

# MULTICÒPTER PER A SITUACIONS DE RISC INDUSTRIAL



*Imatges: Multicòpter en ple vol al Parc de l'Hostal del Fum, Palau de Plegamans*

Héctor Ortega González  
2<sup>n</sup> A Batx, curs 2012-2013  
Prof: Jordi Orts González  
Treball de Recerca (àmbit tecnològic)  
14-01-2013

## AGRAÏMENTS

Al meu pare, l'Edmundo. Dels que m'han ajudat, ell és qui ha estat més dedicat cap al projecte, i qui ha col·laborat més amb mi. Durant el període de construcció va ser qui em va ajudar en els aspectes més tècnics, i també va donar enfocaments nous i alternatius que han influït de forma positiva en el projecte. Sense la seva ajuda, acabar dins el termini tot el procés que hi ha descrit en aquest treball no hauria estat possible.

A la meva mare i al meu germà, la Montse i l'Òscar, per la seva paciència durant tot el temps que ha durat el projecte. L'optimització del temps ha estat possible gràcies a ells. Si no haguessin col·laborat sacrificant el seu temps d'oci, no hauria pogut dedicar les hores necessàries.

Al meu professor de tecnologia (i el tutor dels Treballs de Recerca de l'àmbit de tecnologia), el Jordi, per estar a sobre del projecte i facilitar-me l'obtenció de peces i el material del taller.

Al director de l'institut (IES Príncep de Viana), el Ramón, per cedir-me de forma tan ràpida el gimnàs de l'escola per a realitzar les primeres proves amb el multicòpter.

A Jordan Liske ("sirbow2"), per la seva inestimable ajuda des del principi del projecte, tant en la part de redacció i teoria com en la part de construcció i components. També per haver estat tant de temps responent a les preguntes de teoria més complexa, i per orientar-me en l'adquisició de parts. A més a més, sense la seva ajuda per videoconferència no hauria estat capaç d'haver implementat l'electrònica a temps.

Finalment, a Thomas ("Zennix") i a "Budget Engineer", per la seva ajuda en els detalls de teoria sense resoldre.

## ÍNDEX DE CONTINGUTS

	<u>pàg.</u>
1. Introducció	4
2. Teoria	6
2.1. Enginyeria mecatrònica: El fonament del projecte	6
2.2. FC	7
2.2.1. Teoria i funció	7
2.2.2. Tipus de FC i altres aspectes	9
2.3. Transmissor i receptor (TX i RX)	9
2.3.1. Teoria i funció	9
2.3.2. Tipus de TX i RX i altres aspectes	11
2.4. Sensors principals: Giroscopis i acceleròmetres	12
2.4.1. Teoria i funció	12
2.4.2. Tipus de sensors principals i altres aspectes	13
2.5. Motors brushless	13
2.5.1. Teoria i funció	13
2.5.2. Tipus de motors brushless i altres aspectes	19
2.6. ESC (variadors de velocitat)	22
2.6.1. Teoria i funció	22
2.6.2. Tipus de ESC i altres aspectes	25
2.7. Bateries	30
2.7.1. Teoria i funció	30
2.7.2. Tipus de bateries i altres aspectes	35
2.8. Hèlixs	37
2.8.1. Teoria i funció	37
2.8.2. Tipus d'hèlixs i altres aspectes	43
2.9. Maniobra del multicòpter	44
2.10. Síntesi	44
3. Disseny	46
3.1. Hardware i estructura	46

## Multicòpter per a situacions de risc industrial

3.1.1. Esquema general	46
3.1.2. Plànols	48
3.1.3. Materials i pressupost	49
3.1.3.1. Productes escollits per al multicòpter	49
3.1.3.1.1. FC	49
3.1.3.1.2. Giroscopi i acceleròmetre	51
3.1.3.1.3. TX i RX	53
3.1.3.1.4. Motors	54
3.1.3.1.5. Hèlixs	56
3.1.3.1.5. ESCs	57
3.1.3.1.6. Bateria	59
3.1.3.1.7. Materials estructurals	59
3.1.3.1.8. Altres aspectes	60
3.1.3.2. Pressupost i mètode de compra	60
3.2. Software i programació	61
3.2.1. Esquema general	61
3.2.2. FC: Control general	61
3.2.2.1. Multiwii	61
3.2.2.1. PID	62
3.2.3. ESC: Programació	67
4. Conclusió i valoracions	68
5. Bibliografia	71



## INTRODUCCIÓ

La idea d'un multicòpter, com a concepte, fa molt que existeix. Ja el 1920, el primer multicòpter, tripulat per Oehmichen, va aconseguir alçar-se de terra. Tot i que va ser un vol satisfactori, els problemes tècnics de l'aeronau eren massa grans per a que s'aconeguís ràpidament un model estable. A més, amb l'absència de sistemes de control electrònics, l'estabilització era pràcticament impossible. És per això que el multicòpter va ser oblidat, substituït per l'helicòpter i les successives millores en l'avió.

És a principis del 2007 quan es comença a sentir parlar un altre cop de multicòpters, aquest cop, però, a escala. Els multicòpters elèctrics de radio control es comencen a fer un lloc entre els altres tipus d'aeronaus. Ara, amb control electrònic, l'estabilització passa a ser un obstacle que es pot superar. Els multirrotors comencen a tenir grups propis i finalment formen part de les pàgines web i associacions de radio control d'arreu del món.

No obstant, només són models, fins feia poc ningú havia provat de realitzar el mateix experiment que Oehmichen. Això va ser fins feia molt poc: l'Octubre de 2011, un grup d'enginyer alemanys, el grup E-volo, aconseguia un vol tripulat de multicòpter durant més d'un minut. Està format per 16 hèlixs de doble pala, i té espai per a un passatger. La mobilitat és molt bona i el rendiment espectacular.

Ara que els multicòpters poden ser tant eficients és el moment de desenvolupar les seves aplicacions en diferents camps. Potser on més ha estat utilitzat és al camp de la fotografia, ja que els multirrotors presenten una gran estabilitat i la possibilitat de quedar-se en *hovering* (vol estàtic). Però aquestes característiques poden ser aplicades a molts altres camps.

L'objectiu d'aquest projecte és l'estudi i construcció (i posterior pilotatge) d'un multicòpter, però també el seu enfocament a una aplicació concreta: la seva aplicació a situacions d'emergència industrial. Les propietats dels multirrotors els fan adients per a aquestes situacions, en les que cal una gran maniobrabilitat, un alt grau d'estabilitat, i capacitat de

Multicòpter per a situacions de risc industrial

càrrega.

El multicòpter, en una situació d'aquesta índole, seria com una sonda de reconeixement: Després d'alguna fuga, explosió, ensorrament, la zona és sempre insegura. Enviar un equip humà a la zona és perillós, però disposant d'un multicòpter de reconeixement es podrien minimitzar els riscos, ja que no hi hauria d'haver cap operari a prop de la zona perillosa. El multicòpter aniria a la zona compromesa, deixaria anar una sonda o un equip de sensors i tornaria a la base de control. Aquest equip de sensors aniria recopilant dades, que transmetria a la base. Òbviament, per a realitzar aquesta tasca cal una càmera. Implementar-la és molt fàcil en una estructura tipus multicòpter, per tant incrementa la facilitat de muntatge.

Per tant, en aquest treball s'exposaran les característiques i funcionament del multicòpter, la teoria present al darrere, el disseny i materials d'un multicòpter fet a mà i la seva posterior construcció (i pilotatge), però també ho faran des del punt de vista d'aplicació com a equip de reconeixement en situacions de risc industrial.

## TEORIA

Abans de començar amb els aspectes de disseny i construcció del multicòpter, calen unes mínimes nocions sobre el que serà discutit en l'esmentat apartat per a poder comprendre realment els temes que hi seran discutits. Aquests coneixements seran exposats en aquest apartat, el de teoria. Recomano encara més que es llegeixi tot el contingut d'aquesta secció de la memòria, ja que conté tota la informació exposada i discutida a fons. Per a sintetitzar tots els continguts dels apartats de teoria, el sub-apartat final d'aquest capítol (2.10. Síntesi) inclou un senzill i sintetitzador esquema, a més d'un diagrama de flux i un petit comentari que faran les vegades de resum. Tot i que l'esquema és equivalent a un resum del capítol, llegir tot l'apartat de teoria proporcionarà una visió molt més detallada de la part teòrica que ha calgut per a la realització d'aquest projecte. De totes maneres, allò que desembocarà en una comprensió més en detall i de forma global de la teoria darrere de la construcció del multicòpter és llegir el capítol sencer, inclòs el mateix punt 2.10: Síntesi.

### ***Enginyeria mecatrònica: El fonament del projecte***

El multicòpter, com ja he mencionat a la introducció, no és l'aeronau més usual, i això es deu a la seva complexitat de control. Com que el seu moviment es basa en l'augment o reducció de la potència dels motors, i, per tant, de les rpm de les hèlixs, aquestes últimes han d'estar coordinades perfectament per a aconseguir estabilitat i moviments correctes, i això és, a la pràctica, impossible de fer si controléssim cada hèlix per separat, per exemple, si a cada canal de la meua emissor de radiocontrol li assignés una hèlix individual. A més de la gran habilitat que requeriria que el multicòpter estigués estable, hi haurien moviments i maniobres impossibles a causa del sistema de control amb *sticks*. El multicòpter és la única de les aeronaus que funcionen així. L'helicòpter (que històricament va sorgir després d'un intent fallit d'un vol estable amb un multicòpter a gran escala, el 1906) és una estructura semblant, però no és el mateix tipus de control, ja que, tot i ser un aerodí d'ala mòbil, es basa en el control directe de les hèlixs.

Per tant, entre una senyal enviada per qui tingui el control de l'aeronau i el moviment real del multicòpter hi ha d'haver un component que interpreti la senyal enviada i la transformi en el moviment desitjat. Aquest component és el microcontrolador central (anomenat "*Flying Chart*" o FC, como veurem més endavant). A més, hi ha altres elements de control que en les pàgines següents seran dissertats. Necessitem, llavors, els coneixements inherents a l'ús de microcontroladors i antenes: la programació. Cal, també, per a realitzar el multicòpter, l'estructura, òbviament, a més del cablejat per a transportar l'electricitat en gran amperatge que alimentarà els motors.

Així, per a realitzar aquest tipus d'aerodí calen components mecànics, elèctrics o de potència, electrònics i de telecomunicacions, i informàtics. Tots aquest coneixements, i les branques de la ciència i enginyeria on es troben, pertanyen d'igual forma a l'enginyeria mecatrònica. L'Enginyeria Mecatrònica és la intersecció de l'Enginyeria Mecànica, l'Enginyeria Elèctrica, L'Enginyeria Electrònica i/o de Telecomunicacions, i l'Enginyeria Informàtica. Com podem veure, són coneixements que han sigut claus en la realització d'aquest projecte. Per tant, sense cap dubte la base d'aquest projecte ha estat l'Enginyeria Mecatrònica, que involucra la utilització de sistemes de control i computació, a més dels citats anteriorment, per a l'assoliment dels seus objectius, en aquest cas, un dron per a situacions d'emergència industrials.

## ***Flying Chart***

### >Teoria i funció

La part més important del sistema de control del multicòpter és la "*Flying Chart*" (en anglès, "Mapa/Taula de vol"). Essencialment, és la part que s'encarrega de controlar el multicòpter sencer, seguint les ordres enviades pel receptor de l'emissora de radiocontrol, però contrastant-ho amb les rebudes pels sensors. Així, si rep la senyal "*endavant*", la FC controlarà els ESC (variadors de velocitat) per a que els motors girin de una determinada forma (els dos motors de darrere amb més potència i els dos de davant amb menys, en

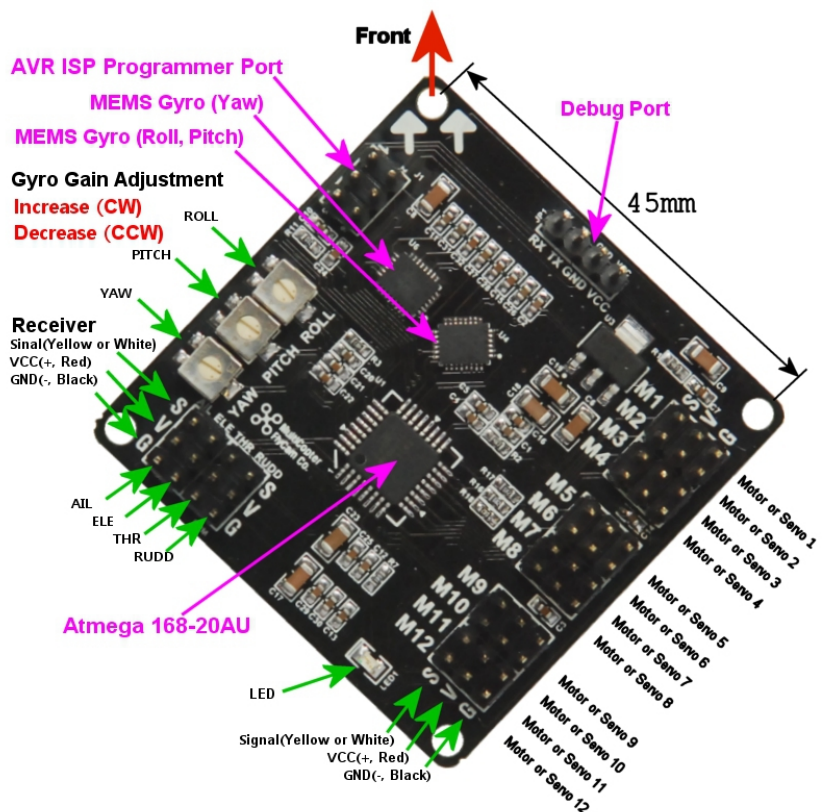
Multicòpter per a situacions de risc industrial

aquest cas particular) per a que el moviment sigui aconseguit, però tenint en compte quins motors estan ja girant més de pressa que els altres (per a mantenir l'estabilització) i actuarà en conseqüència: el 99% de les vegades, per a fer un moviment uniforme, com pujar cap a amunt, l'increment de les rpm dels motors difereix en gran quantitat. O un cas semblant: quan hi ha vent, l'acceleròmetre n'informa a la FC, que realitza un augment més o menys gran del necessari que en un escenari ideal sense ràfegues d'aire.

Jordan Liske. "Kkmulticopter FC". Digitalduino, 15-04-2012. Imatge disponible a <http://dduino.blogspot.com.es/2012/04/quadcopterbuild-log.html>. /Figura 1. FC de disseny usual. Podem observar les sortides per a motor, entrades per als quatre canals, i l'ajustament de la resposta respecte els sensors, que està realitzada per potenciòmetres.

Encara que l'usuari no envii cap ordre, la FC sempre estarà realitzant una funció: l'estabilització del multicòpter. En qualsevol estat o sota qualsevol mode o condició programada, sempre hi ha una rutina d'estabilització. La carta

de vol es basa en les lectures que els seus sensors (giroscopi, o giroscopi i acceleròmetre, funcionant ambdós alhora (en mode estable)) per a saber a quin/s motor/s li cal més potència per a que el multicòpter es mantingui paral·lel al terra, o a un pla desitjat. El grau, rapidesa i suavitat d'aquesta resposta és ajustable, normalment, mitjançant protocols de control per PID, o, en alguns models obsolets, aquesta modulació es fa mitjançant simplement potenciòmetres. Més informació sobre ajust al disseny.



Multicòpter per a situacions de risc industrial

### >Tipus d'FC i altres aspectes

La FC pot portar acoblats els sensors o poden estar situats de forma independent. En la majoria dels casos, sobretot en productes comercials, hi són inclosos per facilitar la feina al comprador del producte. En canvi, en projectes fets a mà o amb característiques específiques diferents, el caire d'investigació que posseeix l'enfoc del seu desenvolupament sol fer que hom construeixi una FC, sense dependre de productes comercials que són restrictius amb els canvis de variables. Per tant, per aspectes de facilitat d'implementació, els sensors solen estar separats, a més de funcionar usualment amb protocols de comunicació I<sup>2</sup>C o ser reciclats d'altres components electrònics. En aquest projecte he fet servir l'última opció, per això els sensors estan aïllats de la FC i el seu apartat també.

Un aspecte important sobre la FC a tenir en compte són les entrades i sortides i els protocols de comunicació entre els diferents components de la part de control, de la qual la FC n'és el centre. El següent diagrama de blocs mostra el tipus de connexió entre els diferents components:

La FC, a més, és l'encarregada de proporcionar corrent al receptor, un component molt important, com veurem en les següents línies.

## ***Transmissor i receptor (TX i RX)***

### >Teoria i funció

Així com la FC és el cor del multicòpter, el transmissor i el receptor és allò que regula els moviments segons l'usuari desitgi. El transmissor (TX) és el mòdul que envia les ordres al receptor segons els moviments dels *sticks* o dels *trimmers* o palanques que realitzem a l'emissora de ràdio. Molt freqüentment també es considera el transmissor tot el conjunt

Multicòpter per a situacions de risc industrial

mòdul emissor+emissora de ràdio. En aquesta memòria considerem el TX com el últim cas. El receptor (RX) és, com el seu nom indica, el mòdul encarregat de rebre les ordres provinents del TX. Ambdós parts necessiten d'una antena per al seu correcte funcionament.



Jordan Liske. "Turnigy 9X and Turnigy 9X 8C v2 receiver". *Digitalduino*, 25-04-2012. Imatge modificada. Imatge original disponible a <http://dduino.blogspot.com.es/2012/04/quadcopterbuild-log.html>./ Figura 2. TX (esquerra) i RX (dreta). A la imatge l'RX està augmentat, és sempre molt més petit que el TX. En aquest model en concret, mesura aproximadament com la pantalla del mateix TX. És imprescindible que ambdues parts tinguin antena.

L'emissió i recepció d'ordres s'estructura en canals. Cada canal és un camí per a transmetre informació dintre d'una determinada freqüència, i separada dels altres canals de la mateixa, és a dir, són totalment independents. Quan més gran sigui el *bandwidth* on s'opera més espai per a canals hi haurà. En el cas d'un TX ordinari, el canal consisteix en una sèrie de possibles valors, valors que varien del mínim al màxim de forma gradual en els canals principals i de forma digital en el secundaris.

Els canals principals són els dels *sticks* i *trimmers*, que es poden regular de forma gradual, tal com es faria amb un potenciòmetre. Tots tenen valors positius i negatius respecte del seu eix central. En canvi, els canals secundaris, només disposen del valor mínim i màxim, tal com apagat i encès en un interruptor o 0 i 1 en una senyal de tipus digital. Hi ha, de totes formes, uns canals secundaris que disposen de tres estats: neutre, negatiu i positiu.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

Els canals principals es corresponen amb els moviments bàsics de l'aeromodel, en aquest cas THROTTLE (potència/elevació), PITCH (endavant/endarrere), ROLL (esquerra/dreta), i YAW (girs sobre sí mateix). Tots els canals excepte el THROTTLE tenen retorn de molla als *sticks* corresponents, per tornar a la posició de repòs una vegada s'ha acabat de manipular l'*stick*. Així, el valor es manté a menys que l'usuari el canviï voluntàriament, aspecte molt necessari mentre el controla el model.

La sortida del RX cap a la FC sempre és de tipus PWM (*Pulse Width Modulation*, Modulació per Amplada de Pols), que és el tipus de comunicació típic amb servos ordinaris: Una línia de comunicació amb tres cables, un per a GND, un altre per a V+, i un altre per a Senyal (S). Es basa en la durada d'un pols de voltatge constant, que estableix la posició del servo. Hi ha més informació sobre PWM al CD.

### >Tipus de TX i RX i altres aspectes

El TX pot operar en diferents configuracions anomenades modes. El més usual quan el radiocontrol era una activitat poc comuna és el mode 1, però ara que s'ha extès és molt més comú el mode 2. Es diferencien en la situació dels canals. Es pot apreciar a la figura 3.



Jordan Liske. "TX mode scheme". Digitalduino, 15-04-2012. Imatge disponible a <http://dduino.blogspot.com.es/2012/04/quadcopterbuild-log.html>. / Figura 3. Mode 1 i Mode 2 en un transmissor. Com podem veure, l'ordre dels canals és diferent. Cal tenir en compte que Rudder = YAW, Ailerons = ROLL, Elevator = PITCH, considerant un multicòpter. THROTTLE no canvia sigui quin sigui l'aeromodel.

Un aspecte a tenir molt en compte és que el canal de THROTTLE, sigui on sigui, cal que tingui un *stick* sense retorn en molla, com ja he mencionat més enrere. Això provoca que no sigui suficient amb canviar la configuració de referència del TX, també cal canviar



Multicòpter per a situacions de risc industrial

mecànicament la seva estructura interna, ja que s'hauran de col·locar i treure molles. Per això escollir el mode és un assumpte important a l'hora de triar el transmissor.

Per evitar interferències entre diferents equips, avui dia gairebé totes les emissores treballen en freqüència de 2.4 GHz (que té un rang de freqüències relativament gran) amb un sistema automàtic (FHSS o DSSS) que cerca les freqüències lliures en la banda. La modulació més comuna és la de PPM (*Pulse Position Modulation*, Modulació per Posició de Pols), que transforma una ordre de molts PWM (polsos amb més o menys duració) de tots els canals de l'emissora en un únic senyal que el mòdul del TX pot transmetre al RX. L'RX els descodifica i envia cadascun al canal que pertoca. Hi ha, però, una necessitat d'establir una sincronització, fer un *bind*, que iguala el rellotge intern del RX al que el TX porta. Així, el TX està sincronitzat amb l'RX, i pot rebre senyal coherent.

El PPM no és res més que una agrupació de PWM. En la senyal PPM, hi ha una fracció de temps assignada a cada canal que conté un pols PWM amb la seva durada (que indica la posició de l'stick del canal en concret). Aquesta senyal circula (actualitza els valors) de forma regular i refresca les dades. Per tant, estrictament parlant, el control dels canals no és continu, sinó seqüencial, però a la pràctica no s'aprecia.

## ***Sensors Principals: Giroscopis i acceleròmetres***

### >Teoria i funció

El sensor mínim que un multicòpter necessita per al seu correcte funcionament és el giroscopi, però és molt convenient disposar també d'un acceleròmetre. Són els sensors que controlen l'angle i la velocitat, respectivament, del multicòpter.

Saber l'angle, la funció que realitza el giroscopi, és indispensable. Ell informa a la FC de quins motors cal accelerar o desaccelerar. Saber la velocitat, funció de l'acceleròmetre, és també important, tot i que no imprescindible: informa a la FC que, tot i estar equilibrats en angle gràcies a la informació del giroscopi, el multicòpter s'està desplaçant per causes externes, com el vent. Així la FC pot regular els motors per contrarestar-ne l'efecte.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

En realitat, el giroscopi no calcula l'angle en el que està el multicòpter, sinó que calcula la RAPIDESA de l'increment d'angle respecte el temps. Així, si la senyal és molt petita indica que la velocitat del canvi d'angle és petit, independentment de quin sigui l'angle actual o l'increment. Si la senyal és molt gran, significa que la rapidesa del canvi també ho és, sense importar l'angle inicial ni l'increment. El multicòpter pot funcionar així satisfactòriament ja que, quan més gran la senyal, més ràpid s'ha mogut el multirroto, i més gran i ràpida ha de ser la resposta dels motors. Per tant, es mogui lent o ràpid, el multicòpter mai arribarà a un punt crític encara que no sàpiga quina és la posició angular actual o quin angle ha recorregut. I per fixar quina és la posició d'angle 0, és suficient amb fer-ho a mà. El calibratge serà discutida en l'apartat de disseny.

