



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

ESTUDI DEL HARDWARE DEL PILOT AUTOMÀTIC ARDUPILOT

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTOR: Miquel Juhé Lluveras

DIRECTOR: Enric Pastor Llorens

DATA: 19 de Juliol del 2011

Títol: Estudi del Hardware del pilot automàtic Ardupilot

Autor: Miquel Juhé

Director: Enric Pastor Llorens

Data: 19 de Juliol del 2011

Resum

Un pilot automàtic és un sistema generalment electrònic que, en els objectes voladors, serveix per mantenir un vol estable i rectilini o realitzar maniobres controlades.

Un sistema de pilotatge automàtic és imprescindible als UAV o *Unmanned Aerial Vehicles*, que són vehicles aeris no tripulats. Com que no són tripulats, no compten amb la intervenció de cap pilot des de la cabina per corregir les perturbacions externes i el pilot automàtic cobra més importància.

Aquest treball es centra en un d'aquests sistemes de pilot automàtic per UAVs anomenat Ardupilot. L'Ardupilot està basat en la tecnologia oberta Arduino i és un hardware de baix cost però amb altes prestacions que permet ser configurat completament per aconseguir una estabilitat i un guiatge a mida.

Per tant, l'objectiu d'aquest treball és analitzar el hardware de l'Ardupilot, des dels elements i sensors més petits fins a la integració del sistema per, d'aquesta manera facilitar el treball i la configuració del grup Icarus.

Per fer-ho s'han analitzat els components individualment i estudiat la connectivitat entre ells per acabar amb un resum complet del sistema.

Title: Hardware study of Ardupilot autopilot

Author: Miquel Juhé

Director: Enric Pastor Llorens

Date: July 19, 2011

Overview

An autopilot is a system generally electronic that, in flying objects, is able to maintain a stable and horizontal flight or execute controlled maneuvers.

In UAVs or Unmanned Aerial Vehicles an autopilot is essential. Since they are unmanned, they do not count on the intervention of any pilot inside the cockpit to mend the external perturbations so the autopilot gets more relevance.

This project is based in one of these autopilot systems for UAVs, the Ardupilot. Ardupilot is made over the open source Arduino basics and it is a low cost hardware with high performances. It can be fully configured to get personal stabilization and guiding.

The objective of this project is analyzing the Ardupilot hardware, from the smallest elements and sensors to the whole system integration to facilitate the work of the Icarus group.

To do so, all the individual elements have been analyzed and their connectivity has been studied to find out the whole system integration overview.

ÍNDIX

ÍNDIX DE FIGURES.....	8
INTRODUCCIÓ	10
CAPÍTOL 1. FONAMENTS	12
1.1. UAV.....	12
1.2. Pilots Automàtics	14
1.2.1. Definició general.....	14
1.2.2. Ardupilot.....	16
CAPÍTOL 2. IMU SHIELD	18
2.1. Components	18
2.1.1. Acceleròmetre (9).....	18
2.1.2. Giroscopis (2 i 10)	20
2.1.3. Sensor de pressió (3)	23
2.1.4. Magnetòmetre (port 6).....	25
2.1.5. Convertidor Analògic/Digital (8).....	25
2.2. Integració de la placa.....	27
2.2.1. Busos d'alimentació	27
2.2.2. Busos de senyal	30
2.2.3. Entrada i sortida	34
CAPÍTOL 3. ARDUPILOT.....	36
3.1. Components	36
3.1.1. Microprocessador principal.....	36
3.1.2. Microprocessador secundari (codificador PPM).....	39
3.1.3. Multiplexor	39
3.2. Integració	41
3.2.1 Busos d'alimentació	41
3.2.2. Busos de senyal	42
3.2.3. Entrada i sortida	42
CAPÍTOL 4. GPS I ANTENES	44

4.1. GPS	44
4.1.1 Fonaments	44
4.1.3 Connexió amb el sistema	47
4.2 Antenes.....	48
CAPÍTOL 5. INTEGRACIÓ DEL HARDWARE	49
CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS	53
BIBLIOGRAFIA	54
ANNEX A. ENSAMBLATGE DEL HARDWARE	56
ANNEX B. ARDUPILOT HARDWARE SETUP	60
ANNEX C. CONFIGURACIÓ DELS PARÀMETRES PID.....	62
ANNEX D. DETALL DELS CIRCUITS.....	65
D.1. IMU Shield.....	65
D.2 Ardupilot	66

ÍNDIX DE FIGURES

Fig. 1.1 MQ-1 Predator construït per General Atomics Aeronautical Systems Inc. [25]

Fig. 1.2 RQ-2B Pioneer dissenyat per Pioneer UAV Inc. I operat pel cos de marines dels Estats Units d'Amèrica [25]

Fig. 1.3 RQ-7 A/B Shadow 200. Construït per AAI. Usat normalment en missions de reconeixement. [25]

Fig. 1.4 El Curtis C-2 que Lawrence Sperry va equipar amb el seu pilot automàtic i amb el que es va presentar al concurs. [24]

Fig. 1.5 Esquema d'un pilot automàtic. [26]

Fig. 1.6 Gràfic de la resposta temporal de dos pilots automàtics amb diferent dumping factor (ζ) [26]

Fig. 2.1 Imatge de la placa IMU Shield amb tots els seus components numerats [2]

Fig. 2.2 Diagrama de blocs funcional del sensor ADXL335 [1]

Fig. 2.3 Esquema del principi físic del giroscopi MEMS [11]

Fig. 2.4 Diagrama de blocs funcional del sensor IDG-500 [15]

Fig. 2.5 Diagrama de blocs del sensor ISZ-500 [16]

Fig. 2.6 Tres exemples de displays d'altimetres. D'esquerra a dreta, any 1913, 1930 i altímetre analògic actual. [7]

Fig. 2.7 Esquema de blocs intern del sensor BMP085 [8]

Fig. 2.8 Esquema de blocs del funcionament d'un convertidor ADC amb tecnologia SAR [9]

Fig. 2.9 Esquema del *timing* del conversor. [9]

Fig. 2.10 Esquema de les connexions de l'ADC. Més informació a la secció 2.2.2

Fig. 2.11 Xarxa d'alimentació principal (5 Volts). Els punts blaus representen sortides a l'altra placa, els parèntesi el número de codi del component segons la Fig. 2.1 i els números entre claudàtors els pin son està connectat. El punt vermell respresenta la font d'alimentació de la placa Ardupilot.

Fig. 2.12 Xarxa d'alimentació secundària (3.3 Volts)

Fig. 2.13 Xarxa d'alimentació secundària (3.3 Volts). Els parèntesi són els números de control dels components segons la figura 2.1, els números entre claudàtors són els pin son està connectat.

Fig. 2.14 Representació de la placa IMU. Ressaltat amb vermell (i blau) la línia d'alimentació de 5V.

Fig. 2.15 Representació de la placa IMU. Ressaltat amb vermell (i blau) les línies d'alimentació de 3.3V.

Fig. 2.16 Remarcat amb vermell una de les dues línies del bus I²C de la placa IMU Shield.

Fig. 2.17 Esquema de la instal·lació d'un bus SPI d'N esclaus.

Fig. 2.18 Remarcat amb vermell (i amb blau) les línies del bus SPI que va del convertidor ADC al microprocessador.

Fig. 2.19 Amb vermell les línies del bus SPI que van de la memòria EEPROM al microprocessador principal passant pel port d'expansió SPI.

Fig. 2.20 Amb vermell les línies del bus UART des del port USB fins al microprocessador.

