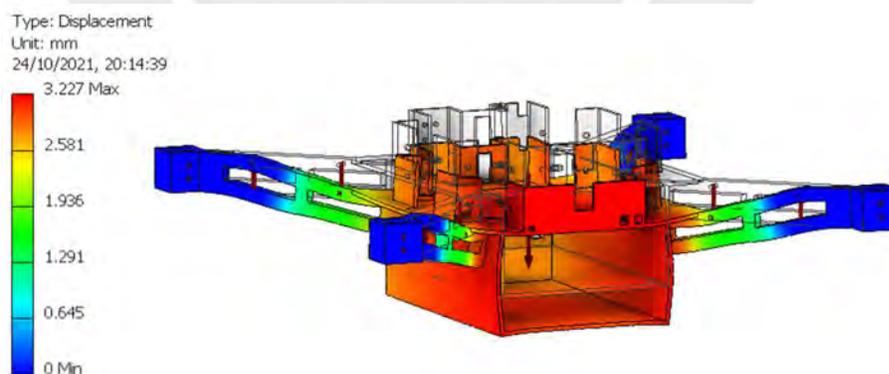


Figura 5.6. Simulación de desplazamientos en la carcasa del dron. Elaboración propia.

5.2 Análisis del diseño de software

En esta sección se emplearán distintos softwares que permitan programar y simular los algoritmos de lógica y control presentados en la sección de diseño de software del Capítulo 4.

5.2.1 Simulación del algoritmo del depósito de desinfección

Para la simulación del depósito de desinfección se empleó el software de programación Arduino IDE para elaborar el código, presentado al inicio del Anexo 10, y el programa online Tinkercad para la simulación del mismo código en conjunto con actuadores virtuales. A continuación, en la Figura 5.7, se puede observar el entorno del segundo programa mencionado con las conexiones correspondientes al diagrama de conexiones presentado en la Figura A2.1.

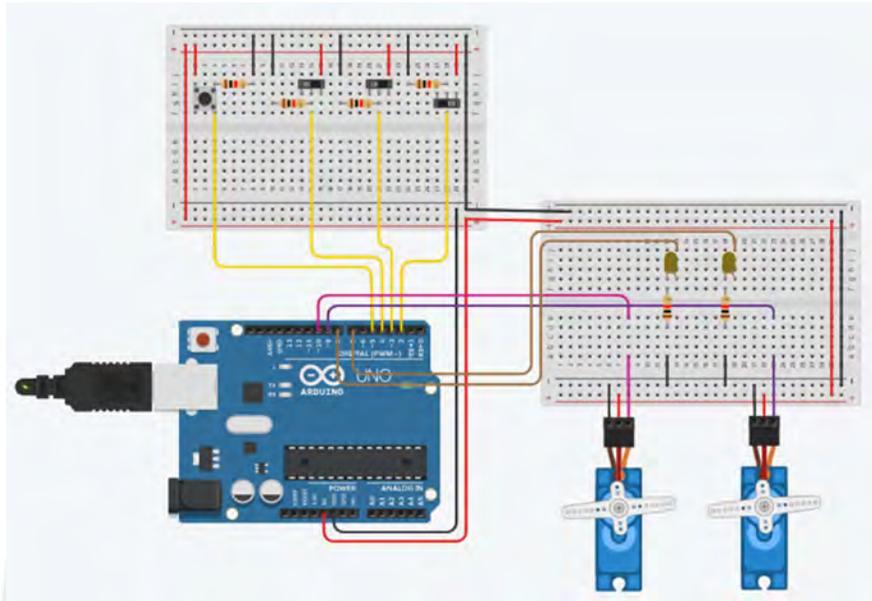


Figura 5.7. Modelado virtual para la simulación del funcionamiento del algoritmo del depósito de desinfección. Elaboración propia.

Resulta importante realizar aclaraciones con respecto al modelado virtual presentado en la Figura 5.7. En primer lugar, el programa Tinkercad presenta la limitación de no contar con el modelo de Arduino NANO seleccionado para el dron; sin embargo, el Arduino UNO cuenta con los mismos pines que se emplearán para el algoritmo, por lo que, para este proyecto, ambos modelos pueden considerarse como equivalentes.

En segundos lugar, se utilizaron luces LEDs para representar las señales encargadas del módulo Relay de dos canales que acciona las bombas con la finalidad de que se apreciara en las imágenes, presentadas en el Anexo 10, el cambio que existía entre cada etapa; ya que al usar el modelo de motor DC que brinda el programa, no se apreciaba con claridad el accionamiento.

En tercer lugar, el arreglo de botones y switches ubicados en la parte superior de la imagen son la representación de las señales que se obtienen del receptor del dron. Se modeló el botón del mando como un pulsador para que su comportamiento se asemeje al real y las señales de altura, destino y del interruptor de contacto momentáneo se modelaron como switches pues en la realidad sus valores se mantienen constantes por largos periodos de tiempo a diferencia del botón del mando. De ese modo, el arreglo representa, de izquierda a derecha, al botón del mando, la señal de destino, la señal de altura y el estado del interruptor de contacto momentáneo.

Por último, se debe tener en cuenta que, para la programación de los servomotores, los parámetros de ‘pmin’ y ‘pmax’ declarados en el código, que permiten calibrar el rango de rotación que tendrá el eje del servomotor, se obtienen de forma empírica, por lo que no se descarta la posibilidad de que para los servomotores SG51R escogidos, dichos parámetros varíen ligeramente con respecto a los parámetros de los servomotores de la simulación. Aclarado ello, y como ya se mencionó anteriormente, los estados de la simulación se pueden observar en las imágenes del Anexo 10, concluyéndose que el algoritmo se comporta de forma acorde a lo esperado.

5.2.2 Simulación del lazo de control

Para la simulación del lazo de control se parte del código de Matlab presentado en el Anexo 8 y del diagrama de bloques hecho en Simulink presentado en la Figura 4.13. Debe mencionarse que la Figura 4.13 presenta unos bloques de conversión de radianes a grados a la salida de los ángulos de orientación para su presentación en los gráficos. Las características que debe presentar el controlador varían dependiendo de la variable analizada y, aun así, los parámetros deben coexistir para que al funcionar en conjunto cumplan con todos los requisitos.

Por ello, para el comportamiento de la variable Roll, que se mantendrá en 0, se busca que las variaciones generadas por otros movimientos no superen los 5° de inclinación. Para el comportamiento de la variable Pitch, la cual trabajará con ángulo menores de 15° de inclinación para que el peso de la carga no fuerce la apertura de los seguros del depósito, se busca que su sobre impulso no supere el 5% y que su tiempo de establecimiento sea menor o igual a 5 segundos. Para el comportamiento de la variable Yaw, la cual debe alcanzar giros de 90° de forma lenta para que le permita al usuario retroalimentar su visión con la imagen transmitida por la cámara, se busca que no tenga sobreimpulso y que su tiempo de establecimiento sea entre 5 y 10 segundos. Finalmente, para el comportamiento de la variable Z (altura) se parte de la exigencia presentada en la Tabla A1.1 sobre la altura y velocidad máxima que se le permitirá al dron en zonas urbanas; por ende, se busca que el dron pueda mantenerse a 110 m o más de altura y su velocidad de ascenso o descenso no superen los 40 km/h, lo que se traduce en un tiempo de respuesta aproximadamente mayor a los 10 segundos.