El giroscopi ha de ser un giroscopi de tres eixos per poder controlar els tres eixos de possible inclinació del multicòpter: cap a endavant i endarrere, cap als costats, i gir sobre sí mateix.

L'acceleròmetre també ha de ser de tres eixos, els mateixos que els tres possibles moviments rectilinis del multicòpter: cap amunt, cap als costats i cap a endavant/endarrere. Aquests eixos de moviment, en anglès, són anomenats THROTTLE, ROLL, PITCH. YAW, el moviment de gir sobre si mateix, ja està controlat pel giroscopi.

### >Tipus de giroscopis i acceleròmetres i altres aspectes

Un dels aspectes a tenir en compte en aquests dos sensors essencials és el tipus de comunicació. A tots els giroscopis i acceleròmetres utilitzats en aquest tipus de projectes, la comunicació sempre és de tipus I<sup>2</sup>C, que és tipus bus en sèrie: els cables respectius a GND i a V+ i els de comunicació, que només són dos: SDA i SCL. SDA és el de dades i SCL és el rellotge.

## **Motors brushless**

### >Teoria i funció

Multicòpter per a situacions de risc industrial

Els motors utilitzats en un multicòpter estan sempre funcionant amb canvis de ritme molt ràpid i brusc, ja que l'estabilització d'aquest tipus d'aeronau ho requereix, al estar sustentada únicament per hèlixs. A més, a això se li afegeix la necessitat d'una potència relativament gran, ja que per a que un multicòpter voli eficientment cal que el ràtio de força de propulsió/pes sigui, com a mínim, de 2:1. Uns motors ordinaris, com els *brushed* (amb escombretes), que són els més comuns, sofririen un desgast molt ràpid, i haurien de tenir una grandària notable per a poder aconseguir la potència requerida, a més de tenir un pes més gran. Per tant, cal un altre tipus de motor que pugui proporcionar les qualitats necessàries en la construcció d'un multicòpter.

Els motors usats s'anomenen *brushless*, ja que no tenen escombretes. Aquest és el seu principal avantatge. Però, a més de l'absència d'aquest component de vida útil tan curta, els motors *brushless* difereixen en moltes altres coses dels *brushed*. Els motors *brushless* són també anomenats *BLDC motor* ("BrushLess DC Motor).

*NOTA: Ens basem com a referència de motors brushless als tipus outrunner, que tenen els imants rotatoris a la part exterior. Consulteu el següent subapartat en el capítol de motors per obtenir més informació.*

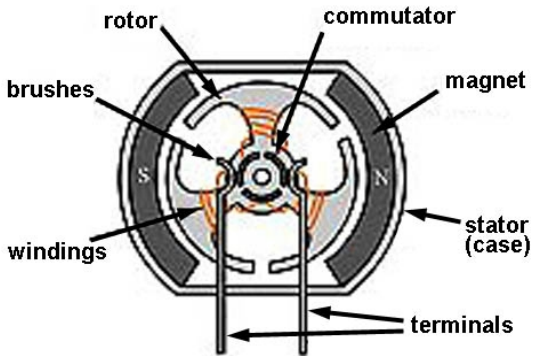
La diferència més notable és el canvi de mètode de gir: En un motor *brushless*, a diferència de l'altre tipus, l'estator (la part fixa del motor) és on es troben les bobines de l'electroimant, i es troba al centre. La part exterior és la formada pels imants, que són atrets per les bobines. Aquesta part exterior va unida a l'eix del motor. L'estator d'un *brushless* ordinari està elaborat amb un material ferromagnètic, que fa les vegades de nucli de les bobines, per a maximitzar l'efecte d'atracció al activar els electroimants. A més, per minimitzar les pèrdues per corrents de Foucault a l'estator, no és un bloc massís sinó una agrupació apilada de làmines fines aïllades les unes de les altres.

El *bell*, que és la part rotativa exterior que conté els imants, està unida a l'eix (el *shaft*) mitjançant, normalment, un cargol de pressió. A més, un *bell* de motor *brushless* sempre té molts més imants que un *brushed*, que en sol tenir només dos. Per a acoblar l'hèlix al motor, o bé es fa servir un *prop adapter* directament al *shaft*, o bé un adaptador de *bell* a

Multicòpter per a situacions de risc industrial

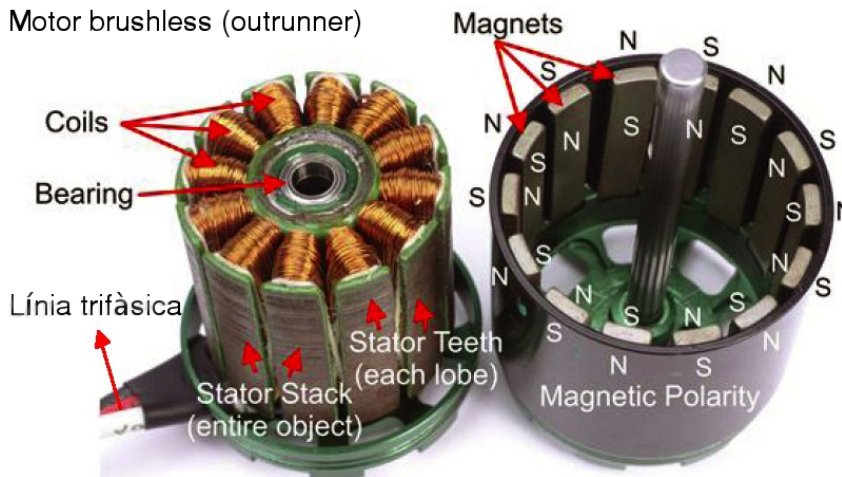
hèlix, anomenat *collet*, de disseny únic per cada fabricant. Per a més informació sobre aspectes tècnics i d'implementació, consulteu l'apartat de disseny.

Typical brushed motor in cross-section



Brian Mulder. "Typical brushed motor in cross-section. Southern Soaring Club, Cape Town, Maig del 2005. Imatge disponible a <<http://www.southernsoaringclub.org.za/a-BM-motors-1.html>>. Figura 4. Esquema de motor brushed típic. Es pot apreciar el mecanisme d'escombretes que activa i desactiva les fases de forma automàtica. També es pot observar que només hi ha dos imants.

Motor brushless (outrunner)



N/A. ???. RCUiverse, sense data. Imatge modificada. Imatge original disponible al CD i a <<http://www.rcuniverse.com/magazine/reviews/1344/BrushlessMotors7.jpg>>. Figura 5. Motor brushless, amb l'estàtor a l'esquerra i el bell a la dreta. Etiquetes (de dreta a esquerra i dalt a baix): Bobines, rodaments, línia trifàsica, pila de l'estàtor (objecte sencer), dent de l'estàtor (cada llàmina), imants, polaritat dels imants (N,S). Es pot

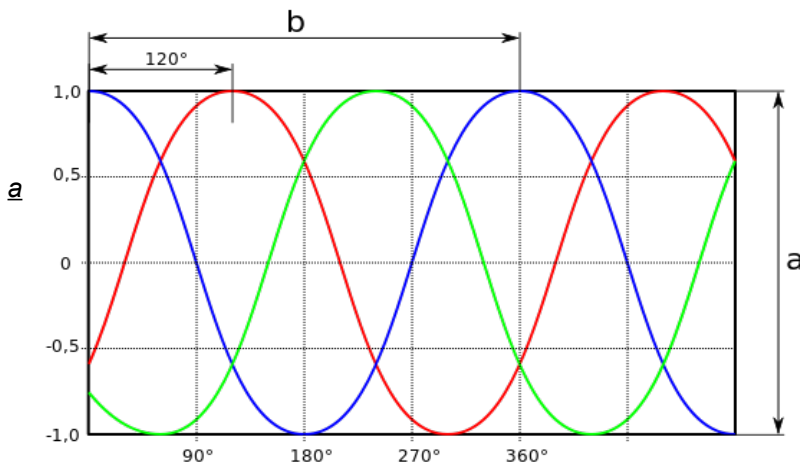
observar el shaft adherit a la bell, que girarà al estar posada correctament al voltant de l'estàtor.

Els motors *brushless* solen ser trifàsics, és a dir, formats per tres fases. Cada fase és el conjunt de bobines comunes, que s'activen i es desactiven alhora. En el motor *brushless* trifàsic més simple, hi haurien només tres bobines, cada una seria una fase. L'addició de bobines es realitza per a aconseguir més parell motor i més revolucions per minut.

Un motor *brushless* trifàsic tindria una actuació molt més acurada i potent si el sistema d'alimentació fossin tres ones sinusoidals (una per fase) exactament iguals, desfasades 120 graus l'una respecte l'altra, com es mostra a la imatge. Lamentablement, realitzar un control així és irrealitzable pel moment, i la bateria, a més, subministra corrent continu (DC). Per tant, el control dels motors serà de forma diferent. No obstant això, quan més petits són els motors menys rellevant és l'aspecte de la senyal d'entrada. En el cas de motors de la grandària que són utilitzats en aquest treball, les ones tipus trapezoïdal o fins

Multicòpter per a situacions de risc industrial

i tot quadrades (tipus digital) asseguruen un bon rendiment que s'apropa a l'ideal. Per tant, el sistema de control, que veurem al capítol següent, es basarà en ones quadrades, i també el funcionament del motor que està exposat en aquest capítol.



“Tomia” (usuari de Viquipèdia). “Diagram of three phase voltatge”. Wikipedia, the free encyclopedia, 22-01-2009. Sota llicència de Wikimedia Commons. Disponible a <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/3-phase-voltage.svg>

Figura 6. Mostra els valors del voltatge de cadascuna de les línies d'un sistema trifàsic respecte l'angle recorregut per l'alternador que genera la ona. També poden ser considerades respecte del temps, si se sapigués la velocitat de gir del mateix. El desfasament, de 120 graus, és fàcilment observable. “b” representa la llargada d'un cicle

complet. “a” representa el mòdul del voltatge de les línies. Per a un funcionament òptim del motor, així haurien de ser les línies de tensió. No obstant, no es pot realitzar amb les bateries que farem servir.

Per a aconseguir el moviment del motor, se segueixen aquest passos:

1. Una o dues fases es connecten a V+ (depèn del sistema de control, com veurem) i una altra a GND.
2. El corrent circula per les fases i activa els inductors, que actuen com a electroimants i fan girar l'anell d'imants permanents.
3. Quan els imants han arribat a la posició de màxima atracció, les fases es desactiven.
4. Després d'un temps (que és regulable), les fases es tornen a activar, aquest cop en una altra combinació, i els imants es tornen a desplaçar.
5. Un cop han arribat a la posició de màxima atracció, les fases es desactiven.
6. Es repeteixen els passos 4 i 5 successivament per a mantenir el motor en marxa. Els intervals entre activacions són regulables. Quan més temps, més lent anirà, quan menys (fins a arribar a interval nul) més ràpid funcionarà. Tot i que és operar el motor “a trossos”, a la pràctica l'efecte és el mateix que si fos continu.

Com que el mètode de control varia l'actuació del motor, la informació sobre els diferents mètodes de control és explicada al capítol següent. Així mateix també conté imatges dels passos determinats que segueix cada mètode.

Hem vist que la impedància del motor no varia, per tant tampoc ho fa la seva intensitat, només és variable l'interval d'inactivitat entre les activacions. Però per poder manipular les

dades característiques del motor amb més facilitat, considerarem el consum del motor en una determinada velocitat la mitjana de la intensitat que es consumeix mentre el motor opera en les esmentades rpm. És a dir, es considera que la intensitat augmenta quan l'interval entre activacions s'escurça, i que disminueix quan el mencionat període d'inactivitat es veu expandit.

Per exemple: un motor normal consumeix uns 20 A a màxima velocitat i 25 A a *burst* (quan va més del permès, només pot funcionar així durant un cert període de temps relativament curt). La mínima intensitat per a que giri, o *idle current*, és 1 A. Sabem que la intensitat característica del motor no varia, però sí varien els intervals de temps en els quals no circula corrent. Així, direm que funciona a 12,5 A (al 50% del *burst*, que és la seva velocitat màxima) quan els intervals d'inactivitat elèctrica tenen la mateixa duració que els períodes d'activitat magnètica, és a dir, quan el temps amb les fases activades representa el 50% total del temps que el motor estaria en funcionament si mantingués la mateixa velocitat per sempre. Anirà a 1 A quan els intervals de passada de corrent només representen un 4% (el percentatge de 1 sobre 25) del temps total de funcionament del motor si mantingués altra cop la velocitat constant per sempre.

Una aproximació diferencial és l'aproximació correcta (ja que el motor no comença a girar amb el consum ni el parell motor òptim per al vol, ni tampoc mantindrà la velocitat constant per sempre), i també és intuïtivament entenedora: en un interval de temps infinitesimalment petit, a consum màxim del motor el pas de corrent formaria el 100% d'aquest interval, i diríem que consumeix el màxim corrent que indiqués el fabricant; a consum mitjà, el temps que les bobines estiguessin activades representaria el 50% del màxim indicat pel fabricant; i a mínim el temps en el qual els electroimants farien moure el motor representaria el percentatge del corrent mínim indicat pel fabricant respecte el corrent màxim (també indicat pel fabricant).

A més de basar-se en el temps amb les fases activades i desactivades, també es pot fer la mateixa aproximació amb les revolucions per minut: el consum de corrent és directament proporcional a les rpm, i també a la duració del moviment en les activacions. És a dir, la relació entre el temps de fases activades/temps d'inactivitat elèctrica és la mateixa que entre temps en el qual el motor es desplaça/temps en el qual està quiet (ja

Multicòpter per a situacions de risc industrial

que com hem vist abans funciona a intervals), degut a que l'activitat magnètica és la causa directa, òbviament, del moviment rotatori del motor, i aquesta primera ràtio és proporcional a la quantitat d'rpm a la que estigui funcionant el motor. Quan més velocitat angular, més consum mitjà té el motor.

Si diem que el corrent varia segons la velocitat, també considerem que ho fa el voltatge, tot i que en realitat no és així. Amb el voltatge, seguirem el procés de la mateixa forma que amb la intensitat: la mitjana respecte el temps (està explicat de forma detallada més amunt). Així, a 50 % d'rpm, hi haurà 50% del voltatge total. Com podem veure, és paral·lel a l'augment de corrent mig de consum: a 50% d'rpm consumirem 50% de la intensitat màxima i operarem a 50% del voltatge al que estiguem connectats. Això introdueix una de les característiques més importants als motors *brushless*: els rpm/V. Ens diuen quantes rpm aconseguirem per volt. Així, un motor de 1000rpm/V anirà a 1000 rpm si subministrem 1 volt, a 2000 rpm si n'hi subministrem 2, a 3000 amb tres, etc. Però això no s'aprecia en aquesta característica. L'aspecte important és que ens informa de quantes rpm podrà assolir com a màxim, un valor molt important a l'hora d'escollir motor.

Cal tenir en compte que el sentit de bobinatge dels inductors, així com el sentit del corrent que circuli per ells, tenen influència sobre el tipus de camp magnètic. Si en una bobina amb enrotllament horari hi circula un corrent de dreta a esquerra, els pols magnètics (N i S) estaran invertits respecte un inductor amb també enrotllament horari però amb un corrent d'esquerra a dreta. De la mateixa forma, dos inductors amb el mateix sentit del corrent però l'un amb enrotllament antihorari i l'altre amb horari tindran els pols magnètics invertits l'un respecte de l'altre.

Com és obvi, els passos necessaris per a operar el motor són massa complicats per a establir un sistema de control no electrònic, per no dir que això implicaria la utilització de les escobretes, que són una de les desavantatges dels *brushed* enfront als *brushless*. Per tant, la única opció per a aconseguir el control dels motors *brushless* és un component de control electrònic. Són els anomenats Variadors de Velocitat (ESC en anglès), que ja hem vist mencionats abans. La teoria i funcionament dels ESC serà explicada en breu, al capítol 2.6. Com que hi ha diversos tipus d'ESC, també hi ha

Multicòpter per a situacions de risc industrial

diversos tipus de control de motor.

Hi ha un últim aspecte molt important a tenir en compte: els imants sempre seran en un nombre no divisible pel nombre de pols, ni tampoc pel nombre de fases, i en cas de ser-ho, el nombre resultant hauria de ser més gran que el nombre de fases del motor (per exemple un motor trifàsic de 9 pols i 12 imants). Això es fa per a que no existeixi una posició que no obligui a la part mòbil a girar al activar les fases. Ho veurem en unes poques línies als variadors de velocitat, en especial al sistema *sensorless*.

### >Tipus de motors brushless i altres aspectes

Hi ha dos tipus de motors *brushless* usats per a l'elaboració de multicòpters i de robots controlats a distància en general: els *outrunners* i els *inrunners*. Els *outrunners*, com el seu nom indica, tenen la part mòbil (els imants) a l'exterior. Són els que assoleixen més parell motor, que és una característica molt important en els multicòpters. Quan més pes tingui, caldrà una hèlix més gran (com veurem en l'apartat 2.8) i caldrà un parell motor més gran perquè el motor la pugui portar. Per tant, aquest tipus de motor és el que s'utilitza més comunament (ja que a partir de 550 grams de pes total es requereix gairebé sempre l'ús d'un *outrunner*).

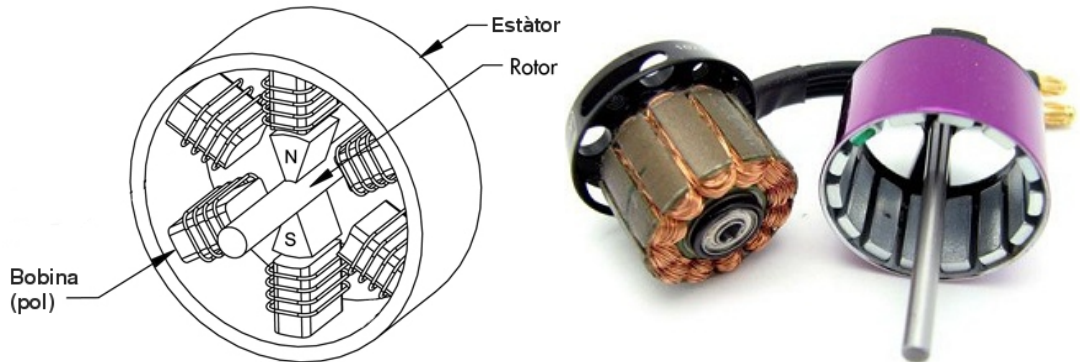
L'*inrunner* és el motor que té l'estator a l'exterior, i a l'interior el rotor amb imants adherits a ell. Quan els imants giren, el rotor gira, i ho fa per la part interior. Per això, l'*inrunner* és el que aconsegueix més revolucions per minut, sol triplicar i quadruplicar les rpm aconseguides per un *outrunner* de més o menys el mateix amperatge. El problema és que no aconsegueixen tant parell motor com els *outrunner*. Per això es solen fer servir en micromulticòpters (de menys de 500 grams i menys de 25 cm de motor a motor), on no es requereixen hèlixs grans, per tant quantes més rpm tingui el motor més impulsió tindrà, ja que no hi ha una resistència de gir notable, com sí que és en els multicòpters usuals. Els motor *inrunner*, però, no tenen l'estator elaborat de ferro, sinó que sol estar fabricat amb alguna resina plàstica. Per això, quan estan desconnectats, poden girar lliurement, a diferència dels *outrunner*, en els quals l'estator sempre està atret pels imants,



Multicòpter per a situacions de risc industrial

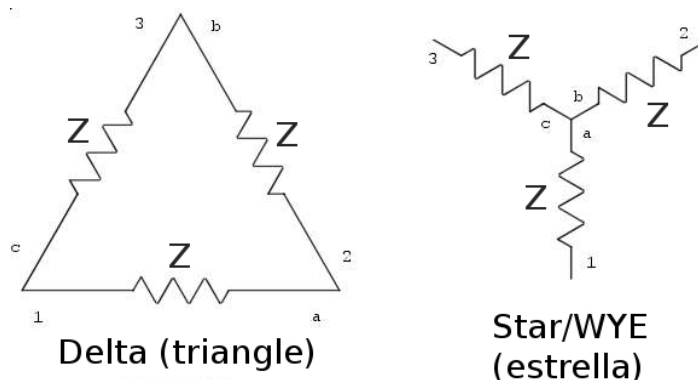
impossibilitant una rotació lliure quan estan desactivats degut al magnetisme natural de l'estator ferromagnètic.

Galil. Inrunner motor. GalilMC unltd. Sense data. Imatge disponible a [http://www.galilmc.com/support/servotrends/st\\_04\\_11/images/brushless-motor-web.jpg](http://www.galilmc.com/support/servotrends/st_04_11/images/brushless-motor-web.jpg)./  
Figura 7. Motor inrunner (esquerra) vs outrunner (dreta).

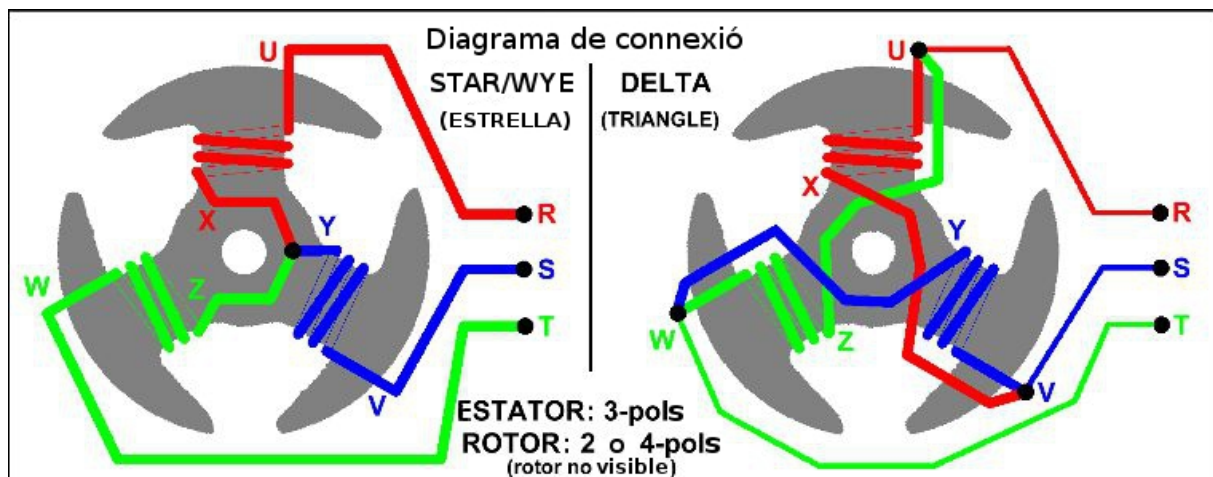


Un aspecte molt important en un motor *brushless* és la configuració de les fases i els imants. Hi ha molts tipus de configuracions, en les que varia el nombre de pols, imants o l'ordre entre ells. Podem fer dos criteris de tipus de connexió:

- Sobre la connexió entre les fases: Hi ha només dos tipus: Star/WYE (connexió en estrella) i Delta (connexió en triangle). Les dues configuracions són utilitzades en igual mesura, els proveïdors comercials de motors fabriquen dels dos tipus. La diferència entre les dues és que, generalment, WYE té un rendiment molt bo en situacions d'arrencada o desacceleració del motor. En canvi, Delta és molt més efectiva en situacions amb velocitat constant. Per un multicòpter, on hi han canvis sobtats, sol ser més usada la WYE, però la diferència entre la utilització d'una o altre no és apreciable.



