

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Títol: Prototip d'aerolliscador controlat a distància

Document: 1. Memòria

Alumne: Yassine el Kabdani Haddouzi

Tutor: Joaquim Armengol Llobet

Departament: Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

Àrea: Enginyeria de Sistemes i Automàtica

Convocatòria (mes/any) juny/2020

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. Antecedents.....	3
1.2. Objecte	3
1.3. Especificacions i abast	3
2. EVOLUCIÓ DELS AEROLLISCADORS.....	5
2.1. Actualitat.....	7
2.2. Classificació.....	8
3. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT	9
3.1. Estructura base	10
3.2. Sistema de sustentació.....	11
3.3. Sistema de propulsió	14
3.4. Motors	15
4. DISSENY MECÀNIC DE L'AEROLLISCADOR	16
4.1. Simulació aerodinàmica.....	19
4.2. Impressió 3D	21
5. MAQUINARI	25
5.1. Microcontrolador.....	25
5.2. Comunicació pel control remot.....	26
5.3. Motor	30
5.4. Servomotor	37
5.5. Alimentació	38
5.6. Controlador (joystick)	38
5.7. Càmera FPV.....	39

6. PROGRAMACIÓ	43
6.1. Comandament	45
6.2. Control del moviment	49
7. POSADA EN MARXA	51
8. PROVES.....	54
8.1. Dinàmica	54
8.2. Control de la trajectòria.....	58
8.3. Distància de control	59
8.4. Superació d'obstacles.....	61
8.5. Superació de pendents.....	63
8.6. Autonomia	65
9. RESUM DEL PRESSUPOST.....	67
10. CONCLUSIONS.....	68
10.1. Treballs futurs.....	69
11. RELACIÓ DE DOCUMENTS	71
12. BIBLIOGRAFIA.....	72
13. GLOSSARI	74
A. CODIS DE PROGRAMACIÓ	76
A.1. Codi Arduino pel comandament	76
A.2. Codi Arduino pel control del moviment	78

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Els aerolliscadors van aparèixer als principis de la dècada dels seixanta amb un gran impacte a escala mundial per l'èxit que van tenir, gràcies als avantatges únics que proporcionaven. A causa d'algunes característiques no poden competir al costat d'altres vehicles popularitzats al mercat, però això no impedeix que en determinats camps siguin una opció atractiva.

Al llarg dels anys, els aerolliscadors s'han utilitzat en diferents àmbits pels avantatges a l'hora de poder accedir a diferents medis: s'han utilitzat per activitats militars, per recerca a llocs inaccessibles (conjuntament amb altres tipus de vehicles), pel transport de mercaderies i fins i tot pel transport de persones.

Encara que la seva tecnologia ha passat per alts i baixos, el seu principi de funcionament és un aspecte clau perquè permet el desplaçament per terra i aigua. Aquest principi es basa en la reducció de la força de fregament que exerceix el medi sobre el vehicle mitjançant la formació d'un coixí d'aire a la part inferior de l'aerolliscador.

1.2. Objecte

L'objectiu del projecte, en primer lloc, consisteix a dissenyar un prototip d'aerolliscador a petita escala per comprovar el principi de funcionament descrit. Es pretén realitzar un control remot d'aquest per tal de poder controlar-lo. A més, també es tracta d'avaluar el moviment per diferents entorns terrestres.

En general, es vol aconseguir conèixer i mostrar el principi de funcionament d'aquests vehicles, per així despertar un interès i motivar el seu desenvolupament.

1.3. Especificacions i abast

L'abast d'aquest projecte serà la construcció i comprovació del funcionament del prototip d'aerolliscador. El prototip tindrà una eslora de 20 cm aproximadament i es fabricarà a través de la impressió 3D, que actualment està en creixement. S'intentarà que el disseny i la

col·locació dels diferents components que el formen garanteixin un bon control del prototip per un correcte funcionament.

El control de l'aerolliscador s'efectuarà mitjançant diferents microcontroladors. Un captarà les ordres de moviment, enviades per l'altre microcontrolador a distància, i en funció d'aquestes ordres, actuarà consegüentment sobre el prototip.

Per tal d'avaluar el comportament dinàmic en diversos entorns, es planteja realitzar proves per superfícies variades, que es distingeixen pels seus coeficients de fregaments. Es procurarà determinar les característiques de resposta de l'aerolliscador en cada cas. També es posa a prova el seu comportament davant de terrenys amb irregularitats en la superfície

2. EVOLUCIÓ DELS AEROLLISCADORS

Aquest capítol pretén il·lustrar el rerefons dels aerolliscadors, cobrint la seva història fins a l'actualitat, s'ha utilitzat com a referència bibliogràfica principal les afirmacions realitzades per Raül Esperet (2014). En aquest capítol, s'explicarà l'evolució que han tingut els aerolliscadors, coneguts com a hovercrafts en anglès.

El primer vehicle pensat a funcionar amb el principi que utilitzen els aerolliscadors va ser fruit del filòsof i teòleg Emmanuel Swedenborg. La teoria proporcionada per aquest filòsof consisteix a reduir la força de fregament que tenen els vehicles i així poder aconseguir augmentar el rendiment, d'aquesta manera s'aconsegueix augmentar la velocitat. Per aconseguir-ho va pensar a afegir aire entre la superfície i el vehicle, agrupant un volum d'aire comprimit a pressió a la part inferior i així reduir la força de fregament amb la superfície.

D'avant d'aquesta idea, l'any 1716, el filòsof va dissenyar una màquina per poder provar la seva teoria. La màquina era semblant a una barca bolcada tal com es mostra a la figura 1, però amb la particularitat que a la part central, al lloc a on se situava el tripulant, hi havia un accionament manual mitjançant rem. En moure'ls es comprimia l'aire a la part inferior i d'aquesta manera el vehicle s'elevava, així aconseguia reduir de manera considerada el fregament de la barca amb la superfície.

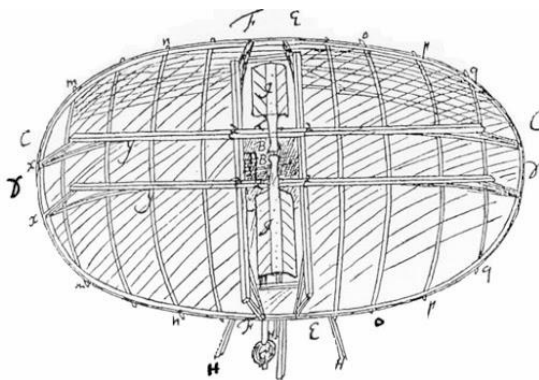


Figura 1. Disseny d'una màquina per provar la seva teoria l'any 1716

Finalment, el filòsof Swedenborg va concloure que el prototip que va dissenyar mai es podria portar a terme, ja que requeria una força molt gran per moure els rem i aconseguir introduir l'aire comprimit a la part inferior d'aquest. Això va ser causa que l'home no té la suficient força per portar-ho a terme.

Al llarg dels anys es van construir diferents prototips i es van registrar algunes patents, però finalment no es va trobar cap aplicació pràctica. No va ser fins que va arribar Christopher Cockerell, el qual va ser l'idealista del vehicle amb coixí d'aire.

A mitjans dels anys cinquanta va proposar una solució pràctica, a més de canviar la configuració de la circulació de l'aire per l'interior, també va determinar l'ús d'un coixí d'aire flexible per sostenir-lo, així donar la llibertat per a qualsevol classe de superfície.

Fins llavors, la idea que hi havia era que els vehicles tinguin un coixí d'aire flexible a alta pressió en la part inferior. Però passava el mateix problema, es requeria molta potència per aconseguir l'aire a altes pressions, la qual cosa feia baixar el rendiment.

No va ser fins a l'any 1952 quan Cockerell va provar una idea que va tenir per tal de solucionar aquest darrer problema. Per realitzar l'experiment va necessitar només un assecador de cabell, una balança i dues llaunes cilíndriques de diferents diàmetres. L'experiment va consistir a construir un difusor d'aire format per una lata interior i una lata exterior d'un diàmetre superior, tal com mostra en la part dreta de la figura 2. Va introduir aire en el difusor i va mesurar la força que l'aire exercia sobre la balança, per posteriorment comparar-la amb quan només s'introdueix l'aire de manera directa sobre una superfície gran.

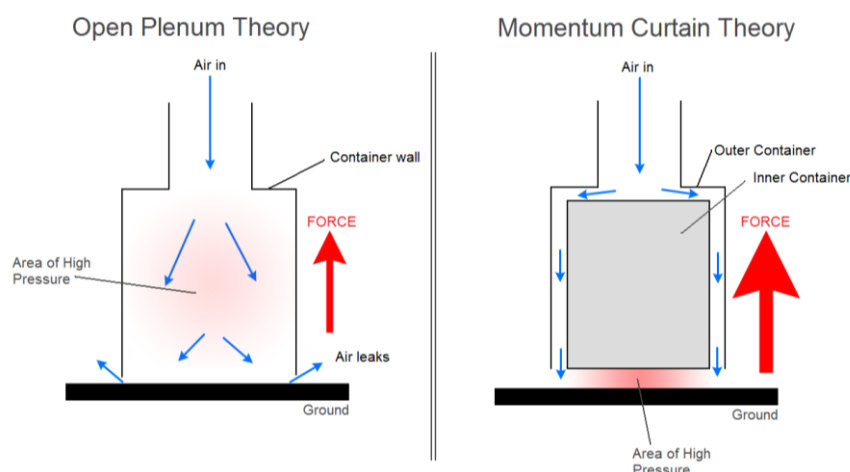


Figura 2. Experiment realitzat per l'inventor Cockerell l'any 1952

Després de realitzar l'experiment va poder concloure que s'exerceix més força quan el difusor extreu l'aire pels costats amb una superfície petita que quan impulsa l'aire directament en una superfície molt més gran. A més de descobrir aquest principi físic va donar el nom d'aerolliscador pels vehicles que funcionen a partir d'aquest principi.

Una vegada realitzat l'experiment va voler aconseguir finançament per part del govern britànic per portar-ho a gran escala. La situació del país, posteriorment a la guerra, va aconseguir convèncer el govern que s'havia de portar a terme abans que cap altre país ho fes. L'any 1956 va patentar la idea del vehicle amb coixí d'aire, així que l'any 1959 es va fer la primera demostració pública del primer aerolliscador construït al món, anomenat SR-N1.

Amb aquest aerolliscador es van realitzar diferents recorreguts, la més important va ser creuar el canal de la Mànega el vint-i-cinc de juliol del 1959. A causa del gran èxit que va tenir el primer model, el desenvolupament dels aerolliscadors va començar a realitzar-se a diversos països del món.

Aquest èxit va començar a frenar per les pujades de preu dels combustibles portades a terme per l'orient mitjà i pel desenvolupament dels catamarans perforadors, ja que utilitzaven un consum inferior per dur a terme quasi les mateixes activitats aquàtiques.

A partir d'aquest moment es va començar a utilitzar bàsicament pel transport de mercaderies i persones de manera puntual. Tot i tenir diversos desavantatges, aquests van quedar compensats per les facilitats que comportava l'ús d'aquests vehicles, ja que els passatgers podrien pujar-hi amb tota comoditat i embarcar les mercaderies amb tranquil·litat, pel fet que podien funcionar sobre diverses superfícies.

2.1. Actualitat

Després de construir el primer model SR-N1, els aerolliscadors van començar a evolucionar al llarg dels anys fins a l'actualitat. En el present, s'utilitzen arreu del món tant per ús militar com per ús civil. Es fan servir per dur a terme diferents activitats com per exemple transbords, trencadors de gel, etc.

També serveixen per realitzar activitats a llocs complexes d'accedir-hi amb altres vehicles. S'utilitzen per competicions pel fet que poden arribar a velocitats elevades i no és fàcil obtenir un control precís, es poden trobar també a les Illes Aleutianes realitzant el transport escolar.

A mesura que passava el temps, s'han anat creant empreses especialitzades a la fabricació dels aerolliscadors arreu del món. Hovercraft Chile és una empresa pionera amb una dècada d'experiència en el desenvolupament d'aquests vehicles, són fabricants i

importadors de parts i peces d'aerolliscadors. L'empresa Argos Hover-Systems és una empresa especialitzada en el disseny i la fabricació d'aquests, l'empresa ha innovat un sistema de sustentació anomenat DATA per aconseguir una estabilitat millor i així poder suportar condicions operatives diverses en relació amb la mida de l'aerolliscador.

2.2. Classificació

Aquests vehicles es troben classificats a la categoria d'amfibi, ja que es poden moure tant per terra com per aigua. En comparació amb els altres vehicles del mateix grup, els aerolliscadors poden aconseguir una alta velocitat sobre ambdós medis.

En funció del disseny que tingui es classificaran en dos grups. La suspensió de l'aerolliscador sobre la superfície és l'aspecte més important i per això és el factor principal que els diferencia.

Per una banda, es troben els tipus plènum, els quals tenen una cambra plenària (es poden veure a part esquerra de la figura 3), és a dir, tenen la particularitat d'introduir aire comprimit a l'interior d'un coixí de manera directa, aquest són poc eficients.

D'altra banda, es troben els del tipus raig perifèric (es poden veure a la part dreta de la figura 3), a diferència dels altres, aquests utilitzen la teoria de l'inventor Cockerell. A la part inferior del vehicle es troba una peça rígida, la qual fa passar l'aire per una superfície més fina i això fa que la mateixa quantitat d'aire generi més força que els del tipus anterior, augmentant el rendiment.

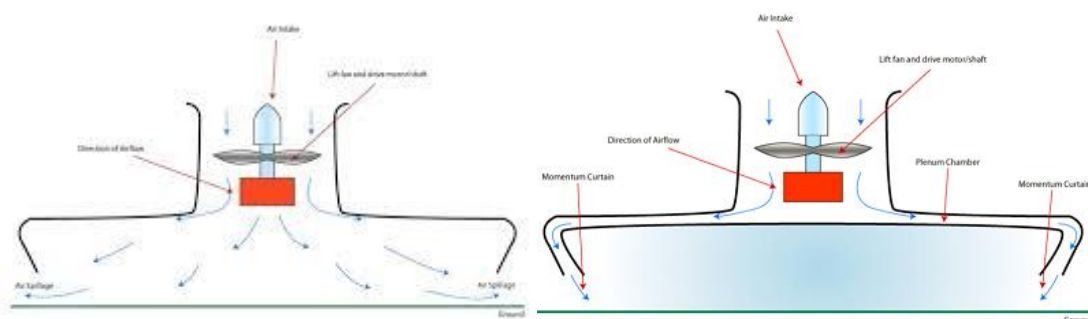


Figura 3. Tipus d'aerolliscador

Aquests tipus es poden combinar utilitzant falces flexibles per a poder alliberar aire més ràpid i poder adherir-se amb més facilitat, ja que s'adapta a la forma de la superfície.

3. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT

En aquest capítol es presenta el principi de funcionament que tenen els aerolliscadors, el qual els hi permet estar en sustentació a una altura suficient d'una superfície, cosa que permet aconseguir negligir el fregament present i a la vegada moure's per diferents medis.

Entre la base de l'aerolliscador i la superfície existeix un coixí d'aire, creat pel mateix vehicle mitjançant la introducció d'aire a l'interior, mentre aquest està en marxa. Gràcies a això, la força de fregament de l'aerolliscador disminueix, llavors amb una força petita de propulsió es podrà desplaçar per diferents superfícies i en funció de l'altura del coixí podrà passa sobre diversos obstacles.

Tal com s'ha comentat anteriorment, no es classifiquen com a aeronaus, sinó com a amfibis, ja que els aerolliscadors se sustenten gràcies a la força de reacció generada per la pressió que es troba a l'interior del coixí d'aire, la qual és prou forta per a aixecar l'aerolliscador de la superfície a una distància determinada i així reduir el fregament amb la superfície.

Per aconseguir el funcionament correcte del vehicle, aquest haurà de complir certes característiques i haurà de tenir components i formes de disseny concretes. L'aerolliscador restarà a sobre d'un coixí d'aire creat pel mateix vehicle mitjançant un o més ventiladors.

La màxima càrrega que pot arribar a suportar estarà limitada per la pressió de l'aire a l'interior del coixí del vehicle, s'obtindrà realitzant el producte de la pressió per la superfície coberta pel coixí. Pel disseny d'aerolliscadors grans, la càrrega operativa es calcula que sigui un vint-i-cinc per cent inferior a la màxima per seguretat en cas d'emergència.

Una vegada el coixí d'aire s'infla i arriba a la pressió adequada, el vehicle es troba amb molt poc contacte amb la superfície, provocant una reducció de la força de fregament. Llavors la major part de la potència que genera el motor, s'utilitza per vèncer les forces contràries al moviment i moure l'aerolliscador, ja que l'aire que necessita per mantenir el coixí inflat no es requereix tanta potència com a l'inici.

Alguns models utilitzen motors separats per realitzar les diferents accions mentre que altres amb un únic motor aconseguix fer anar l'aerolliscador. En la figura 4 es pot veure la circulació que tindrà l'aire en un disseny on només utilitza un únic motor per fer funcionar l'aerolliscador.

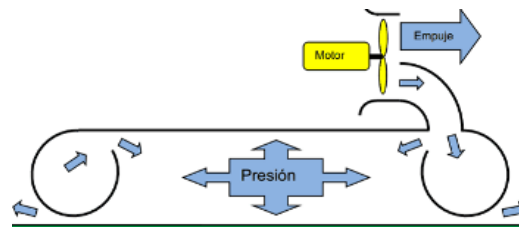


Figura 4. Esquema de funcionament d'un aerolliscador

El moviment de gir del vehicle s'obté controlant el raig d'aire generat pel sistema de propulsió. Aquest control es pot aconseguir girant el motor per la propulsió o es poden utilitzar timons per dirigir el raig d'aire a la direcció que interressi, per així aconseguir girar l'aerolliscador.

3.1. Estructura base

La part més important és l'estructura base. És on aniran posicionats tots els components necessaris per al seu funcionament, a més ha de tenir una forma determinada a la part inferior que permeti la introducció i direcció del flux aire comprimit. Al mateix temps, es recomana que se sigui del tipus raig perifèric, on es compleixi la teoria de l'inventor Cockerell. Per tant és important que es dissenyi de la forma adequada per complir la teoria.

L'estructura interior més utilitzada és la que es mostra a la figura 5. Aquesta reparteix l'aire que ve de l'exterior al llarg del perímetre mentre que pel centre es troba una plataforma solida, proporcionant una gran flotabilitat, amb la particularitat que és una estructura rígida i de fàcil construcció. L'aire circula per l'interior dels costats flexibles i entra a formar part del coixí d'aire de l'interior del prototip pels forats petits que troba. Llavors aquest aire serà expulsat cap a fora quan s'arribi a la pressió corresponent. I així successivament.

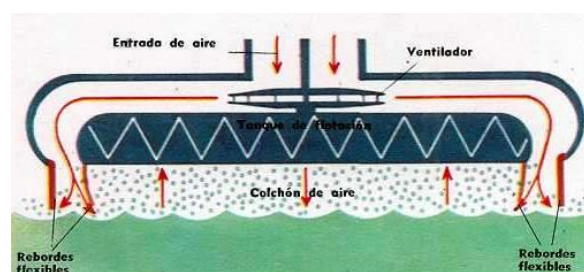


Figura 5. Estructura interior més utilitzada pels aerolliscadors

Els costats flexibles que es troben a la base es coneixen com a falda de l'aerolliscador, tal com s'ha dit anteriorment, està feta a partir d'un material flexible. La falda s'infla i introdueix

l'aire per formar el coixí d'aire a l'interior, cosa que permet moure el vehicle amb una força de propulsió petita, ja que redueix considerablement la força de fregament.

Una vegada el ventilador en marxa, el raig d'aire comença a entrar a la falda i aquesta s'infla. La pressió a l'interior augmenta fins a arribar al punt en què la força que genera la pressió sobre el vehicle iguala al pes de l'aerolliscador. En funció de la potència del ventilador i la mida de la falda, s'aconsegueix una determinada altura de sustentació.

