

GRADUA: Industria Teknologiaren Ingeniaritza  
**GRADU AMAIERAKO LANA**

***GIDARI GABEKO AIREZKO  
IBILGAILUEN AZTERKETA TEORIKO  
ETA PRAKTIKOA***

***1. DOKUMENTUA – MEMORIA***

**Ikaslea:** Fuentes Arruti, Aitor

**Zuzendaria:** Bilbao Landatxe, Javier

**Ikasturtea:** 2017-2018

**Data:** Bilbao, 2018 Ekainak 29

## Laburpen ejekutiboa

Dokumentu honek bi helburu nagusi ditu. Lehena, helburu akademikoa da, gradu amaierako lana izan dadin, eta bigarren helburua aisialdirako erabiltzen diren multikopteroen azalpen teoriko eta praktikoen azterketa gauzatzea da.

Gaur egun, gailu elektronikoak edonon aurkitu daitezke. Teknologian emandako aurrerapenak eguneroko bizitza errazten du, baina askotan teknologia hauen oinarriak ez dira ezagunak, eta honen ondorioz, askotan erabilpen txarrak egiten dira, osagai elektroniko bizi-iraupena murriztuz. Baita askotan gertatzen ohi da, gailu elektroniko bat matxuratzen denean, hau konpontzeko gaitasun teorikoak ez direla ezagutzen, beraz edo gailua bota eta beste bat erosten da, edo hirugarren bati bidaltzen zaio, azken honek konpondu dezan. Argi dago, honen erruz dirua xahutzen dela, eta dokumentu honetan ematen diren azalpenen bitartez, diru horren galera murriztuko da, behintzat multikopteroen inguruan.

Diru xahuketa ekiditzeko, dokumentu honetan zehar, edonork ulertzeko moduan aurki daitezke multikopteroetan agertzen diren osagai nagusien azalpena. Azalpen honen barruan, oinarri teorikoak eta praktikokoak agertzen dira.

Oinarri praktikokoetaz hasiz, irakurleak aurki dezake osagi bakoitzaren deskribapen fisikoa eta funtzionala, multikopteroan nola egon beharko litzateke konektatuta eta osagai horretan azaldu daitezkeen arazoak, baita konponbideak ere.

Oinarri teorikoetan, irakurleak aurkituko duen informazioa erabilgarria izango zaio baldin eta multikoptero berri bat muntatuko badu. Honetan, aurki dezake osagaien material desberdinak, multikoptero mota bakoitzarentzat egokiak diren osagaiak, ezaugarri teknikoak azalduz, edota osagaiek dituzten kodifikazioak azalduz.

Honetaz aparte, irakurlearen esku ere egongo dira multikopteroek erabiltzen dituzten teknologien azterketa. Atal hau ulertzeko, irakurleak ez da zertan izan behar teknologian aditua, baita ere erreflexio bezala irakurri daiteke ikusteko zein garrantzitsua den teknologia gaur egun. Atal honetan, ikusiko da nola hobetu daitezkeen multikopteroaren errendimendua aurrerapen teknologikoetaz balioatuz. Esate baterako, nola erabili daitezkeen motor elektrikoak, zeinek %80 errendimendua daukaten, konbustioko motorren %25-aren aurka.

Baita irakurleak ere dokumentu honetan oinarritutako multikoptero baten muntaketa aurkituko du, horrela bere multikopteroa muntatu nahi izanez gero, gida bat bezala erabiltzeko aukera du. Muntatuko den multikopteroa, argazkiak eta irudiak lortzeko

plataforma hegalaria izango da. Hau lortzeko, multikoptero normal batek baino pisu gehiago izango du (orekagailua eta kamerak eramateko).

Multikopteroak jostailuak badirudite ere, oso arriskutzua dira. Haien pisua eta lortzen dituzten abiadurak zein altueren konbinaketa kalte asko sor ditzake. Beraz, oso garrantzitsua da multikopteroa segurtasun osoz maneilatzea, horretarako dokumentu honetan zehar segurtasun jarraibide batzuk emango dira, eta multikopteroak hegatu baino lehen egin beharreko proba batzuk diseinatu dira.

Horain dela hilabete batzuk (2017/12/29) [1], Espainiako gobernuak arautegi berri bat atera zuen multikopteroen inguruan, lege berri honen laburpen bat ere aurkitu daiteke dokumentu honen eranskinean. Baita dokumentu grafiko bezala ere, Euskal Herrian multikopteroak hegatu ahal diren lekuen mapa atxikitzen da.

Dokumentu honetan proiektu hau gauzatzeko egin den planifikazioa adieraziko da Gantt diagramaren bitartez. Sistema hau oso intuitiboa da, egin beharreko lanak edo atazak taldekatzen dira eta bakoitza Aurrera eramateko behar diren egun kopuruak adierazten dira. Gero, informazio horrekin, programak barrazko grafiko bat egiten du, esan bezala era intuitiboan uler dadin.

Bukatzeko, proiektua gauzatzeko beharrezko aurrekontu bat dago. Aurrekontu hau, osagaien karakterizazioa egin baino lehen egin da, beraz baliteke aurrekontuan agertzen diren osagaiak bat ez etortzea bukaeran egindako multikopteroarekin.

Dokumentu hau ingeniartzaren ikuspuntua edonon aplikatu daitekeela adierazteko era bat da, eta puntu horretatik abiatuta, erronka bezala egindako proiektua izan da. Ingeniariek munduaren ildo ezartzeko aukera daukate, teknologian egindako aurrerapenei esker, eta aurrerapen horiek edonork baliatu ditzakeela adierazteko dokumentua da hau.

## Resumen ejecutivo

Este documento tiene dos grandes objetivos. El primer objetivo es académico, para que sirva como Trabajo de Fin de Grado, y el segundo objetivo es enseñar a analizar teórico y prácticamente un multicoptero de tiempo libre.

Hoy en día, encontramos objetos electrónicos en cualquier sitio. Los avances tecnológicos nos facilitan las tareas diarias, pero muchas veces no son conocidas las bases teóricas de estas tecnologías, y a raíz de esto muchas veces se hace un mal uso de ellos, reduciendo la vida útil de los componentes. También sucede que cuando se estropea un elemento electrónico, no se tienen las capacidades teóricas para arreglarlo, con lo cual se opta o bien por tirar el objeto y comprar otro o se manda a un tercero, para que este lo arregle. Está claro que a raíz de esto se produce un gasto monetario. Por medio de este documento, se va a evitar ese gasto, al menos en el ámbito de los multicopteros.

Para evitar esta pérdida de dinero, a lo largo de este documento, se van a explicar de una manera que cualquier persona pueda entender los diferentes elementos que conforman un multicoptero. Dentro de estas explicaciones, se verán tanto las bases teóricas como prácticas.

Empezando por las bases prácticas, el lector encontrará una descripción física y funcional de los elementos, como deben ir conectados en el multicoptero y los posibles problemas que pueden aparecer en los componentes, al igual que sus soluciones.

En las bases teóricas, la información que encontrará el lector le será útil para el montaje de un multicoptero propio. Aquí, encontrará los diferentes tipos de material, los elementos que tiene cada tipo de multicoptero, explicando sus características técnicas y la codificación de los elementos.

Además de esto, estará en la mano del lector las diferentes tecnologías que se utilizan en los multicopteros. Para entender este apartado, el lector no debe ser un entendido en la materia. Esta información puede ser utilizada para reflexionar sobre la importancia de la tecnología hoy en día. Concretamente, en este documento se verá como se mejora el rendimiento de un multicoptero aprovechando los avances tecnológicos. Por ejemplo, se verá como la utilización de motores eléctricos es clave en este aspecto, ya que el rendimiento de estos está entorno al 80%, mientras que los motores de combustión convencionales tienen un rendimiento entorno al 25%.

El lector también dispondrá en este documento del montaje de un multicoptero, de modo que si quiere crear el suyo propio, podrá utilizar esta parte del documento como una guía. El multicoptero que se montará será utilizado para tomar fotografías aéreas.

Aunque los multicoptero puedan parecer juguetes, son muy peligrosos. La combinación de su peso, las velocidades que es capaz de alcanzar y la altura que es capaz de lograr puede causar daños importantes. Por ello, es de vital importancia manejarlos con cuidado, para ello en este documento se aportaran una serie de pasos a seguir para asegurar el correcto funcionamiento del multicoptero.

A finales del año 2017, el Gobierno de España aprobó un nuevo marco jurídico (29/12/2017) en torno a los multicopteros. En la memoria del documento, se encontrará un resumen de esta ley, así como un mapa donde se indican los espacios restringidos al uso de multicopteros. En el segundo anexo, se podrá encontrar la ley completa.

En este documento, se encontrará también la planificación hecha para llevar a cabo el proyecto mediante un diagrama de Gantt. Este sistema es muy intuitivo, se agrupan los trabajos a realizar y se indican los días necesarios para llevar a cabo dichos trabajos. Luego, con esta información, el programa genera un grafico temporal, mediante el cual se muestra la planificación.

Al final de la memoria, se encontraran dos datos económicos. El primero de ellos será una tabla indicando el descargo de gastos llevados a cabo durante todo el proyecto. El segundo, será un presupuesto modesto para construir un multicoptero.

## Executive summary

This document has two main objectives. The first objective is academic, so that it serves as End-of-Degree Work, and the second objective is to analyze theoretically and practically a free-time multicopter.

Today, we find electronic objects anywhere. Technological advances facilitate our daily tasks, but often the theoretical bases of these technologies are not known, and because of this, they are often misused, reducing the useful life of the components. It also happens that when an electronic element is damaged, you do not have the theoretical capabilities to fix it, with which you choose either to throw the object and buy another or send it to a third party, so that it fixes it. It is clear that as a result of this there is a monetary expenditure. By means of this document, this expense will be avoided, at least in the field of multicopters.

To avoid this loss of money, throughout this document, will be explained in a way that anyone can understand the different elements that make up a multicopter. Within these explanations, both the theoretical and practical bases will be seen.

Starting from the practical bases, the lector will find a physical and functional description of the elements, how they should be connected in the multicopter and the possible problems that may appear in the components, as well as their solutions.

In the theoretical bases, the information that the reader will find will be useful for the assembly of a own multicopter. Here, you will find the different types of material, the elements that each type of multicopter has, explaining its technical characteristics and the coding of the elements.

In addition to this, the different technologies used in multicopters will be in the reader's hand. To understand this section, the reader should not be an understanding on the subject. This information can be used to reflect on the importance of technology today. Specifically, this document will see how the performance of a multicopter is improved by taking advantage of technological advances. For example, it will be seen how the use of electric motors is key in this aspect, since the performance of these is around 80%, while conventional combustion engines have a performance around 25%.

The reader will also have in this document the assembly of a multicopter, so if you want to create your own, you can use this part of the document as a guide. The multicopter to be mounted will be used to take aerial photographs.

Although the multicopter may seem like toys, they are very dangerous. The combination of its weight, the speeds it is able to reach and the height it is capable of achieving can cause significant damage. Therefore, it is of vital importance to handle

them with care, for this in this document a series of steps to be followed will be provided to ensure the correct functioning of the multicopter.

At the end of 2017, the Government of Spain approved a new legal framework (12/29/2017) regarding the multicopters. In the memory of the document, you will find a summary of this law, as well as a map indicating spaces restricted to the use of multicopters. In the second annex, you can find the complete law.

In this document, the planning made to carry out the project through a Gantt chart will also be found. This system is very intuitive, the work to be done is grouped and the days necessary to carry out said works are indicated. Then, with this information, the program generates a temporary graph, through which the planning is shown.

At the end of the report, you will find two economic data. The first one will be a table indicating the disbursement of expenses carried out during the entire project. The second will be a modest budget to build a multicopter.

# Aurkibidea

1.	Sarrera .....	1
2.	Helburua eta irispena.....	1
2.1.	Helburua.....	1
2.1.1.	Helburu nagusiak.....	1
2.1.2.	Helburu teknikoak.....	2
2.2.	Irispena.....	2
3.	Testuingurua.....	3
3.1.	Ibilgailuaren bilakaera.....	3
3.2.	Motor elektrikoa.....	5
3.3.	Gidari Gabeko Airezko Ibilgailua (GGAI).....	6
3.4.	Multikopteroak hegazteko baimendutako lekuak.....	6
4.	Teknologiaren egoera.....	7
5.	Hurbilpen Teknikoa.....	12
5.1.	Oinarrizko mugimenduak.....	12
5.1.1.	Bertikala .....	13
5.1.2.	Mugimendu horizontala.....	14
5.1.3.	Ardatzarekiko mugimendua.....	15
5.1.4.	Ardatzen mugimenduen izendapena .....	16
5.2.	Multikopteroaren kontrola .....	16
5.3.	Multikopteroaren oinarrizko diseinua .....	17
5.4.	Multikopteroaren diseinu osagarria .....	18
5.5.	Multikopteroak osatzen dituzten osagaiak .....	18
5.5.1.	Egitura.....	18
5.5.2.	Motorrak .....	23
5.5.3.	Propelak .....	28
5.5.4.	Bateriak .....	32
5.5.5.	Kontrolagailua.....	35
5.5.6.	ESC.....	37
5.5.7.	Urruti kontrola.....	39
5.6.	Teoria .....	42
5.6.1.	Bernoulli .....	42
5.6.2.	Newtonen 3. Legea.....	46
5.6.3.	Koanda efektua .....	46



5.6.4.	Buck zirkuitua .....	47
5.6.5.	Azelerometroa .....	52
5.6.6.	PI kontrola .....	54
5.6.7.	Motorren funtzionamendua .....	59
5.7.	Hegazteko probak.....	60
5.7.1.	Lehengo proba .....	60
5.7.2.	Bigarren proba .....	62
5.7.3.	Hirugarren proba .....	63
5.7.4.	Laugarren proba .....	64
6.	Legearen laburpena.....	64
6.1.	Erabilpen pertsonala.....	64
7.	Gantt diagrama .....	65
7.1.	Atazak .....	65
7.1.1.	Multikopteroaren proiektua .....	65
8.	Gastuen Zuriketa .....	67
9.	Proposatutako Aurrekontua .....	70
10.	Ondorioak .....	71
11.	Bibliografia .....	73

---

## Akronimoen taula

ABS.....	Akrilonitrilo Butadieno Estireno
AESA.....	Agencia Estatal de Seguridad Aerea
BEC.....	Battery Eliminator Circuit
CW.....	Clock Wise
CCW.....	Counter Clock Wise
CPU.....	Central Processing Unit
EASA.....	European Aviation Safety Agency
ESC.....	Electronic Speed Controller
FPV.....	First Person View
GGAI.....	Gidari Gabeko Airezko Ibilgailua
GPS.....	Global Positioning System
GUI.....	Graphical Users Interface
IMU.....	Inertial Measurement Unit
LED.....	Light-Emitting Diode
LiPo.....	Lithium Polymer
LPAL.....	Licencia de Piloto de Aeronave Ligera
LPB.....	Lehenengo pertsonako Begirada
PID.....	Proportional Integral Derivative
RAM.....	Random Acces Memory
ROM.....	Read Only Memory
UAV.....	Unmanned Aerial Vehicle
USB.....	Universal Serial Bus

## Irudien taula

Irudi 1 (Baloï aeroestatikoa) .....	4
Irudi 2 Lurrunezko autoa (Steam Museum) .....	4
Irudi 3 Wrigh anaiak haien hegazkinean (Sueña Volar).....	4
Irudi 4 Lehenengo makina elektrikoa (Electrical-machines) Irudi 5 Tren elektrikoa .....	5
Irudi 6 ENAIREko mapa.....	6
Irudi 7 Ingalaterrako modelo (London EMS).....	8
Irudi 8 Amazoneko prototipoa Irudi 9 Correos-eko prototipoa.....	8
Irudi 10 Arkeologia lanerako multikopteroa .....	8
Irudi 11 Ertzaintzaren multikopteroaren irudiak .....	9
Irudi 12 Ureztatzeko multikopteroa.....	9
Irudi 13 Hopper prototipoa .....	10
Irudi 14 Fukushima irudiak multikopterotik hartuta.....	10
Irudi 15 Australiako modelo.....	10
Irudi 16 Linea elektrikoko mantenua (Iberdrola) .....	11
Irudi 17 Ur azpiko multikopteroa .....	11
Irudi 18 Multikoptero profesionala .....	11
Irudi 19 Helikopteroen eskema mekanikoa .....	12
Irudi 20 Kuadrakoptero baten momentuak (MundoDron) .....	13
Irudi 21 Z ardatzeko eskema (DronesFly) .....	14
Irudi 22 Angeluen eraketa.....	14
Irudi 23 Ardatz bertikalaren biraketa .....	15
Irudi 24 Ardatzen izendapena (emissarydrones) .....	16
Irudi 25 Pausuak.....	17
Irudi 26 Dead cat (HobbyKing).....	20
Irudi 27 X525 V3 (HobbyKing) .....	22
Irudi 28 Gomazko isolagailua (HobbyKing) .....	23
Irudi 29 Mikrodronen motorrak (MydroneLab) .....	24
Irudi 30 Motor baten kodifikazioa (Aliexpress).....	24
Irudi 31 Multikopteroaren egiturari finkatzeko atala .....	25
Irudi 32 2205Kv-ko motorra (HobbyKing) .....	26
Irudi 33 800Kv-ko motorra (HobbyKing) .....	26
Irudi 34 550Kv-ko motorra (HobbyKing).....	27
Irudi 35 BLDC motor baten ezaugarri taula (HobbyKing) .....	27
Irudi 36 Hibrikoak Irudi 37 Punta fina Irudi 38 Bullnose (HobbyKing) .....	29
Irudi 39 Pitch angeluaren azalpen grafikoa (GoogleImages) .....	30
Irudi 40 Kodifikazioaren arabeko irudia (GoogleImages).....	31
Irudi 41 CW eta CCW propelak (Fero) .....	32
Irudi 42 Lipo bateria (HobbyKing) .....	32
Irudi 43LiHV (HobbyKing) .....	35
Irudi 44 LiPo bateriaren tentsio aztergailua .....	35
Irudi 45 KK2.1 kontrolagailua (HobbyKing) .....	36
Irudi 46 Ardupilot kontrolagailua (APM).....	37
Irudi 47 BEC gabeko ESC (HobbyKing) Irudi 48 BEC-dun ESC (HobbyKing).....	38
Irudi 49 Multikopteroaren mugimenduak .....	40
Irudi 50 Jarraitutasunaren grafikoa (EHU).....	44

Irudi 51 Aire partikulen abiadura eta presioa (Wikipedia) .....	45
Irudi 53 Aire partikulen ez-jarraitutasuna (Wikipedia) .....	45
Irudi 54 Hegazkin beten agertzen diren indarrak (GoogleImages) .....	46
Irudi 55 Koanda efektua eraso angeluaren menpe (Wikipedia) .....	47
Irudi 56 Buck zirkuituaren eskema Psim programas eginda .....	47
Irudi 57 Mosfeta itzalitako eskema .....	48
Irudi 58 Mosfeta piztutako eskema.....	49
Irudi 59 Buck zirkuituaren sarrera eta irteera tentsioak .....	51
Irudi 60 Bariadore lineal eta buck zirkuituaren arteko konparaketa (Wikipedia).....	51
Irudi 61 Azelerometroaren modelizazioa (EHU-Mekanismos) .....	52
Irudi 62 Azelerometroaren funtzionamendu tartea (EHU-Mekanismos).....	54
Irudi 63 Sistema ez berrelikatua.....	55
Irudi 64 Sistema berrelikatua .....	55
Irudi 65 PID sistema berrelikatua .....	55
Irudi 66 P akziodun sistema berrelikatua (errorearekin) (EHU-Automatika).....	56
Irudi 67 P akziodun sistema berrelikatua gaindiketa errorearekin (EHU-Automatika) ..	56
Irudi 68 Sistema kritikoki egonkorra (EHU-Automatika).....	57
Irudi 69 P kontrola (EHU-Automatika)                      Irudi 70 PI kontrola (EHU-Automatika) ..	57
Irudi 71 Motorra kontrolatzeko eskema (Electronoobs) .....	59
Irudi 72 Harilen korrante zentzua (Electronoobs) .....	60
Irudi 74 Biraketa zentzua (GoogleImages) .....	61
Irudi 75 Propelaren posizioa (GoogleImages) .....	62
Irudi 76 Momentuen oreka .....	63
Irudi 77 Espazioko mugimenduak (emissarydrones).....	63

# 1. Sarrera

Lan honetan, argazkiak zein bideoak eskuratzeko lau motordun multikoptero baten muntaketa teoriko eta praktikoa azalduko da, baita ingeniartzaren ikuspuntutik ere aztertuko da multikopteroen funtzionamendua. Honetaz aparte, legalki bete behar diren neurriak emango dira, multikopteroak erabiltzeko baimendutako mapa bat atxikituz.

Muntaketa teorikoaren arloan, multikopteroa diseinatzeko kalkuluak aurkeztuko dira, beharrezkoak diren atalak zehaztuz, eta merkatuan aurkitu daitezkeen aukera ezberdinak azalduz. Horrela, edonork multikoptero desberdin bat egin nahiko balu, lan honetan agertzen den informazioa gida bezala erabili ahalko luke.

Muntaketa praktikoz ere jorratuko da dokumentu hau, atal horretan aztertuko da teorikoki egindako kalkuluak egokiak diren ala ez. Baita muntaketa ere prozesua pausoka azalduko da, eta beste erabiltzaile bateri ager dakioken arazoak plazaratuko dira.

Multikopteroa ingeniartzaren arlotik ere begiratuko da, industria teknologiko graduaren zehar barneratutako kontzeptuetaz baliatuz, atal batzuen funtzionamendua azalduko da.

Azkenik, muntaketa teorikoa eta praktikoa eginda, multikopteroa funtzionatzen duen ala ez aztertzeko, pautak batzuk emango dira konprobaketak egiteko, baita kalean non erabili daitezkeen azalduko da.

## 2. Helburua eta irispena

### 2.1. Helburua

#### 2.1.1. Helburu nagusiak

Helburu nagusi bi daude, bata akademikoa eta bestea aisialdirako multikopteroa eraikitzea.

Helburu akademikotik hasita, dokumentu hau industria teknologiaren ingeniartzako gradua amaitzeko lana da, zeini esker zeharkako gaitasunak landuko dira, hala nola informazio bilaketa hiru hizkuntza desberdinetan, bakarkako lanaren antolaketa,

dokumentuen eraketa, planifikazio ereduak eta habilezia praktikoa multikopteroa montatzerako orduan.

Bigarren helburu nagusia, aisialdirako produktua sortzea da. Gaur egun gailu elektronikoak gero eta arruntagoak dira jendearen artean, edozein urteetako jendea erabiltzen dituzte. Baina agerikoa da pertsona hauek halako gailuak eukitzeko bide bakarra, merkatuan erostea dela. Gainera, barne osagaien ezagutza ezak eragiten du noizbait multikopteroan arazo bat agertuz gero, hau konpontzeko besteengana jotzeko beharra agertzen da. Beraz dokumentu honen bidez, edonork bere kameradun multikopteroa egiteko ahalmena eukiko du, baita barne osagaiak ezagutzeko aukera.