Jordan Liske. Impedance connection diagram. 28-6-2012. Imatge traduïda de l'anglès al català. .Figura 8: Mostra la connexió triangle/estrella de les impedàncies (Z) a un motor trifàsic.



Jordan Liske. Motor phase connection diagram. 28-6-2012. Imatge traduïda de l'anglès al català. Figura 9: Es mostra el tipus de connexionat de les bobines en un estàtor teòric, en el motor trifàsic més senzill possible. També es pot apreciar el sentit de gir de les bobines per a provocar el camp magnètic adequat. Els motors reals tindrien més pols per cada fase.

- Sobre la situació de les bobines i el seu nombre, i el número d'imants: Aquí la varietat s'accentua. Només les més importants hi estan incloses. Les lletres indiquen a quina fase pertany cada bobina. Si la lletra és majúscula, l'enrotllament és l'ordinari (sentit horari). Si és minúscula, invers (antihorari).

>> 9 pols, 12 Imants: És utilitzat en configuració estrella per a motors petits. És l'estructura dels motors de lector de CD-ROM. El patró d'enrotllament és ABCABCABC.

>> 9 pols, 6 Imants: És utilitzat en motors de poca potència per a helicòpters, mode estrella. Patró ABCABCABC.

>> 12 pols, 14 Imants: És utilitzat en configuració Delta per a motors de potència mitjana/alta. S'anomena DLRK (Distributed- Lucas, Retzbach and Kühffus). El patró és AabBCcaABbcC.

>> 12 pols, 8 imants: És el motor de més alta velocitat. Utilitzat en Delta normalment. El seu patró d'enrotllament és ABCABCABCABC.

Construir un motor *brushless* requereix uns imants més forts que els utilitzats en un motor *brushed* usual degut a la seva estructura. Per això gairebé tots els motors *brushless* comercials tenen els imants anomenats Rare Earth Magnet, amb un poder d'atracció de fins a 1.4 Teslas (14000 Gauss). Aquest tipus d'imants va ser desenvolupat entre 1970 i 1980, i són els imants permanents més forts. N'hi ha dos tipus, de Neodimi (d'estructura cristal·lina  $Nd_2Fe_{14}B$ ) o de Samari-Cobalt (amb estructura interna de  $SmCo_5$ ). El primer tipus és el més comú i l'utilitzat per als motors *brushless*, ja que els de Samari-Cobalt són

Multicòpter per a situacions de risc industrial

molt cars. Al ser extremadament trencadissos i oxidables, estan sempre recoberts d'una capa de metall que els protegeix de l'exterior.



[N/A(unk. Date)] Figura 10. Mostra imants de Neodimi (esquerra) i de Samari-Cobalt (dreta). Es pot apreciar el recobriment que ambdós tenen, sent aquest, però, de material diferent.

Els imants de Neodimi poden estar fabricats per sinterització (compactació de pols a gran pressió i temperatura inferior a la de fusió per a formar l'estructura) o per lligament (solidificació ultraràpida). En el cas dels de Samari-Cobalt, el procés de creació només pot ser dut a terme per sinterització.

## **ESC (variadors de velocitat)**

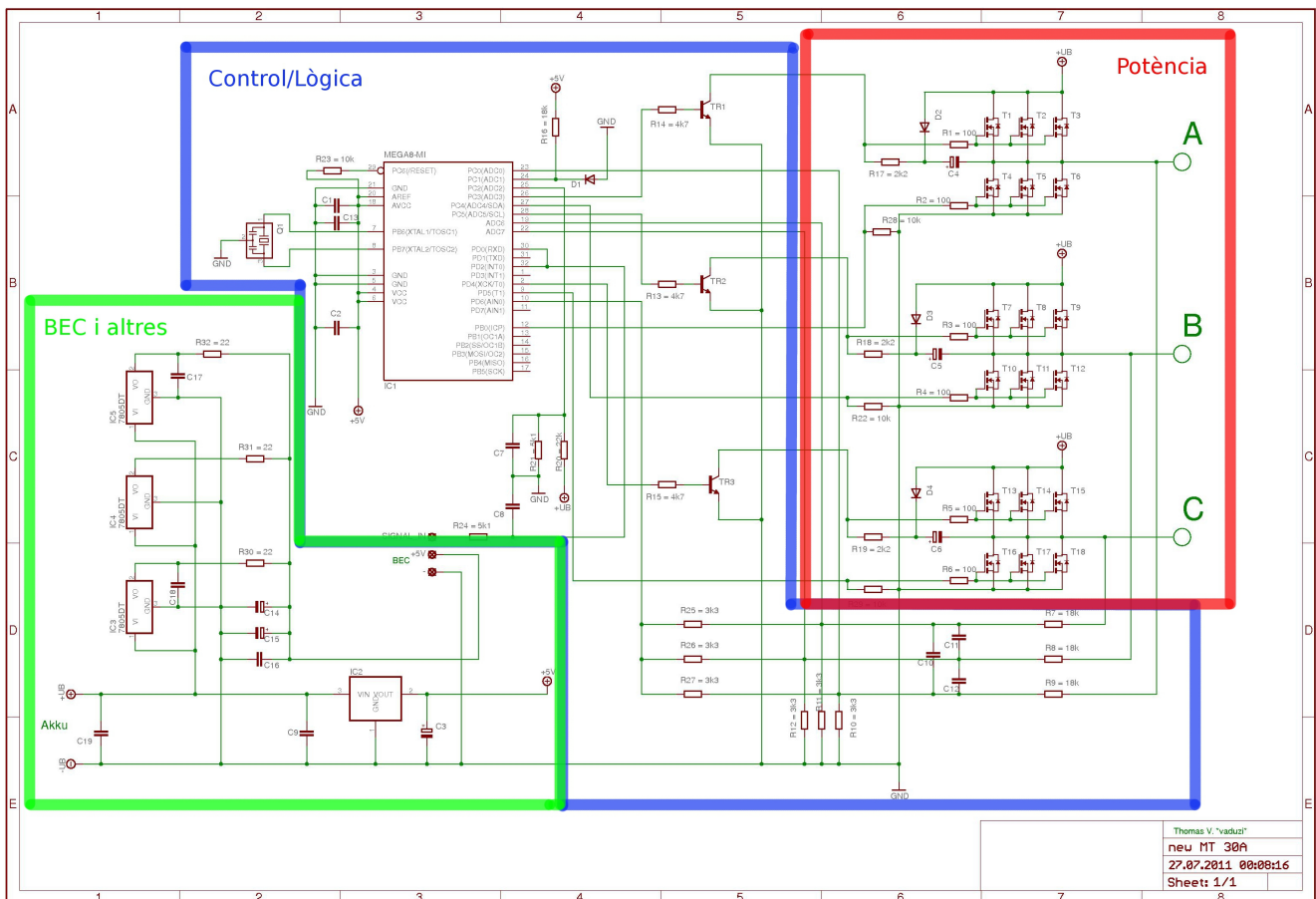
### >Teoria i funció

Els motors *brushless*, com hem vist, presenten un gran nombre d'avantatges respecte dels *brushed*. Tot i així, el fet que no tinguin escobretes comporta la necessitat d'un mecanisme de control electrònic, que va per separat. Aquests mecanismes de control són anomenats "variadors de velocitat" o, de forma més comuna, pel seu acrònim en anglès: ESC (*Electronic Speed Controller*).

La funció bàsica de l'ESC és coordinar correctament l'activació i desactivació de les fases d'un motor en l'ordre correcte per a aconseguir el moviment dels imants circumdants mitjançant l'atracció magnètica que es forma a les bobines de l'estator. Tot allò relatiu a parts específiques i funcionament del motor es troba al capítol anterior.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

Els ESC consten de tres parts bàsiques, cadascuna realitza una funció definida. La primera, el control (*logic* en anglès), és el centre de coordinació de l'ESC. La segona part, potència (*power* en anglès), és simplement el sistema de MOSFETs que deixa passar (o bloqueja, segons el moment) el corrent a cadascuna de les fases. Finalment, la tercera part (en alguns variadors no hi és), el regulador, o BEC en anglès, és aquella part que adequa el voltatge per a alimentar la FC o el RX, a més d'adaptar el voltatge provinent de la bateria per a donar corrent a l'MCU central.



Thomas V. ("vaduzi"). New Mystery Brand 30A ESC layout. 27-07-2011. Disseny independent i de lliure distribució i utilització. Versió 1/1. Imatge modificada per motius il·lustratius. Figura 11. Mostra les diferents parts en un ESC ordinari.

### - Control/Lògica

Aquesta és la que controla l'activació de les diverses fases, i la que rep el *feedback*, en cas de que hi hagi (s'explicarà en unes línies). La part central de control està formada per un MCU, que és el "cor" de l'ESC. Aquest llegeix les ordres provinents de l'FC i activa o desactiva les diferents parts del bloc de potència.

### - Potència

La part de potència, pel seu costat, és aquella que simplement rep l'ordre provinent de la secció de lògica, activant els MOSFETs que la formen i subministrant el corrent necessari per al motor. Hi ha moltes maneres de fer arribar la potència al motor (les discutirem més endavant), però per als exemples farem servir la més comú. Per cada fase del motor hi ha 2 MOSFETs d'alta intensitat, la meitat dels quals són NPN i l'altre meitat PNP (teoria dels diferents tipus de MOSFETs disponible a l'annex), a més d'un NPN de poca intensitat que ens servirà per a invertir el funcionament del PNP. El PNP està connectat d'aquesta manera: Drain a drain de l'NPN, Gate a senyal, Source al V+. El NPN està connectat així: Drain a Drain de PNP, Gate a senyal, Source a GND.

### - BEC

Aquesta part s'encarrega d'adaptar el voltatge que alimenta la FC, que al seu temps alimentarà el receptor, a més de alimentar el mateix MCU del variador en si. A vegades, aquesta part es separa en regulació interna i externa, ja que una de les seves parts dóna corrent a l'exterior, pel funcionament d'altres components, i una altra per al seu MCU mateix. De totes formes, en aquest projecte hem considerat englobar ambdues parts sota la mateixa secció. No tots els variadors porten BEC. En cas d'absència del mateix, ens trobem davant un variador de tipus *Opto-Isolated*, que no disposa d'adaptador de voltatge i que per tant genera la necessitat inherent de instal·lar un adaptador de voltatge independent (UBEC) a la bateria per a alimentar l'electrònica.

>El funcionament en general dels variadors és senzill: Reben una ordre tipus PWM a l'MCU, aquest últim interpreta la senyal i envia els polsos pertinents a les seves 6 sortides (en el cas dels variadors *sensored* i *sensorless*, que ara veurem) o 3 sortides (en el cas dels variadors *feedbackless*) per a activar les fases (i per tant les bobines que les formen) que calguin (varia per cada tipus de variador, al igual que les sortides necessàries), i fer girar els imants, que faran girar l'hèlix. El *feedback*, en els tipus de variadors que en tinguin, farà saber quan han arribat els imants al seu lloc, i per tant, quan cal començar a comptar l'interval de temps entre activacions, que variarà segons la informació rebuda de

Multicòpter per a situacions de risc industrial

la FC. Un cop aquest interval ha passat, hi torna a haver una activació però en un ordre diferent per a mantenir el moviment rotatori del motor. I d'aquesta manera es procedeix successivament.

Així, si volem anar lents, els intervals de temps entre activació i activació seran llargs, i si volem anar ràpids, curts, fins al punt (quan el motor es troba en fase *burst*) que l'interval serà pràcticament zero. El *feedback* marca el punt d'inici dels esmentats intervals.

### >Tipus de ESC i altres aspectes

Hi ha tres tipus d'ESC: Sensorless, Sensored i Super Simple. Tots realitzen la mateixa funció, però tenen diferències entre ells, i alguns posseeixen aspectes que altres no tenen. A continuació hi ha explicats els detalls de cadascun dels tipus i de quina manera controlen el motor. Estan explicats en ordre descendent de popularitat en el seu ús.

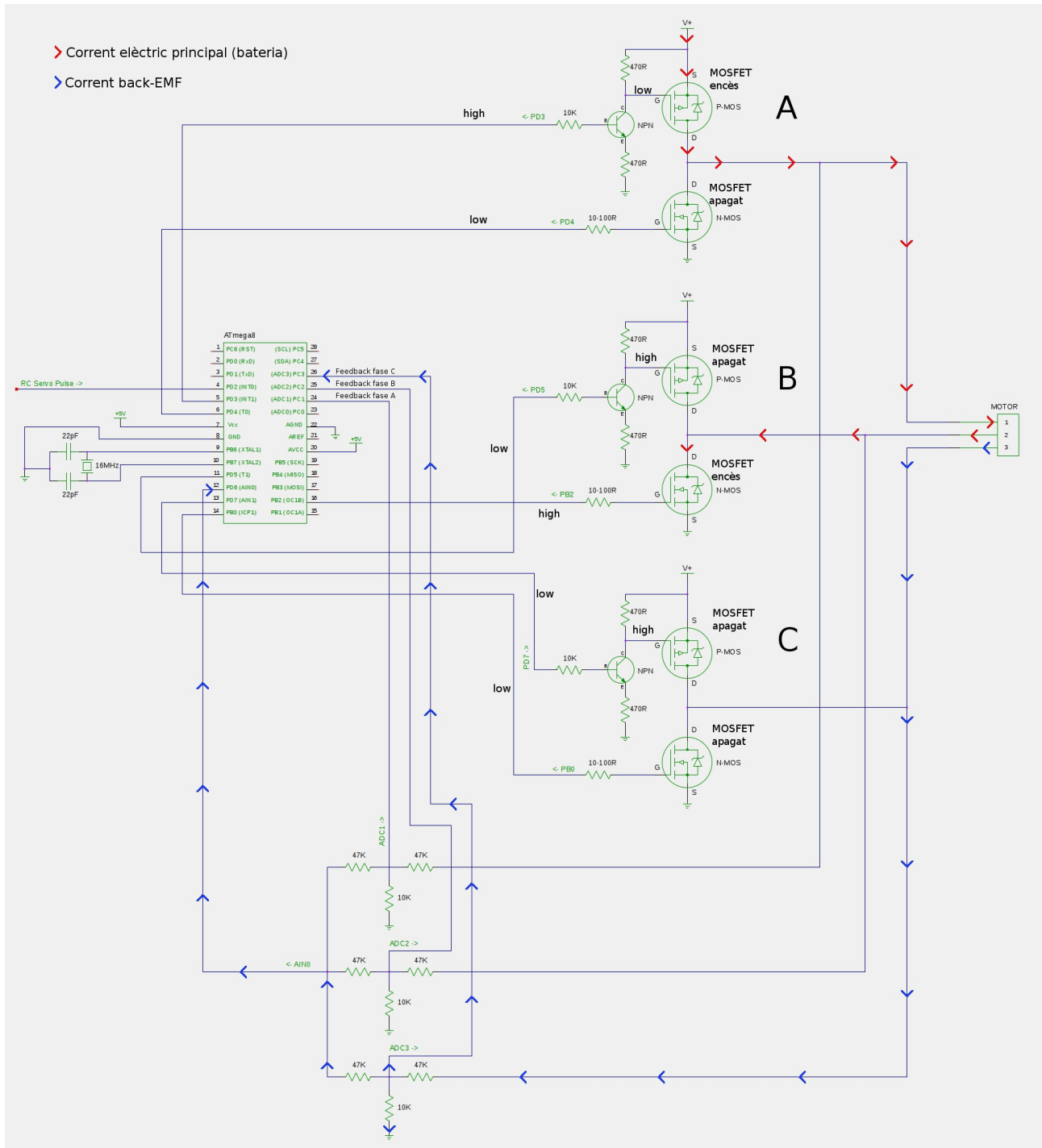
#### **--> Sensorless**

La primera de les divisions és la més utilitzada, ja que per a fer servir aquest tipus d'ESC no cal un motor amb sensors magnètics d'efecte Hall (sí són necessaris als ESC Sensored, com veurem més endavant). Bàsicament, el que fa és deixar una fase apagada i altres dues enceses a cada pas del motor (una a V+ i l'altra a GND). Aquesta fase apagada farà de receptora de feedback, a causa d'una propietat electromagnètica coneguda com el back-EMF (*back ElectroMagnetic Force*). Hi ha més informació sobre el back-EMF a l'annex (Annex 2: Teoria electromagnètica), però el que hem de saber per entendre el funcionament de l'ESC *sensorless* no requereix cap coneixement avançat. En essència, el que diu la llei del back-EMF és que, quan un imant passa per davant d'un inductor o bobina, aquesta experimenta el procés invers a l'habitual (quan un corrent passa per la bobina genera camp magnètic), generant així un impuls elèctric. És a dir, mentre que les altres dues fases enceses generen EMF a partir de corrent (fent girar els imants), la fase apagada fa el contrari: transforma el magnetisme en corrent un altre cop. Aquest impuls torna al MCU i és el que utilitzarem per al *feedback*.

Podem observar el funcionament de l'ESC *sensorless* intuïtivament a la imatge següent. A cada nova activació, el paper que realitza cadascuna de les fases és intercanviat: si a una

# Multicòpter per a situacions de risc industrial

activació A és a V+, B és a GND i C és apagada, a l'activació següent A estarà apagada, B a V+ i C a GND.



Toby Lockey. Example ESC, basic hardware. Qut-brushless-controller, sense data. Disponible a <http://code.google.com/p/qut-brushless-controller/>. Versió 1/2. Imatge modificada per motius il·lustratius./ Figura 12. Aquesta imatge és només il·lustrativa, no és l'esquema de cap variador real. Només es troba present la part de potència i la de control, per a mostrar el funcionament d'ambdues, que és el que realment difereix entre els diferents tipus de variadors. Podem apreciar les diferents senyals a l'ESC.



Com he esmentat al principi del capítol, hi ha diverses maneres de fer la part d'energia en un ESC. Tot i que als exemples dels diversos tipus d'ESC farem servir el més senzill (un NPN de baixa potència per invertir el funcionament del P-MOS i un N-MOS a sota), més endavant es presentaran les diverses maneres de fer el *driving* dels MOSFETs. Al dibuix es pot apreciar com per a connectar una fase a V+ (en aquest cas la A) s'envia un senyal *high* a l'NPN, que la inverteix a *low*, fent que el P-MOS s'activi i deixi passar el corrent des de V+. La senyal *low* a l'N-MOS fa que estigui apagat. Per a connectar la fase a GND (en aquest cas la B) cal invertir la senyal per a connectar-la a V+: *low* a NPN, que el transforma en *high* al P-MOS, fent que estigui apagat. La senyal a l'N-MOS serà *high* per tal d'activar-lo, i així fer passar la corrent per dues de les tres fases del motor. La fase apagada (en aquest cas la C) ho està perquè rep dos senyals *low*, així que els seus MOSFETs estan sense activar. És per aquella fase apagada on circularà el corrent provinent del back-EMF (tot i que seguint un camí diferent per tornar a l'MCU per l'entrada de *feedback*), proveint d'informació sobre la ubicació dels imants al microcontrolador.

És fàcilment observable el problema més gran que comporta l'ús d'aquesta forma d'ESC: els primer impuls, aleatori ja que no tenim *feedback* encara, és com jugar a cara o creu: pot ser que els imants estiguin al lloc ideal per a començar amb el màxim parell motor, o pot ser que no ho estiguin i triguem un cert temps a poder aconseguir-ho. Aquest és l'al·licient més gran per a fer servir motors *sensored* en tasques que requereixin un parell motor màxim des del primer moment. També és el motiu pel qual, com he dit ja a la teoria dels motors *brushless*, el nombre d'imants sigui no divisible pel nombre de bobines de l'estator, per a que no hi pugui haver cap posició de la part mòbil que no provoqui cap moviment (quan totes les forces d'atracció estan equilibrades i impedeixen que el moviment s'efectuï). Si no disposés d'un imant extra per a crear un nombre no divisible pel nombre de bobines de l'estator, en algunes situacions el motor no es mouria, per tant no notaria l'efecte de *feedback* del *back-EMF* i es cremaria degut a la llarga exposició dels cables a intensitat elevada.

Finalment, un últim aspecte a tenir molt en compte en aquest tipus d'ESC és la càrrega



Multicòpter per a situacions de risc industrial

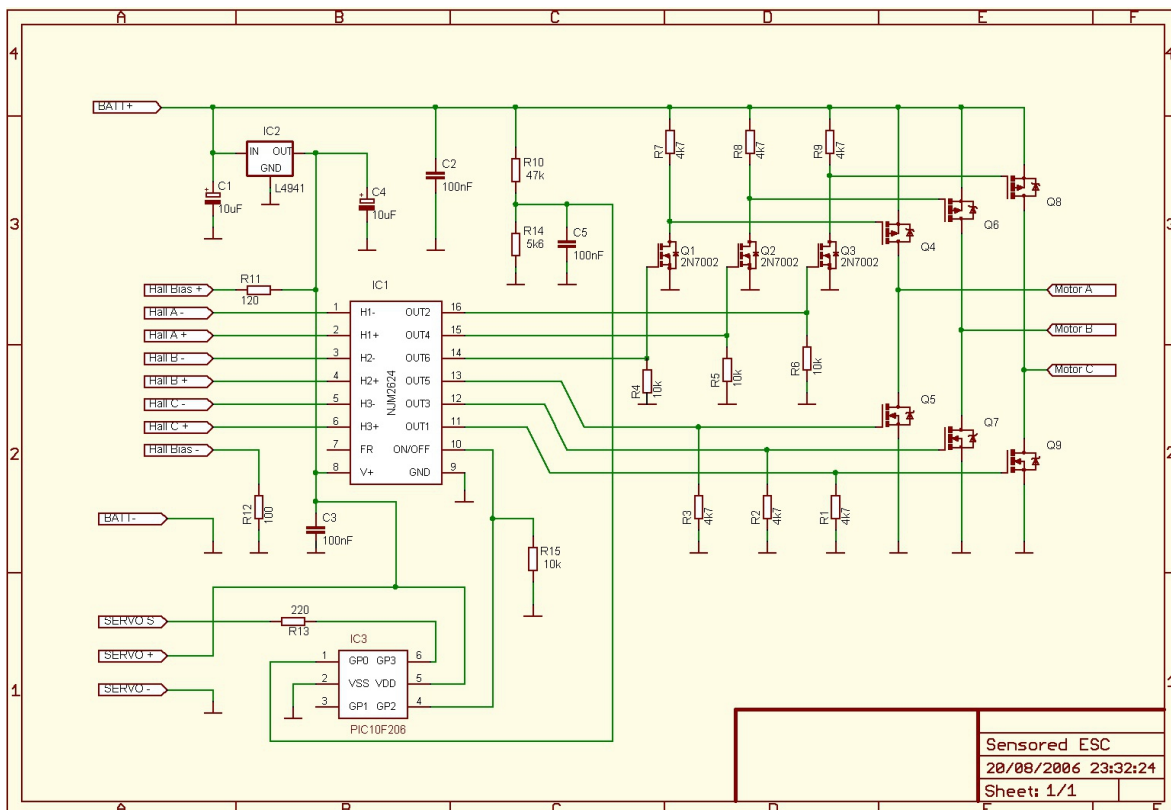
(hèlix) que porten els motors. Quan més gran sigui l'hèlix que tingui, més trigarà en arribar els imants a la posició adequada i més corrent passarà durant més temps. Si aquest temps és excessiu, pot malmetre l'estructura elèctrica. Per això cal que els motors disposin d'una màxima càrrega (grandària de l'hèlix) comprovada.

