

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Disseny i implementació d'un dron captiu

MEMÒRIA

Autors: Oriol Sardà Martí i Guillem Hereu i Titó
Director: Sergio Busquets Monge
Convocatòria: Juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte de final de grau es centra en el disseny i implementació d'un hexacòpter capaç d'aixecar un pes mínim de 2 kg i poder realitzar vols de llarga durada en comparació als drons convencionals que hi ha al mercat. Prèviament, s'ha realitzat una recerca i un estudi del funcionament dels drons, juntament amb estudis de mercat per valorar els components que es necessitaven per a la implementació d'aquest.

Una part important del projecte és el circuit elèctric que s'ha realitzat per a que l'hexacòpter sigui capaç de realitzar vols de llarga durada, ja que és quelcom innovador perquè no es té constància de cap manual o guia per a poder implementar aquest sistema d'alimentació. Així doncs, es va haver d'estudiar i provar la manera per a que el dron fos alimentat sense tenir una bateria de poca capacitat acoblada a ell, mitjançant la qual s'alimenten els drons convencionals. El sistema d'alimentació per a vols de llarga durada consisteix en una bateria de cotxe situada al terra, un inversor de corrent, un cable trifilar per enllaçar aquest inversor amb dos convertidors AC-DC connectats en paral·lel i acoblats al dron, la sortida dels quals va connectada al dron.

S'ha implementat un sistema de seguretat per si s'arriba a donar el cas que el sistema d'alimentació esmentat anteriorment fallés. Aquest consisteix en un muntatge amb díodes de manera que si el sistema anterior deixa de funcionar, una bateria de poca capacitat acoblada al dron passa a ser el nou sistema d'alimentació.

També s'ha inclòs a la memòria un apartat de proves experimentals, que consta de l'explicació del motiu de cada prova, el muntatge, els materials que s'han utilitzat i les conclusions a que s'ha arribat. Aquestes proves s'han realitzat tant per determinar els components que s'utilitzaran per al prototip, com també per introduir diferents millores a aquest.

Sumari

RESUM	2
SUMARI	4
1. GLOSSARI	6
2. PREFACI	7
2.1. Origen del projecte.....	7
2.2. Motivació.....	7
2.3. Requeriments previs.....	7
3. INTRODUCCIÓ	8
3.1. Objectius del projecte	8
3.2. Abast del projecte	8
4. FONAMENTS DELS DRONS	9
4.1. Què és un dron?	9
4.2. Parts del dron i el seu funcionament.....	10
4.2.1. Motors.....	10
4.2.2. Variadors	11
4.2.3. Controladora.....	12
4.2.4. Estructura	12
4.2.5. Font d'alimentació	13
4.2.6. Receptor, emissora i GPS	15
4.3. Història dels drons	16
4.4. Legislació actual	18
4.5. Dron captiu.....	20
4.5.1. Introducció	20
4.5.2. Com funciona?	21
4.5.3. Anàlisi mercat de drons captius.....	22
4.5.4. Aplicacions	24
5. DISSENY I IMPLEMENTACIÓ DEL DRON CAPTIU	25
5.1. Motors	25
5.2. Variadors.....	27
5.3. Controladora	27
5.3.1. Configuració de la controladora.....	29
5.4. Cable.....	32
5.5. Estructura.....	34

5.6.	Font d'alimentació.....	38
5.7.	Receptor, emissora i GPS.....	42
5.8.	Sistemes de seguretat.....	44
5.8.1.	Bateria Supletòria.....	44
5.8.2.	Interruptor diferencial.....	45
6.	PROVES EXPERIMENTALS	47
6.1.	Característiques dels motors.....	50
6.2.	Temperatura dels motors.....	56
6.3.	Hèlices.....	61
6.4.	Cable.....	64
6.5.	Primer vol.....	70
6.6.	Validació de resultats.....	71
7.	IMPACTE AMBIENTAL	72
8.	PRESSUPOST	74
	CONCLUSIONS	77
	AGRAÏMENTS	78
	BIBLIOGRAFIA	79
	Referències bibliogràfiques.....	79
	Bibliografia complementària.....	80

1. Glossari

-UAV: Vehicle aeri no tripulat (VANT), UAV (de l'anglès *unmanned aerial vehicle*) o popularment anomenat dron, és una aeronau que vola sense tripulació. És un vehicle reutilitzable, capaç de mantenir de forma autònoma un nivell de vol controlat i sostingut, propulsat per un motor d'explosió, elèctric o de reacció.

-Dron: És el nom amb el que es coneix popularment el terme UAV.

-Multicòpter: També anomenat multirrotor, és un helicòpter amb més de dos rotors.

-Bateria LiPo: Bateria de polímer d'ions de liti. Tipus de bateria recarregable molt habitual en el món dels drons.

-Motor *brushless*: Motor elèctric sense escombretes, no fa servir escombretes per realitzar el canvi de polaritat en el rotor. Els drons estan equipats amb aquest tipus de motor.

-ESC: De l'anglès *Electronic Speed Controller*; controlador de velocitat electrònic, popularment conegut com a variador, està compost per un circuit amb varis components, és l'encarregat de variar la velocitat d'un motor elèctric junt al seu sentit de gir.

-PWM: La modulació per amplada de polsos (de l'anglès *pulse-width modulation*) d'un senyal o font d'energia és la tècnica amb la que es modifica el cicle de treball d'un senyal periòdic, ja sigui per transmetre informació o per controlar la quantitat d'energia que s'envia a una càrrega.

-Quadrocòpter: Multicòpter de quatre rotors.

-Hexacòpter: Multicòpter de sis rotors.

-Octocòpter: Multicòpter de vuit motors.

-GPS: Sistema de posicionament global (de l'anglès *Global Positioning System*), és un sistema que permet determinar en tota la Terra la posició d'un objecte amb una precisió de pocs centímetres.

-Gimbal: Un *gimbal* és una plataforma motoritzada controlada per una placa amb diferents sensors (normalment acceleròmetres). Generalment s'usen per estabilitzar càmeres per tal de realitzar bones fotografies o vídeos, però també es poden utilitzar per controlar altres components.

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

L'origen del projecte està principalment, en la realització de les pràctiques curriculars a l'empresa Idrone BCN.

L'empresa tenia la idea d'un projecte de creació d'un dron captiu que ens va motivar a l'instant i vam acceptar participar-hi.

2.2. Motivació

Principalment, ens va atreure la possibilitat de posar en pràctica els coneixements assolits durant el grau, sobretot en el camp de l'enginyeria que hem estudiat de forma més recent, l'electrònica.

A més, molts d'aquests coneixements els posaríem a prova de manera pràctica. Traspasar la barrera de la teoria i portar algun d'aquests coneixements a la pràctica, també era un gran al·licient ja que durant la carrera no ho hem pogut fer massa.

Dins del camp dels drons, el concepte de dron captiu és un terreny relativament nou on es considera que hi ha poc mercat i poca competència però la possibilitat de recerca i innovació és molt gran. A més vam gaudir de molta llibertat a l'hora de prendre decisions del projecte.

El fet de realitzar aquest projecte en parella es deu a que l'empresa és petita i nosaltres érem els únics estudiants de pràctiques que fèiem horari de matins, així que hem estat convivint cada dia durant aquest quadrimestre.

Això ha aportat al projecte la capacitat de realitzar tasques en paral·lel i sobretot l'aportació d'un altre punt de vista a part del de cadascú, fent que augmentés la creativitat i fos més fàcil resoldre els problemes amb els que ens hem anat trobant.

2.3. Requeriments previs

Prèviament a l'inici del treball i de començar l'estada de pràctiques, es va realitzar un treball de formació i familiarització en l'àmbit dels drons. Es va usar des de bibliografia recollida a internet fins a llibres que disposava l'empresa.

Es requereix tant la capacitat de realitzar soldadures, com la d'entendre el funcionament del circuit elèctric d'alimentació del dron.

Es necessita un espai de treball còmode i ampli, així com també material bàsic per treballar amb seguretat com ulleres de protecció i amperímetres o voltímetres per poder fer comprovacions.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

Aquests objectius, en gran part, van ser marcats per l'empresa on es van realitzar les pràctiques curriculars:

- Dissenyar un hexacòpter capaç de realitzar vols de llarga durada (més de dues hores).
- Dotar a aquest model la capacitat d'aixecar 2 kg de pes com a mínim.
- Dissenyar el sistema d'alimentació per tal de que el dron no hagi de realitzar el vol alimentat per una bateria LiPo que porti incorporada, sinó que s'alimenti des d'una font que es trobi al terra mitjançant un cable.
- Acoblar el dron i el sistema d'alimentació.
- Implementar al dron sistemes de seguretat.
- Realitzar les proves pertinents per tal de verificar que és operatiu.

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest projecte va des de l'etapa de disseny, on es dimensiona i s'estudia quins components i materials es necessiten per la implementació del dron amb característiques anteriorment esmentades; fins a la comprovació de que el disseny i la implementació d'aquest són correctes.

4. Fonaments dels drons

4.1. Què és un dron?

Un dron es defineix com un vehicle aeri que vola sense tripulació. Aquest nom ve de l'anglès, *drone*, que té dos significats: abella mascle o brunzit. Com és obvi, aquest nom és degut al soroll que fa aquest quan vola [3].

Aquest vehicle aeri pot estar controlat des d'una posició remota o pot tenir vol autònom a partir de plans de vol preprogramats a través d'automatització dinàmica.

Dins del grup de vehicles aeris que volen sense tripulació es poden trobar diferents tipus. Un d'aquests són els avions sense tripulació, però quan ens referim a dron, ens referim a un multicòpter lleuger, amb les hèlices l'eix del qual és perpendicular al terra, el més similar a un helicòpter amb varies hèlices. El gran avantatge que tenen els drons respecte els helicòpters és que el fet de tenir com a mínim 4 hèlices, fa que sigui molt estable i que els eixos de les hèlices es mantinguin gairebé sempre perpendiculars al terra [2].

Existeixen drons de diverses mides, diferents estructures i que tenen diferents finalitats. Sovint, s'utilitzen per feines que l'ésser humà no pot o no vol realitzar, o que són massa perilloses, com l'exploració, la neteja de llocs elevats, objectius bèl·lics, control d'incendis, gravacions a altura, fotografia, agricultura...

Es poden classificar els tipus de drons de la següent manera:

- De curses: Són drons petits i lleugers que arriben a altes velocitats. Per a realitzar curses.
- De joguina: Són drons petits i normalment de materials barats com el plàstic, s'utilitzen sobretot per l'oci o per fer els primers passos de pilotatge.
- De gravació o fotografia: Normalment més grans, ja que porten una càmera per a filmar o fer fotografies, i depenent de la qualitat serà més o menys pesada.
- Militars: Utilitzats per l'exèrcit amb objectius bèl·lics.
- Professionals: Són drons sofisticats, fets amb materials cars normalment, i que serveixen per a varies funcions esmentades anteriorment.

El procés de fabricació de molts drons és força car, ja que a part de tenir peces de materials com fibra de carboni o de vidre, també disposen d'elements força cars, com serien els variadors, els motors o la controladora. La majoria de drons cars són els professionals, ja que han de fer tasques per a empreses, és a dir, fan treballs en la indústria o en la construcció molt sovint. Ara bé, el cost de funcionament del dron, és a dir, quan algú l'utilitza, és molt barat, ja que no consumeix cap mena de combustible, la immensa majoria funcionen amb bateries LiPo.

Un dels grans inconvenients dels drons és que tenen una capacitat de vol molt limitada, degut a que la majoria funcionen amb bateria acoblada, i aquesta li proporciona al dron una capacitat de vol d'aproximadament 20 minuts. En aquest projecte s'ha posat èmfasi en aquest fet, ja que com s'explicarà posteriorment, es tracta de posar fi a aquest gran inconvenient [1].

4.2. Parts del dron i el seu funcionament

4.2.1. Motors

Els motors utilitzats en els drons són els *brushless* (sense escobretes) [11]. Aquests, a diferència dels motors amb escobretes, no utilitzen escobretes que es connecten al col·lector per a realitzar el canvi de polaritat del rotor, la commutació de bobines es realitza electrònicament amb un controlador de motor. El fet més important és que al no tenir escobretes, no hi ha fricció que desgasta el motor, ni produeix soroll al canviar la polaritat, ni es desprèn calor. Això fa que la vida útil del motor sigui més gran que en el cas que tingui escobretes [6].

La pèrdua de calor dels motors amb escobretes fa que la potència útil disminueixi, i per tant, l'eficiència dels motors *brushless* és molt més elevada que la dels motors amb escobretes.

En els drons interessa que els motors siguin el màxim eficients i sobretot que el seu pes sigui petit en comparació a la potència que tenen, és per això que s'utilitzen els *brushless*. Cal afegir que el motor *brushless* té una bona relació velocitat-parell, com que no hi ha fricció, el parell pot arribar a un valor més alt que el motor sense escobretes [7].

Tot i així, com és obvi, els motors *brushless* són més cars que els motors amb escobretes i necessiten un control electrònic per a que funcionin.

Les característiques més importants que s'ha de tenir en compte a l'hora d'escollir un motor *brushless* per a dron són [12]:

- **Revolucions per volt:** El nombre de voltes a la que gira un motor per minut i per cada volt al qual està alimentat es representa amb el paràmetre KV (rpm/V). Per exemple, un motor 800 KV alimentat a 12 V girarà a 9.600 revolucions per minut.
- **Mida:** S'expressa amb un nombre de 4 xifres, les dues primeres indiquen el diàmetre del rotor en mil·límetres, i les dues últimes xifres indiquen l'altura del motor en mil·límetres també.
- **Empenta:** La força que és capaç de fer el motor, és a dir, el pes que pot aixecar. Aquesta es mesura en grams. Per saber quin és el pes que pot arribar a aixecar el dron només cal multiplicar aquest valor pel nombre de motors que tingui.
- **Corrent:** El valor màxim d'intensitat que pot consumir.



Figura 4.2.1.1. Típic motor *brushless* per a drons.
Font: [MODELTRONIC](#)

4.2.2. Variadors

Un variador és un sistema capaç de definir la velocitat i sentit de gir d'un motor mitjançant la generació de impulsos.

Els variadors per a motors *brushless*, en general, usen la PWM (*pulse-width modulation*), per controlar motors elèctrics. Els variadors per motors *brushless* creen un corrent altern trifàsic a partir del corrent provinent de la font d'alimentació (en contínua).

Hi ha dos tipus de variadors, els que tenen incorporat el BEC (*Battery Eliminating Circuit*) i els que no:

La funció d'aquest circuit (el BEC) és la de poder alimentar amb la mateixa font d'alimentació amb la que es subministra energia als variadors i als motors, la resta de components de l'electrònica del dron que necessiten un voltatge molt inferior (al voltant de 5V), com el receptor. Així, no es necessita una bateria suplementària de menor voltatge, alleugerint molt el pes de l'aeronau.

Com s'observa a la *Figura 4.2.2.1*, un variador el componen les següents parts [8]:

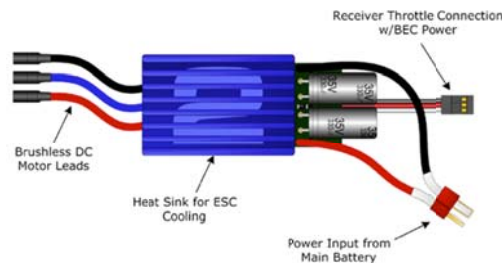


Figura 4.2.2.1. Esquema d'un variador. Font: [FPVMAX](#)

-Dos cables d'entrada: Corresponen a l'alimentació que prové d'una bateria o d'un convertidor.

-Tres cables de sortida: Es connecten al motor per proveir-l'ho amb impulsos.

-Un connector de dos o tres cables: És el cable de senyal, que va connectat a la controladora i rep les dades per moure el motor. El nombre de cables dependrà de si l'ESC té incorporat el BEC, (3 cables) o no (2 cables).

-ESC: És el que conté la part d'electrònica i fa possible el seu funcionament. Es calenta força, així que normalment disposa d'aletes de refrigeració per tal de dissipar la calor generada.

El seu funcionament es pot resumir en els següents passos:

- 1- La controladora envia una senyal tipus PWM amb dades calculades a partir de la posició del dron i la posició del *stick* del transmissor. Aquestes dades viatgen a través del cable de senyal des del connector corresponent fins a l'ESC, aproximadament tarden en arribar entre 1 i 2 mil·lisegons.
- 2- La informació arriba a l'ESC i al mateix moment demana l'energia necessària a través dels seus cables d'alimentació.

- 3- Es produeix la traducció a polsos dins de l'ESC i es transmet al motor a través dels tres cables de sortida.

A l'hora de triar l'ESC per a un dron determinat cal tenir en compte els següents factors:

- Intensitat màxima que suporta el variador.
- Consum del motor o motors a màxima potència.
- El voltatge amb el que treballen.

Els variadors sempre indiquen la quantitat d'ampers màxima que suporten i és important que aquest valor sempre sigui superior al valor consumit per els motors per així evitar crear colls d'ampolla i alhora poder aprofitar al màxim el rendiment dels motors instal·lats.

Tot i així, cal dir que la gran majoria de variadors no només suporten la quantitat d'ampers indicada sinó que poden admetre uns 5-10 ampers més durant uns segons (*burst*), normalment 10 segons, abans de començar a guanyar temperatura perillosament.

4.2.3. Controladora

La controladora és el cervell del dron, gràcies a la qual el dron rep i executa les ordres.

Es tracta d'un petit ordinador orientat al càlcul matemàtic i amb una interfaç que s'encarrega de rebre i transmetre informació per a que el dron mantingui l'estabilitat durant el vol. Recull totes les dades de moviment del dron, del sistema en general, dels sensors interns i externs, de la ubicació GPS, a més, controla les velocitats dels motors.

Moltes plaques controladores tenen incorporat un *autopilot*, és a dir, té la capacitat de programar i realitzar vols sense que es requereixi la presència d'un pilot.

Per exemple, en cas de que s'estigui acabant la bateria o que es perdi el senyal de l'emissora, el dron és capaç de quedar-se quiet en el punt GPS en que es troba o que s'ha ordenat prèviament gràcies a la placa controladora [4].

Totes les controladores tenen quatre parts en comú:

Una banda de ports d'entrada per l'emissora, una banda de ports de sortida, un conjunt de sensors interns i un conjunt de connexions per a entrades i sortides externes.

Cada banda de ports està composta per un nombre determinat de connexions, i aquestes estan compostades per tres connexions més, un negatiu, un positiu i un de senyal.

La controladora s'alimenta aproximadament a 5V, s'ha de col·locar el més a prop del centre de gravetat que es pugui perquè el càlcul sigui el més precís possible, ha d'estar protegida i evitar que estigui en contacte amb vibracions.

Hi ha molts models i tipus de controladores al mercat, les més conegudes són: *Naza*, *Pixhawk* i *APM*.

4.2.4. Estructura

L'estructura d'un multicòpter es coneix amb el nom de "marc" o "frames" i pot tenir varies formes. Les formes més habituals són el quadrocòpter, l'hexacòpter i l'octocòpter. Aquestes estan definides pel nombre de rotors que el componen, 4, 6 o 8. En l'estructura de drons professionals es diferencien dues parts: el xassís i els braços. El xassís és la part central del multicòpter, la qual protegeix els elements més vulnerables (la controladora, el receptor de radiocontrol, el receptor de telegrafia) i subjectar les extremitats del multicòpter. Els braços estan subjectats per un extrem pel xassís, i a l'altre extrem subjecten els motors. També aguanten el variador de cada motor, aquest es pot trobar en qualsevol punt del braç, normalment es troba a l'extrem del braç, a sota del motor. És molt usual que els drons professionals tinguin potes per tal que els braços i

xassís no estiguin a l'altura del terra. Això és per què el multicòpter tingui més temps de reacció quan s'enlaira, ja que al tenir uns motors tant potents, la possibilitat de que es desestabilitzi durant l'enlairament és més alta.

A l'hora de construir un multicòpter, un dels principals factors que s'ha de tenir en compte és el pes, i amb l'estructura es pot optimitzar, tant amb la forma, com amb el material, per tal de que aquest sigui mínim tot mantenint una certa resistència.

Aquests tres components estan fabricats amb tres tipus de materials diferents:

- Fibra de carboni: És el material més car i pesat, però és molt resistent.
- Fibra de vidre: Menys resistent, però més lleuger i menys car.
- Plàstic: És el material més barat, però poc resistent. S'utilitza per a multicòpters d'iniciació normalment. Té un avantatge a tenir en compte, que és la possibilitat d'impressió 3D.

A part d'aquests tres elements, també hi ha altres tubs, cargols, plaques, i elements anti vibracions

4.2.5. Font d'alimentació

La majoria de drons s'alimenten per mitjà d'una bateria LiPo (ions de liti) recarregable situada a sobre de l'esquelet del dron, molts cops a una part inferior a la controladora.

Com indica el seu nom, estan composades de Liti i Polímer. Són unes bateries idònies pel radiocontrol, sobretot per l'aeromodelisme, degut a que a igual capacitat, aquestes bateries són quatre vegades més lleugeres que les Ni-Cd, és a dir, les comuns.

Aquestes bateries estan composades generalment per vèries cèl·lules secundàries idèntiques en paral·lel per augmentar la capacitat de corrent de descàrrega, i sovint estan connectades aquestes en sèrie per augmentar el voltatge total disponible.

Una cel·la d'una bateria Li-Po té un voltatge nominal de 3,7V. Aquesta mai es pot descarregar per sota de 3V per element, i mai es pot carregar a més de 4,3V.

El nombre de cel·les en sèrie s'indica amb una "S". Així doncs, si la bateria és 4S, tindrà 4 cel·les en sèrie, i per tant, el voltatge nominal serà 4 vegades 3,7V; és a dir, 14,8V.

La capacitat de la bateria es mesura en mAh, com més capacitat, més pes tindrà aquesta bateria, així doncs, no sempre és bo augmentar la capacitat, arriba un moment en que empitjora les condicions ja que el dron necessitarà més potència per enlairar-se i consumirà més, es tracta de trobar l'òptim.