Quan la força que realitza la pressió sobre el vehicle és superior al pes d'aquest, el vehicle s'eleva i el coixí d'aire intern comença a perdre aire, llavors és quan es produeix un equilibri. Sempre s'ha de complir l'equació 1 per tal que el vehicle es pugui trobar en suspensió constant a una certa altura. Llavors, en aquest punt, és necessari que l'aire que empeny el ventilador a l'interior estigui relacionat amb la quantitat d'aire que es perd per poder mantenir l'equilibri constant.

$$P_{ac} > \frac{P_v}{S_t} \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

P_{ac} : Pressió d'aire a l'interior de la falda.

P_v : Pes del vehicle.

S_t : Superfície inferior del vehicle.

3.2. Sistema de sustentació

El sistema de sustentació és el que s'encarrega de mantenir el vehicle amb poc contacte amb la superfície corresponent i permet una llibertat de moviments sobre quasi qualsevol superfície. Per tal d'aconseguir-ho, és necessari que hi hagi un raig d'aire a la part inferior de l'aerolliscador, el qual generi una pressió suficient gran per mantenir l'aerolliscador en suspensió.

Gràcies als principis de física, s'obté l'equació 2, la qual defineix la relació entre la força i la superfície amb la pressió que realitza. Amb aquesta equació es podrà trobar la pressió

necessària que ha de tenir el coixí d'aire, per tal de mantenir el prototip en suspensió constant, coneixent la força del pes del vehicle i la superfície que ocupa el coixí d'aire.

$$P_c = \frac{F_s}{A_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

P_c : Pressió relativa del coixí d'aire del vehicle.

A_i : Àrea inferior del vehicle.

F_s : Força generada pel pes del vehicle.

El vehicle disposa d'un pes propi, a aquest se li ha de sumar tota la càrrega que porta a sobre, llavors la força de sustentació ha de ser capaç de suportar tot el pes del vehicle i així generar un equilibri estàtic, amb l'equació 3 es podrà passar la massa a pes.

$$F_s = W_v \times g \quad (\text{Eq. 3})$$

On:

W_v : Massa total del vehicle.

g : Gravetat.

Una magnitud important per conèixer la potència que es requereix pel sistema de sustentació, és el cabal d'aire que el motor ha de generar i que es necessita per aconseguir el correcte funcionament del vehicle.

$$Q_s = V_s \times A_s \quad (\text{Eq. 4})$$

On:

Q_s : Cabal de l'aire d'entrada a l'aerolliscador.

V_s : Velocitat de l'aire d'entrada a l'aerolliscador.

A_s : Superfície de l'aire d'entrada a l'aerolliscador.

Per calcular el cabal d'aire necessari, primer s'haurà de trobar la velocitat a la qual entrà el raig d'aire, per complir amb les condicions que es requereixen. En aquest cas, s'utilitza el principi de Bernoulli per a trobar-la.

S'ha de tenir en compte que el principi a aplicar serveix únicament a fluids incompressibles i l'aire no ho és, però analitzant la situació, s'arriba al punt que l'aire que passa a l'interior es comprimeix poc, ja que quan arriba a certa pressió, part d'aquest aire comença a escapar-se, llavors es pot deduir, que aplicant aquest mètode pot ser una aproximació bona. Una vegada el prototip muntat, es podrà comprovar la veracitat del càlcul.

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g \times Z_1 = \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g \times Z_2 \quad (\text{Eq. 5})$$

On:

V_1 : Velocitat de l'aire a l'entrada del vehicle.

Z_1 : Altura de l'aire a l'entrada del vehicle.

P_1 : Pressió de l'aire a l'entrada del vehicle.

ρ : Densitat de l'aire.

V_2 : Velocitat de l'aire a la part inferior del vehicle.

Z_2 : Altura de l'aire a la part inferior del vehicle.

P_2 : Pressió de l'aire a la part inferior del vehicle.

A partir de l'equació 5 es pot concloure que l'expressió per calcular la velocitat de sortida es redueix a l'equació 6, considerant que el balanç energètic es realitza a l'estat inicial de la posada en marxa. Llavors es té que la velocitat final i l'altura d'aquest punt seran nuls, també cal dir, que la pressió inicial és equivalent a l'atmosfèrica, per tant, si es considera que són pressions relatives, l'atmosfèrica agafa un valor de 0.

$$V_1 = \sqrt{2 \times \left[\frac{P_2}{\rho} - g \times Z_1 \right]} \quad (\text{Eq. 6})$$

Una vegada coneixent els valors de la pressió que ha de tenir l'aerolliscador i el cabal d'aire que necessita, es procedeix a calcular la potència necessària que ha de tenir el sistema de sustentació pel correcte funcionament del vehicle.

$$P_s = p_c \times Q_s \quad (\text{Eq. 7})$$

On:

P_s : Potència útil de sustentació.

3.3. Sistema de propulsió

El sistema de propulsió és el que permet generar la força per tal de moure el vehicle. El motor mou el raig d'aire per tal de generar una força de reacció contrària i així moure l'aerolliscador en el sentit que interessa. Per trobar aquesta força s'utilitzà l'equació 8 tenint en compte diferents paràmetres.

$$F_e = \frac{A_t \times p_a \times V_v^2 \times C_D}{2} \quad (\text{Eq. 8})$$

On:

F_e : Força per la propulsió del moviment del vehicle.

p_a : Densitat de l'aire.

V_v : Velocitat del vehicle.

A_t : Superfície transversal del vehicle.

C_D : Coeficient d'arrossegament del vehicle.

Una vegada calculada la força necessària d'empenta, amb l'equació 9 es pot trobar el valor de la potència de propulsió pel funcionament de vehicle.

$$P_p = F_e \times V_v \quad (\text{Eq. 9})$$

On:

P_p : Potència útil de propulsió.

Amb les equacions esmentades anteriorment, es podrà trobar els valors dels diferents components a utilitzar al llarg del projecte per la construcció de l'aerolliscador. A més, per escollir els components s'haurà d'aplicar el rendiment necessari, per tal de poder trobar la potència elèctrica que ha de consumir el motor pel correcte funcionament.

3.4. Motors

En alguns casos és necessari incloure un sistema de motors adequat, capaç de generar prou potència per alimentar tant el sistema de propulsió com el de sustentació. En general, per aquests vehicles es poden utilitzar tant motors elèctrics com motors de combustió.

Els motors elèctrics se solen recordar com a més pesats que els motors de gasolina equivalents. Això és perquè abans les bateries eren un gran problema a causa del seu pes, però actualment ha millorat la relació en capacitat i pes.

En funció del terreny pel qual es vol utilitzar, es recomana un tipus o altre. Els aerolliscadors amb motors elèctrics s'utilitzaran per superfícies regulars mentre que pels terrenys irregulars es recomana l'ús de motors de combustió a causa de la gran potència que ofereixen amb un pes baix.

Amb aquests motors es formen els ventiladors, utilitzant hèlices, d'aquesta manera es podrà aconseguir un moviment d'aire necessari tant per la sustentació com la propulsió. Es poden trobar ventiladors axials, centrífugs o de flux mixt. Es recomana que aquest estiguin tancats pels costats per tal de no perdre l'aire.

4. DISSENY MECÀNIC DE L'AEROLLISCADOR

Una vegada aclarit que són i com funcionen els aerolliscadors, es procedeix a realitzar el disseny del prototip a portar a terme en el projecte.

En aquest capítol s'explica el disseny mecànic que s'ha decidit per realitzar el prototip d'aerolliscador. El disseny final va passar per diferents etapes per tal d'aconseguir un model més òptim i que compleixi de la millor manera amb les restriccions del material a utilitzar.

Abans de començar a pensar en el disseny del prototip s'han de determinar les característiques principals dels aerolliscadors i seleccionar-ne les que més convinguin en cada cas. Es determina la configuració de distribució de potència, la geometria del vehicle, l'estructura de la falda d'aire i el control de la direcció.

En funció dels sistemes de sustentació i de propulsió, hi ha tres configuracions diferents. Per aquest cas, s'ha decidit optar per una configuració de potència unitària, és a dir, l'aire que mou el motor servirà per alimentar tant el sistema de sustentació com el sistema de propulsió del vehicle, a la figura 6 es pot veure un esquema del funcionament d'aquest sistema, indicant la circulació de l'aire mitjançant fletxes. S'ha optat per aquesta configuració pel fet que suposa una reducció de la mida i del pes d'aquest, ja que es vol realitzar un prototip petit.

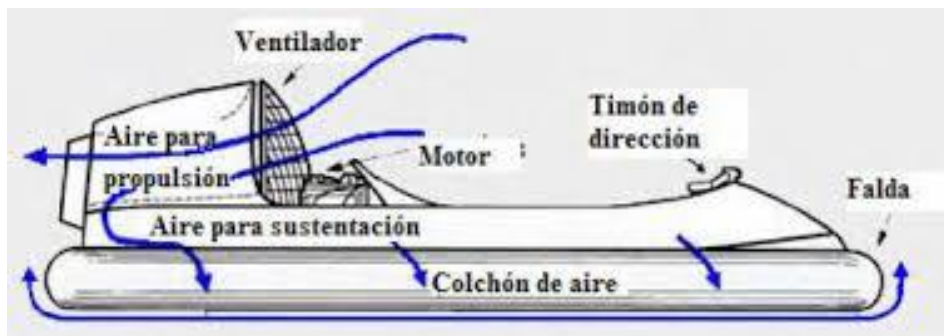


Figura 6. Esquema de configuració d'un sistema de potència unitària

Tal com s'ha comentat anteriorment, el coixinet d'aire a l'interior del vehicle i la falda és l'aspecte més important. Per aquest cas, s'ha optat per l'ús d'un coixinet d'aire de la categoria raig perifèric, ja que d'aquesta manera s'aconsegueix que s'aprofiti més bé la força de l'aire que es mou. Així s'obté un sistema de sustentació millor que utilitzant l'altre estructura, pel

simple fet que l'estructurà que s'ha escollit aprofita més bé la força generada per l'aire, tal com va comprovar l'inventor Cockerell.

També s'ha optat per la falda tipus bossa per la seva simplicitat. Aquesta consisteix a tenir l'aire retingut momentàniament a l'interior de la falda com si es trobés en una bossa, amb secció transversal circular. Posteriorment l'aire passa al coixí d'aire, que es troba a la part inferior del vehicle. Per aquest cas s'utilitza una bossa de polietilè, ja que és flexible i es disposa d'abundància, però es té la restricció del pas per superfícies que la pugui fer malbé.

Finalment falta decidir el tipus de geometria del prototip. Deixant de banda la dificultat de construcció, s'ha escollit la geometria en forma de D, ja que ofereix una millor aerodinàmica i té una millor presentació estètica respecte a les altres formes. A la figura 7 es pot veure un exemple d'aerolliscador amb la geometria seleccionada.



Figura 7. Exemple d'aerolliscador amb forma geomètrica de D

L'hèlice a utilitzar juntament amb el motor serà de tres pales amb un diàmetre de 7 cm, s'ha optat per aquesta per dos motius: és la que més es troba en el mercat a un preu raonable i a més, produeix un moviment d'aire superior amb les mateixes RPM del motor que una hèlice amb dues pales.

Per obtenir el control de la direcció, es pot realitzar de diverses maneres. Per aquest cas, s'utilitza un timó a la part posterior del sistema de propulsió. En funció de la direcció que es trobi el timó, el vehicle tindrà una tendència en canviar la direcció. S'han escollit dos models diferents, mitjançant la realització de diferents proves que es comentaran més endavant, es determina quin dels dos s'utilitzarà.

Una vegada determinades les diferents característiques que ha de tenir el prototip a dissenyar es procedeix a escollir el disseny d'aerolliscador a construir. Fent una recerca per

la xarxa, es troben alguns models preparats amb característiques que interessin i altres que no.

El resultat del disseny del prototip és fruit de la fusió de diferents parts de models de diferents autors, amb les modificacions oportunes, per tal d'adaptar el prototip final a les característiques exigides anteriorment i les condicions dels components a utilitzar.

A més, una vegada dissenyada la primera versió del prototip, es realitzen proves per tal de comprovar el funcionament a la realitat, davant d'aquestes proves, s'ha pogut observar que el disseny necessitava algunes adaptacions per una millora de les prestacions, sobretot en la col·locació dels diferents dispositius que es requereixen pel seu funcionament i així aconseguir un bon equilibri d'aquest.

Per altra banda, també s'ha de dissenyar el comandament per tal de controlar el prototip a distància. Les característiques que el determinen són poques: només ha de ser prou gran per a col·locar-hi a l'interior els components a utilitzar i poder sostenir el monitor de visualització de la càmera. Per acabar, ha de tenir un suport per on es pugui sostenir i controlar el prototip a la vegada.

Pel disseny de les diferents parts del prototip i del comandament s'utilitza el software SolidWorks, és un software CAD pel modelatge en 3D. A la figura 8 es pot veure el logotip d'aquest. Aquests programes faciliten la realització de diferents dissenys de peces en 3D d'una manera bastant simple. També permet el muntatge de conjunts formats per diferents peces i generar plànols tècnics per a la seva construcció d'una manera ràpida i automatitzada. A més permet l'exportació i importació dels documents a una gran varietat de formats.



Figura 8. Logotip del programa SolidWorks

A més dels avantatges descrits anteriorment, s'ha optat per utilitzar aquest software pels coneixements previs que s'han adquirit al llarg del grau en enginyeria, per la multitud de manuals d'utilització i informació disponible a internet, pel disseny de qualsevol classe de figura existents.

4.1. Simulació aerodinàmica

Per tal d'analitzar en fons el disseny del prototip és convenient realitzar una simulació de fluids per tal de veure la resposta que té el model davant de l'aire. D'aquesta manera es podrà avaluar si el disseny del prototip és correcte.

Vistos els diferents programes per realitzar simulacions aerodinàmiques, s'ha optat per utilitzar el programari ANSYS, tot i ser un producte comercial, té la seva gràcia en utilitzar-lo en l'àmbit educatiu per la simulació gràfica que presenta.

El software té diferents opcions per simular diferents processos, però per aquest cas s'utilitza el mode fluid flow, concretament la versió FLUENT, que servirà per a la simulació del fluid que passa a l'exterior del disseny. Per arribar a la solució final, s'ha de passar pels cinc apartats que es troben en la figura 9.

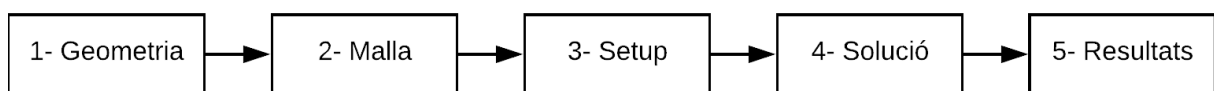


Figura 9. Procés per realitzar la simulació aerodinàmica

Primerament, s'ha de començar important la geometria, sobre la qual es vol realitzar la simulació, aquesta ha de tenir format IGS o equivalent. El mateix programari permet la modificació o possibles retocs, també s'ha de generar l'entorn límit per on circularà l'aire i finalment anomenar les diferents cares per tal que posteriorment, es pugui seleccionar la funció que té cada una, si serà paret, entrada o sortida d'aire.

Un cop fet el primer apartat, es procedeix a generar la malla del sistema de la geometria realitzada en el pas anterior. Es defineix les característiques que es vol obtenir de la malla com ara la mida de la malla, el grau de suavització, etc.

En el tercer apartat s'ha de realitzar la configuració del sistema, la qual proporcionarà els resultats. Se selecciona el tipus de fluid a simular, en aquest cas serà l'aire. També es determina la velocitat d'entrada que el fluid ha de tenir i s'introdueix la funció que tenen les diferents cares de l'entorn creat a l'apartat 1. Es configura la precisió dels resultats que es presentaran, controlant el nombre d'iteracions que s'han de fer a l'hora de realitzar el càlcul.

Una vegada que s'acabin de realitzar els càlculs de les iteracions programades, es procedeix a configurar la forma en què es vol visualitzar la solució, corresponent al quart apartat. Per aquest cas, s'indica que es vol visualitzar la simulació de la velocitat de l'aire.

Finalment, l'últim apartat servirà per visualitzar els resultats obtinguts. Per obtenir les gràfiques de la simulació de la velocitat en un pla determinat, es genera una nova superfície, que s'utilitza per mostrar els resultats sobre el pla corresponent. Llavors, se selecciona la nova superfície creada, la variable a mostrar, el tipus de resultat que es vol obtenir, com a vectors o com a contorn, i per acabar, s'indica amb quina resolució es vol veure els resultats.

Immediatament es presenten els resultats, es veu gràficament el comportament de l'aire amb la geometria. A la part de l'esquerra, es mostra la llegenda que relaciona els colors amb la velocitat que adquireix el fluid. A partir d'aquí, es pot moure la superfície creada al llarg de l'eix per tal de veure els resultats al llarg dels diferents plans de la geometria. També es pot guardar l'animació que és crear movent la superfície.

Quan s'utilitza la visualització per vectors, es pot configurar per visualitzar el moviment de partícules a la velocitat que els hi toca, podent veure la diferència que hi haurà entre zones. També, si se selecciona la superfície per on entra l'aire, es podrà veure vectors per tota l'amplada de la geometria, que permet obtenir una visualització més realista del comportament de l'aire vers la figura.

A la figura 10 es poden veure els diferents resultats gràfics que es poden obtenir amb el programari, a l'esquerra s'utilitza una simulació amb vectors per tota l'amplada de la geometria, mentre que a la dreta s'utilitza la tècnica del contorn per visualitzar el resultat en un pla determinat.

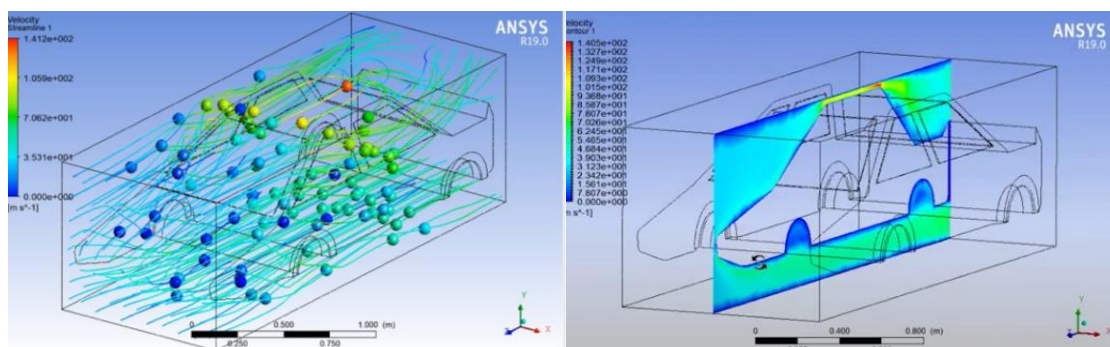


Figura 10. Resultats que pot oferir la simulació

Per utilitzar el programari comentat anteriorment, es requereix un ordinador potent capaç de realitzar molts càlculs sense que quedi bloquejat. A les aules de la universitat, es pot utilitzar el programa sense problemes, però per temes de seguretat davant la situació viscuda, no s'hi va poder accedir. Llavors, per aquest cas, es procedirà a la construcció del prototip sense cap simulació prèvia.

Amb els resultats de la simulació, es volia validar l'aerodinàmica del disseny per tal que fos més eficient, que pogués treballar amb una major acceleració, és a dir, que oferís una força de resistència mínima. És a dir, es volia observar com la part exterior respon amb el moviment de l'aire, si hi ha punts morts on queda retingut l'aire, etc.

També es volia comprovar la circulació de l'aire per la part inferior, ja que d'aquesta manera es podria determinar si l'aire era capaç de circular per la zona inferior, i si els forats presents eren suficient per escapar-se i mantenir part de l'aire retingut.

4.2. Impressió 3D

Quan ja es té el disseny final del prototip preparat, es procedeix a la seva construcció. S'ha d'aconseguir que el prototip tingui una estructura lleugera, però al mateix temps consistent per tal d'aguantar les diferents peces entre si i no deformar-se ràpidament durant el funcionament d'aquest.