### 2.1.2. Helburu teknikoak

Helburu teknikoetan, multikopteroak osatzen dituzten osagaien azterketa gauzatuko da, osagai bakoitzaren ezaugarriak azalduz eta bakoitzaren erabilgarritasuna zein izan daitekeen esanez. Horrela, edozein motako multikopteroa sortzeko ahalmena jasoko du irakurleak.

## 2.2. Irispena

Irudi hauek lortzeko, garatuko den gailua lau motorduneko multikoptero bat izango da. Honi atxikituta, bideo-kamera bat egongo da orekatzaile batekin, airean sor daitezkeen bibrazioak kamarako irudietan ekiditzeko. Konbinazio honen bitartez, horain arte ikusi ez diren ikusputu asko ikusgai egongo dira eta arlo pertsonal zein profesionalean erabili daiteke.

Helburua lortzeko, proiektua hurrengo pausuetan bananduko da:

- Parametroen diseinua.
  - Hasierako kalkulu batzuk egingo dira helburua zein den kontuan hartuta, eta hau betetzeko mugak jarri. Pisua, tamainua eta inbertsioa izango dira mugarri nagusiak.
- Egituraren diseinua.
  - Egitura, edo *Frame* ingelesez, gailuari forma emango dio, eta multikopteroa osatzen dituen osagaien oinarria izango da. Egitura, motorren zenbakia mugatuko du, eta osagaiak jartzeko azalera ere mugatuko du. Oso garrantzitsua da azalera ondo zehaztea eta osagai guztietarako leku aproposa bilatzea, multikopteroaren grabitate zentrua honen erdian egon dadin.

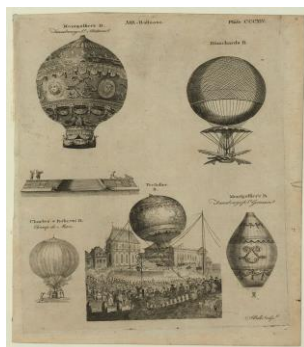
- Osagaien aukeraketa.
  - Erabiltzen diren osagai elektronikoak ugari dira, eta ezarritako eskakizunak beteko dituenak bilatu behar dira.
- Muntaia.
  - Multikopteroaren osagai desberdinen akoplamendua. Atal honetan, hasiera baten pentsatutako ideia bete daitezkeen ala ez ikusiko da. Feedback-a garrantzia izango du, momentuan atera daitezkeen erroreak antzemateko.
- Hegaldi frogak.
  - Behin kuadrakopteroa amaituta, hegaz egiteko gaitasuna frogatu behar da ingurune seguru batean.
- Legedia
  - Egun multikopteroak erabiltzeko dauden legeen laburpen bat.
- Azalpen teorikoak
  - Multikopteroen atal batzuen funtzionamendu printzipioen azterketa.

## 3. Testuingurua

### 3.1. Ibilgailuaren bilakaera

Gizakiok betidanik euki dugu munduan zehar ibiltzeko grina. Gaur egun, ia edonork edonora joan daiteke, baina noski, hau beti ez da horrela izan. Aintzina sortu zeneko lehen ibilgailua, hau pertsonak edo gauzak garraiatzeko erabiltzen den gailu bat dela jakinik, lurretik mugitzeko animalien indarrak baliatzen zen mugimendua sortzeko, adibidez zaldiekin. Baita errez lortu zen itsasontzi txikiak egitea, eta arraunen laguntzaz ur gainetik bidaiatzen hasi ziren. Baina airetik ibiltzea ez zen hain sinplea, ez zeukaten modurik airetik mugitzeko.

Zientzialari asko eta asko saiatu arren, ez zen 1783. urterarte lortu airetik mugitzeko ibilgailu bat. Ibilgailu hau, baloi aeroestatikoa izan zen, Montgolfier anaiek sorutako. Ibilgailuaren lehenengo erakustaldia Frantziako Annonay-ko merkatuan egin zuten.



Irudi 1 (Baloï aeroestatikoa)

Behin hiru elementuetatik, lurra ura eta airea, mugitzeko gai izan ginenean, abiaduran eta karga astunak mugitzeko moduz pentsatzen hasi ginen. Horrela, 1769. urtean, Nicolas-Joseph Cugnot Frantziarra, lurrin bidezko lehen automobila sortu zuen. Printzipio berdinarekin, urte batzuk geroago, 1807-an, Estatu Batuetako Robert Fulton-ek itsasontzi bati lurrunezko motor bat aplikatu zion.



Irudi 2 Lurrunezko autoa (Steam Museum)

Lurrin makina sortu eta mende bat beranduago, konbustioko motorra asmatu zen. 1885. urtean Karl Benz-ek modelo bat eraiki zuen "Benz Patent-Motorwagen" izenarekin. Itsasoetan, 1905. urterarte itxaron behar izan zen dieseleko motordun itsasontzi bat ikusteko. Errusiako "Vandal" izeneko petrolio-ontzi baten instalatu zen lehenengo aldiz horrelako propulsio modu hau. Bi urte lehenago, Wilbur eta Orville Wright anaiek hegaleko finko eta motordun lehen hegazkinaren hegaldia egin zuten, 59 segundukoa.



Irudi 3 Wrigh anaiek haien hegazkinean (Sueña Volar)



Aireko ibilgailuen inguruan, XX. mendearen hasierako zientzialariek baloi aeroestatikoak eskaintzen zueneko estatikotasuna eta hegazkinen abiaduraren tarteko gailu bat lortu nahi zuten. Izan ere, hegazkinak ezin ziren gelditu zeruko puntu baten, baloi aeroestatikoak bezala, eta honen erantzuna Raúl Pateras Pescara Argentinarra lortu zuen 1916. urtean. Gaur egun helikoptero bezala ezagutzen dugun makina frogatu zuen. Naiz eta kontrolatzeko zaila izan, bide berri bat zabaldu zuen zientzia aeroespazialean.

### 3.2. Motor elektrikoa

Gaur egungo ibilgailu gehienak konbustio bidezko motorrekin dabilzate, baina eragozpen bat daukate. Motor hauek, petroleoaren beharra daukate, eta lehengai hau, apurka apurka desagertzen ari da, beraz, beste lehengai batzuekin lan egiten duten motorrak asmatzeko beharra dago.

Garatuen dagoen alternatiba, motor elektrikoa da. Gezurra badirudi ere, ez da berria, 1834. urtean sortu zuen Thomas Davenport-ek, konbustioko motorra baino zaharragoa da beraz. Berak lan bat garatzeko behar beste potentziadun lehen motor elektrikoa garatu zuen. Hortik aurrera, motor elektriko eta konbustioaren arteko lehia hasi zen, interes ekonomiko mundialak zirela medio, eta hasiera batean petroleoaren munduak irabazi zuen lehia hau. Baina urteak joan ahala, jendeak ingurugiroko jasangarritasunaren kontzientzia hartu du, eta gaur egun motor elektrikoaren erabilera handitzen hasi da nabarmen.



Irudi 4 Lehenengo makina elektrikoa (Electrical-machines)



Irudi 5 Tren elektrikoa (Trainsmania)

Gaur egun, honen eredurik ezagunena, trenetan ikusgai daukagu. Trenbidearen goikaldetik katenariak daude zintzilikatuta tentsio izendatu batekin. Trenak katenaria honetara konektatzen da pantografo baten bidez, eta honen tentsioa hartzen du. Tentsio horrekin, trenaren motorra bakarrik ez da hornitzen, trenaren barnean dauden beste gailuentzat balio du, adibidez argientzat.

### 3.3. Gidari Gabeko Airezko Ibilgailua (GGAI)

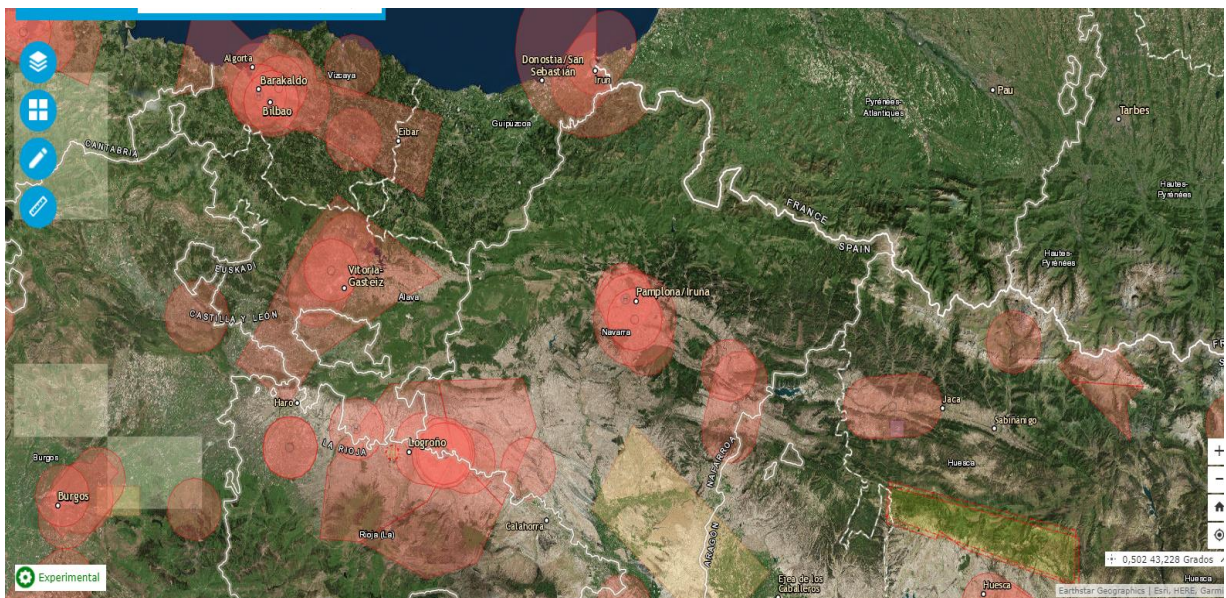
Lehenengo mundu gerran, militarrek haien tiro-praktikak egiteko diana berrien bidean sartu ziren. Batez ere, militar-munduan sortutako makina berriari aurre egiteko, hegazkinari. Baina noski, hegazkinak erabiltzea diana bezala oso garestia zen, beraz, hegazkin baten antzera mugitzen zeneko zerbait behar zuten. Horrela, GGAI (Gidari Gabeko Airezko Ibilgailua) sortu zuten. Honekin, irratia seinaleen bidez, airetik mugitzeko gaitasuna zeukaten makinak asmatu zuten.

Honezkerok, ideia hau urteetan garatzen joan zen, eta hasiera baten osagai pasibo bat izatetik, osagai aktibo bat izatera igaro zen. Adibiderik argiena 'Reaper' izeneko GGAI-a da. Makina hau 27 orduko erabilera dauka, eta heldu daitekeen abiadura 445km/h da.

### 3.4. Multikopteroak hegazteko baimendutako lekuak

Espainiar estatuaren barnean, airean burutzen diren maniobren gainean eskumena dutenek Sustapen Ministerioa eta Barneko Ministerioa dira, hots, haiek daukate airea erregulatzeko baimena. Horretarako AESA (Agencia de Seguridad Aerea) agentzia sortu zen, eta hauek dira egunerokotasuneko tramiteak egiten dutenak. AESAren barnean, airetik dihoan trafikoa kontrolatzeko, ENAIRE sortu zen. Azken honek jartzen ditu airetik ibiltzeko bete beharreko arauak.[2]

Gure multikopteroak espainiar estatuko Euskal Herrian hegazteko, hurrengo mapa erabiltzen da, non gune gorrietan ezin den sartu baimenik gabe.



Irudi 6 ENAIREko mapa

Naiz eta printzipioz guztiz debekatuta egon, posiblea da baimena eskatzea AESari halako guneetan hegazteko. Gune hauen debeku eremua aldakorra da, bakoitzaren trafikoaren arabera aldatzen da. Adibidez, Loiuko aireportuaren debeku alderdia askoz handiagoa da Hondarribikoarekin konparatuz gero.

Herrialdez banatuta, hurrengo hauek dira guneak:

Bizkaia:

- Loiuko aireportua
- Iberdrola dorreko heliportua
- Gurutzetako hospitalearen heliportua
- Iurretako aerodromoa
- Arteagako aerodromoa

Gipuzkoa:

- Hondarribiako aireportua

Araba:

- Gazteizko aireportua
- Elciegoko heliportua
- Logroñoko aireportua
- Agoncilloko base militarra

Nafarroa:

- Noingo aireportua
- Lumbiergo aerodromoa
- Sangesako aerodromoa
- Sesmako aerodromoa
- Agoncilloko base militarra
- Tudelako aerodromoa
- Ablitasko aerodromoa
- Bardenak (Jaurtiketa zelaia)

## 4. Teknologiaren egoera

Azaldutako hiru ataletan oinarrituz, motor elektrikoa, GGAI-a eta helikopteroa, multikopteroak sortu ziren. Multikopteroek ez daukate pertsonak haien barnean airetik gidatzeko, helikopteroek daukaten oreka estatikoa daukate propelen konfigurazioari esker eta propel hauek mugiarazteko erabiltzen diren motorrak elektrikoak dira. Erabilpen asko ditu, bai atal pribatuan zein pertsonalean.

- Emergentsietako multikopteroa.

Dron hauek, bere barnean desfribiladore bat daukate, eta leku zabal eta jendetsuetan erabiltzeko aproposa da, adibidez ibilaldietan, non anbulantzia bat leku konkretu batera heltzeko arazoak dituen, multikoptero hau bidali daiteke.



Irudi 7 Ingalaterrako modeloa (London EMS)

- Delivery drone

Mezularitzako merkatuan erabiltzen hasi da. Amazon enpresak adibidez garraio mota hau erabiltzen duen lehenetarikoak izan dira. Hauek bezala, Correos ere halako gailuak erabiltzen hasi dira, mendietako pertsoneri haien paketeak helarazteko.



Irudi 8 Amazoneko prototipoa



Irudi 9 Correos-eko prototipoa

- Arkeologia

Lurrazpiko eraikuntzak edo tresnak bilatzeko kamara berezi bat du atxikituta.



Irudi 10 Arkeologia lanerako multikopteroa



- Polizia

Drone hauek, pertsona bat nonbaiten galdu bada bilatzeko erabiltzen da. Baita bigilantziak ere egiteko erabili daitezke edota istripuren bateko irudi argiak lortzeko.



Irudi 11 Ertzaintzaren multikopteroaren irudiak

- Rurala

Dron hauek bi erabilera nagusi dituzte. Alde batetik, ureztatzeko gauzatzeko erabili daiteke, eta bestalde, kamara berezi bat atxikitzen zaio, eta honi esker landa bateko herein azalera egokiak identifikatu daitezke.



Irudi 12 Ureztatzeko multikopteroa

- Suteetan

Dron hauen erabilerari esker, pertsonen bizitza ez da arriskuan jartzen. Temperatura altuak jasotzeko prest daude, eta haien barnean bi kamara dituzte. Bata, HD kamara bat da, zuzeneko irudiak hartzeko, eta bestea, sutea eukiko duen progresioa neurtzeko gai da infragorrien bidez. Baita 300 litroko kapazitatea duen multikopteroa existitzen da, 'Hopper' izenekoa.



Irudi 13 Hopper protipoa

- Radioaktibitateko lekuetarako

Horrelako dronak Fukushima erabili dira, zentralaren irudiak jasotzeko. Drona diseinatuta dago leku hortan dagoen radiazioa barne osagaiak matxuratu ez dezaten.



Irudi 14 Fukushimako irudiak multikopteretik hartuta

- Flotagailudunak

Dron hauek, flotagailu bat daukate atxikituta, eta norbait uretan arriskuan egotekotan, segundu gutxitan harengana heltzeko oso aproposa da.



Irudi 15 Australiako modeloa

- Linea elektrikoek mantentze lanetan

Drone hauek, lineetan zehar ager daitezkeen matxurak aurkitzeko erabiltzen da. Kontuan euki behar da linea hauek lurretik 40 metrotara egon daitezkeela, beraz pertsona batek begibiztaz zerbait ikusteko zaila da.



Irudi 16 Linea elektrikoek mantentzea (Iberdrola)

- Ur azpikoak

Drone mota hau, bai airetik zein uretatik ibiltzeko gai da, horretarako guztiz isolatuta egon behar dira osagai elektronikoak, ura matxurak sortu ez dezan.



Irudi 17 Ur azpiko multikopteroa

- Airezko argazkilaritza

Dron mota hau ezagunena da, zeinen helburu nagusia argazkiak edo bideoak ateratzea den.



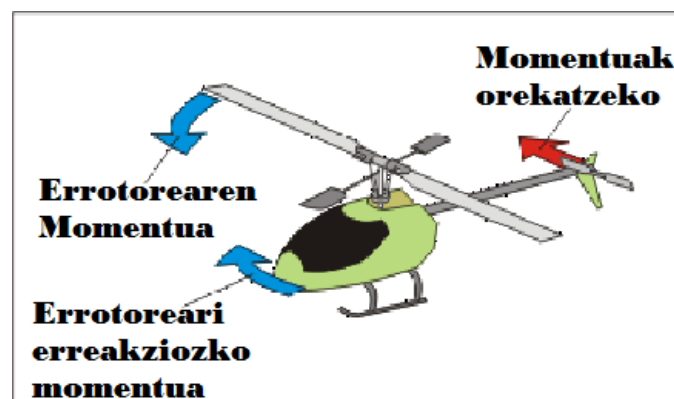
Irudi 18 Multikoptero profesionala

## 5. Hurbilpen Teknikoa

Multikopteroek airean zehar mugitzeko daukaten gaitasuna, motor elektrikoek propelak abiadura handian biratuz lortzen dute. Motor elektrikoak erabiltzeko hurrengo arrazoiak daude.

- Energia elektrikoa erabiliz, sorgailu berdin batekin (bateria), motorra eta multikopteroak dauzkan osagai elektroniko desberdinak elikatu daitezke.
- Motor elektrikoaren eraginkortasuna altuagoa da konbustioko motorrekin konparatuz. (%80 vs %25) [3]
- Segurtasunaren aldetik, ez da batere komenigarria halako aparatu batean likido suharberakor bat izatea.
- Multikopteroek daukaten tamainarentzat, motorrak txikiak izan behar dira, eta motore elektrikoaren teknologia tamaina txikietan aurreratuagoa dago besteekiko konparatuz.

Aurrekoa kontuan hartuz, argi dago zergaitik erabiltzen diren motor elektrikoak. Baina motorrek bere kabuz bakarrik sortzen dabe biraketa bat, hauei batera, mugimendua lortuko duen zerbait jarri behar da. Helikopteroek bezala, propelak erabiltzen dira. Helikopteroek bi errotore erabiltzen dituzte. Lurrarekiko paraleoa dana, errotore printzipala da, eta helikopteroaren mugimendua baimentzen du. Eta beste errotorea, lurrarekiko elkartut dagoena, errotore printzipalaren momentua orekatzeko erabiltzen da.



Irudi 19 Helikopteroen eskema mekanikoa

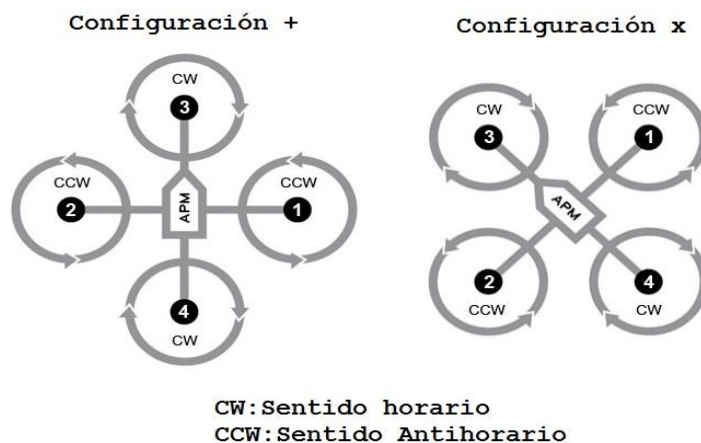
### 5.1. Oinarrizko mugimenduak

Helikopteroek ez bezala, multikopteroek lurrarekiko paraleloan hainbat errotore dauzkate. Errotore bakoitzak, momento bana sortzen du, momento totala nulua izan



behar da, multikopteroaren ardatz elkartuteko mugimendurik ez agertzeko. Momentuak anulatzeko, bi aukera daude. Egiturak motor kopuru bikoiti edo bakoiti euki dezake. Bikoitia baldin bada, motor kopuruaren erdiak alde batera biratu behardute, eta beste erdiak bestaldera. Motor kopuru bakoitia bada, konplexuagoa da oreka sortzea izan ere beti egongo dira motor gehiago alde batera biraka, bestera baino. Motor guztiak kontuan euki behar dira, eta hauen erresultantea anulatu behar da. [4]

Irudian ikus daitekeenez, lau mootorduneko multikoptero batek lau momentu eukiko ditu, momentu bana motor bakoitzeko. Airean oreka posizio baten badago eta motor guztiak biraketa abiadura berdina badaukate, sortuko daben momentua moduluz berdina da baina norantza ezberdinekin. Momentu hauek multikopteroaren grabitate zentruan nuluak izan daitezke, bi motor erlojuen horratzen alde egongo dira, eta beste biek kontra.



Irudi 20 Kuadrakoptero baten momentuak (MundoDron)

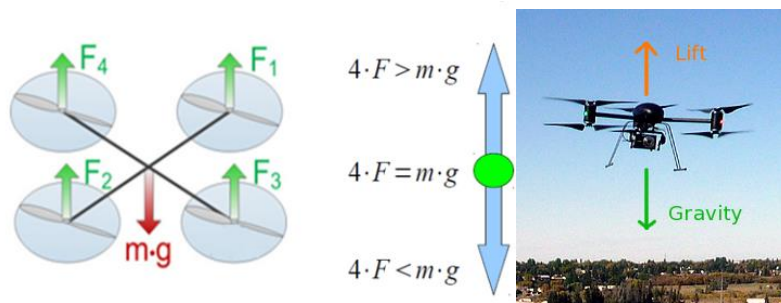
Mugimendua azaltzeko, mekanikaren oinarritzko ekuazioetan oinarrituko gara. Newton-en estatikarako lehen legean zehatz mehatz. Erreferentzi sistema kartesiarra hartuta:

$$\Sigma F_x = 0; \Sigma F_y = 0; \Sigma F_z = 0; \Sigma M_0 = 0;$$

### 5.1.1. Bertikala

Multikopteroa lurreran dagoenean, bere pisua lurraren erreakzioarekin orekatzen da, eta beraz, geldirik dago.