La taxa de descàrrega s'indica amb la lletra "C". Indica la velocitat màxima a la que es pot descarregar. Per exemple, si es té una bateria 1000 mAh 1C, aquesta es descarregarà a 1A en una hora. Si la bateria fos de 1000mAh i 2C, es descarregaria a 2A en mitja hora.

El gran inconvenient que tenen aquestes bateries és que requereixen d'un tracte molt delicat, hi ha risc de deteriorar-les irreversiblement i, fins i tot, poden arribar a explotar. En general, s'han de carregar molt més lentament que les bateries ordinàries, normalment, com a màxim a 3A.

Si es vol que el dron captiu treballi a llocs on no hi hagi presa de corrent, s'haurà d'utilitzar una bateria com a font de subministrament elèctric. Aquesta ha de tenir la màxima capacitat amb un preu mínim possible, el pes és un factor secundari perquè no influeix en el vol del dron.

El prototip captiu d'aquest projecte consumeix 45Ah aproximadament, aquest consum és molt gran, pel que si s'utilitzés una bateria acoblada al dron, aquesta no duraria més de 20 minuts amb el dron sense cap càrrega, i l'objectiu del dron captiu és que el temps de

vol sigui molt més gran. Així doncs, al tenir-la al terra, el pes i les dimensions d'aquesta poden ser molt més elevats que una bateria LiPo acoblada al dron.

Els tipus de bateries que existeixen al mercat són [9]:

- **Bateria de ions de liti (Li-ió):** Utilitzen un ànode de grafit i un càtode d'òxid de cobalt, trifilina o òxid de manganès. Arriben a altes densitats de capacitat. No admeten descàrregues, ja que es fan mal bé. S'utilitzen per aparells electrònics com els mòbils. Un gran avantatge del que disposen és que pateixen molt poc l'efecte memòria (és un efecte que fa que al descarregar i recarregar les bateries al llarg del temps, aquestes acaben presentant una reducció de capacitat d'emmagatzemar energia).
- **Bateria de níquel-ferro (Ni-Fe):** El càtode està compost per fileres de tubs formats per làmines enrotllades d'acer al níquel, els tubs estan plens d'hidròxid de níquel. L'ànode està compost de caixes perforades d'acer níquelat que conté pols d'òxid ferrós. Són bateries barates, admeten sobrecàrregues i descàrregues totals i no presenten efecte memòria pràcticament, per contra, són molt poc eficients (65%) i són molt pesades en comparació a la potència que poden aportar.
- **Bateria de Níquel-Cadmi (Ni-Cd):** Utilitzen un càtode d'hidròxid de níquel i un ànode de compost de cadmi. Tenen una densitat d'energia molt baixa, 50 Wh/Kg. Admeten sobrecàrregues, però tenen un efecte memòria molt alt.
- **Bateria de níquel-hidruir metàl·lic (Ni-MH):** Tenen un ànode d'hidròxid de níquel i un càtode d'aliatge d'hidruir metàl·lic. No presenten un efecte memòria excessivament alt i presenten una densitat d'energia superior a les de Níquel-Cadmi.
- **Bateria de ions de liti (Li-ió):** Utilitzen un ànode de grafit i un càtode d'òxid de cobalt, trifilina i òxid de manganès. Arriben a altes densitats de capacitat. No admeten descàrregues i per això, normalment porten un aparell per conèixer l'estat de la bateria en tot moment i poder evitar així la descàrrega completa. No pateixen efecte memòria pràcticament. Són les bateries que tenen més densitat de capacitat, per aquest fet són les que s'utilitzen per alimentar drons, ja que són les més lleugeres en comparació a la capacitat que tenen. S'utilitzen també per aparells electrodomèstics com els mòbils.
- **Bateria de polímer de liti (Li-Po):** És una variació de les anteriors, són les que permeten una major densitat d'energia, també tenen una taxa de descàrrega superior. Cada cel·la té un voltatge nominal de 3,7V. Són les utilitzades per l'alimentació dels drons. A continuació, a la *Figura 4.2.5.1*, la típica bateria LiPo usada per a drons [5].



Figura 4.2.5.1. Bateria LiPo. Font: [SLS](#)

- **Bateria de plom-àcid:** Està formada per un ànode de plom i un càtode de diòxid de plom en una solució d'àcid sulfúric. Cada cel·la proporciona 2V, així doncs, es pot subministrar múltiples de 2. Tenen una gran capacitat de descàrrega puntual, pel qual s'utilitza molt per a motors d'arrancada dels automòbils. Pot tenir una gran capacitat, el problema és que presenta una gran densitat de capacitat fet que fa que pesi molt, totalment inviable per a l'alimentació d'un dron des de l'aire.

4.2.6. Receptor, emissora i GPS

-Receptor: És el responsable de rebre el senyal de ràdio enviat des del comandament a distància i adequar i enviar aquest a la controladora. És un component l'elecció del qual és senzilla ja que quasi sempre està inclòs a l'hora de comprar l'emissora, i si no fos així hi ha receptors universals molt barats.

-Emissora: L'emissora és un altre component indispensable sense el qual no es podrà fer volar el dron. Amb ella el pilot emet les ordres perquè el dron realitzi el moviment que ell vulgui, i alhora el dron també envia al comandament l'estat de la bateria o la posició GPS. En definitiva, és el vincle entre el pilot i l'aeronau.

Depenent del tipus d'emissora, el senyal es pot emetre a 433 Mhz, 2,4 Ghz (el més comú) i 5,8 Ghz. Aquest arriba al receptor quasi a l'instant, que està connectat a la controladora.

Els transmissors més barats i senzills tenen 6 canals però els professionals poden arribar a tenir-ne fins a 14. Cadascun d'aquests canals gestiona una funció del dron mitjançant servos, com podrien ser el canal de potència o el d'elevació.

Les principals marques són: *Frsky, Spektrum, Turnigy i Futaba*.

-GPS: És la unitat encarregada de transmetre la informació sobre la ubicació, altitud i velocitat a temps real a la controladora. La connexió entre el GPS i aquesta es realitza amb un protocol de comunicació anomenat NMEA

Realment, GPS és només un sistema de posicionament basat en una xarxa de satèl·lits americana, però també existeix un sistema rus (GLONASS), un xinès (BEIDUO o COMPASS) i en un futur un europeu (GALILEO). Com més satèl·lits trobi el receptor del dron, amb més precisió l'ubicarà, però és complicat que pugui ubicar amb una precisió major de +/- 2 metres.

La funció que compleix el GPS en el dron és molt important, present en quasi tots els tipus vols que es poden realitzar (menys quan es fa volar de forma manual). Algunes de les funcions que realitza són:

- Fer volar el dron de forma autònoma amb rutes programades prèviament.
- Bloquejar la posició, és a dir, el dron registra la posició on es troba (altura i coordenades) i es queda en aquesta encara que les condicions atmosfèriques l'empenyin a abandonar-la. És una opció molt útil per fer fotografies i vídeos.
- Per la tornada a casa, el dron quan s'enlaira grava la posició i és capaç de tornar a la mateixa simplement seleccionant l'opció.

4.3. Història dels drons

Com bona part de la invenció científica moderna, el seu desenvolupament ha anat lligat molt sovint a la indústria de la guerra i el seu ús amb finalitats bèl·liques [10].

Entenent un dron com una aeronau que vola de forma autònoma i és pilotada a distància el primer antecedent que es té constància és del 1849: Els austríacs van elevar uns 200 globus aerostàtics equipats amb explosius, tot i que no es podien pilotar a distància sí que es podia definir (usant una bateria galvànica i un cable de coure) el temps de vol i quan acabava el aparell queia al buit i explotava [15].

Nikola Tesla l'any 1898, a un estany del Madison Square Garden de Nova York va realitzar una demostració on va controlar un vaixell amb un transmissor usant ones de radio. Va ser la primera aplicació d'ones de radio de la història i es considera l'embrió de la robòtica moderna.

En 1916, la idea de poder construir armes guiades de forma remota va despertar l'interès de la *Royal Flying Corps* que va supervisar una sèrie d'avions teledirigits i equipats amb explosius. El més rellevant va ser el "*Hewitt Sperry*" capaç de volar 50 milles equipat amb una bomba 130kg. Amb la invenció del giroscopi va ser determinant per fer aquests drons més segurs i capaços. Alhora a Alemanya *Dr. Wilhelm von Siemens* estava desenvolupant un espècie de míssil guiat amb ràdio, precursor dels míssils de creuer moderns. Tots aquests prototips van tenir un èxit relatiu, és a dir, van ser provats en combat però el seu ús no es va generalitzar a causa d'accidents i de la poca fiabilitat que tenien.

Durant la Segona Guerra Mundial (1939-1945), la Marina nord-americana va encetar un programa per identificar i destruir búnquers alemanys, però calia que un pilot guiés l'aeronau carregada d'explosius fins una determinada alçada i després saltés en paracaigudes. La tecnologia de control remot era molt limitada i això es va traduir en molts accidents, fent que el programa fracassés.

A la dècada de 1940 es va desenvolupar el GB-1 Glide, un sistema de bombardeig que consistia en un planejador que estava ideat per evitar les defenses aèries alemanyes. Podia carregar una bomba de fins a 1 tona de pes i estava controlat via ràdio. Es van usar sobre Colònia causant grans danys. El principal problema que tenien era què només es podien usar en les condicions atmosfèriques perfectes.

Al final de la Segona Guerra Mundial, es van comptabilitzar 40.000 avions destruïts i unes 80.000 persones mortes. Aquestes xifres van ser el detonant de l'interès dels exèrcits dels principals països implicats per intentar desenvolupar una força àrea robòtica i millorar l'actual.

Va ser però durant la Guerra Freda, concretament al 1960, quan la Unió Soviètica va abatre un avió espia anomenat U-2 (tripulat per Gary Powers), que es va donar el pas endavant definitiu per evitar que un episodi similar es repetís. La tecnologia va avançar moltíssim en aquest període.

Al 1962, l'empresa *Ryan Aeronautic Company* va proposar la seva versió d'un avió no tripulat: el *Firebee*. Aquests van ser provats amb èxit durant la guerra del Vietnam: Eren llançats de d'un avió major (*Lockheed CC-130 Hércules*) i podien ser pilotats per operadors de ràdio des d'aquest avió o podien volar amb rutes preprogramades. Quan el combustible

se'ls hi esgotava, desplegaven un paracaigudes i posteriorment eren recuperats amb un helicòpter.

També en aquest període, al 1964, EEUU va decidir usar aquests avions per realitzar missions d'espionatge a Cuba, Corea del Nord i la República Popular de Xina. Tot i que va ser abatut en algunes ocasions, EEUU mai va admetre que disposava d'aquesta tecnologia. Es calcula que aquests drons van realitzar més de 34.000 missions de combat entre 1964 i 1975 només a Àsia, i aquestes operacions van costar uns 250 milions de dòlars.

Més tard es va equipar els *Firebee* amb la tecnologia LORAN (*Long Range Navigation*), fent la seva capacitat operacional millorés molt.

Durant la dècada de 1970 la investigació va seguir nous prototips que van implementar la possibilitat de modificar una ruta prèviament determinada durant el vol, però encara no podien fer retornar l'aeronau i fer-la aterrar en un punt concret. Es va iniciar un altre programa amb *Boeing* i *Ryan* per tal d'aconseguir prototips de drons que poguessin volar a gran altura i durant força temps (20 hores) tot duent càmeres de vídeo.

Cap als 80, la iniciativa de la investigació la va portar Israel ja que podien provar en combat prototips contra l'exèrcit siri. A principis dels 90, amb el desenvolupament la computació i de sistemes de control electrònic, els drons van anar agafant la forma que tenen ara. A finals dels 90 es va armar les primeres aeronaus amb míssils.

Pel que fa a la història contemporània, hi ha un esdeveniment que va ser el detonant final de la indústria actual: l'atemptat a les torres bessones al 11 de setembre al 2001. Aquesta va ser la excusa usada per Donald Rumsfeld (secretari de Defensa durant el govern de Bush) per desplegar una immensa força aèria de drons a l'Afganistan i donar llum verda perquè s'utilitzessin per matar.

A l'actualitat les principals potències militars del planeta tenen la seva força aèria de drons militars, i el principal exportador mundial és Israel.

S'estima que al 2013 el Departament de Defensa dels Estats Units disposaven de uns 350 drons amb capacitat d'equipar armament. A finals de 2015, es calculava que s'havien usat unes 500 vegades assassinant a 3922 persones.

Israel també disposa de drons, però el més xocant és que ha equipat drons comercials estàndard (és a dir drons que estan a la venda per un preu d'uns 1.500 euros) amb dispositius per llançar gasos lacrimògens o granades de fragmentació, i els usa habitualment a la franja de Gaza.

Actualment tot i que és evident que la indústria de la guerra és el principal motor de la investigació en aquest camp, el seu ús s'ha popularitzat amb finalitats positives com la conservació, salvament, agricultura, manteniment d'estructures, el sector audiovisual, per realitzar estudis topogràfics, competició, vigilància i, sobretot, oci.

4.4. Legislació actual

La definició de dron per AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) és la següent: “Un dron es una aeronave pilotada por control remoto. Así se llamaba tradicionalmente a algunas de estas aeronaves de uso militar y en la actualidad se ha extendido este nombre a todas las aeronaves pilotadas por control remoto, tanto militares como civiles.

Sin embargo, una aeronave pilotada por control remoto técnicamente se considera un dron cuando tienen un uso comercial o profesional. Cuando el uso de estas aeronaves tiene exclusivamente un fin Deportivo o de recreo, son consideradas Aeromodelos, y se rigen bajo la normativa de éstos.

Hay que subrayar pues que los drones SON AERONAVES. Como tales, están sujetas a la legislación general vigente en España, así como al resto de la normativa aeronáutica.”

La normativa que s'aplica a l'actualitat és la que es va aprovar el 29 de desembre de 2017, el Reial Decret 1036/2017 publicat al BOE [13], on es regula l'ús civil d'aeronaus pilotades amb control remot.

La llei actual només obliga als pilots que vulguin desenvolupar una activitat professional a obtenir la llicència de pilot. En aquesta hauran d'acreditar coneixements pràctics i teòrics així com també un certificat mèdic de classe LAPL (per drons de pes menor de 25kg) o de classe II (per drons amb pes major de 25kg).

Pel que fa l'ús de drons de manera professional o comercial es necessiten els següents requisits:

- Estar donat d'alta com operador a AESA.
- Tenir una assegurança de responsabilitat civil.
- Tenir el títol de pilot de drons, que costa entre 350 i 1600 euros i són aproximadament unes 60 hores lectives.
- Tenir un certificat mèdic en vigor.

Pel que fa l'ús recreatiu:

- Està prohibit volar a menys de 8km de qualsevol aeroport o aeròdrom.
- S'ha de volar sempre fora d'espais aeris controlats
- No sobrepassar els 120m d'altura respecte el terra, o sobre l'obstacle més alt situat dins d'un radi de 150m des de l'aeronau.
- Realitzar sempre el vol de dia i en bones condicions meteorològiques.
- Mantenir el dron sempre dins del llindar visual del pilot (VLOS, Visual Line of Sight)
- Les aeronaus de menys de 250g, podran volar en nuclis urbans densos i sobre aglomeracions de persones o edificis, sempre i quan no superin els 20m d'altura.
- És recomanable, tot i no ser obligat, tenir una assegurança de responsabilitat civil.

Si el dron es vol fer volar sobre zones urbanes però no pesa menys dels 250g marcats per la llei, que són molt restrictius, caldrà que:

- El pes màxim de l'aeronau no podrà ser superior a 10kg.
- Tot el vol haurà de ser dins del llindar de visió del pilot (VLOS).
- La zona de vol haurà d'estar acordonada per l'autoritat competent, o en altres casos, s'haurà de mantenir una distància de 50m amb edificis, estructures i persones que no participin de l'operació.
- L'aeronau haurà de tenir instal·lat un sistema per mitigar l'impacte (airbag, paracaigudes...)

-Caldrà una autorització d'AESA a través d'un estudi de seguretat aeronàutica.

AESA té la següent taula resum on apareixen les principals qüestions, algunes ja comentades, així com algunes de les sancions que pot comportar no respectar la llei [14]:



Figura 4.4.1. Resum de la normativa per a drons. AESA

Fins ara s'ha recollit la normativa dels principals usos que se li poden donar als drons, però per casos menys habituals i més específics:

-Per realitzar vols nocturns:

-Estan permesos sempre i quan es realitzi amb una autorització expressa de AESA que obtindrem a través d'un estudi de seguretat específic. A més a més, caldrà que l'aparell incorpori sistemes que garanteixin la seva visibilitat (com llums, pintura reflectant...)

-Per volar en un espai aeri controlat:

-Està permès per aquelles aeronaus que tinguin equipat un transponedor (és un transmissor que rep un senyal de radio i emet la posició, alçada i freqüència de ràdio de l'aeronau) en mode S (menys en aeronaus de menys de 25kg en vol VLOS). També cal que el pilot tingui acreditació de radio-operador i que conegui l'idioma utilitzat en les comunicacions entre controlador i aeronau. També caldrà una autorització d'AESA que s'obté a través d'un estudi de seguretat.

-Per poder volar més enllà del líndar de visió (BVLOS) amb aeronaus de pes superior a 2kg:

-Cal que l'aeronau disposi de sistemes que permetin detectar i evitar altres usuaris de l'espai aeri, i que aquests siguin aprovats per AESA. A més, caldrà que l'aparell tingui instal·lat un dispositiu de visió orientat cap endavant i com sempre, caldrà una autorització de AESA basada en un estudi de seguretat.

Cal mencionar que està prohibit posar a la maleta que s'embarca a la bodega de l'avió bateries de liti com les que usen els drons.

Sí que es poden embarcar a la cabina, algunes companyies tenen un número màxim de bateries i altres senzillament ho tenen prohibit.

4.5. Dron captiu

4.5.1. Introducció

El concepte de dron captiu xoca amb la idea generalitzada que es té de dron, com un multicòpter que circula per l'aire amb l'ajuda d'una bateria, sense cables que el lliguin a la superfície. Així doncs, el dron captiu es caracteritza perquè s'alimenta des del terra, és a dir, hi ha un cable que connecta la font d'alimentació del terra amb el dron.

La primera reacció que es té quan es comenta a algú aquesta idea és que no té cap mena de gràcia ja que no es pot fer que el multicòpter s'allunyi molt (ja que està limitat per la llargada del cable), que no es poden fer moviments gaire bruscos per la possibilitat de que aquest cable molesti al dron o es pugui enredar, i que tampoc pot anar per espais tancats i amb complexitat, és un dron que treballa d'una manera més segura a l'exterior. Ara bé, quan algú s'allunya de la idea de dron com a aparell d'oci o de curses, i entra al món del dron professional, és a dir, que realitzi funcions concretes útils més enllà de l'oci, s'obre un gran ventall d'aplicacions on aquest prototip captiu pot ésser molt útil, i sobretot, pot suposar un gran estalvi de temps i esforç comparat amb els drons no captius (convencionals).

El gran avantatge que proporciona la utilització del dron captiu és que aquest pot estar a l'aire realitzant les operacions que siguin de manera indefinida. La capacitat de temps de vol passa de ser de 10-20 minuts dels drons convencionals, a ser pràcticament indefinida en el cas del dron captiu. Així doncs, elimina el gran inconvenient dels drons, el poc temps de vol.

Per posar fi al problema del poc temps disponible de vol, s'ha de tenir en compte però, que cal optimitzar el pes dels components del dron al màxim possible, ja que a part d'haver d'aixecar el cable que el lliga al terra, també ha d'aixecar un convertidor que s'explicarà més endavant.

Un aspecte a destacar és el gran ventall d'aplicacions que pot tenir aquest tipus de multicòpter que s'explicaran més endavant.

Aquest concepte de drons s'està desenvolupant també en el sector militar, ja que ofereix aquest gran avantatge del temps il·limitat.

A continuació es mostra una taula resum de les principals avantatges i inconvenients dels drons captius.

Avantatges	Inconvenients
Temps de vol molt gran o infinit.	Alt cost.
La càrrega que pot portar el dron és molt més gran.	El pes total de cable que aixeca augmenta a mesura que puja d'altura.
Es pot utilitzar en zones urbanes, la llei no ho prohibeix.	El cable pot molestar durant el vol.
Degut al llarg temps de vol, es poden utilitzar motors menys eficients per reduir el cost del dron.	Si no es disposa de presa elèctrica, es necessita una bateria de gran pes que es situa al terra.
El cable lliga el dron i per tant, no hi ha possibilitat	

de que s'escapi.	
Es pot posar un nombre gran de rotors, d'aquesta manera, si s'avia un, el dron pot continuar el seu vol igualment.	

Taula 4.5.1. Taula resum d'avantatges i inconvenients dels drons captius. Font: Font pròpia.

4.5.2. Com funciona?

Com s'ha comentat anteriorment, el que fa especial el dron captiu és l'alimentació que utilitza. Així doncs, una part molt important del projecte és la manera amb que es substitueix l'alimentació del dron convencional, és a dir, la bateria LiPo.

Per substituir aquesta bateria s'utilitza un convertidor AC/DC, ja que les bateries entreguen corrent continu al dron. Aquest convertidor està acoblat al dron de manera que quan el dron s'enlaira, aquest també ho farà. El convertidor ha d'entregar un corrent continu amb un voltatge concret. Un gran problema que tenen aquest convertidors és que pesen molt i per tant, s'ha de fer una extensa recerca per trobar el que pesi el mínim possible.

El convertidor AC/DC està alimentat per un inversor (convertidor DC/AC) que si que està situat al terra, és a dir, que el dron no haurà d'aixecar. Aquest inversor és l'encarregat d'ondular i elevar la tensió.

Una cosa molt important que s'ha d'optimitzar al màxim és el pes del cable que connecta l'inversor i el convertidor AC/DC, ja que aquest cable l'ha d'aixecar el dron, i a mesura que el dron va agafant altura, el pes que ha d'aixecar es fa més gran. Així doncs, s'ha d'estudiar a quina altura es vol que pugui arribar a alçar-se el dron, ja que anirà lligat amb el pes que pot arribar a carregar aquest.