Per aquest cas, s'ha optat per utilitzar la tecnologia de la impressió 3D, per dos motius: per complir amb les condicions anteriors de manera simple i el fet de realitzar la peça a mà comportaria més dificultat i un cost major. Gràcies als avenços de la tecnologia de la impressió 3D, es pot imprimir quasi qualsevol disseny sense preocupar-se i a un preu econòmic.

Per aquest cas, s'ha utilitzat la impressora Prusa i3 MK3, la qual és una impressora de fabricació de FFF i actualment és una de les més utilitzades en el món per la simplicitat que ofereix.

Pot arribar a imprimir a 150 mm/s i amb una resolució de $\pm 0,1 - 0,2$ mm, el filament ha de tenir un diàmetre d'1,75 mm i es recomana utilitzar el termoplàstic PLA. El llit calent desmuntable i flexible és un gran avantatge que presenta a l'hora d'extreure la peça impresa sense fer-la malbé.

Una vegada el disseny finalitzat, per procedir a la seva impressió, primer s'ha d'exportar a format STL per tal de poder-se imprimir, ja que aquest permet emmagatzemar la descripció completa d'objectes en 3D.

Abans de començar a imprimir-se, l'arxiu generat ha de passar pel software de la impressora per preparar l'arxiu a enviar, el software corresponent serà l'encarregat de dividir el sòlid 3D en diferents capes, ja que la impressora imprimeix capa per capa.

Finalment s'obtindrà un arxiu en format gcode, el qual la impressora serà capaç de processar per tal de dur a terme la impressió. A la figura 11 es pot veure el moment en què la peça de la base s'està imprimint.

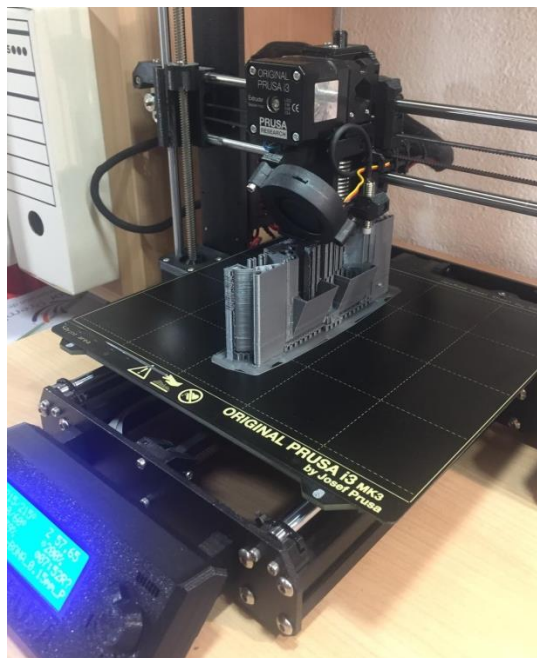


Figura 11. Impressió de la peça base a la Prusa i3 MK3

S'ha fet servir el programari PrusaSlicer 2.0, el que ve amb la instal·lació de la impressora. En el programa es configuren les característiques finals de la impressió, s'utilitza el mode simple, així només es toquen els paràmetres bàsics, ja que els altres venen per defecte en funció del model de la impressió.

Primer de tot, s'indica el model d'impressora a utilitzar i automàticament es configuren els paràmetres per defecte, si no s'està d'acord amb algun, es pot modificar. El més important és introduir les característiques del filament a utilitzar per a garantir les temperatures correctes pel termoplàstic.

Per aquest prototip s'ha utilitzat el filament PLA, ja que és el més recomanat per la impressora, dóna un toc de brillantor a l'acabat i a més és rígid i resistent. Tal com marca la impressora 3D, aquest tindrà un diàmetre d'1,75 mm, tot seguit es configura en un interval de temperatura de 200 a 220 °C. S'han utilitzat diferents colors per imprimir les peces, tots del mateix material, així s'aconseguirà una combinació de colors atractiva i s'aprofitarà el filament. A la figura 12 es pot veure el nivell de les característiques físiques del filament.

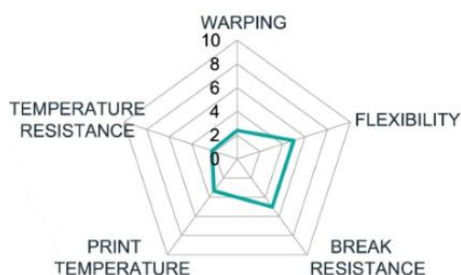


Figura 12. Característiques del filament PLA

A la taula 1 apareixen els valors amb les unitats corresponents que han de tenir els diferents paràmetres a modificar per tenir una impressió correcta del prototip, tots ells pertanyen al mode simple, ja que els altres ja es consideren com a bons.

Característiques	Quantitat	Unitats
Mode	Simple	---
Patró de farciment	Giroide	---
Carcassa Vertical – Perímetre	2,00	u
Carcassa Horitzontal – Capa solida superior	7,00	u
Carcassa Horitzontal – Capa solida inferior	5,00	u
Densitat de farciment	10,00	%
Temperatura extrusió	215,00	°C
Temperatura base	60,00	°C
Altura de la primera capa	0,20	mm
Altura de les capes	0,15	mm
Distancia de l'objecte	2,00	mm
ample de la bossa	5,00	mm
Diàmetre del filtre	0,40	mm
Densitat	1,24	g/cm ²

Taula 1. Paràmetres pel mètode d'impressió

En funció dels valors donats, la peça tindrà una tolerància de deformació i precisió determinada. A més dels paràmetres principals del mètode de la impressió, hi ha la possibilitat d'orientar la peça, escalar-la i moure-la sobre el llit de la impressora.

Una vegada totes les característiques definides correctament, es procedeix a col·locar els suports, els quals serveixen per sostenir la peça durant la seva impressió. Aquests suports s'imprimeixen amb una densitat inferior i posteriorment a la impressió, es poden extreure amb facilitat.

Aquest es col·loquen de manera automàtica però sempre es pot escollir les zones que no interressi posar-ne, concretament a llocs on es troben detalls molt delicats. A la figura 13 es pot veure la peça de la base amb els suports col·locats, de color verd, els quals ajudaran a imprimir aquelles capes on no tenen cap base per poder sostenir-se. Pel conjunt de les peces, s'ha indicat l'opció automàtica de col·locació dels suports.

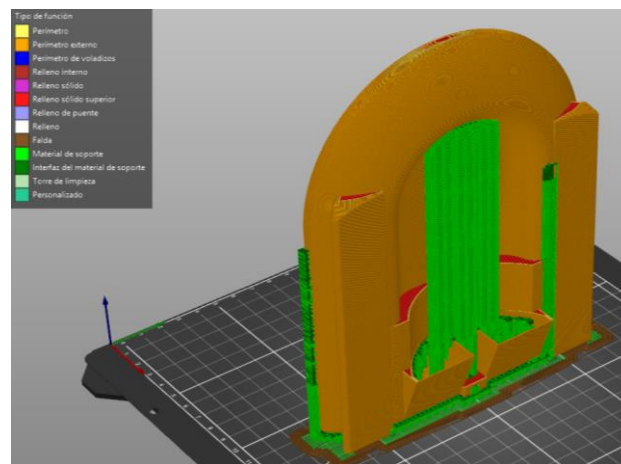


Figura 13. Base del prototip amb els suports necessaris

Quan les peces ja estiguin disponibles, es procedeix a fabricar la falda de l'aerolliscador. Tal com s'ha dit anteriorment, s'agafarà una bossa de plàstic de polietilè i es tallarà la silueta del prototip afegint 3,5 cm per cada costat. A l'interior també tindrà un forat que serà per on passarà l'aire cap a l'exterior. Aquesta s'acobla als suports del prototip que posteriorment s'enganxen a la part inferior del vehicle formant finalment la falda de l'aerolliscador.

Es decideix deixar un marge de 3,5 cm, per permetre a l'aerolliscador aixecar-se una altura suficient, posteriorment es comprovarà mitjançant proves la capacitat en superar obstacles de determinades altures, s'ha de tenir en compte però, que la part inferior es troba baixada 5 cm respecte al prototip, cosa que el farà estancar en alguns obstacles.

5. MAQUINARI

En aquest capítol es detallen tots els components a utilitzar per al prototip d'aerolliscador a construir. A l'hora de seleccionar el maquinari necessari es té en compte les principals necessitats pel bon funcionament d'aquest. S'explicaran els components escollits i les justificacions pertinents per les quals s'ha optat per aquells en particular.

S'intenta seleccionar components de característiques semblants per tal que puguin ser compatibles entre ells. Tots els components a sobre l'aerolliscador estan col·locats de manera estratègica per tal de distribuir el pes i així mantenir el centre de gravetat a l'eix simètric de prototip.

5.1. Microcontrolador

Un microcontrolador és un circuit integrat programable amb la capacitat d'executar ordres que es troben emmagatzemades a la memòria. Inclou les tres principals unitats funcionals d'un ordinador, que són, la CPU, una memòria interna i unitats de E/S, els tres es troben connectats entre bussos.

A causa de la petita dimensió i el baix cost econòmic, són l'opció popularitzada en l'actualitat. En aquests moments hi ha diverses empreses que es dediquen a la fabricació d'aquests. Analitzant diversos fabricants, s'observa que tenen diverses característiques semblants entre si, però per aquest cas, es decideix utilitzar microcontroladors de la casa Atmel per la possibilitat que ofereixen en treballar amb la plataforma Arduino.

Aquesta plataforma ha anat creixent amb el temps gràcies a la facilitat que ofereix als programadors a programar sense previs coneixements experts d'electrònica. A més, es disposa de molta documentació, projectes fets i manuals a internet. També, cal recalcar que és un llicència completament gratis i preparada per ser ampliada a través dels programadors arreu del món.

Per aquest cas, s'utilitza la placa Arduino UNO, tant pel comandament com pel prototip. S'ha escollit utilitzar aquesta per dos motius: pel baix cost econòmicament que té i per la comoditat que ofereix a l'hora d'integrar components. El processador que porta inclòs és l'ATmega328, un processador compacta amb una velocitat de 16 MHz. La placa disposa de

14 E/S digitals, 6 entrades analògiques, 6 sortides amb PWM i pot suportar la comunicació sèrie i I2C. En la figura 14 es pot visualitzar la placa que s'utilitza en el projecte.



Figura 14. Placa Arduino UNO

El microcontrolador controla tot el sistema elèctric del prototip. A través dels senyals d'entrada que rep, mitjançant càlculs i condicions establertes prèviament, genera senyals per tal de ser enviades al prototip. Una vegada es rebin els senyals, aquest procedeix a actuar sobre els actuadors del prototip, mitjançant l'activació o desactivació de les sortides, garantint així el correcte funcionament d'aquest.

Aquesta placa és capaç de realitzar diferents càlculs a altes velocitats, cosa que afavoreix a l'hora de controlar l'aerolliscador, ja que serà un control directe, sense retards de temps importants entre donar l'ordre i executar-la.

5.2. Comunicació pel control remot

La funció principal d'aquest mòdul en el projecte és proporcionar la capacitat de transmetre informació d'un punt a un altre sense la necessitat del cablejat. Davant de les diferents opcions que realitzen aquesta funció, s'ha escollit la comunicació mitjançant el protocol Zigbee per dos motius: es té diversos coneixements adquirits pel grau en enginyeria i per la gran distància que es pot transmetre la informació.

Zigbee és un protocol de comunicacions sense cables basat en la norma IEEE 802.15.4. Creat per l'organització Zigbee Alliance i dirigit pel sector de domòtica, IOT i control d'edificis.

Aquest protocol ofereix la possibilitat de transmetre informació a una certa distància a dispositius que utilitzen la comunicació sèrie, així que, és compatible amb el

microcontrolador a utilitzar. Aquestes comunicacions les realitza a la banda lliure de la freqüència 2,4 GHz. Es divideix la banda en 16 canals de 2 MHz d'amplitud i 5 MHz de separació tal com s'observa a la figura 15.

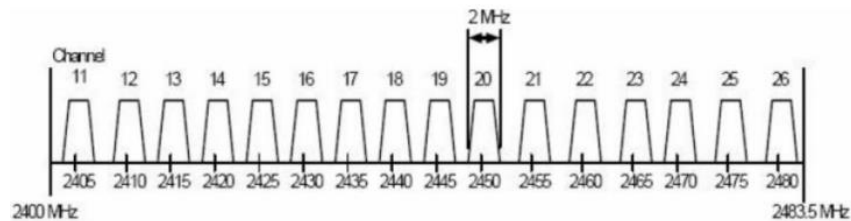


Figura 15. Espectre de la banda lliure de l'estàndard IEEE802.15.4

Per aquest cas, s'utilitza el mòdul XBee S2. La velocitat de transmissió de dades pot arribar als 256 kbps, també conté E/S analògiques i digitals pròpies, però per aquest cas no s'utilitzaran. S'alimenta a 3,3 V i té un consum inferior als 50 mA. La distància pot variar de trenta a cent metres en funció de l'antena a utilitzar i la potència d'emissió de cada model.

Existeixen dues sèries de XBee. Els de la sèrie 1 estan encarats a sistemes petits, únicament per substituir el filament entre dos punts, mentre que els de la sèrie 2 estan més preparats i permeten la creació de xarxes entre diferents mòduls i proporciona més possibilitats. Per dur a terme el projecte s'ha optat pel XBee de la sèrie 2, ja que ofereix més possibilitats i en el cas que interessen ampliar el projecte en un futur, no es requerirà cap element de comunicació extra. S'ha optat per utilitzar l'antena amb cable, anomenada Whip, la qual es pot veure a la figura 16.



Figura 16. Mòdul XBee Series 2

Actualment, existeixen diferents topologies de comunicació compatibles amb el mòdul seleccionat, les quals es poden veure a la figura 17. Cada una serveix per a un tipus específic de control. Per aquest cas, s'escull utilitzar la topologia de malla, ja que no és jeràrquica. És a dir, qualsevol mòdul es pot connectar amb qualsevol altre que es troba a la mateixa xarxa, es preparà per si en algun futur interessa tenir interconnectats diferents

aerolliscadors i que es puguin comunicar entre si, així no s'haurà de realitzar cap canvi de configuració ni de component.

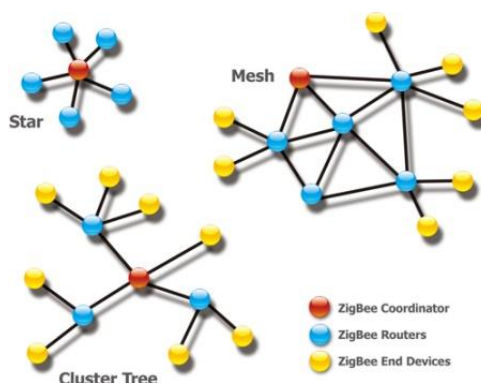


Figura 17. Tipus de topologies de les xarxes

Abans de començar a realitzar la programació, els mòduls s'han de configurar per tal d'indicar en quina funció i característiques han de treballar, en quin canal actuaran, etc. S'utilitzarà el programari X-CTU per tal de configurar cada mòdul juntament amb una placa adaptadora USB. A la figura 18 es pot veure la pantalla principal que mostra el programa per introduir les diferents dades. També s'ha de definir el tipus de topologia a utilitzar, i tot seguit, en el mateix software es pot veure els diferents mòduls que es troben a la xarxa creada i el seu estat en temps real.

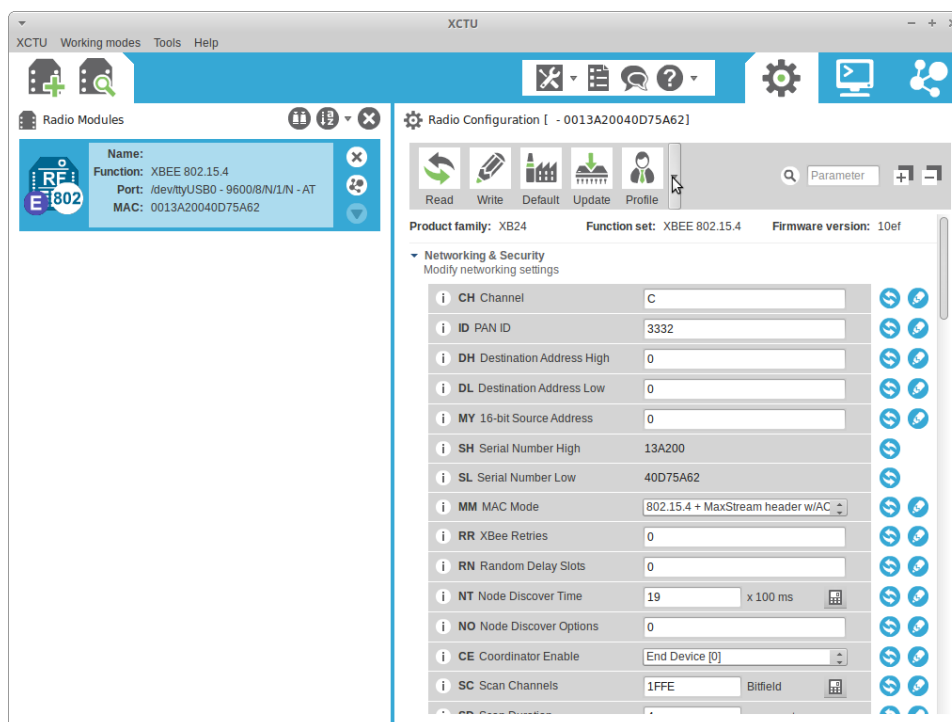


Figura 18. Pantalla software XCT-U per configurar mòduls XBee

Pel mòdul XBee del comandament se selecciona la funció ZigBee coordinador API, ja que és l'encarregat d'establir el canal de comunicació per tota la xarxa, mentre que pel mòdul de l'aerolliscador se selecciona la funció de ZigBee encaminador, el qual posteriorment, tindrà la capacitat per unir-se a la xarxa establerta pel coordinador.

S'ha d'assegurar que els diferents camps del programa, pels dos mòduls, continguin el mateix. Per fer-ho, només es canvia el valor del PAN ID per un número igual pels dos i es selecciona el canal de comunicació, els altres valors es deixen per defecte. D'aquesta manera s'aconsegueix que només els que tinguin aquests determinats valors, podran unir-se a la xarxa i comunicar-se entre si.

El mateix mòdul disposa de diferents tipus d'enviament de dades: mode AT, mode de comandes i mode API. El mode AT només serveix per realitzar la comunicació entre dos mòduls de manera senzilla, on no s'ha de crear cap paquet de dades, es configura de tal manera que tot allò que arribi a un mòdul, s'envia de manera automàtica a l'altre mòdul, prèviament configurat.

El mode de comandes, és un mode més restrictiu que els altres, ja que només es pot enviar o rebre dades d'un coordinador a un encaminador o dispositiu final, no es poden comunicar mòduls que no siguin coordinadors, per aquesta raó es descarta. Finalment, l'única opció restant a utilitzar, és el mode API.

Aquest últim mode, el mode API, permet la comunicació dels mòduls entre ells independentment del tipus que siguin, excepte els End device. Aquest mode utilitza un protocol específic per la transmissió, el protocol consisteix a construir un paquet de dades, indicant l'adreça MAC del destinatari, el tipus, les dades i més característiques.

En la figura 19 és mostra el protocol que se segueix per realitzar la transmissió d'informació. Es pot veure que la trama a enviar està formada per diferents dades, de diferents mides.

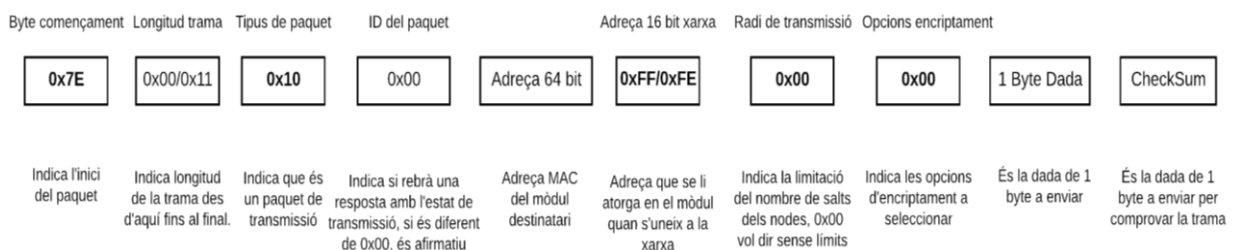


Figura 19. Protocol per les trames a enviar del mòdul XBee S2 del mode API

S'ha de tenir en compte també, que les posicions marcades en negreta són constants en qualsevol trama a enviar per aquests mòduls. Les altres, són variables que en funció del tipus de transmissió que es vol obtenir, s'escull un valor o altre.