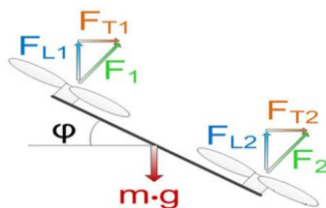
Multikopteroa gora egiteko, Z ardatzean mugitzeko alegia, grabitateak sortutako indarra ( $m * g$ ) baino apur bat gehiagoko indarra behar du, eustea (Lift) sortzeko. Hau da, motorrek sortutako indarra, multikopteroaren pisuaren indarra baino handiagoa izan behar da.



Irudi 21 Z ardatzeko eskema (DronesFly)

### 5.1.2. Mugimendu horizontala.

Mugimendu hau gauzatzeko multikopteroa lurrarekiko duen paralelotasun planoan aldatuko da nahi den norabide eta norantzan, horizontalarekiko angelu bat sortuz. Angelu aldaketa honen bidez, motorrek sortutako indarra deskonposa daiteke,  $F_z$  indar bertikalean eta  $F_y$  indar horizontalean.



Irudi 22 Angeluen eraketa

Multikopteroa ardatz bertikalaren puntu berdinean mantentzeko, hurreragoa bete behar da.

$$F_z = F * \cos\varphi = m * g$$

Hau da,  $\varphi$  angelua gora egin ahala, biderketa konstante mantentzeko  $F$  indarra handitu behar da. Mugimendu hauek gauzatzeko angelu erabiliena  $\varphi=20^\circ$  da, izan ere angelu hau baimentzen du multikopteroan desplazamendu leunak gauzatzea, beraz, indar bertikal berri hurreragoa izango litzateke.

$$F_z = F' * \cos(20^\circ) = m * g \quad \cos(20^\circ) = 0,939 \quad F' = 1.064 * F$$

Hau da, horizontalarekiko  $20^\circ$ -ko angelua dagoenean, motorrek sortu behar duten indar berri bertikalean ez mugitzeko, oreka mantentzeko behar duen indarraren %6,4 gehiago behar da.

Bestalde, angelu honekin, indar horizontala agertzen da, hurrengo balioarekin.

$$F_y = F * \sin\varphi$$

Multikopteroak orekatik angelu bateko posiziora aldatzeko, multikopteroaren grabitasun zentruan momentu bat sortu behar da. Momentu hau motorren indarren menpe dago, eta oreka kokapenean momentua nulua da, baldin eta motor guztiak indar berdina sortzen badute eta hauetatik grabitate zentzura distantzi berdina dago.

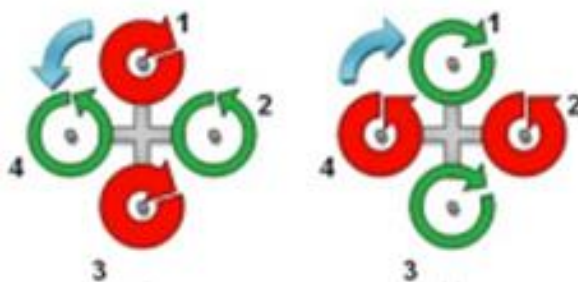
Beraz, momentua lortzeko eta ardatz bertikaleko kokapena ez aldatzeko, hurrengo egin behar da. Demagun eskumatara biratu nahi dela, orduan eskumako bi motorren indarra jeitsi behar da, eta ezkerreko bi motorren indarra igo proportzionalki, beti  $F_z = F * \cos\varphi = m * g$  mantenduz.

### 5.1.3. Ardatzarekiko mugimendua.

Mugimendu hau multikopteroa bere ardatzarekiko biraketa bat egitean datza. Horretarako, bai ardatz bertikaleko zein horizontalekiko kokapena konstante mantentzen da. Hau da, horizontalekiko ez da agertu behar angelurik, eta motorren indar totala pisuaren eraginaren beste izan behar da.

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = m * g$$

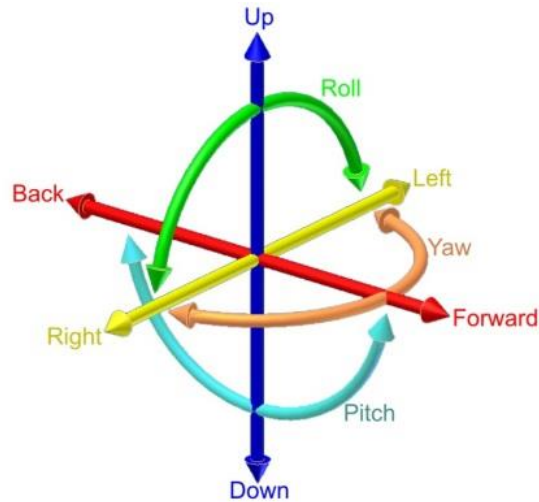
Biraketa, momentuaren eraginez lortzen da. Diagonalean dauden motorren konbinazioa egiten da, 1 eta 3 motorren abiadura handitzen da, momentu handiago bat sortuz grabitate zentruarekiko, aldiz 1 eta 2 motorren abiadura txikitzen da, hauek sortutako momentua murriztuz. Beti ere, goiko ekuazioa bermatuz. Horrela, erlojuen horratzen aldeko momentua sortuko da grabitate zentruan, multikopteroaren orientazioa aldatuz.



Irudi 23 Ardatz bertikalaren biraketa

#### 5.1.4. Ardatzen mugimenduen izendapena

Multikoptero mugimenduak ingelesetik datozen izenekin ezagutzen dira. Hurrengo irudian, ardatz bakoitzak duen izena adierazten da.



Irudi 24 Ardatzen izendapena (emissarydrones)

#### 5.2. Multikopteroaren kontrola

Behin ikusita teorikoki nola mugitzen dan multikopteroa, praktikoki nola egiten duen azalduko da. Hau da, multikopteroa nola kontrolatu daitekeen nahi diren mugimenduak egiteko. Honetarako, kasurik sinpleena azalduko da, zeinetan multikopteroa kontrolatzeko irratik seinaleak erabiltzen diren. Geroago ikusiko den bezala, aginduak bidaltzeko beste hainbeste modu daude.

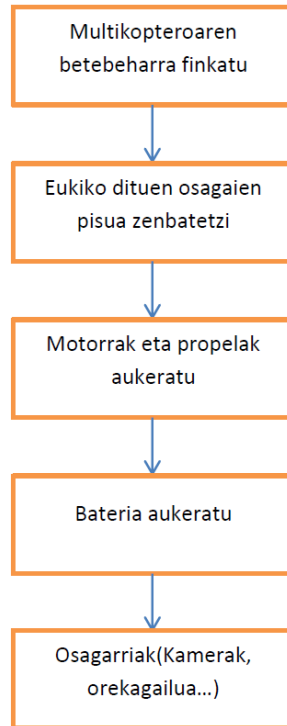
Multikopteroarekin dagoen kontaktu bakarra, urruti kontrolarekin egiten da. Hau, frekuentzia jakin bateko uhinen bitartez (2,4GHz), multikopteroan dagoen seinale hartzailearekin komunikatzen da, eta urruti kontrolatik bidalitako agindu analogikoak, agindu digitalak bihurtzen ditu, hauek, multikopteroaren kontrolagailuak uler ditzan.

Behin kontrolagailuak aginte digitala hartutakoan, motor bakoitzari aginduak bidaltzen dizkio seinale digitalekin. Baina seinale hau motorretara heldu baino lehen, ESC-tik pasatzen dira, seinalearen intentsitatea eta tentsioa handitzeko, baita gero azalduko den moduan, sistema monofasikotik trifasikora pasatzeko. Beraz, ESC-ak kontrolagailuko agindua hartzen du, eta potentzia elektronikan oinarrituz, motor trifasikoa momenturo euki behar duen abiadura kontrolatzen du.

*Urruti kontroleko seinalea → Hargailua → Kontrolagailua → ESC → Motorrak*

### 5.3. Multikopteroaren oinarrizko diseinua

Multikoptero bat diseinatzeko orduan, hurrengo zikloa egin behar da. Kontuan izan, hasierako diseinuan batez ere pisua aztertzen dela, horregaitik ez dira osagai guztiak sartzen, pisudunak bakarrik. [5]



Irudi 25 Pausuak

**Multikopteroaren helburua** ezarri. Desberdinak dira lasterketako multikopteroak eta argazkiak ateratzeko multikopteroak.

**Zenbatezpenak** burutu. Multikopteroak eukiko duen pisua eta tamainua.

**Motorren** ezaugarriak aukeratu. Pisu eta multikoptero motaren arabera.

**Propelak** aukeratu motorren ezaugarrien arabera, motorren biraketarekin propelak behar besteko eustea sortu dezaten.

**Bateria** aukeratuko da hegazteko denbora kontuan hartuz, baita multikopteroak eukiko duen tentsioari erreparatuz.

**Extrak**, multikopteroak eukiko duen funtzioaren arabera osagaiak dira.

Aurkeztutako osagaiak izango dira multikopteroaren pisua gehienbat definituko dutenak. Beste osagaien pisua, kontrolagailua bezala, oso txikia da aurrekoekin konparatuz.

Behin osagaiak aukeratuta, hauen pisu totala kalkulatu da, eta aukeratutako motor eta propelak pisu hori mugitzeko gai diren aztertu. Gaitasuna badaukate, oinarrizko diseinua bukatuta egongo litzateke (kontuan euki, normalean segurtasun neurriak direla medio, motorren bulkada indarra, multikopteroaren pisuaren bikoitza dela). Gaitasunik ez badaukate, osagaiak berriz aukeratu behar dira (motor indartsuagoak edo osagai pisutsuak aldatu).

## 5.4. Multikopteroaren diseinu osagarria

Oinarrizko diseinua prest dagoenean, multikopteroaren osagarriak aukeratu dira. Osagai hauek hurrengoak dira: kontrolagailua, urrutiko kontrola eta egitura. Kasu askotan, zuzeneko irudiak hartzen dira, horretarako Lehehengo Pertsonako Begirada (FPV ingelesez) sistema erabiltzen da, sistema honek kamara txiki bat dakar antena batekin, honek irudiak irrati seinalez bidaltzeko, lurrean hargailu bat jartzen da seinaleak eskuratzeko eta azkenik dekodifikadore bat dago irudiak pantailaratzeko.

Behin osagaiak aukeratutakoan, benetazko pisuaren kalkulua egiten da, eta hasiera batean egindako zenbatezpenarekin konparatu da. Egindako zenbatezpena ondo egotekoatan, hau da benetazko pisua zenbatezpenarena baino apur bat txikiagoa baldin bada, diseinua balizkoa izango da. Zenbatezpena benetazko pisua baino askoz handiagoa edo txikiagoa bada, multikoptero txarto diseinatuta egongo da, beraz aldaketak egin beharko dira.

## 5.5. Multikopteroak osatzen dituzten osagaiak

Multikopteroak osagai desberdinetaz osatuta dago, naiz eta ezagunenak motorrak eta egitura (frame) izan, badaude beste osagai batzuk oso garrantzitsuak direnak multikopteroaren funtzionaltasuna bermatzeko, hurrengo orrialdeetan osagaien deskribapena egingo da. [6]

### 5.5.1. Egitura

Honekin, multikopteroaren helburua burutzeko eukiko den espazioa finkatuko da. Egituren tamaina lau ataletan bana daiteke.

-Etxeko multikopteroa

-Lasterketako multikopteroa

-Argazki multikopteroa

-Zama multikopteroa

Etxeko multikoptero ("Mikrodron") batek duen frame-aren tamaina, 150mm baino txikiago da. Tamaina lauki baten diagonalen neurria da. Bere tamaina hain txikia denez, eragozpen handiak daude erabili daitezkeen gailuekin. Adibidez, propelak oso txikiak izan behar dira, baita motorrak edota bateriak. Azken honengatik, bateriek 200mAh-koak dira, eta dron hauen autonomia 5 minututakoa da.

Multikoptero hau, gomendagarria da multikopteroen munduan hasiberriak diren pertsonentzat, izan ere, beste aparatuen mugimendu berdinak egiten ditu, eta hauei ohitzeko erraza da, besteek daukaten arriskua ekidinez. Gainera, umeentzako ere aproposa da arrazoi berdinegatik.

Lasterketako multikopteroak askoz ezagunagoak dira, izan ere, azken urteotan arrakasta handia izan dute halako lehiaketak mundu osoan zehar, zaletuen zenbakia exponentzialki handituz. Halako dronen frame-ak, 250-400mm artean daude. Tamaina honekin, posiblea da motor potenteagoak jartzea, baita propel eta bateria handiagoak.

Tamaina honetako motorrak, oso abiadura handian bira ditzakete, eta pisuaren aldetik ez dira astunak, beraz, oso azkarrak bihurtzen dira. Hau da lasterketak egiteko arrazoirik handiena, dronen abiadura handiak. Ez bakarrik abiadura, ere oso azkarrak dira mugimenduak egiterakoan, adibidez bihurtzeetan, edo altuera aldaketetan.

Argazkilaritzaren aldetik, oso interesgarria da multikopteroen ekarpena, izan ere profesionaleri perspektiba berri bat ematen die, orain arte ez zeukatena. Baina tamaina hauetako dronak ez daukate bakarrik argazki profesionalak ateratzea helburu, asko erabiltzen da bigilantzia esparruan, adibidez, poliziek erabiltzen dabe.

Egiturak 450-600mm artean daude. Zabalera hau oso aproposa da multikopteroari ekstrak jartzeko, esan bezala, gehien erabiltzen dena kamara bat da, gimbal batekin. Gimbala, estabilizazio sistema bat da. 3 orekagailu mota daude, ardatz bakar bateko orekagailua, bi ardatzetakoak eta hirukoak. Baina osagarri hauek, multikopteroaren pisua handitzen dute, eta horretarako motorrak potenteagoa eta handiagoak izan behar dira.

Zama lanerako erabiltzen diren multikopteroak ez dira asko ikusten horaindik, baina Estatu Batuetan badaude enpresa batzuk halako gailuak erabiltzen dituztenak bidalketak egiteko alde batetik bestera (Amazon, UPS...)

Halako multikopteroen egitura 600 eta 1000mm-koak dira, eta lehen bezala, tamaina handitzeak, pisua handitzea dakar. Beraz, erabili behar diren motorren pareta altuagoa izango da, baita propelen tamaina handiagoa.

Aurrerago azalduko dugu motorraren parearen erlazioa.

Behin multikopteroaren egitura tamainaz sailkatuta, beste sailkapen bat azalduko da, multikopteroak eukiko dituen motor kopuruarengatik hain zuzen ere. Honi, multikopteroen konfigurazioa deritzogu.

Multikopteroak, sinpletasunean oinarritzen dira, beraz, erabilitako motorrak airea bakarrik bultza dezakete ardatz baten. Motorrak edozein angelutan jarri ahalko balitz, motor batekin nahikoa izango genuke, gaur egungo gerrako hegazkinak bezala. Hegazkin hauek, hegaletan atal mugikorak dituzte mugimendua ahalbidetzeko, baina multikopteroen kasuan, atal guztiak finkoak dira.

Murrizpen hau kontuan hartuta, ikusiko da zein den behar den motor zenbaki minimoa multikopteroek hegaz egin dezaten.

1. Motor bakar batekin, bakarrik gora eta behera egingo luke. Ezpaziontzia bezala.
2. Bi motorrekin, espazioan bi askatasun gradu eukiko lirateke, hau da, motorrak lurrari elkartzut ipiniz, ardatz bertikalean eta ardatz horizontal baten bakarrik mugituko ginateke. "Osprey" hegazkinak egiten duen bezala.
3. Hiru motorrekin, elkarren artean konbinatuz, posible da espazioko 3 ardatz linealetan mugitzea. Multikoptero hauek, trikopteroak deitzen dira.

Beraz, hiru motorretik aurrerako konfigurazioak onargarriak dira orekaren eta mugimenduaren aldetik.

Egitura diseinatzerakoan, beste datu batzuk euki behar dira kontuan. Besoen arteko angeluak eta multikopteroaren norabidea finkatu behar dira.

Besoen angeluak normalean trigonometrikoki orekatuta egoteko egiten da,  $\frac{360}{\text{Beso kop.}}$ . Hau da, 3 beso baditu,  $120^\circ$ -rekin banatuta egongo dira, 4 baditu,  $90^\circ$  etab.



Irudi 26 Dead cat (HobbyKing)



Baina bestelako angelu konfigurazioak ere egin daitezke, adibidez “Dead Cat” egitura. Aurreko besoen arten 120° daude, eta atzeko besoen artean aldiz, 90°.

Halako konfigurazioak posibleak dira kontrolagailua ahalbidetzen badu, horretarako kontrolagailuaren programan sartu beharko litzateke konfigurazioaren datuak.

Azkenik, materialaren inguruan arituko gara.

- Plastikoa

Material honek aurkeztu dezakeen malgutasuna arazo bat da drone bat eraikitzeke garaian. Beraz, material egokia litzateke, ondo dator estategikoki erabiltzeko, baina ez egitura osoa material honetan oinarritzeko. Lurreratze tren edota helizeen babesgailu gisa erabili ohi da. Kasu batzuetan, tamaina txikiko multikopteroak eraikitzeke ere balio du.

Egituran erabiltzeko plastiko gogorak aukera daitezke, baina hauek aurkezten duten hauskortasuna handia da golpeetarako erresistentzia mugatuz. Bestalde, bibrazioen aurrean ere ez dute era aiposean erantzuten, hauek xurgatzeko gai ez baitira.

- Egurra

Egurraren abantaila nagusia bere prezioa dela esan daiteke. Historian zehar oso erabilia izan den material hau merkea eta maneiatzeko erraza da. Bibrazioen aurrean xurgapen maila altua eduki arren, bere zurruntasuna edo kolpeekiko erresistentzia ez da ziurrenik honelako proiektu batek beharko lukeenari ondoen doakiona: hegaldi eta muntaiaren probak egiterakoan gailua hondatzea saihestu nahiko da, ahalik eta denbora gutxien galtzeko muntaiaren eraikuntzan. Hala ere, aipatutako merketasunak saiakuntza horietako batean zatiren bat hondatuz gero ordezkapena erraztuko luke.

Egurraren arabera, merkeago edo garestiagoak topa daitezke, baita pisutsuagoak edo arinagoak ere. Preziari eta pisuari erreparatuz, esango litzateke okumen xafak erabili genitzakeela beharko litzatekeen forma laua emateko egiturari.

- Karbono zuntzak

Material honen arintasun eta gogortasun altuek oso egokia bilakatzen dute aplikazio desberdin askotarako. Multikoptero baterako ere material egokia litzateke, edozein

formatan lor genezake, eta gainera bibrazioak ondo moteldu eta xurgatzen ditu. Material honek, proiektu honen aurrean aurkezten duen desabantaila bakarra bere prezioa litzateke.

- G10 (Beira zuntzak)

Mekanikoki eta fisikoki karbono zuntzen oso antzekoa den material hau aurretik aipatutakoa baino merkeagoa da. Xafla moduan aurkitu daiteke merkatuan eta, orokorrean multikopteroen gorputzaren beheko nahiz gaineko plaka gisa erabili ohi da. Kasu honetan ordea, beira zuntza mugatuagoa da bibrazioen xurgapenari dagokonez, karbono zuntzak hobeto erantzuten baitu.

Gorputza eta besoak beraz aipatutako material hauekin osatuko litzateke, haien ezaugarriak aurkeztuak egonik gure proiektura ondoen moldatzen direnak hautatuz. Laborategian bi materialen konbinazioz egina dagoen egitura topa dezakegu: beira zuntzeko material konposatua eta aluminioa.

Beira zuntzak dituen gorputza eta aluminiozko besoak dituen HobbyKing X525 V3 egitura modelo. Bi materialen konbinazioz egitura solido baina arina lortzen da, eta karbonozko lurreratze trenak ere berarekin dakar. Aurkezten dituen lurreratzeko elementuak nahiko motzak dira, hasierako saiakeretan aireratze zein lur-hartze prozesuak erraztuz. Besoen amaieran kokatuta egonda gailuari oreka aurkitzea erraztuko diote lurra hartzeraren doanean.



Irudi 27 X525 V3 (HobbyKing)

Badira babesgarri edo bibrazioen aurrean motelgailu gisa lan egin dezaketen materialak ere. Beren malgutasun edo egonkortasun ezagatik, ezin ditugu material hauek egitura osorako kontsideratu, baina hauen gehikuntza lagungarria izan daiteke gailuaren atal batzuk hobetzeko, adibidez, kontrolagailuan bibrazioak murrizteko.



Irudi 28 Gomazko isolagailua (HobbyKing)

- Aluminioa

Aluminioa tamaina eta forma desderdinetan aurki daitezke merkatuan, xafla lauetatik estrusio bidez lortutako gorputzeraraino. Prezio eta biziraupenerakargarriak ditu material honek, eta dentsitate nahiko baxua du hemen erabili ditzakegun beste material batzuk baino altuagoa izan arren ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ).

Bestalde, aluminioak aurkezten duen elastikotasunak materialaren haustura ekiditen du, baina ez da plastikoa bezain malgua eta, beraz, deformazio txikiz erantzungo luke gailuaren hegaldi batean. Hau ez litzateke alderdi komenigarri bat izango gailua proba fasean badago: talkekin besoak okertzera joko lukete, gailuaren simetria galduz eta propelak posizio guztiz bertikaletik ateraz. Propelak bertikaltasuna galtzen badute, bulkada indarren galera ekar dezake, eta aurretik sartutako kontrolen baliogabetasuna.

- Goma-aparra

Gailuaren egituraren oinarria ezingo da goma-aparra izan, aurkezten duen zurruntasun eskasagatik. Alabaina, segurtasun gehigarri gisa erabili daiteke, elementu delikatueta kolpeak moteltzeko babesgarri gisa adibidez, edo bibrazioen xurgapenean laguntzeko, egitura eta kontrol plakaren tartean jarritz gero. Material honen barnean gainera bariazio asko daude, zurruntasun gehiago edo gutxiago eskaini dezaketanak.

### 5.5.2. Motorrak

Multikopteroetan erabiltzen diren motorrak, ingeleseko BLDC hizkiekin identifikatzen dira (BrushLess Direct Current). Ohizko motorrekin konparatuz hobeagoak dira, izan ere eskuilak kentzean motorretik elementu mekaniko bat kentzen da, motorraren errendimendua hobetuz eta matxuratzeko ahalmena duen osagai bat gutxiago eukiz. Gainera, erabilitako imanak lur arrarokoak dira. Hauei esker, ohiko motor baten potentzi bera sortu dezakete tamainu txikiago batekin. [7]

BLDC motorrek desabantaila bat badaukate ohiko motorrekin konparatuz. BLDC motorrak mugiarazteko, kontrol elektronikoa behar da, harilen elikatzea kontrolatzeko. Baina gaur egun halako elektronika oso garatuta dago, eta era merkean eskura

daiteke kontrolagailu elektronikoa bat. Multikopteroen kasuan, control hau ESC-en barnean dago.