El canvi de DC/AC - AC/DC pot semblar una estupidesa perquè es passa de corrent continu a obtenir corrent continu, però és una de les claus del funcionament del dron captiu. Aquest canvi es fa perquè si s'alimenta el dron amb una bateria de corrent continu des del terra amb un cable per el qual circuli corrent continu, la caiguda de tensió que es troba quan el cable arriba al dron és massa gran com perquè aquest pugui aixecar-se, a part, el cable que uneix l'inversor i el convertidor ha de transportar corrent alterna amb un elevat voltatge, per poder així disminuir la secció del cable i en conseqüència, el pes. És una de les parts més importants a l'hora d'optimitzar el pes que ha d'aixecar el dron. Si no es fes aquest canvi, el dron hauria d'aixecar un cable d'una secció molt gran, en conseqüència el pes augmentaria molt, de manera que seria incapaç d'aixecar-lo.

Un petit inconvenient que té el fet d'haver de transportar el corrent altern és que es necessiten 3 cables (Fase + Fase + Neutre) enlloc de 2 cables com seria amb continu.

Un altre inconvenient és que el convertidor DC/DC és molt més lleuger i eficient que l'AC/DC perquè no utilitza bobines, a tot això, s'ha de sumar que els convertidors AC/DC són generalment molt cars (de l'ordre de 5.000€), i amb certes característiques són molt escassos en el mercat.

4.5.3. Anàlisi mercat de drons captius

La idea de dron captiu no és gens popular, és per això que ara mateix no existeix un mercat gaire ampli de dron captiu, però tot i així, hi ha algunes empreses d'innovació que ja han posat a la venda alguns exemplars.

La majoria estan orientats a la fotografia, filmació o vigilància, ja que al poder estar molta estona a l'aire pot servir com a càmera de vigilància de trànsit o altres espais exteriors. També s'ha detectat l'existència d'alguns exemplars que es fan servir per a pintar o netejar amb aigua edificis. La majoria ho fan pujant la pintura o aigua des del terra amb una mànega i es dispara amb una pistola acoblada al dron. S'ha trobat també exemplars que s'utilitzen per aplicar anticongelant als aerogeneradors.

A aquest escàs mercat, tot i que creixent, se li ha de sumar que el preu és molt elevat, degut a que fer el prototip de captiu en si ja és car. Així que la venda està destinada sobretot a empreses i no pas a particulars. S'ha realitzat un estudi de mercat de prototips de captiu i no es té coneixement d'exemplars que tinguin un preu inferior als 20.000€. Aquí és on es pot veure que el prototip d'aquest projecte pot tenir una bona sortida al mercat si s'aconsegueix reduir costos de fabricació i en conseqüència el preu de venda al públic.

També s'ha analitzat que hi ha empreses que es dediquen a la venda de "maletes". Aquestes maletes porten incorporades una gran bateria o generador de corrent continu, un inversor de manera que subministra corrent en alterna i un enrotllador de cable amb el cable que alimenta el convertidor AC-DC acoblat al dron. És una manera molt còmode i elegant de vendre el producte, ja que l'usuari només veu una "caixa" del qual surt el cable que alimenta el dron. Amb aquesta maleta es poden convertir alguns drons professionals que inicialment funcionen amb una bateria acoblada al dron, és a dir, de manera convencional, a prototips captius que poden estar moltes hores volant. Això si, s'ha d'instal·lar el convertidor AC-DC prèviament al dron en qüestió.

Un altre prototip que s'ha trobat al mercat funciona d'una manera molt diferent al d'aquest projecte. Enlloc de transportar el corrent en alterna, el cable transporta corrent en contínua a una tensió molt elevada, de manera que la caiguda de tensió és mínima. Aquest cable connecta amb un convertidor DC-DC acoblat al dron per tal de disminuir la tensió i que sigui òptima per al dron. L'avantatge d'aquest convertidor és que és molt més lleuger i eficient que el convertidor AC-DC. Per contra, aquests convertidors són molt escassos al mercat i s'han de fer a mida per una empresa externa, pel que el preu es dispara molt. Això comporta que aquests exemplars siguin encara més cars.

També s'ha trobat maletes que utilitzen el sistema de transportar corrent en contínua a alta tensió i la posterior instal·lació d'un convertidor DC-DC al dron que es vulgui convertir a prototip captiu.

A continuació es mostren alguns exemples dels productes explicats anteriorment:

- Dron utilitzat per la neteja d'edificis, de l'empresa *Aerones*. És un dron amb 16 motors, l'equivalent a un quadrocòpter de quadrocòpters. Com es veu a la *Figura 3.7.3.1*, porta incorporat dipòsits i pistoles per disparar el líquid, l'aigua surt a 200 atmosferes, i es pot enlairar fins a 40 metres. A la *Figura 4.5.3.1*, es pot veure un imatge d'aquest dron.

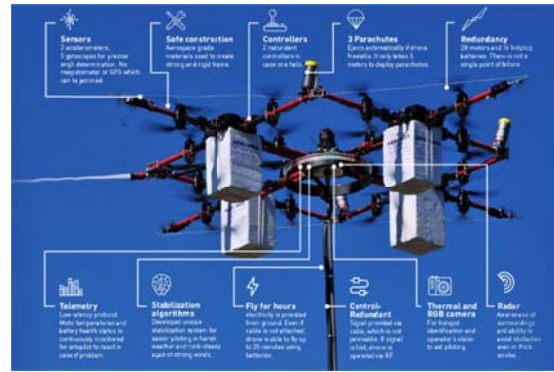


Figura 4.5.3.1. Dron de Aeronas usat per netejar molins de vent. Font: [AERONES](#)

- Maleta de l'empresa *PowerLine* per a conversió a captiu del M200 de l'empresa DJI. Utilitza transport de corrent en contínua a 380V. Li entrega al dron una potència de 3000W, a dalt s'hi instal·la el convertidor DC-DC que baixa la tensió a 50V. El cable té una llargada de 61 metres. A continuació, podem veure un exemple de la maleta en qüestió.



Figura 4.5.3.2. Maleta per adaptar un dron estàndard a captiu. Font: [NTPDRONE](#)

- *MMC TDrone 1200*. Utilitza un convertidor DC-DC. Es transporta el corrent en contínua a una tensió de 220-400V i s'entrega al dron una tensió de 25V, similar al prototip d'aquest projecte, equivalent a 6s de les bateries LiPo. Utilitza un cable per transportar que pesa 2Kg/100m.



Figura 4.5.3.3. Dron MMC TDrone 1200. Font: [MMC UAV](#)

4.5.4. Aplicacions

Com ja s'ha comentat, la idea del dron captiu és relativament nova i per tant, hi ha molt poc mercat ara però està creixent el nombre de drons captius juntament amb les seves aplicacions.

Els prototips on el pes està molt optimitzat poden realitzar diferents funcions, ja que s'hi pot instal·lar diferents sistemes o aparells per realitzar les tasques que siguin necessàries.

A continuació s'expliquen diferents aplicacions que s'han trobat quan s'ha fet un estudi de mercat:

Filmació/fotografia: La majoria de drons convencionals s'utilitzen per aquesta tasca, amb el prototip captiu es poden fer servir càmeres que pesen més que les *GoPro* i que per tant, la seva qualitat d'imatge és major. Es pot gravar durant molta estona sense necessitat de baixar el dron per recarregar la bateria.

Vigilància o càmera de trànsit: Degut a que la càmera no canvia de posició, es manté estàtica, amb el prototip captiu s'aconsegueix una càmera permanent, i amb la possibilitat d'orientar-la per tot l'espai de tres dimensions.

Neteja d'edificis / pintar parets: Amb el prototip captiu es pot prescindir de l'operari i de la instal·lació de bastides per realitzar la neteja o pintada de façanes. També proporciona més llibertat de moviment que no tindria l'operari en la bastida. El dron porta instal·lat un mecanisme per disparar aigua o pintura i una mànega que està alimentada des del terra. Hi ha drons amb un nombre molt elevat del motors, setze, que duen incorporats els dipòsits a sobre i es prescindeix de l'ús de la mànega.

Funcionar com a antena de telecomunicacions: Si el dron està alimentat amb un cable llarg, més enllà de 20 metres, pot servir per aguantar una antena de telecomunicacions de forma indefinida.

Aplicació d'anticongelant a aerogeneradors: Utilitza el mateix concepte que el dron de netejar edificis, però en aquest cas, duu incorporat els dipòsits amb anticongelants per aplicar-lo a les pales dels aerogeneradors per millorar el seu rendiment i la seva vida útil.

5. Disseny i implementació del dron captiu

5.1. Motors

El motor del prototip d'aquest projecte és un *DJI 4114 PRO 400 KV*. És un motor *brushless* amb 22 pols, pesa 150 grams, té un estator de 41 mm de diàmetre i 14 mm d'altura. Es pot alimentar des de 4S fins a 8S (14,8V - 29,6V), no hi ha problema ja que recordem que la font d'alimentació és de 24V.

Així doncs, tenim un pes total de 0,9 Kg amb els sis motors.



Figura 5.1.1. Motor DJI 4114

PRO. Font: [RC-INNOVATIONS](#)

Amb el banc de motors es va fer una prova per veure quin és el màxim de potència i força al qual arriba amb una alimentació de 24V. Pot arribar a consumir 629 W, amb un corrent de 27A i realitzar una força d'empenta de 3,5 Kg, amb les hèlices DJI R1552. Aquesta força multiplicada pels 6 motors que té el multicòpter dona una força màxima total de 24 Kg. Això es podria aconseguir amb un convertidor més potent que el que hi ha actualment, ja que hauria de poder subministrar 3.774W per poder arribar al màxim, tot i així, el multicòpter mai treballa al seu màxim.

El model escollit té una eficiència màxima de 0,01051 Kg/W quan el corrent és de 1,466A, treballa a 35,3W i fa una força de 0,371 Kg.

Arriba a una velocitat de rotació elèctrica de 13.894 rpm, i s'ha de tenir en compte que la velocitat de rotació visual/real és una mica superior a aquesta. No es va poder comprovar a quant equivalia aquesta velocitat de rotació, però es situa entre els 15.000 rpm i 16.000 rpm.

Com podem veure a la *Figura 5.1.2*, cada motor està unit a una planxa de fibra de carboni per mitjà de tres cargols. Al mateix temps aquesta planxa està unida a dues abraçaderes a l'extrem de cada tub amb cargols. D'aquesta manera els motors queden ben subjectats i s'eliminen possibles vibracions.

Les hèlices són desplegable, cada pala s'uneix a la part superior del motor per mitjà de dos cargols, com veiem a la *Figura 5.1.3*.



Figura 5.1.2. Fotografia de la unió del motor amb la xapa de carboni i amb el braç del dron. Font: Font pròpia.



Figura 5.1.3. Fotografia de la unió de les hèlices amb el motor. Font: Font pròpia.

Als tres cables d'alimentació del motor se'ls hi solda uns pins de manera que es puguin connectar amb les tres sortides dels variadors, com veiem a la *Figura 5.1.4*. Aquests han estat degudament connectats depenent del sentit de gir de cada motor, horari o antihorari.

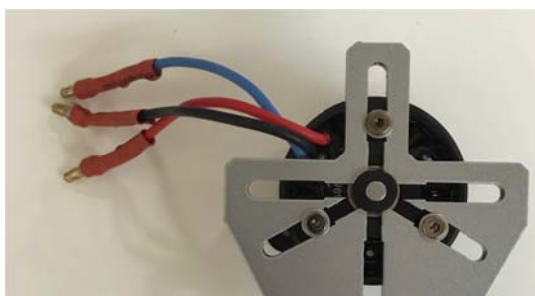


Figura 5.1.4. Fotografia dels pins que cal soldar al motor per connectar-lo amb el variador corresponent. Font: Font pròpia.

5.2. Variadors

Els variadors triats per aquest projecte són els *DYS Simonk 40A 2-6s*. S'han escollit per les següents raons:

- Poden suportar un corrent continu màxim de 40A, com que el sistema d'alimentació del dron pot subministrar un màxim de 133A per als sis motors, això indica que per cada variador hi circulen un màxim de 22 A.
- Poden suportar voltatges de fins a 24 V.
- Són assequibles econòmicament.



Figura 5.2.1. Variador *DYS Simonk*.

Font: [FLYINGTECH](#)

Per alimentar els sis variadors es connecten en paral·lel a la sortida del convertidor AC-DC. Es solda amb estany els sis cables de corrent al cable de corrent de sortida del convertidor. El cable de senyal de cada variador es connecta al seu port corresponent a la controladora *Naza M V2*, a través de la cavitat interior dels braços com es pot veure a la *Figura 5.2.2*.

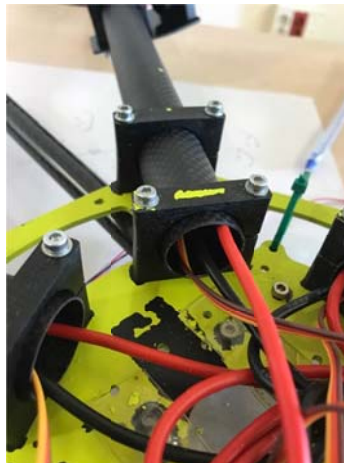


Figura 5.2.2. Fotografia del cable de senyal del i els cables de potència del variador entrant per la cavitat interior del braç. Font: Font pròpia.

Els variadors es subjecten al braç usant unes brides negres, tot i que aquesta és una unió provisional que cal millorar. Podem veure la unió a la *Figura 5.1.2* de l'apartat anterior.

5.3. Controladora

La controladora *Naza M V2* va ser l'escollida per al projecte de dron captiu. Pertany a l'empresa DJI, segurament, la més famosa en la indústria dels drons. És una controladora que es caracteritza perquè fa que el dron sigui molt estable, no es mogui de manera brusca, sigui més fàcil d'enlairar sense desestabilitzar-se i el vol sigui molt suau. També avisa quan hi ha errors que posen en perill el dron. Tot això la converteix en una de les controladores més segures, i en aquest projecte és el que interessa, ja que no es tracta d'un dron de cursa

sinó d'un dron que s'ha de mantenir estable i corri els mínims riscos possibles, degut a que hi ha elements cars.

Parts de la controladora:

- Controladora: És el cervell del multicòpter. On hi van a parar totes les connexions.
- LED: És un LED amb una sortida USB per connectar la controladora a l'ordinador. La llum del LED indica què li passa al multicòpter en tot moment i el mode de vol en que es troba.
- GPS: Receptor de la senyal GPS.
- PMU: Alimenta la controladora i s'hi poden connectar diferents accessoris i enviar informació a la controladora, com el GPS.

En quant a les connexions de la controladora, es veuen resumides a la *Figura 5.3.1*:

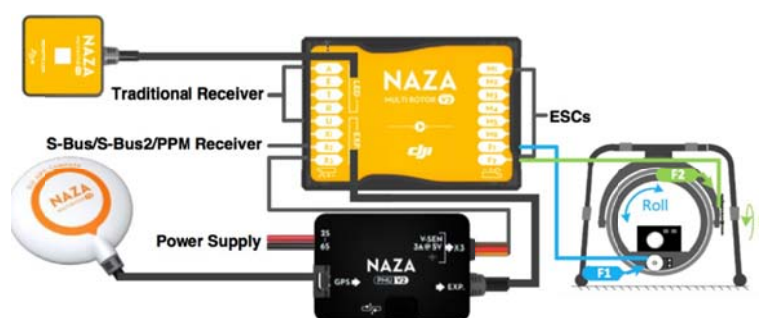


Figura 5.3.1. Connexions Naza M V2. Font: DJI

La controladora inclou els següents modes de vol:

- Manual*: L'usuari té el control estricte del multicòpter. Es recomana per a pilots ja experimentats, ja que pot ser perillós. No hi ha protecció de cops de vent, ni vertical ni horitzontal.
- Attí*: El multicòpter mantindrà la seva alçada si no es fa servir el RC. Però el vent pot moure'l horitzontalment, ja que no utilitza GPS.
- GPS*: El multicòpter es mantindrà en la seva alçada i posició en el pla si no es fa servir RC. És el mode més segur si hi arriba senyal GPS.
- Failsafe*: No és ben bé un mode, és el que fa el dron quan es detecta un error o un risc. El dron automàticament baixarà fins a aterrar. És una mesura de seguretat.

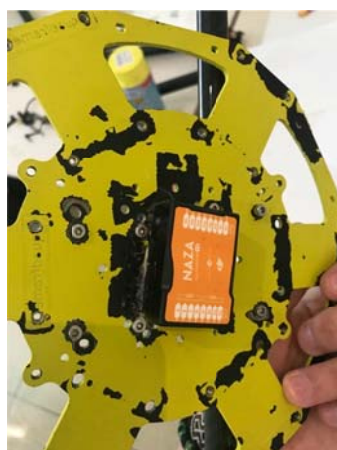


Figura 5.3.2. Fotografia de la controladora fixada al centre del xassís inferior. Font: Font pròpia

La controladora s'enganxa amb silicona al centre de la tapa inferior del xassís com es pot veure a la *Figura 5.3.2*. D'aquesta manera queda totalment protegida. La silicona evita les possibles vibracions de la controladora i la deixa totalment subjecta. La tapa superior del xassís té un forat circular al centre de manera que es pot observar la fletxa de la controladora que indica la direcció del GPS cosa molt important perquè el dron s'orienti bé i sàpiga la posició i orientació exacte en cada moment.

5.3.1. Configuració de la controladora

Per tal de poder configurar la controladora es necessita el programa gratuït *Naza Assistant*. Els passos que cal seguir són els següents:

-Cal descarregar el programa i els *drivers* per l'ordinador des de la pàgina de DJI, són gratuïts. Una vegada instal·lat tots els components ja es pot obrir el programa.

-Obrir el transmissor, en aquets cas el comandament a distància *Futaba*, tot seguit connectar el dron amb l'ordinador via USB i finalment, connectar l'alimentació del dron.

-Si s'han seguit els passos correctament apareixerà un cercle il·luminat de color verd fent pampallugues a la part inferior del programa d'ordinador, i es pot continuar programant el dron. Si el cercle apareix de color gris sense llum o del color vermell caldrà apagar el dron i tornar a començar el procediment.

-És important que el primer que es faci sigui anar al menú d'"Upgrade" i mirar si hi ha alguna actualització ja sigui a la controladora, GPS o al "IMU firmware". És important tenir instal·lada la última versió ja que amb el temps es van detectant problemes i hi han actualitzacions que els solucionen.

-Una vegada actualitzat, cal introduir els paràmetres del dron passant per els diferents menús obligatoris dins de la pestanya "Basic": "Aircraft, Mounting and RC."

-*Aircraft*: En aquesta pestanya només cal introduir l'arquitectura del dron, en aquest projecte, Hexa-Rotor V. Es pot veure a la *Figura 5.3.1.1* un esquema de cada configuració amb el sentit de gir de cada motor.

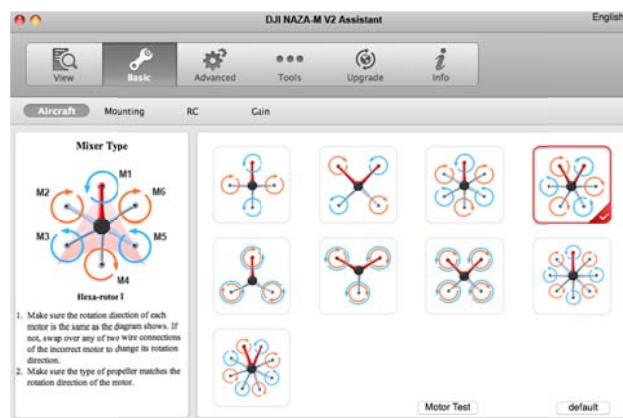


Figura 5.3.1.2. Fotografia del menú per introduir la posició del GPS. Font: Font pròpia.

-*Mounting*: Aquí cal introduir la posició exacta del GPS respecte el centre de la controladora. És un pas molt important perquè d'això depèn que la controladora s'orienti bé i obtingui dades correctes de l'orientació del dron a temps real.

En el cas d'aquest projecte les coordenades són les següents:

X=3.5cm

Y=1cm

Z=-10.5cm

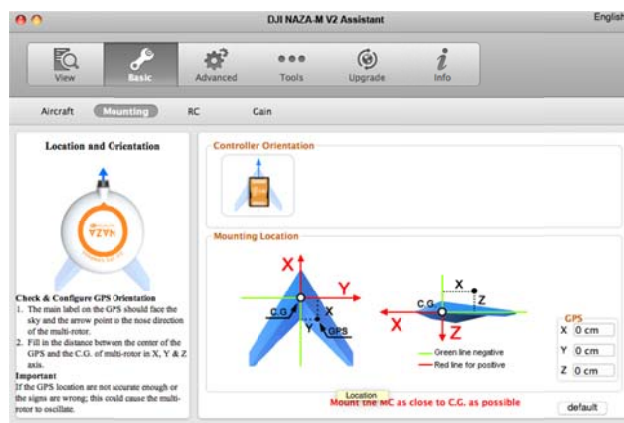


Figura 5.3.1.1. Fotografia del menú per seleccionar el tipus d'aeronau. Font: Font pròpia.

-*RC*: Aquesta pestanya és també una de les més importants. S'usa per calibrar el comandament a distància.

Primer, cal indicar quina és la modalitat amb la que s'ha connectat el receptor a la controladora: *Tradition*, *D-Bus* o *PPM*. En el cas d'aquest projecte es va usar la modalitat *D-Bus*.

Després, cal moure els *sticks* del comandament en totes les direccions i fins al màxim, així es podrà saber quin és el punt on es té aquests quiets i al mig, en posició neutre. Per la mateixa raó, també cal moure totes les palanques.

Alhora, es defineix la direcció del moviment dels sticks, és a dir, que quan pugin (és a dir s'allunyin del cos del pilot) es tradueixi en augment (del *throttle*) o en inclinació cap endavant.