Per aquest cas, només s'utilitza el mòdul XBee per transmetre la informació a distància, tots els càlculs restants els realitza la placa Arduino. D'aquesta manera, només es connecta l'alimentació i els pins per la comunicació sèrie per realitzar la transmissió, tal com s'indica a la figura 20.

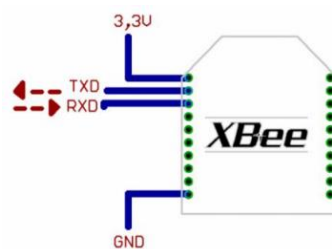


Figura 20. Connexions del mòdul XBee amb la placa Arduino

Per tal de poder connectar el mòdul XBee amb la placa Arduino, es requereix d'un adaptador especial, ja que els pins d'aquest són més prims. En la figura 21 es pot veure la forma de l'adaptador a utilitzar, el qual s'ha realitzat manualment i es trobava al laboratori de sistemes intel·ligents.



Figura 21. Adaptador XBee per Arduino UNO

A més d'adaptador pel mòdul XBee, també serveix per a la connexió d'un mòdul Bluetooth, disposa d'un interruptor per seleccionar la funció a utilitzar.

5.3. Motor

El component principal del prototip és el motor elèctric que el fa funcionar. Aquest motor és l'encarregat de realitzar la propulsió i mantenir en suspensió l'aerolliscador, per tant, ha de

tenir la potència suficient per realitzar aquestes funcions. Anteriorment, s'ha realitzat una recerca dels càlculs necessaris per a trobar aquestes potències. A continuació es mostren els diferents càlculs i raonaments realitzats.

El pes global que té l'aerolliscador amb tots els components inclosos és d'uns 425 grams. Aquest pes es troba repartit per tota la superfície inferior del prototip, el motor haurà de generar una pressió d'aire suficient per a poder sustentar tot el pes del vehicle.

Amb les distàncies que es troben en el document dels plànols, es pot calcular la superfície inferior del vehicle, la qual agafa un valor de 0,0244 m². Tot seguit, a partir de l'equació 9 s'obté la pressió necessària per al funcionament correcte del prototip.

$$P_c = \frac{F_s}{A_i} = \frac{0,425 \times 9,810}{0,024} = 181,271 \text{ Pa} \quad (\text{Eq. 9})$$

Una vegada trobada la pressió, es procedeix a calcular el cabal d'aire necessari per tenir les condicions requerides a l'interior del vehicle. La superfície que té l'aerolliscador per introduir l'aire és de 5,8 cm² cada conducte, aquesta s'ha trobat directament des del programari de disseny, ja que té una forma complexa per calcular-la a mà. El prototip disposa de 2 conductes. A través del principi de Bernoulli, explicat anteriorment, a partir de l'equació 10 es troba el valor de la velocitat d'entrada que ha de tenir l'aire.

$$V_1 = \sqrt{2 \times \left[\frac{P_2}{\rho} - g \times Z_1 \right]} = \sqrt{2 \times \left[\frac{182,271}{1,225} - 9,810 \times 0,3 \right]} = 17,079 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 10})$$

Una vegada coneixent aquests valors, ja es pot calcular el cabal d'aire que ha de generar el motor per tal de complir amb les condicions anteriors i funcionar de manera correcta.

$$Q_s = V_s \times A_s = 17,07900 \times 0,00116 = 0,01980 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Eq. 11})$$

Llavors, es procedeix a trobar el valor de la potència que es necessita per realitzar aquest moviment d'aire a l'interior del prototip, amb l'equació 12 s'obté el valor d'aquesta.

$$P_s = P_c \times Q_s = 181,27 \times 0,02 = 3,63 \text{ W} \quad (\text{Eq. 12})$$

La potència calculada a l'equació anterior és per satisfer la part de sustentació del vehicle, mentre que ara, s'ha de calcular la potència necessària d'aire que s'ha de moure per satisfer la part de propulsió. Per calcular-la, primer s'ha de conèixer la força d'empenta per moure el vehicle a una certa velocitat, considerant que està en sustentació i que la força de fregament amb la superfície és molt petita, cosa que no es tindrà en compte pels càlculs.

Mitjançant el programari de disseny, s'obté que la superfície transversal del vehicle és de 32,041 cm², vista la forma de la secció transversal amb els components del prototip, s'agafarà un coeficient d'arrossegament unitari, ja que corresponent a la d'una secció rectangle. Es calcula la potència necessària per moure el vehicle a una velocitat de 30 cm/s, tot seguit, a l'apartat de proves, es comprova si coincideix amb la realitat. Amb l'equació 13 s'obté la força d'empenta necessària que s'ha de generar per complir amb les condicions establertes.

$$F_e = \frac{A_t \times p_a \times V_v^2 \times C_D}{2} = \frac{0,0032041 \times 1,225 \times 0,03^2 \times 1}{2} = 1,76 \mu \text{ N} \quad (\text{Eq. 13})$$

Llavors, una vegada determinada la força d'empenta necessària i coneixen la velocitat en què ha d'anar el prototip, es pot determinar la potència necessària de propulsió de l'aire per aconseguir la velocitat desitjada. Amb l'equació següent es determina la potència necessària.

$$P_p = F_e \times V_v = 1,76 \times 10^{-6} \times 0,03 = 5,29 \times 10^{-8} \text{ W} \quad (\text{Eq. 14})$$

Tal com era d'esperar, la potència de propulsió del vehicle és mínima. Això és perquè s'ha considerat que no disposa de forces de fregament i que l'única força a vèncer és la que oposa l'aire, i en ser un prototip petit, doncs aquesta és mínima. A la realitat, tot i estar en sustentació, tindrà una força de fregament present, que pot arribar a afectar els càlculs realitzats.

Finalment, amb l'equació 15, s'obté la potència neta que ha de tenir el motor per tal de realitzar les dues accions de manera correcta, ja que, s'ha escollit la configuració d'un únic motor.

$$P_{mu} = P_p + P_s = 3,6 + 5,29 \times 10^{-8} = 3,60 \text{ W} \quad (\text{Eq. 15})$$

On:

P_{mu} : Potència útil del motor.

Tal com s'ha dit anteriorment, en el capítol del principi del funcionament, tota la potència s'utilitza per a la sustentació del vehicle, però una vegada el coixí inflat, llavors ja requereix menys potència per mantenir-se inflat, i la resta s'utilitza per a la propulsió del vehicle. D'aquesta manera, una vegada en marxa, es podria compensar la força de fregament que s'ha considerat nul·la.

Una vegada fets els càlculs, s'observa que es necessita una potència útil de 3,6 W per moure l'aire i així poder satisfer les necessitats del prototip. Però, com que a la realitat sempre hi ha pèrdues per diversos factors, s'haurà d'aplicar un rendiment. Aquest rendiment és una incògnita perquè depèn de diversos factors.

La potència es pot perdre pel cablejat del motor, pel regulador de velocitat, per l'eficiència de l'hèlice i per l'aire que s'escapa pels costats. Avaluant totes aquestes pèrdues, s'ha decidit considerar un rendiment del conjunt amb valor del 50 % per tenir un avantatge a l'hora de portar-ho a la pràctica. Posteriorment, mitjançant proves, es podrà corroborar si aquesta consideració s'ha aplicat correcte o si s'ha quedat curta. Amb l'equació 16 s'obté la potència elèctrica necessària que ha de tenir el motor.

$$P_{me} = \frac{P_{mu}}{\eta_g} = \frac{3,60}{0,5} = 7,20 \text{ W} \quad (\text{Eq. 16})$$

On:

P_{me} : Potència elèctrica del motor.

η_g : Rendiment general del sistema.

Mitjançant els càlculs, s'obté que es necessita com a mínim disposar d'un motor de 7,20 W de potència elèctrica per tal que l'aerolliscador tingui un funcionament correcte.

Analitzant els diferents motors disponibles per internet, s'ha acabat optant per utilitzar un motor elèctric sense escobretes, conegut pel nom de brushless. El fet de no tenir escobretes proporciona més avantatges respecte als altres, les escobretes produeixen

un fregament entre si que fa reduir el rendiment, desprendre calor i soroll, per contra, en general els motors sense escombretes requereixen un major manteniment.

La manera de funcionar d'aquests motors és diferent que els altres motors de corrent continua. Aquest estan formats per diferents bobines connectades en estrella entre si, tal com es pot veure a la figura 22. En funció de cada motor, tindrà un nombre diferent de bobines. L'electrònica encarregada de controlar-lo anirà commutant les diferents bobines de l'estator, d'aquesta manera s'anirà generant un camp magnètic interior que actuarà sobre els diversos imants del motor, que es troben enganxats en el rotor, cosa que generarà el moviment rotatiu del motor.

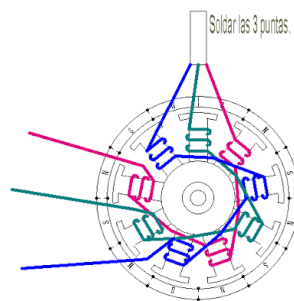


Figura 22. Esquema de les connexions del motor sense escombretes

S'ha escollit aquest motor pel sistema de potència del prototip per diversos motius: pel fet que es poden controlar fàcilment amb el regulador de velocitat corresponent, per la gran velocitat de rotació que ofereix amb un voltatge petit i per la relació potència-mida que acaben proporcionant.

Concretament, s'utilitza un motor de la casa DYS, ja que s'ha trobat una gran varietat en el mercat i es poden comprar per unitats. Tots els models són capaços de donar una potència superior a la mínima que requereix l'aerolliscador.

Un paràmetre important del motor és el valor dels kv de cada un, aquest valor indica les RPM per volt i determina la velocitat en la qual girarà el motor en funció del voltatge d'alimentació. Com major sigui aquest paràmetre, el parell que ofereixen serà cada vegada menor, considerant constant la potència.

Per aquest cas, no és necessari que el motor tingui un gran parell, ja que només ha de moure una hèlice de tres pales, però sí que ha de girar a altes RPM, per tal que generi un moviment d'aire suficient per fer funcionar el prototip. Per conèixer quin valor de kv

correspon, s'han realitzat proves de diferents motors amb diferents paràmetres de kv i alimentats amb diferents voltatges. A la taula 2 es pot veure quin paràmetre de kv és el més apte pel prototip.

Valor dels kv	7,4 V	11,1 V	14,8 V
1.000	No	No	No
2.200	No	Mitges	Apte
3.600	No	Apte	Apte

Taula 2. Resultats de les proves dels diferents motors

Un cop analitzats els resultats, es decideix utilitzar el motor DYS SE1407 de 3600 kv, ja que amb un voltatge inferior podrà aconseguir fer funcionar l'aerolliscador de manera correcta, cosa que implica una reducció de bateries i a la vegada, una reducció de pes, que és el que interessa. A continuació es pot veure a la figura 23 el model del motor escollit.



Figura 23. Motor Brushless DYS SE1407 3600 kv

Segons les especificacions del fabricant, el motor proporcionar una potència sense càrrega de 7,77 W quan s'alimenta a 11,1 V. Quan aquest conté una càrrega, la potència elèctrica augmenta. Es pot concloure doncs, que es compleix la condició anterior, que la potència del motor és superior a la trobada mitjançant els càlculs realitzats, pel correcte funcionament del prototip. Només faltaria provar si els càlculs teòrics són correctes.

Per controlar els motors sense escombretes, és necessari disposar d'un dispositiu de control de velocitat, anomenats ESC, els quals han facilitat molt el control d'aquests últimament. Aquests dispositius estan formats per una sèrie de components electrònics, ajustant el cicle de treball o la freqüència de commutació d'aquests, s'ajustarà la velocitat del motor del funcionament.

L'ESC està format per dos components, primer es tenen els drivers, la funció d'aquest serà aplicar la tensió necessària en els transistors, els quals obriran o tancaran el pas del corrent.

El segon component rep el nom de pont trifàsic, aquests bloquejaran o permetran el pas del corrent cap a les bobines corresponents, d'una manera molt precisa, i així obtenir la seqüència desitjada per determinar la velocitat de gir del motor.

Un dels pols del motor generà un petit voltatge proporcional a la velocitat que porta el motor, conegut com a FEM. Aquest voltatge generat serveix al controlador ESC per conèixer la velocitat i el sentit de gir del motor en qualsevol moment.

A partir d'aquesta velocitat i de la consigna rebuda pel microcontrolador, es realitza un control de velocitat i es determina quins transistors activar i quins desactivar, i amb quina freqüència commutar-los per aconseguir el seu objectiu.

Es poden controlar a través del microcontrolador, mitjançant senyals de polsos d'entre 1 a 2 ms. Els polsos d'1 ms s'anomenen polsos d'amplitud mínima mentre que els polsos de 2 ms s'anomenen polsos d'amplitud màxima. A la figura 24 es pot veure gràficament la mida dels diferents polsos límits que requereix el regulador ESC.

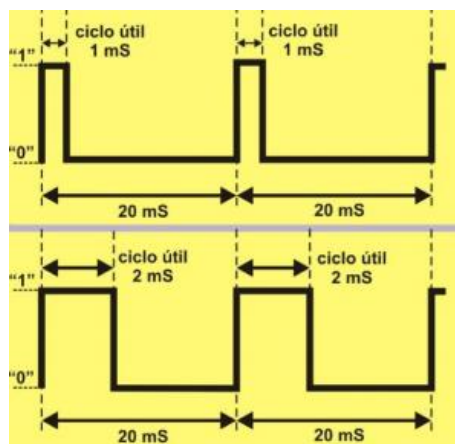


Figura 24. Senyals límits pel control de l'ESC

Els ESC han d'estar dimensionats en funció del motor a controlar. Aquest es dimensionen a partir de la intensitat que poden aguantar. El motor a utilitzar pot arribar a consumir aproximadament 20 A, a plena càrrega.

S'escull el regulador ESC T-REX 450 de 30 A, el qual és capaç d'arribar a suportar una intensitat de 40 A continuats durant 10 segons i pics de 45 A, així que pot aguantar perfectament el corrent del motor, en el pitjor cas, quan consumeixi 20 A. A més, disposa d'una sortida BEC, per tal d'alimentar algun component extern de 5 V i amb un corrent d'1,5

A. A continuació, a la figura 25 es pot veure la forma del component a utilitzar i el cablejat que disposa.



Figura 25. Regulador ESC T-REX 450 de 30 A

5.4. Servomotor

Pel control de la direcció del prototip s'utilitza un timó, a la part posterior del motor per tal de direccionar el vent, i així obtenir una propulsió del prototip a la direcció que interessa. El timó ha d'estar suportat sobre una plataforma que tingui la capacitat de controlar la posició per cada instant a través de senyals elèctrics.

S'ha decidit utilitzar un servomotor per a realitzar el control del timó. Un servo és un mecanisme amb la capacitat de controlar la seva ubicació en qualsevol posició dintre d'un rang d'operacions, en funció del senyal que rep. La rotació que realitzen els servomotors es controlen de la mateixa manera que els reguladors dels motors sense escobretes, mitjançant polsos que van d'1 a 2 ms.

Pel projecte s'utilitza el servomotor KY66 de la casa Longruner amb un parell d'1,6 kg/cm, es pot veure a la figura 28. Té un pes de nou grams, un rang d'operació de 180° i permet una alimentació de 4,8 V a 6,2 V. S'ha escollit aquest perquè s'adapta totalment a les condicions del prototip: els nivells de tensió que requereix s'extrauen del microcontrolador mateix, i el timó que s'utilitza, té un pes de grams, cosa que gràcies al parell que suporta, el pot controlar sense problemes.



Figura 26. Servomotor KY66 de la casa Longruner

5.5. Alimentació

Per alimentar els diferents components elèctrics que s'utilitzen per al funcionament de projecte, s'utilitzen tres bateries Li-Po de 3,7 V cada una amb una capacitat de 1200 mAh pel funcionament del prototip i dos bateries pel funcionament del comandament a distància.

Aquestes bateries estan formades per liti i polímer, són molt utilitzades als vehicles de ràdio control pels diversos avantatges que proporcionen, el principal és que els fabricants poden donar qualsevol forma que afavoreix-hi el seu ús. A la figura 27 es pot veure la forma de les bateries que s'utilitzen. Es caracteritzen per ser lleugeres i emmagatzemar grans quantitats d'energia. El principal inconvenient és que presenten una resistència interna elevada, que causa una gran caiguda de tensió quan el corrent és elevada.



Figura 27. Bateria Li-Po de 3,7 V amb 1200 mAh

Aquestes bateries són molt delicades, si se'ls hi dóna un mal ús, poden arribar a inflamar-se ràpidament i reduir el seu temps de vida. Per fer funcionar l'aerolliscador es necessiten diferents voltatges, en el document de plànols es troben especificats.

Les tres bateries estaran connectades en sèrie per tal de donar un voltatge màxim d'11,1 V amb una capacitat de 1200 mAh, que és el que necessita el motor. Per les diferents tensions per alimentar el microcontrolador i els altres components es podran extreure a través de les connexions que es troben en el document de plànols.

Amb aquesta alimentació, el motor podrà arribar a funcionar a 39,960 revolucions per minut teòricament, on serà capaç de donar el cabal necessari per fer funcionar el prototip.

5.6. Controlador (joystick)

Des del comandament del prototip s'indicà les diferents ordres per controlar el funcionament del vehicle. Hi ha dos variables a controlar del prototip: la direcció del timó i la velocitat de gir del motor.

Per tenir un control més visual, es decideix utilitzar una palanca de control per cada variable, cada palanca tindrà dos eixos. La direcció horitzontal, representada per l'eix x, s'utilitza per tenir el control sobre la posició del timó mentre que la direcció vertical, representada per l'eix y, s'utilitza per tenir el control de la velocitat del motor.

Les palanques a utilitzar s'anomenen joystick digitals, a la figura 28 es pot veure la forma que tenen. Aquests utilitzen potenciómetres per llegir de manera instantània l'estat en què es troba cada eix, cosa que els fa ser més precisos. També incorpora un polsador al centre per poder ser utilitzat de manera més pràctica.



Figura 28. Joystick de dos eixos amb polsador

Les entrades de la placa Arduino treballen a una lògica de 5 Volts. Aleshores, per tal d'aprofitar la màxima resolució, s'alimenta a 5 V, i així la lectura de les entrades analògiques agafen valors de 0 a 1.023. El polsador que incorpora al centre es programa de tal manera que mentre es pressiona, el microcontrolador deixà de rebre senyal, per així activar o aturar el comandament quan es prem.

Pel control del prototip, s'utilitzen dos components per a tenir un control més pràctic. Un d'ells està situat a la part dreta del comandament, per controlar la velocitat del motor, mentre que l'altre està a l'esquerra i servirà per determinar la posició del timó. En funció del moviment d'aquests components, l'Arduino realitzarà els càlculs necessaris per determinar les ordres a donar a l'aerolliscador per tal de fer-lo funcionar de la manera indicada.

5.7. Càmera FPV

Per fer el prototip més interactiu amb l'usuari, es decideix instal·lar una microcàmera i poder visualitzar el vídeo captat a distància. A través d'un dispositiu suportat pel comandament, es podrà visualitzar de manera directa el vídeo emès per la microcàmera.

Aquesta tecnologia s'anomena FPV i serveix per pilotar vehicles a distància, sense la necessitat de tenir-lo visible, pel mitjà d'una càmera que transmet a temps real en el monitor del pilot mitjançant transmissions per radiofreqüència. Els equips FPV consten de diverses parts: el transmissor de vídeo, la càmera FPV, la qual captarà i enviarà les imatges cap al transmissor i el receptor. També es troben antenes per amplificar la potència de transmissió, les quals juguen un paper molt important.