De ese modo, se obtuvieron cada una de las constantes del controlador partiendo de los valores que se estimaban en el trabajo de Paiva (2016) y luego realizando un ajuste de prueba y error en los parámetros con el fin de obtener resultados que se ajustaran lo mejor posible al comportamiento deseado. Dichas constantes se pueden apreciar en la Tabla 5.1 a continuación.

Tabla 5.1 *Constantes del controlador*

Variable	K proporcional	K integral	K derivativo
Roll	40	0.5	15
Pitch	40	0.5	15
Yaw	0.595	0	1.03
Z	20	0.8	40

Nota. Elaboración propia.

Con ello, se procedió a simular el lazo cerrado con el programa Simulink estableciendo valores en el bloque ‘Señales del mando’. En la primera fila de la Figura 5.8 se presenta la respuesta de referencia y real del ángulo Roll. Se observa que existen ligeras variaciones durante los tiempos en donde se realizó un movimiento en el ángulo Pitch, el cual será presentado más adelante. Sin embargo, el valor máximo que se registra de estas variaciones es de 0.0345 radianes, lo que corresponde a 1.977° , comprobándose que la respuesta cumple con los requisitos estipulados anteriormente.

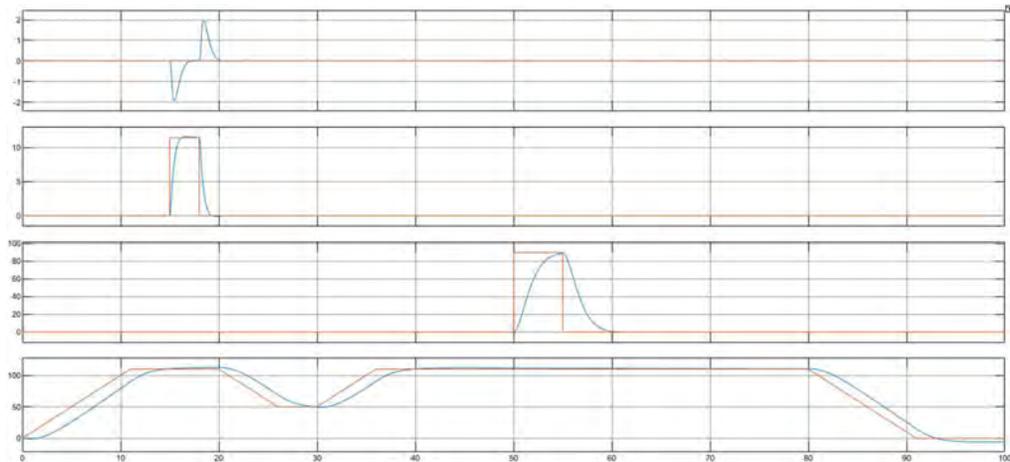


Figura 5.8. Gráfica de las respuestas de las variables Roll, Pitch, Yaw y Altura respectivamente (Referencia en rojo y Real en azul). Elaboración propia.

En la segunda fila de la Figura 5.8 se presenta la respuesta de referencia y real del ángulo Pitch. Para la simulación se consideró una señal de 0.2 radianes, o lo que es 11.46° , en un tiempo de 3 segundos aproximadamente. Se observa que presenta un ligero sobreimpulso hasta 0.203 radianes, lo cual representa un 1.5% de sobreimpulso; mientras que, el tiempo de establecimiento se da a los 2.3 segundos, comprobándose que la respuesta cumple con los requisitos planteados anteriormente.

En la tercera fila de la Figura 5.8 se presenta la respuesta de referencia y real del ángulo Yaw. Para la simulación se consideró una señal de 1.57 radianes, o lo que es 90° aproximadamente, en un tiempo de 5 segundos. Se observa que para esta respuesta no existe un sobreimpulso; por otra parte, el tiempo de establecimiento es alrededor de los 5 segundos, estimado al analizar el tiempo que tarda en volver al valor inicial. Es de ese modo que se verifica que la respuesta cumple con los requisitos planteados anteriormente.

En la cuarta fila de la Figura 5.8 se presenta la respuesta de referencia y real de la altura Z. Para la simulación se consideró que el dron despega hasta los 110 metros de altura, luego desciende a una altura de 50 metros, vuelve a subir y finalmente aterriza. Se observa que la respuesta del sistema tiende a estar ligeramente por encima de la referencia y que, además, presenta un retraso constante de 2 segundos aproximadamente. Por otra parte, se observa que al inicio y al final del recorrido presenta alturas negativas, pero ello se puede entender teniendo en cuenta que el Simulink no considera que existe un suelo cuando Z es igual a 0.

Un error similar se presenta al analizar las gráficas de velocidad en el eje X y en el Eje Z que se presentan en las Figuras 5.9 y 5.10, respectivamente. Con respecto a ese error, Paiva (2016) menciona lo siguiente:

[...] el movimiento en el eje X y Y puede ser indefinido hasta no forzar movimiento en el sentido contrario. Esto debido a que no se considera la resistencia del aire y se mantiene el movimiento debido a la inercia del cuerpo (p. 44).

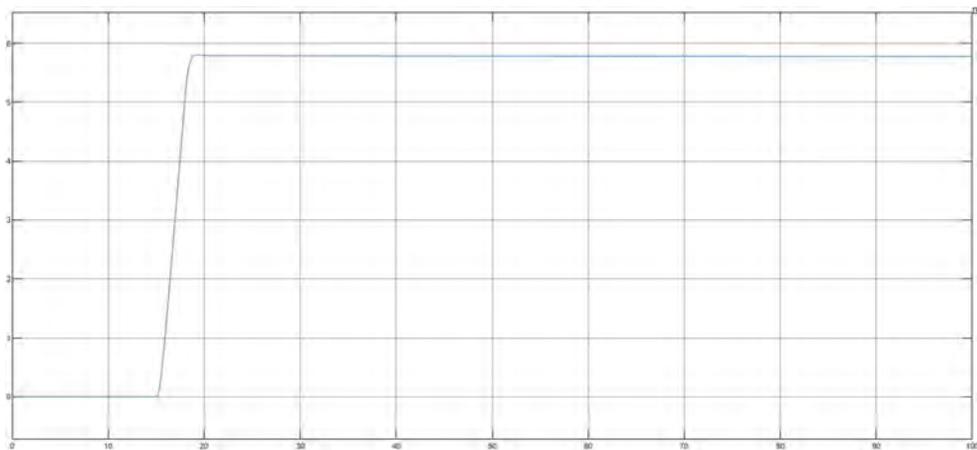


Figura 5.9. Gráfica de la velocidad en el eje X. Elaboración propia.