A sota, es defineix un mode de vol per a cada posició de les palanques del comandament. En el cas d'aquest projecte es van posar els següents modes de vol:

- Per la palanca SF en la posició de baix:
 - Amb la SE a dalt: *Failsafe*.
 - Amb la SE al mig: *Failsafe*.
 - Amb la SE a baix: *Failsafe*.
- Per la palanca SF en la posició de dalt:
 - Amb la SE a dalt: *Failsafe*.
 - Amb la SE al mig: *Atti*.
 - Amb la SE a baix: *GPS*.

Aquesta configuració respon a que si el pilot està realitzant un vol normal i té problemes pugui activar d'una manera ràpida el *Failsafe* fent que el dron aterri només canviant la palanca SF (ja que aquesta palanca només te dues posicions) sense haver de pensar i de manera automàtica.

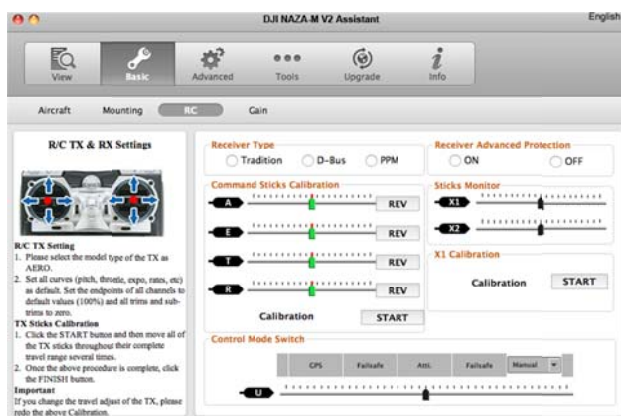


Figura 5.3.1.3. Fotografia del menú per calibrar el comandament a distància i assignar modes de vol.
Font: Font pròpia.

Si després es vol modificar altres paràmetres, més avançats, per mirar d'adaptar el comportament del dron a la tasca que es vulgui realitzar, es pot fer des de la pestanya d'“Advanced”, i anar passant per les diferents opcions: “Settings of Motor, FailSafe, Gimbal, Low-Voltage Alert, and Flight Limits”.

-Settings of Motor. Aquí es pot modificar la velocitat dels motors just després de que s'encenguin. Els motors *brushless*, són difícils d'encendre ja que presenten un pic alt d'intensitat, per tant en aquest projecte, es va posar la velocitat de gir al mínim. Així el pic d'intensitat produït a l'encendre els motors és menor.

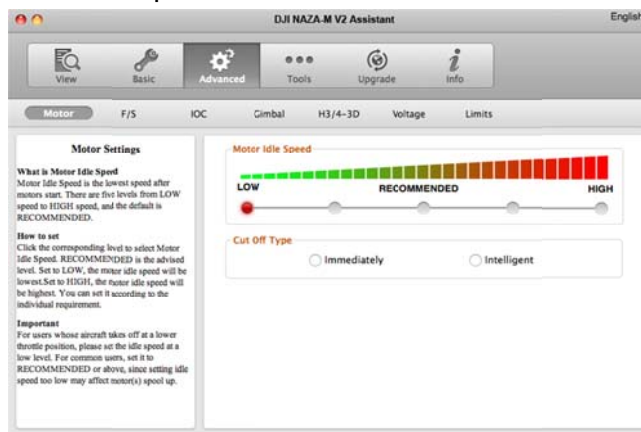


Figura 5.3.1.4. Fotografia del menú per regular la velocitat de gir dels motors a l'encendre el dron. Font: Font pròpia.

-FailSafe: Aquesta opció, tot i estar a l'apartat d'avançades, és molt important. El *FailSafe* s'activa quan el dron perd el senyal del radio control, cosa que podria ser molt perillosa. El programa deixa escollir entre dues opcions: que el dron torni al punt d'enlairament i a allà aterri, o que directament al perdre el senyal aterri en aquell punt.

El *FailSafe* també el podem activar amb el comandament, per si es perdés el control del dron o si no es volgués aterrar-lo manualment.

En el cas d'aquest projecte es va configurar el *Failsafe* perquè aterrés en el punt on es trobés quan s'activés.

-*Gimbal*: Aquí es poden calibrar els motors del gimbal que incorpori el dron. En el cas d'aquest projecte no es va incorporar cap.

-*Low-Voltage Alert*: Aquí es pot introduir límits al voltatge de la bateria, un primer límit, fent que si baixa d'un cert valor avisi (mitjançant un pitador i amb la llum que emet un LED). El segon límit, faria aterrar el dron per evitar que la bateria s'esgotés i el dron es precipités cap al terra.

Aquesta opció permet connectar una bateria totalment carregada i calibrar-la, fent que la controladora reconegui aquell voltatge com el màxim que pot contenir la bateria que s'usi i així evitar introduir manualment un valor que podria no ser del tot cert.

En el cas d'aquest projecte, com el sistema d'alimentació és un diferent a una bateria LiPo, s'ha desactivat.

Tot i això, es va programar una altra configuració per si es fan vols únicament amb bateria, amb uns límits establerts per una bateria LiPo 6S.

-*Flight Limits*: En aquesta pestanya s'introdueixen els límits de vol del dron, tant d'alçada respecte el punt d'enlairada com de la distància horitzontal de l'emissora. En cas que es superin aquests límits, el dron segueix sent controlable però només per retornar dins dels límits marcats.

En el cas del projecte, es van establir uns límits de 2000m tant per l'altura com per la distància horitzontal respecte l'emissora. A aquests límits mai s'hi arribarà, ja que el cable del dron és de 15 metres, però es van introduir uns valors suficientment grans perquè aquesta protecció mai molesti.

-És interessant guardar la configuració del dron en un document (que pot generar el mateix programa) per així poder anar canviant alguns paràmetres però tenint sempre una còpia de seguretat d'alguna configuració bona anterior.

-Per finalitzar el procés, es treu el connector USB directament i les dades queden guardades a la controladora.

El manual del *Naza M V2 Assistant* es troba a l'annex.

5.4. Cable

L'elecció del cable que connecta l'inversor i el convertidor AC-DC és una part molt important d'aquest projecte, ja que al ser molt llarg pot influir en el pes que el dron ha d'aixecar. S'ha d'intentar buscar el cable amb el mínim pes possible que sigui capaç de suportar la intensitat que es necessita per alimentar el dron.

S'ha de tenir en compte que com més gran sigui la intensitat, més gran ha de ser la secció del cable. I com més gran sigui el voltatge, més recobriment aïllant necessita el cable.

El cable que es necessita ha de subministrar al convertidor AC-DC un corrent altern de 13,8 A a una tensió de 220V.

Degut a que el convertidor subministra una potència màxima de 3.000W, el corrent màxim que pot circular és de 13,8A:

$$P = V \times I$$

$$I = \frac{3000}{220} = 13,8A$$

Aquest cable serà bifàsic ja que ha de conduir corrent alterna, així doncs es tindrà dues fases i un neutre. Degut a que és bifàsic, la intensitat màxima que podrà circular per cada fase serà la meitat de la total, és a dir, 6,9 A.

Els cables elèctrics normalment poden ser de dos materials; alumini o coure. Els dos tenen els seus avantatges i inconvenients. Per exemple, el coure és més conductor que l'alumini però també té major densitat, per tant, s'ha d'escollir quin dels dos materials té major conductivitat en funció del seu pes.

Es pot observar a la *Taula 5.4.1* que l'alumini té més del doble de conductivitat elèctrica en funció del seu pes que el coure, per tant, aquest ajuda a optimitzar més el pes del cable del dron captiu. Tot i així, l'empresa per motius econòmics va optar per comprar cables amb conductor coure, ja que són més barats.

Material	Densitat	Conductivitat elèctrica	Conductivitat/densitat
Coure	8.690 Kg/m ³	5,96·10 ⁷ S·m ⁻¹	6.651 S·m ² /Kg
Alumini	2.698,4 Kg/m ³	3,78·10 ⁷ S·m ⁻¹	14.014 S·m ² /Kg

Taula 5.4.1. Taula resum de les propietats del cable depenent del seu material. Font: Font pròpia.

Existeixen unes taules per saber quina és la secció del cable en funció del corrent que ha de suportar, no obstant, l'empresa on s'ha realitzat el projecte es vol assegurar de la veracitat d'aquestes taules per poder reduir al màxim la secció, i en conseqüència, el pes del cable. A continuació a la *Taula 5.4.2* es pot veure la taula en qüestió:

Secció de Cable	Intensidad Màxima
0,5 mm ²	6 A
0,75 mm ²	9 A
1 mm ²	11 A
1,5 mm ²	14 A
2 mm ²	16 A
2,5 mm ²	20 A
4 mm ²	28 A
6 mm ²	37 A
8 mm ²	48 A
10 mm ²	53 A
16 mm ²	75 A
25 mm ²	100 A
35 mm ²	125 A
50 mm ²	160 A

Taula 5.4.2. Taula resum de secció de cable de coure en funció de la intensitat màxima que hi circula. Font: COELECTRIX

Per la intensitat màxima que pot arribar a circular pel cable, 6,8A; aquesta requereix que la secció del cable sigui de $0,5 \text{ mm}^2$ o de $0,75 \text{ mm}^2$.

Així doncs, a part de realitzar proves amb cables d'aquestes seccions també es realitzen proves amb seccions de $2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ i $0,3 \text{ mm}^2$, per veure si es pot optimitzar encara més el pes. La *Taula 5.4.2* indica que la secció que s'hauria d'utilitzar és la de $0,75 \text{ mm}^2$.

Com es veurà en l'apartat de proves experimentals, per tal d'aconseguir el mínim pes sense arribar a temperatures de cable inadmissibles, s'ha escollit alimentar el convertidor AC-DC amb un cable de secció $0,5 \text{ mm}^2$.

5.5. Estructura

Abans de realitzar el muntatge de l'estructura, l'empresa va demanar dissenyar un model amb *SolidWorks* per tal de veure si era possible la seva construcció, l'aspecte final que tindria i el seu pes aproximat. Al model de *SolidWorks* es va introduir el pes de cada component per tal de poder realitzar aquesta aproximació.

A més, l'drone BCN tenia interès en la realització d'aquest model per en un futur poder introduir modificacions i millores.

A les *Figura 5.5.1* i *5.5.2* es poden veure fotografies del disseny després de renderitzar el model de *SolidWorks* perquè les fotografies quedin millor.



Figura 5.5.1. Fotografia del model realitzat amb *SolidWorks*. Font: Font pròpia.



Figura 5.5.2. Fotografia del model realitzat amb *SolidWorks*. Font: Font pròpia.

A continuació a les *Figures 5.5.3*, *5.5.4* i *5.5.5* es mostren uns esquemes fets amb *SolidWorks* de les principals cotes en les tres vistes del dron. Totes les cotes estan expressades en mil·límetres.

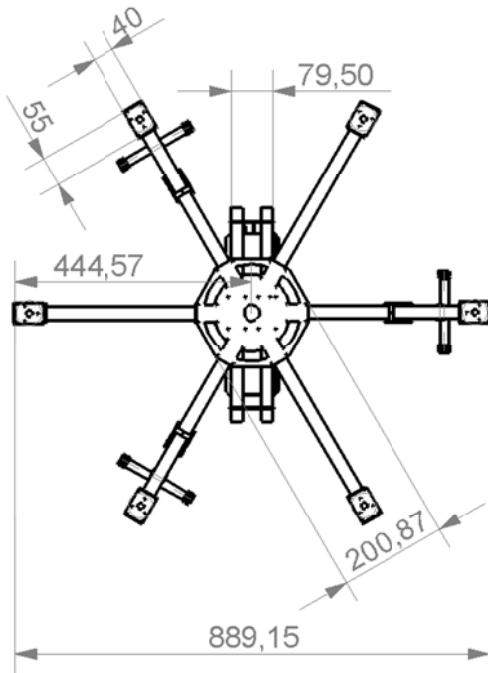


Figura 5.5.3. Fotografia de la vista superior amb algunes cotes. Font: Font pròpia.

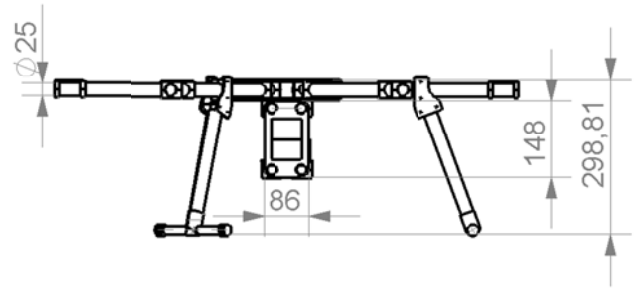


Figura 5.5.4. Fotografia de la vista lateral amb algunes cotes. Font: Font pròpia.

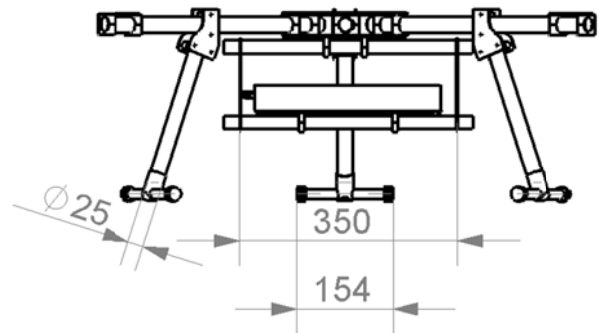


Figura 5.5.5. Fotografia de la vista de perfil amb algunes cotes. Font: Font pròpia.

Una vegada validat el model, amb el vist i plau de l'empresa es va procedir al muntatge.

El multicòpter d'aquest projecte, com ja s'ha vist, té forma hexacòpter, és a dir, té sis braços, amb un motor i un variador per cada braç. Com es pot veure a la *Figura 5.5.6*, l'estructura és de fibra de carboni i fibra de vidre.



Figura 5.5.6. Fotografia de l'estructura del dron juntament amb el cablejat de potència que alimenta els variadors.
Font: Font pròpia.



Figura 5.5.7. Fotografia de la part central del dron amb el cablejat. Font: Font pròpia.

La tapa o xassís, és a dir, la part que protegeix la controladora i aguanta els braços està feta de fibra de vidre. Es va triar aquest material ja que tot i perdre resistència respecte la fibra de carboni, també es perdia pes, i com que és un dron professional que no està destinat a curses ni altres vols de risc, no hi ha problema en que no sigui el màxim resistent, ja que no ha de rebre gaires cops.

A la *Figura 5.5.7* es pot veure la part central del dron amb el cablejat, preparat per ser tancat amb la tapa superior.

Els braços, en canvi, estan fets de fibra de carboni, ja que aquests si que han de ser molt resistents perquè els motors són molt potents. Els braços tenen forma de tub i per dins hi circulen tant el cable de senyal com els d'alimentació. Cada braç mesura 34 centímetres de longitud i tenen un diàmetre exterior de 25 mil·límetres.

El multicòpter consta de tres potes situades a tres braços. Aquestes també són tubs de fibra de carboni, i tenen un mecanisme per plegar-les per tal de que el multicòpter sigui molt més fàcil de transportar. A la *Figura 5.5.8* es mostra l'estructura del dron en el seu conjunt.



Figura 5.5.8. Fotografia amb la vista superior del dron. Font: Font pròpia.



Figura 5.5.9. Fotografia amb la vista lateral del dron. Font: Font pròpia

A l'extrem dels braços, on s'hi troba el motor hi ha una placa per tal de subjectar i mantenir horitzontal el motor, juntament amb dos elements anti-vibració, ja que una de les coses més importants és que ni els motors ni la controladora tinguin vibracions.

A l'altre extrem dels braços també hi ha quatre elements anti-vibració, per eliminar la vibració entre la tapa i el braç, fet que podria traslladar la vibració cap a la controladora i el multicòpter es desestabilitzaria.

Els elements anti-vibració estan fets de plàstic, de manera que són molt lleugers. Tots aquests elements consten de forats on s'hi col·loquen caragols per tal que agafin bé el braç.

A la part inferior de les potes, és a dir, la part que toca el terra, hi ha una estructura amb espuma per tal de fer lleuger l'aterratge sense fer mal bé la pota. El muntatge es pot veure a la *Figura 5.5.10*.



Figura 5.5.10. Fotografia de la pota del dron on s'hi pot veure els complements d'espuma a la part inferior. Font: Font pròpia.

A sota de la part inferior de xassís hi ha el suport dels convertidors collats a la part central. Aquesta també està feta íntegrament de fibra de carboni. A les *Figures 5.5.11 i 5.5.12* es pot veure l'estructura del suport dels convertidors amb detall.



Figura 5.5.11. Fotografia del suport dels convertidors, vista lateral. Font: Font pròpia



Figura 4.5.12. Fotografia del suport dels convertidors, vista del perfil. Font: Font pròpia

5.6. Font d'alimentació

Pel que fa a la bateria del terra, es va escollir un model de plom-àcid per a cotxe, degut a que té un preu poc elevat i tenen molta capacitat.

La bateria escollida és el model Energy 72Ah 12V. Subministra corrent continu a 12V, una capacitat de descarregar 72 ampers durant una hora, i sabent que el dron captiu consumeix aproximadament 45Ah, el dron pot estar més d'una hora i mitja volant sense necessitat de recanvi de bateria.



Figura 5.6.1. Bateria Energy de plom-àcid.
Font: [BATERIA FACIL](#)

Aquest inversor també està situat al terra, així que tampoc importa el seu pes, i es va escollir un inversor barat degut a que no cal optimitzacions de pes i hi ha una gran varietat d'aquests convertidors al mercat. Amb aquest canvi a corrent altern de 220V fa que es pugui disminuir molt la secció del cable que el connecta al convertidor que està

acoblat al dron perquè la intensitat és molt petita, i així es pot disminuir el pes que ha d'aixecar el dron. Alhora es redueixen les pèrdues.

L'inversor d'aquest projecte és de la marca EnRise, de 3000W però que en pot suportar fins a 6000W de pic, es pot veure a la *Figura 5.6.2*:



Figura 5.6.2. Fotografia del inversor usat. Font: [AMAZON](#)

Per últim, el convertidor AC-DC està acoblat al dron, fet que comporta que s'ha de disminuir el màxim possible el seu pes. Aquest és l'encarregat de subministrar-li al dron un corrent continu de 24V a partir del corrent alterb de 220V que li proporciona l'inversor. És el substitut de la bateria Li-Po que necessita el dron convencional, és a dir, no captiu.

En aquest cas, subministra un corrent a un voltatge semblant al 6s, 22,2V, que és el que necessiten els motors i variadors d'aquest prototip. El problema d'aquest tipus de convertidor (AC-DC) és que són cars i pesen molt, i en molts casos s'han de fer a mida per una empresa externa especialitzada en convertidors. L'empresa on s'ha realitzat aquest projecte, ja disposava d'un convertidor AC-DC de sortida de 1600W i 24V. Concretament, el model és l'RSP-1600-24 de l'empresa Mean Well.

Aquest convertidor entrega un màxim de corrent continu de 67,5A a 24V, si es sobrepassa aquest corrent el convertidor talla el subministrament com a mesura de protecció per tal que no es sobreescalfi o s'arribi a cremar. El seu pes és de 2,1 Kg, com es pot veure, és un pes força rellevant ja que comporta més o menys el pes d'un terç del dron. Es va estudiar la manera d'aconseguir un altre convertidor amb menys pes, però el mercat n'ofereix de molt més cars que aquest. Es va triar aquest al veure que en relació preu-pes era el més rentable.

Es pot veure a la *Figura 5.6.3* el convertidor escollit:



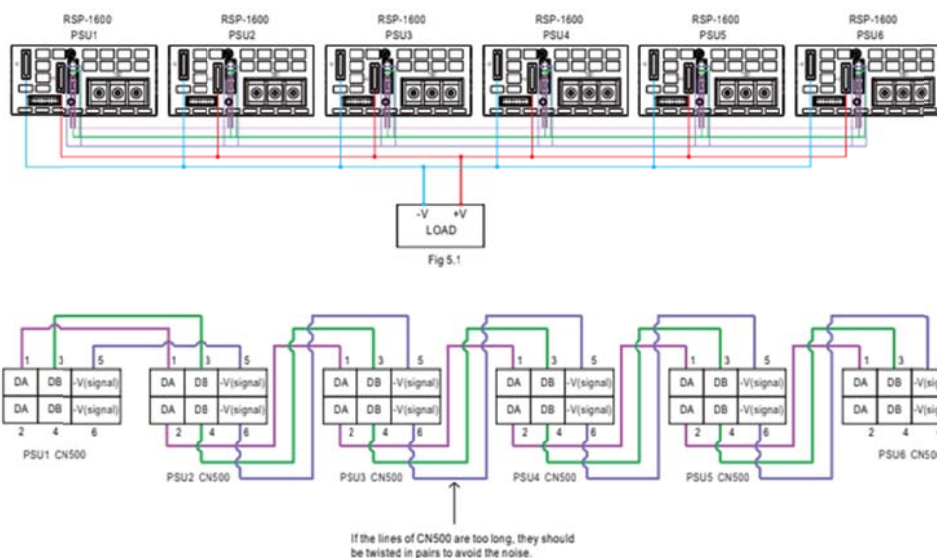
Figura 5.6.3. Convertidor RSP-1600-24.

Font: [MEAN-WELL](#)

En la realització de la primera prova de vol, com s'explica posteriorment, es va arribar a la conclusió de que seria necessari un convertidor més potent o un convertidor idèntic a l'RSP-1600-24 connectat en paral·lel per a que el dron pogués armar-se i volar. Es va optar per l'opció de connectar un altre RSP-1600-24 en paral·lel amb l'anterior.

Amb l'ajuda de la fitxa tècnica del convertidor RSP-1600-24 es procedeix a la connexió en paral·lel. El pes del dron passa a ser de 8,37 Kg, ja que se li sumen aquests 2,1 Kg del segon convertidor en paral·lel.

La *Figura 5.6.4* mostra la connexió dels RSP-1600-24 en paral·lel, com es veu es poden connectar fins a sis convertidors en paral·lel:



La

fitxa

Figura 5.6.4. Esquema de connexions dels convertidors en paral·lel. Font: [MEAN-WELL](#)

tècnica del convertidor es troba a l'annex.

En la *Figura 5.6.4* es mostra com es connecten els cables de senyal per connectar els dos convertidors en paral·lel. Estan assenyalats amb els colors verd, lila i blau.