Hasieran esan bezala, tamaina txikiko motor elektrikoak erabiltzen dira multikopteroetan. Motor hauek korrante alternoko 3 fase-dunak dira, eta normalean errotoea kanpotik daramatzate, "outrunner" izenekoak.

Aipatu behar da, mikrodronek ez dutela horrelako motorrik erabiltzen, tamaina murrizpenak direla medio. Hauen motorrak oso txikiak dira, eta korrante zuzenekoak. Mota honetako motorrak, *Coolplay* deitzen dira. Motor hauek monofasikoak dira, bi mota daude, orratzen alde (CW) biratzen dituztenak eta orratzen aurka (CCW). Motor hauen biraketa ezin daiteke aldatu, beti alde batera biratzen dute.



Irudi 29 Mikrodroneen motorrak (MydroneLab)

BLDC motor bat erosterakoan, fabrikanteek ematen duten kodigoa ulertu behar da, diseinu atalean ezarritako espezifikazioak betetzen dituen jakiteko. Hurrengo irudian, kodifikazio estandarra agertzen da.

**2212 2300KV**

Irudi 30 Motor baten kodifikazioa (Aliexpress)

Lehenengo zenbakia (22), motorraren diametroari egiten dio erreferentzia.

Bigarren zenbakiak (12), motorraren altuerari egiten dio erreferentzia.

Hirugarren zenbakiak (2300), konstante bat da, voltiotako konstantea. Zenbaki hau motorraren sarreran dagoen tentsioarekin biderkatuz, motorraren rpm-ak lortzen dira.

Lehenengo bi zenbakiak motorraren dimentsioak ditugu, eta normalean, motor txikiak, multikoptero txikietan muntatzen dira, eta motor handiak, multikoptero handietan. Kontuz ibili behar da, izan ere, kodigo honetan ez dira aurkitzen motorrek dauzkaten torlojuentzako zuloen kokapena. Motorraren dokumentazioan ikusi beharko da zuloen kokapena, eta bermatu zulo horiek gure egiturarekin bat datoztela.



Irudi 31 Multikopteroaren egiturari finkatzeko atala

Kontuz ibili behar da baita hirugarren zenbakiarekin ere, izan ere, zenbakiaren unitateak Kv, kilo voltiokin nahastu daitezke. Baina esan bezala, konstante bat besterik ez da, eta motorraren abiadura zein izango den adierazten du, sarrerako tentsioaren menpe. Hau da, sarreran 10 V badaude, motorrak 23000 rpm-rekin biratuko du.

Kv zenbaki altuago batek, ez du zertan esan nahi motor hori potenteagoa dela, bakarrik azkarrago biratzeko ahalmena duela, beti ere kargarik gabe. Hau errazago ulertzen da hurrengo adibidearekin. Egoera normal batean, pisu gutxiko pertsonak batek, pisu handiko beste batek baino azkarrago korrika egin dezake, baina bi pertsoneri zama bat jarri ezkerre, pisu handiagoko pertsonak, txikiagokoak baino azkarrago ibiliko litzateke. Multikopteroetan antzekoa gertatzen da, pisu handiko multikoptero bat mugiarazteko, aire kantitate asko mugitu behar da eta horretarako motorrak pare handia behar du, ez abiadura gehiago. Beraz, multikopteroaren pisua gora egin ahala, motorren abiadura behera egiten du eta pare gora.

Motorren sailkapena, multikopteroaren tamainarekin edo pisuarekin batera egiten da.

- Multikoptero txikiak

Multikoptero txikiak, normalean lasterketarako erabiltzen direnak, bizkortasun handiko multikopteroak dira, abiadura handiak lortu eta norantza momentu batean aldatzeko gai izan behar diren motorrak erabiltzen dute. Hauen Kv-ak 1000-tik 3000-ra daude gutxi gora behera, eta oso motor baxuak dira.



Irudi 32 2205Kv-ko motorra (HobbyKing)

- Multikoptero ertainak

Multikoptero ertainetan, argazkilaritzan erabiltzen direnak adibidez, oreka dinamikoaren eta abiaduraren arteko oreka bilatzen da, ez da beharrezkoa norantzaren aldaketa azkarrik, beraz Kv txikiagoko motorrak erabiltzen dira. Motor hauek, begibiztaz apur bat luzeagoak dira, eta 750-1000 Kv artean daude.



Irudi 33 800Kv-ko motorra (HobbyKing)

- Multikoptero handiak

Multikoptero handietan erabiltzen diren motorrak, itxuraz luzeagoak dira, eta multikoptero hauetan garrantzitsuena oreka eta zamak mugitzeko gaitasuna denez, oso Kv txikietako motorrak erabiltzen dira, baina pare handikoa. Izan ere, Kv baxuko motorrek, indar gehiago daukate inguruko airea mugiarazteko, eta honen ondorioz, bulkada handia sortzen dute. Motor hauek 100-700 Kv arteko konstanteak daukate.



Irudi 34 550Kv-ko motorra (HobbyKing)

Behin azalduta ze motor mota behar den multikoptero mota bakoitzerako, aukeratuko den motorraren propietateak azalduko dira. Horretarako, hurrengo taula aztertuko da.

The voltage ( V )	Paddle size	current ( A )	thrust ( G )	power ( W )	efficiency ( G/W )	speed ( RPM )		
11.1	EMAX8045	1	110	11.0	10.0	3650		
		2	200	22.0	9.1	4740		
		3	270	33.0	8.2	5540		
		4	330	44.0	7.5	6200		
		5	380	55.0	6.9	6700		
		6	420	66.0	6.4	7150		
		7.3	470	81.0	5.8	7400		
	EMAX1045	1	130	11.0	11.8	2940		
		2	220	22.0	10.0	3860		
		3	290	33.0	8.8	4400		
		4	360	44.0	8.2	4940		
		5	430	55.0	7.8	5340		
		6	490	66.0	7.4	5720		
		7	540	77.0	7.0	5980		
		8	580	88.0	6.6	6170		
		9	620	99.0	6.3	6410		
		9.5	640	105.5	6.1	6530		
		14.8	EMAX8045	1	130	14.8	8.8	3900
				2	230	29.6	7.8	5180
3	310			44.4	7.0	6000		
4	390			59.2	6.6	6610		
5	470			74.0	6.4	7200		
6	530			88.8	6.0	7570		
7	580			103.6	5.6	7910		
8	630			118.4	5.3	8230		
9	670			132.2	5.0	8500		
10	700			148.0	4.7	8780		
10.7	720			158.4	4.5	9030		

Irudi 35 BLDC motor baten ezaugarri taula (HobbyKing)

V→ Aplikatutako tentsioa.

Paddle→ Propelaren luzeera eta eraso angelua.

A→ Motorrak eskatutako intentsitatea.

G→ Sortutako bulbaka, gramotan.

W→ Potentzia.

GW→ Efizientzia.

RPM→ Minutu bateko reboluzioak.

Motor baten kontuan hartu behar diren barne propietateak hurrengoak dira:

Taulako datuekin, dronen hurrengo piezak zeintzuk izan behar diren jakingo da. Adibidez, demagun tamaina ertaineko multikoptero bat egin nahi dela, 4 besodunekoa eta estimatu da guztizko pisua 1250g-koa izango dela. Beraz, segurtasun neurriengatik, motorrek sortu behar duten bulkada 2500 g da. Beti segurtasunez margen handi bat utzi behar da.

Bateriarekin hasita, tentsio maila ezartzen da. Multikoptero ertainetarako 11.1V edo 14.8V erabiltzen dira. Demagun 11.1V hartzen dela.

Ondoren, propelak hautatzen dira. Era askotakoak daude, baina halako multikopteroentzat, normalean 10x45-ekoak hautatzen dira.

Bateria eta propelak behin hautatuta, behar den bulkada emoteko gai direla baieztatu eta gero, taulatik aterako da korrante maximoaren balioa. Balio honekin, multikopteroaren beste zati bat hautatuko da, ESC (Electronic Speed Control) alegia. Gailu honek espezifikazioetan dakarren korrantea, motorrarena baino altuagoa izan behar da derrigorez.

### 5.5.3. Propelak

Propelen inguruan jakin behar diren datuak hurrengoak dira. Materiala, konfigurazioa, diametroa, eraso angelua eta angeluaren norabidea.

Materialaren haukeraketa bere garrantzia deko, izan ere, material ezberdinek zurruntasun, bibrazioen transmisio, eta talken aurkako erresistentzi desberdinak dituzte. Zurruntasuna eta talken aurkako erresistentziaren garrantzia handia da, izan ere, hauei esker propelaren hasierako formari eusteko erraztasuna eukiko dute zenbait materialek. Epe ertain batean onuragarria izango da, izan ere propelak desbideratze bat jasanezkerok, drone osoaren eraginkortasuna murriztuko litzateke. Kontuan euki behar da, dronen istripu txikiak arraroak ez direla, eta hauetan propelak ez deformatzea ondo etorriko da. Bestalde, bibrazioen murrizpena ere inportantea da, baita multikopteroaren eraginkortasuna ere murriztu ez dadin.

- Plastikoa

ABS plastikoa bezalako materialak multierrotoreen munduan ezagunenak dira. Merkeak dira, hegaldian ondo erantzuten dute eta iraunkorrak dira. Talken aurka ez dute erresistentzia handirik aurkezten, eta normalean propelaren bat apurtu egiten da



kolpe bat jasotzean, beraz probek dirauten bitartean ziurrenik behin baino gehiagotan aldatu beharko dira. Badaude karbono-zuntzez armatutako plastikozko propelak ere, zaintzuk erresistentzia altuago bat daukaten, baina zuntz hutsez egindakoak baino merkeagoak diren.

- Zuntzez armatutako polimeroak

Karbono zuntzek aurkezten dituzten produkzioarako zailtasunek eragin zuzena dute propelen produkzioan, eta plastikozko propelak baino garestiagoak dira. Material hauek ordea, zurruntasun altuago bat eta makurdura gutxiago aurkezten dute, baina beste elementu baten aurka talka egitean kalte handiagoa sortu dezake bere gogortasuna dela eta. Gainera, beste materialek ez bezala, propel hauek akabera ona aurkezten dute eta ez dute orekatze beharrik izaten.

- Material naturalak

Egurra bezalako materialak ez dira oso erabilgarriak propel gisa multierrotoretan, hauen produkzioa plastikoena baino garestiagoa baita. Hala ere, haien abantaila handiena zurruntasuna eta arintasuna dira, hegaldian makurdurarik edo flexiorik jasaten ez dutelarik. Hauskorak ere badira, eta beraz probetarako ez dira gomendagarriak.

Konfigurazioaren atalean, propel bakoitzak dituen punta kopurua eta punta ezaugarriak aztertzen dira.

Punta kopuruaren inguruan, normalean bi puntadunak erabilienak dira, baina ez da arraroa hiru puntadunak aurkitzea. Hauen arteko diferentzia bulkadan eta kontsumoan nabarmena da. Punta gehiagorekin, inguruko aire gehiago mugituko da reboluzio bakoitzeko, baina baita energiaren kontsumoa handitzen da.

Punta konfigurazioaren aldetik, hiru konfigurazio dira nabarmenenak.

- Punta fina
- Bullnose
- Hibridak



Irudi 36 Hibrikoak (HobbyKing)



Irudi 37 Punta fina (HobbyKing)



Irudi 38 Bullnose (HobbyKing)

### Punta fina

Energiaren aldetik eraginkorrenak dira, eta bulkadarik txikiena sortzen dutenek. Honen ondorioz, multikoptero osoaren tenperatura ez dute igotzen.

### Bullnose

Bulkadarik handiena sortzen du, baina honen ondorioz, aire gehiago mugitu behar da, eta motorrek gehiago kontsumituko dute, drone osoaren tenperatura igoz. Hauek, lasterketarako aproposenak dira, izan ere, lasterketetan oso esfortzu handiak behar dira denbora oso txikian.

### Hibridak

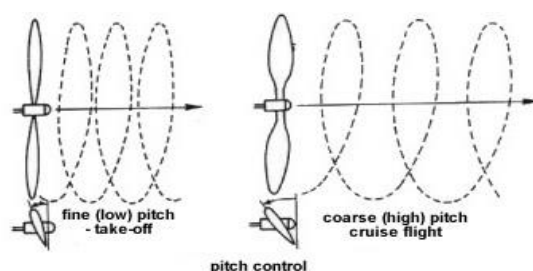
Kontsumoaren eta bulkadaren arteko oreka ematen dutenak. Multikoptero ertainetarako aproposa.

Propelak motor baten ipintzean, bere inguruko airea mugitzen dute. Mugimendu honekin, bulkada sortzen da. Propelak gero eta azalera handiagoa euki, gero eta aire gehiago mugituko dute, beraz, bulkada ere handituko da. Gauza bera gertatzen da eraso angeluarekin (Pitch), angelu hau gero eta handiagoa izan, bulkada gehiago sortuko da, izan ere airearen kontra propelaren azalera gehiago egongo da.

Eraso angelua definitzeko, hurrengo irudian oinarrituko gara.

Propelak bere ardatzan buelta oso bat biratzean egiten duen luzeera lineala.

Gero eta Pitch handiagoa izan, gero eta distantzia gehiago egingo du, eta gero eta aire gehiago mugituko du.

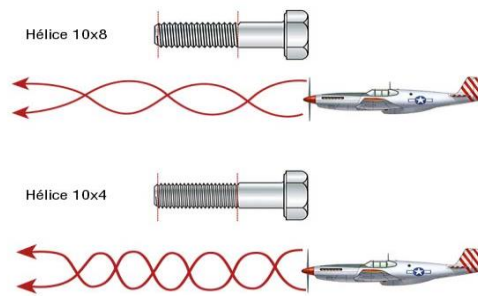


Irudi 39 Pitch angeluaren azalpen grafikoa (GoogleImages)

Propelen kodea hurrengoa da YYxWW, non:

YY---> Diametroa hatzbetetan

WW---> Pitch angelua. (Dronak sortzen duen plano horizontaletik, propelak duen malda).



Irudi 40 Kodifikazioaren araberako irudia (GoogleImages)

Behin propelen teoria jakinda, jakin behar da ze propel erabili multikoptero mota bakoitzarentzat.

Argi eta garbi, propeletan murrizpen nabarmenena tamaina da. Mikrodronean erabili ohi direnak oso txikiak dira, normalean 3 cm-koak dira, hazbete 1 ingurukoak.

Multikoptero txikietan, hauen egiturak 300mm ingurukoak direnez, propelen diametroa frame-a baino txikiagoa izan behar da, beraz, 6 hazbete baino txikiagoak izaten ohi dira.

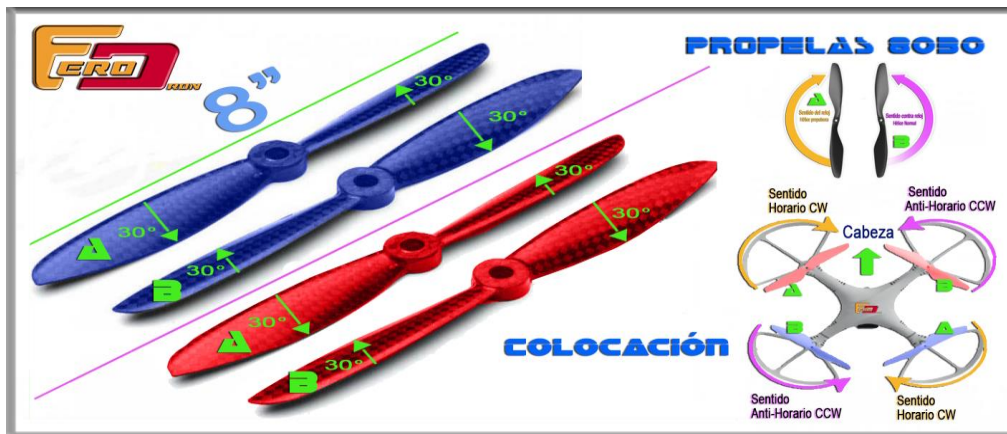
Multikoptero ertainetan, kontuan hartuta frame-aren tamaina 500mm-ko ingurukoak direla, 9 hazbetekoak erabiltzen dira.

Multikoptero handietan berriz, 12 hazbetekoak.

Pitch angeluaren balioa orokorrean multikopteroen tamaina guztietarako berdina da, 45° ingurukoa.

Pitch angeluaren posizioa dela eta, beste sailkapen bat egin daiteke.

Erlojuaren orratzen aldekoak (CW) eta erlojuen orratzen kontrakoak (CCW). Edozein egitura konfiguraziorientzat, propelaren goikaldea, biraketa norantzan egon behar da. Hurrengo irudian adibidez, A propel urdinaren biraketa norantza orduen aldekoa izan behar da, eta B propela, orduen aurka.



Irudi 41 CW eta CCW propelak (Fero)

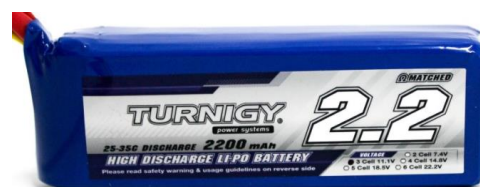
Horrela, propela biraraztean, aurkitzen duen airea beherantz bultzatzen du, eta multikopteroari gorakako bulkada emoten dio. Askotan arazo asko sortzen dira propel bat dagokion lekuan jarrita ez dagoelako, multikopteroaren desoreka larriak sortuz.

#### 5.5.4. Bateriak

Baterien funtzioa, multikopteroaren hornidura elektrikoa da. Multikopteroek osotzen dituzten gailuek energia elektrikoarekin funtzionatzen dute 3,5 eta 12 V bitartean. Gailu txiki hauek, bateria txiki batekin hornitu ahal dira, kontsumo txikia daukatelako.

Baina lehenago esan bezala, motorrak elektrikoak dira eta multikopteroek dauzkaten gailuen artean, korrante gehien kontsumitzen duteneak dira. Beraz, multikoptero osoa elikatzeko bateria elektriko handi bat erabiliko da.

Bateria bat aukeratzeko orduan, diseinatu nahi den multikopteroaren propietateei erreparatu behar da. Kontuan euki beharrekoak honako hauek izanda. ESC eta motorren lan tentsioa, kontsumitutako korrantea eta bateriaren dimentsioak eta pisua.



Irudi 42 Lipo bateria (HobbyKing)

Bateriak irudikoak bezala dira, eta hauen aurrekaldean jakin behar diren datuak agertzen dira.

- Tentsioa

Bateriaren tentsio maila ezagutzeko, eskumako behealdean dagoen laukia begiratu behar da. Hemen, merkatuan dauden tentsio maila desberdinak agertzen dira, eta batería horren tentsio maila markatuta agertzen da zirkulu beltz batez.

Tentsio maila zelda kopuruaren arabera ezartzen da. Zelda bakoitzak, 3,7V ditu, beraz, batería bat 3 zelda baditu, tentsio maila 11,1V izango da.

Kontuan euki behar da bateriek tentsio bakar bat emoten dutela, eta multikopteoren gailuek beste tentsio batekin elikatzeko, potentzia elektronikan oinarrituriko piezak erabili beharko direla.

Bada ere nomenglatura berezi bat bateriak erosterakoan. Nomenglatura honetan adierazten da bateriaren konfigurazioa, zenbat zelda dituen paraleloan (P) eta zenbat seriean (S). Bateria bi paraleloan jartzen direnean, emandako tentsioa batería bakoitzarena da, aldiz seriean jartzen badira, emandako tentsioa batería bakoitzaren gehiketa da. Oso garrantzitsua da paraleloan dauden baterien tentsioa berdina izatea.

Nomenglatura horrela agertzen da:

3S1P → Batería hiru zelda ditu seriean,

3S2P → Batería guztira 6 zelda ditu, bi zutabe paralelotan jarritako 3 zeldetan banatuta.

Lehenego adibideko bateriak, 11,1V eskeintzen ditu (3,7\*3) eta bigarren bateriak ere tentsio berdina eskeiniko du, vaina bi zutabe dituzenez, intentsitate gehiago elikatu ahalko du.

- Korrontea

Bateriak eskeini dezakeen korrontea denboraren menpekoa da eta mAh-tan emoten da. Bateria denbora gehiagotan lan egitea nahi bada, korronte gutxiago eskeiniko digu, eta alderantziz. Kasu honetan, batería hau 2200 mAh-koa da. Hau esan nahi du, ordu baten 2,2 A emoteko gaitasuna duela, 4,4 A ordu erdian etab.

Korrontearen kontsumoa hegaldiaren denboraren kontrola izango du. Demagun 10 A-ko 4 motor erabiliko ditugula. Guztien artean, 40-eko kontsumo bat eukiko dute. Bateriaren 2,2 A-ak zatitzen baditugu motorren eskaerarekin,  $2.2/40$ , 0,055 ordu ditugu, edo berdina dena, 3,3 minutu.

Korrontearen inguruan, beste datu bat euki behar da kontuan. Deskarga ratioa deritzo, eta baterian *discharge* bezala agertzen da. Bi balio agertzen dira, lehengengoa uneoro bateriak eman deakeen korronte kopurua da, eta bigarrena, segundo batzuetako unean emon dezakeen korronte kopurua. Kasu honetan, 25 da uneoroko balioa, eta 35 unekoa. Balio hauek, bateriaren mAh-ekin biderkatuta, uneoro eta une baten eskura daukaun korronte kantitatea da, kasu honetan, uneoro 55 A eta une baten 77 A.

- Bateria orekatua

Esan bezala, bateria mota hauek zelda desberdinak lotzean egiten dira. Zelda bakoitzak bere tentsioa era independente batean kargatzen ditu, beraz gerta daiteke bateria kargatzerakoan bateriaren zeldaren bat besteak baino lehen karga maximora heltzea. Hau gertatzean, kargadoreak energia jarraituko du emoten bateriari, beste zeldetan horaindik karga falta delako, baina baita energia ere emango dio kargatuta dagoeneko zeldari. Zelda honi sartutako energi extra hori, bero moduan kanporatzen du, energi gehiagorik ezin duelako barneratu, eta bereziki hau da bateria mota hauen arazorik handiena. Tenperatura igotzean, bateriaren forma konkontzen da, eta honen bizi-iraupena murrizten da.

Arrazoi honengatik gomendagarria da bateria kargadore bereziak erostea. Kargadore hauek, uneoro zelda bakoitzaren tentsioa biztaratzen ditu honen pantailan, gainera kargatzeko modu asko eskeintzen ditu. Modu hauen artean, karga orekatua egiteko dago, modu honetan kargadoreak kontrolatzen ditu zelden karga, eta baten bat karga osora heltzean, energi fluxua mozten dio.

- **LiPo bateria birziklatzea**

LiPo bateriak osagai kimikoak ditu barnean, eta ezin dira edonora ezta edonola bota behar ez direnean. Hurrengo pausuak bete behar dira.