### --> Sensored

El segon grup és el que utilitza sensors magnètics d'efecte Hall per a detectar el pas dels imants per les fases. Són anomenats *sensored*. Utilitzant els sensors com a *feedback*, el MCU és capaç de controlar correctament el motor segons les ordres provinents del FC.

Cal dir que aquest grup és el menys nombrós, a causa dels pocs avantatges que tenen sobre els *sensorless* comparant-ho amb la dificultat de la col·locació dels sensors.

Un exemple de ESC amb sensors magnètics és aquest:



Thomas V. ("vaduzi"). Sensored ESC (DIY). RCGroups, 20-08-2006. Disseny independent i de lliure distribució i utilització. Versió 1/1./ Figura 13. Un variador de velocitat sensed usual.

Aquí, el funcionament en detall dels variadors és el mateix que l'explicat als *sensorless*,

Multicòpter per a situacions de risc industrial

amb la diferència que la fase que en aquests últims estigui col·locada a GND, en un *sensored* també serà a V+, i la que estigui apagada estarà connectada a GND.

L'avantatge principal d'aquest tipus d'ESC és que poden aconseguir un major parell motor, ja que tenen dues fases a V+ i una a GND (ja que no hi ha necessitat d'una fase per al *feedback*), i, sobretot, que el MCU sap en tot moment on són els imants, per tant permetent-li aconseguir el màxim de parell motor de forma instantània, a diferència dels *sensorless*, que al arrencar tenen uns instants d'incertesa de la posició.

A la figura 14 es pot apreciar l'adaptació d'un motor a *sensored* per a que els *sensored* ESC pugui operar amb ell. En concret aquest motor ha sigut dissenyat per a aplicacions de control molt precís a baixes revolucions, aspecte on el *sensorless* no rendeix de forma satisfactòria.



John Rob Holmes ("johnrobholmes"). *Sensored BLDC motor*. RCGroups, 27-09-2008. Versió 1/1./ Figura 14. La imatge mostra les diferents fases del motor per colors (R, G, B), així com els sensors magnètics d'efecte Hall (1, 2, 3). La "bell" (part giratòria) del motor està extreta per a permetre la visibilitat.

#### --> Feedbackless

L'últim tipus de variadors són els anomenats *Feedbackless*, i com el seu nom indica, són els més senzills de tots, ja que no tenen *feedback*. En aquest tipus de variador, el *feedback* simplement es deixa de banda, i el MCU només envia els senyals a les fases seguint una pauta temporal, sense esperar a rebre el *feedback* que li proporciona el coneixement de quan han arribat els imants.

És a dir, el seu cicle té 6 passos: n'hi ha tres on 2 cables són a V+ i un a GND i n'hi ha tres que són amb 2 cables a GND i un a V+.

Aquests ESC, per tant, tenen el defecte de poder provocar una parada momentània (amb momentània ens referim a més gran que l'interval previst entre activacions), ja que no

Multicòpter per a situacions de risc industrial

detecten quan arriba l'imant i poden accelerar massa el canvi de funció de les fases, provocant una parada que, tot i que curta, provoca que aquests tipus de variadors facin perdre rendiment al motor, a més de castigar-lo en més quantitat que els altres dos tipus.

No obstant això, són molt populars pel que fa a la construcció de variadors DIY (electrònica DIY ("Do It Yourself") és electrònica feta a mà), però no són comuns en dissenys comercials, de fet són pràcticament inexistent. El seu avantatge és el poc cost, ja que no necessiten un microcontrolador tant potent com els altres ni altres components només necessaris quan hi ha *feedback*.

## **Bateries**

### >Teoria i funció

La bateria (o bateries, en alguns casos) del multicòpter són una part essencial. Dóna corrent a tot el conjunt, un multicòpter porta només una bateria principal gairebé en tots els casos. Fins i tot l'electrònica està alimentada per la bateria mitjançant el BEC dels ESC o un adaptador de voltatge independent (UBEC), en el cas de que els variadors siguin tipus *Opto-Isolated* (que no disposen de BEC intern).

El funcionament general d'una bateria és senzill. Es basa en les anomenades reaccions REDOX (REDucció-OXidació): Hi ha un extrem carregat positivament, el Càtode, i un altre carregat negativament, l'Ànode. Entre ells dos hi ha un sòlid o fluid conductor, l'electròlit. Per l'electròlit es desplacen els ions positius, i pel circuit connectat a la bateria els electrons. Quan s'hi connecta un circuit, el flux d'electrons comença i la bateria es va descarregant. Si s'hi connecta una font d'intensitat, la bateria es carrega.

En la descàrrega de la bateria, el Càtode es redueix (guanya electrons) i l'Ànode s'oxida (perd electrons), és a dir, els electrons viatgen de l'Ànode al Càtode. Conforme l'Ànode es va oxidant, i per tant el Càtode es va reduint, els cations (ions positius), que es trobaven adherits als electrons que al principi eren situats en el mateix Ànode, van viatjant gradualment cap al càtode, ja que aquest últim està guanyant progressivament electrons.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

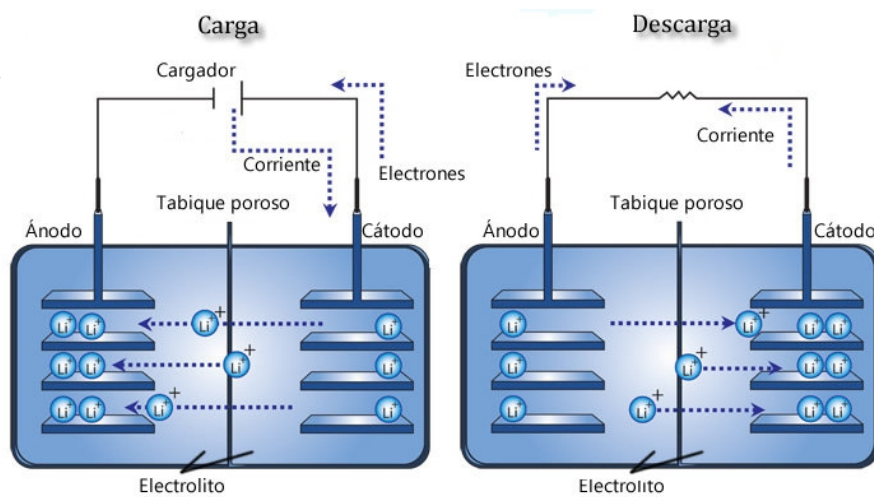
Quan més electrons perd l'Ànode, més en té el Càtode, i més flux de cations hi ha en l'electròlit. I si hi ha més flux de cations a l'electròlit, hi ha la mateixa quantitat de flux d'electrons pel circuit. La descàrrega durarà fins que el Càtode estigui replet d'electrons i l'Ànode estigui sense partícules negatives (a la pràctica, això no es pot realitzar fins a un punt tant absolut, ja que malmetria la bateria). En la càrrega, la polaritat i el procés s'inverteixen. Ara, el corrent anirà del Càtode a l'Ànode (del + al -). Per tant, els electrons s'aniran acumulant a l'Ànode (reducció), mentre que el Càtode s'anirà "buidant" de càrregues negatives (oxidació). Aquest procés continuarà fins a que no restin partícules negatives al Càtode. Ambdues reaccions es poden veure a la figura 15:

Luis Moreno Martínez. "¿Se necesita química Redox para mandar un SMS?" El Cuaderno de Calpurnia Tate, 07-03-2012. Imatge Disponible a

<<http://elcuadernodecalpurnia.tate.blogspot.com.es/2012/03/quimica-redox-en-tu-iphone-blackberry.html>>./

Figura 15. Reacció REDOX en una bateria de Liti general. Podem observar el canvi de polaritat i reacció en la càrrega respecte de la descàrrega.

A la càrrega, l'Ànode acumula electrons i cations, mentre que el Càtode s'oxida i es llibera de càrregues. A la descàrrega, el procés és invers. Com es pot apreciar, el sentit teòric del corrent sempre va en sentit contrari al flux real d'electrons.



©2006 HowStuffWorks

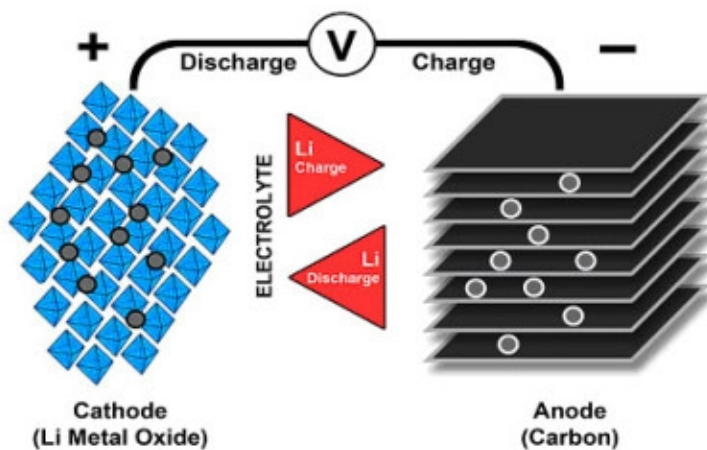
Com ja sabem, la càrrega només és possible si subministrem a la bateria un corrent extern que mobilitzi les càrregues de nou al seu lloc inicial, per a que puguin produir una reacció espontània (descàrrega) un cop el circuit es completa. Com que la descàrrega és espontània, la càrrega, que és el camí invers, no ho pot ser. El que ens informa de l'efectivitat o espontaneïtat d'una reacció química és el que s'anomena *Energia Lliure de Gibbs (G)*. És el seu increment, però, el que ens indica si la reacció és espontània o efectiva (considerant G inicial abans de la reacció i G final després de la reacció). Si  $\Delta G < 0$ , la reacció és espontània, i quan més petit sigui el valor, més efectiva serà. Pel contrari, si  $\Delta G > 0$ , la reacció no és espontània i cal d'una energia externa (corrent extern en la càrrega, per exemple) per a realitzar-la, i quan més gran sigui el valor, més energia

Multicòpter per a situacions de risc industrial

caldrà.

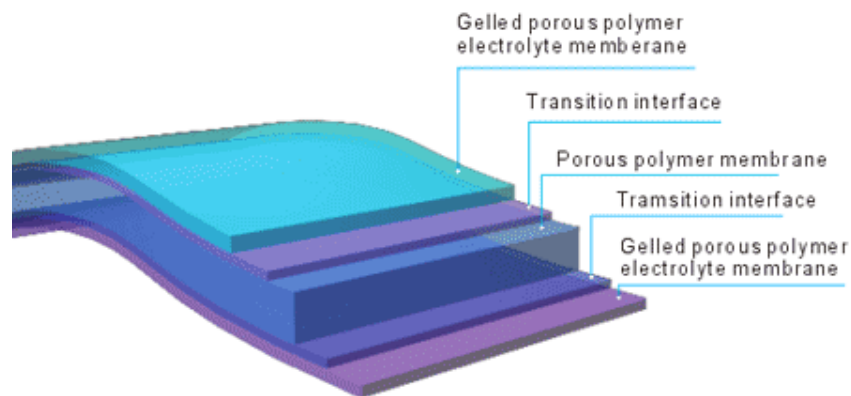
Hi ha molts tipus de bateries (NiMH, NiCd, Lithium-Iron-Phosphate, Lead-Acid), però en aquest treball ens centrarem en la més comuna i eficient en la tasca a realitzar: La bateria de Lithium-Ion-Polymer (Polímer de Liti ionitzat), o LiPo per a abreviar. El multicòpter és un tipus d'aeronau que requereix un amperatge molt gran en molt poc temps, degut al tipus de motors usats (*brushless* de gran potència) i als canvis bruscos i ràpids dels mateixos. Per tant, necessitem una bateria amb una gran capacitat de descàrrega en molt poc temps, i que ens doni una duració acceptable. Això només ho podem aconseguir amb la màxima eficiència amb les bateries LiPo.

La LiPo pertany a la família de bateries Lithium-Ion (o Li-ion per a abreviar), però es diferencien d'elles en que, en comptes de tenir el Càtode (+) d'òxid ferrós de Liti, com és usual en aquest grup, està realitzat amb un polímer a base de Liti. L'Ànode (-) és comú a tota aquesta família de bateries, sempre està format a base de Carboni. Quan es produeix la descàrrega, a través de l'electròlit els electrons viatgen de l'Ànode al Càtode, com hem explicat abans. De la mateixa manera, els cations (que són Liti en aquest tipus de bateries) realitzen el viatge per l'interior de l'electròlit. A la càrrega, ambdues partícules recorren el camí invers, i necessiten d'un estímul. Podem observar l'estructura a la Figura 16:



Battery University. Li-ion battery scheme. 22-06-2011. Disponible a [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries) / Figura 16. Circuit bàsic d'una bateria de Lithium Ion. L'Ànode és a base de carboni i el càtode és òxid ferrós de liti. Els cations de liti circulen per l'electròlit. A la càrrega, els cations van de l'Ànode al Càtode i a la descàrrega a la inversa.

Les bateries LiPo es diferencien de les Lithium-Ion en dos aspectes: El càtode i l'electròlit. El càtode, a diferència de la Li-ion, està format per un polímer artificial a base de Liti. Aquest polímer és més efectiu a l'hora d'emmagatzemar molta càrrega en molt poc temps. L'electròlit de la LiPo, a més, està fet d'un gel conductor. Els electròlits són sempre més efectius si són fluids o gels, però quan més líquid sigui més risc d'incendi o explosió hi ha. Els electròlits, si s'exposen a l'aire (per exemple, si la bateria és foradada) provoquen una reacció violenta que pot acabar en incendi o explosió. És per això que moltes bateries, degut a aquest risc, recorren a un granulat sòlid per a aquesta funció, aspecte que minva molt la seva efectivitat. En canvi, el gel proporciona un terme mig perfecte entre el fluid i el granulat, i així disposen d'un gran amperatge amb un risc notablement menor que amb electròlit líquid. No obstant, un electròlit d'una bateria LiPo està compost de moltes més parts i és increïblement més complex. A la figura 17 podem observar una estructura simplificada d'un electròlit de bateria LiPo.

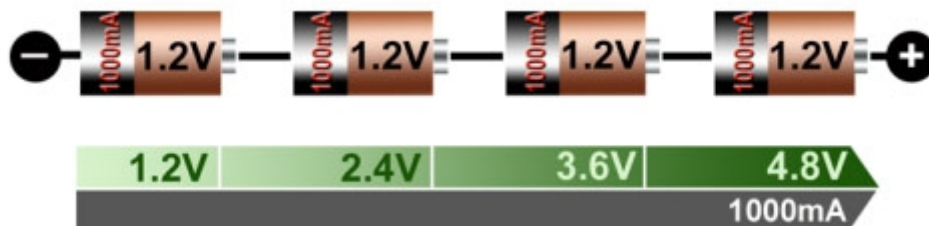


*Gaston-Lithium. Polymer Tech. Gaston-Narada, data desconeguda. Disponible a <<http://www.gaston-lithium.com/tech-certificates.html>> / Figura 17. Electròlit de bateria LiPo. De dalt a baix: Membrana gelatinosa de l'electròlit, Capa de transició, membrana de polímer porosa, Capa de transmissió, Membrana gelatinosa de l'electròlit. Una major agrupació de filtres porosos i components tipus gel aconseguix obtenir un major rendiment pel que fa a la quantitat de descàrrega.*

Un problema de les bateries LiPo és que necessiten calor per a realitzar la tasca amb més eficiència. Així, si la bateria està a 25 graus abans de començar a fer-la servir tindrà més eficiència que si comencéssim a usar-la a 5 graus. No obstant, la bateria es va escalfant espontàniament conforme la descàrrega es prolonga.



Totes les bateries LiPo estan estructurades en forma d'agrupació de cel·les de bateria individuals connectades en sèrie entre si. Cada cel·la té típicament 3,7 Volts de valor nominal. La capacitat de càrrega o descàrrega així com els miliAmpers per hora (mA\*h) que pot donar varien en funció del model de cel·la. Les bateries normalment utilitzades són agrupacions de dues cèl·lules o més. Conforme hi ha més cèl·lules que formen la bateria, el voltatge incrementa al estar situades en sèrie. Així, una bateria de dues cèl·lules tindrà 7,4 V, una que en tingui tres entregarà 11,1 V, i una de quatre ens donarà 14,8 V. No obstant això, el valor quan les bateries estan absolutament carregades augmenta 1,2 V, de mitjana, sobre el valor nominal del *pack* de cèl·lules. Així, una que en tingui tres arribarà fins a 12,3 V al estar totalment carregada. Com que estan connectades en sèrie, implica que el màxim corrent a donar serà el mateix que el d'una cel·la sola.



Battery University (courtesy of Cadex). "Serial connection of four NiCd or NiMH cells". Battery University, 06-10-2010. *imatge disponible a* [http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations). Figura 18. Connexió de quatre bateries en sèrie. Com es pot veure, el voltatge és incrementat, però la intensitat màxima és la mateixa que la d'una cel·la individual.

Hi ha una simbologia estandarditzada per marcar la capacitat de càrrega/descàrrega de les bateries, així com per a indicar quantes cèl·lules tenen. Cada cèl·lula es marca amb una S, per tant una de dues cèl·lules seria 2S, de tres 3S, de quatre 4S, i així successivament.

Per a marcar quin grau de descàrrega o càrrega poden arribar a suportar les bateries, s'especifica mitjançant la quantitat de "C"s que tingui. Una bateria amb capacitat de descàrrega d'X Cs ens indica que pot arribar a donar corrent fins a X vegades la quantitat que donaria constantment en una hora (els mAh que tingui especificats). Per a posar un exemple: Una bateria de 4000 mAh pot donar-nos 4 A durant una hora sencera abans d'esgotar-se. Si aquesta bateria tingués un ratio de descàrrega de 25C (un valor força comú), ens podria arribar a donar 100 A com a màxim (4000 mA\*25), i ens duraria 144

Multicòpter per a situacions de risc industrial

segons, és a dir, 2 minuts i 24 segons (això és 1h/25). Naturalment, les bateries utilitzades mai haurien d'arribar a la seva capacitat màxima de descàrrega, per raons de seguretat i duració de la vida de la bateria. Per tant, caldrà sempre escollir una bateria amb un ràtio de, com a mínim, 15 C més del necessari. Els aspectes tècnics sobre escollir bateries seran discutits a la part de materials al disseny.



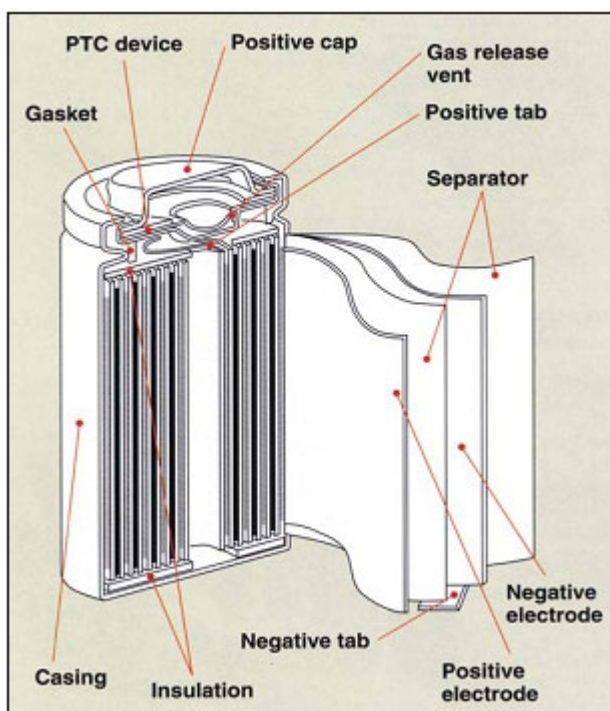
Héctor Ortega. Bateria amb etiquetes. 28-12-12. / Figura 19. Bateria típica amb senyalització de valors de referència més importants. A) mA\*h, B) Ràtio de descàrrega, C) Nombre de cel·les i voltatge, D) Resistència interna (Ohm matched vol dir que ha passat per tractament per a tenir molt poca resistència interna).

### >Tipus de bateries i altres aspectes

Hi ha molts tipus de cèl·lules de bateria pel que fa a la seva forma i estructura, tant interna com externa. A continuació en citaré els més importants:

- Cèl·lula cilíndrica:

És el tipus més usual. Té bona resistència mecànica i es pot carregar relativament de pressa. Encara que no es fa servir en tipus LiPo per la seva poca capacitat de descàrrega, és una forma popular a les Li-ion.



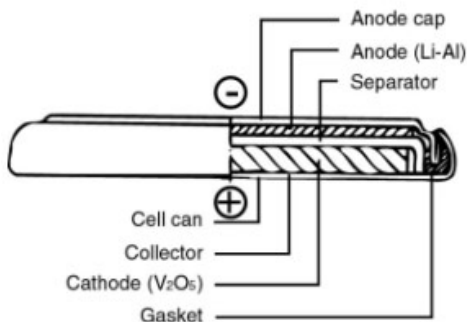
Battery University (Sanyo courtesy). "Cylindrical cell inner structure". Battery University, 01-05-2011. Disponible a [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells) / Figura 20. Bateria de tipus cilíndric. Es poden apreciar els sistemes d'insolació del negatiu al positiu (làmina separadora), així com els connectors per a el seu ús a la descàrrega. Una part molt essencial també visible a la figura és el conducte de descàrrega de gas, esclatxa per on els gasos a vegades creats o simplement el calor poden sortir. A diferència d'altres tipus de cèl·lules, aquesta és de protecció (casing) dura, feta de metall. Les làmines s'agrupen en plans al voltant de l'eix.



Multicòpter per a situacions de risc industrial

- Cel·la de botó:

És una de les usades en dispositius electrònics petits. No poden ser ni LiPo ni Li-ion.

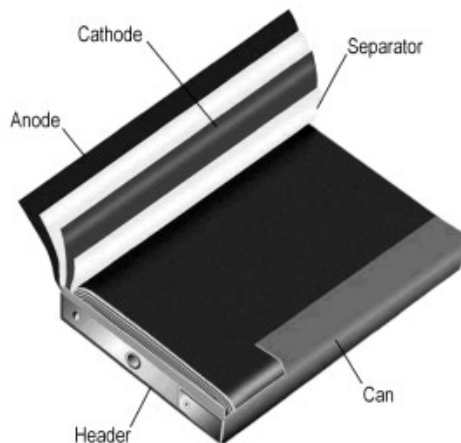


Battery University (courtesy of Panasonic). "Button cell inner structure". Battery University, 01-05-2011. Imatge disponible a [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells). / Figura 21. Estructura interna de la pila de botó. Es pot apreciar la juntura ("Gasket"), estanca en aquest cas, que no permet que surti el calor ràpidament. Per això aquestes piles tenen un període de càrrega molt lent.

- Cel·la rectangular:

Una de les configuracions més populars fa pocs anys.

D'ús corrent a les LiPo i Li-ion. Ara, però, han sigut substituïdes per les *Pouch Cell*, que veurem més endavant.