Fig. 3.1 Imatge de la placa Ardupilot amb tots els seus principals elements enumerats [2]

Fig. 3.2 Esquema de blocs de l'AVR ATmega1280

Fig. 3.3 Esquema de l'execució d'un programa

Fig. 3.4 Gràfic del funcionament de la codificació digital PPM [25]

Fig. 3.5 Il·luminat en vermell (o blau) la línia d'alimentació de la placa Ardupilot.

Fig. 3.6 Esquema de blocs del bus d'alimentació de la placa de l'Ardupilot, els punts blaus representen sortides cap a l'altra placa o cap a dispositius externs. El punt vermell és la connexió entre els dos sistemes d'alimentació de les dues plaques.

Fig. 3.7 Esquema de les entrades i sortides als actuadors de la placa Ardupilot

Fig. 4.1 Esquema aproximat del diagrama de radiació d'una *patch antenna*. [27]

Fig. 4.2 Esquema de les connexions del GPS a la placa

Fig. 5.1 Esquema qualitatiu de la distribució d'elements i la seva connectivitat entre ells a l'Ardupilot.

Fig. 5.2 Esquema de les principals entrades i sortides de l'Ardupilot [2]

Fig. 5.3 Imatge de les entrades i sortides pels servos i equips RC de l'Ardupilot [2]

Fig. A.1 Tots els elements dels que consta l'Ardupilot Mega kid que es pot comprar junt o per separat cada element.

Fig. A.2 Placa Ardupilot amb els pin headers amb angle soldats.

Fig. A.3 Tallant els male headers per a què encaixin en a les femelles.

Fig. A.4 Placa Ardupilot amb els pin headers mascles ja soldats als forats corresponents

Fig. A.5 Les dues plaques ja soldades amb els seus corresponents connectors.

Fig. A.6 Ardupilot complet amb el GPS enganxat al port corresponent.

Fig. C.1 Captura de pantalla del Mission Planner de l'Ardupilot.

INTRODUCCIÓ

Quan ja fa més d'un segle de l'inici de la història de l'aviació tal com la coneixem avui en dia, encara queda molt terreny per córrer. D'aquells primers avions que amb prou feines es podien controlar i que no s'aixecaven més de 100 metres del terra hem passat als avions que es piloten pràcticament sols capaços de fer la volta al món sense posar combustible. Però tot i això, les finestres obertes encara són múltiples. La recerca al camp de l'aviació comercial sembla estar destinada avui en dia a l'eficiència, la reducció de soroll o l'augment de capacitat, però quan girem apartem la vista i ens fixem en altres tipus d'aviació ens adonem que la recerca està destinada a conceptes molt dispersos.

I aquí és on entren els UAV o *Unmanned Aerial Vehicles*. Aquests avions o helicòpters (o qualsevol altre tipus d'objecte aeri motoritzat que crei sustentació aerodinàmica) són el present o futur immediat per resoldre molts dels riscos o problemes que presenta l'aviació avui en dia.

Si féssim un recull de notícies sobre desastres aeris segurament ens trobaríem que la gran majoria es donen durant tasques d'extinció d'incendis, de salvament i rescat o les mateixes missions militars. Per tant, quina és la solució davant la pèrdua de vides humanes en missions aèries de risc? Doncs que aquests avions o helicòpters es pilotin sols, sense la necessitat d'una persona volant al seu interior.

Els UAV no són una tecnologia nova, però encara compten amb un gran marge de millora. Des dels primers globus aerostàtics guiats pel vent amb un temporitzador per les bombes fins als UAV plens de sensors i càmeres per missions de reconeixement actuals passant pels míssils autodirigits de la segona guerra mundial, els UAV han estat un dels objectius centrals de les forces armades de mig món durant la història.

I durant els últims anys aprofitant els avenços fets en el terreny militar, l'aviació civil ha anat incorporant els UAV per objectius varis com poden ser el control de fronteres, la prevenció i extinció d'incendis, missions de vigilància i rescat, control de canonades, observació agrícola...

Però per a que aquests avions no tripulats puguin desenvolupar el seu objectiu, necessiten *alguna cosa* que els controli. Si l'objectiu és, per exemple, la inspecció d'una zona boscosa i l'obtenció de fotografies, l'UAV ha de ser capaç de seguir una traçada, passar per uns waypoints prèviament seleccionats a una certa altura i tornar. Però a més, el més important segurament és que tot això ho ha de fer autònomament i preservant la seva pròpia seguretat i integritat. Si, per exemple, aquest avió mentre està sobrevolant la zona boscosa es troba amb una ràfega de vent creuat intens que el desequilibra, ha de ser capaç de corregir els alerons o l'estabilitzador per tornar al seu estat previ de vol uniforme i rectilini.

I qui s'encarrega de fer tot això si l'avió és no tripulat? Doncs el pilot automàtic. El mateix pilot automàtic que permet a un Airbus A340 fer un trajecte de Barcelona a Nova York sense pràcticament tocar els comandaments de vol és el que controla l'UAV. De fet les diferències internes són mínimes. Els dos es basen en les dades de l'entorn exterior obtingudes a través d'uns sensors, les processen i comparen amb els valors "objectiu" i quan no coincideixen actuen sobre les superfícies de vol per corregir-ho.

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar amb profunditat el hardware d'un d'aquests sistemes de pilot automàtic, l'Ardupilot. Amb aquest estudi es pretén que qualsevol usuari que vulgui adquirir aquesta plataforma pugui ser capaç d'identificar tots els elements que conté, entendre les seves funcionalitats, conèixer les seves capacitats i màxims operatius i, en definitiva, pugui saber fer funcionar la plataforma.

El projecte està dividit en cinc capítols. En el primer es fa una petita introducció als conceptes de UAV i pilot automàtic per posar en situació al lector. En el segon capítol s'hi descriu una de les dues plaques amb les que compta el sistema, la de l'IMU Shield, allà on s'hi concentren tots els sensors. En el tercer, es parla de l'altra placa, on hi ha el processador i les sortides als actuadors. Finalment en el quart capítol es parla del GPS i la connexió wireless amb l'estació base i en el cinquè i últim es fa una conclusió de la integració del hardware.

CAPÍTOL 1. FONAMENTS

1.1. UAV

UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*. Basant-nos en el seu nom, un UAV és un vehicle aeri no tripulat. Dins d'aquest grup, com es pot entendre, hi caben multitud d'objectes o aparells diversos. Un globus d'heli, un avió de paper o una bala es podrien considerar com vehicles aeris no tripulats. És necessari doncs, definir cada un d'aquests conceptes abans de poder entendre què i què no és un UAV.

Segons la seva definició, un UAV és un vehicle aeri motoritzat no tripulat, que utilitza forces aerodinàmiques per produir sustentació, que pot volar autònomament o ser teledirigit i que és capaç de transportar un cert payload. D'aquesta manera i a partir d'aquesta definició, ja podem descartar les tres propostes que hem plantejat abans; un globus no és motoritzat, un avió de paper no pot ser dirigit i una bala no pot transportar càrrega.

Però, si ja existeixen els avions i helicòpters convencionals, per què serveix un UAV?

La primera necessitat que va aparèixer per començar a desenvolupar aquests artefactes va ser (com moltes altres en el món de la tecnologia) militar. Es volia disposar d'un objecte volador capaç de participar en combats actius o missions de reconeixement sense el risc de la pèrdua de vides humanes en cas de ser abatut.

Podríem considerar que els primers pseudo-UAV van aparèixer a finals del segle XIX quan l'exèrcit austríac va desenvolupar uns globus aerostàtics carregats amb material explosiu que, aprofitant el vent i un dispositiu electromagnètic, eren capaços de deixar anar les bombes a sobre de l'objectiu. Si bé és veritat que avui en dia un globus com aquests no es podria considerar un UAV ja que no genera sustentació a partir de forces aerodinàmiques ni és motoritzat, sí que es pot considerar com la primera llavor per al desenvolupament dels UAV com els coneixem avui en dia.