1. Bateria deskargatu zelda bakoitak 2,5V euki arte
2. Ontzi baten, jarri ura eta gatza
3. Bateria sartu eta 24 orduz utzi
4. Bateria lehortu eta konprobatu zelden tentsioa nulua dela
5. Garbigune batera eraman

Bateria mota bi erabiltzen dira, ohikoa Lipo izenekoak, eta azken urteotan beste mota bat agertzen hari da, LiHV izenekoak. LiHV bateria berri hauen abantailak hurrengoak dira.

- Bizi iraupena

LiHV tentsio altuago baten lan egin dezakete, beraz, potentzia berdina garatzeko, korrante gitxiago erabiltzen du. Korrante gitxiago egoteak, barne temperaturaren jaitiera ekartzen du, eta garrantzitsua da, izan ere, litioaren lan eremua 0°C-tik 40°C-ra doa. Beraz, temperatura jaiztea, litioaren mantenua hobetzen du.

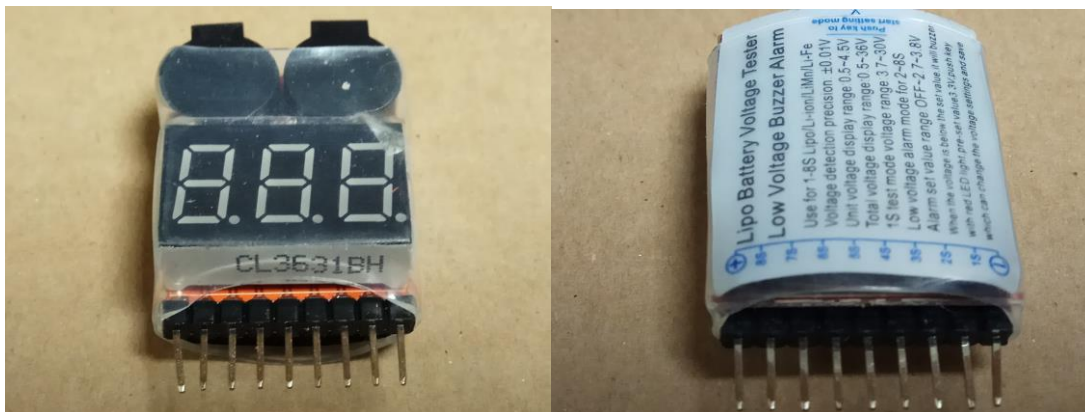
- Pisua

Bateria hauek konfiguratuta daude deskarga ratioa txikiagoa izateko, honekin bat bateriaren barnean material gitxiago egotea dakar, beraz, pisu gutxiago daukate.



Irudi 43LiHV (HobbyKing)

Bateriarekin batera, gomendagarri da bateria neurgailu bat erostea. Osagai hauek hatz baten tamaina dute, oso erosoak dira gainean eramateko, eta bateriaren karga totala zein partziala (zelula bakoitzekoa) ematen du.



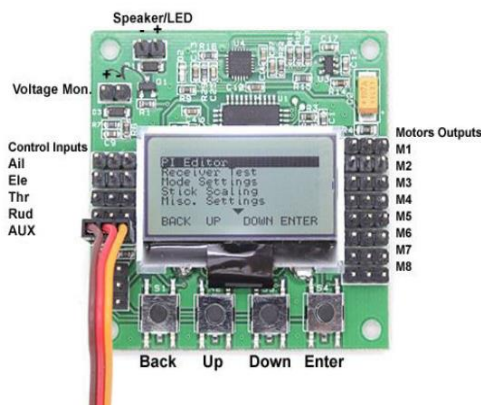
Irudi 44 LiPo bateriaren tentsio aztergailua

### 5.5.5. Kontrolagailua

Edozein makina, gailuren bat behar du bere funtzioak behar den moduan bete ditzan. Gailu hau, makinaren burmuina da, eta multierrotoretan kontrolagailua izeneko plaka erabiltzen da. Honi esker, multierrotorean dauden atal guztiak era analogiko batean kontrolatzeko gaitasuna ematen digu. [8]

Kontrol honen helburu nagusia, multierrotoreak airetik mugitzeko gaitasunean ikusten da. Airetik ibiltzeko gidariak bere urrutiko mandoarekin esaten duen bezala, kontrolagailuak seinale hori hartzen du, eta motor bakoitzari seinale bat bidaltzen dio uneoro ze abiadurarekin egon behar den esanez.

Motorren kontrolaz aparte, kontrolagailu batzuk posibilitatea emoten dute beste gailu batzuk kontrolatzeko. Adibidez, GPS, gimbal, orekatze sistema, datu bilketa etab.



Irudi 45 KK2.1 kontrolagailua (HobbyKing)

Funtzesko kontrolagailu batek, hurrengo sarrera eta irteerak behar ditu.

Sarreraren aldean, 4 pin behar ditu, altuera eta espazioko 3 biraketak ahalbidetzeko.

Irteeraren aldean, multierrotorearen beso kopuruaz beste irteera pin behar dira, pin bakoitzak motor bati joango delako. [9]

Irudiko ezkerreko aldean ikusten dira sarrerako 4 pinak, eta eskumaldean aldiz, irteerakoak. Irteeran 8 pin daudenez, octocoptero bat egin leike plaka honekin.

Kontrolagailu mota asko daude, sinpleenetatik, adibidez “KK” plakak, konplexuenera arte “ArduPilot”. Lehen motako plakak, programazio osoa eginda daukate, eta ardura bakarria hardware-a ondo konektatzea eta plakari “esatea” ze multierrotor mota erabilko den da. Gainera, nahiko extra gutxi onartzen dituzte, normalean ez daukate ez GPS-rik ez horrelako ezer.

ArduPilot motako plakak aldiz, naiz eta azken urteotan merkaturatzen ari diren programa batzuk barne programazioa errazteko asmoz, oraindik programatu behar da. Plaka hauen alderik honena, gailu asko onartzen dituela da, GPS, gimbal, konpas, sonar, LED...





komunikazioa ahalbidetzen du [11]. Erabilitako motorrak, 3 fasekoak dira, alternoak, eta kontrolagailuak igorritako seinalea korrante zuzeneko da. Beraz, ESC-ak bere barnean dituen elektronikako potentziaz baliatu, korrante zuzeneko seinalea, korrante alternoko bihurtzen du.

ESC bat aukeratzeko orduan, aurretik aukeratutako gailuetatik ateratako datuekin egiten da. Behin jakinda ze motor erabiliko den, eta zein izango den kontsumitutako balio maximoa, balio honi bider 1,10 egiten zaio. Balio berri honekin, ESC aukeratu ahal da.

Kontuan hartu behar da ea aukeratutako ESC-ak badaukan integratuta bateriaren tentsioa jeisteko ahalmena. Ahalmen hori Battery Elimination Circuit (BEC) emoten dio. Hala bada, ESC-ren kable estuenak 3 koloreko kableak eukiko ditu, aldiz, BEC ez badauka, bi kable besterik ez dira egongo



Irudi 47 BEC gabeko ESC (HobbyKing)



Irudi 48 BEC-dun ESC (HobbyKing)

Osagai hauek bi eratan aurkitu daitezke, motor bakar baterako edo motor anitzentzako.

- Motor bakarra

Mota honetako ESC-ak nahiko estuak dira, eta normalean, egituraren besoen behealdean instalatu daitezke. Itxura laukizuzenekoak dira, eta motor bakar bati lotuta daudenez, korrante gitxiago pairatzen dute, eta honen ondorioz ez dute tenperatura aldetik igoera handirik eukiko. Orekaren aldetik ere, oso interesgarriak dira, izan ere, esan bezala besoetan erraz jarri daitezke, eta besoak simetrikoki bananduta egonez gero, ESC-ek ez dute desorekatuko multikopteorea.

Badaukate desabantaila bat, eta konexioen aldetik dator. ESC bakoitza bateriari zuzenean konektatuta egon behar da, eta adibidez 4 besoko multierrotor batean, 8 kable eukiko dira, nahasteko erraza. Horretarako, distribuzio plakak erabiltzen dira, gauzak errazteko asmoz.

- Multimotor

Mota honetako ESC-ak lauki itxura daukate, eta normalean hauen tamaina handia da. Alde positiboak baditu, txukuntasunaren aldetik adibidez, sarrerarako bakarrik bi kable behar ditu (positiboa eta negatiboa), instalatzeko erraza da programazioaren aldetik, izan ere behin bakarrik programatu behar da. Kontuan euki motor bakarreko ESC-ak banan banan programatu behar direla, eta guztietan parametro berdinak sartzea ez da erreza.

Bestalde, matxuren aurrean inbertsio txarra da, izan ere edozein motorreko kableren bat apurtu ezker, ESC guztia aldatu beharko da. Gainera, motor askori elikatzen diotenez, gailu honen tenperatura nabarmen igotzen da. Orekaren aldetik ere bere murrizpenak ditu, izan ere ez da erraza izaten alako lauki bati leku apropos bat aurkitzea egituran.

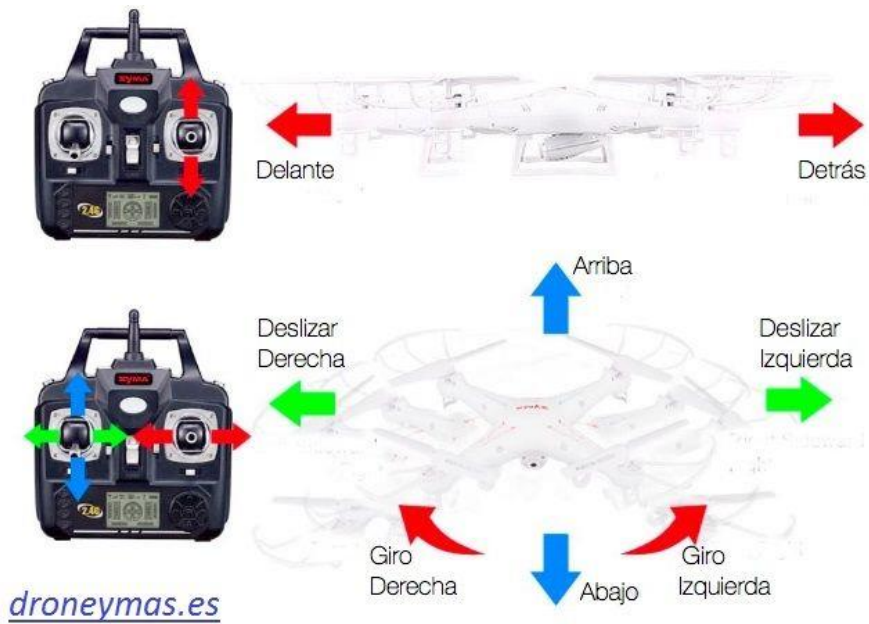
Mikrodronek ez daukate halako gailurik, izan ere erabilitako motorrak korrante zuzenekoak dira, eta erabilitako bateriekin zuzenean elikatu daiteke drone-aren elektronika osoa.

Multikoptero txikietatik gora, ezinbestekoa da halako gailuak erabiltzea. Txikietan adibidez, erabilitako motorrak intentsitate balio nahiko altuak dauzkate, 45 A ingurukoak, esan bezala, motor hauek abiadura oso handiak sortzen dituztelako. Multikoptero ertainek berriz, 10 A inguruko korranteak dauzkate, eta zama lanekoek aldiz, 5 A.

### 5.5.7. Urruti kontrola

Multikopteroa gidari gabeko gailua denez, gehien erabiltzen den metodoa multikopteroa kontrolatzeko, irrati seinaleen bidez funtzionatzen duen urruti kontrola da. Urruti kontroletik, multikopterora instrukzioak bidaltzen dira azken honek airetik nahi den bezala mugitzeko [12]. Horretarako, gaur egun 2.4 GHz-ko urruti kontrolak erabiltzen dira.

Urruti kontrolak sailkatzeko era, kanal zenbakien bidez da. Kanal bakoitzetik, agindu bat bidaltzen da, beraz multikoptero bat airetik mugitzeko behintzat urruti kontrolak 4 kanal behar ditu (Thrust, yaw, pitch, roll).



Irudi 49 Multikopteroaren mugimenduak

Lau agindu hauek bidaltzeko, urruti kontrolaren joystick-ak erabiltzen dira, eskuetako bi hatz lodietkin kontrolatzeko.

Irrati seinaleen barruan, hiru frekuentzia dira erabilgarrienak.

Kontuan izan behar da, urruti kontrolaren antenaren luzeera, erabilitako frekuentziarekiko alderantziz proportzionala dela. [13]

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

Non  $\lambda$  antenaren luzeera den,  $C$  argiaren abiadura eta  $f$  erabilitako irradi seinalearen frekuentzia.

Irrati seinaleetan irismena ere kontuan hartu behar da. Gero eta frekuentzia baxuago izan, gero eta irismen altuago lortuko da.

- 72MHz

Esan bezala, erabilitako antenaren luzeera, alderantziz proportzionala da irradi seinalearen frekuentziarekin, beraz 72MHz-eko seinaleak bidaltzeko, besteetan baino antena handiagoa erabili behar da. 299,792,458

$$\lambda = \frac{300000000}{72000000} = 4 \text{ metroko uhin luzeera}$$

Antenen ezaugarri geometrikoei esker, uhin luzeeraren laurdena behar dute irrati seinaleak bidaltzeko, beraz frekuentzia honetako seinaleak bidaltzeko metro bateko antena behar da. [14]

Frekuentzia honetako irrati seinaleen irismena hiruretatik altuena da, eta erabilitako modeloaren arabera distantziak aldatu daitezke, baina batz-besteko distantzia 4 kilometrokoa da.

- 2.4GHz

Irrati frekuentzia honekin, lortuko den antena tamaina eroso izango da erabileraren aldetik ikusta.

$$\lambda = \frac{300000000}{2400000000} = 0,125 \text{ metroko uhin luzeera}$$

Frekuentzia honetako irrati seinaleen irismena hiruretatik altuena da, eta erabilitako modeloaren arabera distantziak aldatu daitezke, baina batz-besteko distantzia kilometro batera ez da heltzen.

- 5GHz

Irrati frekuentzi honekin, antenarik txikiena erabiltzen da, aurrekoaren erdia gutxi gora behera.

$$\lambda = \frac{300000000}{5000000000} = 0,06 \text{ metroko uhin luzeera}$$

Frekuentzia honetako irrati seinaleen irismena hiruretatik altuena da, eta erabilitako modeloaren arabera distantziak aldatu daitezke, baina batz-besteko distantzia 500 metrokoa da.

Beraz, argi ikusten da 72MHz frekuentziako irrati seinaleak erosoak ez direla urruti kontrola erabiltzeko, baina hegaldi luzeak egin nahi eskero, hegazkin kontrolatuen kasuan adibidez, aukerarik honena da. [15]

Multikopteroen kasuan, bi irrati frekuentzien antenen luzeerek ez dute eragozpenik sortzen, beraz alde hau ez da muga bezala ikusten. Aldiz, irismenan bai ikusi daiteke alde dagoela, beraz horregaitik 2,4GHz-eko frekuentziak dira erabilienak.

Multikopteroa lurretik kontrolatzeko beste aukera batzuk ere badaude. WiFi eta Bluetooth seinaleen bidez aginduak bidali daitezke, edota GPS-ren biden kontrola daiteke.

- WiFi eta Bluetooth

Seinale hauek oso indartsuak dira, baina irismena oso mugatua dute. Bluetooth teknologia metro pare batzuetako irismena du, eta WiFi teknologia normalean ez ditu 50 metroak gainditzen. Beraz, irismen txikia dela eta, teknologia hauek ez dira erabiltzen multikopteroetan, baina mikrodronetan bai erabiltzen dira, hauen akzio eremua ere oso txikia delako.

- GPS

Teknologia hau esan daiteke irismen mugapenik ez duela. Baina GPS teknologia kontrolagailu guztiek ezin dute erabili. Normalean, hasiberrientzako kontrolagailuetan bakarrik irati seinaleak hartzen dituzte, baina kontrolagailu aurreratuetan (APM adibidez) GPS antena bat jarri daiteke. Honen bitartez, bai ordenagailu batetik zein Smartphone batetik, GPS konfiguratu daiteke nahi den ibilbidea ezarriz. Baina ibilbideaz aparte, altuera eta abiadura ezarri daiteke. Behin datuak kontrolagailuan sartuta, GPS-a espazioan dauden sateliteekin konektatzen da, eta haiei esker ezarritako aginduak betetzen dituzte. Gainera, sateliteei esker, internetera konektatzeko ahalmena duen edozein gailurekin multikopteroaren posizioa, abiadura eta altuera ikusi daiteke.

## 5.6. Teoria

Multierrotoreek hegaz egiteko gaitasuna daukate, baina zergaitik egin dezakete hegaz ez dago garbi. Honen inguruan teoria asko daude, baina ingeniari aeronautikoek ez dute aurkitu oraindik hegaz egiteak baimentzen duen teoriarik. Atal honetan, bi teoria azalduko dira. Esan bezala, hiru teoria hauek ez dira guztiz bikainak, baina airean zer gertatzen den ulertzeko balio dute.

### 5.6.1. Bernoulli

Daniel Bernoullik erakutsi zuen nola “fluido baten barne presioa murrizten da, fluido beraren abiadura gora egin heinean”, edo beste era batera esanda, “mugimenduan dagoen fluido baten, presioaren eta abiaduraren batuketa konstantea da fluido horren edozein puntutan”,  $P + v = K$ .

Edozein fluido idealetan (biskozitate gabe eta marruskadurarik gabe), konprimaezina, egoera laminarrean zirkuitu itxi batetik mugituz, fluidoak daukan energia konstante mantentzen da zirkuituaren zehar.

Testu hau, energiaren kontserbazioaren aplikazio zuzen bat da, beste era batera esaten da fluidoak ez badu energiarik trukutzen kanpoaldearekin, energia konstante mantentzen da.

Teoremak, bakarrik hartzen ditu kontuan fluidoak bere ibilbidean zehar alda dezakeen energiak. Hauek hurrengoak izanik; energia zinetikoa, energia potentziala eta fluxupeko presioaren energia (hidroestatika).

Energia zinetikoa (Hidrodinamikoa)      Fluidoaren abiadura       $0.5 * m * v^2$

Energia potentziala      Fluidoaren altuera       $m * g * h$

Fluxu energia (Hidroestatikoa)      Fluidoaren presioa       $p * V$

Non “*m*” masa, “*v*” abiadura, “*g*” grabitate indarra, “*h*” fluidoaren altuera, “*p*” presioa eta “*V*” fluidoaren bolumena hurrenez hurren.

Beraz, Bernoulliren ekuazioa hurrengo da.

$$\frac{1}{2} * m * v^2 + m * g * h + p * V = Kte$$

Hurrengo irudian aplikatuz, 1 eta 2 puntuen artean:

Zirkuitu itxia eta altuera berdina izanik, energia potentziala deuseztatzen da. Baita *V* ere, izan ere fluido konprimaezina da. Termino guztiak bolumenarekin zatituz, Bernoulliren formularen adierazpen ezagunagoa lortzen da.

$$\frac{1}{2} * \rho_1 * v_1^2 + \rho_1 * g * h_1 + p_1 = \frac{1}{2} * \rho_2 * v_2^2 + \rho_2 * g * h_2 + p_2$$

Fluidoaren altuera berdinean dagoenez, energia potentzialaren adierazpenak deusestazen dira. Orduan, Bernoulliren ekuazioa hurrengo eran gelditzen da.

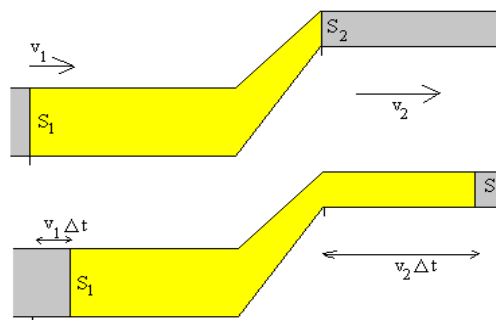
$$\frac{1}{2} * \rho * v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} * \rho * v_2^2 + p_2$$

Beraz, fluido berdina izanik,  $\rho$  dentsitate berdina da, eta ekuazioan alda daitezkeen aldagaiak abiadura eta presioa dira. Horrela, hasieran azaldutako teorema frogatzen da, eta askotan erabilitako ekuazioa lortzen da.

Suposatuz, 1 ingurunearen presioa 2 ingurunearen presioa baino altuagoa dela.

$$\Delta p = \frac{1}{2} * \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Kontuan izateko beste propietate bat, jarraitutasuneko ekuazioa da. "Fluido bat diametro aldakorreko hodi batetik jariatzen dagoenean, bere abiadura aldatzen da zeharkako azalera aldatzen denean".



Irudi 50 Jarraitutasunaren grafikoa (EHU)

Kontuan hartuz fluidoaren alde horia hodiaren zehar,  $t$  eta  $t+dt$  momentu baten hurrengoa adierazi daiteke.

Hasierako  $dt$  tarte batean, hodiaren behealdaren  $S_1$  azalera eskumarantz mugitzen da  $Dx_1=v_1Dt$ . Mugitutako fluidoaren masa hurrengoa da.

$$\partial m_1=\rho \cdot S_1 \partial x_1=\rho S_1 v_1 \partial t.$$

Berdin eginez, hodiaren goikaldeko  $S_2$  azalera eskumarantz mugitzen da  $Dx_2=v_2Dt$  dt tartean. Mugitutako fluidoaren masa hurrengoa da.

$$\partial m_2=r S_2 v_2 \partial t.$$

Fluido egonkorra denez,  $dt$  tartean  $S_1$  azaletatik zeharkatzen den masa,  $S_2$  azalera zeharkatzen duen masa berdina izan behar da denbora tarte berdinean.

Beraz, hurrengo berdinketa egin daiteke.



$$\rho S_1 v_1 \partial t = \rho S_2 v_2 \partial t.$$

$\rho$  dentsitatea eta  $dt$  denbora tarte berdinak izanik, deuseztatzen dira, orduan ekuazioa hurrengo eran geratzen da.

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Azken hau, jarraitutasun ekuazioa deritzo. Ekuazio honek adierazten du bi puntutako abiadura eta azaleraren erlazioa. Puntu bateko azalera, besteara baino altuagoa bada, bestearen abiadura lehenengoarena baino altuagoa izango da.

Azaldutako bi propietateak kontuan hartuz, Bernoulliren ekuazioa eta jarraitutasunaren ekuazioa, bi punturen arteko azalera diferentzia, abiadura diferentzia bat ekartzen du, eta honek, presio aldaketa dakar. Horren adierazpen grafikoa hurrengo irudian ikus daiteke, non bi puntuen arteko presio diferentziak ikusten diren bertikalki dauden tutu estuetan.