Battery University (courtesy of Polystor Corporation). "Prismatic cell inner structure". Battery University, 01-05-2011. Imatge disponible a [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells). / Figura 22. Cel·la tipus prisma. Té les connexions en tipus llengüeta, que pot anar a parar a un cable o no. Es sol usar per a bateries Li-ion, però ara són més populars les configuracions tipus *Pouch Cell*.

- *Pouch Cell*:

És igual que la cel·la prismàtica, però sense carcassa rígida. En aquesta configuració, la carcassa esdevé una fina làmina. El problema d'aquest tipus de cel·les,

però, és que poden inflar-se degut als gasos alliberats en un mal funcionament puntual. No obstant, és un fet que ocórrer poques vegades. En aquest tipus de bateria, els components (Ànode, Càtode, electròlit, material porós) també s'estructuren en làmines flexibles, com en els altres tipus de bateries.



Battery University (courtesy of Cadex). "Pouch cell and swollen Pouch cell". Battery University, 01-05-2011. Imatge disponible a [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells). / Figura 23. Cel·la tipus *Pouch Cell*, i una cel·la de les mateixes característiques inflada degut als gasos.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

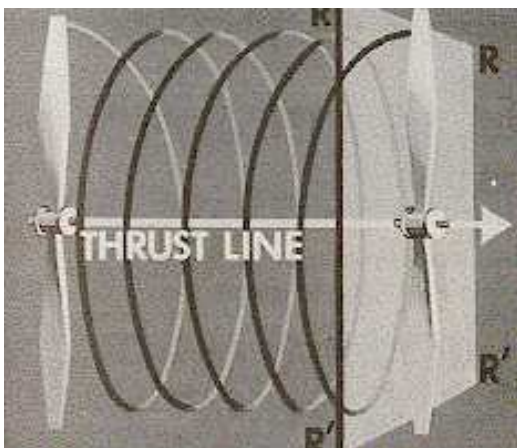
Aquest tipus de cel·la és l'utilitzat per a realitzar el 95% de les bateries LiPo comercials. Les cel·les són agrupades amb les llengüetes interconnectades, i després soldades a cables d'amperatge màxim adient. Tot això és envoltat de plàstic semi-rígid, i finalment de plàstic termoretràctil que ho manté tot junt, i possibilita que els cables puguin ser utilitzats. Finalment, una etiqueta enganxada a sobre informa de les característiques de la bateria, com hem vist abans.

## Hèlixs

### >Teoria i funció

Les hèlixs són una part on hi ha una gran teoria d'aerodinàmica i mecànica de fluids al darrere. Tot i que en aquest treball no hi aprofundirem, sí que calen unes nocions bàsiques per a saber com funcionen i quina es farà servir, i sobretot perquè.

>Hi ha dos principis que fan que l'hèlix funcioni, un més simple i l'altre més complex. El primer principi de funcionament de les hèlixs és molt senzill: Cal que l'aire es mogui per a que l'objecte on està situada l'hèlix també ho faci. És a dir, una hèlix normal (*tractor*) fa que l'aire vagi cap a enrere, fent anar la hèlix (i allò a que estigui subjectada) anar cap a endavant. És a dir, la forma de l'hèlix agafa l'aire i l'empeny cap a enrere, desplaçant-se llavors ella mateixa cap a endavant. És, simplement, la llei d'Acció i Reacció: una força aplicada en un cos provoca una força oposada de característiques iguals i sentit contrari. Per a aconseguir això, és clar, cal aconseguir que l'aire no tingui temps d'adaptar-se al moviment, ja que en cas de fer-ho no es mouria cap a enrere, sinó que simplement es mouria i envoltaria l'hèlix tota l'estona. Per a evitar-ho, cal que la rotació sigui molt ràpida. Aquest primer principi és el mateix que el de les hèlixs de vaixell.

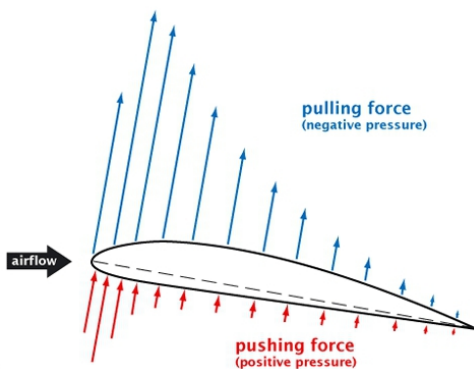


Fondear. "Hélices barco". Fondear S.L. 2007. Imatge disponible a [http://www.fondear.org/infonautic/barco/Motores\\_Helices/Helices\\_Empuje/Helices\\_Empuje.htm](http://www.fondear.org/infonautic/barco/Motores_Helices/Helices_Empuje/Helices_Empuje.htm). / Figura 24. Primer principi de funcionament de les hèlixs. Gràcies a les pales inclinades, les hèlixs s'"insereixen" al líquid.

El segon principi és el mateix que el de les ales fixes dels avions, ja que la hèlix, en realitat, també té un perfil alar, tot i que varia en funció de la distància al

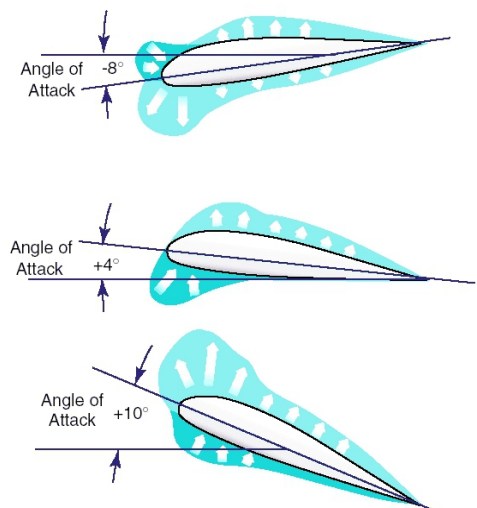
centre i és lleugerament diferent. El motiu per a la força de sustentació d'un avió, doncs, és el mateix que un dels que provoca a la hèlix la força cap a endavant:

La base es troba en la diferència de pressions entre la seva cara de més recorregut (extradós), i la de menys recorregut (intradós). Això es deu a que el perfil alar "talla" l'aire (estant el fluid amb comportament laminar) però no l'obstrueix, sinó que només en modifica el flux. L'aire que passa per sobre va més de pressa que el de sota, i tots dos es troben al mateix punt ja que el corrent no ha estat trencat. Quan més de pressa circula l'aire, segons el principi de Bernoulli (aplicat a superfícies equipotencials), menys pressió esdevé, formant per tant una pressió més dèbil (a més d'algunes zones de buit) a l'extradós, que "tira" cap amunt. La diferència de pressions creada entre les dues cares del perfil fa que el perfil alar experimenti una força amb direcció i sentit cap al punt de menys pressió. És el que s'anomena efecte Venturi. Tot això és fàcilment observable a la Figura 25:



First Flight. "Bernoulli effect on an airfoil". First Flight, sense data. Imatge disponible a <http://weblab.open.ac.uk/firstflight/forces/>. /Figura 25. Observem l'efecte de Bernoulli sobre un perfil alar. Es pot veure com la diferència de pressions crea una força ascensional.

Cal tenir en compte que la direcció de la força i també el seu mòdul canvia segons quin angle d'atac tingui. L'angle d'atac és simplement amb quin angle respecte l'horitzontal està l'eix del perfil alar, com es pot apreciar a la Figura 25. Quan l'angle d'atac és de 0 graus, la força proporcionada, tot i que depèn del disseny, sol ser relativament petita, però sol presentar angle de 90 graus respecte l'eix, és a dir, cap amunt. Quan anem incrementant l'angle d'atac, la força canvia la seva direcció, encarant-la més cap a endarrere, però augmentant el seu mòdul. De la mateixa forma, si la velocitat és incrementada, també augmentarà el mòdul de la força d'ascensió. Si l'angle d'atac esdevé negatiu, la força s'anul·la o s'encara cap a sota.



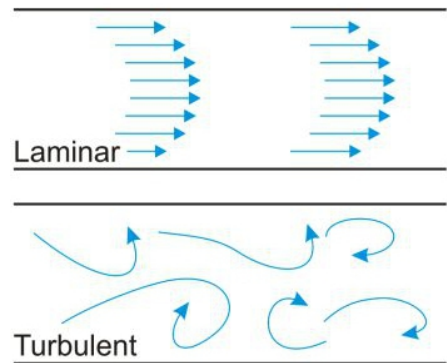
Free Online Private Pilot Ground School. "Pressure distribution on an airfoil". Free Online Private Pilot Ground School, sense data. Imatge disponible a <http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/aerodynamics.html> /Figura 26. Distribució de les

Multicòpter per a situacions de risc industrial

forces de pressió amb diferents angles d'atac. Com es pot veure, un angle d'atac més gran proporciona una força ascensional també més gran. En canvi, un angle negatiu proporciona força cap al terra.

Aquest últim principi, però, només és vàlid quan el fluid es mou a una velocitat relativament gran i amb un comportament fortament laminar. En l'escenari d'un comportament turbulent del fluid, la força generada decreix considerablement. En aquests casos pren més importància el primer principi que el segon. És per això que les hèlixs dels vaixells, utilitzant l'aigua com a fluid per a impulsar-se, sent l'aigua de caràcter turbulent, no utilitzen el segon principi.

Eni Generalic. "Laminar flow". Croatian-English Chemistry Dictionary & Glossary. 1 Jan. 2013. KTF-Split. Imatge disponible a <<http://glossary.periodni.com>>. / Figura 27. Comportament laminar i turbulent d'un fluid en una tovera. El comportament laminar forma un front de fluid d'estructura parabòlica, mentre que el turbulent és desordenat i completament imprevisible.

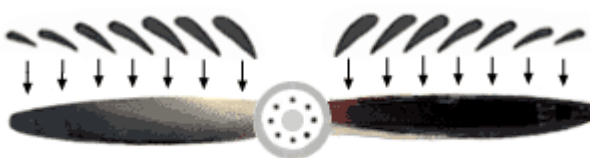


> Amb el que hem vist fins ara, sabem que les hèlixs han de combinar els dos principis explicats anteriorment. Per tant, caldrà que desenvolupin una forma característica que ho permeti:



Killer Planes. SlowFly Propeller. Killer Planes Shop, sense data. Imatge disponible a <[http://www.killerplanes.com/sites/default/files/imagecache/product\\_full/11x4.7\\_Slow\\_Fly\\_Prop.jpg](http://www.killerplanes.com/sites/default/files/imagecache/product_full/11x4.7_Slow_Fly_Prop.jpg)>. / Figura 28. Forma característica d'una hèlix. S'aprecia el canvi de perfil, la forma de les pales, el seu angle, la llargada i els extrems.

Com podem veure a la figura següent, l'angle d'atac i el perfil van variant per a aconseguir un equilibri en que la mitjana de les forces sigui la més gran possible, i, a més, una compensació de les direccions tal que la força resultant tingui l'angle més aproximat possible a 90 graus respecte l'horitzontal.

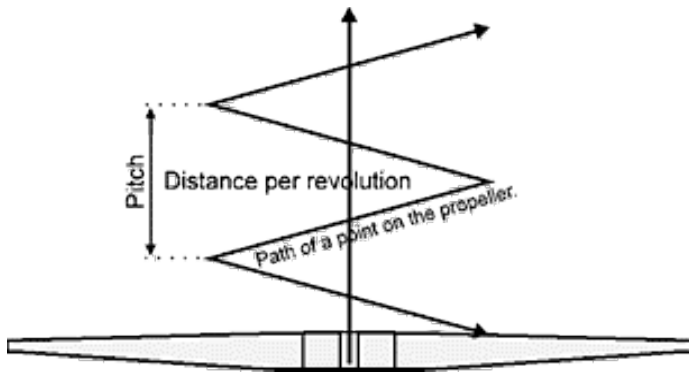


Miguel Ángel Muñoz. "Perfiles y ángulos de incidencia". ManualVuelo, sense data. Imatge disponible a <<http://www.manualvuelo.com/SIF/SIF32.html>>. / Figura 29. Variació del perfil i angle d'atac al llarg del recorregut de l'hèlix. La força ascensional és el més aproximada possible a la direcció de l'eix de gir de les hèlixs.

Fig.3.2.3 - Perfiles y ángulos de incidencia.

No obstant, com ja sabem, i com es pot apreciar als esquemes, aquest no és l'únic component que es té en compte en el disseny d'una hèlix, de fet és el secundari. L'aspecte més important és una variable que cal explicar: el *pitch*.

El *pitch* és el recorregut que faria l'hèlix sobre l'eix de rotació al realitzar una rotació completa, degut a la primera propietat de les hèlixs explicat més amunt (desplaçament relatiu de l'aire). Com és obvi, depèn de l'angle de la pala respecte de l'horitzontal, molt semblant a l'angle d'atac (però considerant una pala horitzontal, no un perfil), i també depèn del radi. El *pitch* de l'extrem de l'hèlix serà molt més gran que el *pitch* en un punt mitjà de la hèlix si l'angle en ambdós punts és el mateix. És a dir, si són pales rectes amb el mateix angle a tot el recorregut, el *pitch* augmenta segons la distància respecte el centre augmenta. Per a una hèlix amb un angle d'inclinació de 45 graus, el *pitch* seria molt més gran a 10 cm de distància que a 2 cm, per tant, es blegaria cap a amunt. De fet, fins i tot en *pitch* constant, l'hèlix es sol blegar una mica. Es pot apreciar a la Figura 30:

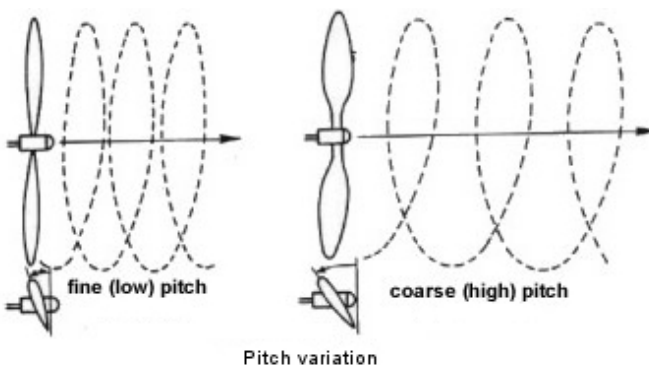


*The Bolly Book : Propeller theory. Pitch description. ??-??-2007. Imatge disponible a <<http://www.bolly.com.au/book/Book.php?Chapter=2&Section=2>>/*

*Figura 30. Descripció del pitch d'una hèlix. Com podem veure, és la distància sobre l'eix de rotació que realitza l'hèlix al fer una rotació completa. Si l'hèlix tingués pales amb el mateix angle durant tot el recorregut, el pitch no seria*

*constant i l'hèlix es blegaria.*

Per tant, com es pot veure, el *pitch* NO és constant en una hèlix de pales planes. Aquesta és la causa de que l'angle varii conforme el radi augmenta. Per això les hèlixs tenen aquesta forma característica còncaua per dins. El *pitch* sol ser constant en una hèlix a partir d'un terç del seu radi total, d'on conforme ens anem allunyant l'angle va decreixent, però el *pitch* es manté el mateix al llarg de qualsevol sigui la seva llargària.



partir d'un terç del seu radi total, d'on conforme ens anem allunyant l'angle va decreixent, però el *pitch* es manté el mateix al llarg de qualsevol sigui la seva llargària.

*Pilot Friend. Variable Pitch Propeller. Pilot Friend, sense data. Imatge modificada. Imatge original disponible a <[http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/images/50.jpg](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/images/50.jpg)>. /*

Multicòpter per a situacions de risc industrial

*segons l'angle de l'hèlix. Si l'angle augmenta, el pitch també ho fa.*

Cal dir, però, que no totes les hèlixs tenen *pitch* constant. Hi ha molts models d'hèlixs en les que el *pitch* varia 3 o 4 polzades del centre fins a l'extrem. En altres el *pitch* creix fins a 1/4 del *length* de l'hèlix i després segueix constant. Per tant, hi ha un marge de *pitch* variable a totes les hèlixs.

Sabem que, degut a l'efecte par motor, el multicòpter giraria en el mateix sentit de gir de les hèlixs si totes gressin de la mateixa manera, de la mateixa manera que en un helicòpter. Per això, cal que dos facin la rotació en un sentit i dos en l'altre. Per això hi ha dos tipus d'hèlixs: les *standard rotation* i les *reverse rotation*. Les primeres giren en el sentit contrari a les agulles del rellotge (CCW) i les segones en sentit horari (CW). Per a més informació sobre com afecta el sentit de rotació als moviments del multicòpter, visitar maniobra del multicòpter.

Per a catalogar les hèlixs de forma comercial, hi han diversos aspectes que sempre han d'estar presents: Tipus d'hèlix (ho veurem més endavant), nombre de pales, *length* (llargada, normalment en polzades), *pitch* (normalment en polzades), i sentit de gir ("R" per a *reverse*, no res per a *standard*) . Els valors del *length* i el *pitch* es posen l'un al costat de l'altre separats per una "x". Uns exemple de nom de models d'hèlix seria:

*GWS style two blades 10x4.5 R rotation propeller. O TGS style two blades 12x5 propeller.*

> Un efecte a tenir molt en compte és el comportament del fluid respecte a l'hèlix, ja que fins ara hem suposat un fluid indeterminat i ideal per a explicar la teoria de les hèlixs. Aquest component pot quedar patent utilitzant una unitat adimensional descoberta per l'enginyer i físic Osborne Reynolds: El número de Reynolds (Re). El que fa aquesta unitat és indicar la relació entre els termes d'inèrcia i de viscositat d'un fluid. És a dir, és el quocient entre els efectes cinètics i convectius del fluid i la seva viscositat cinemàtica (ja que considerem un escenari on el fluid o l'objecte està en moviment). Per tant, un número de Reynolds alt indica una gran eficiència del perfil, ja que les forces útils per a la propulsió són molt més grans que les forces viscoses, que actuen en contra del moviment.



Multicòpter per a situacions de risc industrial

Així, un  $Re = 200.000$  indica que el total de les forces impreses per la hèlix al fluid (i a la hèlix pel fluid, degut a la llei d'acció i reacció) és 200.000 vegades més gran que les forces viscoses no desitjades. La fórmula del número de Reynolds es pot veure a la figura 32:

$$Re = \frac{\rho V_s D}{\mu} \quad \text{O, el que és el mateix:} \quad Re = \frac{V_s D}{\nu}$$

Sabent que:  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

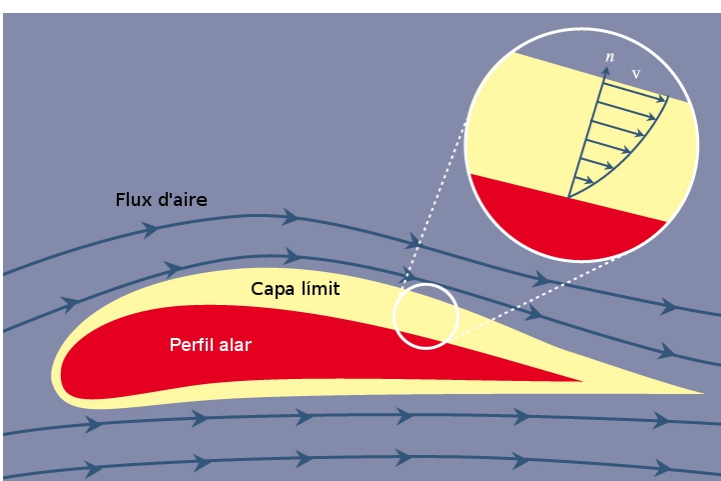
Sent:

$\rho$ : densitat del fluid  
 $V_s$ : velocitat característica del fluid  
 $D$ : Longitud característica del sistema  
 $\mu$ : viscositat dinàmica del fluid  
 $\nu$ : viscositat cinemàtica del fluid

Héctor Ortega González. *Fórmula nombre Reynolds. 9-1-13./ Figura 32. La fórmula del nombre de Reynolds. Podem veure que, a més velocitat, més elevat serà el número i més efectivitat tindrà el perfil. Tot i així, cal no superar un cert valor, com veurem més endavant.*

Sabem que sempre, absolutament en qualsevol situació, hi haurà un nombre de Reynolds més gran en una escala petita que en una gran si ambdós perfils són exactament iguals i estan en la mateixa situació i fluid. Per tant, les hèlix en un model a escala tenen molta més eficiència que en un model real, per això poden ser més petites. Això també explica la dificultat de creació d'un model de multicòpter per a encabir-hi una persona: en un model amb ala, les hèlixs no han de suportar tot el pes. En canvi, en un model de multicòpter, la única sustentació prové de les hèlixs. I en addició, els motors són més eficients si són elèctrics, cosa només possible avui dia si són de grandària reduïda.

Un altre aspecte a tenir en compte és el tipus de flux que presenta el fluid segons el nombre de Reynolds del perfil alar. Si  $Re < 500.000$ , el fluid té un comportament laminar a la capa límit (zona del fluid que és pertorbada per la velocitat relativa del sòlid a dins del corrent. És a dir, és la part on l'efecte que provoca el perfil és apreciable). La capa límit és realment important en qualsevol sistema de propulsió que es basi en perfils, i un comportament laminar en aquesta zona es pot considerar com un indicador de bon funcionament de l'ala o, en el nostre cas, l'hèlix.



Smithsonian National Air and Space Museum. *Boundary Layer. Unkown date. Imatge traduïda i modificada./ Figura 33. Podem apreciar la capa límit d'un perfil alar. Com es pot veure, la velocitat, que és perpendicular a la normal (n) del perfil alar en un punt determinat, decreix quan ens apropem*

Héctor Ortega González

Multicòpter per a situacions de risc industrial

*a l'ala en sí. El comportament de l'aire a la capa límit pot ser o laminar o turbulent, segons el nombre de Reynolds del perfil concret. El comportament del flux d'aire exterior és laminar.*

En conseqüència, les hèlixs de grandària real perden una gran eficiència si els seus extrems giren a una velocitat lineal que s'aproximi a la del so, ja que el nombre de Reynolds sobrepassarà els  $5 \cdot 10^5$ , fent així un flux turbulent a la capa límit, que provocarà un augment de pressió a la part superior, i una disminució de la força d'ascensió.

Per tant, qualsevol estudi bàsic del comportament de l'hèlix en el fluid, imprescindible a l'hora d'elaborar-ne un disseny, ha de tenir en compte el comportament del flux, i això ha de comportar, com a mínim, el càlcul del nombre de Reynolds, que és una de les unitats base en disseny de reactors i de perfils alars. Això es deu a que el nombre de Reynolds varia segons ens separem del centre de l'hèlix, ja que, com hem vist abans, és una successió de diferents perfils alars, que canvien l'angle d'atac. Per això és d'extrema importància.

