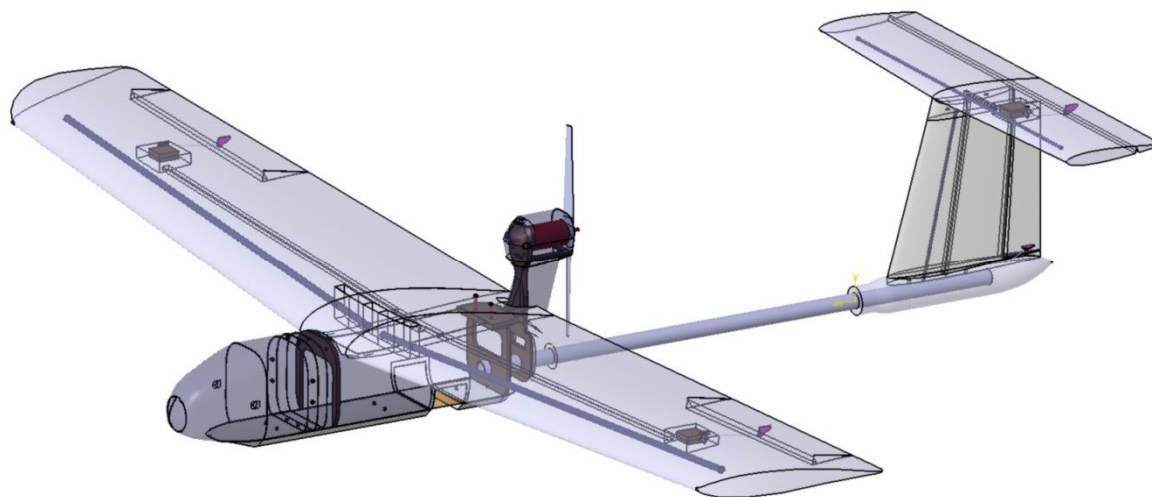


Escuela Superior de Ingenieros

Universidad de Sevilla

DISEÑO DE UN UAV LIGERO DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA PARA MONITORIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL



Noviembre_2010

Autor: Manuel García Rivero

Tutor: Aníbal Ollero Baturone

Agradecimientos

Hay muchas personas a las que debo agradecer por su apoyo en este proyecto y a lo largo de toda la carrera. En primer lugar, agradecer al tutor de este proyecto Don Aníbal Ollero Barutone por la oportunidad ofrecida de realizar este proyecto y al centro de tecnología CATEC en el que se ha desarrollado el proyecto. Me gustaría también reconocer el apoyo prestado por el personal de este centro, desde el coordinador del departamento de aviónica, Don Antidio Viguria, hasta los compañeros de proyectos.

Finalmente quiero agradecer el apoyo y la ayuda de mi familia, mis compañeros de la escuela y mis amigos. Muchas gracias.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.2	UAVs	16
1.2.1	UAVs de características similares al de diseño.....	19
1.3	Organización de la memoria	21
2	DISEÑO CONCEPTUAL.....	23
2.1	Bocetos sobre las primeras ideas	23
2.2	Diseño de los componentes del UAV.....	25
2.2.1	Fuselaje	25
2.2.2	Ala	28
2.2.3	Cola	28
2.2.4	Tubo de cola	29
2.2.5	Motor (pusher/puller).....	30
2.3	Planos del UAV	32
3	AERODINÁMICA	35
3.1	Selección del perfil aerodinámico	35
3.1.1	Ala	36
3.1.2	Cola	42
3.2	Geometría de las superficies aerodinámicas	44
3.2.1	Ala	44
3.2.2	Estabilizador horizontal.....	51
3.2.3	Estabilizador vertical	52
3.3	Aerodinámica del avión	54
3.3.1	Coeficiente de resistencia parásita (component buildup method)	54
3.3.2	Polar del avión	61
3.3.3	Eficiencia del avión.....	64
3.4	Superficies aerodinámicas	66
3.4.1	Ala	66
3.4.2	Estabilizador horizontal.....	68