A partir d'aquí, durant la primera i segona guerra mundials la recerca es va centrar en els torpedes aeris dirigits remotament. Al principi es llançaven des d'altres avions i eren dirigits per radio control des d'aquests, i més endavant, cap als anys 40, es van començar a implantar càmeres de televisió per poder ser controlats des de vaixells o estacions base. En aquell temps, però, no tothom estava d'acord en la investigació en UAV perquè aquests primers torpedes aeris tenien un índex d'efectivitat relativament baix comparat amb els atacs amb armes convencionals.

No va ser fins a la meitat dels anys 60 quan es van començar a desenvolupar els primers UAV de reconeixement usats pels Estats Units per espiar les zones comunistes de la Xina i el Vietnam. Precisament en aquesta guerra, des del 1964 fins al 1975, es van perdre en combat més de 500 UAVs, fet que va estalviar la pèrdua de centenars de vides humanes. [27]

Tot i que l'eficàcia dels UAV havia quedat constatada, no va ser fins vint anys més tard quan es van començar a usar en missions actives de combat, i tot i així, fins després de la guerra dels Balcans no es va començar a tenir en compte el poder i avantatges que proporcionaven els UAVs. Però realment el cop d'efecte es va produir després dels atemptats de les Torres Bessones de Nova York del 2001. A partir de les guerres d'Afganistan i l'Irak, les inversions en UAV als Estats Units van passar de 2.27 milers de milions de dòlars a 14 [25].

Actualment, la principal funció dels UAV segueix sent la militar i la majoria dels recursos i els avenços es fan en aquest camp [fig 1.1 a 1.3, alguns exemples d'UAVs actualment utilitzats per les forces armades dels Estats Units]. Tot i això, amb la gran expansió que han tingut en aquest segle, s'ha vist que els UAV poden servir per moltes altres coses. Entre les aplicacions no-militars més destacables que se li donen hi ha la d'inspecció de canonades i línies d'alta tensió, control de fronteres, prevenció d'incendis, missions de rescat, busca de petroli i gas, topografia i desastres naturals i fins i tot aplicacions agrícoles.

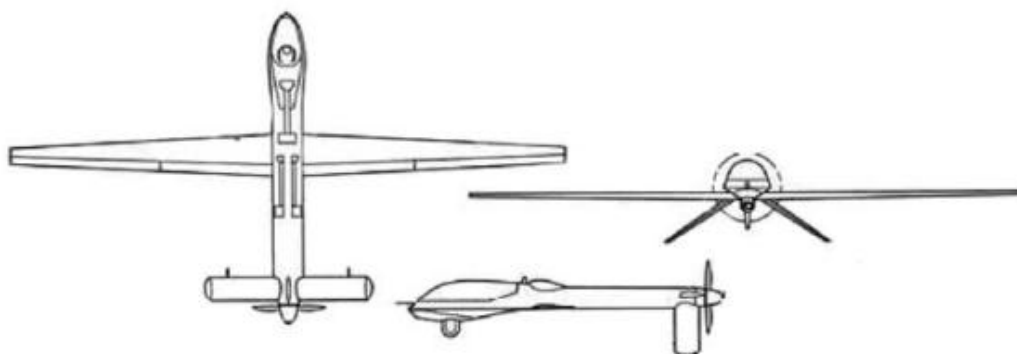


Fig. 1.1 MQ-1 Predator construït per General Atomics Aeronautical Systems Inc. [25]

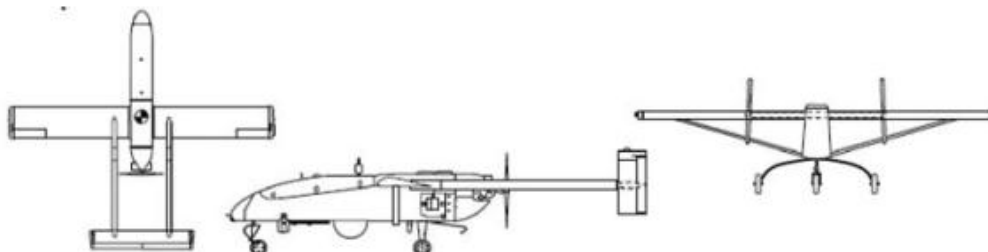


Fig. 1.2 RQ-2B Pioneer dissenyat per Pioneer UAV Inc. I operat pel cos de marines dels Estats Units d'Amèrica [25]

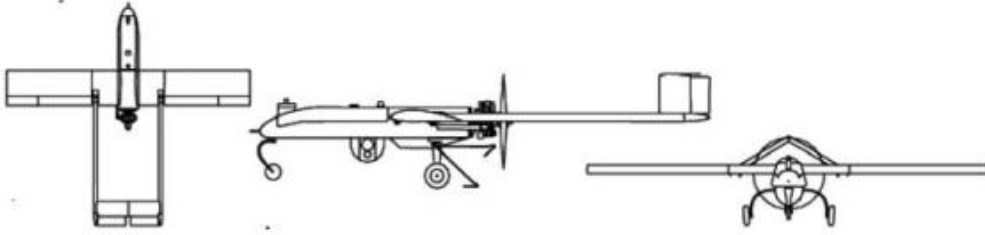


Fig. 1.3 RQ-7 A/B Shadow 200. Construït per AAI. Usat normalment en missions de reconeixement. [25]

L'objectiu del nostre UAV serà el de la recerca i el desenvolupament de nous mètodes i sistemes per millorar la separació vertical mínima entre els avions, que actualment està regulada en 1000 peus [12].

1.2. Pilots Automàtics

1.2.1. Definició general

Immediatament després que a principis del segle XX es desenvolupessin els primers avions, es va fer evident que la càrrega de treball que havia de suportar el pilot (o pilots) durant un vol era excessiva. En aquelles primeres aeronaus, amb escassa estabilitat era necessària la intervenció constant del pilot sobre els comandaments de vol per corregir qualsevol perturbació i mantenir un vol rectilini. Va ser al 1914, només 11 anys després que els germans Wright fessin el seu primer vol (el que és considerat el primer avió de la història), que el nord-americà Lawrence Sperry va inventar el pilot automàtic.

Sperry i Emil Cachin, el seu mecànic, van presentar el seu primer pilot automàtic en un concurs francès de seguretat aèria l'any 1916. Després de moltes propostes també importants pel futur de l'aeronàutica (com magnetos, carburadors o self-starters), Sperry i Cachin van pujar a l'avió i van fer tres passades per sobre del jurat i el públic. A la primera passada Sperry va deixar anar les mans dels comandaments, aixecant-les perquè tothom les veiés. A la segona passada, el seu mecànic va enfilarse en una ala mentre l'avió passava per sobre els caps dels assistents. Després d'una petita inclinació pel canvi de pes, l'avió va recuperar el seu vol anivellat sense que ningú actués sobre les superfícies de control més que el pilot automàtic. Per últim i per acabar-ho de demostrar, Sperry i Cachin es van enfilarse cadascun en una ala sense ningú als comandaments davant la mirada impressionada dels assistents. Aquest "show" els va valer el primer premi, de 50.000 francs, un contracte amb l'exèrcit francès i la fama immediata. Aquell rudimentari, però eficient, pilot automàtic es basava en giroscopis, un generador elèctric i actuadors hidràulics. [24]

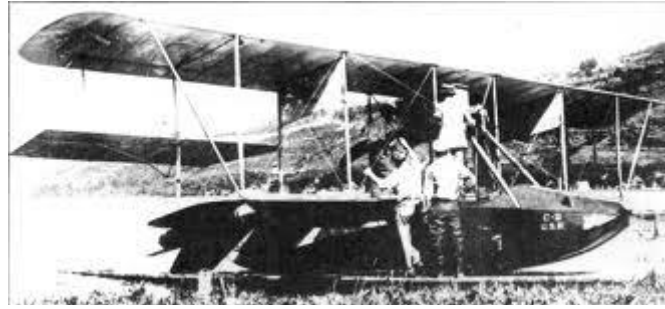


Fig. 1.4 El Curtiss C-2 que Lawrence Sperry va equipar amb el seu pilot automàtic i amb el que es va presentar al concurs. [24]

Amb aquesta primera pedra, els pilots automàtics es van anar perfeccionant i van acabar sent el que són ara, una eina que no només manté l'avió en vol constant i uniforme, sinó que són capaços de guiar-lo a través d'una ruta, aterrar o dur a terme maniobres determinades.