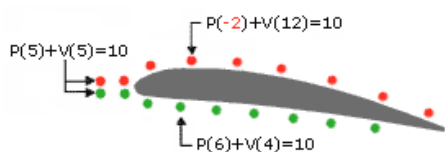
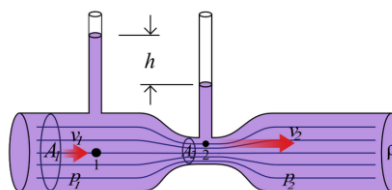
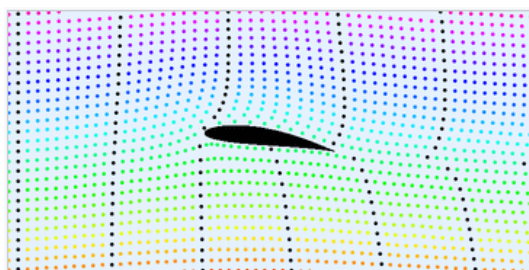


Fig.1.2.1 - Teorema de Bernoulli.



Irudi 51 Aire partikulen abiadura eta presioa Irudi 52 Presio diferentzia abiaduraren menpe (Wikipedia)

Bernoulli-ren ekuazioak hegazkinen portaera azalduko luke, baldin eta hegalaria heltzen diren aire partikulak, hegalararen amaieran elkartuko balira, baina hori ez da horrela gertatzen.



Irudi 53 Aire partikulen ez-jarraitutasuna (Wikipedia)

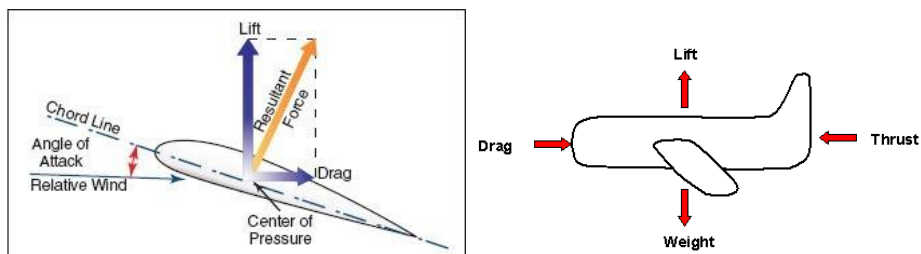
Irudi honetan, aire partikulak ikusten dira hegal profil baten aurka. Hegalari jo baino lehen, aire partikulak batera daude, baina hegala hasi eta berehala, partikulen arteko

posizio erlatiboa aldatzen doa, eta hegala amaiera heltzean, ez dira batera ateratzen [16]. Beraz, honek jarraitutasunaren ekuazioa ez dela betetzen adierazten du.

Hau guztiz ez betetzeak, ez du esan nahi Bernoulli-ren ekuazioa ez duela zer ikusirik euste indarrean, baizik eta honek ez duela euste osoa bermatzen. Euste osoa bermatzeko, beste ekuazio bat dago, Newtonen 3. Legea alegia.

### 5.6.2. Newtonen 3. Legea

Newtonen 3. Legea, akzio erreakzioaren legea deritzo, hau da, edozein akziok, modulu berdineko eta norantza desberdineko indar bat sortzen du. Honetan oinarrituz, hegalean finkatzen bada errefentzi sistema, aireak hegala indar batekin joko luke hegala aurrera egin ahala. [17]

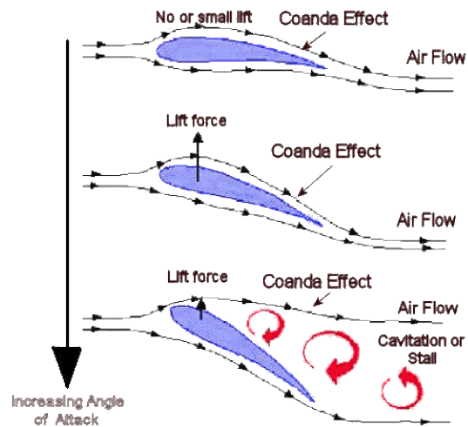


Irudi 54 Hegazkin beten agertzen diren indarrak (GoogleImages)

Aireak hegalean jotzen du eta beherantz desbideratzen da, beraz akzio erreakzioan oinarrituz, indar erresultante bat agertuko da hegala goiko aldean. Angeluen arabera, indar erresultantea bertikalagoa edo horizontalagoa izango da, gero eta bertikalagoa izan, gero eta euste gehiago sortuko du. Irudiaren azalpena bukatzeko, drag-aren kontzeptua azaldu behar da. Drag-a hegazkinak sortzen duen erresistentzia da, zein gehien bat motorrek sortutako indarrekin orekatzen den.

### 5.6.3. Koanda efektua

Koanda efektua, fluido batek azalera biribilkatuetatik igarotzean agertzen den fenomeno da. Hau gertatzerakoan, fluidoak azaleraren norabidearen bidea hartuko du. Bide hau jarraituz, hegala amaieran fluidoak beheranzkako norantza jarraituko du, indar bertikal bat sortuz. Akzio erreakzio oinarria jarraituz, modulu berako eta kontrako norabideko indar bat sortuko da, eustea agerrarasiz.



Irudi 55 Koanda efektua eraso angeluaren menpe (Wikipedia)

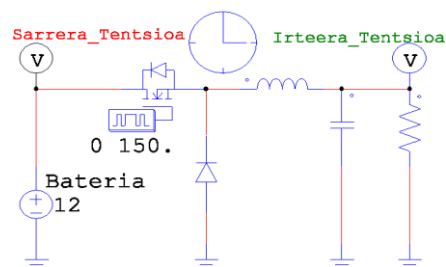
Baina kontuan euki behar da azken irudiko portaera. Baliteke irteera angelu batera heltzea, zeinetan turbulentiak agertzen diren, eta euste indarrak ia desagertzen diren.

#### 5.6.4. Buck zirkuitua

ESC-aren funtzioetariko bat, bateriaren 12V-ak kontrolagailuarentzako 5V-tetan bihurtzea da. Horretarako, buck zirkuitu bat erabiltzen da. Zirkuitu honek kondentsagailu bat, haril bat, diodo bat eta mosfet bat dauka. Hurrengoko eskeman bezala muntatuta dago.[18]

Zirkuitu hau, mosfetaren eraginaren ondorioz, bi modu dituela esan daiteke (On/Off), hau da, bi zirkuitu desberdinetan deskonposa daiteke, eta bakoitzaren ekuazioak lortuz, zirkuitu osoaren emaitza lor daiteke.

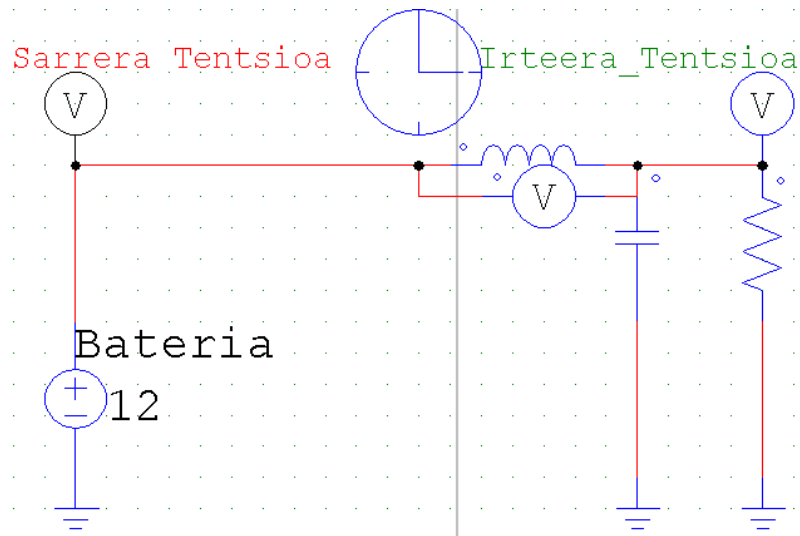
Izan bedi  $V_{DC}$  bateria,  $V_L(t)$  eta  $i_L(t)$  harilaren tentsioa eta intentsitatea,  $V_C(t)$  eta  $i_C(t)$  kondentsagailuaren tentsio eta korronea eta  $R$  kargaren balioa.



File:	Buck2500.cir
Designed by:	ANSI/PS/IEEE
Created on:	1/1/2016
Page:	1 of 1

Irudi 56 Buck zirkuituaren eskema Psim programas eginda

## Mosfet Off



Irudi 57 Mosfeta itzalitako eskema

Mosfeta itxita dagoenean, diodoak ez du korronteirik garraiatzen, beraz goi aldeko tentsioa handiagoa da behe aldekoa baino. Gauzak horrela, bateriatik irteerara korrontea agertuko da.

Kirchhoff-en bigarren legea erabiliz irudiko sisteman.

$$V_L(t) = V_{DC} - V_C(t)$$

Kirchhoff-en lehenengo legea erabiliz irudiko sisteman.

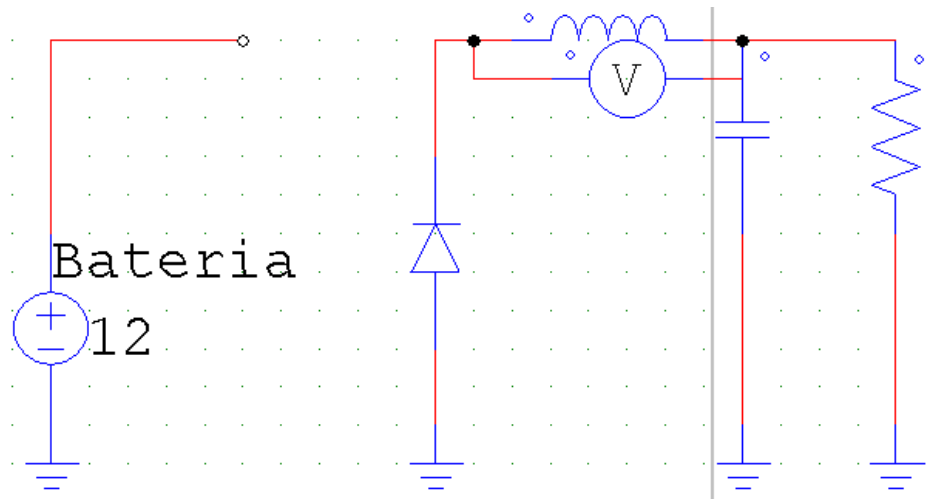
$$i_L(t) = i_C(t) + \frac{V_C(t)}{R}$$

Lortutako ekuazioa moldatuz.

$$i_C(t) = i_L(t) - \frac{V_C(t)}{R}$$

Lortutako ekuazioak, mosfeta itxita dagoeneko momentuak definitzen ditu elektrikoki.

## Mosfet On



Irudi 58 Mosfeta piztutako eskema

Mosfeta zabalik dagoenean, sistemak jasotzen duen tentsioa kondentsadoreak ematen dio. Kasu honetan, goiko aldeko tentsioa behe aldekoa baino baxuagoa da, eta honen ondorioz diodoa korrontea garraiatzen du. Gauzak honela definituta, hurrengo ekuazioak lortzen dira.

Kirchhoff-en bigarren legea erabiliz irudiko sisteman.

$$V_L(t) = -V_C(t)$$

Kirchhoff-en lehenengo legea erabiliz irudiko sisteman.

$$i_C(t) = i_L(t) - \frac{V_C(t)}{R}$$

Jada ezarri ditugu bi sistemen ekuazioak, horain bien artean bete behar dituzten ezaugarriekin, buck zirkuituaren erantzunak lortuko dira.

Alde batetik, harileko tentsioaren batazbestekoa periodo baten nulua izan behar da ( $\langle V_L \rangle = 0$ ). Izan ere, harilkatu baten intentsitatea handitzen da bere tentsioaren integralarekin, hau da, tentsioaren gehiketa denboran zehar positiboa izango da, baldin eta periodo bateko batazbesteko tentsioa zero baino handiagoa bada, eta honen integrala positiboa bada (edo negatiboa), korrontearen balioa gora (edo behera) egingo du balio arriskutsuak lortu arte.[19]

$$\Delta i_L(t) = \frac{1}{L} \int V_L dt$$

Beraz, Buck zirkuituaren bi moduen tentsioak ditugunez, hauen batzbestekoa nulua izan behar da.

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt ; V_L = V_{DC} - V_C(t) + (-V_C(t))$$

Sistemaren bi tartek definitzeko,  $T$  eta  $T_{on}$  erabiliko ditugu. Zeinetan  $T_{on}$  mosfeta itxita dagoeneko denbora den, eta  $T$  mosfeta itxita eta zabalik dagoeneko denbora, periodo osoa.

$$\frac{1}{T} \left[ \int_0^{T_{on}} (V_{DC} - V_C(t)) dt + \int_{T_{on}}^T (-V_C(t)) dt \right] = 0$$

Integral hau garatuz, hurrengo emaitza lortzen da.

$$V_C(t) = \frac{T_{on} * V_{DC}}{T}$$

Definituz  $D$  duty time, mosfeta itxita dagoeneko denbora eta periodoaren arteko erlazioa bezala.

$$V_C(t) = D * V_{DC}$$

Lortutako ekuazio honek adierazten digu zenbatekoa izan behar de mosfetaren lan frekuentzia batera baten tentsioa jakinik eta irteerako tentsio bat jasotzeko.

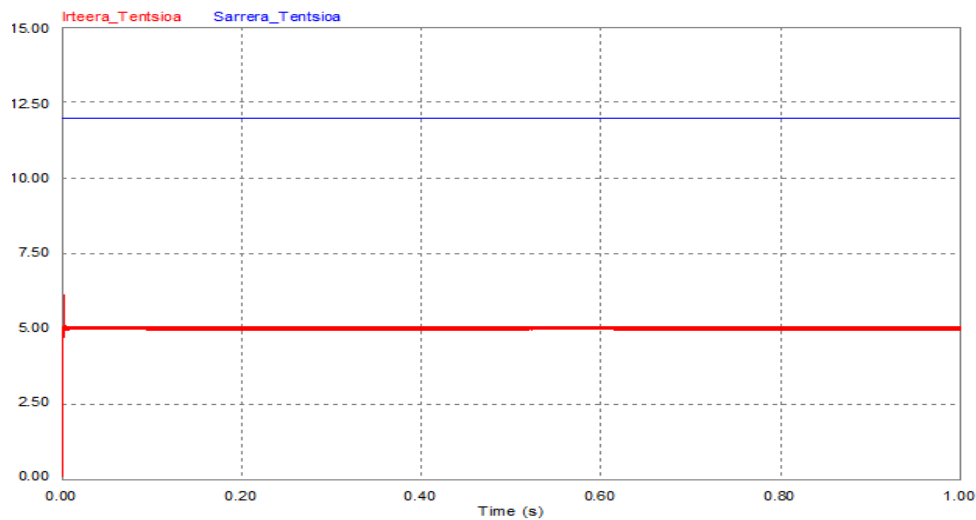
$V_C(t)$  → Irteera tentsioa

$V_{DC}$  → Sarrera tentsioa

$D$  → Duty time

Beraz,  $V_{DC}$  bateriaren 12V-ak direlarik eta kontrolagailuan 5V nai direnez,  $D$  duty cycle 0.416 da.

$D$  mosfeta piztuta dagoen denbora portzendaia da, hau da, mosfetaren frekuentzia 1 Hz-ekoa bada, 0.416 segundu ON egongo da, eta 0.583 segundu OFF.



Irudi 59 Buck zirkuituaren sarrera eta irteera tentsioak

Buck zirkuituak egindako lana, bariadore lineal batek ere egin dezake. Baina osagai honek, arazo handi bi dauzka, potentzi galera handiak ditu eta potentzi hau bero bidez kaleratzen duela.

Hurrengo grafikan ikusi daiteke bariadore lineal eta buck zirkuitu baten diferentziak karga tentsio konstante baterako eta batera tentsio desberdinetarako. Ikusten da nola sarrerako tentsioa gora egin ahala, potentziaren galera handitzen dela errendimendua nabarmen gutxituz, eta honekin batera osagaiko temperatura nabarmen igoko da.

Potentzia galera honen sorrera bariadore linealaren funtzionaltasunean dago. Tentsio aldaketa egiteko, erresistentzi bat erabiltzen du eta erresistentzia baten potentzi galera bere tentsio aldaketa eta korrontearen menpe da. Beraz, gero eta tentsio aldaketa euki, gero eta potentzi gehiago xahutuko du.

BEC voltage: 6 Volts  
 BEC load: 3 Amps

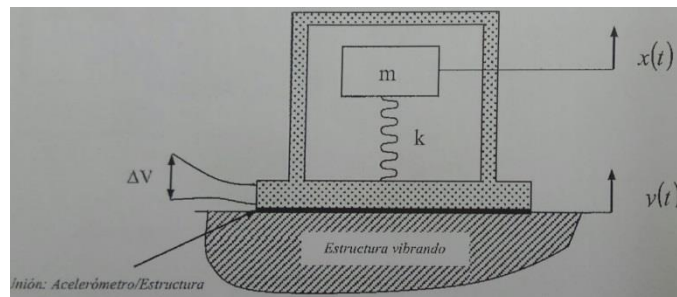
Battery Voltage	Linear BEC			Switching BEC		
	Battery Current	Wasted Power	Efficiency	Battery Current	Wasted Power	Efficiency
2s lipo (7.4v)	3A	4.2w	81.0%	2.797	2.7w	~85%
3s lipo (11.1v)	3A	15.3w	54.0%	1.865	2.7w	~85%
4s lipo (14.8v)	3A	26.4w	44.4%	1.399	2.7w	~85%
5s lipo (18.5v)	3A	37.5w	32.0%	1.119	2.7w	~85%
6s lipo (22.2v)	3A	48.6w	27.0%	0.954	2.7w	~85%

Irudi 60 Bariadore lineal eta buck zirkuituaren arteko konparaketa (Wikipedia)

### 5.6.5. Azelerometroa

Azelerometroak, edo transduktoreak, osagai mekanikoak dira zeintzuk solidarioki jartzen dira aztertu nahi denaren gainean [20]. Osagai honek aldagai mekaniko bat seinale elektriko bihurtzen du. Osagai hauek posizioak, abiadurak eta azelerazioak neurtzeko gaitasuna ditu.

Azelerometroak 3 osagai nagusi ditu. Oinarria solidarioki hitzatzita sistema bibranteari, elementu piezoelektrikoa eta masa txiki bat. Elementu piezoelektrikoak kuartzoko kristalak dira, zeintzuk haien bi aurpegien artean tentsio diferentzia bat sortzen duten tentsio mekaniko bat jasotzean. Mekanikako ikuspuntutik, esan daiteke malguki baten portaera daukala. Sistema mugitzerakoan, masaren inertziak kristalentan akzio bat eragiten du.



Irudi 61 Azelerometroaren modelizazioa (EHU-Mekanismos)

Izan bedi  $x(t)$  azelerometro barneko masaren tokialdaketa absolutua, eta  $y(t)$  aztergai dagoen sistemaren tokialdaketa absolutua azelerometroa kokatzen den puntuan. Notazio honekin, eta suposatuz azelerometro eta sistemaren arteko konexioa perfektua dela, bibrazio txikietan oinarritutako ekuazioak planteatu daitezke.

Lehenengo ekuazioa,  $m$  masaren mugimendu ekuazioa da. Bibrazio askeak motelgarritasunik gabe.

$$m * \ddot{x}(t) + k * [x(t) - y(t)] = 0$$

Bi aldeetan  $-m * \ddot{y}(t)$  terminoa gehituz, malgukiaren desplazamenduaren ekuazioa lortzen da.

$$m[\ddot{x}(t) - \ddot{y}(t)] + k[x(t) - y(t)] = -m * \ddot{y}(t) \quad (1)$$

Non  $z(t) = x(t) - y(t)$ , malgukiaren desplazamendua.

$$m * \ddot{z}(t) + k * z(t) = -m * \ddot{y}(t) \quad (2)$$



Material piezoelektrikoen karakteristiketan oinarrituz, esan daiteke sortutako potentzial diferentzia proportzionala dela malgukiaren indarrari.

$$\Delta V \sim k * z(t)$$

Izan bedi  $y(t)$  sistemaren mugimendua, hurrengo armonikoaz sortutakoa.

$$y(t) = Y * \sin(\bar{\omega} * t)$$

Bi aldiz deribatuz, eta (1) ekuazioan ordezkatzuz, hurrengoa lortzen da.

$$m * \ddot{z}(t) + k * z(t) = m * \bar{\omega}^2 * Y * \sin(\bar{\omega} * t)$$

Indar armonikoak sortutako erantzuna motelgarritasunik gabeko sistema batean hurrengo da.

$$x(t) = \frac{f_0}{k} * \frac{1}{1 - \beta^2} * \sin(\bar{\omega} * t)$$

Non  $f_0$  indar armonikoaren modulua den,  $k$  malgukiaren konstante elastikoa eta  $\beta$  indar armonikoaren eta frekuentzia naturalaren arteko erlazioa.

$$z(t) = \frac{m * \omega^2 * Y}{k} * \frac{1}{1 - \beta^2} * \sin(\omega * t) = Z * \sin(\bar{\omega} * t)$$

Beraz, tokialdaketaren anplitudea hurrengoa da.

$$Z = \frac{m * \bar{\omega}^2 * Y}{k} * \frac{1}{1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\omega}\right)^2}$$

Non  $\omega$  frekuentzia naturala den, hurrengo ekuazioatik aterata.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Funtzionamendu ona bermatzeko baldintzetan oinarrituz,  $\omega \gg \bar{\omega}$ , beraz modulua horrela gelditzen da.

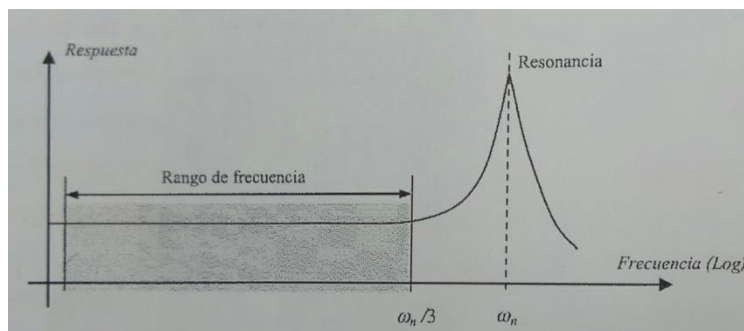
$$Z \approx \frac{m * \bar{\omega}^2 * Y}{k}$$

Modulua hau (2) ekuazioan ordezkatur.

$$\Delta V \propto k * z(t) = m * \bar{\omega}^2 * Y * \sin(\bar{\omega} * t) = -m * \ddot{y}(t)$$

Azkenengo ekuazio honetatik, esan daiteke transduttorearen sinale elektrikoa proportzionala dela sistema bibrantearen azelerazio absolutuarekin.