### >Tipus d'hèlix i altres aspectes

Són cinc aspectes essencials els que defineixen com és una hèlix: La longitud (*length*), el *pitch*, el nombre de pales, la forma de les pales i la forma del perfil alar. La combinació d'aquestes cinc variables pot donar lloc a un munt de tipus d'hèlix únics, però aquí només citaré els més importants:

**-GWS:** *Hèlixs ideals per a vol lent o per a multicòpters de grandària gran. Proporcionen una empenta gran, però a costa de necessitar un motor de més amperatge. Models bipala o tripala. Els bipala van des de 65 fins a 356 mm de length, i des de 20 fins a 254 mm de pitch. Les tripala van des de 8 polzades (203,2 mm) fins a 9 polzades (228,6 mm) de length, de 4 polzades (101,6) fins a 5 (127 mm) de pitch. Les hèlixs tipus bipala tenen les pales forma ovalada amb extrems suaus. Les tripales les tenen rectangulars amb els extrems suavitzats. El pitch és constant en tot el seu recorregut, per tant l'angle inicial és el més pronunciat, i es suavitza segons ens allunyem del centre.*

**-APC (APC-E):** *(NOTA: APC-E són la majoria de les hèlixs tipus APC (el 90 %)). Útils per a avions, pensades per a vol mig/ràpid. Estan dissenyades per a motors a més de 15000 rpm (motors elèctrics tipus E), per això també tenen bon rendiment en multicòpter petits, degut a la poca resistència al moviment i la gran velocitat de gir dels motors de poc parell*

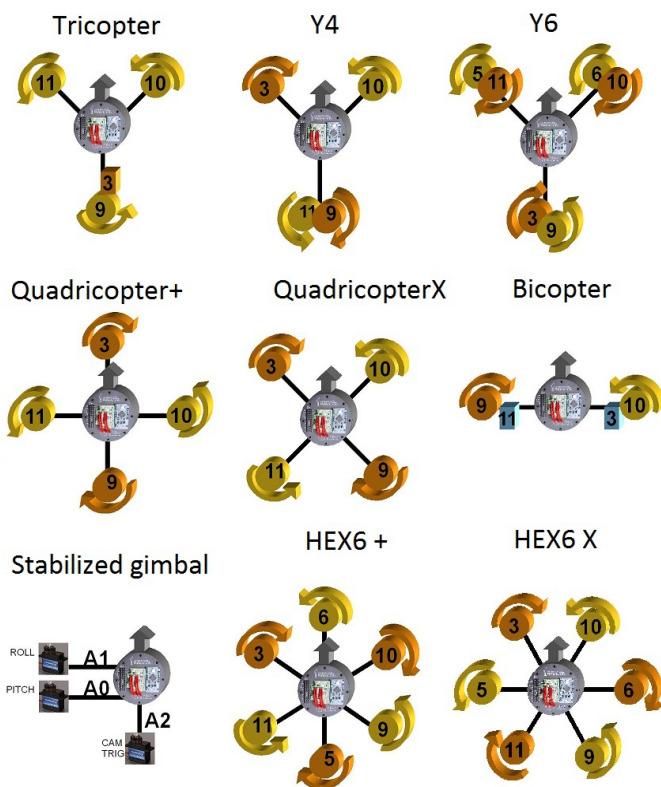


motor. *Produeixen una força d'empenta mitjana. Només de tipus bipala. Únicament per a motors elèctric (excepte el subtipus "sport"). Les mides van des de 4,75 polzades (mm) fins a 14 polzades (mm) de length, i de pitch des de 4 polzades (mm) fins a 8 polzades (mm). El pitch és constant a partir d'1/6 del radi, més a prop del centre el perfil és molt gruixut i es basa en el principi de sustentació de perfils alars explicat a la teoria. Forma ovalada amb final rectangular, amb un dels vèrtexs suavitzats (el del costat d'atac respecte a l'aire) i l'altre sense suavitzar, per a oferir menys resistència.*

**-TGS:** Ideals per a avions i planadors motoritzats. Hèlixs de gran precisió i definició. Pitch constant durant tot el recorregut.

**-SlowFly (SF):** Hèlixs ideals per a multicòpters i altres aeromodels de vol lent. Són capaces de produir molta més força de propulsió en situacions de poques rpm i poca velocitat de l'aeronau, com succeeix amb els multicòpters quan es troben en vol estàtic (hovering). Mides molt variades. Només bipala.

### Maniobra i estabilització del multicòpter



Hi ha molts tipus de multicòpters, i actualment encara n'estan desenvolupant més. Aquesta secció recopila de forma breu l'estructura bàsica dels diferents multicòpters fins a avui dia.

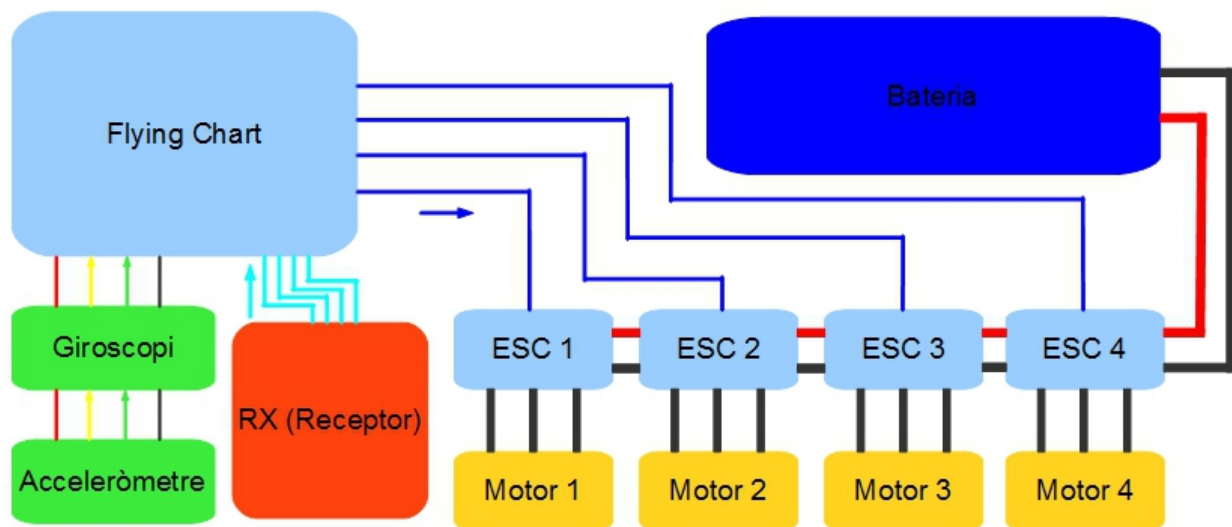
*N/A. Sense data. Google imatges. / Figura 34. Diferents tipus d'estructures de multirrotores. Es mostra la situació de repòs. La figura de baix a l'esquerra és un Gimbal, un sistema de canvi d'angle de càmera. El funcionament d'estabilització i moviment és anàlog al d'un multicòpter. L'octocòpter, al ser una variant amb un disseny intern molt diferent, no està present a la imatge.*

### Síntesi

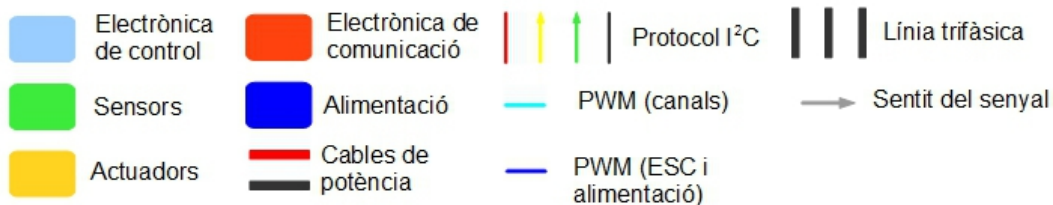
Com ja he mencionat a l'apartat de teoria, si el lector ha decidit de llegir la síntesi de la informació, aquí disposa d'uns esquemes que resumeixen els coneixements necessaris per comprendre satisfactòriament els següents apartats.

Aquest esquema mostra l'estructura general del multicòpter (ometent l'estructura física):

## Multicòpter per a situacions de risc industrial

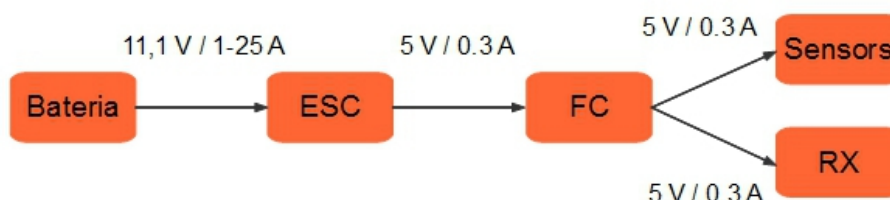


### Legenda:



Héctor Ortega. Esquema general electrònic del multicòpter. 06-01-2013. / Figura 35. Esquema general de connexió de blocs en el multicòpter. Podem observar el sentit del senyal i el connexionat entre les diferents parts. Cal dir que el senyal tipus PWM, representat només per un cable, està en realitat format per tres: V+, Senyal i GND.

L'alimentació elèctrica segueix aquest recorregut:



Héctor Ortega. Esquema d'alimentació del multicòpter. 06-01-2013. / Figura 36. L'alimentació elèctrica al multicòpter. No calen adaptadors, tot ho fan els components de forma independent.

Pel que fa al funcionament i el control: L'RX rep una senyal codificada en forma de PPM (codificació més usada) del TX escollida per l'usuari. L'RX emet una senyal en forma de PWM (senyal tipus servo) cap a la FC per les entrades corresponents als canals i al moviment desitjat que representen. La FC, que ha estat rebent senyal en protocol I<sup>2</sup>C del giroscopi i acceleròmetre per saber les rpm necessàries als motors per que el multicòpter estigués estable, actuarà en conseqüència augmentant el senyal per PWM adient a cada motor cap als ESC. Els ESC augmentaran o disminuiran la velocitat de gir dels motors (variant els intervals entre canvi de fase), i així el multicòpter assolirà el moviment desitjat

Multicòpter per a situacions de risc industrial

o simplement estarà estable en cas de que l'usuari no envii cap canvi.

## **DISSENY**

NOTA: Aquesta part del treball és en la que parlaré sobre el multicòpter realitzat al llarg del desenvolupament i recerca del projecte, per tant no tractarà de temes relatius a teoria excepte quan sigui necessari. Per a saber els fonaments de la construcció i la teoria que hi ha al darrere, consulteu el capítol de teoria.

El món dels multicòpters és un territori del radio control i disseny d'aeromodels molt nou, fa només uns quants mesos que el terme s'ha acceptat i que s'han començat a fer projectes de definició o documentació sobre què és un multirroto. De fet, a Viquipèdia el terme en idioma anglès s'ha escrit el 3 de Novembre de 2011.

El disseny del multirroto és un tema delicat i amb moltes possibilitats. Al ser un aeromodel molt nou, les úniques bases de coneixement realment sòlides pel que fa a la construcció i configuració de multicòpters són els fòrums que hi ha dispersats per Internet, com RCGroups, una de les webs i fòrums més famoses sobre radio control. La desició del disseny, tant com dels materials i de les peces, pot ser considerat una combinació única i mai feta en gairebé totes les construccions de multicòpters, al haver-hi tant pocs en tot el món. El disseny d'aquest treball no n'és una excepció. En les línies següents exposaré les decisions que he pres, en què consisteixen i perquè ho he fet, ja que no hi ha cap base estàndar com sí succeeix en altres aeromodels, com l'avió.

### ***Hardware i estructura***

L'aspecte més rellevant del multicòpter, i aquell que s'ha de concretar primer, són els seus components i la estructura física. Ambdós han d'estar perfectament equilibrats i són dependents, quan canvia un ha de canviar l'altre. Per tant, és potser la part més difícil de decidir degut a la manca d'informació, com he explicat al principi d'aquest capítol, a més de la necessitat de concretar-ho de forma ràpida, eficaç i possible amb els mètodes dels

Multicòpter per a situacions de risc industrial

que es disposa.

### >Esquema General

Hi ha molts tipus d'estructures de multicòpter, i molt més variades si tenim en compte el nombre de motors possibles. Al ser un iniciat en aquest món, em vaig decantar per el més eficaç, però que al mateix temps pogués abastar-ne la construcció i el pressupost. Havia de ser, doncs, un disseny equilibrat. Aquest disseny és el quadcòpter. És la típica estructura de multicòpter, i es basa en els mateixos principis de maniobra que tots els altres multicòpters més coneguts, a diferència dels tipus que difereixen, com el bicòpter, el tricòpter o l'Y6. És, de fet, l'elecció estrella pel que fa a la construcció d'un multirrotor. Aquest motius, i també econòmics i de temps, em van fer decantar-me per la construcció d'un quadcòpter.

Calia doncs escollir el tipus d'estructura del multirrotor, i hi ha una gran varietat de dissenys diferents, a més de tipus de materials emprats. El més utilitzat és potser el disseny de quadcopter en X. També existeix, no obstant, el quadcòpter tipus *Duct Fan*, que és format per una sola peça de material lleuger que protegeix les hèlixs i forma una base per a l'electrònica. Fins i tot existeixen els quadcòpters tipus *Spider*, que tenen una base descentrada i braços desiguals i en posicions que no formen un polígon (tot i que està perfectament balancejat en el pes), ideal pel vol acrobàtic.

Però calia un disseny que pogués carregar pes, ja que havia de portar una càmera i sensoratge, i el disseny en X era poc eficient i ocupava molt espai, fins i tot els models plegables. A més, aquest tipus de quad no pot tenir una plataforma molt gran per problemes de resistència si això es realitzés. Per tant, em vaig decantar per un disseny molt nou i innovador que havia sorgit dels aeromodelistes dels EEUU feia poc de temps: El quad-H. Aquest quad té un disseny senzill i eficient, fàcil de realitzar amb mètodes no excessivament sofisticats (altres esquemes requereixen disposar d'una màquina de tall tipus CNC). A més, pot carregar pes de forma eficient, té un espai per a plataforma molt ampli i còmode de forma rectangular, i es pot allargar tant com es vulgui. Finalment, quan està plegat optimitza molt l'espai. Per tant, aquest va ser el disseny escollit, i es va realitzar en disseny plegable.



Multicòpter per a situacions de risc industrial

Un aspecte molt important és el sistema d'amortiment per a aterratges del multicòpter. En aquest disseny, tot i que no està patent en els plànols, es pot observar a les fotos i vídeos (després de la versió electrònica 2) que disposa de 2 parells de cames (unides en forma d'un trapezi sense base), on s'ha implementat un sistema de tubs, tot construït artesanalment, que disposa de moles per a amortir. Si les molles no són suficients, el propi material es blegarà, absorbirà l'impacte i no provocarà rebot extra, ja que, a diferència de les molles, provoca energia no conservativa (transformada en calor). Tot el sistema està fet d'alumini, al igual que l'estructura del quadcòpter.

### >Materials i pressupost

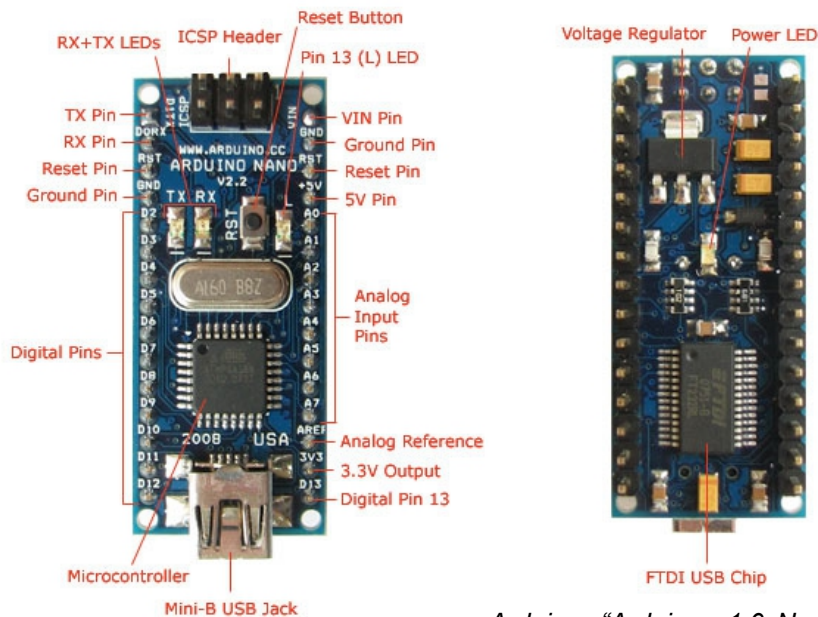
#### **>> Productes escollits per al multicòpter**

En aquest apartat estan exposades les peces i materials escollits per a l'elaboració del multicòpter, i també la raó i les característiques.

#### **- *Flying Chart***

Per a la Flying Chart, he optat, com veurem més endavant, per a fabricar-me'n una jo mateix. El microcontrolador que faig servir és l'Arduino Nano V 3.0, que disposa d'un Atmega328p, opera en velocitat de 16 MHz i té un port microUSB de connexió per a la programació. El software ha estat desenvolupat per l'usuari de multicòpter a RCGroups "Alexin Paris". S'anomena Multiwii, i serà exposat més endavant.

Multicòpter per a situacions de risc industrial



labelled". Arduino Creative Commons, 2008. Imatge disponible a <http://arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardNano>/ Figura 37. Arduino Nano v1.0 pel davant i pel darrere. Tot i que és la primera versió, l'única diferència entre aquesta i la 3.0 és l'ús del microcontrolador Atmega328p a la versió 3.0 (aquí s'utilitza l'Atmega168), i la ubicació del led de potència a la part superior a la versió 3.0.

Les característiques principals de l'Arduino Nano v3.0 són:

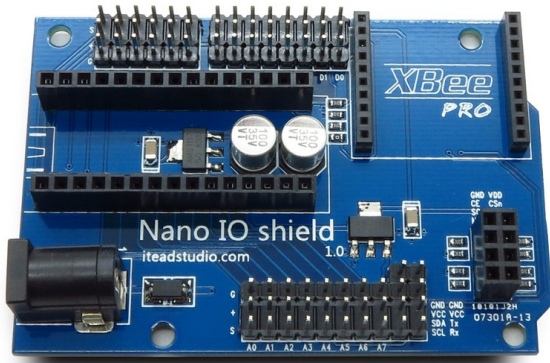
**Microcontrolador:** Atmel ATmega328  
**Voltatge d'operació (a nivell lògic):** 5 V  
**Voltatge d'entrada (recomanat):** 7-12 V  
**Voltatge d'entrada (límits):** 6-20 V  
**Digital I/O Pins:** 14 (dels quals 6 proporcionen PWM output)  
**Pins d'entrada Analògica:** 8  
**Corrent contínua per I/O Pin:** 40 mA  
**Flash Memory:** 32 KB (dels quals 2KB es fan servir pel Bootloader)  
**SRAM:** 2 KB  
**EEPROM:** 1 KB  
**Freqüència:** 16 MHz  
**Dimensions:** 0.70" x 1.70"

Per a adaptar l'Arduino Nano a les connexions tipus servo que caldria fer, les corresponents als canals i als variadors, s'ha adquirit un *shield* adaptador per a aquest chip, l'Arduino Nano I/O Shield, que transforma les entrades i sortides de senyal en tipus servo, estalviant així cablejat extra i soldadures. En acoblar el microcontrolador a l'escut, la configuració queda com la que veiem a la Figura 38. També veiem el chip i la FC quan



Multicòpter per a situacions de risc industrial

tot hi està connectat.



Imall. "Arduino Nano I/O Shield v1.0". Itead Studio, 24-3-2012. Imatge disponible a <http://imall.iteadstudio.com/im120417016.html>./ Figura 38. Arduino Nano I/O Shield v1.0. Es pot apreciar les sortides i entrades configurades en tipus servo, a més de l'entrada de potència tipus jack de sota a l'esquerra.

Aquesta FC, al ser feta de forma "artesanal", no disposa de giròscop ni acceleròmetre, motiu pel qual han d'estar comprats per separat.

Forma de connexió entre les diferents components del multicòpter i l'Arduino Nano:

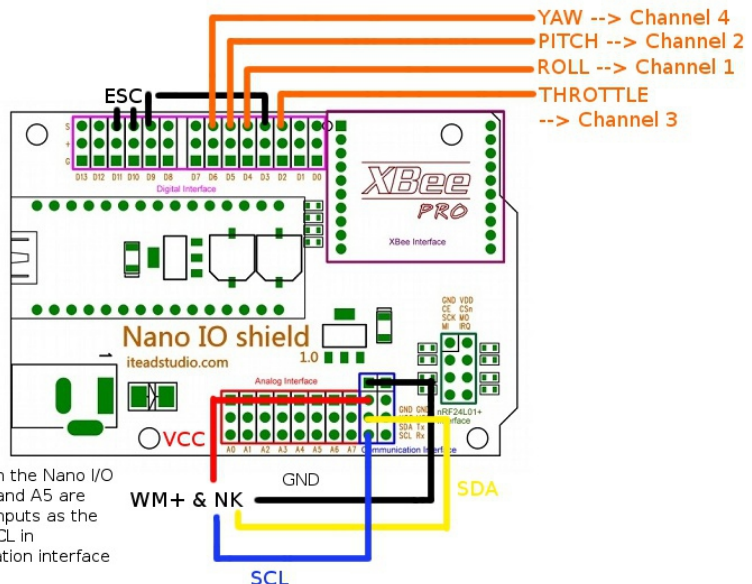
Héctor Ortega González. Nano connection layout. 20-12-2012. Imatge disponible a <http://www.rcgroups.com/forum/showthread.php?t=1679621&page=14>./ Figura 39. Entrades i sortides i la connexió a l'Arduino Nano.

NOTA: Les entrades analògiques A4 i A5 es corresponen amb les SDA i SCL (respectivament) de comunicació I<sup>2</sup>C.

NOTA: A causa de la resposta massa erràtica de la FC artesanal, va adquirir-se un model amb els sensors integrats, millorant així el vol (veure més en detall a conclusions).

### - Giròscop i Acceleròmetre

Com que el software usat és Multiwii, un software obert creat per a aquestes aplicacions, està pensat per a que l'usuari amb poder adquisitiu estàndard. Com veurem més endavant, amb aquest aquest programa sol usar els giroscopis i acceleròmetres de la consola de Nintendo Wii. Es poden fer servir sense problemes molts models de venta per





Multicòpter per a situacions de risc industrial

separat, però degut als avantatges que representa fer servir els de la consola Wii és una elecció poc comuna.

En concret, es faran servir el Wii Motion Plus (WM+, afegit al comandament de la consola per millorar-ne la precisió), que conté quatre giroscopis de dos eixos cadascun, i tres giroscopis de tres eixos. Com és lògic, només uns quants seran utilitzats.

L'acceleròmetre és el Wii Nunchuk, que disposa, com el Wii Remote (el comandament principal), de un acceleròmetre de 3 eixos per a detectar el moviment. Al ser aquest primer més barat que aquest últim, se sol adquirir el Nunchuk per a realitzar la funció, com en aquest treball.

El principal avantatge de fer servir aquest sensors respecte d'altres és el seu cost. 30 € si són la versió legítima de Nintendo per a la consola, o 10 € si són models no homologats per l'empresa.

També hi ha l'aspecte de l'espai, molt important en un aeromodel. En una PCB d'uns 30x25 mm estan tots els components del WM+, i en una de 40x20 els del Nunchuk.



**Original WM+**

Joel Cördier. "Wii Motion Plus connectors". RCGroups, 20-11-2010. Imatge disponible a <http://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?attachmentid=3609778>. /Figura 40. WM+ original i clon de Nunchuk.