3.4.3	Estabilizador vertical	70
3.5	Superficies hipersustentadoras: flaperones.....	71
4	ESTRUCTURA Y TÉCNICAS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE.....	73
4.1	Estructura.....	73
4.1.1	Fuselaje	74
4.1.2	Ala	75
4.1.3	Cola	76
4.1.4	Protección inferior	77
4.1.5	Tubo de cola	77
4.2	Componentes y pesos.....	77
4.3	Posición del centro de gravedad	82
4.4	Técnicas de fabricación y montaje	83
4.4.1	Fuselaje	83
4.4.2	Ala	86
4.4.3	Cola	91
4.4.4	Protección inferior	91
4.4.5	Tubo de cola	92
4.5	Cálculos estructurales.....	92
4.5.1	Estudio del factor de carga.....	92
4.5.2	Diagrama de la envolvente.....	93
4.5.3	Tensiones en elementos estructurales	95
5	ESTABILIDAD Y CONTROL	99
5.1	Criterio de signos.....	99
5.2	Estabilidad estática longitudinal.....	100
5.2.1	Modelo de fuerzas y momentos	101
5.2.2	Punto neutro de la aeronave.....	104
5.2.3	Margen estático.....	105
5.2.4	Posición del ala y del estabilizador horizontal.....	105
5.2.5	Dimensionado del timón de profundidad	108
5.2.6	Derivadas de estabilidad y de control.....	108
5.2.7	Trimado	109
5.3	Estabilidad estática lateral - direccional	111
5.3.1	Modelo de fuerzas y momentos	111

5.3.2	Dimensionado del timón de dirección	112
5.3.3	Derivadas de estabilidad y de control (modelo del Tornado)	113
5.3.4	Criterios de estabilidad lateral – direccional	114
5.3.5	Trimado con viento cruzado	114
5.3.6	Trimado en viraje	116
5.4	Modelo de Tornado	116
6	ACTUACIONES Y PROPULSIÓN	119
6.1	Diagrama T/W – W/S	120
6.2	Combinación motor + hélice	124
6.2.1	Motor	124
6.2.2	Hélice	126
6.3	Baterías	127
6.4	Circuito eléctrico y propulsivo	130
6.4.1	Esquema	130
6.4.2	Modelado	131
6.5	Curvas de actuaciones	133
6.5.1	Potencia	134
6.5.2	Empuje	136
6.5.3	Tiempo de descarga	137
6.6	Actuaciones de los segmentos	138
6.6.1	Despegue	138
6.6.2	Subida	138
6.6.3	Vuelo recto y nivelado	141
6.6.4	Descenso	148
6.6.5	Aterrizaje	149
6.7	Consumo de la batería	149
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	151
8	REFERENCIAS	153

Índice de tablas

Tabla 1: Categorización de UAVs según JUAS.....	17
Tabla 2: Datos de UAVs de características similares al de diseño	20
Tabla 3: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del fuselaje	56
Tabla 4: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del tubo de cola y base de la cola..	57
Tabla 5: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del pylon.....	57
Tabla 6: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del ala.....	58
Tabla 7: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del estabilizador vertical	59
Tabla 8: Estimación del coeficiente de resistencia parásita del estabilizador horizontal.....	60
Tabla 9: Estimación del coeficiente de resistencia parásita en los dos cruceros	61
Tabla 10: Valores del coeficiente de resistencia parásita en los distintos tramos de la misión..	62
Tabla 11: Coeficiente de sustentación óptimo y eficiencia aerodinámica máxima en los distintos tramos.....	65
Tabla 12: Materiales empleados en la fabricación del UAV.....	78
Tabla 13: Pesos de los componentes del fuselaje	78
Tabla 14: Pesos de los componentes de la cola	79
Tabla 15: Pesos de los componentes de la protección inferior.....	79
Tabla 16: Pesos de los componentes de la cola	79
Tabla 17: Pesos del motor y de la hélice	80
Tabla 18: Pesos de las baterías	80
Tabla 19: Pesos de los equipos de aviónica.....	81
Tabla 20: Derivadas de estabilidad respecto a la deflexión del timón de profundidad	108
Tabla 21: coeficientes de sustentación y de momento a ángulo de ataque nulo	109
Tabla 22: Derivadas de estabilidad longitudinales	109
Tabla 23: Derivadas de estabilidad lateral-direccionales en el tramo de crucero.....	113
Tabla 24: Derivadas de estabilidad lateral-direccionales en el tramo de crucero de vigilancia	114
Tabla 25: Trimado de la aeronave en presencia de viento cruzado $\beta=20^\circ$	115
Tabla 26: Características geométricas de la hélice elegida.....	126
Tabla 27: Mach en la punta de la hélice.....	127
Tabla 28: Especificaciones de las baterías LiPo	127
Tabla 29: Características del pack de batería elegido para la propulsión.....	129
Tabla 30: Consumo de mAh en los distintos tramos	150