El control remot del prototip, tal com s'ha comentat, funciona a una freqüència de 2,4 GHz, com la majoria d'emissores de ràdio control. Els experts recomanen que el millor cas és que la freqüència per transmetre el vídeo de la càmera FPV, sigui major que la de ràdio control. D'aquesta manera, s'aconsegueix protegir el senyal de les interferències que el comandament pugui causar, amb el senyal de ràdio control.

Analitzant les possibilitats de complir amb la recomanació anterior, es decideix utilitzar una freqüència de 5,8 GHz per transmetre el vídeo a distància. Les antenes són petites i la majoria de la tecnologia FPV ve preparada per treballar en aquesta freqüència..

Com més alta la freqüència, la qualitat a la transmissió augmenta, però s'ha de tenir en compte que també té inconvenients en utilitzar freqüències altes, el pitjor és que redueix la distància d'abast perquè costa més penetrar obstacles durant la transmissió en comparació amb una freqüència inferior d'iguals característiques.

Un altre paràmetre important a tenir en compte, és la potència d'emissió. Com més gran sigui, més gran serà la distància de transmissió. Es recomana buscar un punt mitjà, ja que com més gran la potència d'emissió, major és la transmissió però també s'escalfa molt més, cosa que produeix un major consum i fa reduir l'autonomia. Legalment, a Europa, es pot utilitzar una potència d'emissió màxima de 25 mW per a freqüències de 5,8 GHz.

La qualitat de la càmera dels sistemes FPV varia en funció del paràmetre TVL, el qual indica el nombre de línies horitzontals que transmet. Com major sigui aquest nombre, major serà la resolució i la qualitat. Per un sistema de control remot, utilitzar una càmera amb un TVL de 540 ja és suficient per obtenir una imatge nítida.

Estudiant les diferents opcions de càmeres FPV que es troben en el mercat actualment, s'opta per utilitzar una microcàmera amb l'emissor incorporat, bàsicament per la simplicitat que presenta i la petita mida que té, per tal d'encaixar perfectament en el prototip.

S'ha escollit la microcàmera FPV que conté l'emissor incorporat, de la casa Crazepony. Aquesta càmera compleix amb el conjunt d'especificacions comentades anteriorment. Proporciona una potència d'emissió del senyal de 25 mW, un consum de 200 mA per una tensió d'alimentació de 5 V, té un camp de visió de 120° amb una resolució de 600 TVL, acceptable pel prototip a dur a terme.

La microcàmera escollida disposa d'una antena de polarització circular, que apunta a totes direccions en la mateixa intensitat. Segons el fabricant, pot arribar a un abast de 100 metres, cosa que es comprovarà posteriorment en el capítol de proves. A la figura 29 es pot veure el component utilitzat. A la figura 29 es pot veure la forma de la microcàmera.



Figura 29. Microcàmera FPV amb emissor de 25 mW

La càmera utilitza una banda de freqüència per la transmissió de les dades de 5,8 GHz. Disposa de 8 canals diferents per transmetre les dades, i en cada canal pot escollir 1 de les 5 bandes a utilitzar, els valors d'aquestes es troben a la fitxa tècnica proporcionada pel fabricant. En total podrà transmetre per 40 canals diferents. Des del mateix aparell es pot seleccionar quin canal utilitzar mitjançant un polsador que incorpora.

Llavors, una vegada en marxa la càmera FPV, comença a transmetre el vídeo pel canal seleccionat, per tant, es requereix un receptor capaç de rebre el senyal enviat per l'emissor, perquè sigui possible, aquest haurà de treballar en la mateixa banda de freqüència que l'emissor, en aquest cas, a la banda de 5,8 GHz.

S'ha pensat a buscar una solució pràctica per poder veure la imatge sense necessitat de cap aparell de visualització extra, és a dir, utilitzar un aparell que s'utilitzi de forma regular a la vida quotidiana. Per complir amb això, s'utilitza un mòdul receptor de 5,8 GHz, que tindrà la capacitat de recollir el senyal rebut per radiofreqüència i enviar-lo a través d'un USB, a l'ordinador o al telèfon mòbil.

S'opta per utilitzar el receptor UVC OTG FPV de la marca Skydroid, el qual treballa a una banda de 5,8 GHz, disposa d'una antena omnidireccional de 5 dBi per rebre el senyal enviat. S'alimenta a través de la connexió amb el cable USB, a 5 V, amb un consum de 200 mA. En la figura 32 es pot veure el component connectat en un telèfon mòbil a través del port USB.



Figura 30. Receptor UVC OTG FPV connectat a un telèfon mòbil

Té la capacitat de proporcionar informació de 150 canals diferents i incorpora una opció de recerca automàtica per cobrir tots els canals, i seleccionar on es tingui major senya.

Per visualitzar el vídeo a temps real des del mòbil, es necessita disposar d'un software específic capaç d'entendre la informació que rep. Per aquest cas, s'utilitza l'aplicació del mateix fabricant del receptor, s'anomena Skydroid FPV. Una vegada connectat al telèfon, com s'indica a la figura 32, es pot veure la informació rebuda pel receptor, sempre quan se seleccioni el mateix canal que l'emissor.

En el telèfon mòbil, juntament amb el mòdul receptor, es pot obtenir el vídeo que la càmera està gravant a temps real, amb una latència molt petita, al voltant de 100 ms segons el fabricant, tot seguit es comprovarà en el capítol de proves. El comandament disposa d'una posició per col·locar-hi el telèfon mòbil, i així, poder observar la imatge a temps real mentre es va controlant el prototip.

6. PROGRAMACIÓ

En aquest capítol s'explicarà el desenvolupament dels diferents programes a utilitzar per a dur a terme el control remot pel funcionament de l'aerolliscador.

S'han desenvolupat dos programaris, un realitza la lectura de les accions emeses pel comandament i l'altre s'encarrega de controlar els actuadors necessaris per al funcionament correcte. Els dos s'han programat en la plataforma lliure d'Arduino i s'han escrit amb el llenguatge propi d'aquesta, un similar entre C i C++, que ja es tenia coneixements previs.

S'ha utilitzat el programari IDE d'Arduino. És una eina on es pot programar de manera senzilla i ràpida, permet realitzar la mateixa compilació del programa i la càrrega d'aquest a la memòria flaix del microcontrolador, de manera directa mitjançant el cable USB que es troba en la mateixa placa.

Els programes consten de 3 parts, la primera és la declaració de les llibreries i les diferents variables a utilitzar al llarg del programa, la segona part és on es troben les ordres que només s'han d'executar a l'inici del programa, per inicialitzar i configurar elements, que s'anomena configuració i finalment es troba el bucle principal, que és el cos del programa, les ordres que conté a l'interior es repeteixen indefinidament.

Per la comprovació del correcte funcionament del programa en qualsevol moment, es creu convenient establir una comunicació entre la placa i el PC mitjançant el cable USB. El hardware de la placa UNO té incorporat l'única comunicació sèrie en els pins 0 i 1, els quals també es troben connectats en el port USB de la mateixa placa.

Tal com s'ha comentat anteriorment, per la transmissió de la informació s'utilitza un mòdul XBee, el qual també es comunica pel port sèrie. Per permetre la comunicació sèrie en diversos components, la plataforma ha desenvolupat una llibreria per tal d'habilitar una comunicació sèrie en altres pins digitals restants, la qual s'anomena SoftwareSerial.

Abans de començar a realitzar el programa, es decideix el criteri a seguir per controlar el prototip. Les variables que es controlen són la velocitat que pot arribar el motor sense escombretes i la direcció que agafa el timó, aquestes variables agafen valors determinats en funció de les indicacions que proporcionen els joysticks.

Pel timó, es decideix que pot agafar 5 posicions diferents. En funció de la posició del joystick respecte a l'eix x, significarà una direcció o altra, a la taula 3 es pot veure la relació que segueix les diferents posicions amb els angles corresponents.

Valor del joystick	Angle de posició (°)	Posició del timó	Lletra
0 - 200	10	Esquerra	A
200 - 500	50	Esquerra parcial	B
500 - 550	90	Central	C
550 - 850	130	Dreta parcial	D
9024 - 1023	170	Dreta	E

Taula 3. Relació del joystick amb la posició del timó.

Per la comunicació entre els mòduls es realitza mitjançant lletres en majúscules, cada lletra indica un estat de les sortides de l'aerolliscador, a la taula 3 i 4, es pot veure també la relació de cada estat amb la lletra que correspon.

Pel que fa al motor, teòricament, pot tenir moltes velocitats diferents, però a la pràctica, la diferència entre velocitats semblants no es nota. Per aquest cas, es decideix seleccionar velocitats intermèdies, per aconseguir diferències en els efectes que generi. Llavors, després de realitzar diferents proves, s'ha decidit determinar 5 velocitats, les quals generen efectes d'impuls d'aire diferent. En funció del posicionament del joystick respecte a l'eix y, el motor corresponent anirà arribant a aquestes velocitats de manera proporcional.

Per tenir un control més visual del vehicle, a la posició natural del joystick, la velocitat del motor serà nul·la i mentre que vagui agafant valors positius respecte a l'eix y, el motor adquirirà les diferents velocitats seleccionades anteriorment de manera gradual. A conseqüència, només s'acabarà aprofitant el moviment positiu de l'eix y del joystick.

El motor es controla per una sortida PWM generada per la llibreria Servo, el senyal generarà polsos d'amplada d'1 a 2 ms, quan els polsos siguin d'amplitud mínima, s'obté una velocitat nul·la del motor, mentre que per l'amplitud màxima, el motor anirà a màxima velocitat.

A la taula 4 es pot veure la relació entre els diferents valors que agafa el joystick, amb la mida dels polsos en microsegons que es generarà en cada situació i la lletra que relaciona cada estat entre els dos programes.

Valor del joystick	Velocitat	Amplada polsos (µs)	Lletra
0 - 520	Nul·la	1000	F
520 - 650	Baixa	1300	G
650 - 780	Mitja	1450	H
780 - 910	Alta	1650	I
910 - 1023	Màxima	1800	J

Taula 4. Relació del joystick amb la velocitat del motor

6.1. Comandament

L'ordinograma de la figura 31 és una manera d'explicar de forma simplificada la solució adoptada pel programa del comandament. A l'annex d'aquest document figura el programa amb el codi complet.

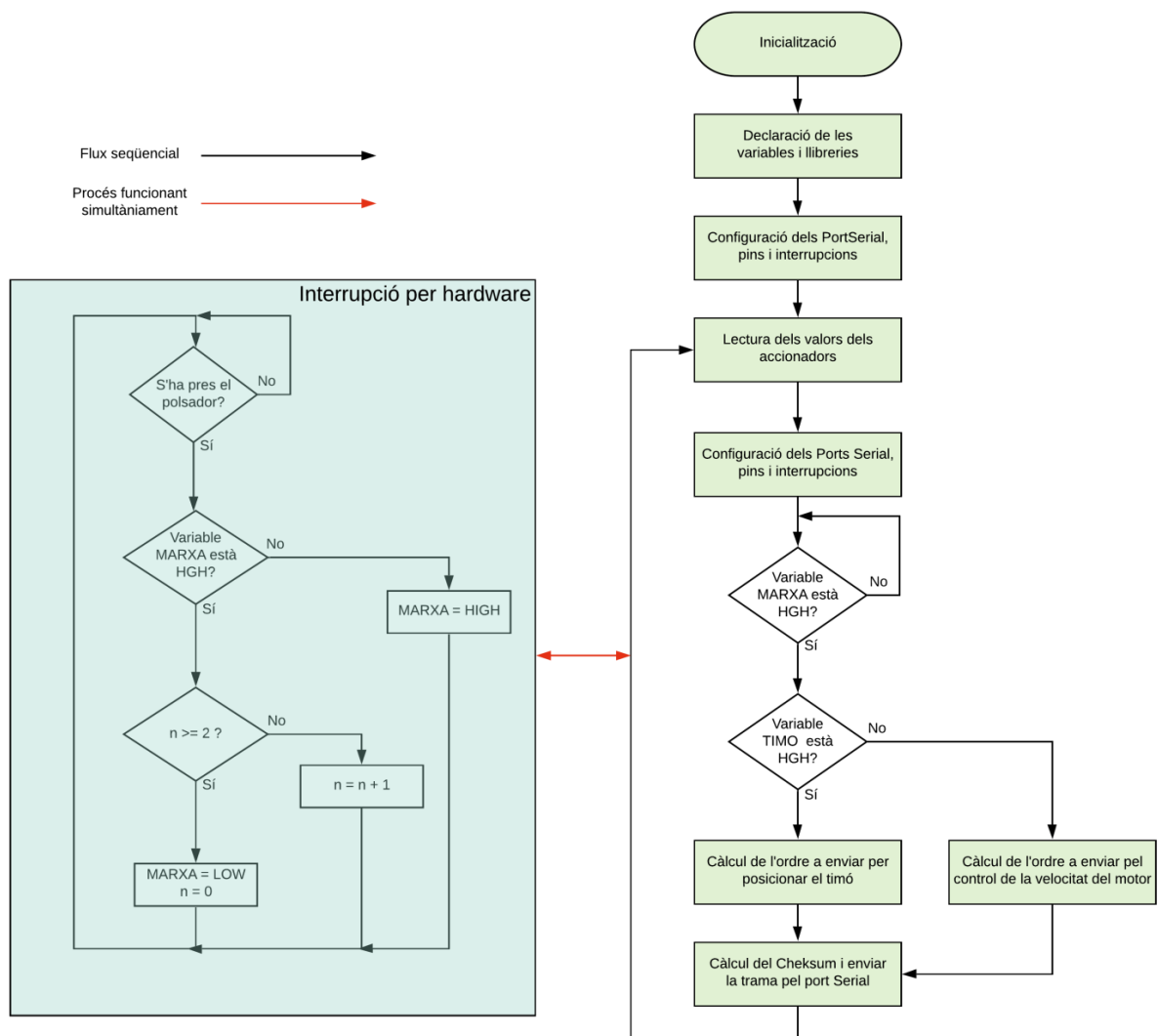


Figura 31. Ordinograma del codi pel comandament

Quan s'inicia el programa, primer es fan una sèrie de passos fixos, s'inicialitzen les variables internes i es declaren les llibreries a utilitzar durant l'execució del programa. Posteriorment, es passa a l'etapa de la configuració, on es configuren els pins i es defineix la interrupció que es portarà a terme. A continuació es mostra la taula 5 amb les variables utilitzades al llarg del programa, el tipus i una breu descripció.

Nom	Tipus	Descripció
encendre	byte	Vector a on es guarda la trama a enviar
checksum1	byte	Es guarda el valor del Checksum de cada trama
VRx	const int	Pin de l'eix x del joystick
VRy	const int	Pin de l'eix y del joystick
SW	const int	Pin del polsador
ValorRx	Int	Es guarda el valor de la posició de l'eix x de joystick
ValorRy	Int	Es guarda el valor de la posició de l'eix y de joystick
SWITCH	bool	Es guarda l'estat del polsador
Marxa	volatile bool	Variable interna que determina l'estat del comandament
com	volatile int	Comptador de les vegades que s'ha pres el polsador
Timo	bool	Variable interna que determina les ordres a enviar
startTime	long	Variable per emmagatzemar el temps en microsegons

Taula 5. Variables utilitzades al programa comandament

El polsador per activar i desactivar el comandament es defineix com una entrada pull-UP, això significa que l'entrada corresponent anirà connectada a una resistència interna, la qual permetrà un canvi d'estat quan aquest estigui pressionat.

Aquest tipus de configuracions són necessàries quan es tracta de polsadors, ja que d'altra manera, el microcontrolador no seria capaç de detectar correctament el voltatge de l'entrada, això és a causa del fet que quan el polsador està obert, el voltatge que detecta l'entrada no està determinat.

Per la configuració escollida, que s'anomena pull-UP, quan no es pressioni el polsador, el voltatge a l'entrada de l'Arduino serà sempre de 5 V. En canvi si es prem el polsador, es té que l'entrada del microcontrolador és igual a la tensió del terra, que és 0 V. En la figura 32 es pot veure aquesta configuració de manera més visual, també s'indica el sentit de circulació del corrent en cada cas.

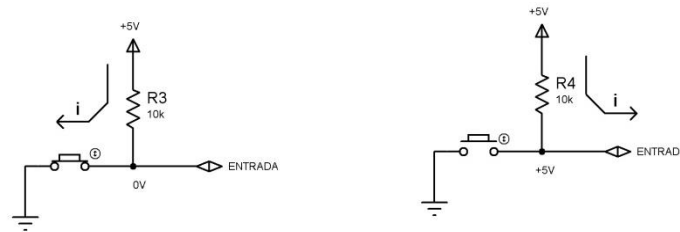


Figura 32. Configuració Pull-UP

Tal com es veu a l'ordinograma de la figura 31, el programa disposa d'una interrupció per hardware per detectar el canvi d'estat del polsador i així activar o aturar el comandament. S'ha configurat la interrupció com a FALLING, cosa que significa que el moment que el polsador passi d'un estat HIGH a un estat LOW, s'entri a la interrupció.

D'aquesta manera, en qualsevol moment, el comandament es posarà en marxa quan es pressioni el polsador, mentre que si es torna a pressionar 2 vegades, el funcionament del comandament quedarà aturat fins que es troni a activar.

Per modificar les variables compartides entre la interrupció i el programa, s'han de declarar com a volàtil. Aquesta declaració no és un tipus de variable, sinó una ordre pel compilador. La funció que té és ordenar al compilador que la variable haurà de ser consultada sempre abans d'utilitzar-la, donat que podria haver-se modificat durant el funcionament del programa o durant la interrupció. Com a inconvenient, declarar una variable com a volàtil suposa una pèrdua d'eficiència del microcontrolador, ja que el compilador desactiva algunes optimitzacions que es troben activades per defecte.

Mitjançant diferents proves realitzades amb el polsador, s'ha vist que per únic canvi d'estat del polsador, la interrupció es detectava múltiples vegades. Això és degut al soroll en els canvis d'estat dels components físics, tal com es pot veure a la figura 33.

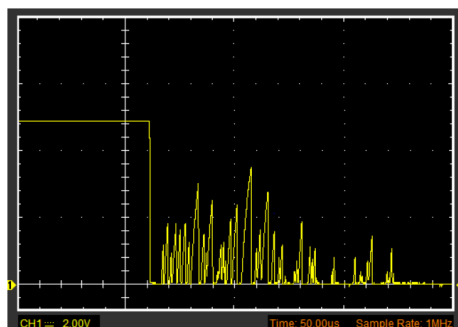


Figura 33. Rebots d'un canvi d'estat d'un polsador

A través d'un oscil·loscopi es pot visualitzar perfectament el soroll que generà un polsador en un canvi d'estat, els rebots del soroll poden arribar a activar més d'una vegada la interrupció. Per eliminar els rebots dels polsadors, s'aplica un debouncing en el polsador.

Existeixen dos mètodes per realitzar un debouncing, per hardware o per software. Com que l'aerolliscador està limitat d'espai, s'ha decidit realitzar un debouncing per software, ja que té l'avantatge de no requerir components extres.

La forma per dur a terme el debouncing és controlar el temps entre l'activació de les interrupcions. Si el temps és inferior a un temps determinat prèviament, simplement s'ignora l'execució de la interrupció. Mitjançant diferents proves, s'ha determinat que un temps de 250 ms entre interrupcions és suficient per eliminar tots els rebots generats. S'ha de tenir en compte que la funció delay() no funciona correctament quan s'activen les interrupcions.

```
void Start() {  
  if (millis() - startTime > 250)  
  {  
    ...  
    startTime = millis();  
  }  
}
```

Des del comandament s'ha de controlar dues sortides de l'aerolliscador, per simplificar el programa s'ha decidit alternar l'enviament de les ordres d'aquestes sortides, regulat per la variable Timo. Com que el programa s'executà en temps petits, això no suposarà cap problema de latència a l'hora de transmetre les dades.

Una vegada determinada l'acció a transmetre a l'aerolliscador, es procedeix a calcular el checksum de la trama a enviar. L'acció de comparar el checksum que es calcula en el programa amb el qual es generà per la font receptora, representa una confirmació i assegura haver rebut la trama completa sense errors. Si l'equip receptor generà el mateix valor de checksum que l'enviat, llavors es deixarà passar la informació per tal de poder ser analitzada.