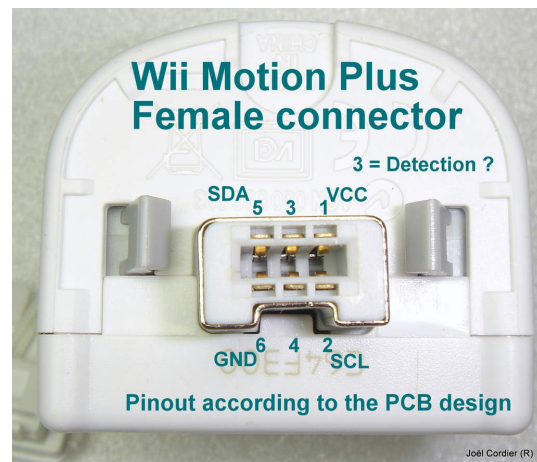
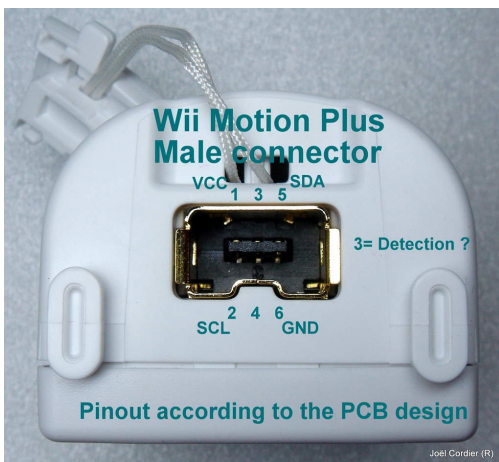
En el cas del giroscopi, els models usuals són el IDG600 o el IDG650, presents en el 90% de models de WM+ legítims i no legítims. El microcontrolador regulador del procés de comunicació amb la FC transforma, mitjançant un convertidor d'analògic a digital de 14 bits, les senyals tipus ADC (analògiques) dels giroscopis en protocol bus sèrie I<sup>2</sup>C que funciona a 400 kbits/s, utilitzant una interfície de dos cables (més V+ i referència (GND)).

Multicòpter per a situacions de risc industrial

Aquesta senyal és senzilla d'interpretar per l'Arduino. En general, l'actuació d'aquests giroscopis i del WM+ en conjunt és acurada, i donat el preu que costa adquirir-ho és l'elecció més recomanable.

Pel que fa a l'acceleròmetre, el seu gran avantatge és la connexió amb el WM+ tipus també I<sup>2</sup>C. S'anomena "I<sup>2</sup>C bypass mode", ja que connecta el Nunchuk a l'Arduino sense necessitat d'entrades addicionals. El WM+ interpreta la senyal i la transmet a l'Arduino de forma directa. El desavantatge més evident és que, en molts models de Nunchuk, els botons o el joystick, que estan soldats directament a la PCB, no són extraïbles i ocupen espai.

Per a poder utilitzar els components, cal desmuntar-los de la carcassa i saber la referència dels cables en ambdós accessoris. Per a identificar els cables, sol utilitzar-se com a referència els connectors comercials, com podem veure-ho en la figura següent. També podem observar la comunicació i connexió entre WM+ i Nunchuk.



Joel Córdier. "Wii Motion Plus connectors". RCGroups, 20-11-2010. Imatge disponible a <<http://www.rcgroups.com/forums/attachment.php?attachmentid=3609778>>. /Figura 41. Connexions tipus I<sup>2</sup>C de la Nintendo Wii segons connectors comercials. El número tres és per a la detecció d'activació de botons.

### - Transmissor i receptor (TX i RX)

L'emissora (o transmissor) i el receptor inherent són una de les parts més vitals del multicòpter, i també una de les més costoses. A més, no hi ha la opció de fabricació a mà, sinó que és necessària l'adquisició d'un model comercial.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

El model escollit és el més recomanat per als aeromodelistes que s'inicien: el transmissor Turnigy 9X 9Ch 2.4 GHz Transmitter. Incorpora 9 canals, funcionalitats de guardat de models, configuracions d'estil de vol i les opcions d'ajust usuals en una controladora. El receptor és un model ideat per a operar amb el TX anterior, el 2.4 GHz 9X 8Ch Receiver (V2). El mòdul emissor en sí ve inclòs amb la controladora i n'és homònim. El transmissor està configurat electrònicament i mecànicament en mode 2, amb modulació PPM.

HobbyKing. "Turnigy 9X pack". HobbyKing, 01-01-2012. Imatge disponible a [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_8992\\_\\_Turnigy\\_9X\\_9Ch\\_Transmitter\\_w\\_Module\\_8ch\\_Receiver\\_Mode\\_2\\_v2\\_Firmware\\_.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__8992__Turnigy_9X_9Ch_Transmitter_w_Module_8ch_Receiver_Mode_2_v2_Firmware_.html) / Figura 42: El pack de components TX i RX de Turnigy. El firmware és l'original.



Un aspecte important sobre aquest transmissor és el *firmware*. A tots els fòrums i llocs d'informació, els usuaris recomanen sempre un *reflashing* (canvi

de *firmware*) del transmissor. El *firmware* que porta per defecte, Turnigy9x, és un que ofereix poc rendiment i escasses opcions. Per això, la comunitat d'usuaris d'aquest transmissor ha desenvolupat un *firmware* que optimitza la funcionalitat del transmissor: s'anomena "ER9X".

Aquest *firmware* millora les característiques de personalització, *trimmering* (ajust de variables), *endpoints* (proporció d'interval de variació de senyal segons els *sticks*), etc.



Helibatics. ER9X flashed Turnigy 9X. Helibatics, 2010. Imatge disponible a <http://www.helibatics.com/turnigy-9x-txr1.html> / Figura 43. Turnigy 9X amb el firmware ER9X i llum de fons blava.

Finalment, cal un accessori per a il·luminar la pantalla amb llum des de dins, ja que si no la visualització de les dades es complica. Més informació a Altres aspectes.

### - Motors

Els motors són un component que requereix de càlculs i estimacions per a escollir-lo:

Multicòpter per a situacions de risc industrial

Segons el pes, la bateria i les hèlixs, el motor a escollir serà diferent. El motor ha de poder carregar amb el pes del multicòpter i disposar d'un marge molt elevat. Com a mínim cal, com ja he explicat a l'apartat de teoria, una proporció d'aixecament/pes de 2:1. Com ja hem vist al principi, el quadcòpter amb tots els components pesa 1412 g.

Els motors escollits són els KDA 22-20L *outrunner*. Tenen un règim nominal de 21 A com a màxim, i poden funcionar en sobrecàrrega fins a 25 A cinc segons abans de provocar danys a l'estructura. Tenen 1000 rpm/V, així que assoleixen un màxim de 25000 rpm. A màxima potència amb una hèlix de 11x4.7 (11 polzades de *length* i 4.7 de *pitch*) aquest motor pot arribar a proporcionar fins a 1280 g d'empenta a 21000 rpm.



Héctor Ortega. Motor KDA 22-20L i accessoris. 15-11-2012. Imatge disponible a <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1679621&page=9>. / Figura 44. Motor KDA 22-20L i accessoris. D'esquerra a dreta: Tubs termoretràctils, cargols de fixació a la part no rotatòria, clip "c" (utilitzat per a mantenir el shaft en el seu lloc), femella per a l'adaptador collet, prop adapter (peça de plàstic), washer (per a posar sobre l'hèlix al collet), cèrcols de goma (per al prop adapter), muntura tipus X, shaft de recanvi, cargols de recanvi per a fixar el collet al bell, cargol per a fixar el shaft al bell (sense capota), motor KDA amb collet i shaft, connectors bullet 4 mm femella i mascle.

Es pot fer un senzill càlcul per a saber a quina proporció de *thrust*/pes (*thrust* és l'empenta cap a amunt) està exposat el multicòpter. Sabem que el multirrotores pesa 1412 g. Si cada motor dóna 1280 g, això fa un *thrust* total de 5120 g. Si dividim aquest resultat entre el nostre pes, això ens dóna una ràtio de 3,626:1. Aquest valor és molt positiu, ja que el valor usual és de 2.5:1 en multicòpters de 600 mm *across*. Per a calcular el temps de vol, és suficient amb una simple equació:

$$\begin{aligned} \text{Ràtio} &= \frac{\text{Thrust}}{\text{Pes}} & \text{Ràtio} &= \frac{5140}{1505} = 3,415 \\ \frac{A_{\text{max}}}{A_{\text{hov}}} &= \frac{\text{Thrust}}{\text{Pes}} = \text{Ràtio} & \frac{100 A}{A_{\text{hov}}} &= 3,415 \\ A_{\text{hov}} &= \frac{A_{\text{max}}}{\text{Ràtio}} & A_{\text{hov}} &= \frac{100 A}{3,415} = 29,280 A \\ t &= \frac{\text{Capacitat}}{A_{\text{hov}}} & t &= \frac{4 Ah}{29,280 A} = 0,13661 h \\ & & & \text{Héctor Ortega González} \\ & & & t \approx 8 \text{ min} \end{aligned}$$

Com veiem, 8 minuts de temps de vol, un temps

dintre de la mitjana. Com s'ha comprovat en les proves sobre el camp, l'aparell hi arriba.

Hi ha dues opcions per a unir les hèlixs amb la part rotativa del motor: El *shaft* (l'eix) pròpiament dit, fent servir un *prop adapter*, o una peça exclusiva del fabricant que s'enganxa al *bell* amb caragols, anomenada *collet*, i que té un eix de diàmetre més gran que el *shaft*. Ho podem veure a la figura 44.

### - Hèlixs

Com ja he mencionat, les hèlixs són un aspecte que s'ha d'escollir juntament amb els motors. Ja hem vist que les hèlixs escollides són unes 11x5 Slowfly. S'ha escollit aquest tipus d'hèlixs ja que, com hem vist a la teoria, són les que proporcionen un *thrust* més alt en unes revolucions baixes (1000 rpm/V), que són uns 1280 g.

Cal utilitzar uns anells adaptadors per a ajustar les hèlixs, que tenen un forat de diàmetre molt gran, Per a implementar les hèlixs al motor, com hem vist el mètode escollit ha sigut l'adaptador al *bell* del motor. Per això farem servir un anell d'un diàmetre igual que el de l'eix de la peça especial.

Hi ha un aspecte sobre les hèlixs que pot deixar-se de banda, però és d'ajuda per a la maniobra del multicòpter. Com ja sabem, la maniobra del quadcopter en construcció és en mode X, això vol dir dues hèlixs davant i dues darrere, la direcció frontal és la perpendicular a la línia que uneix les dues hèlixs del costat davanter. Orientar-se amb aquesta configuració és una tasca difícil, per això molts pilots posen referències visuals (els braços pintats, una corda, una barra...), però la que és més còmode i no ocupa espai és la d'utilitzar el color de les hèlixs. Dos hèlixs han de ser CW i dos CCW. Si agafem dues hèlix d'un color (normalment negre) però sentits diferents, podran posar-se ambdues al front. Contrastaran amb les d'altre color (verd en el meu cas), que també tindran ambdós sentits i aniran al darrere. Així podem veure de forma cromàtica el front i la part



Multicòpter per a situacions de risc industrial

de darrere.

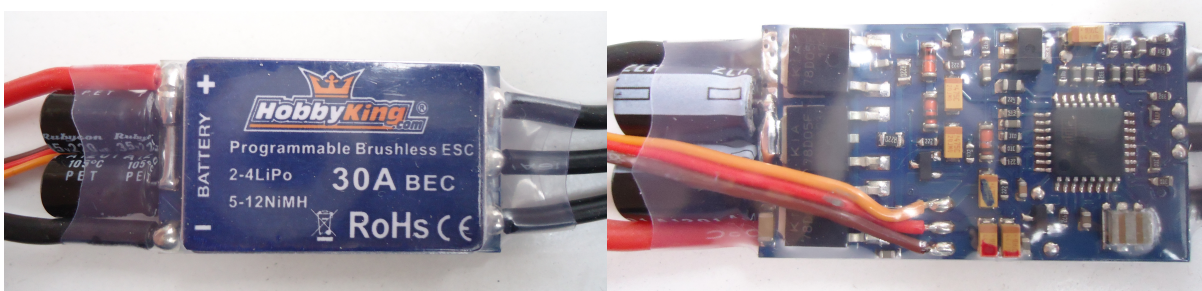
### - ESCs

Les característiques dels ESC també han de dependre del motor, com les hèlixs. Com ja sabem, tots els motors tenen un consum de corrent teòric que augmenta amb les revolucions. Els ESC, al ser els que regulen el motor, també reben els amperes que les inductàncies del motor utilitzen per a girar. Per tant, els variadors de velocitat s'organitzen segons amperatges a suportar: hi ha ESCs de fins a 10A, de fins a 20A, fins a 30A...

Tot i que en teoria seria suficient amb un ESC en el qual la màxima intensitat suportada sigués la mateixa que la intensitat en *burst* del motor, a la pràctica per a evitar riscos sempre s'implementa un ESC de corrent màxim de com a mínim 5 A per sobre del corrent màxim real del motor. Així, a més d'evitar riscos, s'allarga la vida del variador de velocitat.

Hi ha una segona característica a tenir en compte: el tipus de variador. En realitat, gairebé tots els variadors comercials són programables, amb una targeta es poden ajustar determinats valors tals com la rapidesa de refresc, si l'ESC té la funció de fre (no utilitzada en multicòpters), el tipus de protocol de comunicació amb la FC... Però tot i que els valors són programables, hi ha molts aspectes que no ho són. Per tant, fa un any s'han començat a desenvolupar un tipus de variadors nous: Els variadors específics per a multirrotors.

Actualment, hi ha pocs models. Els dos més utilitzats són HobbyKing BlueSeries i HobbyKing Multistar. En aquest cas, l'utilitzat és un ESC de la sèrie dels primers: El HobbyKing BlueSeries 30A. Com que els motors consumeixen 25 A en *burst*, per a assegurar el marge s'ha considerat necessari 5 A més a règim normal (ja que aquest variador aguanta fins a 40 A en *burst*).



Multicòpter per a situacions de risc industrial

Héctor Ortega. Hobbyking 30A BlueSeries ESC. 28-11-12./ Figura 45. Variador HobbyKing 30A BlueSeries ESC. Vista frontal (els MOSFETs són tapats pel cartró d'especificacions) i vista de sota (part de control i BEC).

Aquest variador té les següents característiques:

- Corrent Constant: 30A
- Corrent en *burst* (3 segons): 40A
- Bateria: 2-4 cel·les LiPo.
- BEC Intern: Subministra 5V i fins a 3A
- Freqüència de refresc: Variable, valor per defecte és 8 kHz.
- Rotació de motor (amb programació): CW i CCW
- Funció de frenada: Disponible, desactivada per defecte.
- Resistència interna molt baixa
- Tallada del funcionament (per a evitar danys): a 3,0 V d'entrada
- Tipus de tallada del funcionament: Reducció de la velocitat gradual
- Protecció contra el sobreescalfament

Aquest variador utilitza com a microcontrolador principal un Atmega8.

Sabem que és necessari que els motors girin en un sentit o en un altre per motius d'estabilitat, explicats a la maniobra del multicòpter. Per tant, a l'hora d'acoblar un motor a un variador, a vegades ens trobarem amb un sentit de gir no desitjat. Tot i que es pot invertir amb programació, hi ha un mètode molt més senzill: és suficient amb intercanviar les connexions de dos dels cables del variador al motor. Per exemple, el cable central a la dreta i el de la dreta al centre. Així, el sentit de gir està invertit, el 100% de vegades.

És amb aquest objectiu que neixen els *bullet connector*, connexions tipus banana de molt bona conductivitat que es poden separar a mà, i així realitzar canvis ràpidament. Hi ha més informació als aspectes secundaris del disseny.

Tot i que els variadors BlueSeries estan preparats per als característics canvis sobtats de velocitat i corrent característics de l'ús de motors en multicòpters, també porten implementada unes variables a programar mitjançant el que s'anomena carta programadora.

HobbyKing. BlueSeries ESC programming card. Hobbyking, 2010. Imatge disponible a [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_13431\\_HobbyKing\\_Programming\\_card\\_for\\_BlueSeries\\_Brushless\\_Speed\\_Controller.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_13431_HobbyKing_Programming_card_for_BlueSeries_Brushless_Speed_Controller.html). /Figura 46. Carta de programació per a variadors BlueSeries. Les cartes d'aquest tipus són molt comunes de





Multicòpter per a situacions de risc industrial

*trobar, i gairebé tots els variadors comercials en tenen una per a ajustar l'ESC.*

No obstant, aquests valors a canviar no seran suficients per a aconseguir realment un bon rendiment en el multicòpter. Cal un canvi sencer de *firmware*. El millor fins a dia d'avui és el *firmware* SimonK, desenvolupat per Simon Kirby. La informació en concret sobre aquest programa es troba a l'apartat de Software. Per a programar sobre un variador, també calen accessoris com el USBasp AVR Programmer i un accessori físic per a poder connectar amb els pins necessaris durant el procés sense haver de soldar ni fer connexió directa amb el microcontrolador principal de l'ESC. Més informació a l'apartat d'aspectes secundaris.

### **- Bateria**

A l'hora d'escollir bateria, cal tenir en compte diversos aspectes molt rellevants per a escollir quina és la millor: Corrent màxim dels motors, corrent en el qual el multicòpter realitza *hovering*, rpm/V, etc. Hi ha, però, unes regles bàsiques que ens permeten saber si la nostra bateria rendirà bé o no.

Sabem quin és el *thrust* màxim dels motors (5120 g), i la ràtio ( $5120/1412 = 3,656$ ). Com que aquest *thrust* és amb els motors al màxim, la corrent també serà màxima en aquesta empenta (a 5120 g, el consum és de 100 A en total, 25 A per motor). Hem de dividir els ampers màxims per la ràtio, i amb això obtindrem quants ampères necessitem per a fer *hovering* ( $100 \text{ A} / 3,656 = 28 \text{ A}$  en total. Això, és clar, és una aproximació. En la realitat, el comportament no és perfectament lineal). Un cop hem obtingut el valor, només cal que calculem quan de temps durarà la bateria si el consum fos el necessari per a fer el *hovering* durant tota l'estona (vol estàtic). Amb la bateria escollida, que és una Turnigy Nano Tech 3S 11,1 V 4000mAh 35-70 C, calculem la duració:  $28 \text{ A} / 4 \text{ A} = 7\text{C}$  (necessita 7 vegades més el corrent per a poder flotar). Ara es calcula el temps màxim de *hovering*, que és  $1\text{h}/7 = 8$  minuts 34 segons de vol estàtic. Com podem veure, són càlculs molt fàcils i de gran utilitat.

### **- Materials estructurals**

Hi ha una gran diversitat de materials entre els que escollir per a la construcció d'un multirrotor: fusta, plàstic, fibra de carboni, metall, i fins i tot *kevlar*. Escollir un primer

Multicòpter per a situacions de risc industrial

material és difícil i les opinions a la xarxa són divergents. Però al final, el producte escollit va ser l'alumini, i per una simple raó: ofereix molta resistència i molta maleabilitat, a més de ser fàcilment manejable. Els altres materials, si eren millors es feien més difícils de manipular, i si eren més fàcils eren molt pitjors. Per tant, el punt intermedi és l'alumini.

L'únic inconvenient d'aquest material és el pes. Així com un de fusta o plàstic de les mateixes dimensions pesaria molt més poc, un d'alumini és relativament pesat. Per això el multicòpter pesa uns 150 grams més de l'esperat amb qualsevol altre material. Concretament, hi ha dos tipus de làmines al quadcopter: d'1 mm de gruix i de 0,5 mm de gruix.

#### **- Altres aspectes**

Com ja hem vist, calen alguns accessoris per a poder *flashear* els variadors amb software SimonK. El que cal és un programador USBAsp i un accessori per a fer-ho sense soldadures. També és recomanable una cinta per a penjar-se el transmissor del coll.

Un accessori de rellevància és un avisador de voltatge. És un brunzidor que s'activa quan el voltatge de la bateria, a la que està connectat, baixa per sota d'un valor ajustable. Hi ha amb pantalla i sense.

#### **>> Pressupost i mètode de pagament**

Habitualment, en la construcció de multirrotors, gairebé totes les peces es demanen a fora mitjançant Internet. Uns dies més tard, el paquet arriba amb les peces necessàries per a realitzar la tasca desitjada. El període d'entrega, però, és llarg. Aquest és el gran problema de la construcció d'aeromodels no comuns, les peces no solen ser trobades a una tenda local. Aquest fet endarrereix molt la construcció.

Pel que fa al pressupost, la construcció d'un multicòpter mitjà sol ser d'uns 225 €. Els components més cars són el TX i RX, la bateria i els motors. Després la FC, els variadors i els altres aspectes secundaris. A aquest preu li hem d'afegir el cost dels enviaments, que

Multicòpter per a situacions de risc industrial

varia segons el lloc, pes i legislació. Els únics aspectes legals a tenir en compte són els relatius a les bateries. Aquestes poden ser un problema degut al seu potencial elèctric, i solen venir via Suïssa per motius legals.

### >Software i programació

Un aspecte molt important a l'hora de finalitzar la construcció del multicòpter és la programació i ajust de variables. En les següents pàgines estan exposades les accions a fer més usuals.

#### **>> FC: Control general**

Com ja sabem, el software de la FC és el Multiwii. Aquest, a més de ser *Open Source*, té una gran varietat de variables que es poden ajustar per a millorar el rendiment del multicòpter, a més de l'ajust de PID. Hi ha dos blocs, per dir-ho així, ajustables: El programa en sí i les seves variables, i el PID.

#### **- Multiwii**

Els aspectes més rellevants a l'hora d'ajustar són aquells que es poden configurar en el programa mateix de Multiwii, a l'apartat config.h. Són aquestes:

##### Secció 1:

Tipus de multicòpter. Podem escollir entre Bicòpter, Tricòpter, Quadcòpter P, Quadcòpter X, Hexacòpter P, Hexacòpter X, Octocòpter P i Octocòpter X, a més d'avió i helicòpter, ara també disponibles a Multiwii.

MINTHROTTLE. Valor mínim per als motors, com la seva velocitat mínima.

MAXTHROTTLE. Valor màxim de velocitat.

MINCOMMAND. Mínima senyal de comunicació entre els variadors i la FC quan els ESC no estan armats.

I2C\_SPEED. Velocitat de comunicació del protocol I<sup>2</sup>C. Varia si usem un clon o una versió genuïna.

IMU\_boards. Es pot escollir si es vol fer servir una FC completa comercial amb els sensors inclosos.

Independent\_Sensors. Hem de dir quins sensors independents fem servir (per exemple, WM+).

##### Secció 2: Opcions específiques del multicòpter

En aquesta secció s'habiliten variables i funcions opcionals úniques al tipus de multicòpter que s'hagi escollit. Hi ha masses aspectes per a posar-los aquí de forma individual.

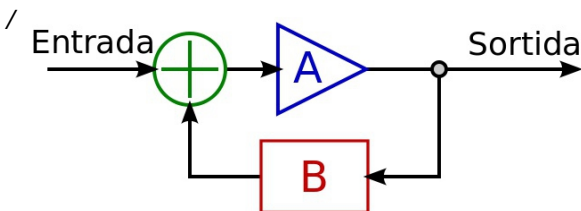
Hi ha més seccions, però aquí no seran discutides degut a la seva poca relació amb el

Multicòpter per a situacions de risc industrial

projecte principal.