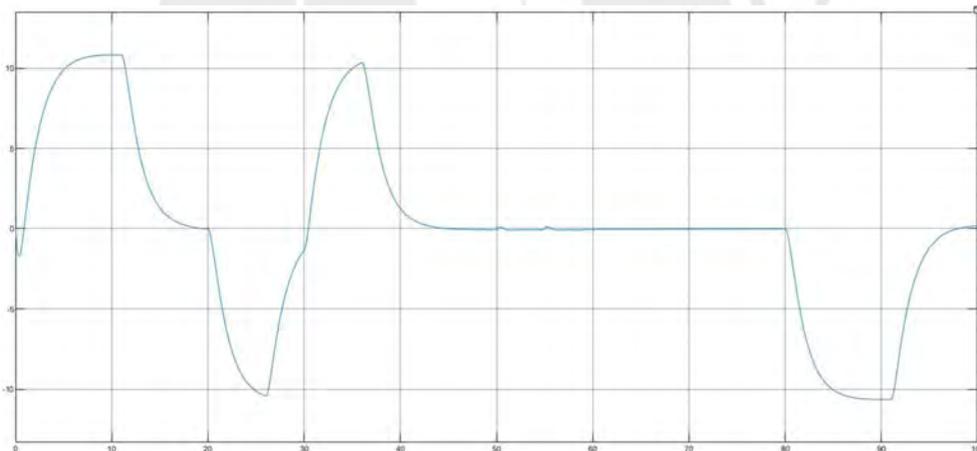


Figura 5.10. Gráfica de la velocidad en el eje Z. Elaboración propia.

Aun así, de las figuras presentadas anteriormente, se pueden obtener las velocidades en el plano horizontal y vertical respectivamente. De la Figura 5.9 se observa que la velocidad máxima a la que llega el dron en el plano horizontal es de 5.786 m/s, o lo que es lo mismo, 20.83 km/h. Por otra parte, de la Figura 5.10 se obtiene que la velocidad máxima a la que llega el dron en el plano vertical es de 10.79 m/s, que equivale a 38.84 km/h. Es de ese modo que se comprueba que el dron cumple con los requisitos planteados anteriormente.

Por último, se verificó que las acciones de control no solicitaran un voltaje mayor al límite físico de 24 V que posee la batería. En la Figura 5.11 se puede observar que el vector de voltajes medios presenta picos moderados e iguales al momento de elevarse

o reducir su altura; mientras que cuando realiza variaciones en el ángulo Yaw, los picos de voltaje se desfasan y solicitan mucho más voltaje. Aun así, se verifica que el sistema no solicita más de 24 V, estando dentro del límite de la batería.

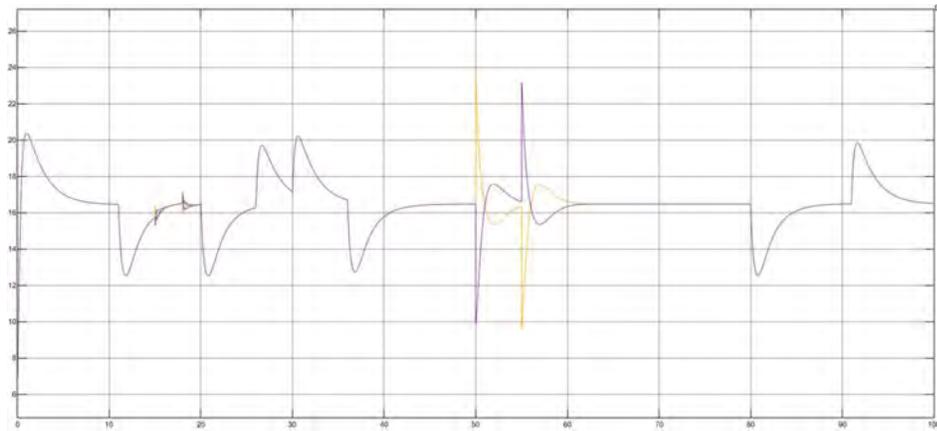


Figura 5.11. Gráfica del vector de voltajes medios. Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que los resultados presentados fueron evaluados considerando un dron con carga máxima; es decir, con masa 14.58 kg. Aun así, es importante recalcar que, durante el ajuste, las constantes del controlador fueron aproximadas para funcionar tanto para el escenario en donde el dron tiene carga como para cuando no carga con productos. Este último escenario se simuló disminuyendo 3 kg al peso del dron que figura como constante en el código de Matlab presentado en el Anexo 8. Los resultados de ese caso se pueden apreciar en el Anexo 11, concluyendo que el comportamiento no varía significativamente y se mantiene dentro de los requerimientos estipulados.

5.2.2.1 Ecuación de diferencias

La ecuación de diferencias es la estructura del algoritmo que permite la implementación del control diseñado en cualquier microcontrolador. Para obtenerla se parte de la estructura PID presentada en el Capítulo 4 y en el Anexo 9 y se elaboran las expresiones que representan las funciones de transferencia del controlador, como se aprecian en las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3. En la primera ecuación, la variable U_x representa a cualquiera de los movimientos básicos referentes a las variables de control Roll, Pitch, Yaw, las cuales poseen estructuras similares. En el caso de la variable altura, a este resultado U_x debe, a nivel de código, sumársele la constante de gravedad g y dividirse entre el producto de los cosenos de los ángulos Roll y Pitch. La variable U_x está conformada por una acción PI y una acción D las cuales dependen de una señal de error, expresada en la ecuación 5.4, y de una variable sensada v_{act} respectivamente.

$$U_x = PI - D \quad (5.1)$$

$$PI = K_p * (v_{ref} - v_{act}) + \frac{K_i}{s} * (v_{ref} - v_{act}) \quad (5.2)$$

$$D = K_d * s * v_{act} \quad (5.3)$$

$$e_v = v_{ref} - v_{act} \quad (5.4)$$

Para la discretización de las ecuaciones presentadas, se empleó la aproximación de Tustin para transformar las expresiones en el dominio de “s” al dominio de “z”, donde T es el periodo de muestreo escogido, obteniéndose las ecuaciones 5.5 y 5.6 para el término PI y D respectivamente.

$$PI(z) = K_p * E(z) + K_i * \frac{T * (1 + z^{-1})}{2 * (1 - z^{-1})} * E(z) \quad (5.5)$$

$$D(z) = K_d * \frac{2 * (1 - z^{-1})}{T * (1 + z^{-1})} * v_{act}(z) \quad (5.6)$$

Finalmente, se termina el procedimiento al emplear la transformada z de los términos obtenidos en las ecuaciones anteriores para hallar la ecuación de diferencias de los términos PI y D de la ecuación inicial. De esa manera, las ecuaciones 5.7 y 5.8 representan las ecuaciones de diferencias correspondientes a los términos respectivos, PI y D.

$$PI(k) - PI(k-1) = (K_p + \frac{K_i * T}{2}) * e(k) + (\frac{K_i * T}{2} - K_p) * e(k-1) \quad (5.7)$$

$$D(k) + D(k-1) = \frac{K_d * 2}{T} * v_{act}(k) - \frac{K_d * 2}{T} * v_{act}(k-1) \quad (5.8)$$

5.3 Estimación de costos del prototipo

Para la estimación de costos, se organizaron en 6 aspectos: Componentes eléctricos, Componentes mecánicos, Cables y conexiones, Material, Diseño y Fabricación. Del mismo modo, para incluir los costos de importación en el cálculo, se emplearon tarifarios de importación: uno de Amazon para los precios de Estados Unidos y FedEx para el resto del mundo. Se consideró, para la inclusión de estos costos, que los productos provenientes de un mismo país serán importados en grupo con un único costo por peso total.