Pel que fa al cablejat de potència, les entrades i sortides del convertidor que es vol col·locar amb l'altre convertidor es connecten en paral·lel amb les respectives entrades i sortides tal i com mostra la *Figura 5.6.4*.

Al realitzar aquesta connexió del dos convertidors en paral·lel, el fabricant assegura en la fitxa de característiques del convertidor Mean Well RSP-1600-24 que el corrent de sortida es redueix un factor de 0,9, i per tant, en conseqüència la potència també, ja que en la connexió en paral·lel la tensió es manté en el seu valor:

$$\text{Corrent de sortida} = 67,5 \cdot n^{\circ} \text{ convertidors} \cdot 0,9$$

$$\text{Potència de sortida} = 1600 \cdot n^{\circ} \text{ convertidors} \cdot 0,9$$

Així doncs, al realitzar la connexió en paral·lel el conjunt de dos convertidors no són capaços de subministrar una potència del doble de 1600W, sinó que aquest ha està

multiplicat pel factor de 0,9. D'aquesta manera s'obté que aquest conjunt és capaç d'entregar una potència de 2.880 W.



Figura 5.6.5. Connexió dels convertidors en paral·lel. Font: Font pròpia.

A continuació, a la *Figura 5.6.5* es pot veure el sistema en el seu conjunt i el dron captiu un dels dies que es va anar a fer-lo volar. Es veu clarament la bateria connectada a l'inversor, el fusible i el cable fins on arriba al convertidor del dron.

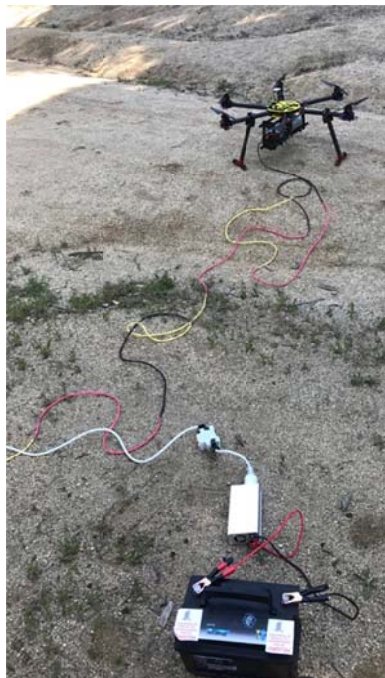


Figura 5.6.6. Fotografia del sistema d'alimentació per al dron captiu un dels dies que es va anar a provar-lo. Font: Font pròpia.

A continuació, a la *Figura 5.6.7* es pot veure un esquema del sistema d'alimentació captiu:

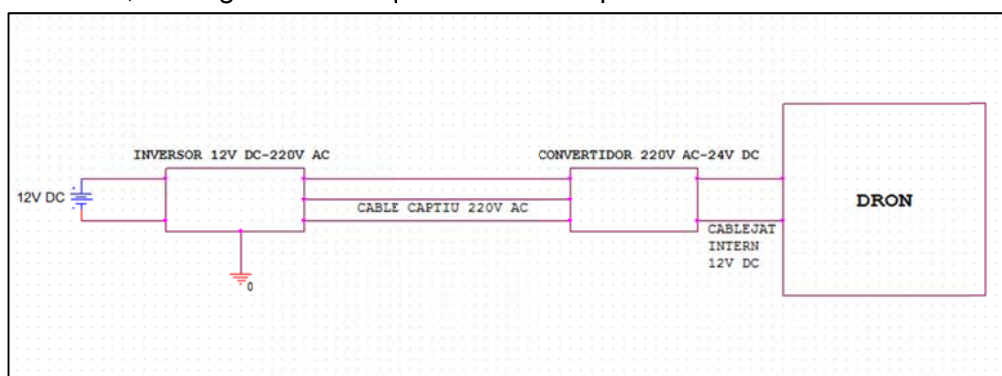


Figura 5.6.7. Esquema del sistema d'alimentació captiu. Font: Font pròpia.

5.7. Receptor, emissora i GPS

Pel que fa al comandament a distància per aquest projecte és de la marca Futaba, en concret el model T14SG. És un model molt professional i el seu preu és força elevat.

El comandament a distància disposa de 14 canals que es poden usar per governar drons, helicòpters i vaixells. També té una gran pantalla il·luminada i un botó tàctil per desplaçar-se per aquesta.

Està alimentat per una bateria de NiMH de 7,2V que té una bona durada d'ús, tot i que és molt recomanable que sempre abans de fer vols llargs sigui carregada.

El sistema d'emissió que usa és el FassTest (2,4GHz).

Pot memoritzar fins a 30 models d'aeronau diferent, cosa molt útil si s'utilitza el mateix comandament per més d'un dron.



Figura 5.7.1. Emissora Futaba T14SG.

Font: [WALLAPOP](#)

Per al receptor, com s'ha comentat anteriorment, la tria de l'emissora determina el receptor que s'ha d'usar. En el cas d'aquest projecte, el receptor és el Futaba R7008SB.

Aquest model pot provocar fins a 32 tipus de telemetries de dades a fins a més de 2000 metres de distància

El primer pas que cal fer és enllaçar el receptor i el comandament, prement una petita tecla al dors del receptor.

Una vegada l'emissora ha detectat el receptor cal programar els canals del comandament

per tal d'assignar aquells que interessin a les funcions més habituals del dron. El receptor està connectat a la controladora de manera bi-direccional a través del seu port SBus2. Cal que sigui alimentat entre 3.5V i 8.8V i alhora d'instal·lar-l'ho és important que les antenes estiguin ben subjectes i que hi hagi 90 graus entre elles. El manual del fabricant del receptor i emissora es troben a l'annex.



Figura 5.7.2. Receptor Futaba R7008SB.
Font: [MERCADORC](#)

Per últim, el GPS: En el cas d'aquest projecte, la tria de la controladora NazaV2 va determinar també el model de GPS que s'ha d'usar. Quan es compra la controladora en qüestió ja està inclòs el GPS.

És molt important que l'orientació del GPS sigui la mateixa que la controladora, és a dir, a part de que estiguin el màxim d'horizontals respecte el terra i ben subjectats (sense cap vibració), cal que unes petites fletxes que tenen pintades estiguin apuntant al mateix lloc, és a dir, mateixa direcció i sentit.

A la *Figura 5.7.3* es pot veure el receptor unit al xassís amb silicona per la part inferior per reduir les vibracions i amb una brida per assegurar que no es mou.

A la *Figura 5.7.4* es pot veure el GPS que es fixa a través d'un dels cargols de la part superior del xassís i amb silicona per evitar vibracions.



Figura 5.7.3. Fotografia la unió del receptor amb el xassís. Font: Font pròpia.

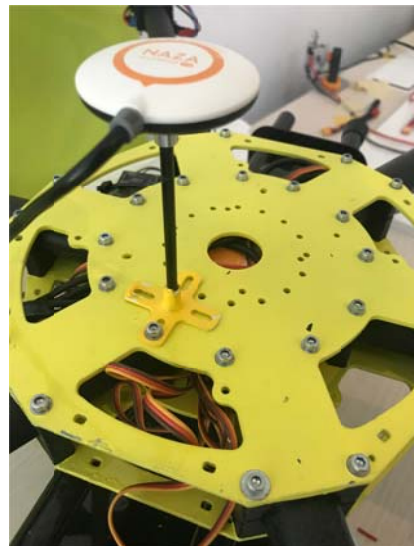


Figura 5.7.4. Fotografia de la unió del GPS amb el xassís. Font: Font pròpia.

5.8. Sistemes de seguretat

5.8.1. Bateria Supletòria

Un dels principals problemes que es poden tenir volant amb el sistema d'alimentació captiu és que aquesta deixi de subministrar energia al dron, ja sigui perquè un mal vol del dron faci desconnectar el cable o per un mal funcionament d'algun dels seus components.

És per això que s'ha ideat un sistema per evitar possibles danys al dron, al pilot o a terceres persones:



Figura 5.8.1.1. Bateria LiPo SLS Magnum V2. Font: [SLS](#)

Per poder prosseguir el vol del dron en cas de que el sistema captiu deixi de funcionar s'ha connectat una bateria supletòria (6S LiPo molt lleugera i amb 3500mAh) en paral·lel. Aquesta bateria pot proporcionar uns 2 minuts d'autonomia al dron, que són més que suficients per aterrar-lo. Sempre quan es faci volar el dron, es tindrà connectat a la bateria un mediador de voltatge de les cel·les, que indica en tot moment el potencial d'aquestes i es posa a emetre soroll si baixa del 20%.



Figura 5.8.1.2. Mesurador de voltatge de celes LiPo. Font: Font pròpia

Perquè aquesta bateria no es descarregui mentre el dron estigui volant alimentat pel sistema captiu, cal que el voltatge d'aquesta sigui inferior al que proporciona el convertidor a la seva sortida per tal de que en condicions normals sigui el convertidor el qui alimenti. El voltatge de la bateria és de 22,2V i el que proporciona el convertidor a la seva sortida de 24V.

Com tampoc convé que el sistema captiu alimenti la bateria, es col·loca un díode 150 KSR 20 150A 200V al pol positiu d'aquesta i al pol positiu del convertidor. Així s'evita que quan una font d'alimentació sigui l'encarregada d'alimentar el dron no hi hagi corrent que flueixi cap a l'altra font, evitant que es facin malbé aquestes.

Per saber si el dron està funcionant amb el sistema captiu o amb la bateria es col·loca un pitador, que emet so si detecta que l'alimentació prové de les cel·les de la bateria, així el pilot sap que hi ha hagut un problema i pot fer aterrar el dron immediatament.

A continuació, les *Figures 5.8.1.4 i 5.8.1.5* de l'esquema elèctric i una fotografia d'aquest:

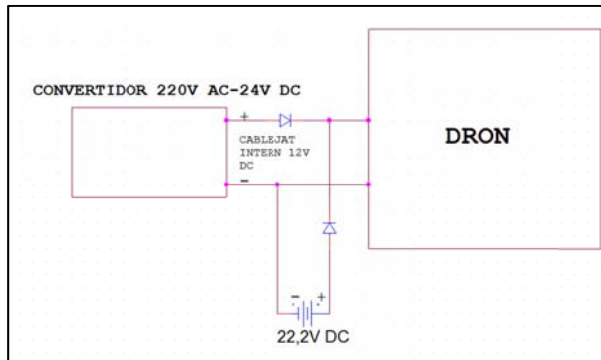


Figura 5.8.1.4. Esquema elèctric del sistema. Font: Font pròpia.



Figura 5.8.1.5. Fotografia del muntatge final. Font: Font pròpia

Muntant el sistema de la bateria supletòria el sistema d'alimentació és el següent:

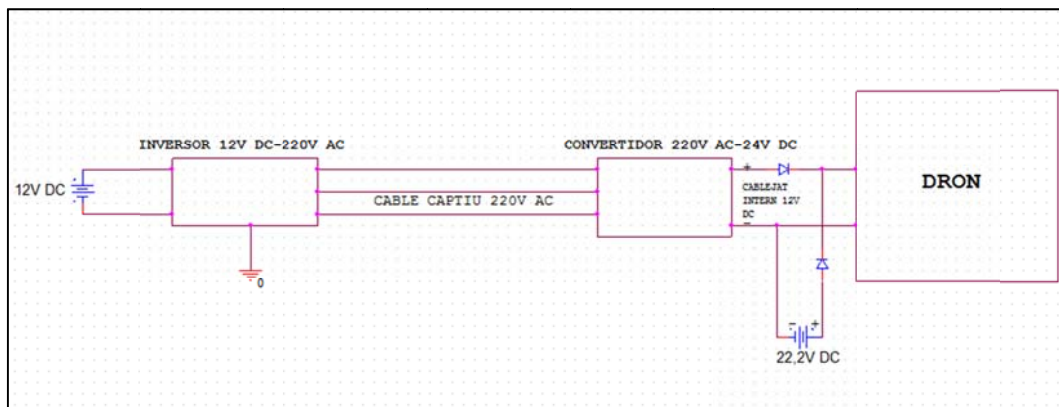


Figura 5.8.1.6. Esquema del sistema d'alimentació complet. Font: Font pròpia.

5.8.2. Interruptor diferencial

Sempre que es tinguin voltatges alts, com el cas d'aquest projecte, es necessiten elements de protecció extras per tal d'evitar possibles accidents. En el cas excepcional de que el cable trenqui o s'esquerdi, podria deixar al descobert el conductor elèctric, molt perillós pel contacte.

En aquest cas, s'ha instal·lat un interruptor diferencial de 30mA a la sortida del convertidor 220VAC-12VDC protegint el tram de cable de 220V.

En cas que l'interruptor detecti una fuga superior a 30mA talla el corrent per tal d'evitar accidents. Tot i així, sabent que el dron captiu compta amb una bateria supletòria, tallant el corrent de la font d'alimentació, el dron no cau al buit.

Tot seguit, a la *Figura 5.8.2.1* es pot veure una fotografia del muntatge final.



Figura 5.8.2.1. Fotografia del muntatge final. Font: Font pròpia

La distribució final del pes del dron és la següent, com es pot veure a la *Taula 5.1*:

Component	Pes (Kg)
Esquelet dron + cablejat intern + variadors	2,495
2 convertidors RSP-1600-24	4,2
Cable trifilar 0,5 mm ² 15 metres	0,63
Conjunt Naza M V2	0,095
6 motors DJI 4114 amb hèlices	0,95
Total	8,37

Taula 5.1. Taula resum de la distribució de pesos final.

Font: Font pròpia

6. Proves experimentals

Per tal de realitzar les proves on es prenen mostres de temperatura cal muntar un termòmetre que sigui fiable i pugui proporcionar dades a temps real.

La base del muntatge ha estat una *protoboard* i una placa d'*Arduino*.

El sensor (sensor de contacte) usat ha estat un específic per a motors elèctrics de la marca *Eagle Tree Systems*, molt barat i fàcil d'usar degut al llarg i flexible cable. Pot mesurar amb exactitud fins a 150 graus centígrads.

En les següents *Figures 6.1* i *6.2* es pot veure el muntatge realitzat:



Figura 6.1. Muntatge del termòmetre. Font: Font pròpia

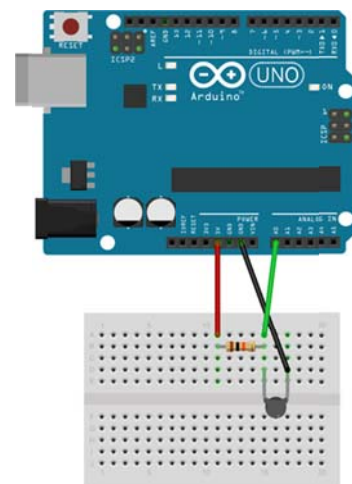


Figura 6.2. Esquema del muntatge del termòmetre. Font: Font pròpia.

El codi usat es pot veure a la *Figura 6.4*:

```

prueba$
#include <math.h>
const int Rc = 2200; //ohms
const int Vcc = 5; //volts

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  float raw = analogRead(A0); //llegim el pin A0 (bits)
  float V = raw / 1025 * Vcc; //transformem bits a volts
  //Serial.println(V); //visualitzem volts
  float T;
  T = (-66.311) * V + 303.3; //transformem de volts a temperatura
  Serial.println("T = ");
  Serial.println(T);
  Serial.println("C");
  Serial.println('\n');

  delay(1000);
}

```

Figura 6.4. Codi Arduino del termòmetre.

Font: Font pròpia

Per calibrar el termòmetre, es transformen els valors en bits (0-1024) llegits al pin A0 a volts (0-5V). Després, usant un mesurador de temperatura per infraroig que hi ha a l'empresa, es prenen 3 mesures de referència i s'emparellen amb els valors de voltatge que llegeix el sensor. Amb aquests tres punts, es grafiquen i es realitza una regressió lineal, obtenint l'equació que relaciona la variació de voltatge amb la variació de temperatura.

Connectant la placa *Arduino* a l'ordinador es pot saber en tot moment la temperatura que registra el sensor i modificar en qualsevol moment la freqüència de mostreig, cosa que és molt útil per poder adaptar el sensor als diferents experiments.

Per poder estudiar els motors en unes condicions el màxim similars a les de vol i poder controlar-los i conèixer el màxim de paràmetres d'aquest a temps real, s'usa un banc de motors.

El banc utilitzat és de la marca *RCBenchmark*, concretament el model 1520. Es van afegir dos components extres per tal de realitzar l'experimentació més completa: una pesa de 200g per tal de calibrar-l'ho i un mesurador òptic de rpm.

Amb la compra ja ve inclosa l'aplicació de control del banc, que es connecta a l'ordinador pel port USB.

Al rebre el paquet, el banc està desmuntat en les següents peces i cal muntar-l'ho:



Figura 6.5. Banc de motors desmuntat.

Font: [RCBENCHMARK](#)

Es va instal·lar un sensor òptic de revolucions tot i que el banc ja ve equipat amb sensor de revolucions elèctric però es volia obtenir el resultat més aproximat a la realitat i observar si hi havia discrepància entre aquests dos.

Com es veu a la *Figura 6.6*, el sensor de rpm es subjecta usant cargols al banc, a una distància de 5mm. Es va enganxar una cinta adhesiva de color blanc al rotor del motor, fent que el sensor registri cada vegada que canviava de blanc a negre i a la inversa, per així saber les voltes per minut a cada instant.



Pel que fa al muntatge de la placa del banc en sí, es veu a la *Figura 6.6*, que se li connecten els cables de potència per l'esquerra provinents de la font d'alimentació, pot suportar fins a 35V o bateries LiPo 8S.

Al centre de la placa es connecten els cables de senyal del variador just a sobre dels cables de senyal del sensor òptic de rpm, en els pins corresponents.

Figura 6.6. Muntatge del mesurador de rpm. Font: Font pròpia

El variador cal subjectar-lo mitjançant brides al banc, ja que queda penjant a l'aire i és perillós a causa de la força del vent que genera el motor.

Per últim els motors es subjecten a una placa dissenyada especialment per això, i aquesta al banc. Normalment, cada motor és collat per 4 cargols per la part de posterior usant arandelles per tal de fer més segura la unió. Es pot veure el muntatge a les *Figures 6.7 i 6.8*.



Figura 6.7. Muntatge del variador al banc de motors. Font: Font pròpia



Figura 6.8. Muntatge del motor al banc de motors. Font: Font pròpia.

El banc de proves es subjecta a una taula usant un sergent per tal de realitzar les proves amb seguretat.

6.1. Característiques dels motors

Els motors dels drons són els encarregats de transmetre un moviment rotatiu a les hèlices per a realitzar una força perpendicular al terra i en direcció cap a dalt per tal d'aixecar el dron, mantenir-lo a l'aire o realitzar qualsevol altra maniobra. Amb els variadors s'aconsegueix que els motors girin a una velocitat desitjada per tal de realitzar les maniobres corresponents. Aquests motors brushless poden estar alimentats amb diferents tensions contínues, en particular, a l'empresa on s'ha realitzat el projecte hi ha motors que s'alimenten amb 12V i altres amb 24V. Això és degut a que els primers no suporten una tensió superior a 14,5V, i els segons suporten fins a 29,6V. També es disposa de dos convertidors AC-DC diferents, un que entrega 12V i un altre que entrega 24V al dron, els dos en corrent continu. Així doncs, s'ha pogut realitzar proves amb tres motors diferents (dos de 12V i un de 24V).

Objectius i procediment:

L'objectiu d'aquestes proves és determinar quin motor és el més apte pel prototip captiu d'aquest projecte. Depenent de la força que poden realitzar els diferents motors, també es determina quin convertidor AC-DC va incorporat al dron per alimentar els motors. S'ha de tenir en compte que el dron pesa 8,37 Kg, i per tant, la força total màxima que han de realitzar els sis motors ha de ser superior al doble d'aquest pes, ja que el dron treballa amb els motors a meitat de potència, i a part, el dron s'equipa amb algun instrument per a realitzar alguna funció concreta, ja sigui una càmera, com una mànega amb una pistola per expulsar aigua.

Els fabricants proporcionen característiques nominals sobre els motors, ara bé, aquestes proves serveixen també per verificar si es compleixen les característiques de les respectives fitxes tècniques.

Les característiques proporcionades pels fabricants dels respectius motors estan resumits a la *Taula 6.1.1* a continuació:

Model	Pes (g)	KV (rpm/V)	Potència màxima (W)	Corrent màxim (A)	Força màxima (Kgf)	Diàmetre estator (mm)	Alçada estator (mm)
2312E	56	800	133	12	0,8	23	12
4114 PRO	150	400	666	30	2,5	41	14
MT 2216	63	810	110	10	0,95	22	16

Taula 6.1.1. Taula resum de característiques dels motors assajats. Font: Font pròpia.

Amb aquesta prova els factors que es volen conèixer són:

- La màxima força d'empenta de cada motor.
- El corrent que hi circula en tot moment.
- La potència màxima que pot assumir i les relacions d'aquesta amb la força d'empenta, la velocitat de rotació i l'eficiència, en tot moment.

Una vegada es coneixen els diferents factors es pot procedir a l'elecció de motors per al prototip i a la comparativa amb la fitxa tècnica proporcionada pels fabricants.

Material i muntatge:

- Banc de motors *RCBenchmark*.
- Motor *DJI 4114 PRO 400KV* amb hèlices *DJI R1552*.
- Motor *MT 2216* amb hèlices *DJI E310*.
- Motor *DJI 2312E* amb hèlices *DJI E310*.
- Variador *DYS SimonK 40A*.
- Variador *Emax SimonK 30A*.
- Convertidor *RSP 1600-24*.
- Convertidor *MP700 12V*.
- Cinta adhesiva.
- Ordinador.

Aquestes proves es realitzen amb el banc de motors de l'empresa, es connecta el motor en qüestió connectat amb el variador, i aquest connectat amb el corresponent convertidor AC-DC que es connecta a la xarxa. A l'estator del motor s'hi col·loca una cinta blanca adhesiva per tal que el banc de motors realitzi la lectura de la velocitat de rotació d'aquest.