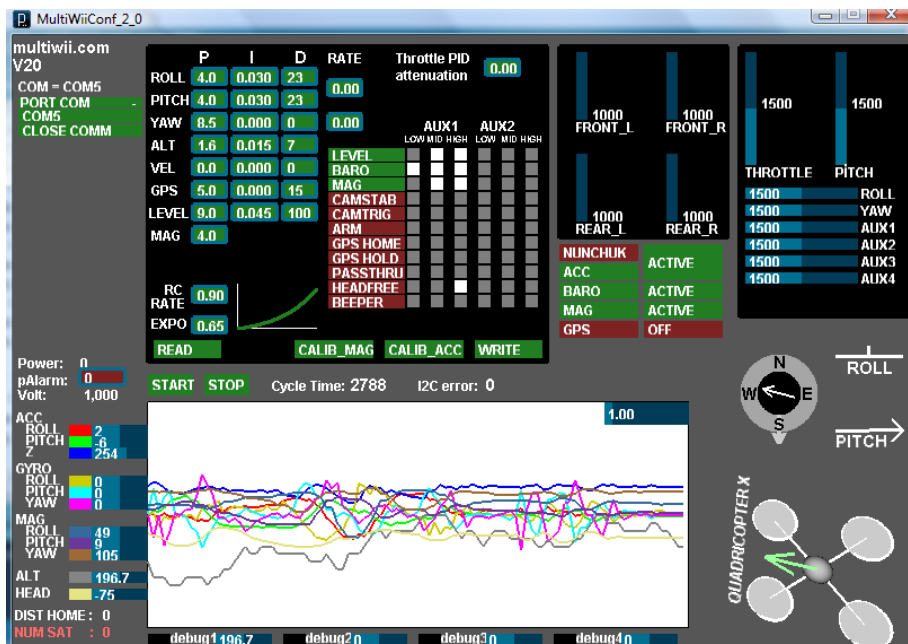
### - PID

Una altra forma d'ajust és l'ajustament de les variables del PID a Multiwii. PID és un protocol de control industrial, en el qual hi ha unes senyals determinades de resposta respecte les d'entrada. És a dir, una funció (la funció de transferència) transforma l'entrada (que són els sensors) en una reacció d'acord amb aquest valor. Però, a més, disposa d'uns sensors que comproven i informen de la resposta provocada per la sortida. Així, l'entrada són els sensors i les dades de la pròpia sortida. La comparació d'ambdós ens dona l'error. És el que s'anomena un sistema de laç tancat, és a dir, que disposa de *feedback*. Una representació gràfica podria ser:



“Arnaugir”. Sistema de control bàsic amb realimentació. Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. 21-10-2012, 13:05. Imatge disponible a [http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Sistema\\_de\\_control\\_b%C3%A0sic\\_amb\\_realimentaci%C3%B3.svg](http://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Sistema_de_control_b%C3%A0sic_amb_realimentaci%C3%B3.svg) >/ Figura 47. Mostra un sistema simplificat de laç tancat. La senyal de sortida, B, és comparada amb l'entrada esdevenint una altra senyal que la funció de transferència A transformarà en sortida, sent aquesta nova sortida comparada altre cop, repetint així el cicle.

Modulant la funció, modulem la reacció, i per tant variem la resposta del multicòpter. Els COMs es varien mitjançant el que s'anomena GUI (figura 47), que no és res més que una interfície d'usuari que modifica els valors del programa amb més facilitat. Cal que la FC estigui connectada a l'ordinador per a poder experimentar senyal i escriure sobre el programa.



“Widelec”. PID tuning. RCGroups, 18-04-2012. Imatge disponible a <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1616910&page=5>. / Figura 47. Resposta de la FC respecte moviments externs observada a la GUI. Les línies del gràfic representen la intensitat de cada senyal (un de cada color) respecte el temps. Es pot veure l'ajustament tipus PID a dalt a l'esquerra.

Héctor Ortega González

La base matemàtica del control PID és senzilla: és simplement una combinació de tres tipus de control: Proporcional, Integral i Derivatiu. Per a comprendre'l en la seva globalitat, cal comprendre el principi en el que es basa cadascun.

El control Proporcional és el més senzill dels tres, i és el més bàsic i de més utilització a sistemes no-complexos. La resposta d'actuació és directament proporcional a l'error que detecta comparant l'entrada respecte la sortida. És a dir, si hi ha un error  $x$ , l'actuació realitzada és  $k \cdot x$ . Estrictament, però, és la *funció* de l'error respecte el temps la que és proporcional a la *funció* de la resposta. Però en la pràctica l'enunciació és la mateixa.

Matemàticament expressat:

Sent:

$$C_p(t) = k_p \cdot e(t)$$

$C_p(t)$  = Funció del Control Proporcional (respecte del temps)  
 $k_p$  = Constant del Control Proporcional  
 $e(t)$  = Funció de l'error (respecte del temps)

/Héctor Ortega González. Control proporcional./ Figura 48. Expressió matemàtica del control proporcional.

L'inconvenient d'aquest tipus de control és que provoca el que anomenem un *offset*. És la variació del punt d'estabilitat o referència a causa del temps que transcorre entre l'actuació inicial del sistema regulador (actuadors) i l'estabilització de l'error de sortida. És a dir, al haver-hi un error a la sortida, els actuadors fan un esforç proporcional per contrarestar-lo. Però el procés NO és instantani, per tant quan l'error ja no hi és les condicions de repòs han canviat. Aplicat al multicòpter, si només existís control Proporcional, al corregir una tendència a la inclinació excessiva (al aturar-se el moviment d'inclinació no desitjat), ja estaria relativament inclinat a causa de que la correcció no ha sigut instantània, i si només disposés d'aquest tipus de control romandria d'aquesta forma. No obstant, en el multicòpter, la utilització d'un sistema de referència absolut, a més dels altres dos tipus de control, impedeix que coses semblants succeeixin. Per els problemes que presenta, a la pràctica el sistema Proporcional pur és poc utilitzat, a més de fer servir sistemes de reajustament basats en punts de referència absoluts evitar *offsets* permanents o de llarga durada.

En el control Integral, la funció de la resposta del sistema és proporcional a l'integral de la funció de l'error respecte el temps. En altres paraules, la *velocitat* de la resposta del sistema és proporcional a l'error d'entrada. Per tant, la derivada de la funció de la resposta (que, de fet, no és res més que la seva velocitat) és igual a una constant per la funció de l'error. Expressat de forma matemàtica:

$$C_i(t) = k_p \int_0^t e(t) dt$$

Sent:

$C_i(t)$  = Funció de Control Integral (respecte del temps)  
 $k_i$  = Constant de Control Integral  
 $e(t)$  = Funció de l'error (respecte del temps)

/Héctor Ortega González. Control integral./ Figura 50. Expressió matemàtica del control integral.

Aquest sistema, a diferència del proporcional, no acumula error ni presenta un *offset*. El problema que presenta el control integral és la seva resposta lenta i progressiva, que actua de forma ondulatoria: mentre hi hagi senyal d'error persisteix l'acció per a la seva correcció, al ser una resposta lenta, al arribar a prop del punt de no error l'acció correctora encara segueix influint, fent que no s'aturi al punt zero de l'error sinó que es passa i estableix un error negatiu, que tindrà menys magnitud, i que novament serà corregit gradualment fins a repetir el procés, esdevenint un error positiu de menys magnitud que l'anterior. Matemàticament, això es repetirà fins a  $t \rightarrow \infty$ . En la realitat, el que succeeix és que el control Integral sí que arriba a eliminar gairebé completament l'error (degut a les forces de fricció i altres motius), però triga massa temps i presenta un fenomen ondulatori normalment no desitjat. Per això el control Integral pur no se sol utilitzar.

El tercer component de control PID, el Control Derivatiu, és l'invers del proporcional. En un sistema de control Derivatiu pur, la funció de la resposta és proporcional a la derivada de la funció de l'error. Dit d'una altra manera: la resposta és proporcional a la velocitat de l'error. Matemàticament expressat:

$$C_d(t) = k_d \frac{d e(t)}{dt}$$

Sent:

$C_i(t)$  = Funció de Control Integral (respecte del temps)  
 $k_i$  = Constant de Control Integral  
 $e(t)$  = Funció de l'error (respecte del temps)

El control derivatiu té unes propietats força interessants (encara que també presenta inconvenients). L'avantatge més evident és l'anticipació que presenta. Com que la resposta és proporcional a la derivada de la funció de l'error, és proporcional a la *tendència* d'aquesta. Per tant, sap el grau de canvi que l'error presenta i pot evitar que l'error es maximitzi abans de que succeeixi. Fins i tot, alguns controls Derivatius tenen sistemes d'emmagatzematge que guarden les dades de les tendències de la funció de l'error en una base de dades, cada cert temps. Així, quan s'han completat diversos cicles, es pot començar a fer-ne la mitjana, per a així, amb l'ús d'altres sistemes de control addicionals d'altra índole, poden corregir millor els errors.

L'inconvenient que el control Derivatiu presenta és la seva brusquedat. Al tractar-se de derivades, es mesura en un temps molt petit, per tant un gran increment de l'error gran establirà com a dada una velocitat infinita, que farà que l'acció correctora actuï de forma brusca i ràpida. Per això no se sol fer servir en la seva forma pura, sinó combinat amb I per tal que se suavitzï aquesta acció.

Com hem vist, els controls Proporcional, Integral i Derivatiu no proporcionen per sí mateixos un control eficient. És per això que gairebé sempre s'utilitza el control PID, que fa que cada tipus de control actuï en un cert percentatge. Per exemple:

$$C_t(t) = p_p \{k_p e(t)\} + p_i \left\{k_i \int_0^t e(t) dt\right\} + p_d \left\{k_d \frac{de(t)}{dt}\right\}$$

Tenint en compte que:

$$p_p + p_i + p_d = 1 \quad p_p, p_i, p_d < 1$$

Sent:

$C_t(t)$  = Control PID total

$p_p$  = Percentatge proporcional

$p_i$  = Percentatge Integral

$p_d$  = Percentatge Derivatiu

Altres símbols: els mateixos que en les equacions anteriors



Multicòpter per a situacions de risc industrial

/Héctor Ortega González. Control PID./ Figura 52. Expressió matemàtica d'un control PID estàndard.

Normalment, però, l'acció està restringida a un tipus de control predominant, usualment el proporcional. Això es fa mitjançant aquesta expressió:

$$C_t(t) = k_p \left\{ e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \right\}$$

/Héctor Ortega González. Control PID amb restricció a P./ Figura 53. Expressió matemàtica d'un control PID restringit a l'acció proporcional (P).

Aquest últim és el tipus del control PID del nostre multicòpter. En l'interfície gràfica d'usuari o GUI (*Graphic User Interface*), hi ha un control de PID per a cada moviment del multicòpter. Recordem-ne els tipus: el THROTTLE (potència), PITCH (endavant/endarrere), ROLL (esquerra/dreta) i YAW (girs sobre sí mateix). Hi ha control en tots excepte en el THROTTLE mateix ja que només expressa la potència entregada als motors i no és susceptible de ser objecte d'un sistema de control de llaç tancat.

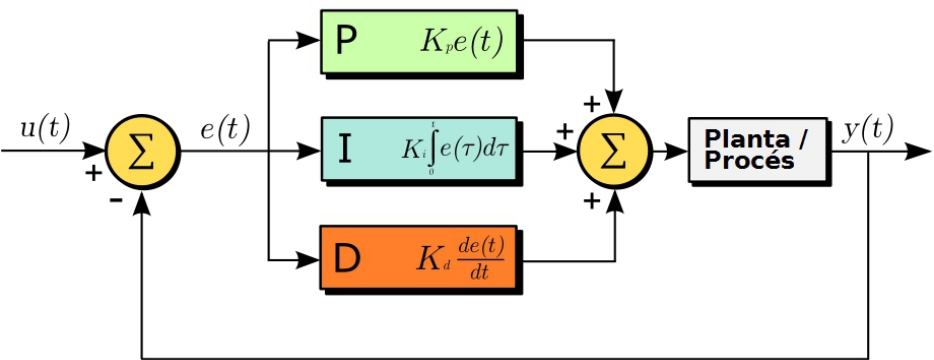
Cal que, en valor derivatiu a Multiwii, un valor més alt significa una acció més petita, ja que específicament en el programa Multiwii 2.1 s'ajusta una variable de derivatiu inversa ( $1/k_d$ ), per tant un valor més gran significa una acció derivativa més petita, i això es tradueix en moviments més suaus.

Trobar la combinació justa de constants de PID que ens convingui per a cada moviment és una tasca molt lenta i complexa. A grans trets, però, un multicòpter de mode acrobàtic no necessita molta exactitud (de fet el pot perjudicar) i amb valors petits, d'acció poc definida, acomplirà molt bé la seva funció. En canvi, un multicòpter de vol estable, com el d'aquest projecte, necessita uns valors elevats per a tenir una acció molt exacte, i l'ajustament d'aquests pot ser una tasca llarga. Com a consignes bàsiques, el valor del derivatiu al GUI hauria de ser alt (és a dir, com hem vist abans, acció baixa), i tenir un proporcional i un integral relativament alts que actuïn entre ells fins al punt desitjat.

Sobre els ajustaments actuals de PID del multicòpter, els quals estan a continuació, cal tenir present que són variables en constant canvi degut a posteriors modificacions o canvi de l'estil de vol, i hauran variat dintre d'un temps. Ajustaments PID (només eixos bàsics, sense mostrar ajustaments de funcions extra):

Eix de moviment	Valor		
	P	I	D
ROLL	4,75	0,052	41
PITCH	4,75	0,052	41
YAW	8,95	0,012	5

Finalment, en aquest esquema podem veure com funciona en global l'acció teòrica de PID: "Zerodamage". *PID\_en.* Imatge modificada i traduïda per "Arnaugir". *Viquipèdia, l'enciclopèdia*



*lliure.21-10-12, 00:32. Imatge original disponible a <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PID\\_en.svg/](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PID_en.svg/)>*

Figura 54. Control PID general (esquema teòric).

### >> ESC: Programació

Com hem vist abans, es fa servir un *firmware* diferent específic per a multicòpter, inventat per Simon Kirby. El que fan és augmentar dràsticament la rapidesa de reacció dels variadors. Està en base AVR. Hi ha molts *firmware* diferents, ja que depenen de la posició dels MOSFETs en el variador. Si es posa un *firmware* incorrecte a un ESC, el més probable és que quedi malmès.

Hi ha una gran base de dades sobre quins *firmwares* són adequats per a determinats variadors a [https://docs.google.com/a/iepegasoviana.cat/spreadsheet/ccc?key=0AhR02IDNb7\\_MdEhfVjk3MkRHVzhKdjU1YzdBQkZZRIE#gid=0](https://docs.google.com/a/iepegasoviana.cat/spreadsheet/ccc?key=0AhR02IDNb7_MdEhfVjk3MkRHVzhKdjU1YzdBQkZZRIE#gid=0). Però hi ha un aspecte sobre el que sempre podem estar segurs: Un variador només és *flashejable* amb un programa SimonK normal si disposa d'un microcontrolador Atmega. Els microcontroladors SiLabs tenen un software específic actualment en desenvolupament.

## CONCLUSIÓ I VALORACIONS

Com hem vist a la introducció, aquest projecte tenia dos objectius principals, encara que es podrien enumerar fins a tres (el primer es pot fraccionar entre la teoria i la realització/disseny/construcció del multicòpter):

El primer objectiu, l'estudi i construcció d'un multicòpter, ha comportat una recerca en profunditat d'aspectes molt diversos, així com la necessitat d'adquirir coneixements teòrics interdisciplinaris, que convergeixen en la seva realització. Aspectes com la cerca de material adient, i dels càlculs necessaris per a escollir-lo en funció del seu pes, buscant una solució en equilibri entre la lleugeresa del material i la seva resistència, així com la facilitat de manipulació del mateix. Tot això combinat amb la tria dels motors adients, i de la bateria adequada per a alimentar-los, i els càlculs requerits per a triar-la.

També ha suposat una llarga investigació el triar un microcontrolador programable adient per a realitzar una Flying Chart artesanal, oberta a canvis i personalització que no serien possibles amb un model comercial. L'aprenentatge i familiarització amb els microcontroladors suposa també un avantatge secundari, ja que es poden aplicar a infinitat de tasques. A més, l'ús de sensors reciclats (comandaments de Nintendo Wii) prova la versatilitat que poden tenir els components electrònics, i que és possible reutilitzar-los satisfactòriament.

La indagació sobre el funcionament teòric i pràctic dels ESC també ha sigut un component sempre present durant tot el desenvolupament del projecte. La investigació i familiarització amb els diferents tipus de microcontroladors (Atmega i SiLabs) ha sigut una de les parts centrals en aquest aspecte, i també ha suposat un enriquiment i una eina útil per al futur. La utilització de software de programació, com AVRDUDE per als Atmega, ha sigut una part important que s'ha tingut que investigar. Tot i que al final no s'han fet canvis de *firmware* en els ESC, es faran en un futur pròxim per a millorar la resposta de vol del quadcòpter.

En conclusió, aquest primer objectiu ha estat prou satisfactori. S'ha investigat sobre la teoria i implementació dels components d'un multirroter i s'ha pogut acabar de construir i

Multicòpter per a situacions de risc industrial

provar un quadcòpter dins el termini.

El segon objectiu, l'adaptació del multicòpter per a situacions de risc industrial, ha estat realitzada de forma satisfactòria, ja que disposem d'una sonda funcional que llegeix valors mitjançant el programa BluePicaxe, que connecta via un adaptador Bluetooth al PICAXE 08-M2 implementat en una placa AXE092, on hi ha connectat un sensor de temperatura del qual es llegeixen valors reals a 9600 bauds (foto de portada). Tot i que el sistema físic de connexió al propi multicòpter no s'ha plantejat, el sistema típic *payload* (càrrega de material) no hauria de suposar un problema excessivament gran d'implementació al multicòpter, i s'implementarà en un futur proper. Per tant, podem considerar el segon objectiu també tot un èxit.

Com a conclusió final, els multicòpters han demostrat ser una eina útil en molts aspectes, com per exemple el didàctic. La realització d'un disseny, i la seva construcció, requereixen coneixements interdisciplinaris i recerca, com ja hem mencionat. Però també tenen molts altres camps d'aplicació, que tot just comencen a ser explorats. De fet, des del començament d'aquest projecte fins a dia d'avui, s'ha pogut observar un increment d'interès general envers aquest tipus d'aeromodels, tant per a aplicacions lúdiques com per a professionals. Tasques com filmació sobre l'aigua, vigilància forestal, control d'incendis, anàlisi de reaccions químiques no desitjades en abocadors, i fins i tot detecció de mines, són un dels exemples de futures aplicacions per a multicòpters, projectes que ara estan en fase de desenvolupament, i que en un futur pròxim podrien ser la norma. Els multicòpters com a eines només acaben d'enlairar-se, i tenen un llarg i ampli camí per recórrer.

NOTA (12-09-2013): De fet, aquest projecte ha seguit viu fins i tot després de la seva finalització formal a l'entrega dels Treballs de Recerca el Gener de 2013. En concret, el desenvolupament per compte propi del multicòpter ha portat a la implementació d'un sistema de posicionament GPS, amb utilització del mateix per a diverses funcions de manteniment/viatge a unes coordenades exactes, i de sistema FPV (càmera en visió de primera persona, utilitzada per a el control en temps real).

Multicòpter per a situacions de risc industrial

El GPS (model U-Blox 6M) ha sigut implementat mitjançant un microcontrolador ATmega8 (328p) intermedi entre la Flying Chart (amb la que s'hi comunica via protocol I<sup>2</sup>C), y el GPS (amb el qual es comunica via protocol USB/TTL/Serial a 115200 bauds) en sí mateix, tot alimentat per la connexió comuna V+/GND existent entre els tres components. El GPS i la placa amb el microcontrolador adaptador estan implementades en una estructura feta a mà, a sobre de la part de darrere del multicòpter per a aconseguir un millor senyal. Aquesta implementació permetrà catalogar punts conflictius en una situació de risc industrial, i associar-los a unes coordenades GPS exactes, acció molt útil i de vital importància per a identificar àrees amb zones de risc en posicions concretes controlades.

La càmera FPV (model SONY CCD color de 1/3 polzades) transmet la imatge gràcies a un transmissor i receptor model Boscam 5,8 GHz. Tant la càmera com el transmissor estan alimentades per una bateria LiPo model Rhino 460 mA 3S 11.1 v 20C. La càmera té una estructura petita de suport, juntament amb uns servos de 5 g (model HXT500) que la subjecten, que permet que giri lliurement en dos eixos (Pan (esquerra a dreta) i Tilt (dalt a baix)). El receptor connecta directament amb un ordinador mitjançant un adaptador de vídeo analògic a digital (llegible per l'ordinador), i mostra imatges en directe des de la perspectiva del multicòpter. Tant la bateria, com la càmera i el seu sistema de gir, com el transmissor estan muntades en una estructura feta a mà, a sota de la part frontal de l'aparell, per a obtenir la màxima visibilitat.

Aquesta implementació permet una tasca vital: el lliure moviment del multicòpter per àrees que no són visibles des del punt provisional on es munta l'estació de terra.

Per a finalitzar aquest incís: ara, uns mesos després de l'entrega del projecte, l'aparell té els seus propis sistemes d'interacció amb l'entorn, deixant llest per a la tasca el multicòpter, que vola satisfactòriament i compleix el seu objectiu.

NOTA: Vídeos de vol, muntatge, sensors, etc. es troben al CD.

Multicòpter per a situacions de risc industrial

## **BIBLIOGRAFIA**

> Fonts d'informació:

Arduino:

<http://arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardNano>

Battery University:

<http://batteryuniversity.com/>

[http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells)

[http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations)

DigitalDuino Blog:

<http://dduino.blogspot.com.es/2012/04/quadcopterbuild-log.html>

Elabz:

<http://elabz.com/bldc-motor-with-arduino-circuit-and-software/>

<http://elabz.com/brushless-dc-motor-with-arduino/>

Gravitech:

[http://site.gravitech.us/Arduino/NANO30/Arduino\\_Nano3\\_0.pdf](http://site.gravitech.us/Arduino/NANO30/Arduino_Nano3_0.pdf)

Instructables:

<http://www.instructables.com/id/BLDC-Motor-Control-with-Arduino-salvaged-HD-motor/?ALLSTEPS>

Multiwii:

<http://www.multiwii.com/>

<http://www.multiwii.com/software>

RCGroups:

<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1679621>

<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=598050>

Southern Soaring Club Cape Town: <http://www.southernsoaringclub.org.za>

SpinGarage: <http://blog.spingarage.com/build-a-diy-brushless-motor-controller-in-a-d>

Multicòpter per a situacions de risc industrial

The Bolly Book: Propeller Theory:

<http://www.bolly.com.au/book/Book.php?Chapter=2&Section=2>

<http://www.bolly.com.au/book/Book.php?Chapter=2&Section=3>

Viquipèdia:

<http://es.wikipedia.org/wiki/1%C2%B2C> <http://ca.wikipedia.org/wiki/1%C2%B2C>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-position\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-position_modulation)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Rare-earth\\_magnet](http://en.wikipedia.org/wiki/Rare-earth_magnet)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet)

[http://ca.wikipedia.org/wiki/Nombre\\_de\\_Reynolds](http://ca.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Outrunner>

Altres: <http://elcuadernodecalpurniatate.blogspot.com.es/2012/03/quimica-redox-en-tu-iphone-blackberry.html>

<http://www.gaston-lithium.com/tech-certificates.html>