En el primer aspecto, los costos son una recopilación de precios de los componentes previamente seleccionados en la sección del diseño eléctrico. Además, se consideró dentro del costo un conector AS150U para la conexión entre la batería y la PDB. De ese modo, el precio total de este aspecto es de 2051.77 dólares y los montos detallados se pueden apreciar en la Tabla A12.1 del Anexo 12, en donde se presenta el costo por importación de la batería que proviene de Alemania.

En el segundo aspecto, se consideran los costos de las piezas comerciales que no entraron dentro de la categoría anterior, tales como las hélices, los soportes de goma, los envases para el alcohol y los conectores para las mangueras del depósito de desinfección. También se incluyeron el precio de los tornillos y tuercas, los cuales fueron aproximados por medio de un listado de precios que brinda el catálogo virtual del programa de Autodesk: Fusion 360. Es así como el precio total de este aspecto es de 669.32 dólares y los montos detallados se pueden apreciar en la Tabla A12.2, en donde se presenta el costo por importación de las hélices, que incluyen el costo de los motores y los ESC presentados anteriormente; el costo de importación de los soportes de goma, que incluyen el costo de los componentes eléctricos provenientes de Estados Unidos; el costo de importación en conjunto que representan el envase de plástico y

su tapa y el costo de importación de las boquillas, que incluye el costo de los componentes eléctricos provenientes de España.

En el tercer aspecto, se consideran los costos por metro de los cables eléctricos a emplear, así como las mangueras del depósito. Para las mangueras se estimó que cada microbomba empleaba un largo equivalente a la longitud del depósito y que las conexiones con las 5 boquillas empleaban las distancias entre sus agujeros, obteniéndose 1.3 m de manguera aproximadamente. Para las conexiones eléctricas se estimaron las longitudes de cada conexión partiendo de los datos que presentan el esquema de conexiones eléctricas del Anexo 2 y los planos de ensamble del Anexo 6. Con ello, se obtuvo la Tabla A12.3, de donde se concluye que se usarán, aproximadamente, 3.3 metros de cable calibre 14 AWG y 21.35 metros de cable calibre 16 AWG. Por último, se aproximaron las medidas al entero superior, obteniendo un precio total en este aspecto de 7.04 dólares, donde los montos detallados se pueden apreciar en la Tabla A12.4.

En el aspecto de materiales, se consideran los costos por peso del plástico y la fibra de carbono a utilizar; mientras que, para el aluminio y el acero galvanizado se tomaron en cuenta los precios de las barras, planchas y tubos comerciales requeridos para la fabricación de las partes. De ese modo, el precio del plástico empleado es de 39.42 dólares; para la fibra de carbono es de 21.72 dólares; para las piezas de aluminio es de 293.71 dólares y para el acero galvanizado es de 70.16 dólares. El proceso para la obtención de estos montos se puede apreciar en las Tablas A12.5, A12.6 y A12.7, en donde se presenta el costo por importación de las piezas de aluminio.

En el aspecto de diseño, se consideran los costos del diseño de las piezas, el desarrollo de los algoritmos y la elaboración de diagramas y conexiones pertinentes. Para ello, se estimaron 3 cosas: el precio en dólares por hora del trabajo realizado, aproximado en 10 dólares por hora; la cantidad de horas semanales dedicadas a cada uno de los dominios del diseño, las cuales serían alrededor de 25 horas a la semana; y la cantidad de semanas dedicadas por cada dominio. De esa manera, para el dominio eléctrico se dedicaron 2 semanas en la búsqueda y selección de componentes; para el diseño mecánico se utilizaron 3 semanas para el modelado en 3D y el diseño de las piezas y sus planos; y para el diseño de software, se empleó 1 semana para la codificación del Arduino NANO y del algoritmo de control. Luego, al multiplicar el costo por hora por el número de horas semanales trabajadas por la cantidad de semanas dedicadas, se obtiene el costo del diseño por dominios.

Por último, en el aspecto de fabricación, se está considerando que el costo será igual al precio del material, sin considerar importación, multiplicado por un factor dependiendo del tipo de proceso utilizado, los cuales se pueden apreciar en la Tabla A12.8. De ese modo, se considera que para la fabricación de piezas de plástico y fibra de carbono el factor será 5 porque algunas de las piezas requieren moldes de inyección, lo que elevará su costo de fabricación. Por otra parte, para la fabricación de piezas de aluminio y acero galvanizado se está considerando un factor de 3 porque, si bien las operaciones de corte, laminado y conformado de chapa no son muy costosas, las operaciones de torneado y taladrado incrementarán el precio al final.

De esa manera, en la Tabla 5.2 a continuación, se presenta un resumen de los costos estimados, obteniéndose que el precio de fabricación del dron es de 5348.78 dólares,

superando el deseo presentado en la Tabla A1.1 de no superar los 5000 dólares en costos totales de desarrollo de un prototipo.

Tabla 5.2 *Resumen de costos*

Aspecto		Costo (\$)
Componentes eléctricos		2051.77
Componentes mecánicos		669.32
Cables y conexiones		7.04
Material	Plástico	39.42
	Fibra	21.72
	Aluminio	293.71
	Acero	70.16
Diseño	Eléctrico	500.00
	Mecánico	750.00
	Software	250.00
Fabricación	F. Plástico	197.10
	F. Fibra	108.62
	F. Aluminio	179.43
	F. Acero	210.48
Total		5348.78

Nota. Elaboración propia.

5.4 Validación de la lista de exigencias

Finalmente, en la Tabla 5.3 se presenta una lista de evidencias que verifican el cumplimiento de los deseos y exigencias presentados al inicio del trabajo en la Tabla A1.1. De esa lista de validación se puede afirmar que se cumplieron con todos los requerimientos planteados como exigencias para el presente trabajo. Por otra parte, en cuanto a los requerimientos planteados como deseos, se observa que no se cumplieron todos. En resumen, se cumplió con el 100% de las exigencias y con el 44.44% de los deseos.