Per obtenir el valor del checksum de la trama, se sumen tots els valors excepte els tres primers, posteriorment s'aplica l'operació del mòdul amb valor 0xFF, per després restar aquest valor respecte al 0xFF i obtenir un resultat inferior a 255, ja que només es poden enviar valors com a màxim d'un byte.

```
checksum1 = 0x00;
for (int i = 3; i < 18; i++)
{
  checksum1 += encendre[i];
}
checksum1 = 0xFF - (checksum1 % 0xFF);
```

Finalment, es procedeix a enviar el conjunt de la trama byte per byte pel port sèrie configurat per la transmissió de dades. El valor del checksum s'envia com a últim byte de la trama.

6.2. Control del moviment

A continuació, a la figura 34 es pot observar el següent ordinograma, el qual és una manera d'entendre el programa que contindrà el prototip pel control del moviment d'aquest. A l'annex d'aquest document figura el programa corresponent amb el codi complet.

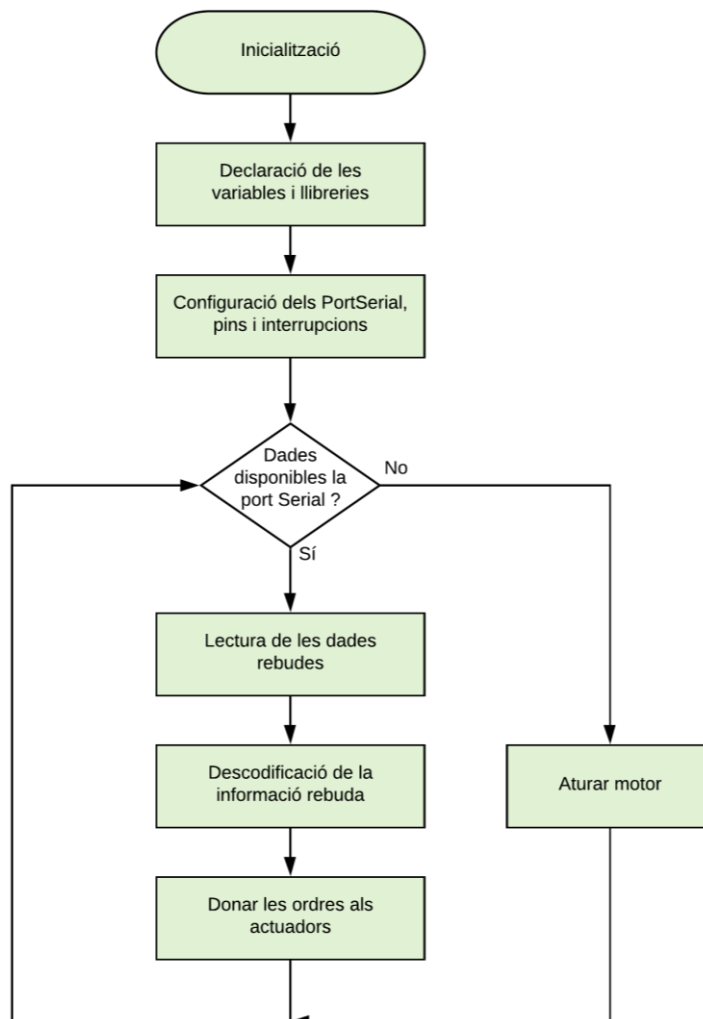


Figura 34. Ordinograma del codi pel control del moviment

Quan s'inicia el programa, es realitzaran els mateixos passos que el programa anterior. A continuació es mostra les variables utilitzades al llarg d'aquest programa, el tipus i una breu descripció d'aquesta en la taula 6.

Nom	Tipus	Descripció
MSer	const int	Pin pel servomotor
MMot	const int	Pin pel motor sense escombretes
inByte	char	Variable per guardar les dades rebudes del Port Sèrie
servo	int	Variable per controlar posició del timó
Motor	int	Variable per controlar la velocitat del motor

Taula 6. Variables del programa del prototip

A més de la llibreria del SoftwareSerial també s'utilitza la llibreria Servo, la qual permet a l'Arduino controlar la posició exacta del servomotor. Per aquest cas, també s'utilitza per controlar la velocitat del motor, ja que els dos motors funcionen de la mateixa manera. Aquesta llibreria permet generar polsos d'1 a 2 ms, indicant-hi el temps que es vol tenir activada la sortida o indicant l'angle de posició que es vol obtenir.

Per la direcció del timó, es controla indicant l'angle de posició que es vol arribar aconseguir, mentre que pel motor, s'indica mitjançant el temps que es vol mantenir activada la sortida, d'1 a 2 ms, donat en microsegons.

Un cop preparada tota la inicialització, es procedeix a activar el motor brushless. Aquesta acció es realitza en la configuració del programa, ja que només s'ha de fer una vegada mentre el programa està activat. Per activar-lo, s'han d'enviar polsos d'1 ms durant 5 segons, passat aquest temps, el motor podrà ser utilitzat per funcionar a qualsevol velocitat.

Si arriben les dades pel port sèrie, el microcontrolador anirà llegint les dades que rep del comandament i generarà les ordres necessàries per al control de les sortides d'aquest. Quan deixi de rebre dades, per temes de seguretat, s'aturarà el motor fins que es tornin a rebre noves dades.

Per fer el codi més entenedor, les ordres per fer funcionar els components es guardaran a les variables corresponents. Al final de realitzar les diferents operacions, es dona l'ordre als actuadors a través d'aquestes variables.

7. POSADA EN MARXA

Una vegada amb tots els components preparats i amb el programari desenvolupat, es procedeix a la posada en marxa del prototip. Aquest apartat consisteix en el muntatge i test del funcionament de l'aerolliscador.

Abans de tot, es verifica la funció dels diferents components del prototip per separat, a través de diferents proves. Una vegada comprovades les funcionalitats de cada un i la comunicació per separat, es comença a provar tots els components junts però sense col·locar-los en el prototip, per tal d'assegurar la compatibilitat entre ells.

S'inicia amb la fase del muntatge del comandament. Es realitzen les connexions dels components amb el microcontrolador tal com indicia el document dels plànols, posteriorment es comprova el funcionament, mitjançant l'enviament de les dades al PC pel port sèrie a través de l'USB de la placa.

Un cop comprovat, es comença a introduir els components a l'interior de comandament, encaixant el port USB de la placa a la posició que toca, posteriorment es col·loquen les bateries i es passen els cables per la connexió. A la figura 35 es pot veure com queda el comandament del prototip un cop muntat. Per acabar amb aquesta fase, es torna a comprovar amb el PC si continua funcionat correctament.

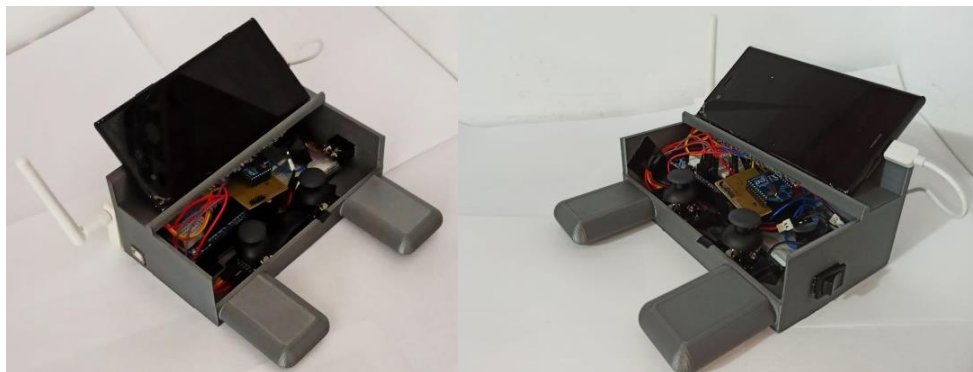


Figura 35. Comandament del prototip muntat

Llavors, es procedeix a seguir a la següent fase, on es comença el muntatge del prototip. S'inicia col·locant la falda sobre el suport exterior, ajustant-la a la base amb el suport interior. Aleshores es fan passar els cables del servomotor per l'interior de l'aerolliscador i es col·loca entre els dos conductes que hi ha, ajustat amb un cargol.

Es col·loca l'hèlice en el motor sense escombretes i s'ajustà mitjançant el cargol que incorpora, perquè no caigui durant el funcionament. Abans de començar a col·locar els components en el prototip, es realitzen les connexions necessàries, tal com s'indica en el document de plànols, d'aquesta manera es verifica si el conjunt dels components funcionen d'acord les indicacions que envia el comandament.

Posteriorment a la verificació, s'acobra el motor en el suport corresponent mitjançant 4 cargols. Llavors es col·loca el suport a la base del prototip suportat pel servomotor i enganxat amb cola per la part inferior. El prototip agafa la forma que es pot veure a la figura 36.

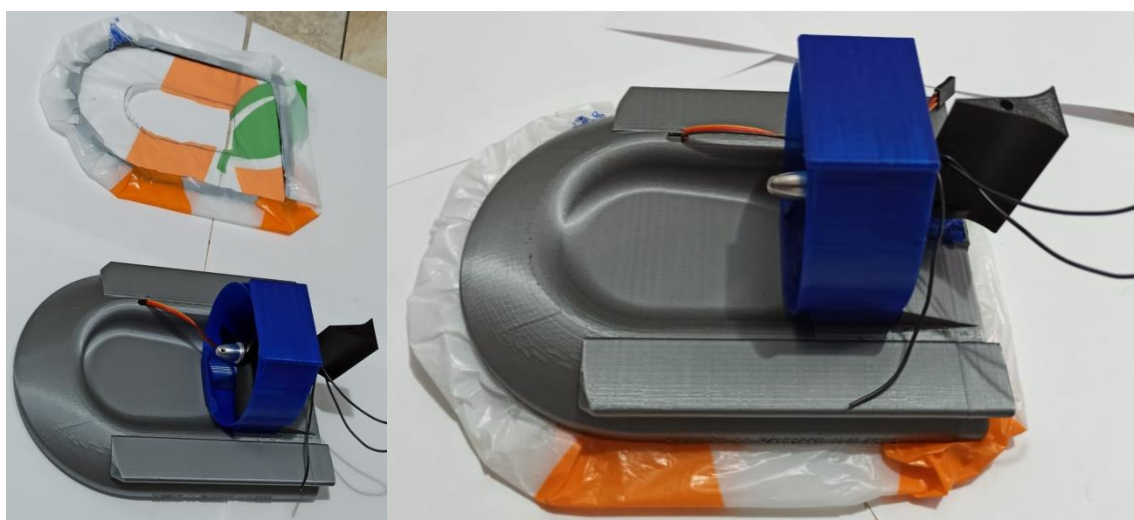


Figura 36. Procés de construcció del prototip

Un cop preparat, es posiciona la placa d'Arduino a la base del centre i es passen les connexions mitjançant els cables necessaris, s'utilitzen regletes de connexió per la bateria i el motor. El mòdul XBee i la microcàmera FPV es col·loquen a la part superior del suport que aguanta el motor, on també es troba el regulador de velocitat del motor.

Quan les connexions estiguin preparades i comprovades, és començar a controlar el prototip a través del comandament. Es comprova doncs, que el prototip actua igual que quan els components estaven separats i d'acord les indicacions del comandament.

Per acabar, es procedeix a l'última fase. Per aconseguir un funcionament estable, l'aerolliscador ha de tenir un repartiment de pesos equilibrat, per tal d'eliminar la tendència a girar per un costat o altre. Per controlar-ho, es juga amb la posició de les bateries. Es

col·loca una a cada costat i la tercera a la part del davant, just al centre, tal com mostra la figura 37, així s'aconsegueix centrar tot el pes a l'eix de simetria del vehicle.

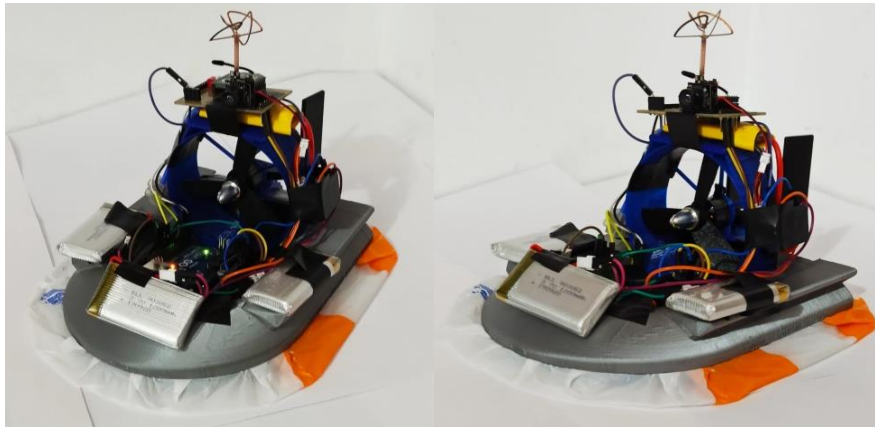


Figura 37. Prototip d'aerolliscador muntat amb el conjunt dels components

Si mentre es realitzen proves es veu que tendeix a recórrer cap a alguna direcció en concret, es podrà moure la tercera bateria a algun dels costats del prototip per compensar el desequilibri del pes que hi pugui haver, o en cas contrari, afegir contrapesos, opció poc recomanada, ja que el pes del prototip augmentaria i podria afectar el funcionament.

8. PROVES

En aquest capítol s'explicaran les diferents proves realitzades a l'aerolliscador, una vegada ja muntat, per tal d'avaluar el seu funcionament. Amb les diferents proves s'avaluarà alguns aspectes del prototip que es comentaran a continuació.

Abans de començar a realitzar les proves, s'ha comparat la funcionalitat dels dos timons seleccionats pel projecte, i finalment s'ha optat per un d'ells. Mitjançant fer-lo anar per diferents superfícies, que es comentaran més endavant, donant-li ordres de gir cap a la dreta i esquerra, s'ha vist que el model 2 del timó controla molt més bé el prototip que el model 1, ja que aquest no acaba de fer girar del tot el prototip en cap direcció ordenada. El segon model controla l'aire més bé a la direcció indicada pel comandament. A la part esquerra de la figura 38 es pot veure la peça del model 1 del timó, mentre que a la part dreta, es pot veure el model 2.



Figura 38. Models de timons utilitzats

La diferència entre els timons, es podria haver vist prèviament a la simulació de fluids, que es volia fer, però per temes de seguretat, no es va poder accedir als ordinadors de la universitat, els quals incorporaven el programa corresponent, i tenen prou potència per fer-lo anar. Llavors, una vegada escollit el timó corresponent, es procedeix a realitzar la resta de proves que s'expliquen a continuació.

8.1. Dinàmica

Una primera part serà avaluar la dinàmica que té el prototip quan passa per diferents superfícies, s'avaluarà l'acceleració que adquireix de manera visual, la velocitat i la potència que es consumeix. En funció dels resultats que s'extreuen, serviran per a la millora del

prototip en cas que es vulgui realitzar una versió següent. En la figura 39 es pot veure algunes de les diferents superfícies utilitzades per dur a terme la prova.

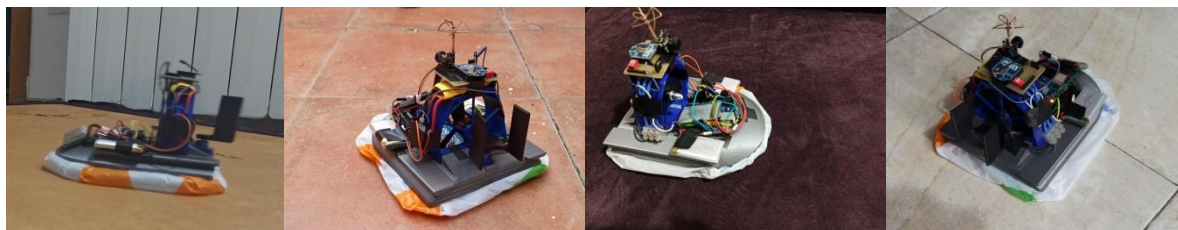


Figura 39. Algunes de les superfícies per on s'ha realitzat les proves

Es comença per la primera prova, la qual consisteix a determinar la velocitat màxima que adquireix l'aerolliscador quan passa sobre diferents superfícies. Per portar-la a terme, es marquen dos punts sobre la superfície, a una distància d'1 metre, i amb un cronòmetre es mesura el temps que passa quan l'aerolliscador passa d'un punt a l'altre en línia recta. Per cada superfície es realitza múltiples vegades per tenir un resultat més precís. A la taula 7 es pot veure la mitjana dels resultats obtinguts.

Superfície	Temps (s)	Velocitat (m/s)
Rajoles interior ceràmica	0,82	1,21
Rajoles exterior ceràmica	1,27	0,78
Fusta amb vernís	0,89	1,12
Parquet	0,87	1,14
Superfície metàl·lica	0,80	1,25
Tèxtil	---	---
Tauler de fusta MDF	0,88	1,13

Taula 7. Resultats de la prova de velocitat

Amb aquests resultats, s'ha pogut veure que en funció de la superfície per on circula l'aerolliscador, la velocitat màxima a assolir varia. Això és a causa del fet que cada superfície proporciona una força de fregament diferent, en algunes més grans que altres, això queda reflectit en els resultats obtinguts.

Tot i que anteriorment s'ha dit que la força de fregament és petita, que pels càlculs s'ha considerat nul·la, en realitat sí que està present, i en diferents valors en funció del material, cosa que redueix l'efecte produït pel motor. D'aquesta manera, es pot ordenar les superfícies en funció del coeficient de fregament que ofereixen amb el prototip.

En els càlculs, s'havia proposat que l'aerolliscador aconseguís una velocitat de 30 cm/s, considerant la força de fregament nul·la, per tant, sí l'aerolliscador utilitza la potència calculada hauria d'aconseguir una velocitat inferior a aquesta, això és degut al fet que en els càlculs no es té en compte la força de fregament.

Vists els resultats, es pot concloure que el motor supera aquesta velocitat perquè està consumint una potència molt més elevada que la calculada, cosa que fa augmentar la velocitat. Es pot afirmar doncs, que els càlculs són correcte, per una potència superior a la calculada, obtenir una velocitat del prototip superior, tot i que la força de fregament li restà velocitat.

Un altre factor important és que una vegada el prototip està en suspensió, la majoria de la potència s'utilitza per a la propulsió, cosa que també fa augmentar la velocitat que pot arribar a assolir.

També cal comentar, que per algunes superfícies l'aerolliscador no funciona, concretament les superfícies tèxtils. El motiu és que proporciona una força de fregament amb el polietilè elevada, tan gran que el plàstic es quedà enganxat amb la superfície, i que el motor no pot superar. A més, com que s'ha utilitzat un polietilè simple per la falda, s'ha evitat fer proves per superfícies com l'asfalt o amb pedretes, ja que es podria fer malbé. Els aerolliscadors a gran escala utilitzen una falda resistent per superfícies rugoses sense problemes.

La segona part de la prova consisteix a observar el comportament de l'acceleració per cada superfície, per portar-ho a terme, s'ha utilitzat el mateix mètode anterior, però des de l'aerolliscador partint del repòs, s'ha obtingut el temps en assolir una distància determinada, a partir d'aquí, es podrà comparar l'acceleració per cada superfície provada.

Superfície	Temps (s)
Rajoles interior ceràmica	1,36
Rajoles exterior ceràmica	1,73
Fusta amb vernís	1,63
Parquet	1,38
Superfície metàl·lica	1,21
Tauler de fusta MDF	1,42

Taula 8. Resultats de la prova d'acceleració

Amb aquests resultats, s'analitza bàsicament el comportament del prototip en l'acceleració i no el valor d'acceleració, ja que aquesta no és constant. Aquest temps són major que els anteriors perquè abans de començar a moure's, s'han de complir diferents condicions.

Una d'elles, és tenir la pressió que toca en el coixí d'aire, cosa que agafa cert temps en aconseguir-ho, llavors una vegada inflat ha de vèncer tant la força de l'aire com la força de fregament que ofereix la superfície, cosa que al moment inicial costarà molt més, ja que actua el fregament estàtic que és més gran que el dinàmic.