Un pilot automàtic, pot ser, en definitiva, qualsevol sistema mecànic, hidràulic o electrònic que pugui mantenir l'avió en equilibri i portar-lo d'una posició d'equilibri fins una altra.

En el nostre cas, estem estudiant un pilot automàtic electrònic. Les entrades són els sensors, mentre que les sortides són els actuadors. [veure Fig 1.5 a tall d'exemple]. El funcionament és simple. Es fixa un valor final objectiu (pot ser un rumb, una alçada, una actitud...) i el pilot automàtic, a partir de les mesures dels sensors que té, assoleix aquest valor objectiu mitjançant els actuadors (alerons, potència del motor, compensadors ...).

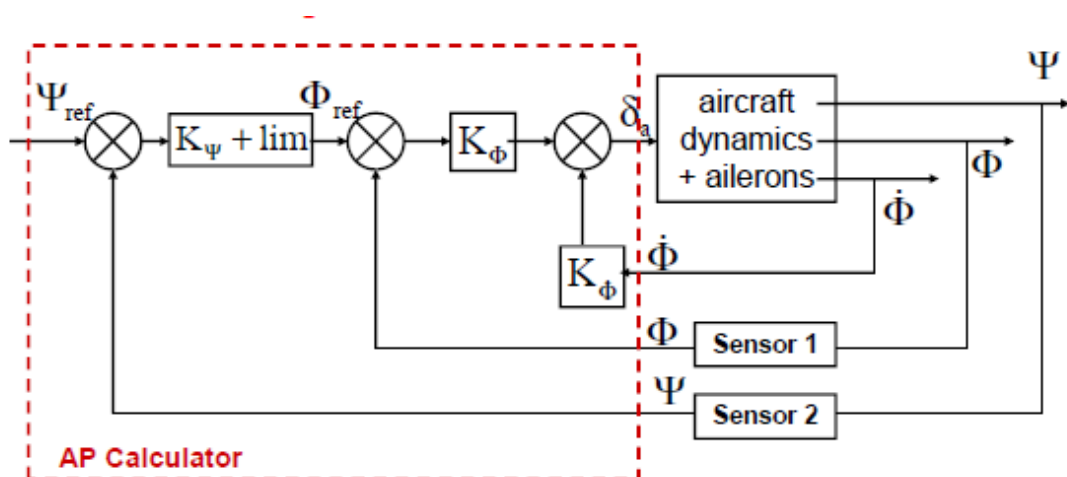


Fig. 1.5 Esquema d'un pilot automàtic. [26]

Aquesta definició del funcionament dels pilots automàtics, però, es queda molt curta si ens fixem en tota la part matemàtica i informàtica que hi ha al darrere, ja que aquest valor objectiu es pot obtenir de diverses formes. La resposta del pilot automàtic en el temps pot dibuixar un gràfic com aquest [Fig 1.6 línia

verda] o un altre com aquest [Fig 1.6 línia blava]. Que ho faci d'una manera o de l'altre depèn dels paràmetres que es defineixin en la seva programació. Com que en el nostre cas es fa a través del software que configura la programació del microprocessador, no hi entrarem.

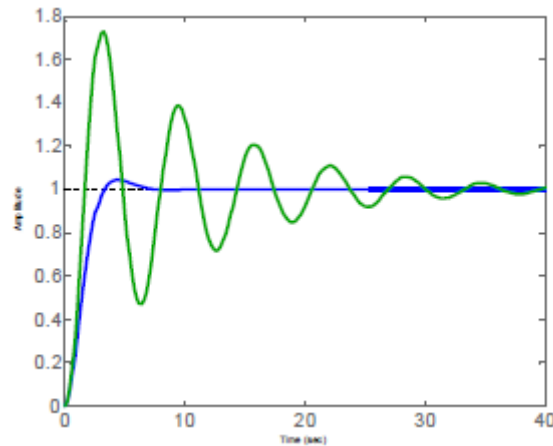


Fig. 1.6 Gràfic de la resposta temporal de dos pilots automàtics amb diferent dumping factor (ζ) [26]

1.2.2. Ardupilot

La plataforma que nosaltres estudiem és l'Ardupilot. L'Ardupilot és un sistema de pilot automàtic per UAVs basat en la plataforma de codi obert Arduino que utilitza dues plaques, una pels sensors i l'altre per l'electrònica i l'enviament de senyals als actuadors.

L'Ardupilot va ser ideat i dissenyat pel grup DIY Drones, liderat per Chris Anderson i Jordi Muñoz. La seva primera aparició en públic va ser al 15 d'Abril del 2009 quan en un concurs de l'empresa Sparkfun sobre UAVs creats per aficionats el grup DIY Drones va guanyar el concurs (una cursa) amb més d'un minut de diferència sobre el seu màxim rival. [3]

A partir d'aquell moment la plataforma va anar evolucionant fins a la que estudiem nosaltres, l'Ardupilot Mega o pel seu número de versió, l'Ardupilot 2.7.

La plataforma Arduino en la que es basa aquest pilot automàtic és una placa amb un microprocessador i línies d'entrada i sortida. L'objectiu dels creadors d'aquesta plataforma, al 2005, va ser crear un sistema econòmic per controlar projectes d'estudiants interactius, és a dir, afegir un microcontrolador a un projecte electrònic creat per estudiants (i un ADC si calia).

El hardware de l'Arduino, així com el de l'Ardupilot, es programa amb una versió de C++ amb algunes simplificacions i modificacions a través d'un programa IDE (*Integrated Development Environment*), és a dir, un programa capaç d'editar línies de codi, compilar-les i interpretar-les i debugar.

Com ja hem vist, l'objectiu dels pilots automàtics és el de mantenir un vol estable a nivell i realitzar maniobres per navegar l'avió. Això l'Ardupilot ho aconsegueix gràcies als sensors situats a la placa de l'IMU Shield que li proporcionen les dades necessàries per conèixer l'actitud de l'UAV, la seva alçada o la seva acceleració. A més, compta amb les dades del GPS extern que li facilita l'estat de la velocitat i la posició al mapa.

Un enllaç de dades mitjançant les antenes XBee embarcades permeten a l'estació terrena conèixer l'estat de l'UAV en tot moment i maniobrar-lo manipulant els paràmetres del pilot automàtic.

Tots aquests processos que tenen lloc al pilot automàtic serveixen per actuar sobre els *servos* que controlen les superfícies de vol o el motor.