Tabla 5.3 *Verificación de la lista de exigencias*

Exigencias	Evidencia
Dimensiones del robot < 2 m x 2 m x 1 m	El plano de ensamble indica que se cumplen las dimensiones
Altura de vuelo > 110 m	La simulación comprueba que se alcanza la altura
Velocidad de vuelo en zonas urbanas < 40 km/h	La simulación indica que la velocidad máxima es 38.84 km/h
Capacidad de carga: Hasta 3 kg	Los motores MN605-S son capaces de cargar con peso extra
El dron transporta productos desde la farmacia hasta el domicilio del cliente	Se describe la funcionalidad en el concepto del producto

Recibe instrucciones del mando de control	Se seleccionó el receptor RX4R para el dron
Envía su posición, altura e imágenes del entorno	El receptor RX4R cuenta con telemetría y el transmisor Tx06-Split transmite el video
Debe mantenerse equilibrado, despegar y aterrizar de forma simplificada	La simulación indica que el máximo sobreimpulso en el Pitch es de 1.5% y la máxima inclinación en el Roll es de 1.977°
Verificar que llegó al destino	El algoritmo del depósito presenta el uso de una variable destino
El dron será teleoperado desde la farmacia	Se describe la funcionalidad en el concepto del producto
Algoritmo para el control de la orientación	Se presenta un lazo de control PID para la orientación
El dron debe conectarse a instrumentos de calibración para validar las demás exigencias	Se describe la funcionalidad en el concepto del producto
El operador colocará manualmente los productos en el depósito	Se describe la funcionalidad en el concepto del producto
Deseo	
Dimensiones del depósito de desinfección < 30 cm x 30 cm x 10 cm	El plano de ensamble indica que la canasta sobrepasa las dimensiones, pero el espacio destinado para los productos cumple con lo solicitado
Tiempo de vuelo < 30 minutos	La selección de la batería se estimó con un tiempo de vuelo entre 20 y 30 minutos
Hardware redundante	No cumplido
Peso del dron < 10 kg	No cumplido
Modelo de cuadricóptero	El modelo del dron es el de un cuadricóptero
Ruido producido entre 80 y 90 dBA	No comprobable
Distancia de trabajo < 5 km	El rango del receptor RX4R es de más de 2 km
Debe emplear piezas comerciales que puedan encontrarse en el mercado nacional	No todas las partes se encuentran en el mercado nacional
Precio del desarrollo del prototipo < 5000 dólares	El precio estimado es de 5586.88 dólares

Nota. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con respecto al trabajo elaborado, se concluye que, tanto a nivel de concepto de solución como de proyecto preliminar, el prototipo de dron teleoperado para el *delivery* de productos farmacéuticos en entornos infecciosos es viable. Partiendo de lo abarcado en el Capítulo 1, se entiende que la problemática que supone la inmovilidad y el aislamiento dentro de un ambiente infeccioso, observado en un contexto de pandemia, requiere de una solución que emplee los avances tecnológicos que ofrece la robótica y las telecomunicaciones. Si a ello se le suma la situación peruana, donde el acceso a los servicios de salud, incluyendo los medicamentos y productos que se obtienen en boticas y farmacias, no es igual para todos los estratos socioeconómicos y geográficos; se hace evidente que un robot que logre desempeñar el servicio de *delivery* es una solución que aborda varias problemáticas a la vez.

Se concluye también que la metodología empleada y los diseños realizados a lo largo de este trabajo colaboraron íntegramente. Esto permitió el logro de los objetivos que abarcaban el diseño conceptual del dron como el establecer sus parámetros y características o formular el concepto de un mando. También se lograron los objetivos del diseño preliminar donde se resalta el diseño de los sistemas eléctricos y mecánicos del dron y del depósito, evidenciado en la coherencia entre los cálculos preliminares con los resultados de la simulación de las piezas mecánicas sometidas a los mayores esfuerzos, así como también en los resultados de la simulación del funcionamiento integrado del código de Arduino NANO con los componentes eléctricos seleccionados para el depósito. Además, el objetivo de simular el algoritmo de control de orientación se logra de forma integral al contemplar la ecuación de diferencias del controlador y los resultados de la simulación del modelo aerodinámico del dron con el controlador adaptado para funcionar con y sin carga máxima.

Abordando también el Capítulo 3, cabe resaltar la importancia de diseñar el dron con respecto a adaptar un producto ya existente; pues de ello se concluye que el diseño de un dron resulta en una opción más económica debido a que los precios de los drones disponibles en el mercado que cumplen con las exigencias requeridas, superan con creces el límite planteado en la lista de exigencias de la Tabla A1.1. Si bien el precio estimado por el desarrollo del prototipo es de 5348.78 dólares y supera el límite deseado, debe recordarse que al tratarse de un prototipo y de una estimación de costos de fabricación particular, el precio tenderá a reducirse al momento de pasar al siguiente nivel de madurez tecnológica y desarrollarse como un producto de fabricación en serie, además de seguir siendo menos costoso que la adquisición de un dron de dimensiones y aplicaciones similares.

Por último, se concluye que el trabajo, además de lograr con sus objetivos, cumplió con los requerimientos de producto planteados en la Tabla A1.1. La evidencia de ello se encuentra en la validación de la misma lista, presentada al finalizar el trabajo. Como se mencionó en su respectiva sección, los requerimientos que fueron categorizados como exigencias fueron cumplidos al 100% a lo largo del trabajo, gracias al diseño realizado como a la metodología empleada.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

En primer lugar, a lo largo de la investigación se observó que para el diseño de un controlador de vuelo de drones se requiere simplificar varios de los aspectos que influyen en el modelo de vuelo del dron. Del mismo modo, para este proyecto, se realizó una simplificación del efecto del incremento de masa en el comportamiento del control, ya que no se consideró el efecto de la masa en la inercia del cuerpo, ni en su centro de masa. Por ello, se recomienda evaluar la posibilidad de implementar en el algoritmo el diseño de una función que permita relacionar el cambio de masa con la inercia del cuerpo y con la posición de su centro de masa.

En segundo lugar, como se mencionó anteriormente, los datos modelados como la constante del motor y los coeficientes de empuje y arrastre; así como el nivel de ruido que generan los motores, son resultados que se obtienen en un laboratorio. Por eso se recomienda que, si se diera el caso de una futura investigación para la mejora del sistema de control, sería ideal adquirir los motores y realizar las pruebas de forma física en un ambiente controlado.

Por último, como se abordó anteriormente en la validación, la característica de hardware redundante expuesta como un deseo en la lista de exigencia no se logró cumplir. Ello debido al tipo de modelo escogido para el dron, el cual es un cuadricóptero. Por lo tanto, se recomendaría contemplar la posibilidad de adaptar el modelo a un octocóptero o un hexacóptero, o en su defecto, emplear motores tándem que permitan incorporar dicha característica al modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrar, M. M., Islam, R. y Shanto, A. H. (2020). An Autonomous *Delivery* Robot to Prevent the Spread of Coronavirus in Product *Delivery* System. *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, (11), 0461-0466. <https://doi.org/10.1109/UEMCON51285.2020.9298108>
- A Current Affair. (9 de enero de 2019). *Drone Delivery Debacle | A Current Affair Australia* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8v5hCxBZTh0>
- Amazon. (s.f.). *Amazon Prime Air*. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>
- Arduino. (s.f.). *Arduino Uno Rev3*. Arduino Official Store. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/?selectedStore=us>
- Arduino. (s.f.). *Arduino Nano*. Arduino Official Store. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=us>
- Arroyo, J. (11 de marzo de 2020). *Coronavirus: la OMS declara la pandemia a nivel mundial por Covid-19*. RedacciónMédica. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://www.redaccionmedica.com/secciones/sanidad-hoy/coronavirus-pandemia-brote-de-covid-19-nivel-mundial-segun-oms-1895>
- Aviation International News. (14 de abril de 2020). *Wing Drone Delivery Service Helping Deliver Critical Supplies During Covid-19 Crisis - FutureFlight* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=huJQkr8CGsw>
- Azorín, J. (2003). *Control bilateral por convergencia de estados de sistemas teleoperados con retardos en la transmisión* [Tesis de doctorado, Universidad Miguel Hernández]. <http://dspace.umh.es/handle/11000/1670>
- BBC News Brasil. (27 de julio de 2020). Covid-19: 3 países que fueron ejemplo de lucha contra el coronavirus y ahora ven una "segunda ola" de contagios. *BBC*. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53541458>
- BBC News Mundo. (30 de marzo de 2020). Coronavirus | Cómo hace frente al covid-19 cada país de América Latina. *BBC*. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-51881075>
- BGSU Dining. (s.f.). *Starship at BGSU and Bowling Green*. Recuperado el 07 de abril de 2021 de <https://new.bgsudining.com/starship-bgsu>