Segons els resultats obtinguts, es veu que segueix el mateix criteri que la prova anterior, però que ara necessita més temps en realitzar el mateix recorregut, cosa que ja té sentit. També es conclou que en funció de la superfície, el comportament a l'hora d'accelerar, canvia, pels motius explicats a la prova de la velocitat.

Finalment, per conèixer més bé la resposta del prototip en cada superfície, s'ha observat la potència que consumeix per cada cas, per tal d'analitzar si en funció del tipus de superfície, la potència canvia.

S'ha calculat la potència consumida a través d'un wattímetre connectat entre les bateries i el prototip, el resultat de la potència per diferents superfícies ha sigut el mateix, ja que, independentment de la superfície, el motor i els altres components funcionen d'igual manera. Tal com s'observa a la figura 40, quan tot està en marxa, el prototip consumeix un corrent de 2,33 A amb una potència de 16,7 W, potència suficient per superar la velocitat estipulada anteriorment corresponent a la potència teòrica.

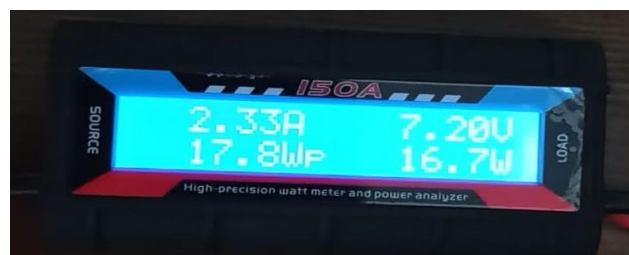


Figura 40. Obtenció de la potència consumida del prototip

Realitzant aquesta prova s'ha vist que quan s'activa el motor, és quan es consumeix la major part del corrent, i a més, la tensió que proporciona la bateria cau en picat. Tal com es veu a la figura 40, la tensió d'alimentació és d'11,1 V teòrics, però quan aquest es posa en marxa, baixa fins a 7,20 V.

La reducció de la tensió en els terminals de la bateria és provocat per la gran resistència interna que té, equivalent a la pèrdua de calor. Llavors, com més corrent circuli, més caiguda de tensió hi haurà en la resistència interna. Amb la mesura obtinguda i l'equació 17, es calcula el valor equivalent de la resistència equivalent que té incorporada.

$$R = \frac{V_{out} - V_{in}}{I_{in}} = \frac{11,10 - 7,20}{2,33} = 1,67 \Omega \quad (\text{Eq. 17})$$

On:

R: Resistència interna.

V_{out} : Voltatge de sortida de la bateria.

V_{in} : Voltatge real de la bateria.

I_{in} : Intensitat de circulació.

Mentre es feien aquestes proves, també s'ha observat el comportament del prototip per cada superfície. S'ha vist, que en totes les superfícies, el comportament és el mateix, només canvia la velocitat. S'ha pogut observar que el prototip té una tendència en desplaçar-se cap al costat dret mentre està en marxa. Aquest fet indica que el repartiment de pesos és correcte, ja que segueix bé la trajectòria marcada, però es pot millorar canviant de posició d'algun component.

8.2. Control de la trajectòria

Un aspecte molt important, que s'ha comentat a l'apartat anterior, és el control de la trajectòria a realitzar. El prototip té tendència a anar cap a la dreta, però deixant de banda aquest inconvenient, s'ha volgut determinar la capacitat que té de girar cap a les dues bandes.

Per portar-ho a terme, s'ha escollit una superfície per realitzar-hi les diferents proves, la superfície de rajola internes de ceràmica, i s'ha avaluat el comportament d'aquest.

Per determinar la capacitat de gir, s'ha observat el radi de gir que presenta pel millor equilibri de pesos. A partir d'aquí, s'han tret les diferents observacions que es comentaran a continuació. Totes aquestes proves s'ha dut a terme amb el model 2 del timó.

S'ha vist, que per girar a la dreta, l'aerolliscador ho fa amb un radi inferior que per girar a l'esquerra. S'ha vist també, que quan està en moviment, té més facilitat de girar a qualsevol costat, que quan aquest està aturat i vol iniciar el moviment realitzant un gir.

Això és degut al fet que quan està parat i el timó indica una direcció per girar, la superfície lliure per impulsar l'aerolliscador queda reduïda, ja que part d'aquesta la tapa el timó, i per iniciar el moviment, li costa. Amb una mica de constància, s'aconsegueix moure.

8.3. Distància de control

Una característica determinista del prototip és la distància màxima que pot arribar en rebré les dades enviades pel comandament. Per poder determinar aquesta distància, es farà de dues maneres, una primera, es mesurarà la distància màxima a la qual pot arribar sense cap mena d'obstacle pel mig, mentre que la segona prova consistirà a determinar la distància màxima amb obstacles, que seran les parets i els diferents mobles de casa. Amb aquesta prova, es podrà determinar si les indicacions del fabricant dels mòduls són les correctes.

Una vegada realitzada la primera prova, es veu que el prototip és capaç de rebre les dades enviades pel comandament fins a una distància màxima de 102 metres aproximadament sense cap obstacle pel mig, cosa que indica que ja compleix amb les indicacions del fabricant dels mòduls.

També s'ha pogut comprovar que quan hi ha obstacles entre el comandament i el prototip, aquesta distància es redueix considerablement a 11 metres lineals. També s'ha de dir que aquesta distància pot variar en funció del tipus de material i nombre d'obstacles trobats.

De la mateixa manera, també es realitza la mateixa prova amb la microcàmera FPV, es comprova la distància màxima a la qual pot transmetre el senyal sense interferències importants, es realitzen les dues proves amb els mateixos obstacles que la prova anterior. Com que es comuniquen per freqüències diferents, això vol dir que hi haurà certa diferència entre les dues, i amb aquesta prova es comprova.

S'ha pogut comprovar que la càmera FVP pot arribar a transmetre la imatge en bones condicions fins a una distància màxima de 133 metres aproximadament, sense cap mena d'obstacle.

A partir d'aquesta distància, el receptor rep un senyal del 23%, bastant pobre, ja es comença a veure negrós. A la figura 41 es pot veure la imatge transmesa quan s'estava acostant a la distància límit, es pot veure que primer marxa el color i posteriorment la imatge sencera.



Figura 41. Imatge rebuda a distància al costat de la màxima

A la prova amb obstacles, s'ha pogut comprovar que aquesta distància queda reduïda fins als 6,5 metres lineals. S'ha pogut veure que la imatge que rep quan es troba a la distància límit, just al costat d'una paret feta de rajoles, rep un senyal del 6%, amb el qual es veu tota la imatge borrosa.

Finalment, amb aquesta prova s'ha pogut comprovar que les freqüències majors penetren pitjors els obstacles, però segons experts, aquestes transmeten amb més bona qualitat. S'ha vist que amb la freqüència de 2,4 GHz el senyal arriba més lluny, superant més obstacles que la de 5,8 GHz.

En la prova sense obstacles, s'ha comprovat que la càmera FPV podia transmetre a més distància, això és perquè té una antena major tant per l'emissió com per la recepció de les dades enviades.

A més d'aquestes proves, també es comprova la latència que presenta la microcàmera FPV a l'hora de transmetre les imatges, per així poder verificar el valor donat pel fabricant. Per portar a terme aquesta prova, s'utilitza un cronòmetre digital.

Amb la microcàmera, s'enfoca en aquest cronòmetre, i després d'un temps, es comprova la diferència de temps que presenta entra la imatge de la càmera i el cronòmetre real. A la figura 42 es pot veure un exemple d'un resultat obtingut.



Figura 42. Resultat de la prova de la latència de la càmera FPV

Per tenir uns valors més precisos, s'ha fet la mateixa prova 5 vegades, els valors dels quals es troben a la taula 9.

Intent	Cronòmetre Real	Cronòmetre FPV	Diferència (ms)
1	10,92	10,83	90,00
2	50,83	50,72	110,00
3	00,83	00,73	100,00
4	11,03	10,93	100,00
5	31,78	31,88	100,00

Taula 9. Resultats prova de latència

Es pot concloure doncs, que la microcàmera FPV té una latència de 100 ms a la transmissió d'imatge, tal com indica a les característiques del fabricant.

8.4. Superació d'obstacles

Els aerolliscadors són coneguts pel fet que poden passar per diferents superfícies, tot i aquestes tenir imperfeccions, gràcies al principi de funcionament. Per aquest cas, es prova la capacitat que té el prototip a superar obstacles de diferents altures. Les proves es realitzaran per la superfície que es té internament a casa, la de rajoles de ceràmica interna.

Aquesta prova se separarà en dos, en la primera, es col·loquen diferents obstacles en el llarg de la superfície per on passarà, i s'anirà comprovant si els va superant, cada vegada els obstacles tindran una altura major. Per aquesta part, l'aerolliscador haurà de tenir una velocitat adquirida abans de superar l'obstacle. En la figura 43 es pot veure els diferents elements a travessar, enganxats a la superfície per tal que no es moguin.



Figura 43. Obstacles a superar en la prova

Amb els diferents elements enganxats a la superfície amb cinta adhesiva, s'ha simulat l'aparició d'obstacles al llarg de la superfície. Cada element indica una altura diferent i en funció dels elements que pot superar, s'aconsegueix el valor de la capacitat de sobrepassar obstacles.

Llavors, amb aquesta prova es pot concloure que l'altura màxima dels obstacles que el prototip pot superar és de 7 mm aproximadament, a partir d'aquesta altura el prototip comença a tenir dificultats en superar el cent per cent dels obstacles, és a dir, l'aerolliscador puja sobre l'obstacle, però a vegades es queda atrapat al mig, no sempre aconsegueix acabar l'acció del tot.

Això és perquè la part inferior de la base està baixada 5 mm respecte a la resta, cosa que per la part davantera, el prototip pot superar l'obstacle però quan arriba a la part baixada, normalment el vehicle s'encalla amb l'obstacle, tal com es pot veure a la figura 44. S'ha vist que a partir dels 12 mm aproximadament, el prototip xoca contra l'obstacle com si fos una paret.

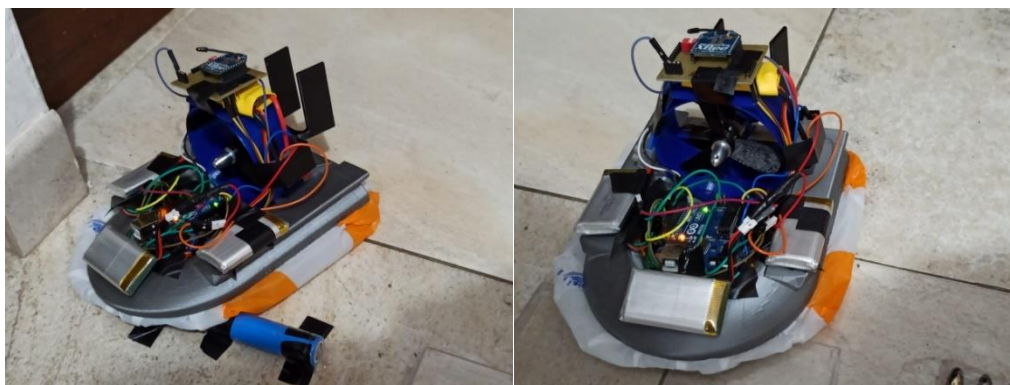


Figura 44. Resultats de superar obstacles entre 7 mm i 12 mm

En la següent prova, el prototip haurà de vèncer els mateixos obstacles superats a la prova anterior, partint de la posició de repòs, és a dir, sense velocitat prèvia en el moment de la superació dels diferents obstacles.

S'ha pogut veure que si el prototip té un obstacle, amb una altura superior als 5 mm, aquest no és capaç de seguir tirant endavant de cap manera. Llavors, es conclou que per millorar la capacitat de superar obstacles és disposar d'una velocitat abans de trobar-se'l.

La comparació entre les dues proves ja es preveia, ja que quan el prototip no té inèrcia, ha de superar una força, i si encara es troba al davant un obstacle doncs ho té més difícil. En canvi, quan ja porta una velocitat, superar un obstacle li resulta molt més fàcil, ja que a més de la força de propulsió, també hi haurà la força d'empenta que genera la mateixa inèrcia del prototip.

Llavors, es pot deduir que com més gran sigui la velocitat que porti, el prototip podrà superar obstacles amb una altura més gran sense dificultats, arribant al límit dels 12 mm. I al contrari, com menys velocitat, l'altura màxima a superar serà inferior.

Finalment, es conclou que com que en funció de la superfície la velocitat màxima varia, doncs la capacitat en superar obstacles no serà la mateixa, si part d'aquesta capacitat depèn de la velocitat que porta, en tot cas, hi haurà una petita diferència present.

8.5. Superació de pendents

La següent prova a dur a terme consisteix a determinar si el prototip és capaç de superar plans inclinats. El motor del prototip s'ha calculat per tal que vagui en superfícies planes però com que s'ha aplicat un rendiment acceptable, i a més, el motor consumeix més potencia de la calculada, es realitza la prova per conèixer fins a quin pendent és capaç d'aguantar.

Quan es tracta de plans inclinats, s'utilitza el sistema d'eix paral·lel al pendent per la descomposició de les forces, ja que resulta més senzill realitzar la descomposició de les components de les forces.

Analitzant la situació, el prototip ha de vèncer una força extra respecte les superfícies horitzontals, aquesta és part de la força del pes que estira el prototip pendent avall, tal com

es pot veure a la figura 45. En funció de l'angle del pendent, aquesta força serà cada vegada més gran, per conseqüència, arribarà a un punt on la força exercida pel motor no podrà superar les forces que s'oposen al moviment, indicant que ha arribat al pendent límit que pot superar.

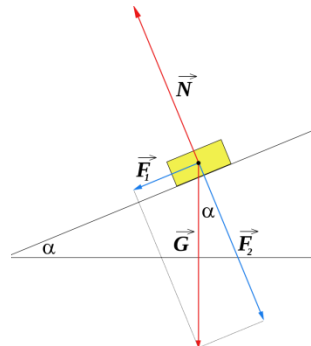


Figura 45. Distribució de la força del pes en un pendent

Amb aquesta prova, s'analitza la capacitat del prototip en pujar pendents des del repòs del motor, si és que té la capacitat, es determina fins a quin pendent pot arribar a pujar. Per tal de portar a terme la prova, s'utilitza una planxa de fusta MDF d'1 m², la qual a partir de diferents suports mòbils, es va aconseguir diferents pendents.

Amb la prova realitzada, s'ha vist que el pendent límit és de 7,62% i s'ha verificat que pot vèncer tots els pendents inferiors a aquest. Per aquest pendent, el prototip ja no té força per seguir endavant i es queda quiet, amb el motor a tota potència. Quan es produeix aquesta situació, significa que la força del motor és equivalent a totes les forces que s'oposen al moviment, i per tant el prototip no es mou.

En canvi, quan el pendent és major aquest no només no pot avançar endavant, sinó que torna endarrere, això és pel fet que la component de la força del pes sobre l'eix paral·lel del pendent és superior a la força del motor.

Per acabar de completar la prova, s'ha analitzat si el motor té una millor capacitat en pujar pendents amb inèrcia. S'ha pogut veure que quan el prototip té una velocitat inicial, el prototip avança pocs centímetres més i actua d'igual manera que abans.

Això és perquè la inèrcia és com una empenta puntual que té al moment de pujar el pendent, cosa que li permet pujar alguns centímetres de més que quan no la té, però quan l'empenta perd el seu valor, ja actua de manera normal.

8.6. Autonomia

Una vegada realitzades totes les proves, s'ha vist que la bateria del prototip s'acabava en un temps petit, per això, en aquest apartat s'ha volgut calcular de manera teòrica l'autonomia del prototip, per comparar-la amb la realitat, i així poder saber si la capacitat de les bateries són les indicades pel fabricant.

Les bateries que utilitza el prototip estan connectades en sèrie, i en general ofereixen una tensió d'11,1 V amb una capacitat de 1.200 mAh. Per tant, això indica que aquestes bateries, juntes, són capaces de proporcionar 1.200 mA en una hora, amb un voltatge d'11,1 V. A la realitat, aquests valors dependran de l'estat de la bateria, i en funció d'això, poden veure's reduïts.

Primer de tot, s'ha d'obtenir el corrent total que consumeix el prototip. El prototip està format per la placa d'Arduino, pel servomotor, pel mòdul XBee i per la càmera FPV. Segons els fabricants, es pot conèixer el consum que té cada component, excepte el motor, que aquest depèn de la càrrega que se li aplica, la qual es desconeix. També s'ha de tenir en compte, que pel cablejat que hi ha, això requereix un consum, però gairebé negligible.

Per aquest cas, per tenir valors reals i no teòrics, s'ha decidit utilitzar el mateix wattímetre utilitzat abans per mesurar la potència, aquesta vegada és per agafar el valor de la intensitat que consumeix el prototip.

Per aquest cas, amb tot connectat i activat, el prototip arriba a consumir 2,30 A. Llavors, pel càlcul de l'autonomia del prototip d'una manera senzilla i directa, s'utilitza l'equació 18.

$$t = \frac{C}{I} = \frac{1,2 \text{ Ah}}{2,3 \text{ A}} = 0,52 \text{ hores} \quad (\text{Eq. 18})$$

On:

t: Temps de descàrrega de la bateria.

C: Capacitat de la bateria en Ah.

I: Intensitat consumida per la càrrega en A.

A partir de la informació que proporcionen diferents fabricants, s'ha vist que sovint especifiquen que la capacitat de la bateria es dona en un temps de descàrrega nominal de 20 hores, de tal forma serà el valor escollit per les bateries utilitzades.

La capacitat d'una bateria depèn del ritme de descàrrega que es produeix, com a tal, no pot ser considerada exactament com una constant lineal. Es va demostrar que una taxa de descàrrega més elevada extreu més energia que una taxa inferior, una llei que il·lustra i reflecteix aquest fenomen és la llei de Peukert, la qual anuncia l'equació 19.

Tal com indiquen Noshin et al.(2012), la constant de Peukert per les bateries de Li-Po agafen un valor mitjà d'1,05, aquest depèn bàsicament de la topologia interna d'aquestes.

$$t = H \times \left(\frac{C}{H \times I} \right)^K = 20 \times \left(\frac{1,2}{20 \times 2,3} \right)^{1,05} = 0,43 \text{ hores} \quad (\text{Eq. 19})$$

On:

K: Constant de Peukert.

H: Temps de descàrrega nominal.

El fet de considerar en aquest cas la no linealitat fa que es tingui una autonomia inferior que la calculada en un inici. En general, comparant els resultats obtinguts en l'equació 18 es veu que el valor no varia tant, això és a causa del motiu que la constant de Peukert agafa un valor baix d'1,05. Per tant, el càlcul inicial no anava desencaminat.

Una vegada resolta la incògnita del temps, s'obté que en general, l'autonomia de la bateria és de 0,43 hores, equival a 25 minuts aproximadament. Això és una forma relativa de calcular l'autonomia, ja que depèn de l'estat en general de la mateixa bateria. També s'ha de tenir en compte que quan el motor accelera, té un consum més elevat, per tant, si hi ha moltes acceleracions durant el seu funcionament, això suposa una reducció important de l'autonomia del prototip.

Llavors, una vegada provada la duració de la bateria, realitzant moltes acceleracions durant el procés, s'ha comprovat que és un valor acceptable respecte les condicions donades i comparat amb el valor teòric, per tant, es pot afirmar que la capacitat de les bateries són les que indica el fabricant.

9. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost del projecte és degut al disseny del prototip i del seu comandament, el que suposa un total de mil vuit-cents seixanta euros amb vuitanta-cinc cèntims, sense IVA.

10. CONCLUSIONS

En aquest projecte s'ha portat a terme la construcció d'un prototip i s'han indicat les proves que s'han dut a terme. Tota la informació necessària es troba detallada, com també les característiques dels elements i el procediment per a realitzar l'execució del prototip.

Per la realització del projecte, s'han aplicat diversos coneixements típics d'un grau en enginyeria, i a més, s'han reforçat amb la recerca d'informació disponible d'aerolliscadors existents. També s'ha passat a l'etapa del muntatge físic del prototip, el qual presenta un repte més gran que deixar-ho en càlculs teòrics.