Abans es calculava la posició dels avions amb una sèrie d'acceleròmetres combinats amb giroscopis basant-se en els principis de la mecànica bàsica integrant el sistema INS (del que després es parlarà 2.1.2). Si saps l'acceleració, integrant pots saber la velocitat i tornant a integrar pots saber la posició (amb algunes dades inicials necessàries per fer-ho). Això, però, tenia molts problemes perquè en avions que volen llargues distàncies, un petit error en la mesura de l'acceleració implicava un error enorme en la mesura de la posició i, per tant, era poc fiable.

Els acceleròmetres més comuns són els piezoelèctrics i els capacitius. Els primers funcionen a base d'uns cristalls microscòpics que a partir de l'acceleració s'exciten i produeixen una diferència de tensió. Els capacitius, en canvi, es basen en dues superfícies, una fixa i l'altra suspesa d'una molla separades entre sí formant un condensador. Al aplicar una acceleració sobre les superfícies la que té llibertat de moviment s'allunyarà o aproparà a la primera provocant així un canvi en el valor de la capacitat que formen:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

L'acceleròmetre que utilitzarem nosaltres és el ADXL335 fabricat per l'empresa americana *Analog Devices*, especialitzada en sistemes electrònics. Aquest sensor utilitza la tecnologia capacitiva per aconseguir el valor de l'acceleració (tan l'estàtica com la dinàmica).

El ADXL335 consta d'una superfície de *polysilicon* (o silici policristalitzat) penjant d'una molla a sobre d'una làmina també de silici formant un condensador. Quan el sensor es mou (experimenta una acceleració) produeix un canvi en la posició de la massa que penja de la molla i d'aquesta manera produeix un canvi en el valor de la capacitat. Aquest canvi produeix una variació lineal en tensió respecte a l'acceleració aplicada. Després, a partir de la demodulació de la fase es pot determinar la magnitud i direcció de la pertorbació. Aquesta senyal doncs, un cop demodulada és amplificada i surt del sensor a través d'una resistència de 32 k Ω . Després, l'usuari selecciona l'ample de banda mitjançant un condensador (entre 0.5 Hz i 1600 Hz pels eixos X i Y i entre 0.5 Hz i 550 Hz per l'eix Z)[C_x , C_y i C_z en la figura 2.2]. D'aquesta manera, el sensor consta de tres sortides analògiques per X, Y i Z proporcionals al valor de l'acceleració aplicada. Quan el sensor detecta una acceleració de 0 g, el valor analògic de sortida és el valor mig de V_s .

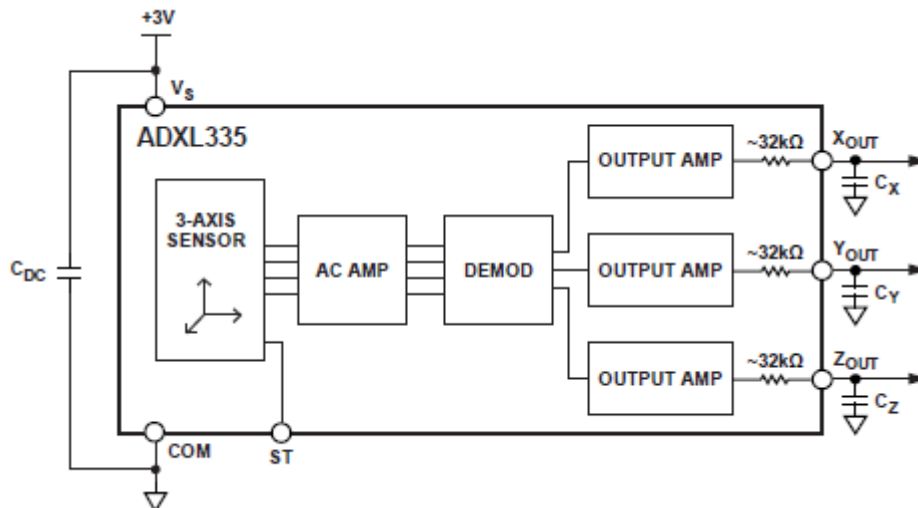


Fig. 2.2 Diagrama de blocs funcional del sensor ADXL335 [1]

Rang de mesura	$\pm 3,6$ g	
Acceleració màxima	10000 g	
Sensibilitat	330 mV/g	Màxima
Voltatge a 0 g	1,5 V	Si $V_s=3V$
Alimentació	1,8-3,6 V	
Consum	350 μA	Si $V_s=3V$
Rang de temperatura	-40 - 85 °C	

Taula 2.1 Principals característiques operacionals del ADXL335

2.1.2. Giroscopis (2 i 10)

Un giroscopi és un dispositiu que serveix per conèixer la inclinació d'un cos i que es basa en el principi de conservació del moment angular. Els primers giroscopis eren analògics i consistien en un disc girant constantment amb total llibertat de moviment al seu eix. Això s'aconseguia amb una sèrie d'arcs de suport. D'aquesta manera, una pertorbació externa sobre el giroscopi, el faria rotar mantenint sempre la orientació inicial a causa del fort moment angular.

Els giroscopis es fan servir en l'aviació per saber l'actitud que porta l'avió respecte al terra o per calcular la seva posició. Els giroscopis, juntament amb els acceleròmetres dels que ja s'ha parlat, integren el que s'anomena INS, o Inercial Navigation System. L'INS és un sistema de navegació alternatiu als que es fan servir actualment (VOR, GPS...) molt utilitzat antigament, que et permet saber la posició a partir de les variacions en l'acceleració i la orientació. Mesurant la variació en orientació i sabent els valors inicials, es pot calcular el rumb actual, però sense saber la velocitat que ha portat el cos no es pot saber la posició. Però quan això es combina amb els acceleròmetres, que calculen

l'acceleració de tot el sistema referència (sense tenir en compte els canvis d'orientació), es pot saber la posició exacta del cos en qualsevol moment.

Tot i que aquest sistema pràcticament ja no es fa servir (només en viatges molt llargs per zones on no hi ha radio-ajudes, com ara els oceans), tots els avions encara el porten i abans de cada vol és necessària la calibració d'aquests giroscopis.

Però el giroscopi que utilitzarem nosaltres no és un giroscopi analògic com aquests, ja que seria molt més car i poc pràctic per una placa tan petita. El nostre giroscopi fa servir un principi MEMS (Micro Electro-Mechanical System), desenvolupat i patentat per l'empresa InvenSense. Aquest principi està basat en la força de Coriolis que apareix sobre una massa vibrant en ressonància quan se li aplica una acceleració angular.

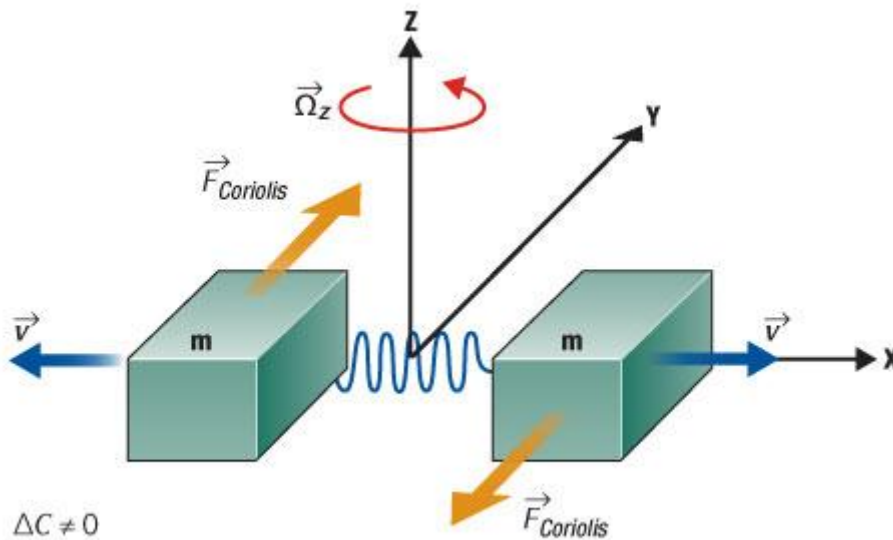


Fig. 2.3 Esquema del principi físic del giroscopi MEMS [11]

Aquest sensor utilitza dues masses en vibració constant que es mouen sempre en sentit oposat. Quan apareix una velocitat angular sobre el sistema, la força de Coriolis que es genera sobre les masses és contrària cosa que fa variar la capacitat que generen entre elles. Aquesta variació és amplificada, demodulada i filtrada per produir un voltatge analògic proporcional a la velocitat angular aplicada. En cas que l'acceleració que es produeixi sobre el sistema sigui lineal, la força de Coriolis generada sobre les dues masses oscil·lants tindria el mateix signe, fet que no variaria la capacitat relativa.