- Boeing. (3 de octubre de 2019). *Forward Flight*. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://www.boeing.com/features/2019/10/cav-flight-testing-10-19.page>
- Boeing. (2 de mayo de 2019). *Watch: Cargo Air Vehicle Completes First Outdoor Flight*. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://www.boeing.com/features/2019/05/cav-first-flight-05-19.page>
- Boquillas de aspersión. (2021). *BB09 – Cono lleno – ¼’’ BSPT (GAS) – 120° - 6 lit/min @3bar (Acero inoxidable)*. Recuperado el 07 de octubre de 2021 de <https://boquillasdeaspersion.es/comprar/cono-lleno-difusores-agua-picos-lavado-duchas/>
- Chávez-Arroyo, R. y Rodríguez, W. (2018). *Diseño e implementación de un dron hexacóptero con software de geolocalización para señalar puntos de siembra en el fundo de palma aceitera Witpalm* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional – Universidad Ricardo Palma.
- Consejo General de Colegios Farmacéuticos. (2020). *Ozono y COVID-19* [Archivo PDF]. <https://www.portalfarma.com/Profesionales/campanaspf/Asesoramiento-salud-publica/infeccion-coronavirus-2019-nCoV/Documents/ozono-covid-19.pdf>
- Costa, J. (s.f.). *Uso adecuado de lámparas Germicidas* [Archivo PDF]. <https://oftalmologos.org.ar/files/institucional/covid/uso-adecuado-de-lamparas-germicidas.pdf>
- Costas, J. (31 de marzo de 2014). *La fibra de carbono será pronto una alternativa razonable al aluminio y el acero*. MotorPasion. Recuperado el 19 de setiembre de 2021 de <https://www.motorpasion.com/tecnologia/la-fibra-de-carbono-sera-pronto-una-alternativa-razonable-al-aluminio-y-el-acero>
- Crisante, M. (2013). *Mercado farmacéutico y acceso a medicamentos en el Perú* [Archivo PDF]. https://www1.paho.org/per/images/stories/FtPage/2013/Mercado_farmacutico-o-acceso_medicamentos-Peru.pdf
- Darnel. (s.f.). *Frascos plásticos transparentes* [Archivo PDF]. <https://darnel-website-pro.s3.amazonaws.com/ft/frascos-plasticos-transparentes-ficha-tecnica.pdf>
- Decreto Supremo 058-2021-PCM de 2021 [Presidente de la República]. Que prorroga el Estado de Emergencia Nacional declarado por Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por los Decretos Supremos N° 201-2020-PCM, N° 008-2021-PCM y N° 036-2021-PCM, y modifica el Decreto Supremo N° 184-2020-PCM. 29 de marzo de 2021. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-prorroga-el-estado-de-emergencia-naciona-decreto-supremo-n-058-2021-pcm-1938954-2/>

- Durán, A. (2012). *Modelado, Control y Percepción en Sistemas Aéreos Autónomos* [Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla]. Biblioteca de Ingeniería - Universidad de Sevilla.
- Dynatec. (24 de enero de 2021). *Los drones aportan nuevas soluciones a la industria 4.0*. Recuperado el 26 de junio de 2021 de <https://dynatec.es/2021/01/24/los-drones-aportan-nuevas-soluciones-a-la-industria-4-0/>
- Eachine. (s.f.). *Eachine Caddx Ant Lite 1200TVL 3.7-18V FPV Camera for AE65 Whoop FPV Racing Drone Spare Part*. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.eachine.com/Eachine-Caddx-Ant-Lite-1200TVL-3-7-18V-FPV-Camera-for-AE65-Whoop-FPV-Racing-Drone-Spare-Part-p-2106.html>
- Eachine. (s.f.). *Eachine TX06 Split FPV Camera Transmitter Micro 700TVL 5.8Ghz 40CH 25mW 1.8g AIO VTX-CAM for RC Drone Tiny Whoop Mobula7 - NTSC 120 degree lens*. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.eachine.com/Eachine-TX06-Split-FPV-Camera-Transmitter-Micro-700TVL-5-8Ghz-40CH-25mW-1-8g-AIO-VTX-CAM-for-RC-Drone-Tiny-Whoop-Mobula7-NTSC-120-degree-lens-p-2085.html>
- Eachine. (s.f.). *Eachine TX801 VTX + JJA 1200TVL Mini CAM 5.8G 72CH 0.01mW-600mW Switched FPV Mini Transmitter Camera Combo for RC Drone Aircraft - Red PAL*. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.eachine.com/Eachine-TX801-VTX+-JJA-1200TVL-Mini-CAM-5-8G-72CH-0-01mW-600mW-Switched-FPV-Mini-Transmitter-Camera-Combo-for-RC-Drone-Aircraft-Red-PAL-p-1864.html>
- Federal Aviation Administration. (2020). Proposed Rules. *Federal Register*, 85(225), 74271-74273. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-11-20/pdf/2020-25663.pdf>
- Federal Aviation Administration. (2020). Proposed Rules. *Federal Register*, 85(225), 74285-74289. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-11-20/pdf/2020-25666.pdf>
- Federal Aviation Administration. (2020). Proposed Rules. *Federal Register*, 85(226), 74622-74624. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-11-23/pdf/2020-25659.pdf>
- FedEx. (2021). *Servicios y Tarifas* [Archivo PDF]. <https://www.fedex.com/content/dam/fedex/international/rates/fedex-rates-all-es-pe-2021.pdf>
- Fernandez, E. (20 de enero de 2006). *Guia telescópica*. 3DContentCentral. Recuperado el 3 de octubre de 2021 de <https://www.3dcontentcentral.es/Download-Model.aspx?catalogid=171&id=13588>
- Fernández, M. (15 de febrero de 2021). Coronavirus: ingenieros peruanos crean robots que desinfectan y hacen *delivery*. *Andina*. <https://andina.pe/Agencia/noticia->

[coronavirus-ingenieros-peruanos-crean-robots-desinfectan-y-hacen-delivery-833757.aspx](https://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10525/TesisDron.pdf?sequence=1)

Fernández, H., Torres, I. y Ramírez, U. (2016). *Diseño, construcción y control de una aeronave tipo dron* [Tesis de titulación, Universidad Nacional Autónoma de México].