El prototip es controla a distància per l'usuari a través de les indicacions emeses pel comandament, les quals s'envien per radiofreqüència. És a dir, sense interconnectar-los mitjançant fils. A més, s'ha instal·lat una càmera que enregistra a temps real. Així s'obté un control més pràctic i precís que cobreix grans distàncies.

El conjunt dels objectius plantejats pel projecte s'han complert de manera satisfactòria, tot i les restriccions imposades. S'han realitzat diferents tipus de proves per determinar i estudiar les propietats i característiques del prototip.

Amb el projecte s'aconsegueix arribar a un coneixement més profund sobre l'evolució, la utilitat del principi de funcionament i les particularitats que presenten aquests vehicles, cosa que pot despertar un interès pel desenvolupament d'aerolliscadors.

El prototip té una eslora d'uns 20 cm i s'ha imprès amb una impressora 3D. Durant la col·locació dels diferents components en el prototip, s'ha tingut en compte que no interfereixi amb l'aerodinàmica i procurant la correcta distribució de pes.

S'han realitzat proves variades per analitzar les característiques i el funcionament del prototip, que han mostrat resultats interessants. S'ha avaluat el comportament dinàmic amb especial atenció a la velocitat. També s'han comprovat característiques com ara l'autonomia de les bateries, la latència de la càmera, la distància de control, el control a la trajectòria, etc.

Per motius de seguretat davant la situació actual de pandèmia, no s'ha pogut accedir als ordinadors de la Universitat per portar a terme la simulació aerodinàmica del prototip. Tot i

no ser un objectiu del projecte, era convenient tenir-ho present i poder visualitzar la simulació per tal d'avaluar el model prèviament a la impressió.

En el conjunt del projecte es perfila que els aerolliscadors són vehicles amb qualitats que poden ser molt útils. El principi de funcionament en què es fonamenten, el fet de produir una reducció considerada de la fricció, els fa ser únics. Això pot incitar la seva reaparició en el mercat, per tant, encara poden tenir un llarg futur a recórrer.

10.1. Treballs futurs

El prototip presentat per aquest projecte no és perfecte, i com qualsevol altra cosa, pot tenir les seves millores indiscutibles, per tant el prototip no s'acaba aquí, sinó que té diferents aspectes a perfeccionar per les versions següents.

Un aspecte a millorar, és la càrrega de les bateries. Actualment, per carregar-les, s'han d'extreure i introduir-les en el carregador corresponent una per una. Això suposa un gran problema pràctic i té una solució senzilla. Aquesta no és una millora essencial, ja que independentment, mentre el prototip es trobi carregant-se, aquest no podrà ser utilitzat.

També seria convenient que el prototip pogués realitzar la maniobra de marxa endarrere per sortir de les situacions on quedi atrapat. Una possible manera de dur-ho a terme és canviar el sistema de potència unitari per un doble, d'aquesta manera un motor serà l'encarregat de la sustentació del vehicle, mentre l'altre controla la propulsió. Pel motor de propulsió es pot utilitzar un regulador que controli el sentit de gir.

Una tercera millora del prototip és proporcionar més capacitat de superació d'obstacles. S'ha vist que a partir de certa alçada, el prototip ja no és capaç de superar obstacles, això provoca que per les superfícies on hi hagi presència d'obstacles, la circulació està limitada. Es podria augmentar el volum d'aire que agafa la falda, ja que d'aquesta manera augmenta l'altura de sustentació.

Pel que fa a l'estètica del prototip, es podria retocar el disseny, fent que la base sigui més profunda i més llarga, per tal d'introduir-hi els components i el cablejat. També s'ha vist que el comandament disposa de diferents punts punxeguts, es podria redissenyar el model per tal d'eliminar aquests efectes, donant-li forma com als comandaments de les consoles que es troben actualment en el mercat.

Un aspecte que queda pendent és la circulació per medis aquàtics, que en principi té la capacitat, però com que no està prou protegit, no s'hi pot fer anar. S'hauria d'aconseguir una protecció IP 55 com a mínim. Per la reducció dels cables a utilitzar, es podria dissenyar una PCB on es trobin tots els components connectats.

També convindria estudiar la relació que té les pales de l'hèlice amb l'aire a moure, es podria determinar si el nombre de pales és un factor que intervé principalment. Un altre punt important és conèixer en quina zona o part de la pala l'aire va a més velocitat, ja que això condicionaria com entra l'aire a l'interior de la falda, o com genera la propulsió. Es podria realitzar algunes proves físiques o realitzar simulacions per tal de visualitzar l'efecte que té en cada cas.

Yassine El Kabdani Haddouzi

Graduat en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Torroella de Montgrí, 2 de juny del 2020.

11. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Els documents que formen el projecte són la memòria, plànols, plec de condicions, estat d'amidaments i el pressupost.

12. BIBLIOGRAFIA

CLR. Què és exactament un servomotor i com es defineix. (<https://clr.es/blog/es/servomotor-cuando-se-utiliza/>, 5 de maig del 2020).

COELECTRIX. Càlcul de l'autonomia de les bateries. (<https://coelectrix.com/calcular-la-autonomia-de-una-bateria>, 19 de maig del 2020).

DDC. Què són les càmeres FPV. (<https://dronesdecarreras.com/fpv-y-eso-que-es-1-era-parte/>, 10 d'abril del 2020).

DIGI. Què és XBee. (<https://XBee.cl/que-es-XBee/>, 3 d'abril del 2020).

ESPERET R.. Història de l'inventor Christopher. (<https://www.dailymotion.com/video/x1bygav>, 5 de març del 2020).

F. G. ANGEL. Força d'empenta i coeficient d'arrossegament. (<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/reynolds/reynolds.html>, 18 de març del 2020).

FIGUERES, A. Apunts de l'assignatura d'aplicacions industrials dels microprocessadors. 2019.

GEKY FACTORY. Guia definitiva per alimentar Arduino. (<https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/alimentar-el-arduino-la-guia-definitiva/>, 21 de març del 2020).

HISTARMAR. Funcionament dels aerolliscadors. (<http://www.histarmar.com.ar/InfGral/Hovercraftbase.htm>, 12 de març del 2020).

JOYPLANS RC. ESC per principiants. (<https://www.youtube.com/watch?v=kO9a3F0jGsc>, 3 d'abril del 2020).

LLAMAS, L. Què són i com utilitzar interrupcions en Arduino. (<https://www.luisllamas.es/que-son-y-como-usar-interrupciones-en-arduino/>, 5 de maig del 2020).

MACNUX. Visualitzar FPV en telèfons intel·ligents. (<https://www.macnux.eu/fpv-telefono-eachine-rotg01/>, 5 de maig del 2020).

NAYLAMP. Resistències PULL-UP i PULL-DOWN. (https://naylampmechatronics.com/blog/39_Resistencias-Pull-Up-y-Pull-Down.html, 9 de maig del 2020).

NOSHINE & DAOWD, OMAR, MOHAMED & VAN DEN BOSSCHE, PETER & HEGAZY, OMAR & SMEKENS, JELLE & OOSEMANS, THIERRY & VAN MIERLO, JOERI. Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles—Assessment of Electrical Characteristics. Vol. 5. P.2952-2988. 2012.

POUS, C. Apunts de l'assignatura de sistemes d'adquisició de dades. 2019.

QUADMX DRONE. Introducció a les càmeres FPV. (https://www.youtube.com/watch?v=p5F_xhVDBTHM , 13 de maig de 2020).

ROBOLOGS 2020. Programació d'un ESC amb Arduino. (<http://www.robologs.net/2016/02/01/programacion-de-un-esc-con-arduino/>, 28 de març del 2020).

SMART GAUGE ELECTRONICS. Explicació completa de la teoria de Peukert. (<http://www.smartgauge.co.uk/peukert2.html>, 28 de maig del 2020).

13. GLOSSARI

3D: Tres dimensions

API: Application Programming Interface

AT: Transparent Mode

BEC: Battery Elimination Circuit

CAD: Disseny Assistit per Computadora

CPU: Central Processing Unit

DATA: Distribució Automàtica Transversal de l'Aire

ESC: Electronic Speed Control

E/S: Entrada/Sortida

FEM: Força electromotriu

FFF: Fabricació amb Filament Fos

FPV: First View Person

I2C: Inter-Integrated Circuit

IDE: Entorn Integrat de Desenvolupament

IGS: Initial Graphics Exchange Specification

IOT: Internet Of Things

Li-Po: Lithium Polymer

MAC: Media Access Control

MDF: Fibres de Densitat mitjana

PAN ID: Personal Area Network Identificacion

PLA: Àcid Polí-Làctic

PWM: Pulse Width Modulation

RPM: Revolucions Per Minut

STL: Stereolithography

TVL: TV Lines

USB: Universal Serial Bus

A. CODIS DE PROGRAMACIÓ

En el següent annex, es presenta el codi dels dos programes realitzats amb l'IDE d'Arduino, amb els comentaris respectius per entendre d'una manera millor les diferents variables i parts del codi.

A.1. Codi Arduino pel comandament

```

/* Comandament per un prototip d'aerolliscador a distància.

   Yassine El Kabdani TFG 2020

   14/05/2020 EPS - Universitat de Girona */

// Definició de les llibreries a utilitzar
#include <SoftwareSerial.h>

// Definició del port serial extra que s'utilitzarà per la comunicació.
SoftwareSerial mySerial(5, 6); // Es defineix el pin numero 5 rx, serà el qual
//rebrà la informació, mentre que es defineix el pin numero 6 com a tx, que serà el
//que transmetrà informació. Pin 5 connecta al rx del mòdul i el pin 6 connecta al
//tx.

// Definició de la Trama a enviar
byte encendre[18] = {0x7E, 0x00, 0x0F, 0x10, 0x00, 0x00, 0x13, 0xA2, 0x00, 0x40,
0x89, 0x21, 0xB8, 0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00, 0x48}; //Vector de divuit
//posicions, on es guardarà la trama en cada posició, la qual ocuparà un byte.
byte checksum1 = 0x00; // Posició de la memòria on es guardarà el valor del
//checksum de cada trama, ocupa un byte.

// Definició dels pins per on es rebrà informació.
const int VRx = A0; // Posició del pin per joystick respecte l'eix x.
const int VRy = A1; // posició del pin per joystick respecte l'eix y.
const int SW = 2; // Polsador del pin per joystick.

// Definició de les variables internes del programa.
int ValorRx; // Agafarà el valor del joystick respecte l'eix x.
int ValorRy; // Agafarà el valor del joystick respecte l'eix y.
bool SWITCH; // Agafarà l'estat que té el polsador.

bool Timo = LOW; // Indicarà quin element es controlarà, si el timó o la velocitat,
//sempre començarà per la velocitat.
long startTime = 0; // servirà per guardar el temps quan està en la interrupció,
//així es podrà controlar el temps ha passat entre dos interrupcions.

//Definició de les variables que utilitzarà la interrupció, es declaren com a
//volàtils.
volatile bool Marxa = LOW; // Indicarà l'estat del comandament.
volatile int com = 0; // Portarà el cronometratge de les vegades que s'ha entrar i
//s'ha realitzat l'acció a la interrupció.

void setup() {
  // Definició dels ports Serial
  Serial.begin(9600); // Es defineix la velocitat a 9600 bits per segon, per la
  //comunicació amb el PC.
  mySerial.begin(9600); // Es defineix la velocitat a 9600 bits per segon, per la
  //comunicació amb el Serial configurat.

  // Definició de la interrupció
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SW), Start, FALLING); // Es defineix que el
  //polsador serà el que causi la interrupció, quan passi d'un estat HIGH a LOW.

  // Definició de les entrades del programa

```

```

pinMode(VRx, INPUT);
pinMode(VRy, INPUT);
pinMode(SW, INPUT_PULLUP); // es defineix la entrada, activant una resistència
//interna.
}

void loop() {

    // Es realitza la lectura de les entrades del comandament, també es mostra per el
    //ordinador si es connecta en el PC, per poder depurar errors.
    ValorRx = analogRead(VRx);
    Serial.println("El valor de RX és :");
    Serial.println(ValorRx);

    ValorRy = 1023 - analogRead(VRy); //S'inverteix per corregir la polaritat, perquè
    //visualment sigui correcte.
    Serial.println("El valor de Ry és :");
    Serial.println(ValorRy);

    SWITCH = digitalRead(SW);

    // S'aplicarà les diferents condicions de condicionaments.

    if (Marxa == HIGH) { // Comandament es troba en activat.

        if (Timo == HIGH) { // S'activarà aquest condicional quan s'hagi de controlar
        //el timó.

            // En funció dels valors llegits, s'escollirà la lletra a enviar
            if (ValorRx <= 200 ) {
                encendre[17] = 'A';
                Serial.println("A");
            } else if ( ValorRx > 200  and  ValorRx <= 500 ) {
                encendre[17] = 'B';
                Serial.println("B");
            } else if ( ValorRx > 500  and  ValorRx <= 550) {
                encendre[17] = 'C';
                Serial.println("C");
            } else if ( ValorRx > 550  and  ValorRx <= 850 ) {
                encendre[17] = 'D';
                Serial.println("D");
            } else if ( ValorRx > 850 ) {
                encendre[17] = 'E';
                Serial.println("E");
            }
            Timo = LOW; // Indicació que s'ha acabat de seleccionar el timó.

        } else { // S'activarà aquest altre quan s'hagi de controlar la velocitat del
        //motor.

            // En funció dels valors llegits, s'escollirà la lletra a enviar.
            if (ValorRy <= 520 ) {
                encendre[17] = 'F';
                Serial.println("F");
            } else if ( ValorRy > 520  and  ValorRy <= 650 ) {
                encendre[17] = 'G';
                Serial.println("G");
            } else if ( ValorRy > 650  and  ValorRy <= 780) {
                encendre[17] = 'H';
                Serial.println("H");
            } else if ( ValorRy > 780  and  ValorRy <= 910 ) {
                encendre[17] = 'I';
                Serial.println("I");
            } else if ( ValorRy > 910 ) {
                encendre[17] = 'J';
                Serial.println("J");
            }
            Timo = HIGH; // Indicació que s'ha acabat de seleccionar la velocitat del
            //motor.
        }
    }
}

```

```

// Determinació del CheckSum per comprovar que les ordres són enviades
//correctament.
checksum1 = 0x00; //Inicialitzem la variable
for (int i = 3; i < 18; i++) // Bucle pel càlcul determinar del checksum.
{
  checksum1 += encendre[i]; // Es sumarà tots els bits de la trama, excepte els
  //3 primers, que es on anirà el valor del Checksum.
}

checksum1 = 0xFF - (checksum1 % 0xFF); // S'aplica un mòdul del valor respecte
//el FF, així aconseguirà un valor inferior a FF, posteriorment es farà una
//resta, i es tindrà el CheckSum de la trama.

//S'enviarà la trama byte a byte a través de la comunicació serial extra
//configurada.
for (int i = 0; i < 18; i++) // Bucle per enviar la trama.
{
  mySerial.write(encendre[i]);
}
// Finalment s'envia el valor obtingut del checksum de la trama enviada.
mySerial.write(checksum1);
}
}

// Interrupció per determinar l'activació del comandament.
void Start() {
  if (millis() - startTime > 250) // Eliminar el fenomen conegut com a debouncing,
  //Controla el temps entre l'activació de diferents interrupcions.
  {
    // Activació o desactivació del comandament.
    if (Marxa == HIGH) {
      com = com + 1;
      if (com >= 2) { // si ja s'ha pres dos vegades.
        com = 0;
        Marxa = LOW;
        Serial.println("S'apaga");
      }
    } else if (Marxa == LOW) {
      Marxa = HIGH;
      Serial.println("S'encen");
    }
    startTime = millis(); // Una vegada es realitza la interrupció, es guarda el
    //temps en que s'ha acabat, així evitar el debouncing.
  }
}

```

A.2. Codi Arduino pel control del moviment

```

/* Comandament per un prototip d'aerolliscador a distancia, mitjançant comunicació
per radio utilitzant moduls Xbee.

```

```

Yassine El Kabdani TFG 2020

```

```

14/05/2020 EPS - Universitat de Girona */

```

```

// Definició de les llibreries a utilitzar
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>

```

```

// Definició del port serie exte que s'utilitzarà per la comunicació.
SoftwareSerial mySerial(5, 6); // el pin 5 serà per tx i el 6 per a rx // El pin 5
//anirà conectat el pin 1 del xbee mentre que en el 6 anirà conectat el pin 2.

```

```

// Declaració de els objectes que utilitzaran la llibreria.
Servo servoMotor; // Declaració de l'objecte del motor brushless.
Servo Brush; // Declaració de l'objecte del SERVO motor.

```

```
// Definició dels pins per on es rebra informació.
const int MSer = 12; // Posició per el pin pel SERVO motor.
const int MMot = 9; // Posició per el pin pel Motor Brushless.

// Definició de les variables internes del programa.
char inByte; // Variable on es guardarà la informació rebuda en forma de caràcter.
int servo = 90; // Variable on es guardarà el valor en graus de posició del timo.
int Motor = 1; // Variable on es guardarà el valor del nivell de velocitat.

void setup() {

    // Definició la relació del pin amb l'objecte SERVO motor, i inicialització
    //d'aquest.
    servoMotor.attach(MSer);
    servoMotor.write(servo);

    // definició la relació del pin amb l'objecte Motor Brushless
    Brush.attach(MMot);
    Brush.writeMicroseconds(1000); // Enviar un pols de 1 ms durant 5 segons per
    //activar el motor.

    delay(6000);

    // Definició dels port Serie
    //mySerial.begin(9600); // Es defineix la velocitat a 9600 bits per segon, per la
    //comunicació per el port Serial configurat.
    //Per fer-lo servir s'ha de descomentar al llarg del programa.
    Serial.begin(9600); // Es defineix la velocitat a 9600 bits per segon, per la
    //comunicació.
}

void loop() {

    // Realitzar les accions necessàries quan hi hagi informació en el port Serial.
    if (Serial.available() > 0) { // Per cada byte que arriba, entra al condicional.
        inByte = Serial.read();
        //Serial.println(" HA ENTRAT");

        //Les dades es representaran en caràcters, sempre que correspongui a algun de les
        //seleccionades, s'entrarà al condicional que toqui.
        //es deixaran línies de programa comentades, per si es volgués visualitzar pel
        //port serial de la placa a través del PC i per entendre millor el funcionament.
        // Ordres per controlar la direcció del timó
        if (inByte == 'A' ) {
            servo = 10;
            //servoMotor.write(10);
            //Serial.println("10°");
        } else if (inByte == 'B' ) {
            servo = 50;
            //servoMotor.write(50);
            //Serial.println("50°");
        } else if (inByte == 'C' ) {
            servo = 90;
            //servoMotor.write(90);
            //Serial.println("90°");
        } else if (inByte == 'D' ) {
            servo = 130;
            //servoMotor.write(130);
            //Serial.println("130°");
        } else if (inByte == 'E' ) {
            servo = 170;
            //servoMotor.write(170);
            //Serial.println("170°");
        } // Ordres per controlar la velocitat del motor
        else if (inByte == 'F' ) {
            Motor = 1000;
            //Brush.writeMicroseconds(1000);
            //Serial.println("1000");
        }
    }
}
```



```
} else if (inByte == 'G' ) {
Motor = 1300;
//Brush.writeMicroseconds(1300);
//Serial.println("1100");
} else if (inByte == 'H' ) {
Motor = 1450;
//Brush.writeMicroseconds(1450);
//Serial.println("1450");
} else if (inByte == 'I' ) {
Motor = 1650;
//Brush.writeMicroseconds(1650);
//Serial.println("1650");
} else if (inByte == 'J' ) {
Motor = 1800;
//Brush.writeMicroseconds(1800);
//Serial.println("1800");
}
// S'executen les accions amb els valors determinats anteriorment
servoMotor.write(servo); // posiciona del timó
Brush.writeMicroseconds(Motor); // Regula la velocitat del motor

} else { // Condicional que entra quan deixa de rebre dades.
Brush.writeMicroseconds(1000); //Atura el motor en cas de perdre la senyal.
}
}
```