Neurketak balizkoak izan daitezen, frekuentzia eragingailuek azelerometroaren frekuentzi naturaletik urrun egon behar dira. Beraz, azelerometro baten funtzionamendu egokia bermatzeko, honen parametroen ezagutza ezinbestekoa da. Hurrengo irudian erakusten da zein tartetan eraginkorra den azelerometroa. Tarte hori, frekuentzia naturalaren lehen herenean kokatzen da.

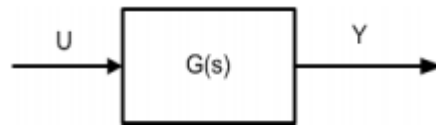


Irudi 62 Azelerometroaren funtzionamendu tarte (EHU-Mekanismos)

### 5.6.6. PI kontrola

Sistemak kontrolatzerako orduan algoritmo matematikoak erabiltzen dira. Multikoptero sinpleetan erabiltzen diren algoritmoak, PID motakoak dira. Kontrolagailu hauek, multikopteroaren kontrolagailuak espazioko ardatz bakoitzerako kontrol algoritmo bat dauka, bermatzeko urrutiko kontroleratik bidalitako agindua multikopteroak behar bezala betetzen duela.

Multikopteroek deskribatzen dituzten mugimenduak automatikako ikuspuntutik, sarrera baten aurrean sistema dinamiko batek duen erantzuna da.



Irudi 63 Sistema ez berreikatua

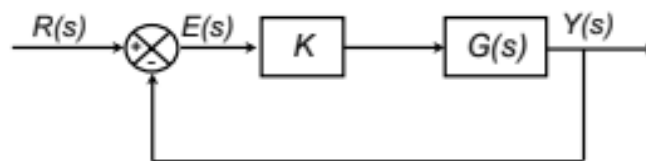
$U = \text{Sarrera}$

$G(s) = \text{Sistemaren dinamika}$

$Y = \text{Erantzuna}$

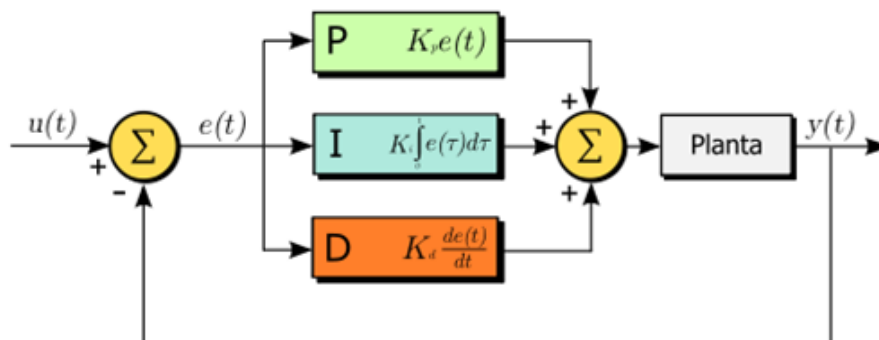
Sarrera, urruti kontroletik bidalitako seinaleak dira, sistemaren dinamika multikopteroaren ezaugarri bat da, eta erantzuna multikopteroak sarrera sistemaen dinamikan duen emaitza.

Horrelako sistema batek, eragozpen bat dauka. Erantzunak duen balio ezin daiteke ziurtatu sarrerakoa izango denik, sistemaren dinamikaren menpe dago. Hau ekiditzeko, sistema berreikatuak erabiltzen dira. Sistema hauek, irteerako balio hartzen dabe, eta sarrerako seinalearekin konparatzen du.



Irudi 64 Sistema berreikatua

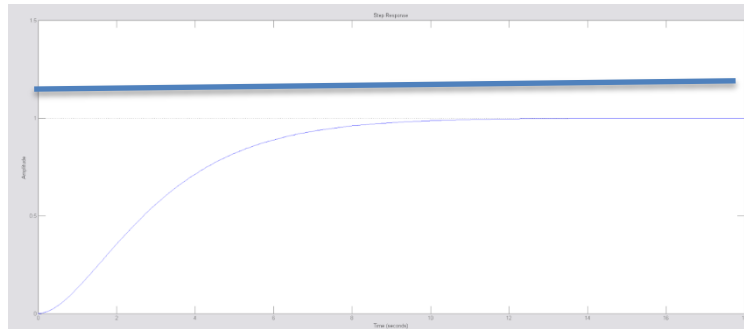
Sistema honi, sistema berreilatua deritzo, zeinatan kontrolagailu bat  $K$  erabiltzen dan sarrerako eta irteerako arteko seinaleen kenketa (errorea) manipulatzeko. Kontrolagailu anitz daude, baina erabilienak hiru akzio hauek dira. Akzio proportzionala ( $P$ ), integrala ( $I$ ) eta deribatiboa ( $D$ ) (kontrolagailu askotan  $D$  akzioa ez da erabiltzen, horregaitik ez da azalduko). [21]



Irudi 65 PID sistema berreikatua

## Proporzionala

Akzio honen bidez, erantzunaren forma aukeratzen da. Erantzun hau, P akzioa handitzean daukan lehenengo eragina, erantzunaren abiadura bizkortzea da, hau da, sistemak puntu batetik beste batera igarotzeko denboraren murrizpena dakar.

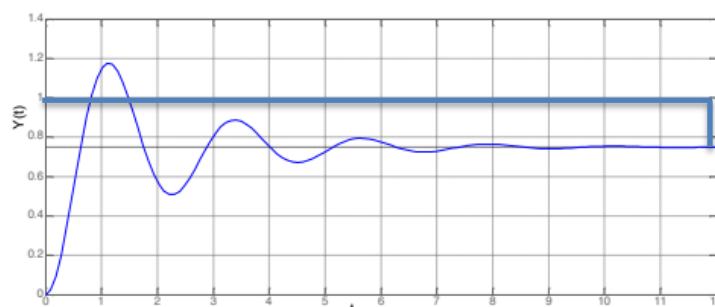


Errorea

Irudi 66 P akziodun sistema berrelikatua (errorearekin) (EHU-Automatika)

Irudi honetan urdinez adierazten da sistema baten erantzuna denboran zehar. Grafikoaren endialdean esan daiteke erantzuna bere azken baliora (balio egonkorra) heldu dela. P akzioa igotzerakoan, lortuko den grafikoa oso antzekoa da, baina azken balioa azkarrago agertuko da.

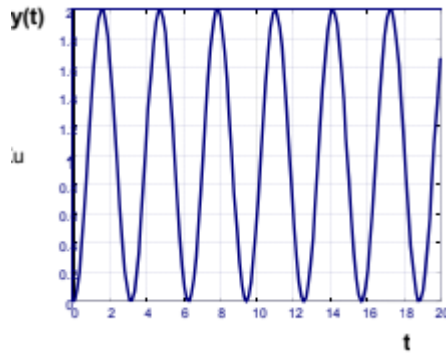
Ezin daiteke P akzioa nahi beste igo, izan ere balio batetik aurrera gaindipena agertzen da. Gaindipenaren fenomenoak, fisikoki oszilazio txiki batzuekin konpara daiteke. Adibidez erantzuna angelu bat bada, amaierako angelua lortu arte, alboko angelutetatik ibiliko da orekatu arte.



Errorea

Irudi 67 P akziodun sistema berrelikatua gaindiketa errorearekin (EHU-Automatika)

Baite ere, P akzioa gehiegi igotzen baldin bada, sistema ezegonkortzeko arriskua dago. Sistema ezegonkor batek ez du inoiz erantzun orekatu bate emango. Hurrengo grafikoan ikusten da sistema kritikoki egonkor bat. Sistema hau erantzun oszilakor bat emango du denboran zehar, inoiz orekatu gabe.



Irudi 68 Sistema kritikoki egonkorra (EHU-Automatika)

P akzioaren beste muga bat dago, sistemaren asetasuna. Sistemek funtzionamendu mugak dituzte, adibidez izan bedi sistema bat zeinetan jasan dezakeen seinale altuena 10V-koa den. Demagun errorea 2-koa dela, eta akzio proportzionala 6-koa. Hauen biderketa 12V izango da, beraz sistema erretzeko arriskuan egongo litzake.

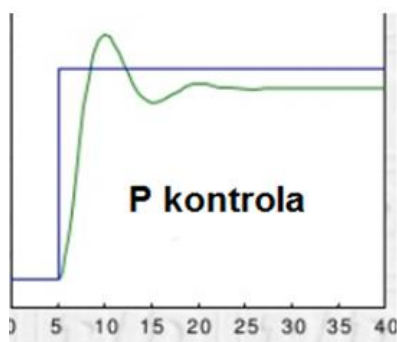
### Integrala

Kontrol mota honek, sistemaren errorea nulua izan arte eragiten egongo da, honen adierazpide matematikoa hurrengo izanik.

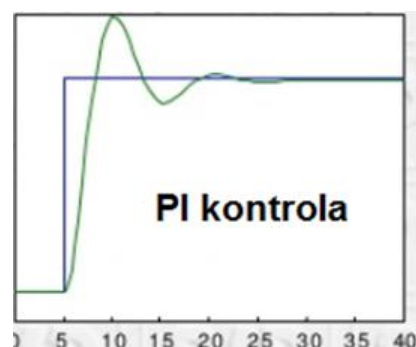
$$u(t) = \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt$$

Zenbat eta  $T_i$  handiago izan, sistemak errorea azkarrogo kenduko du, baina kontuz ibili behar da, izan ere sisteman oszilazioak ager daitezke  $T_i$  balio batetik aurrera.

I akzioa bakarrik erabiltzen bada, sistemaren erantzuna oso motela izaten da, beraz askotan P akzio proportzional batekin batera erabiltzen da, PI kontrolagailu bat erabiliz.



Irudi 69 P kontrola (EHU-Automatika)



Irudi 70 PI kontrola (EHU-Automatika)

Irudietan daukagu sistema baten sarrera (marra zuzena) eta honen erantzuna (marra oszilakorra). Ikus daiteke nola P kontrola erabilia, ez den heltzen sarrerak eskatutako baliora, errore bat sortuz. Aldiz, PI kontrola erabilia, sarrerak eskatutako baliora heltzen da, I akzioak errorea kenduz.

### PI kontrolagailua sintonizatu

$$u(t) = K_c[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt]$$

Multikopteroak sintonizatu daitezke nahi bezala, desiratutako erantzunak emon dezaten. Multikopteroaren ardatz mugimendu bakoitzeko (yaw, pitch eta roll) PI kontrol bat dago, beraz guztien parametroak konfiguratu ahal dira.

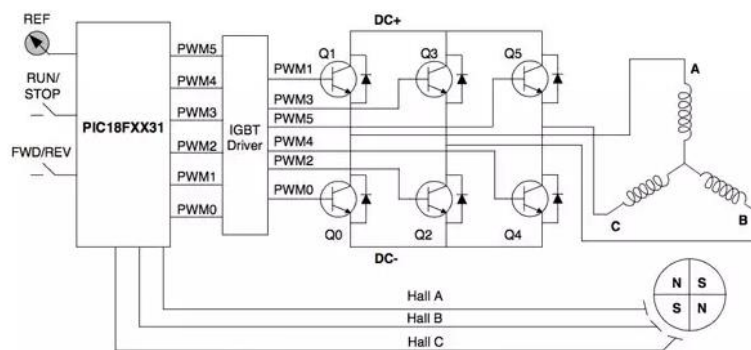
Sintonizazioa egiterakoan, ardatzak banan banan konfiguratko behar dira. Beraz, hiru ardatzetatik bat aukeratu eta P akzioetik hasi behar da, I akzioa nulua izanik. Puntu honetan, P akzioaren balio baxu bat jartzen da, eta multikopteroaren portaera aztertzen da aukeratutako ardatzan. Ikusten bada horaindik urruti kontroleko aginduetara motel erantzuten duela, P akzioa gehiago igo behar da. Pausu hauek errepikatu behar dira, multikopteroaren erantzun denbora apropos batera heldu arte, beti ere oszilazioak agertzen ez diren elean. Gogoratu multikopteroak hiru mugimendu dituela, beraz pausu hauek beste bietan ere egin behar dira, mugimendu bakoitzeko P akzioa nahi den bezala egon arte.

Behin P akzioa ezarrita, I akzioarekin hasiko da. Gogoratu, akzio integralaren eragina errorearen deuseztapena dela. Hurrengo pausu berdintsuak jarraituko dira, lehenengo hiru ardatzetatik bat aukeratu eta P akzioa aukeratutakoarekin, I akzioa balio baxu baten jartzen da, eta apurka apurka igotzen da multikopteroaren portaera aztertuz. I akzioa sartutakoan, multikopteroak ez du errorerik eukiko, beraz aztertu beharreko parametroa denbora da. I akzioa igoko da nahi den denbora lortu arte, beti ere multikopteroak oszilazioak agertzen ez diren elean. Oszilazioak agertzerakoan I akzioa ideala gainditu dela esan nahi du, beraz jeitsi beharko litzateke oszilazioak desagertu arte.

Prosezu hau hiru ardatzekin egingo da, banan banan lehenengo P akzioa konfiguratuta eta gero I akzioa. Kontuan euki behar da hiru ardatzak konektatuta daudela, beraz ardatz bat konfiguratzean, beste ardatzetan egindako konfigurazioa zahartuta gelditzen da, parámetro berri hauek ez zituztelako konfiguratzerakoan. PI kontrolagailu batekin aldaketa hauek ezin dira guztiz deuseztatu, beraz multikopteroaren hegalaldia ez da guztiz leuna izango, baina kontrolagailu honek naiz eta aldaketa hauen erruz oszilazio txiki batzuk sortu, hegaz egiteko eragozpenik ez da.

### 5.6.7. Motorren funtzionamendua

Multikopteroetan erabilitako motorrak, brushless motakoak dira. Motor mota hau trifasikoa da, baina multikopteroaren elikadura monofasikoa da (bateria). Bien arteko lotura, potentzia elektronikak egiten du eta multikopteroaren ESC-aren barnean agertzen da. Lotura honetan, motorraren kontrola ere gauzatzen da, hurrengo eskemaren arabera. [22]



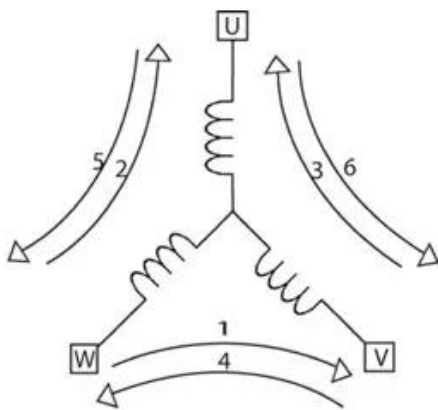
Irudi 71 Motorra kontrolatzeko eskema (Electronoobs)

Motorra eskumaldean irudikatuta dago Y itxurako harilen bitartez. Harilen sarrerak IGBT pare batera konektatuta daude. IGBT-ak hiru konexio dituzte, kontrolagailura (driver), tentsiora (5V edo lurra) eta beste IGBT pareari.

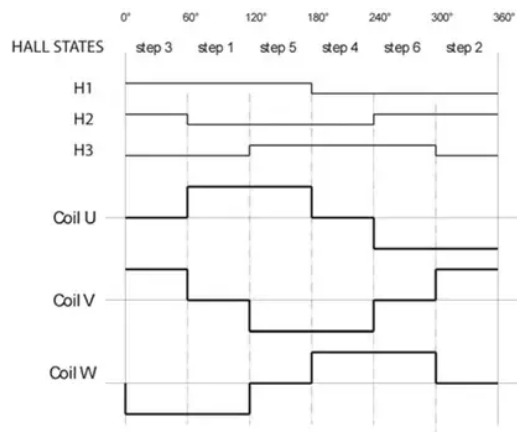
Mikrokontrolagailuaren irteeran PWM motako seinaleak bidaltzen ditu IGBT-ei, hauen batazbesteko tentsioa eta korrontea ezarriz, eta batazbesteko hauek dira motorraren abiadura eta pareak kontrolatzen dituztenak. Motorrak errotorearen posizioa jakiteko, hiru HALL EFEKTUKO sensore erabiltzen ditu (A,B eta C). Errotoreak fluxu magnetikoa sortzeko, bi iman iraunkor erabiltzen ditu.

Sistema honek, sei pausuko konmutazio sekuentzia bat erabiltzen du motorraren erreboluzio elektriko bakoitzeko. Motorrak bi iman pare dituztenez, beharrezkoak dira bi erreboluzio elektriko behar dira motorra erreboluzio bat egin dezan.

Hall efektuko sensore pare bat ezartzen dute kontrolagailuak noiz elikatu behar dituen harilak. Irudiko kasuan, H1 eta H2 sentsoreak U harilaren konmutazioa ezartzen dabe. H2 N (Ipar) polo bat antzematen duenean, U harila positiboki elikatzen da, H1 N polo bat antzematean, U harila "zabaltzen" da, H2 S (hego) polo magnetiko bat antzematean, U harila negatiboki elikatzen da (lurrera konektatu), eta azkenik H1 S polo magnetikoa antzematean, harila berriz "zabaltzen" da. Modu berdintsuan, H2 eta H3 sentsoreak ezartzen dute elikatzen bada V harila, eta H1 eta H3 sentsoreak W harila kontrolatzen dute.



Irudi 72 Harilen korrante zentzua (Electronoobs)



Irudi 73Harilen konmutazio sekuentzia (Electronoobs)

Pausu bakoitzean, bi fase aktibatuta daude, bata motorraren korrontera konektatuta, eta bestea korronteari irteera bide bat emonez, hirugarren fasea zabalik egongo da.

## 5.7. Hegazteko probak

Behin multikopteroaren osagai guztiak lotuta eta konektatuta eta kontrolagailua eta ESC-ak programatuta daudenean, multikopteroa funtzionatzen duen ala ez probatu behar da. Proba hauetatik informazio asko atera daitezke, besteak beste, aukeratutako osagaiak egokiak diren, osagaiak ondo kokatu diren grabitate zentrua multikopteroaren erdian egoteko, konexioak ondo dauden jakitea edota motorren biraketa zentzua egokia den.

### 5.7.1. Lehengo proba

Lehenik eta behin, multikopteroak duen gaitasuna lurretik altxatzeko segurtasunez aztertu behar da, baina kontuan hartuta lehenengo proba dela, ez dago ziurtasunik multikopteroak urruti kontrolaren aginduak behar bezala jarraituko duenik, beraz multikopteroa nolabait kontrolpean euki behar da. Horretarako hurrengo proba diseinatu da, multikopteroa leku finko batera lotu soka txiki baten bidez. Bakarrik altxatzeko gaitasuna aztertzen denez, soka txikia izan daiteke, horrela multikopteroa deskontrolatzen baldin bada ere, ez da urrun joango.

Erabilitako metodoan hurrengo materialak erabili dira.

1. Egurrezko pale bat euskarri finko bezala (Multikopteroaren motorrek sortutako indarra baino pisu handiagokoa, 2-3Kg).



2. Pita estua palea eta multikopteroa lotzeko (Arrantzako kable fina, malgua eta erresistentea)

Kontuak euki behar da egurrezko palea puntu finkotzat hartu ahal izateko, honen pisuak eragindako indarra, multikopteroen motorrek eragindakoa baino handiagoa izan behar dela. Beraz, proba hau segurtasunez gauzatzeko, lehenik eta behin zehatz meatz jakin behar da motorrek sor desaketan indarra.

Behin jakinda egurrezko palearen pisua nahikoa dela multikopteroa finkatuta eukiteko, proba hasi daiteke. Horretarako, palea horizontalki jartzen da, eta honen azal lauean multikopteroa kokatzen da. Pitak multikopteroa eta palea lotzeko erabiltzen da, horretarako paleari daratulu batekin zuloak egiten zaizkio, pita zuloetatik pasa eta multikopteroaren hanketara lotu. Behin hanka guztiak lotuta daudenean proba hasi daiteke.

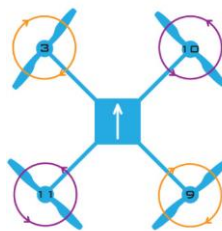
Proba hasteko urruti kontroletik *thrust* palankari eragiten zaio, eta gauzak ondo egonez gero, multikopteroak gora egingo du soka guztiz luzatu harte.

Baliteke ere, multikopteroak gora ez egiteak arazo desberdinengatik izan daiteke.

Azaldu ahal diren arazoak.

### Motorren baten biraketa egokia ez denean

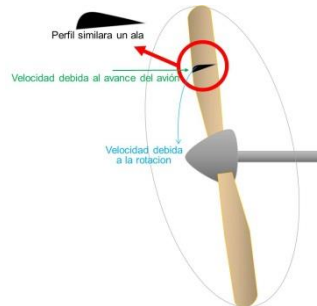
Kontuan euki behar da motorren biraketazko zentzua ez dela arbitrarioa, biraketak antolatzen dira momentu osoa nulua izan dadin. Horretarako, lau motorduneko kuadrakoptero baten konfigurazioa hurrengoa izan behar da.



Irudi 74 Biraketa zentzua (GoogleImages)

## Propelen bat bere tokian ez egotea

Motorren biraketa zentzua egokia denean, propelen posizioa txarto egon daiteke. Kontuan euki behar da propelak bi konfigurazio mota dutela CW (horratzen aldekoak) eta CCW (horratzen kontrako). Propelak erabilgarriak izan daitezten, propelaren angelodun aldea biraketa zentzuaren alde egon behar da.



Irudi 75 Propelaren posizioa (GoogleImages)

## Bateria deskargatuta egotea

Baliteke ere baterien karga baxua izatea, eta honen ondorioz motorrek ezin dute haien potentzia osoa eman. Motorren abiadura bateriaren menpekoak direlako.

## Pisu gehiegi eukitea

Baliteke ere multikopteroaren karakterizazioa txarto egin izana. Adibidez aukeratutako motorrak ez daukate multikopteroaren pisua altzatzeko gaitasunik.

### 5.7.2. Bigarren proba

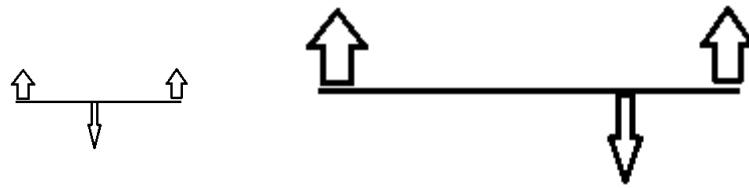
Behin ikusita guztia ondo konektatuta dagoela, eta multikopteroa lurretik era egonkorrean altzaten dela, segurtasun neurriak kendu, eta poliki poliki multikopteroaren portaera aztertu. Hegaldi hau, segurtasunez leku itxi batean egitea gomendatzen da, beti ere oso mugimendu txikiak eginez.

Aurkitu daitezkeen arazoak.