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10525/TesisDron.pdf?sequence=1>

Fly Sky. (s.f.). *FS-IA10B*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.flysky-cn.com/ia10b-canshu>

Flytrex. (s.f.). *FAQ*. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://www.flytrex.com/support/faq/>

Flytrex. (s.f.). *Our drones*. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://www.flytrex.com/#project-detail>

FrSky. (s.f.). *RX4R*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.frsky-rc.com/product/rx4r/>

FrSky. (s.f.). *RX6R*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.frsky-rc.com/product/rx6r/>

Font, E. (2001). Antisépticos y desinfectantes. *OOFARM*, 20(2), 55-64. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-pdf-13780>

Gamarra, K. (17 de abril de 2020). *Rappi comienza sus primeras entregas con robots*. EcommerceNews. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://www.ecommercenews.pe/lanzamientos-ecommerce/2020/rappi-entregas-con-robots.html>

Huguet, G. (14 de mayo de 2020). *Grandes pandemias de la humanidad*. Historia National Geographic. Recuperado el 08 de abril de 2021 de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/grandes-pandemias-historia_15178

Infineon. (s.f.). *DPS310*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/pressure-sensors/pressure-sensors-for-iot/dps310/>

Ley N° 29459 de 2009. Ley de los productos farmacéuticos, dispositivos médicos y productos sanitarios. 27 de noviembre de 2009. D. O. No. 10806. Recuperado el 14 de abril de 2021 de http://www.gacetajuridica.com.pe/servicios/normaspdf_2009/Noviembre/26-11-2009.pdf

Luong Dinh Phuc. (10 de junio de 2017). *Arduino NANO*. GrabCAD Community. Recuperado el 1 de octubre de 2021 de <https://grabcad.com/library/arduino-nano-4>

- MatekSys. (s.f.). *Flight Controller F405-STD*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=f405-std#tab-id-2>
- MatekSys. (s.f.). *Flight Controller F722-STD*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=f722-std#tab-id-2>
- MatekSys. (s.f.). *GPS & Compass Module M8Q-5883*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=m8q-5883>
- MatekSys. (s.f.). *GPS Module SAM-M8Q*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=sam-m8q>
- MatekSys. (s.f.). *GNSS & Compass M9N-5883*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=m9n-5883#tab-id-2>
- MatekSys. (s.f.). *PDB-HEX 12S*. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=pdb-hex>
- MatekSys. (s.f.). *XCLASS PDB FCHUB-12S*. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <http://www.mateksys.com/?portfolio=fchub-12s#tab-id-2>
- Mendivelso, R. y Leon, H. (2020). *Diseño del sistema de comunicación entre un dron y una estación terrena para entrega de mercancía* [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional - Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ministerio de Salud del Perú. (2005). Evaluación de los potenciales efectos sobre acceso a medicamentos del tratado de libre comercio que se negocia con los Estados Unidos de América. http://www.redge.org.pe/sites/default/files/MINSA-TLC-salud-Peru_0.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (1 de mayo de 2020). *MTC: operaciones con drones deben cumplir con la normativa vigente en resguardo de la ciudadanía*. Gob.pe. Recuperado el 25 de abril de 2021 de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/143580-mtc-operaciones-con-drones-deben-cumplir-con-la-normativa-vigente-en-resguardo-de-la-ciudadania>
- MIT Electric Vehicle Team. (2008). *A Guide to Understanding Battery Specifications* [Archivo PDF]. http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- MT Lab. (s.f.). *MiniBomba Sumergible DC 3-5 V 70-120L/H*. Recuperado el 10 de setiembre de 2021 de <https://mtlab.pe/store/minibomba-sumergible-dc-3-5-v-70-120l-h/>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Bomba de agua sumergible 12VDC 3M 240L/H*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://naylampmechatronics.com/bombas-de-agua/260-bomba-de-agua-sumergible-12vdc-3m-240lh.html>

- Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Módulo Relay 2CH 5VDC*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://naylampmechatronics.com/drivers/31-modulo-relay-2-canales-5vdc.html>
- Nieto, E. y Vaca, F. (2020). Desarrollo de un modelo matemático, cinemático y dinámico con la aplicación de software, para modificar el funcionamiento de un dron, para que este realice monitoreo automático. *Recimundo*, 4(1), 332-343. <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/814>
- Open Lab. (s.f.). *Filamento ABS Blanco 1.75mm 1Kg Marca Colido*. Recuperado el 19 de setiembre de 2021 de <https://openlab.com.pe/product/filamento-abs-blanco-1-75mm-1kg-marca-colido/>
- Organización Mundial de la Propiedad Intelectual et al. (24 de julio de 2019). *Índice Mundial de Innovación 2019: La India experimenta un importante avance, mientras que Suiza, Suecia, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y el Reino Unido lideran la clasificación; el proteccionismo comercial constituye un riesgo para el futuro de la innovación*. OMPI. Recuperado el 28 de abril de 2021 de https://www.wipo.int/pressroom/es/articles/2019/article_0008.html
- Paiva, E. (2016). *Modelado y Control de un Cuadricóptero* [Tesis de Maestría, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional – Universidad de Piura.
- Perú Retail. (23 de diciembre de 2019). *Perú: Hogares aumentan su consumo en farmacias gracias al cuidado personal*. Recuperado el 14 de abril de 2021 de <https://www.peru-retail.com/peru-hogares-consumo-farmacias-cuidado-personal/>
- Preevid. (25 de marzo de 2020). *Alcohol para la desinfección de material médico contaminado con SARS-CoV-2*. Biblioteca virtual murciasalud. Recuperado el 25 de abril de 2021 de <https://www.murciasalud.es/preevid/23541#>
- Prusa Polymers. (2018). *Hoja de datos técnicos: Prusament PLA de Prusa Polymers* [Archivo PDF]. https://prusament.com/media/2020/01/PLA_TechSheet_SPA.pdf
- Ramírez, A. y Domínguez, E. A. (2011). El ruido vehicular urbano: problemática agobiante de los países en vías de desarrollo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(137), 509-530. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000400009
- Reagan, J. (2020). *Amazon Delivery Drones: FAA OK's Prime Air Fleet*. Dronelife. Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://dronelife.com/2020/08/31/faa-oks-amazon-prime-delivery-drone-fleet/>