El banc de proves i l'ordinador estan connectats amb un connector USB. Amb el programa *RCBenchmark*, que és el software que utilitza el banc de proves, es controla el senyal que se li dona al variador per controlar la velocitat de rotació del motor. Se li dona un senyal mínim, de manera que el motor no gira, fins a arribar a un senyal on el motor ja no pot girar més ràpid, és a dir, fins a arribar al seu màxim.

El muntatge consisteix en connectar el convertidor corresponent a la xarxa, aquest alimenta el variador que està connectat al motor, que està subjectat pel banc de proves. Amb un connector USB es connecta el banc de proves a l'ordinador, de manera que el Software del *RCBenchmark* fa un recull de dades durant l'experiment.

A la *Figura 6.1.1* es pot veure el muntatge realitzat. Com s'observa es va posar una capsula de grans dimensions (era una capsula per al transport de drons molt resistent) per tal de separar el operador que manipuli el ordinador i el banc de motors i es van usar ulleres de protecció en tot moment, per tal de poder realitzar les proves amb seguretat.



Figura 6.1.1. Fotografia del muntatge realitzat per l'experimentació. Font: Font pròpia.

Resultats prova amb els motors MT2216 i DJI 2312E amb alimentació de 12V:

- **MT2216 - 810 KV:**

Arriba a un màxim de 0,281 Kg de força d'empènyer, quan hi circula un corrent de 10,19 A, es consumeixen 118,42 W de potència, que coincideix també amb el màxim de potència.

Gira a una velocitat màxima de 7597 rpm, ho fa quan el voltatge és de 11,64 V. La velocitat elèctrica és de 8.757 rpm. Respecte a la velocitat nominal de gir, que és de 9.428 rpm, el motor treballa a un 92,88 % de la nominal.

Potència màxima nominal: 110 W.

Potència màxima real: 118,42 W. 107,65% de la nominal.

Arriba a 10,22 A de corrent com a màxim.

El voltatge es manté bastant constant des de l'inici de la prova (0 rpm) fins al final (8757 rpm). A l'inici es troba a 12,1 V i disminueix fins als 11,63 V.

En quant a l'eficiència (Kgf/W) arriba al seu màxim, 0,0033924 Kgf/W, quan es consumeixen 12,97 W de potència, el motor gira a 3106 rpm, fa 0,044 Kg de força i hi circulen 1,09 A de corrent.

Es pot veure a les *Figures 6.1.2 i 6.1.3* alguns dels paràmetres estudiats:

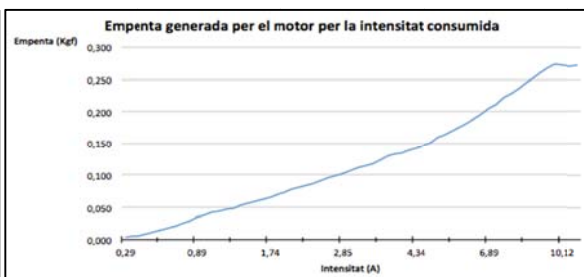
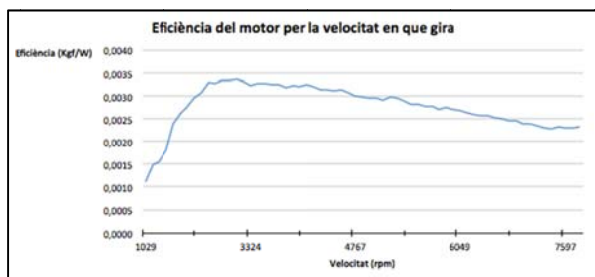


Figura 6.1.2. Gràfic de l'eficiència del motor. Font: Font pròpia.

Figura 6.1.3. Gràfic de l'empenta generada per el motor. Font: Font pròpia.

- **2312E - 960 KV:**

Màxim Kg de força: 0,821 Kgf (11,813 A; 8236 rpm; 136,7 W).

Velocitat nominal màxima: 11.121 rpm.

Velocitat real màxima: 8.243 rpm.

Velocitat elèctrica màxima: 9.617 rpm. 86,47% respecte la nominal.

Interval de voltatge: 12,11 V - 11,58 V.

Potència màxima nominal: 133 W

Potència màxima real: 136,7 W. 102,78 % respecte la nominal.

Eficiència màxima: 0,009192 Kgf/W. S'aconsegueix quan es té: 11,2 W ; 3.036 rpm ; 0,944A; 0,103 Kgf.

A continuació, a les *Figures 6.1.4* i *6.1.5* es poden veure alguns dels paràmetres estudiats:

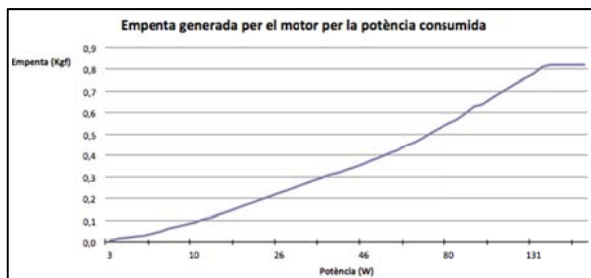


Figura 6.1.4. Gràfic l'empenta generada per el motor. Font: Font pròpia.

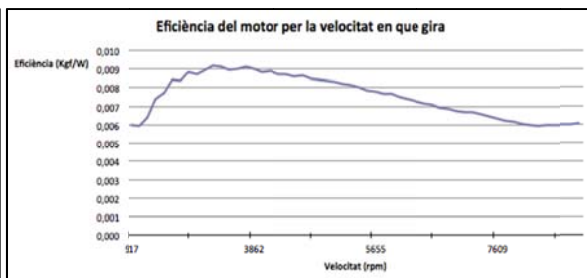


Figura 6.1.5. Gràfic de l'eficiència del motor. Font: Font pròpia.

Comparativa i conclusions de la prova de *MT 2216* i *DJI 2312E* alimentats a 12V:

El motor *2312E* pot arribar a consumir més potència, gairebé 20 W més, i per tant també hi circula un corrent més gran, 1,5 A més.

Tot i que el *2312E* arriba a un consum considerablement més gran, la força màxima a que pot arribar és molt superior a la que pot arribar l'*MT 2216*; concretament 2,92 vegades més gran, 0,821 Kgf.

Si s'utilitzessin aquests motors per a la implementació d'un hexacòpter, amb *MT2216* s'arribaria a una força de 1,69 Kg, en canvi, si s'utilitzessin *2312E*, es podria arribar a una força de 4,93 Kg. Una diferència de 3,24 Kg.

En quant a l'eficiència, agafant un punt on el consum sigui el mateix, 50 W, per als dos motors es pot observar la clara diferència d'eficiències.

El motor *2312E* fa una força de 0,388 Kgf, amb una eficiència de 0,0077725 Kgf/W.

El motor *MT2216* fa una força de 0,140 Kgf, amb una eficiència de 0,002779 Kgf/W.

Com es pot observar, el motor *2312E* és molt més eficient que l'*MT2216*, concretament, una relació de 2,8 vegades més gran.

S'arriba a la conclusió de que cap d'aquests motors és apte per la implementació del prototip captiu, ja que haurien d'arribar a fer una força més gran que el doble del pes del prototip, que és de 8,95 Kg. No obstant, s'ha vist en quins aspectes la fitxa tècnica dels fabricants no és verídica.

Tanmateix, si s'hagués d'implementar un prototip de dron de menor pes, s'escollirien els motors *DJI 2312E* per la seva implementació, ja que són molt més eficients i arriben a fer una força molt superior que els motors *MT 2216*; amb una relació de 2,9 la força d'aquests últims.

Resultats de la prova amb el motor 4114 PRO 400 KV amb alimentació de 24V:

Màxim Kg de força: 3,447 Kg (26,793 A; 13.734 rpm (elèctrica); 628,774 W).
 Velocitat nominal màxima: 9.685 rpm.
 Velocitat real màxima: 11.909 rpm.
 Velocitat elèctrica màxima: 13.894 rpm.
 Interval de voltatge: 23,476 V - 24,213 V.
 Potència màxima nominal: 666 W
 Potència màxima real: 628,78 W. 94,41 % respecte la nominal.
 Eficiència màxima: 0,01015 Kgf/W. S'aconsegueix quan es té: 35,3 W; 1,466 A; 0,371 Kgf.

A les Figures 6.1.6 i 6.1.7 es pot veure algun dels resultats obtinguts:

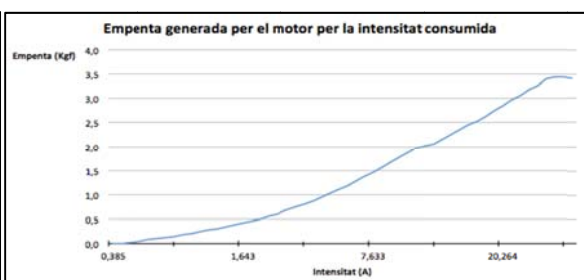
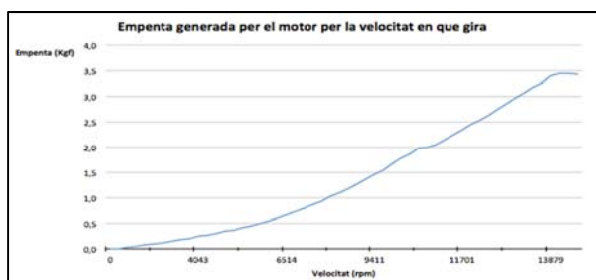


Figura 6.1.6. Gràfic de l'empenta generada per el motor. Font: Font pròpia.

Figura 6.1.7. Gràfic de l'empenta generada per el motor. Font: Font pròpia.

Totes les taules amb els resultats obtinguts durant les proves experimentals es troben a l'annex.

A continuació la Taula 6.1.2, es presenta un resum de tots els resultats:

Model	Potència màxima (W)	Corrent màxima (A)	Força màxima (Kgf)	Velocitat màxima (rpm)	Eficiència màxima (Kgf/W)
MT2216	118,42	10,22	0,281	9.428	0,0033924
DJI 2312E	136,7	11,18	0,821	8.243	0,009192
DJI 4114 PRO	628,78	26,79	3,45	11.909	0,01015

Taula 6.1.2. Taula resum dels resultats obtinguts en l'experimentació. Font: Font pròpia.

Conclusions de la prova:

Aquest motor alimentat amb el convertidor *RSP-1600-24* és apte per a la implementació del prototip captiu. Els sis motors poden arribar a una força màxima de 20,67 Kg, que és més del doble del pes del dron. Com que els motors del dron durant el vol funcionen a un 55-60% de la seva capacitat, farien una força d'11,36 - 12,4 Kg, és a dir, hi hauria entre 3,45 i 2,4 Kg sobrants per a poder equipar el dron per a fer alguna funció concreta, ja sigui una càmera, o una mànega per pintar edificis.

S'ha comprovat que la força màxima a la que pot arribar aquest motor és molt superior a la indicada pel fabricant; amb una relació d'1,38 respecte la indicada.

6.2. Temperatura dels motors

Els motors de drons estan dimensionats i dissenyats per tal de realitzar vols de curta durada, aproximadament uns 30 minuts, ja que cal canviar sovint les bateries que els alimenten. Al mercat no existeixen motors específics per drons captius per tant tots els models són de drons convencionals que realitzen vols amb bateries.

Objectius i procediment:

L'objectiu d'aquestes proves és conèixer l'evolució de la temperatura a l'estator dels motors *brushless* en condicions similars a les de vol, primer en vols de durada estàndard en drons (25 minuts) i després durant 3 hores, per poder comprovar que els motors podrien treballar en un dron captiu.

En els dos experiments s'alimentarà el motor del banc amb un convertidor RSP 1600-24, que proporciona una tensió de 24V.

El banc es programa perquè alimenti el motor a 200W durant tota la prova. Aquests 200W no és un valor triat a l'atzar, en proves de potència-força realitzades anteriorment, s'ha pogut observar que quan s'alimenta el motor a 200W, aquest fa una empenta de 1,7 Kg aproximadament.

Si es té en compte que el dron del projecte és un hexacòpter, quan cada motor s'alimenta a 200W, el dron fa una empenta total de 10,2 Kg, quan el mateix dron pesa aproximadament 8,95 Kg, és a dir, pot mantenir-se a l'aire suportant un pes addicional de 1,25 Kg.

Bàsicament, amb l'experimentació els ítems que es volen conèixer són:

- El procés d'escalfament i refredament així com la temperatura de treball dels motors de dron en un vol normal de 25 minuts, perquè puguin ser comparats després amb els valors obtinguts en un vol més llarg.
- Comprovar que els valors de temperatura no superin en cap moment els màxims especificats a la fitxa de característiques tècniques del motor, que és de 80 °C.
- Conèixer el procés d'escalfament i l'estabilitat de la temperatura final, en el cas d'un vol de 3 hores.
- Conèixer el procés de refredament una vegada apagat després d'haver realitzat un vol de 3 hores. Estudiar la possibilitat de que a l'hora de apagar els motors es mantingui uns minuts el motor girant al mínim de potència per tal d'ajudar-lo a refrigerar.

El termòmetre *Arduino* pren una mostra cada 30 segons, durant tota la durada de les dues proves i una vegada passat aquest temps es segueix prenent mostres fins que la temperatura sigui la de l'inici de la prova.

Material i muntatge

- Banc de motors.
- Motor *DJI 4114 PRO 400KV* amb hèlices *DJI R1552*.
- Variador *DYS SimonK 40A*.
- Convertidor *RSP 1600-24*.
- Cronòmetre.
- Termòmetre.
- Placa *Arduino*.
- Cinta adhesiva.

Amb l'ajuda de cinta adhesiva s'enganxa el termòmetre a l'estator del motor per tal que estigui en contacte i prengui mostres de la temperatura d'aquest.

A continuació, a les *Figures 6.2.1 i 6.2.2* es pot veure el muntatge i en detall es pot veure el sensor de temperatura que és la part negra al mig d'un cable vermell que passa per l'estator.



Figura 6.2.1. Fotografia del muntatge per realitzar les proves de temperatura. Font: Font pròpia.

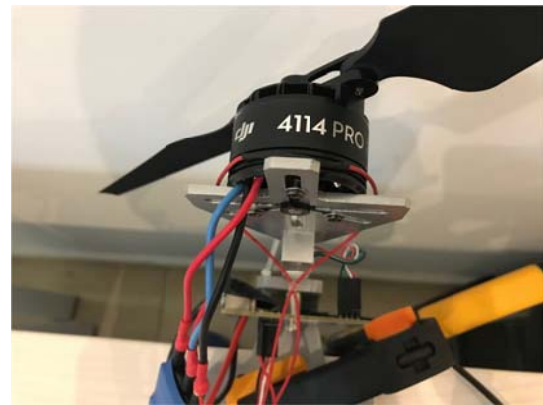


Figura 6.2.2. Fotografia en detall del sensor de temperatura en contacte amb l'estator. Font: Font pròpia.

Resultats de la prova experimental 25 minuts:

Les dades recollides al llarg de tot l'experimentació es poden veure a la *Figura 6.2.3*:

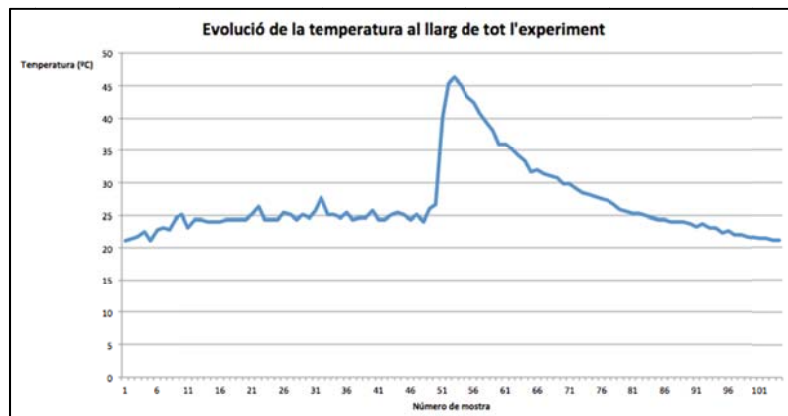


Figura 6.2.3. Gràfic de l'evolució de la temperatura al llarg de tot l'experiment. Font: Font pròpia.

La temperatura inicial és de 21,14 °C i al final, al cap de 25 minuts, és de 26,67 graus. Això suposa un increment de 5,53 °C al llarg de la durada de la prova en règim de funcionament.

És a dir, com es pot veure a la *Figura 6.2.3*, en règim de funcionament es manté força estable al voltant dels 25 °C.

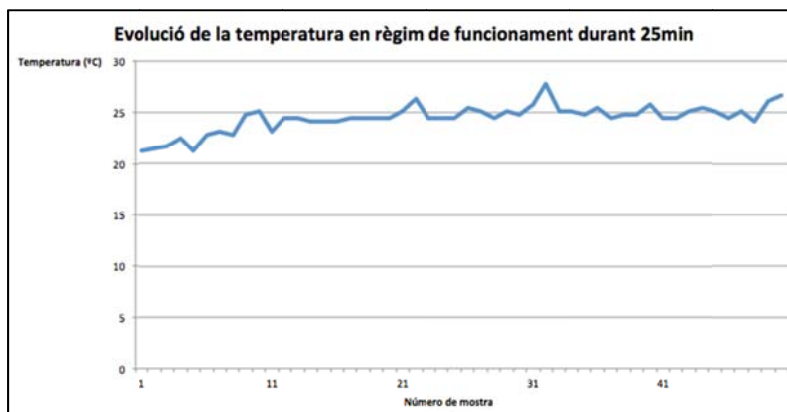


Figura 6.2.4. Gràfic de l'evolució de la temperatura en règim de funcionament durant 25 minuts. Font: Font pròpia.

Una vegada aturat el motor, al cap de 25 minuts, la temperatura augmenta fins a 45,32 °C per després anar-se refredant gradualment fins a tornar a la temperatura inicial, al cap de 26 minuts, com es pot veure a la *Figura 6.2.4*.

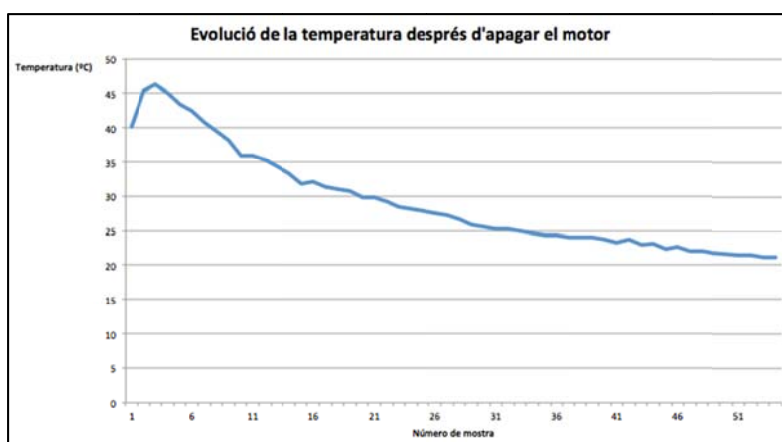


Figura 6.2.5. Gràfic de l'evolució de la temperatura durant el procés de refredament. Font: Font pròpia.

Conclusions de la prova experimental de 25 minuts:

Com s'ha vist, durant tota la prova de 25 minuts, la temperatura es manté estable i no és fins a l'aturada del motor que augmenta. El valor de pic obtingut, 45,32 °C, està lluny del valor màxim de la fitxa tècnica, que és de 80 °C.

Així doncs, com és d'esperar, es pot afirmar que no hi ha problemes d'escalfament per a vols estàndard, és a dir, vols de durada equivalent a si s'utilitza una bateria estàndard de 24V com a font d'alimentació.

Resultats de la prova experimental de 3 hores:

Les dades recollides al llarg de l'experimentació es poden veure a la *Figura 6.2.6*:

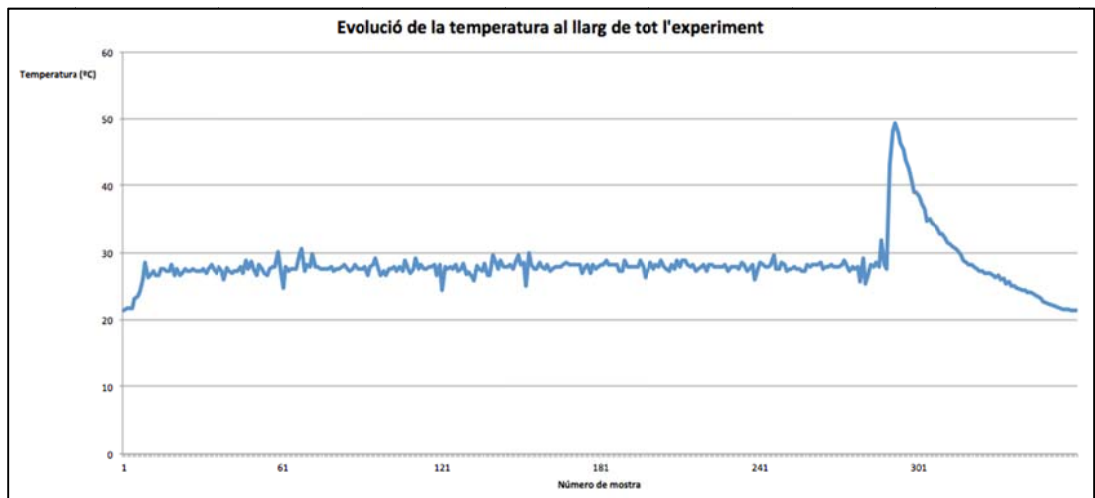


Figura 6.2.6. Gràfic amb l'evolució de la temperatura al llarg de tot l'experiment. Font: Font pròpia.

La temperatura inicial és de 21,47 °C i al final, al cap de 3 hores, és de 27,62 °C. Això suposa un increment de 6,15 °C al llarg de la durada de la prova.

Com es pot veure a la *Figura 6.2.7*, la temperatura és manté estable al voltant dels 27 °C.