Índice de figuras

Figura 1: Clasificación de los UAVs atendiendo a su tamaño y envergadura.....	17
Figura 2: Mosquito	18
Figura 3: Wasp Block II	18
Figura 4: RQ11 Raven.....	18
Figura 5: Puma.....	18
Figura 6: FQM 151 Pointer	18
Figura 7: Pioneer.....	18
Figura 8: Hunter	19
Figura 9: Predator	19
Figura 10: Skylark.....	20
Figura 11: Bayraktar	20
Figura 12: Remoeye 006.....	21
Figura 13: Boceto de la configuración pusher	23
Figura 14: Boceto de la configuración puller.....	24
Figura 15: Vista 1 del diseño en CATIA del UAV	24
Figura 16: Vista 2 del diseño en CATIA del UAV	25
Figura 17: Detalle del fuselaje y de su protección inferior.....	26
Figura 18: Asiento del ala que sirve como registro.....	26
Figura 19: Tomas de refrigeración del fuselaje	27
Figura 20: Tomas de refrigeración de la “góndola” del motor	27
Figura 21: Diseño en CATIA del ala del UAV.....	28
Figura 22: Diseño en CATIA de la cola en T del UAV	29
Figura 23: Tubo de cola (en inglés tail boom) que conecta la cola al fuselaje	30
Figura 24: Esquema de configuración “puller” o “pusher”	30
Figura 25: Vista en planta (medidas en mm).....	32
Figura 26: Vista de perfil (medidas en mm)	33
Figura 27: Perfil NACA 2411	36
Figura 28: Curvas obtenidas del DesignFoil para el perfil NACA 2411.....	37
Figura 29: Perfil NACA 4415	38
Figura 30: Curvas obtenidas del DesignFoil para el perfil NACA 4415.....	38
Figura 31: Perfil SD 7032	39

Figura 32: Curvas obtenidas del DesignFoil para el perfil SD 7032.....	40
Figura 33: Perfil SD 7062	41
Figura 34: Curvas obtenidas del DesignFoil para el perfil SD 7032.....	41
Figura 35: Perfil NACA 0012	43
Figura 36: Curvas obtenidas del DesignFoil para el perfil NACA 0012.....	43
Figura 37: Forma en planta del ala	44
Figura 38: Reducción de la pendiente de la curva de sustentación del perfil al ala.....	46
Figura 39: Distribución de sustentación dependiendo del estrechamiento	47
Figura 40: Tendencia del coeficiente de Oswald en función del estrechamiento.....	48
Figura 41: Esquema de la flecha de un ala	49
Figura 42: Diedro del ala del UAV	49
Figura 43: Forma en planta del ala	50
Figura 44: Forma en planta del estabilizador horizontal	52
Figura 45: Forma de perfil del estabilizador vertical	53
Figura 46: Polar parabólica en los distintos segmentos de la misión	62
Figura 47: Vista ampliada de la polar en la zona de mínima resistencia	63
Figura 48: Comparación de polares con o sin curvatura para el ala.....	64
Figura 49: Ecuaciones en vuelo uniforme horizontal y rectilíneo.....	64
Figura 50: Curva de la eficiencia aerodinámica en función del coeficiente de sustentación en los distintos tramos.....	65
Figura 51: Comparación de la polar del ala con la polar del perfil	66
Figura 52: Curva del coeficiente de momento en función del ala.....	67
Figura 53: Polar parabólica del estabilizador horizontal.....	69
Figura 54: Curva de sustentación del estabilizador horizontal.....	69
Figura 55: Polar parabólica del estabilizador vertical	70
Figura 56: Curva de sustentación del estabilizador vertical.....	71
Figura 57: Disposición de los flaperones en el ala	72
Figura 58: Estructura del fuselaje	74
Figura 59: Fijación del tubo de cola al fuselaje.....	75
Figura 60: Detalle del refuerzo del borde de salida y de la escuadra de la cuaderna del pylon .	75
Figura 61: Estructura interna del ala.....	76
Figura 62: Estructura interna de la cola	76
Figura 63: Piezas de la protección inferior que van atornilladas a la base del fuselaje.....	77