En comptes de tenir un sol sensor per calcular els tres eixos, en la nostra placa tenim dos dispositius diferents, el X-Y i el Z. Encara que, de fet, és com si tinguéssim tres giroscopis independents, perquè el seu principi de funcionament és exactament igual i els dos giroscopis X-Y estan aïllats l'un de

l'altre. Aquests sensors són el IDG-500 (per X-Y) i el ISZ-500 (per l'eix Z). Els dos són fabricats per l'empresa InvenSense i utilitzen el seu sistema patentat.

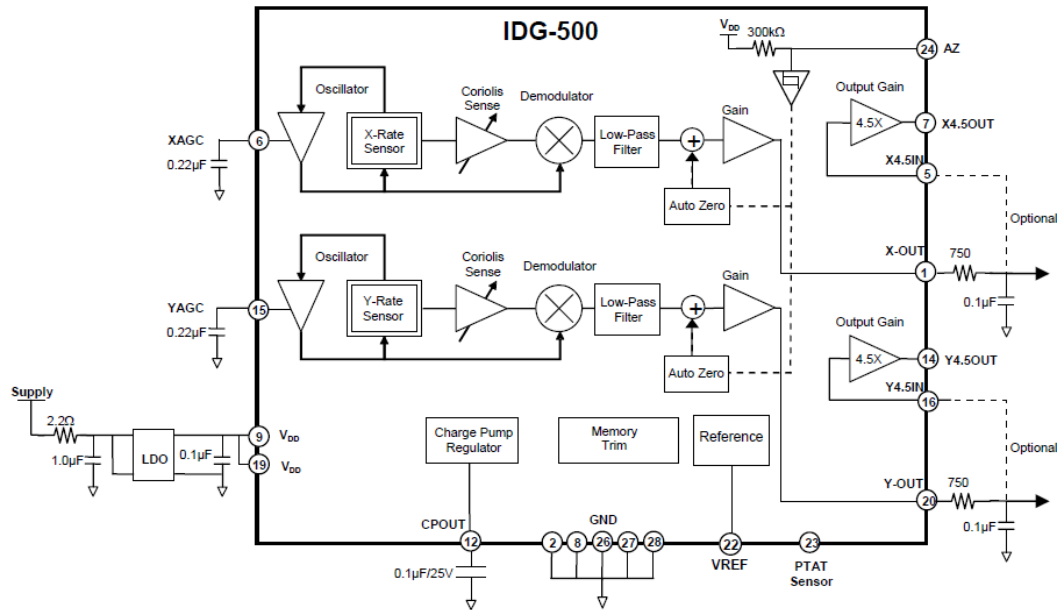


Fig. 2.4 Diagrama de blocs funcional del sensor IDG-500 [15]

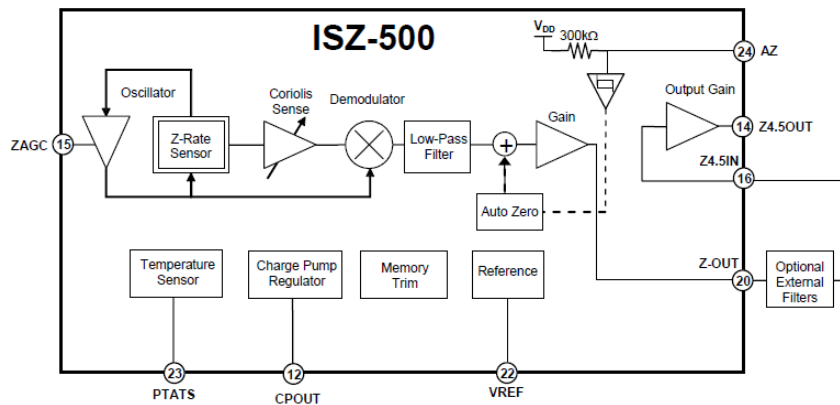


Fig. 2.5 Diagrama de blocs del sensor ISZ-500 [16]

La particularitat més important d'aquests sensors és que disposen d'una doble sortida amb diferent sensibilitat i marges. D'aquesta manera, l'usuari pot utilitzar-ne una per als moviments més ràpids i una altra per als moviments més precisos. Les sortides són totes analògiques.

Rang de mesura	± 500 °/s	
Sensibilitat	2 mV/°/s	
Voltatge de	1,35V	Si Vs=3V

referència		
Alimentació	2,7-3,3V	
Consum	7mA	Standby

Taula 2.2 Principals característiques operacionals dels sensors IDG-500 i ISZ-500

2.1.3. Sensor de pressió (3)

Una de les dades més importants que ha de tenir un pilot automàtic per poder volar un avió o UAV és l'altura. Sense l'altura, un avió volaria gairebé a cegues, sobretot amb mala visibilitat i un UAV seria totalment incontrolable. Però l'altura és una magnitud molt difícil de mesurar. Per fer-ho, es fa de forma indirecta, calculant la pressió ambiental i operant matemàticament amb ella per tal d'aconseguir el valor de l'altura.

I aquí és on entra el sensor de pressió. Encara que al sistema Ardupilot se li pot afegir un tub de pitot (secció 2.2.3) per mesurar la pressió estàtica i dinàmica, la placa de l'IMU porta un sensor de pressió absoluta. Mentre un tub pitot dona dades d'alçada i velocitat (després d'operar matemàticament amb la pressió), aquest sensor només ens proporciona l'alçada, és a dir, actua com un altímetre.

Els altímetres als avions són tan antics com l'aviació mateixa. Al passat, s'obtenia la pressió del port de pressió estàtica exterior i mitjançant una membrana i la diferència de pressions es feia girar una agulla sobre un disc numerat amb l'altura equivalent aproximada. Més endavant els altímetres es van anar sofisticant i, amb l'increment de l'altura de vol dels avions, els altímetres van anar incorporant noves funcionalitats, com les múltiples revolucions, els indicadors numèrics o els displays electrònics.



Fig. 2.6 Tres exemples de displays d'altímetres. D'esquerra a dreta, any 1913, 1930 i altímetre analògic actual. [7]

Tot i així, des del primer altímetre fins a l'últim, tots funcionen amb el mateix principi. Encara que durant la història s'ha intentat en multitud d'ocasions

canviar el sistema de mesurament d'altura, l'altitud-pressió és la que ha perdurat fins als nostres dies. [7]

Els altímetres es basen en el principi físic descobert per Isaac Beeckman (1588-1637) molt abans del descobriment del baròmetre de mercuri o del baròmetre aneroide (el que equipen els avions actualment). El senyor Beeckman va suggerir al segle XVII que la pressió disminuïa amb l'altura, és a dir, que com més amunt pugessis, menys pressió atmosfèrica et rodejaria. Aquesta teoria, però, no va poder ser demostrada fins al 1845 per Eugene Bourdon que va embarcar baròmetres aneroide a una sèrie de globus aerostàtics.