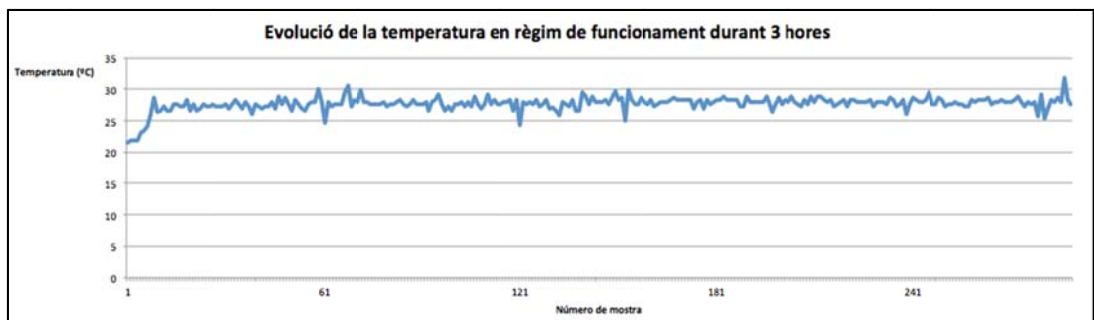


Figura 6.2.7. Gràfic amb l'evolució de la temperatura en règim de funcionament durant 3 hores. Font: Font pròpia.

Una vegada aturat el motor, al cap de les 3 hores, la temperatura augmenta fins a 49,29°C, per després anar refredant-se gradualment fins a tornar a la temperatura inicial, al cap de 35 minuts.

Es torna a encendre el motor i s'arriba a la temperatura de 27,62 °C (temperatura que té el motor abans d'aturar-lo), per veure si el procés de refredament és diferent si es manté les hèlices girant (amb una potència mínima de 8W) durant dos minuts.

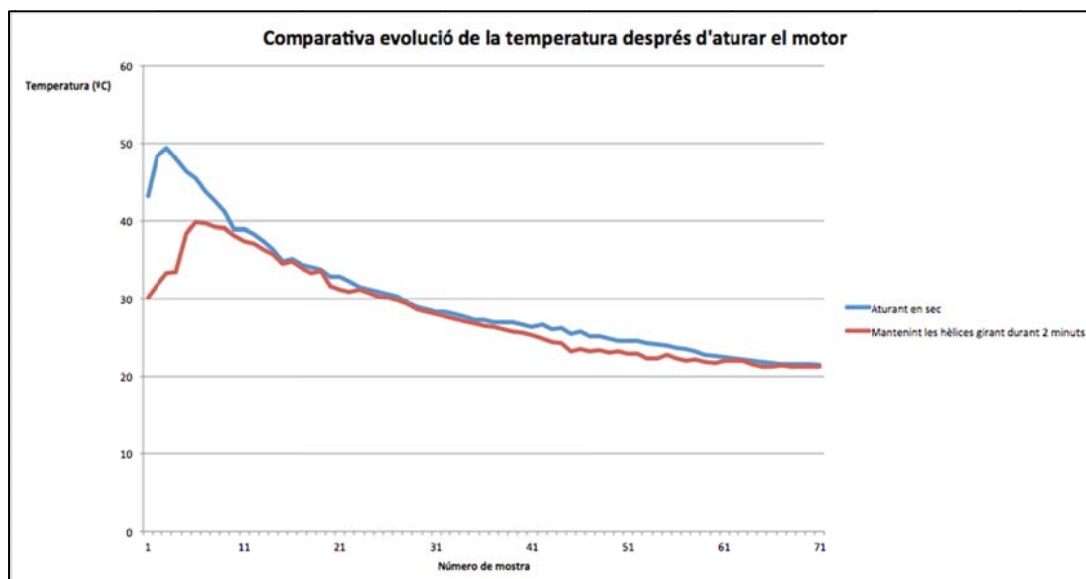


Figura 6.2.8. Gràfic dels dos processos de refredament. Font: Font pròpia.

Com es pot veure a la *Figura 6.2.8*, el valor màxim assolit és menor (gairebé 10 °C) però s'arriba a la temperatura inicial en el mateix temps, és a dir el procés de refredament triga el mateix.

Totes les taules amb els resultats obtinguts durant les proves experimentals es troben a l'annex.

Conclusions de la prova experimental de 3 hores:

S'observa com la temperatura en règim de treball durant la prova de 3 hores és molt similar a la temperatura assolida durant la prova de 25 minuts, varia com a màxim 3 °C.

En l'aturada, el valor de pic obtingut en la prova de 3 hores és 4 °C superior al de la prova de 25 minuts. Els dos valors estan molt allunyats dels 80 °C, per tant es pot afirmar que es pot usar aquest model de motors per realitzar vols de llarga durada, i per tant, són aptes per el dron captiu d'aquest projecte.

Pel que fa a l'aturada deixant girar les hèlices durant dos minuts en el mínim de potència, es veu que és un mètode molt efectiu per reduir la temperatura de pic. Això és degut a la quantitat d'aire que mouen les hèlices i ajuden a dissipar energia per convecció. Es pot incorporar aquesta metodologia a l'habitual que utilitzi el pilot a l'hora de volar el dron captiu.

6.3. Hèlices

Les hèlices són uns dispositius mecànics formats per pales concèntriques i solidàries a l'eix de rotació dels motors. Quan els motors giren, aquestes tracen un moviment rotatiu en el pla. Les pales no són planes, tenen una forma de corba i estan inclinades de manera que provoquen una diferència de velocitats entre una cara de l'hèlice i l'altra. Segons el principi de Bernoulli, la diferència de velocitats comporta una diferència de pressions, i això és el que comporta una força en la direcció de l'eix, és a dir, perpendicular al terra cap a la zona on hi ha menys pressió, és a dir, cap a dalt. Aquesta força és la que provoca l'enlairament del dron.

Objectiu de la prova:

- Analitzar quin tipus d'hèlices són més adients per al prototip captiu del projecte; les hèlices que es van provar són de 2 i 3 pales, així es va poder identificar quin número de pales és més eficient.

Material i muntatge:

- Banc de motors.
- Motor *MT2216*.
- Variador *DYS SimonK 40A*.
- Hèlice *DJI E310* (2 pales).
- Hèlice *DHT A-Men* (3 pales).
- Convertidor *MP700 12V*.
- Ordinador.

La majoria de multicòpters utilitzen hèlices amb dues pales, però també hi ha la possibilitat d'equipar el dron amb hèlices de tres pales. Així doncs, amb el banc de motors es va fer una prova per decidir amb quin tipus d'hèlices s'equiparia el dron d'aquest projecte.

Aquesta prova es va realitzar amb un motor de menys voltatge i potència que l'utilitzat per al prototip captiu, degut a que l'empresa disposava dels dos tipus d'hèlices diferents aptes per aquest motor i així no haver de realitzar una compra innecessària, ja que al provar-se els dos tipus d'hèlices amb un mateix motor, aquests resultats es poden extrapolar al motor del prototip captiu.

El motor que es va utilitzar per la prova és el *MT2216*, el qual treballa a una tensió de 3s, és a dir, 11,1 V, la meitat de tensió que la del motor del captiu.

Aquest corrent a 11,1 V es va poder subministrar amb el convertidor *MP7000 12V*, del qual l'empresa ja en disposava d'un. Es pot veure el muntatge a la *Figura 6.3.1*:



Figura 6.3.1. Fotografia del muntatge realitzat amb el convertidor. Font: Font pròpia.

Un factor important que es va estudiar és l'eficiència, mesurada en Kg/W, és a dir, la força que pot fer per la potència subministrada.

A continuació a les *Figures 6.2.1 i 6.2.2* es pot veure els motors amb les diferents hèlices.



Figura 6.3.2. Fotografia del motor MT2216 amb les hèlices de 3 pales instal·lada. Font: Font pròpia.



Figura 6.3.3. Fotografia del motor MT2216 amb les hèlices de 2 pales instal·lada. Font: Font pròpia.

Resultats de la prova:

Amb alimentació de 3s, el motor amb hèlice de 3 pales pot arribar a consumir més potència que amb hèlice de 2 pales, hi arriba a circular més corrent.

El fet que consumeixi més potència fa que la força màxima a la que pot arribar el motor sigui més gran amb hèlices de 3 pales que amb hèlices de 2 pales. Tot i així, la diferència no és gaire gran, no arriba als 30 grams.

Els resultats obtinguts es poden veure a la *Figura 6.3.4*.

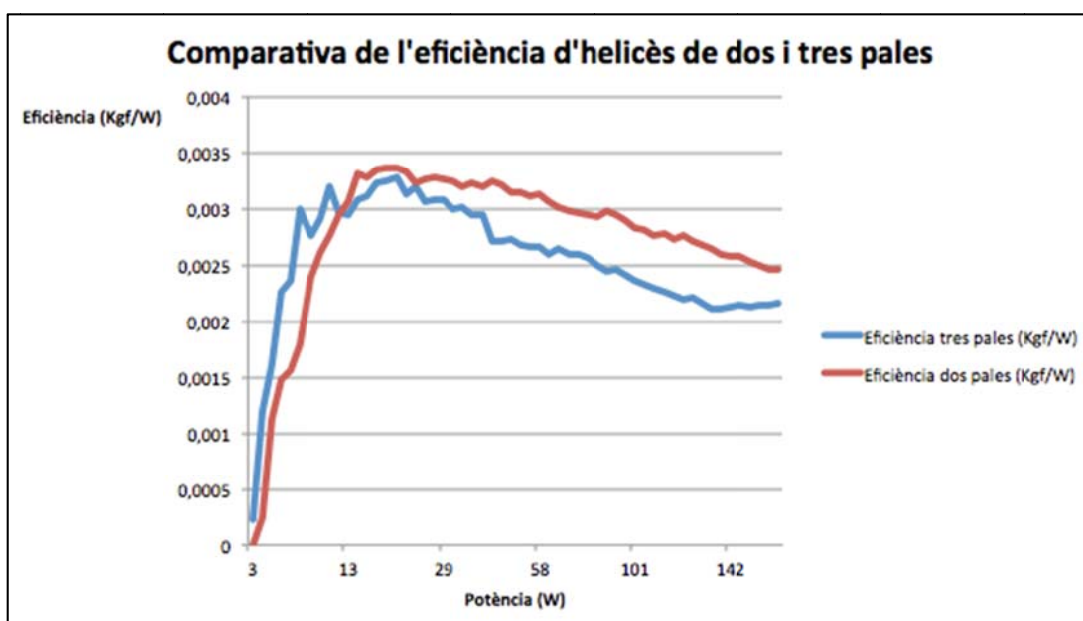


Figura 6.3.4. Gràfic de l'eficiència amb les hèlices amb dos i tres pales. Font: Font pròpia.

En quant a l'eficiència, amb hèlice de 2 pales s'arriba a un màxim superior al cas d'hèlice de 3 pales. Tot i així, en els dos casos s'arriba al màxim d'eficiència amb consums diferents, així doncs, s'ha de veure les diferències entre les eficiències per a un mateix consum per poder determinar quin tipus d'hèlice és més eficient globalment.

S'ha agafat el punt en que es consumeixen 50 W.

El motor amb hèlice de 2 pales fa una força de 0,140 Kg, amb una eficiència 0,002779 Kgf/W.

El motor amb hèlice de 3 pales fa una força de 0,137 Kg, amb una eficiència de 0,0027258 Kgf/W.

Millora d'eficiència creada al col·locar hèlices de dues pales enlloc de tres:

$$\text{Millora d'eficiència} = \frac{\text{eficiència 2 pales} - \text{eficiència 3 pales}}{\text{eficiència 3 pales}} \cdot 100$$

$$\text{Millora d'eficiència} = \frac{0,002779 - 0,0027258}{0,0027258} \cdot 100 = 1,95\%$$

Conclusions de la prova:

Les hèlices amb dues pales són més eficients que les de tres pales, és a dir, el multicòpter pot arribar a optimitzar més l'empenta que proporcionen els motors amb les hèlices per la potència que se li subministra.

Tot i així, aquesta diferència d'eficiència no és molt gran, l'hèlice de dues pales millora l'eficiència de la de tres pales amb un 1,95%.

Per tant, es decideix equipar el prototip captiu amb hèlices de dues pales.

6.4. Cable

Objectius i procediment:

Escollir el cable amb mínima secció, i per tant menor pes, capaç de suportar la màxima intensitat que hi pot circular de manera estacionària.

Per tal de realitzar un experiment per determinar la temperatura a la qual arriben els cables que es proven, s'ha comprat 15 metres bifilars de les següents seccions en mm^2 : 0,75 ; 0,5 ; 0,34. També 15 metres d'un cable de cinc fils de secció $0,2 \text{ mm}^2$.

D'altra banda, s'ha comprat una estufa *Taurus* que consumeix una potència màxima de 2400W, ja que hi ha molt poques estufes de 3000W que no tinguin un preu elevat, d'aquesta manera, el resultat de la prova no és exacte però molt similar al cas del dron de 3000W.

La temperatura es mesura amb un termòmetre que funciona amb una placa *Arduino*, de manera que mostreja la temperatura i ho escriu a la pantalla de l'ordinador automàticament.

S'ha realitzat una prova amb el cable enrotllat en forma de bobina per estudiar la possibilitat d'utilitzar un enrotllador de cable, és a dir, un cilindre amb una manovella per tal de tenir el cable recollit durant el vol del dron. El cable enrotllat arriba a una temperatura en estat estacionari segurament més elevada que en els altres casos ja que es produeix el fenomen de la inducció.

La prova amb el cable a l'aire s'ha realitzat perquè es tindrà una llargària variable d'aquest a l'aire a mesura que el dron s'enlaira. El terra i l'aire no tenen el mateix coeficient de transmitància tèrmica, això pot fer que no tinguin els mateixos resultats ambdues proves.

Es realitzen les proves amb l'estufa a màxima potència per aconseguir 2400W. Amb cada secció de cable es va realitzar tres proves: el cable estirat al terra, el cable enrotllat en forma de bobina i el cable a l'aire (es van penjar d'una biga).

A continuació, a les *Figures 6.4.1 i 6.4.2* podem veure alguns dels muntatges.

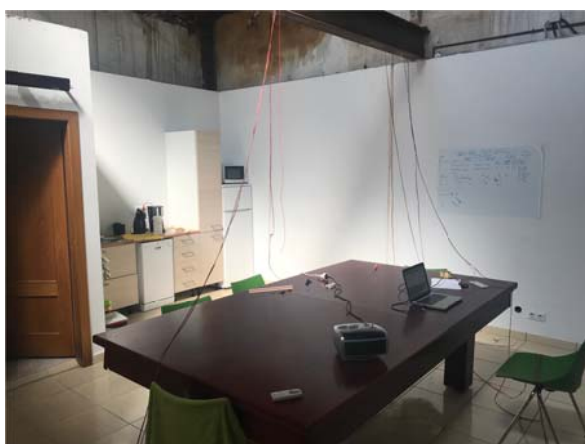


Figura 6.4.1. Fotografia del muntatge per assajar els diferents cables a l'aire.

Font: Font pròpia.



Figura 6.4.2. Fotografia del cable bobinat amb un diàmetre interior de 10cm.

Font: Font pròpia

Les proves es realitzen fins que la temperatura s'ha estabilitzat o s'arriba a temperatures inadmissibles que provoquen que el cable es cremi de manera ràpida. La temperatura màxima admissible per aquests cables és de 70 °C, com indica la *Taula 6.4.1*.

Tipo de Aislamiento seco	Temperatura máxima °C	
	Servicio permanente	Cortocircuito t ≤ 5s
Policloruro de vinilo (PVC) S ≤ 300 mm ² S > 300 mm ²	70	160
	70	140
Polietileno reticulado (XLPE)	90	250
Etileno Propileno (EPR)	90	250

Taula 6.4.1. Taula resum de la temperatura de servei de diferents cables. Font: [NERGIZA](#)

Material i muntatge:

- Estufa *Taurus* de 2400W.
- Cables bifilars de secció en mm²: 0,34 ; 0,5 ; 0,75.
- Cable pentafilar de secció 0,2 mm².
- Placa *Arduino*.
- Connectors *Arduino*.
- Ordinador.
- Termòmetre *Arduino*.
- Cinta adhesiva.

El cable d'alimentació de l'estufa es talla de manera que els tres cables que té recoberts queden accessibles. Amb uns pins es connecta en una banda del pin un dels cables de l'estufa i a l'altra un dels cables amb el qual es vol realitzar la prova. A l'altra punta del cable de prova s'hi connecta un altre pin, l'altra banda del qual està connectada a l'altra part del cable de l'estufa que s'ha tallat abans, i aquest finalment connecta amb l'estufa. Es pot veure aquest muntatge en la *Figura 6.4.3* una fotografia del cable i a la *Figura 6.4.4* una fotografia del muntatge al complet.



Figura 6.4.3. Fotografia en detall del cable seccionat. Font: Font pròpia.



Figura 6.4.4. Fotografia del muntatge al complet. Font : Font pròpia.

Degut a que es disposa de cables bifilars i l'estufa s'alimenta amb tres cables (dos fases i el terra), s'ha connectat un cable d'una secció diferent a la de la prova al neutre, ja que per aquest no hi circula corrent.

Amb el cable de cinc fils de secció $0,2 \text{ mm}^2$ s'ha connectat dos fils a cada una de les dues fases del cable de l'estufa i l'altre fil restant es connecta al neutre del cable de l'estufa. D'aquesta manera és similar a fer una prova amb un cable de secció de $0,4 \text{ mm}^2$. Els cables usats es poden veure a continuació a les *Figures 6.4.5 i 6.4.6*.



Figura 6.4.5. Fotografia del cable pentafilet usat. Font: Font pròpia.



Figura 6.4.6. Fotografia del model de cable usat per les seccions 0.34, 0.5 i 0.75 (en mm^2). Font: Font pròpia.

Abans de començar una prova s'ha comprovat que el termòmetre marqui la temperatura ambient o similar, tot i que el problema no és la temperatura inicial sinó la temperatura en estat estacionari quan s'alimenta l'estufa a 2400W.

El termòmetre pren dades cada 10 segons.

Resultats de la prova amb els cables de diferent secció:

Cable de secció $0,75 \text{ mm}^2$:

- Estirat en contacte amb el terra: La temperatura inicial és de $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ i s'arriba a una temperatura en estat estacionari de $44 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Enrotllat en forma de bobina: La temperatura augmenta des dels $25 \text{ }^\circ\text{C}$ als $82 \text{ }^\circ\text{C}$ i s'estabilitza.
- Estirat en contacte amb l'aire: La temperatura arriba a un estat estacionari al voltant dels $41 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cable de secció $0,5 \text{ mm}^2$:

- Estirat en contacte amb el terra: La temperatura arriba a un estat estacionari al voltant dels $61 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Enrotllat en forma de bobina: La temperatura arriba a més de 90°C , no es va arribar a un estat estacionari per evitar el risc de que aquest es cremés.
- Estirat en contacte amb l'aire: La temperatura arriba a un estat estacionari als $55,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $5,5^\circ\text{C}$ menor que si està en contacte amb el terra.

Cable de secció $2 \times 0,2 \text{ mm}^2$:

- Estirat en contacte amb el terra: La temperatura arriba a un estat estacionari als $72 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Enrotllat en forma de bobina: Arriba a una temperatura inadmissible ràpidament.
- Estirat en contacte amb l'aire: La temperatura arriba a un estat estacionari als $70,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cable de secció $0,34 \text{ mm}^2$:

- Estirat en contacte amb el terra: S'estabilitza a una temperatura de $73 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Enrotllat en forma de bobina: Arriba a una temperatura inadmissible ràpidament.
- Estirat en contacte amb l'aire: S'estabilitza a una temperatura de $66,5 \text{ }^\circ\text{C}$; una temperatura $6,5^\circ\text{C}$ inferior respecte a si està en contacte amb el terra.

La *Figura 6.4.7* mostra l'evolució de la temperatura dels diferents cables de diferent secció en funció del temps quan el cable està estirat en contacte amb el terra. L'eix d'abscisses mostra el nombre de mostra, i cadascuna d'aquestes mostres equival a 10 segons.

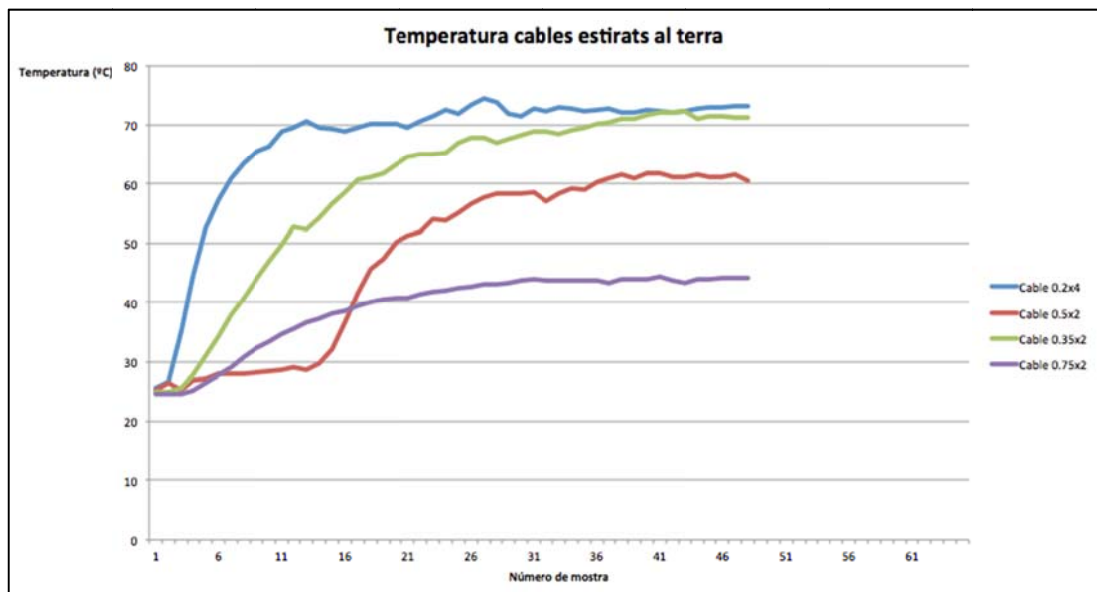


Figura 6.4.7. Gràfic de l'evolució de la temperatura dels diferents cables estirats al terra. Font: Font pròpia.