## Airean ez egonkortzea

Arazo honen jatorria normalean multikopteroaren grabitate zentrua multikopteroaren zentruan ez egotea da. Egoera honek, pisuak eragindako indar bertikalak momentu bat

sortzen du. Momentu hau multikopteroaren zentroan dagoenean, nulua da, aldiz zentrutik aldentuta dagoenean, momentua agertzen da.



Irudi 76 Momentuen oreka

### Aireratzean, desiro ez diren mugimendu txikiak

Normala den portaera da, irratiarekin kontrako mugimenduak egin eta orekatzen da.

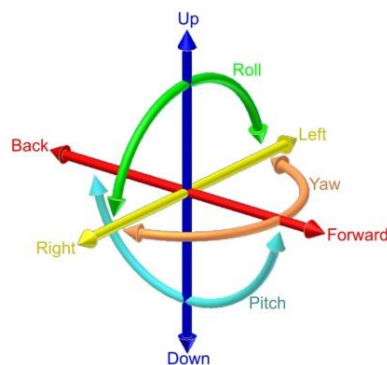
Hegaldi motak hau 3 aldiz behintzat egitea gomendatzen da kalera irten baino lehen, horrela drone-ak daukan portaera barneratzen da.

### 5.7.3. Hirugarren proba

Multikopteroaren portaera ezagutzen dugunean eta ondo orekatuta dagoenean, leku handiago batera joan daiteke, baina momentuz leku itxia izan behar da. Hegaldi hauek kontrolagailuaren PI-ak konfiguratzeko dira.

Leku aproposa da hau egiteko, izan ere leku itxia izanik, ez da agertuko airearen perturbaziorik.

Ardatz bakoitzeko (pitch, yaw eta roll) PI kontrol bat dago, eta hauek banan banan konfiguratu behar dira. Gomendagarria da roll eta pitch angeluak lotzea, hau kontrol plakek emoten duten aukera bat da.



Irudi 77 Espazioko mugimenduak (emissarydrones)

#### 5.7.4. Laugarren proba

Azken proba hau, behin multikopteroa ondo konfiguratuta dagoela, multikopteroaren erantzunak ulertzeko egiten da. Horretarako, multikopteroa puntu batetik, beste batera eramaten da, urruti kontroletik multikopterora bidaltzen diren seinaleen portaera ikasteko.

## 6. Legearen laburpena

Kontuan euki behar da multikopteroen inguruan bi alde desberdintzen direla. Alde batetik erabilpen pertsonala, eta bestalde erabilpen profesionala. Dokumentu hau erabilpen pertsonalarentzako multikopteroetaz hitz egiten duenez, honen inguruan laburpen bat egingo da. Alde profesionalaren inguruan zalantzaren bat izanez gero, bigarren eranskinean lege osoa irakurtzeko aukra dago.

### 6.1. Erabilpen pertsonala

1. Hegaldiak 120 metro baino altuera txikiagokoak izan behar dira
2. Aireportuetatik 8 kilometroko distantzia gorde behar da
3. Ezin daiteke kontrolatutako espazio aereoan hegaldirik egin
4. Ezin daiteke hegaldirik egin babestutako esparruetan (militar, gobernu, industria...) 32. artikuluan agertzen dira leku hauek
5. Hegaldiak pilotuaren begibiztan egin behar dira
6. LPB sistemako hegaldiak, behatzaile batekin egin behar dira
7. Grabazioa, kontuz euki behar da
8. Hegaldiak egunean zehar egin behar dira, eta baldintza meteorologiko egokietan
9. Beste aeronabe handiei prioritatea eman behar zaie
10. Ezin daiteke hegaldirik egin eraikin taldeetan (hiriak, herriak etab...)
11. Ezin daiteke hegaldirik egin pertsonen multzoen gainetik

Hegaldia 50 metroko altuera baino txikiagokoa baldin bada, 8. eta 9. puntuak ez dira derrigorrezkoak. Hau da, altuera txikietan hegaldiak gabaz egin daitezke. Multikopteroak 250g edo gitxiago pisatzen badu eta 20 metroko altuera máximo baterarte, 10. eta 11. puntuak ez dira derrigorrezkoak, hots hirietan zein herrietan erabili daitezke.

32. artikulua hurrengoa dio:

Ezin daiteke hegaldirik egin estatuaren eraikinetatik, defentsako instalazioetatik, instalazio militarretatik ezta zentral nuklearretatik. 50 metroko altueran, hegaldiak baimenduta daude hurrengoko lekuetan. Industria kimikoetan, garraioetan, zentral energetikoetan, zentral hidraulikoetan eta telekomunikaziozko instalazioetan.

## 7. Gantt diagrama

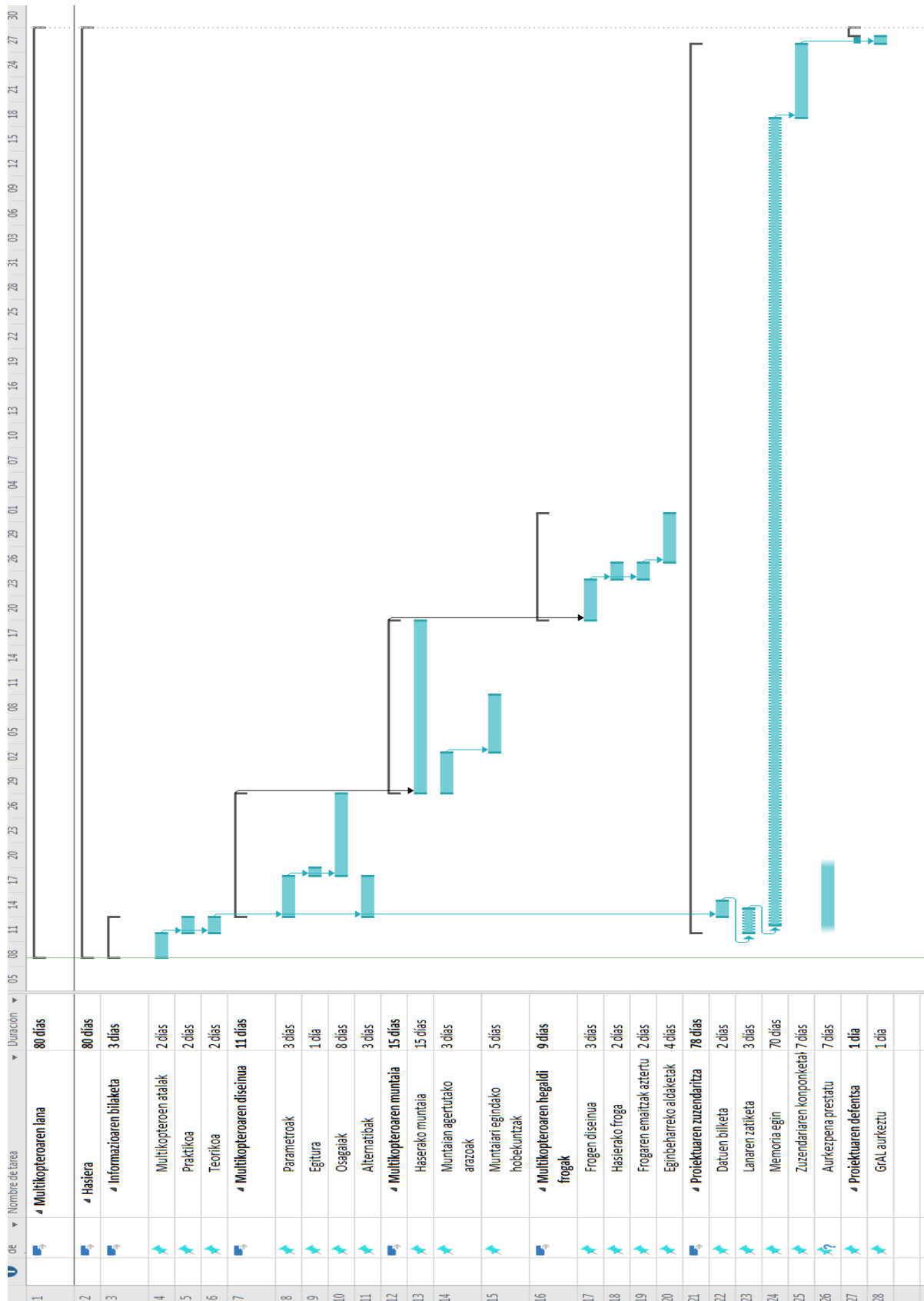
Edozein proiektu garatzeko, ezinbestekoa da auzer aurretik plangintza bat egitea, gauzak prestatu eta bakoitza bere unean garatu ahal izateko. Plangintza Gantt diagrama baten bitartez gauzatuko da, zeinetan proiektuan zehar egingo diren atazak azalduko diren, baita atazak ere noiz eta zenbat iraunduko duten azaltzen da. Jakina, aurretik aurreikusitakoa zehatz mehatz betetzea oso zaila da, baina zenbatespen hurbil bat egitea da honen helburua.

### 7.1. Atazak

Atazen sailkapena egin behar da, multzoetan bananduz eta bakoitzaren hasiera eta amaierak azalduz.

#### 7.1.1. Multikopteroaren proiektua

- I. Informazio bilaketa
  - Multikopteroaren atalak
  - Informazio praktikoa
  - Informazio teorikoa
  
- II. Multikopteroaren diseinua
  - Parametroen diseinua
  - Egituraren diseinua
  - Osagaien aukeraketa
  - Alternatiben azterketa
  
- III. Multikopteroaren muntaketa
  - Hasierako muntaia
  - Muntaiari agertutako arazoak
  - Muntaiari egindako hobekuntzak
  
- IV. Multikopteroaren hegaldi frogak
  - Frogen diseinua
  - Hasierako frogak
  - Frogen emaitzak aztertu
  - Eginbeharreko aldaketak
  
- V. Proiektuaren zuzendaritza
  - Datuen bilketa
  - Lanaren zatiketa
  - Memoria egin
  - Zuzendariaren konponketak
  - Aurkezpena prestatu
  
- VI. Proiektuaren defentsa



## 8. Gastuen Zuriketa

Edozein proiektu hasi baino lehen, argi euki behar da gutxi gora behera proiektuan zehar behar izango den diru kopurua. Dirua askotan proiektuen mugetako bat da, eta proiektua garatzeko baliteke aldaketak egin behar izatea muga ekonomiko ez gainditzeko. Aurrekontua egiteko hurrengo atalak hartuko dira kontuan.

12. Pertsonalaren kostua
13. Erosita dauden osagaien amortizazioa
14. Proiektuarentzat beren-beregi erositako osagaiak

LAN ORDUAK			
Maila	Kostua orduko (€/h)	Ordu kopurua	Totala
Proiektuko zuzendaria	40	20	800,00 €
Ingeniaritza ikaslea	15	680	10.200,00 €

Pertsonalaren kostua

AMORTIZAZIOA				
Osagaia	Eskuratze kostua	Bizitza erabilgarria	Erabilera (h)	Kostua
Herramientak	100,00 €	5	350	0,8€
Ordenagailua	500,00 €	5	360	4,11 €

Erabilitako osagaien amortizazioa

	Osagaia	Modeloa	Prezioa	Unitateak	Totala €	
<b>Egitura</b>	Oinarria	X525 V3	8,76 €	1	8,76 €	
	Bridak	Luzeera ezberdinetako paketea	9,99 €	1	9,99 €	
	Belkroa		9,99 €	1	9,99 €	
	Zinta isolagailua		2,50 €	2	5,00 €	
<b>Propulzio sistema</b>	Motorrak	EMAX MT2213 935KV	14,99 €	4	59,96 €	
	Propelak	10x45 CW	2,99 €	2	5,98 €	
		10x45CCW	2,99 €	2	5,98 €	
		11X47	3,69 €	4	14,76 €	
<b>Sistema elektronikoa</b>	Bateriak	Turnigy 5000 mAh	18,53 €	2	37,06 €	
		Rc Innovations 4000 mAh	35,90 €	2	71,80 €	
	Bateria kargadorea	SkyRC Imax B6 mini 60W 6A	37,90 €	1	37,90 €	
		Turnigy accucell 6	29,90 €	1	29,90 €	
	Kontrolagailua	KK2.1	14,99 €	1	14,99 €	
	ESC	Qbrain 4x20	16,99 €	1	16,99 €	
	Distribuzio plaka		2,92 €	1	2,92 €	
	Kolorezko kableak		1,00 €	10	10,00 €	
	Orekagailua	Hobby Siglo 2 AXIS	49,99 €	1	49,99 €	
	FPV antena	Tx 2,4GHz 200mW	10,00 €	1	10,00 €	
	FPV hargailua	12Ch Digital Display Receiver	30,97 €	1	30,97 €	
	FPV dekodifikadorea				0,00 €	
	<b>Komunikazio sistema</b>					0,00 €
		Urruti kontrola	Turnigy i-10	163,88 €	1	163,88 €
Hargailua		Turnigy i-10 receiver	10,55 €	1	10,55 €	
<b>Grabazio sistema</b>						
	FPV kamera	1/3 SONY CCD (PAL)	15,12 €	1	15,12 €	
	Akzio kamera	4K 30fps Sports ULTRA HD DV	24,99 €	1	24,99 €	
<b>GUZTIRA</b>					<b>647,48 €</b>	



Definizioa	Azalpena	Kostua
Lan ordua	Pertsonalaren kostua	11.000,00 €
Amortizazioak	Jada erositako osagaien amortizazioa	4,81€
Gastuak	Beren-beregi erositako osagaiak	647,48€
Kostu zuzenak	Aurrekoen batura	11.647,48 €
Kostu ez-zuzenak	Aurrekoen batura x 0,1	1.164,75 €
<b>GUZTIRA</b>		<b>12.812,23 €</b>

Datu hauetatik esan daiteke proiektua garatzeko 12.000€ inguru behar izan direla. Gastu honen zatirik handiena esku lanean agertzen da, 11.000€ hain zuzen ere. Gastu hau, proiektuaren zuzendariaren lan orduak eta ingeniaritza ikaslearen lan orduak balioztatuz lortu da.

Hurrengoko gasturik handiena, multikopteroa muntatzeko erabili diren osagai desberdinenak da, honetan ez daude bakarrik multikopteroak dauzkan osagaiak, baizik eta proiektu osoan zehar erosi diren osagaien batuketak. Proiektuan zehar ikusi da nola aukeratutako osagai batzuk ez dute pentsatutako errendimendua eman, beraz beste batzuk erosi behar izan dira.

Amortizazioak ere kontuan hartu dira, bai laborategian erabilitako ordenagailua eta laborategian erabilitako herramintak (daratuluak, soldagailua etab...).

Hauen hiruron batuketak, kostu zuzenak dira. Kostu ez-zuzenen balioa, kostu zuzenenaren %10 batean balioetsi da.

## 9. Proposatutako Aurrekontua

Ondoren, irudiak airetik eskuratzeko multikoptero single bat eratzeko aurrekontu bat proposatzen da. Multikoptero honetan, nahitaezko osagaiak bakarrik aurkituko dira, gastu totalak txikituz.

	Osagaia	Modeloa	Prezioa	Unitateak	Totala €
<b>Egitura</b>	Oinarria	X525 V3	8,76 €	1	8,76 €
	Zinta isolagailua		2,50 €	2	5,00 €
					<b>13,76 €</b>
<b>Propulzio sistema</b>	Motorrak	EMAX MT2213 935KV	14,99 €	4	59,96 €
	Propelak	10x45 CW	2,99 €	2	5,98 €
					<b>65,94 €</b>
<b>Sistema elektronikoa</b>	Bateriak	Turnigy 5000 mAh	18,53 €	1	18,53 €
	Bateria kargadorea				
		Turnigy accucell 6	29,90 €	1	29,90 €
	Kontrolagailua	KK2.1	14,99 €	1	14,99 €
	ESC	Qbrain 4x20	16,99 €	1	16,99 €
	Kolorezko kableak		1,00 €	10	10,00 €
	Orekagailua	Hobby Siglo 2 AXIS	49,99 €	1	49,99 €
					<b>140,40 €</b>
<b>Komunikazio sistema</b>	Urruti kontrola	Turnigy TGY-I6	45,75 €	1	45,75 €
	Hargailua	Turnigy i-10 receiver	10,55 €	1	10,55 €
					<b>56,30 €</b>
<b>Grabazio sistema</b>					
	Akzio kamera	4K 30fps Sports ULTRA HD DV	24,99 €	1	24,99 €
<b>GUZTIRA</b>					<b>301,39 €</b>

## 10. Ondorioak

Teknologiaren aurrerapenak beti onurak ekartzen ditu. Dokumentuaren zehar ikusi den bezala, osagai askoren hobekuntza nabarmenak lortu dira, adibidez motor elektrikoaren erabileran, fluido suharbeherakorrek ez erabiltzeak baimentzen du, gainera errendimendu hobe eskeintzen du, %80 ingurukoa. Beste adibide argi bat, tentsio erregulatzailaren kasuan ikus daiteke, hemen bariadore linealetatik buck zirkuituetara salto egin da, potentzia elektronikan oinarrituz. Bariadore linealen desabantail nagusia, haien potentzia galeran datza, ikusi bezala gero eta elikadura tentsio altuagoa izan, gero eta potentzia gehiago xautzen du bero bezala. Aldiz, buck zirkuituak ez dauka ia potentzia galerarik, eta honen errendimendua %85 dago ezarrita.

Gailu elektroniko bat eukitzeko bi bide daude. Lehenengo bidea, gailua zuzenean erostea da, biderik errezena alegia, bigarren bidea aldiz gailua norberak sortzea da. Argi dago, hasiera batean lehenengo aukera ekonomikoki hobeagoa izango dela bigarrena baino. Esate baterako, merkatuan aurkitu daitezkeen multikopterorik honena *Phantom 4 Pro V2.0* [[https://store.dji.com/es/product/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=buy\\_now\\_menu&vid=43151](https://store.dji.com/es/product/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=buy_now_menu&vid=43151)] da, 1699€ balio ditu eta proiektu hau gauzatzeko bakarrik multikopteroaren osagaietan 647,48€ aurreikusi dira. Honi, eskulana gehitu beharko litzateke, eta proiektu osorako (teoria + praktika) 10.200€ aurreikusi badira, merkatuan zuzenean erostea baino diru gehiago eskatzen du.

Baina ez da bakarrik diruan pentsatu behar, bizitzako gauza guztiak ezin dira eurotan kuantifikatu. Esate baterako, ezin da zenbatespen bat egin persona batek bere semearekin batera halako proiektu bat garatzean bien artean sortuko litzatekeen harreman berezia kuantifikatzeko. Baita, halako proiektuak egiterakoan ezagutzak barneratzen dira, ezagutza hauen bidez norberaren gaitasunak handitzen dira. Adibidez, gailuaren osagaien bat matxuratzen bada, persona horrek osagai hori konpontzeko gai izango da (soldadurak, konexioak, programazioa...).

Gaur egungo munduan, oso garrantzitsua da aurrerapen teknologikoak lortzea, eta ingeniari bezala ikasgai hau asko barneratu behar da. Besteak beste, ingeniariaren eskuetan egongo da munduak jarraituko duen norabidea.

Ondorio teknikoak ere atera daitezke. Memorian zehar adierazi dira ze osagai erabiltzen diren, eta osagai bakoitzaren azterketa egin da. Baita ikusi da ere osagai batzuk zailtasun osogarri bat ekar ditzaketela, programazioa edo konfigurazioaren aldetik. Multikopteroen munduan hasiberrientzat gomendagarria da halako osagaiak ekiditzea, izan ere multikopteroak dituen osagaiak berez hasieran ulertzea ez da erreza. Horretarako, kontrolagailu sinpleak gomendatzen dira (KK2.1), aurreprogramatuta daudelako. ESC-en inguruan ere sinpletasuna bila daiteke, motor

bakoitzeko osagai bat euki beharrean, osagai bat motor guztientzako eukitzea gomendagarria da, izan ere ESC bakoitzak urruti kontrolagailuarekin konfiguratzeko dira eta ESC guztiak era berdinean konfiguratu behar dira, beraz errazagoa da ESC bat ondo konfiguratzeko, lau konfiguratzeko baino.

Azterketa egin eta gero, multikopteroak muntatzeko hurrengo zerrenda pentsatu da. Zerrenda hau, argazkiak eta irudiak eskuratzeko multikoptero bat egiteko da.

Hasiberrientzako multikopteroa:

- 450mm-ko egitura
- Kontrolagailu sinplea (kk2.1)
- ESC bakarra
- 4 motor + 4 propel
- 2 ardatzetako orekagailua
- 6 kanaleko urruti kontrola
- 4000mAh-ko bateria

Esperientzia dutenentzako multikopteroa:

- 450mm-ko egitura
- Kontrolagailu aurreratua (ardupilot)
- GPS
- Telemetria
- Lurreratzeko sentsoareak
- 4 motor+ 4 propel
- 4 ESC
- 3 ardatzetako orekagailua
- LPB sistema (kamera+antena)
- 8 kanaleko urruti kontrola
- 4000mAh-ko bateria

## 11. Bibliografía

- [1] *Boletín Oficial del Estad, Real Decreto 1036/2017*, Madrid, Espainia
- [2] Enaire (2018) *Aplicación Web para Volar Drones de Forma Segura*, Madrid
- [3] Corrienteelectrica (2016) *¿Por qué es más eficiente un vehículo eléctrico que uno de combustión?*
- [4] Infopuesto (2017) *Como Funcionan y Vuelan los Drones*
- [5] Moyano S. *Diseño y Contrucción de un Quadcopter*
- [6 ]Penalva J. (2017) *Como Montar tú Mismo Un Dron de Carreras*
- [7] Brown J. (2018) *Quadcopter Motors: Understanding the Driving Force of the Drones*
- [8] Valero R. *Investigación y Análisis de Controladores de Vuelo para Drones.*
- [9] *KK2.1 Instruction Manual*
- [10] Bird D. (2014) *KK2.1User Guide*
- [11] FPVmax (2015) *Variador Electrónico: Qué es y Cómo Funciona*
- [12] González E. *Diseño y Construcción de un Cruadricóptero de Bajo Coste Controlador por un Dispositivo Movil Inteligente*
- [13] *72 MHz VS 2.4 GHz Radio systems compared*
- [14] Mario (2009) *Antenas: Más Distancia para Radio Control*
- [15] Zamora J. (2016) *Diferencias entre Redes WiFi de 2,4GHz y 5GHz*

- [16] ComprarDrones (2017) *¿Cómo Funcionan las Hélices de un Dron?*
- [17] ThreDronesMag (2016) *The Physics of Multirotor Drone Flight*
- [18] Wikipedia (2018) *Convertidor Buck*
- [19] Martínez I. *Los 10 Mandamientos de la Electrónica de Potencia*, Bilbao
- [20] Hernández A. (2015) *Dinámica de Máquinas*, Bilbao
- [21] Jackson T. (2015) *PID Closed Loop Controls*
- [22] Otálora C.(2013) *Control de Velocidad para Motor DC Brushless sin Sensores*, Bogota