I així i després de molta investigació es va arribar a l'equació de l'atmosfera estàndard que utilitzen els altímetres, inclòs el nostre:

$$Altura [m] = 44330 \cdot \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.225}} \right)$$

El sensor que fa servir la nostra placa és el BMP085, desenvolupat per Bosch. Aquest sensor utilitza la tecnologia piezoresistiva per mesurar el canvi de pressió a l'ambient. Aquesta és la mateixa tecnologia que es fa servir en les bàscules. Es posen sensors piezoresistius a sota la plataforma i quan canvia la tensió que s'aplica sobre els sensors, aquests varien la seva resistència i, per tant, connectats a un circuit adequadament condicionat, es pot saber el valor exacte de la tensió aplicada.

Aquesta tecnologia és molt útil pel fet de tenir una sortida molt lineal (i per tant, evitar uns circuits de condicionament complicats) i per ser molt resistent a l'EMC (*Electromagnetic Compatibility*), és a dir, interferències dels equips o sensors veïns.

A més, aquest sensor és digital, cosa que facilita la seva comunicació amb el processador ja que no ha de passar pel convertidor A/C. Això s'aconsegueix amb un ADC intern i una petita memòria EEPROM que conté dades d'autocalibració del sensor.

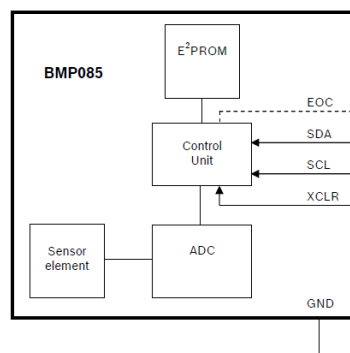


Fig. 2.7 Esquema de blocs intern del sensor BMP085 [8]

Rang de Pressió	300-1100 hPa	
Altura màxima	9000m	
Alimentació	1,8-3,6 V	VDDA
	1,62-3,6V	VDDD
Consum	5 μ A	A 1 sample/s
	0,4 μ A	Standby
Max Consum	1 mA	Conversió
Temps de conversió	7,5 ms	
Exactitud	$\pm 2,5$ hPa	Pressió
	± 2 °C	Temperatura
Resolució	0,01 hPa	Pressió
	0,1 °C	Temperatura

Taula 2.3 Principals característiques del BMP085

2.1.4. Magnetòmetre (port 6)

Un magnetòmetre és un dispositiu sensor que s'utilitza per mesurar la intensitat i direcció d'un camp magnètic. Existeixen dos tipus de magnetòmetres, els escalars i els vectorials. Els primers serveixen només per mesurar la intensitat del camp, sense importar la direcció de la que ve i els segons proporcionen el vector sencer, la intensitat i la direcció. Donat que el camp magnètic de la Terra es pot considerar un vector, un magnetòmetre adequadament configurat pot servir per indicar el rumb (o els graus de desviació del vector) respecte el nord magnètic.

És precisament per aquest objectiu per el qual s'utilitzen els magnetòmetres en l'aviació. Les brúixoles, tot i tenir el mateix objectiu generalment són menys precises i inestables.

Tot i que l'Ardupilot no porta incorporat un magnetòmetre de "sèrie", conté un port d'entrada específic i nosaltres l'utilitzarem. El magnetòmetre que farem servir és el HMC5883L, del fabricant de components electrònics Honeywell. L'HMC5883L utilitza un sensor de camp magnètic magneto-resistiu que li serveix per determinar la direcció del camp magnètic de la Terra i extreure'n el rumb de l'UAV. [14]

A més, amb un conversor ADC de 12 bits i una sortida I²C, la seva connexió al microcontrolador és molt fàcil (veure 2.2.3).

2.1.5. Convertidor Analògic/Digital (8)

Un convertidor analògic-digital, ADC o A/C és un dispositiu electrònic capaç de transformar una senyal analògica contínua a una senyal discretitzada digital

(uns i zeros). El motiu per treballar amb senyals digitals en comptes de senyals analògiques són varis, per exemple, les senyals digitals són molt menys vulnerables al soroll, ja que una senyal analògica pot prendre qualsevol valor mentre que una digital només pot ser un 1 o un 0. Un altre motiu podria ser la seva facilitat de processament i emmagatzematge en comparació amb les analògiques o la capacitat per poder multiplexar un canal digital, és a dir, poder transmetre vàries senyals combinades en una de sola.

Per tant, a l'hora de tractar senyals, operar amb elles i transmetre-les o emmagatzemar-les és molt interessant passar-les, abans que res, a senyals digitals. Per poder discretitzar una senyal analògica, primer s'ha de mostrejar. Això s'aconsegueix a partir d'una funció sample/hold, que en definitiva el que fa és, a partir d'una senyal de rellotge, "captura" mitjançant un array de condensadors el valor de la senyal en un moment determinat i després la processa, converteix i transmet.

En el nostre cas, utilitzem el convertidor ADS7844, de l'empresa Burr-Brown. Aquest convertidor de 12 bits i 8 canals, es caracteritza per utilitzar la tecnologia de conversió SAR (successive approximation register). Aquest sistema s'ajuda de la comparació del valor "capturat" pel circuit sample/hold i el valor digital resultant reconvertit en analògic per un DAC per corroborar que no es produeixen errors en la conversió. Necessita una referència i un *clock* externs.

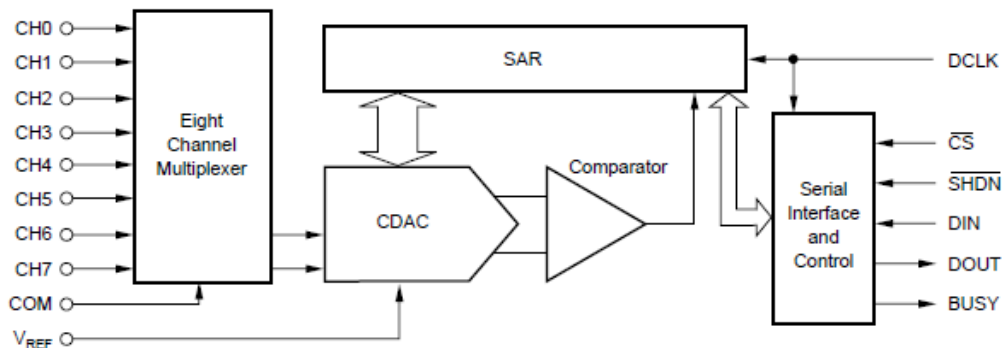


Fig. 2.8 Esquema de blocs del funcionament d'un convertidor ADC amb tecnologia SAR [9]

Però analitzem el funcionament d'aquest convertidor. El valor de tensió de referència (V_{ref}) pot prendre valors entre 100mV i $+V_{cc}$. I aquest valor és el que marca el rang de conversió. Per exemple, si l'entrada està referenciada a terra i V_{ref} és 1.25V, llavors el conversor digitalitzarà qualsevol senyal dins del rang 0-1.25 V.

L'entrada analògica és diferencial i és proporcionada per un multiplexor de vuit canals. La senyal entrant pot estar referenciada tan al pin COM (que en el nostre cas està connectat a terra), com a qualsevol de les altres entrades.