La *Figura 6.4.8* mostra l'evolució de la temperatura dels diferents cables de diferent secció en funció del temps quan el cable està estirat a l'aire.

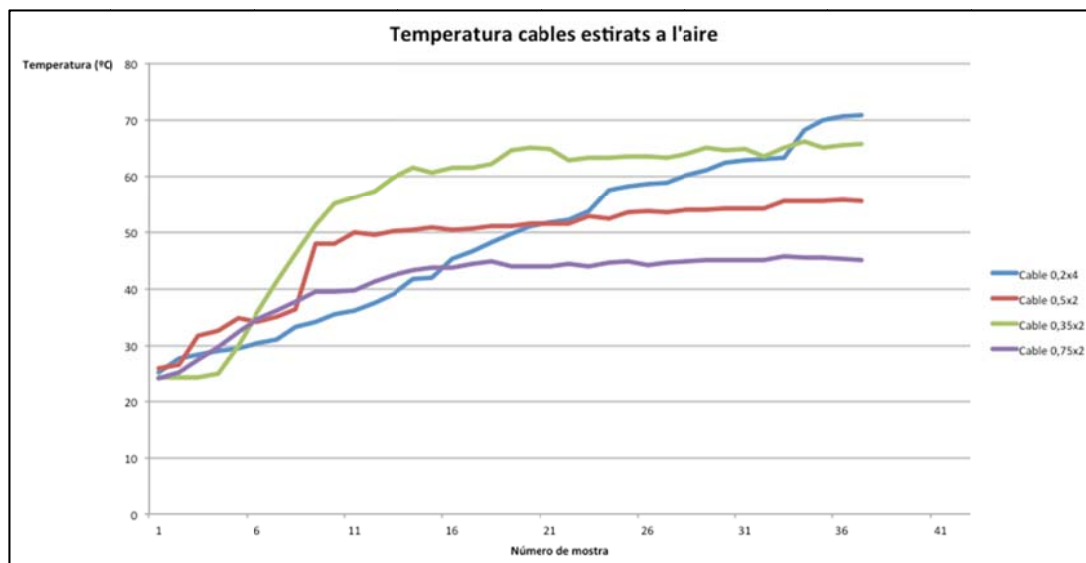


Figura 6.4.8. Gràfic de l'evolució de la temperatura dels diferents cables estirats a l'aire. Font: Font pròpia.

Totes les taules amb els resultats obtinguts durant les proves experimentals es troben a l'annex.

Conclusions de la prova:

S'ha comprovat que la temperatura a la qual arriba el cable estirat en contacte amb l'aire és de l'ordre d'un 10% menor que si està en contacte amb el terra.

També s'ha comprovat que el major problema es troba si es vol utilitzar un enrotllador de cable de manera que el cable té forma de bobina, ja que la temperatura a la que s'arriba és superior a l'admissible fins i tot en el cas d'una secció de 0,75 mm². Si es vol utilitzar l'enrotllador de cable s'ha d'utilitzar cables de secció més gran.

Per al cable sense enrotllar amb una secció de 0,5 mm² no hi ha problema de temperatura, ja que estirat al terra arriba a una temperatura estacionària de 61 °C, fet que no provoca que es cremi el cable.

Amb una secció de 0,34 mm² s'arriba a una temperatura estacionària de 73 °C amb el cable estirat en contacte amb el terra, de manera que no provoca que aquest es cremi ràpidament però no és una temperatura còmoda per al cable.

Així doncs, per tal d'aconseguir el mínim pes sense arribar a temperatures de cable inadmissibles, s'ha escollit alimentar el convertidor AC-DC amb un cable de secció 0,5 mm².

Si s'hagués fet cas a la *Taula 5.4.2*, per la intensitat circulat s'hagués utilitzat una secció de cable entre 1mm² i 1,5mm² enlloc de la de 0,5mm². El fet de realitzar la experimentació ha permès reduir molt el pes del cable.

La *Taula 6.4.2*, que es mostra a continuació, hi ha un breu resum de les temperatures finals que s'assoleixen amb les proves:

	Estirat al terra	Estirat a l'aire	Enrotllat
0,75 mm ²	44 °C	41 °C	82 °C
0,5 mm ²	61 °C	55,5 °C	Inadmissible
2x0,2 mm ²	72 °C	70,5 °C	Inadmissible
0,34 mm ²	73 °C	66,5 °C	Inadmissible

Taula 6.4.2. Taula resum dels resultats obtinguts. Font: Font pròpia.

6.5. Primer vol

Es va realitzar una primera prova de vol amb el pilot de l'empresa per comprovar que el dron podia armar-se i realitzar un vol sense problemes. En aquesta prova es disposava d'un sol convertidor RSP-1600-24, és a dir, amb una potència de 1600 W.

En el moment en que el pilot va donar la comanda amb el radiocontrol per a que el dron s'armés, els motors van fer un intent d'iniciar el moviment rotatiu però en menys d'un segon paraven i el LED indicatiu del convertidor passava de verd (ON) a vermell (OFF).

Es va comprovar amb el voltímetre que les tensions en totes les etapes d'alimentació fossin correctes, i es va plantejar la següent hipòtesi: A l'intentar armar el dron, es subministra un corrent de forma brusca, i degut a que els motors que utilitza el dron són brushless i per tant, asíncrons, presenten pics elevats d'intensitat. Podria ser que aquest pic d'intensitat superés els 67A que pot suportar el convertidor, i per tant, que aquest tallés el subministrament.

Quan es va tornar a l'oficina es va comprovar amb el banc de motors si aquest pic d'intensitat era significant. Es procedia a donar-li un senyal per tal que el motor passés d'estar en repòs a girar a una velocitat considerable. Es va comprovar que el pic d'intensitat era significant, ja que suposava el pas del doble del corrent que hi circulava un cop arribava a l'estacionari.

Es van proposar dues solucions per aquest problema:

-D'una banda, comprar un convertidor capaç de subministrar més potència, d'aquesta manera el corrent que podia circular per ell seria més gran i el pic d'intensitat dels motors no arribaria al màxim corrent que suporta el convertidor.

-D'altra banda, comprar un convertidor exactament igual al que es va utilitzar per fer la prova i connectar-los en paral·lel. D'aquesta manera el corrent que hi circula es reparteix entre els dos convertidors, podent subministrar una potència de gairebé el doble, i en conseqüència el doble de intensitat. Així doncs s'obté un convertidor d'aproximadament 3.000W i hi pot circular un corrent de gairebé 134 A. D'aquesta manera es redueix molt la possibilitat de que el pic que es produeix a l'armar el dron sigui superior al que poden suportar els dos convertidors en paral·lel.

Aquestes dues solucions comporten que el dron hagi d'aixecar un pes superior i per tant té menys pes disponible per instal·lar objectes per a fer tasques concretes. Amb un sol convertidor el dron pesa 6 Kg. Si es col·loca un convertidor igual en paral·lel el dron passa a pesar 8,1 Kg, de manera que es necessita més potència per a que els motors puguin aixecar-lo i realitzar el vol.

Finalment l'empresa es va decantar per la instal·lació d'un convertidor idèntic en paral·lel amb l'antic. A la fitxa tècnica del convertidor es mostra que la potència total s'ha de multiplicar per un factor de 0,9 si hi ha una connexió en paral·lel. Així doncs, la potència màxima que es pot subministrar al dron és de 2.880W, i el corrent màxim que hi pot circular passa a ser de 120 A, com s'ha explicat a l'apartat 4.6.

6.6. Validació de resultats

En base als resultats obtinguts en el primer vol, es va procedir a la compra i instal·lació d'un segon convertidor idèntic a l'anterior en paral·lel amb aquest. Així doncs, es va realitzar un segon vol que tenia com a objectius la realització d'un vol amb els dos convertidors en paral·lel i la comprovació del sistema de seguretat dels díodes i la bateria supletòria.

Es va realitzar el vol sense cap problema, d'aquesta manera es va comprovar que el sistema d'alimentació captiu funcionava correctament.

Per a la comprovació del sistema de seguretat es va realitzar un vol amb els convertidors encesos, i un cop el dron es trobava en l'aire, es va parar el subministrament amb el botó ON/OFF de l'inversor i el dron va passar a ser alimentat per la bateria supletòria. Es va aterrar el dron al cap de menys d'un minut, ja que aquesta bateria té poca capacitat i es té només en cas d'emergència per a poder realitzar aterratges no forçosos.

Així doncs, es pot afirmar que el dron és operatiu i que els sistemes d'alimentació i seguretat funcionen correctament.

7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental cada cop es té més en compte a l'hora d'implementar un projecte. S'ha d'intentar, en la mesura del possible, que els materials que s'utilitzen per a la implementació siguin reciclables i/o reutilitzables. Tot i això, en el camp de l'electrònica és fàcil trobar components que siguin de difícil reciclatge, ja que hi ha materials que s'utilitzen recentment, però cada cop s'investiga més la manera de reciclar-los.

Com bé s'ha pogut comprovar al llarg de la memòria, el dron està compost en gran part per fibra de carboni. Així doncs, resulta de gran interès saber si existeix un procés de reciclatge d'aquest material i en què consisteix.

Els compostos de fibra de carboni consten de filaments de carboni impregnats i aglomerats amb una resina. El reciclatge d'aquests materials resulta difícil de realitzar per diferents motius; la gran majoria d'aquestes resines són termostables (no es fonen amb la calor), hi ha altres ingredients de naturalesa diversa i sovint es troben barrejats amb altres materials.

Tot i així, el fet que la fibra de carboni sigui cada cop més utilitzada en diferents sectors, ha propiciat la investigació de mètodes pel seu reciclatge, i finalment s'està trobant un mètode.

Existeixen unes plantes on es separen les fibres de la resina per mitjà d'un procés tèrmic amb el qual la resina es descompon formant vapors i les fibres queden separades, amb la qual cosa es poden recuperar.

Pel que fa al xassís, està fet de fibra de vidre i aquest material sovint ja està fabricat a partir de vidre reciclat, i a part, es recicla mitjançant un procés similar al de la fibra de carboni.

Un altre component del projecte que abunda és la bateria de 12V que està situada al terra. Tot i ser una bateria, com que és de plom, es pot arribar a reciclar en gairebé un 100% de la seva totalitat, són més reciclables que les piles.

Per contra, la bateria LiPo que s'utilitza com a sistema de seguretat en cas que fallin els convertidors, són de difícil i costós reciclatge i s'han de descarregar completament abans de portar-les a un punt verd o deixalleria. El cost de separació de components d'aquesta és molt elevat i això fa que no es reutilitzin.

Els convertidors AC-DC solen ser reutilitzats amb facilitat en altres aparells, s'ha de tenir en compte però, el voltatge de sortida, la capacitat de corrent que pot portar i totes les seves característiques recollides a les seves respectives fitxes tècniques. Amb l'inversor passa quelcom similar, ja que són aparells que s'utilitzen per moltes funcions i fa que es puguin utilitzar en altres projectes.

Una altra part important que s'ha de tenir en compte són els cables. Els cables a part de que poden ser reutilitzats per infinitat de coses, estan fets de coure, fàcilment reciclable, i de PVC, que és un termoplàstic, i per tant, reciclable.

Els motors *brushless* estan compostos en gran part per coure i ferrita o terres rares. Així doncs, si es desmunta el motor es pot reciclar aquests materials. Les terres rares són els que són més complicats de reciclar, però s'estan estudiant nous mètodes per aconseguir-los.

En general, com que per aquest projecte no hi havia una guia de materials específics a comprar, sinó que s'han comprat components que normalment s'utilitzen per a altres aparells, fa que moltes parts del dron ja siguin reutilitzables per altres objectes. Hi ha parts, com la bateria LiPo, que són de difícil reciclatge, així com molts components de l'electrònica. Tot i així, com que la majoria d'aquests materials s'estan utilitzant cada cop més, a la vegada creix una inquietud o necessitat d'aconseguir el reciclatge d'aquests, i per tant, hi ha investigacions i es descobreixen nous mètodes per a poder reciclar-los.

8. Pressupost

Per realitzar el pressupost d'aquest projecte s'ha tingut en compte la mà d'obra d'estudiant d'enginyeria fent pràctiques curriculars a l'empresa, el cost dels materials utilitzats i un cost de transport d'alguns materials que s'han comprat a l'estranger.

- Mà d'obra d'enginyer en pràctiques curriculars: Són els diners que cobren els dos estudiants d'enginyeria en pràctiques curriculars a l'empresa pel nombre d'hores que ha suposat la realització del projecte. Cada estudiant cobra 6 €/hora i el projecte s'ha realitzat amb 250 hores. A la *Taula 8.1* es mostra el total del cost de mà d'obra.

	Hores treballades	Preu mà d'obra / hora	Nombre treballadors	Total
Despesa per mà d'obra	250	6	2	3.000,00 €

Taula 8.1. Taula resum de les hores dedicades al projecte. Font: Font pròpia.

- Materials utilitzats: És el cost de tots els materials que s'han utilitzat al projecte, en ell no només s'hi reflexa el cost dels components del dron, també es té en compte materials que s'han comprat per a la implementació d'aquest, com l'estany per soldar i el termòmetre. En la *Taula 8.2* es mostra el desglossament d'aquest total.

Objecte	Preu unitat (€)	Unitats	Preu total (€)
Naza M V2	169	1	169
Motor DJI 4114 PRO	48	6	288
Variadors DYS 40A SimonK	19,68	6	118,08
Futaba T14SG	569	1	569
Futaba R7008SB	119,3	1	119,3
RSP-1600-24 Mean Well	368,28	2	736,56
Tub fibra de carboni 3K 1metre, 25mm diàmetre exterior	32,5	3	97,5
Tub fibra de carboni 3K 1metre, 15mm diàmetre exterior	21,25	2	42,5
Planxa fibra de carboni 400*250*2 mm	30,85	1	30,85
Abraçadera de tub de 25 mm	2,4	60	144
Cable 10 AWG vermell 1 metre	2,5	4	10
Cable 10 AWG negre 1 metre	2,5	4	10
Cable servo 1 metre	1,3	4	5,2
Tub esponja	9,46	2	18,92
Tall a mesura de planxa 400x250x2 mm (planxa incluída)	126,65	1	126,65

Estany per a soldadura 1mm/3m	4,9	1	4,9
Connectors d'or de 5,5mm mascle/femella	1,8	18	32,4
Tub per potes	7,93	3	23,79
Pack hèlices DJI S900	28,1	1	28,1
Cinta Velcro Ceys Negre	2,54	1	2,54
Placa Protoboard	6,1	1	6,1
Termometre eagle	9,99	1	9,99
Banc de motors RC Benchmark 1520	253,2	1	253,2
Interruptor diferencial	32,2	1	32,2
Allargador de cable	6,1	1	6,1
Estufa Taurus 2.400W	32	1	32
Cinta aïllant	0,67	3	2,01
Bateria SLS Magnum V2 6s 3000mAh	80,52	1	80,52
Diode 150 KSR 20 150A 200V	13,61	2	27,22
Medidor de voltatge LED	9,9	1	9,9
Esprai pintura de superfícies	13	1	13
Regleta connexió 10mm	1,23	1	1,23
Cable Bicolor 2x0,34 15m	7,14	1	7,14
Cable Bicolor 2x0,5 15m	9,48	1	9,48
Cable Bicolor 2x0,75 15m	10,6	1	10,6
Inversor 12Vdc - 200 Vac	35	1	210
Bateria Energy 72Ah	76,2	1	76,2
Connectors AS150	6	3	18
Connectors XT60 mascle/femella	1,6	2	3,2
		Total	3.385,38 €

Taula 8.2. Taula resum del cost del material usat en el projecte. Font: Font pròpia.

- Transport dels materials: Alguns dels materials s'han comprat en comerços en línia a altres països o ciutats i a diferents distribuïdors, això ha comportat un sobrecost aproximat dels materials d'un 25%. En al *Taula 8.3* es mostra el total d'aquest cost.

	Preu productes (€)	Aplicació del 25%
Despeses per enviament (25%)	960,2	240,05 €

Taula 8.3. Taula resum dels costos derivats del transport. Font: Font pròpia.

La *Taula 8.4* mostra el cost total que ha suposat el projecte. Com es pot observar, aquest cost és molt menor al preu de venda de drons amb sistema captiu, ja que aquests tenen un cost normalment entre 15.000€ i 25.000€. Tot i així, s'ha de tenir en compte que els elaboradors d'aquest projecte han estat estudiants d'enginyeria que realitzen pràctiques curriculars a l'empresa. Per contra, també s'ha de tenir en compte que moltes hores de la mà d'obra s'han vist destinades a la detecció d'errors en el muntatge i funcionament. Si es realitzés un altre prototip idèntic, el nombre d'hores necessàries per realitzar el projecte seria menor.

Despesa per material	3.385,38 €
Despesa per enviament	240,05 €
Despesa per mà d'obra	3.000,00 €
Total	6.625,43 €

Taula 8.4. Taula resum dels costos totals del projecte. Font: Font pròpia.

Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte era la implementació d'un prototip de dron captiu que fos capaç de realitzar un vol de llarga durada. Aquest objectiu s'ha assolit després d'haver modificat i/o afegit alguns components, ja que amb els components inicials no es va poder realitzar un vol.

Un altre objectiu que s'ha complert és el d'optimitzar el pes del dron de manera que sigui capaç d'aixecar entre 2,5 i 3,5 Kg.

A part, s'ha dotat el dron d'un sistema de seguretat, de manera que si el sistema d'alimentació captiu fallés, s'activés una bateria supletòria per a poder continuar el vol fins a aterrar-lo sense posar-lo en perill.

Havent assolit l'objectiu de disposar de capacitat d'aixecar un pes superior a 2 kg, es pot assegurar que es poden instal·lar més components per tal de que aquest tingui aplicacions concretes, ja que en un futur s'hi pot instal·lar una càmera per realitzar filmacions o fotografia, o bé instal·lar un sistema per que aquest actuï com una mànega per pintar o netejar edificis.

No obstant, a la vegada que s'assolien aquests objectius, també es tenia en compte que aquest projecte fos viable econòmicament. Amb això, s'ha aconseguit que l'empresa disposi d'un prototip captiu que pot ser venut per un valor força assequible, inclús més barat que els models que hi ha ara al mercat.

El fet d'haver realitzat una memòria on es recull gran part de la implementació d'aquest prototip, i el fet d'haver construït el dron, aporta a l'empresa l'opció de realitzar un model idèntic en molt menys temps, i per tant, reduir costos. Una altra opció que s'ha aportat a l'empresa és l'opció de millorar aquest prototip i innovar en quant a aplicacions possibles o tasques que pugui realitzar.

Durant el projecte es recomana prevenir riscos constantment i revisar possibles càlculs, ja que s'està treballant amb electricitat i amb corrents força elevats, de manera que un error de càlcul pot ser perillós.

Agraïments

Primer, estem molt agraïts a Idrone BCN, l'empresa on hem realitzat l'estada de pràctiques curriculars i el treball de fi de grau. Hem disposat de molta llibertat i gran quantitat de recursos.

Especialment al Pau Piñol, tutor a l'empresa, que ens ha guiat i format en el món dels drons. Finalment, estem molt agraïts al tutor del treball de fi de grau, en Sergio Busquets. Ens ha ajudat quan ho hem necessitat i sempre que li hem demanat consell ens l'ha proporcionat.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] ELLIOTT, Alex. Cómo construir su propio dron. Editorial Marcombo. Barcelona, 2016.
- [2] JUNIPER, Adam. *La guía completa de drones*. Editorial Acanto. Barcelona, 2016.
- [3] WIKIPEDIA. Vehículo aéreo no tripulado [https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_a%C3%A9reo_no_tripulado, 25 de febrer del 2018]
- [4] ESENZIALE. Todas las partes de los drones [<https://esenziale.com/tecnologia/partes-drone/>, 25 de febrer del 2018]
- [5] MOBUS. ¿Que es una batería LiPo? [<https://mobus.es/blog/que-es-una-bateria-lipo/>, 19 de març del 2018]
- [6] QUADRUINO. Motores Brushless [<http://www.quadruino.com/guia-2/materiales-necesarios-1/motores-brushless>, 26 de febrer del 2018]
- [7] MECANIZADO EL ARENAL. Motores Brushless [<https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>, 26 de febrer del 2018]
- [8] FPVMAX. Variador electrónico (ESC): Qué es y cómo funciona [<http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>, 14 de març del 2018]
- [9] BATERÍAS DE GRAFENO. Tipos de baterías eléctricas [<http://bateriasdegrafenopara.com/tipos-de-baterias/>, 20 d'abril del 2018]
- [10] EL DRONE. Historia de los drones [<http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>, 12 d'abril del 2018]

[11] RCTECNIC. Qué es un DRONE. Tipos, nombres y componentes [https://www.rctecnic.com/blog/107_que-es-un-drone--tipos-nombres-y-componentes, 25 de febrer del 2018]

[12] ACLAV. ¿Cuál es el funcionamiento de un motor brushless? [<http://www.aclav.com.ar/cual-es-el-funcionamiento-de-un-motor-brushless/>, 26 de febrer del 2018]

[13] AESA. Disposición 15721 del BOE núm. 316 de 2017 [https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4629426/rd_1036_17_rpas.pdf, 19 de març del 2017]

[14] AESA. Qué podemos hacer con nuestro dron [https://www.seguridadaerea.gob.es/media/4629387/que_podemos_hacer_con_nuestro_dron.pdf, 19 de març del 2017]

[15] HEMAV. El origen y la historia de los drones [<https://hemav.com/el-origen-y-la-historia-de-los-drones/>, 12 d'abril del 2018]

Bibliografia complementària

[16] DRONES DE CARRERAS. PID para Cuadricópteros [<http://dronesdecarreras.com/pid-para-cuadricopteros-que-es/>, 25 de febrer del 2018]

[17] SOLIDWORKS. Buy Software [<https://www.solidworks.es/sw/buy-software.htm>, 24 de febrer del 2018]

[18] MICROSOFT OFFICE. Comprar suscripciones a Microsoft Office [<https://products.office.com/es-es/buy/office>, 24 de febrer del 2018]