Figura 64: Tubo de cola de fibra de carbono	77
Figura 65: Distribución de la masa en el UAV.....	81
Figura 66: Distribución de los elementos en el interior del fuselaje	82
Figura 67: Localización del centro de gravedad (punto verde) y zona por donde se debe agarrar el UAV en el despegue	83
Figura 68: Detalle de la unión desmontable de las dos partes del fuselaje que se unen mediante tornillos	84
Figura 69: Detalle de la unión atornillada de las dos mitades del fuselaje	84
Figura 70: Detalle de la cuaderna que rigidiza el pylon	86
Figura 71: Detalle de los tetones en el borde de ataque del ala para conectarla a la cuaderna	87
Figura 72: Detalle de los tornillos que fijan el borde de salida del ala al fuselaje.....	87
Figura 73: Esquema de la máquina cortadora de espuma con hilo caliente.....	88
Figura 74: Instantánea de la simulación del corte del ala con la máquina cortadora	88
Figura 75: Detalle del tipo de articulación de los flaperones	90
Figura 76: Detalle del montaje del servo en el ala.....	91
Figura 77: Limitación del factor de carga en función de la velocidad.....	93
Figura 78: Diagrama de la envolvente de vuelo del UAV.....	95
Figura 79: Modelo estructural del tubo de cola	96
Figura 80: Distribución de sustentación a lo largo de la envergadura.....	97
Figura 81: Modelo de barra de la cuaderna del pylon.....	97
Figura 82: Modelo estructural de la cuaderna del pylon	98
Figura 83: Criterio de signos en ejes cuerpo	100
Figura 84: Definición del ángulo de ataque y de resbalamiento	100
Figura 85: Criterios de estabilidad	101
Figura 86: Fuerzas y momentos que actúan en el equilibrado longitudinal de una aeronave	102
Figura 87: Variación del punto neutro y del centro de gravedad con la posición longitudinal del ala.....	105
Figura 88: Posición del ala	106
Figura 89: Variación del punto neutro con la posición en altura del ala	106
Figura 90: Esquema para determinar la posición de la cola.....	107
Figura 91: Variación del punto neutro y del centro de gravedad con la posición de la cola	107
Figura 92: Timón de profundidad del estabilizador horizontal	108
Figura 93: Variación de la condición de trimado con la velocidad	110

Figura 94: Timón de dirección del estabilizador vertical.....	113
Figura 95: Variación de la condición de trimado en presencia de viento cruzado.....	115
Figura 96: Modelo de la geometría del programa Tornado.....	117
Figura 97: Mallado de las superficies aerodinámicas con el programa Tornado.....	118
Figura 98: Diagrama empuje – peso frente a carga alar.....	124
Figura 99: Especificaciones del motor eléctrico AXI 2826/10.....	125
Figura 100: Motor AXI 2826/10.....	125
Figura 101: Hélice.....	126
Figura 102: Curvas típicas de descarga de una batería LiPo.....	129
Figura 103: Pack 4S3P.....	130
Figura 104: Esquema eléctrico del motor y los servos.....	130
Figura 105: Rendimiento de la hélice vs. parámetro de avance en función del paso de la hélice.....	133
Figura 106: Curvas de potencia suministrada al motor.....	134
Figura 107: Curvas de potencia en el eje y pérdidas.....	135
Figura 108: Rendimiento de la hélice en función de la velocidad.....	135
Figura 109: Potencia que proporciona la hélice.....	136
Figura 110: Curvas de empuje en función de la velocidad.....	137
Figura 111: Curvas de tiempo de descarga en función de la velocidad.....	137
Figura 112: Empuje disponible frente a requerido en subida.....	139
Figura 113: ángulo de subida en función de la velocidad al 100% de palanca.....	140
Figura 114: Velocidad vertical de subida en función de la velocidad aerodinámica al 100% de palanca.....	140
Figura 115: Determinación de la palanca en crucero.....	142
Figura 116: Determinación de la palanca en el crucero de vigilancia.....	143
Figura 117: Determinación de la velocidad máxima del UAV.....	144
Figura 118: Determinación de la velocidad de máximo alcance (mínimo empuje).....	145
Figura 119: Determinación de la velocidad de máxima autonomía (mínima potencia).....	146
Figura 120: Velocidad de giro en función del factor de carga y de la velocidad aerodinámica.....	147