- Real Engineering. (25 de enero de 2019). *How Rwanda Built a Drone Delivery Service* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=jEbRVNxL44c>
- Redacción EC. (1 de abril de 2021). Cuarentena de Semana Santa: ¿Cuál es el horario de funcionamiento de los *deliverys* de farmacias y restaurantes?. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/respuestas/cuarentena-de-semana-santa-a-que-hora-funcionaran-los-deliverys-de-farmacias-y-restaurantes-semana-santa-cuarentena-covid-19-deliverys-revtli-noticia/?ref=ecr>
- Redacción Gestión. (27 de enero de 2021). Cuarentena, cierres y *delivery*: estas son las medidas para enfrentar la segunda ola del Covid-19. *Gestión*. <https://gestion.pe/peru/francisco-sagasti-cuarentena-estas-son-las-nuevas-medidas-anunciadas-para-detener-el-avance-de-la-segunda-ola-del-covid-19-nndc-noticia/?ref=gesr>
- RPP Noticias. (23 de abril de 2020). *Se incrementa producción de alcohol en gel, pero demanda es enorme por crisis de la Covid-19*. Recuperado el 06 de abril de 2021 de <https://rpp.pe/peru/actualidad/se-incrementa-produccion-de-alcohol-en-gel-pero-demanda-es-enorme-por-tesis-de-la-covid-19-noticia-1260540?ref=rpp>
- Ruipérez, P. (2016). *Diseño y fabricación de un dron* [Tesis de bachiller, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73170/RUIP%C3%89REZ%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20fabricaci%C3%B3n%20de%20un%20dron%20mediante%20impresi%C3%B3n%203D.pdf?sequence=5>
- Sanyong Lamsal. (12 de mayo de 2019). *T Motors MN605-S KV320 Brushless Motor*. GrabCAD Community. Recuperado el 1 de octubre de 2021 de <https://grabcad.com/library/t-motors-mn605-s-kv320-brushless-motor-1>
- Sika. (2015). *Sika CarboDur S 512* [Archivo PDF]. <https://arg.sika.com/dms/getdocument.get/39892e11-d857-37de-92df-0f24f878821a/Sika%20Carbodur%20512.pdf>
- SoftwareLab. (s.f.). *¿Qué es LTE? Diferencia entre LTE y 4G*. Recuperado el 08 de abril de 2021 de <https://softwarelab.org/es/lte-4g/>
- Soluciones Alternativas Inteligentes. (s.f.). *Filamento PLA Negro*. SAISAC Mecatrónica. Recuperado el 19 de setiembre de 2021 de <https://saisac.pe/producto/filamento-pla-negro/>
- Starship Technologies. (30 de abril de 2018). *Starship Campus Delivery Service with Robots* [Archivo de Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=P_zRwq9c8LY
- Starship Technologies. (s.f.). *A new kind of business*. Starship. Recuperado el 07 de abril de 2021 de <https://www.starship.xyz/business/>

Stylesuxx. (28 de abril de 2019). *AIO FPV camera comparison: Cyclops V2 vs. TX06 vs. F7 3in1* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=nrK3tGIC33E>

T-Motor. (s.f.). *Flame 70A 12S*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/flame_0410/64.html

T-Motor. (s.f.). *MN605-S*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/navigato_0402/42.html

T-Motor. (s.f.). *MN701-S*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/navigato_0402/43.html

T-Motor. (s.f.). *MN705-S*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/navigato_0402/44.html

T-Motor. (s.f.). *P21x6.3"*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/Polish_0416/139.html

T-Motor. (s.f.). *P60 Pin*. T-Motor: The Safer Propulsion System. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de https://uav-en.tmotor.com/html/2018/p_0331/14.html

Tafur, J. (2015). *Metodología de diseño y análisis de sistemas teleoperados considerando dinámica no lineal* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/38247/>

Tattu Gensace. (s.f.). *Tattu 28000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo Battery Pack with AS150+XT150*. Gensace. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.gensace.de/tattu-28000mah-22-2v-25c-6s1p-lipo-battery-pack.html>

Tattu Gensace. (s.f.). *Tattu 30000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo Battery Pack with AS150+XT150*. Gensace. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.gensace.de/tattu-30000mah-22-2v-25c-6s1p-lipo-battery-pack-with-as150-xt150.html>

Tattu Gensace. (s.f.). *Tattu 40000mAh 22.8V 10C 6S1P High Voltage Lipo Battery Pack with AS150+XT150 Plug*. Gensace. Recuperado el 9 de setiembre de 2021 de <https://www.gensace.de/tattu-40000mah-22-8v-10c-6s1p-high-voltage-lipo-battery-pack-with-as150-xt150-plug.html>

Tecnología en Lámina Plástica. (2018). *Acrilo-Nitrilo Butadieno Estireno (ABS)* [Archivo PDF]. <https://gallery.mailchimp.com/b5a3a1facfe35859b83e7931a/files/540dfde3-86bd-400d-abbb->

[d6d5ba1580b5/Ficha t%C3%A9cnica de Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno ABS.pdf](https://www.tecnopura.com/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-3v-6v-compatible-proyectos-arduino/)

- Tecnopura. (s.f.). *Mini bomba de agua sumergible 3V-6V compatible proyectos Arduino*. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.tecnopura.com/producto/mini-bomba-de-agua-sumergible-3v-6v-compatible-proyectos-arduino/>
- Texas Instruments. (s.f.). *Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller Data Sheet* [Archivo PDF]. https://www.ti.com/lit/ds/spms376e/spms376e.pdf?ts=1631404711945&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- TME. (s.f.). *DS430-K*. TME: Electric Components. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.tme.eu/es/details/ds430-k/interruptores-estandar/miyama/>
- TME. (s.f.). *DS-435-S-K*. TME: Electric Components. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.tme.eu/es/details/ds-435-s-k/interruptores-estandar/miyama/>
- TME. (s.f.). *DS-664K-S-L-S-K-TG*. TME: Electric Components. Recuperado el 11 de setiembre de 2021 de <https://www.tme.eu/es/details/ds-664k-s-l-s-k-tg/interruptores-estandar/miyama/>
- Tower Pro. (s.f.). *SG51R*. Recuperado el 10 de setiembre de 2021 de <https://www.towerpro.com.tw/product/sg51r/>
- Tower Pro. (s.f.). *SG90*. Recuperado el 10 de setiembre de 2021 de <https://www.towerpro.com.tw/product/sg90-7/>
- Tower Pro. (s.f.). *SG92R*. Recuperado el 10 de setiembre de 2021 de <https://www.towerpro.com.tw/product/sg92r-7/>
- Universidad Internacional de Valencia. (01 de marzo de 2018). *Cómo hacer un drone casero de forma sencilla*. VIU. Recuperado el 27 de noviembre de 2021 de <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/como-hacer-un-drone-casero-de-forma-sencilla>
- X Development LLC. (s.f.). *Wing, Transforming the way goods are transported*. X. Recuperado el 07 de abril de 2021 de <https://x.company/projects/wing/>
- Wazzú. (s.f.). *Tarifas*. ComprasUSAPERU. Recuperado el 02 de noviembre de 2021 de <https://www.comprasusaperu.com/tarifas.html>
- Welch, A. y Hutchinson, E. B. (2016). A Cost Analysis of Amazon Prime Air (Drone Delivery). *Journal for Economic Educators*, 16(1), 1-12. <https://ideas.repec.org/a/mts/jrnlee/v16y2016i1p1-12.html>

Wing. (30 de noviembre de 2018). *How does drone delivery service work?* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=MSCNirIIosI>

Workhorse. (s.f.). *Workhorse... The leader in last-mile delivery technology.* Recuperado el 07 de abril de 2021 de <https://workhorse.com/horsefly.html>

Workhorse Group. (15 de mayo de 2018). *Workhorse Horsefly Autonomous Drone Package Delivery* [Archivo de Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=jvkqc2bFj8I>

Wright, H. B. y Cairns, W. L. (s.f.). *Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta* [Archivo PDF]. http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/agua/LUZ_ULTRAVIOLETA.pdf