Per seleccionar un mode de funcionament o un altre, el microcontrolador (de la placa Ardupilot) envia un byte de control. A més dels quatre bits que serveixen per seleccionar el tipus d'entrada i els canals seleccionats (A2, A1, A0 i SLG/DIF), al byte de control hi ha el bit d'*start* (S) i dos bits que seleccionen l'estat d'energia en el que queda el convertidor un cop acabada la conversió (PD1 i PD0).

D'aquesta manera, funcionant amb el mode normal, són necessaris 24 sigles de rellotge per acabar la conversió d'un valor, 8 pel byte de control i tretze per la conversió i transmissió. Els tres bits restants són necessaris per completar el tercer byte de comunicació, però no es tenen en compte al convertidor, son LOW (veure Fig. 2.9).

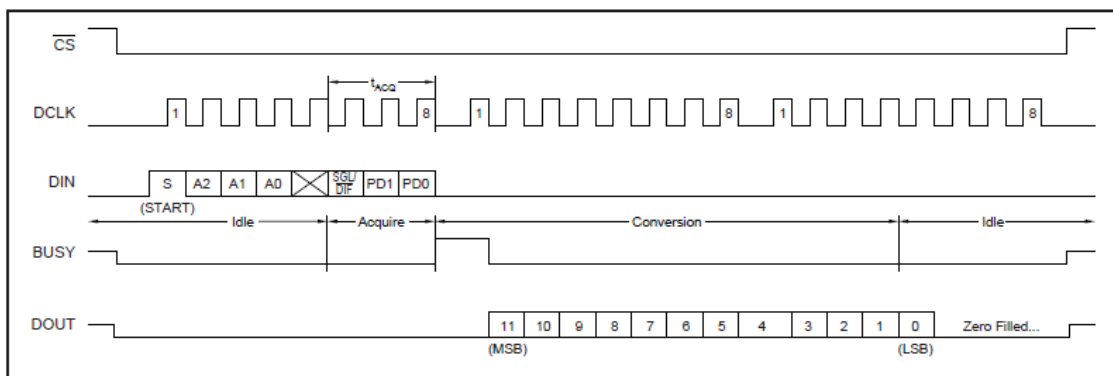


Fig. 2.9 Esquema del *timing* del convertidor. [9]

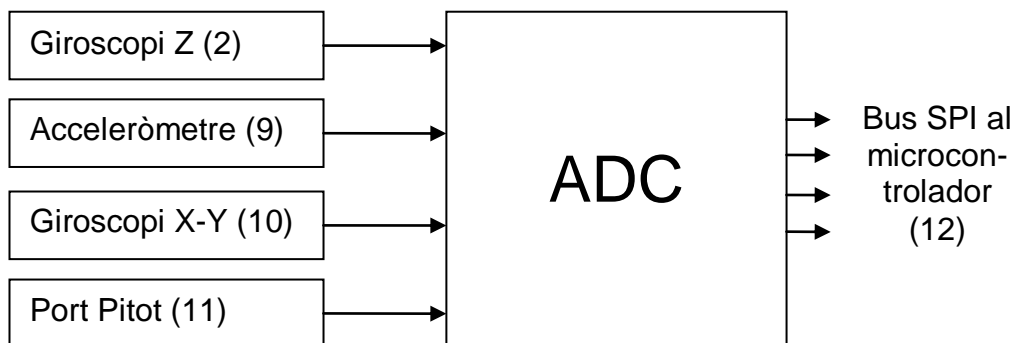


Fig. 2.10 Esquema de les connexions de l'ADC. Més informació a la secció 2.2.2

2.2.1. Busos d'alimentació

A la placa IMU Shield, es poden distingir tres busos d'alimentació clarament diferenciats. Per un costat tenim el bus que surt directament de la font i dos busos que surten de dos dispositius reguladors que a la seva vegada estan

connectats a aquest primer. La diferència entre les línies radica en el valor de la tensió. Mentre que la principal dóna 5 V, les dues línies secundàries estan a 3.3 V. La font de tensió, a la seva vegada, també pot dependre ja que el sistema Ardupilot es pot alimentar de moltes formes diferents. Pel que fa a l'IMU, de moment, només pot ser alimentat a través del port USB, en el cas que estigui connectat a un ordinador, o a través de l'altra placa (representat a la Fig 2.11 la connexió entre els dos sistemes d'alimentació de cada placa pel cercle de color vermell).

El bus principal, està destinat sobretot a alimentar el ADC i el GPS, a part de proporcionar alimentació a través de les sortides, a la placa de l'Ardupilot. Els altres dos busos estan destinats als sensors i unitats de control de la placa. Un als digitals i l'altre als analògics. (Fig. 2.11 a Fig. 2.13

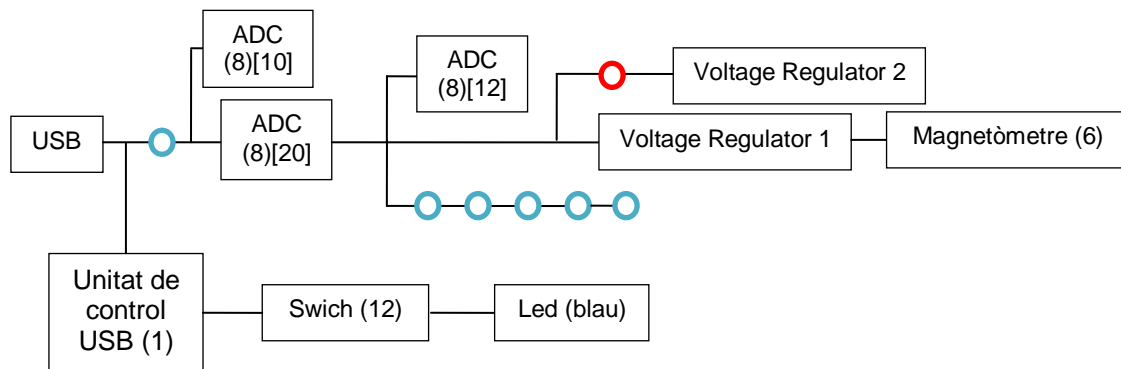


Fig. 2.11 Xarxa d'alimentació principal (5 Volts). Els punts blaus representen sortides a l'altra placa, els parèntesi el número de codi del component segons la Fig. 2.1 i els números entre claudàtors els pin son està connectat. El punt vermell respresenta la font d'alimentació de la placa Ardupilot.

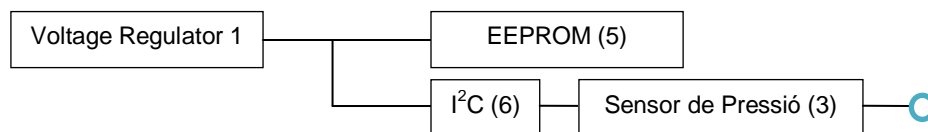


Fig. 2.12 Xarxa d'alimentació secundària (3.3 Volts)

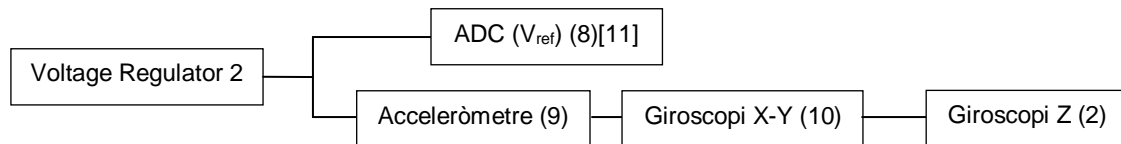


Fig. 2.13 Xarxa d'alimentació secundària (3.3 Volts). Els parèntesi són els números de control dels components segons la figura 2.1, els números entre claudàtors són els pin son està connectat.

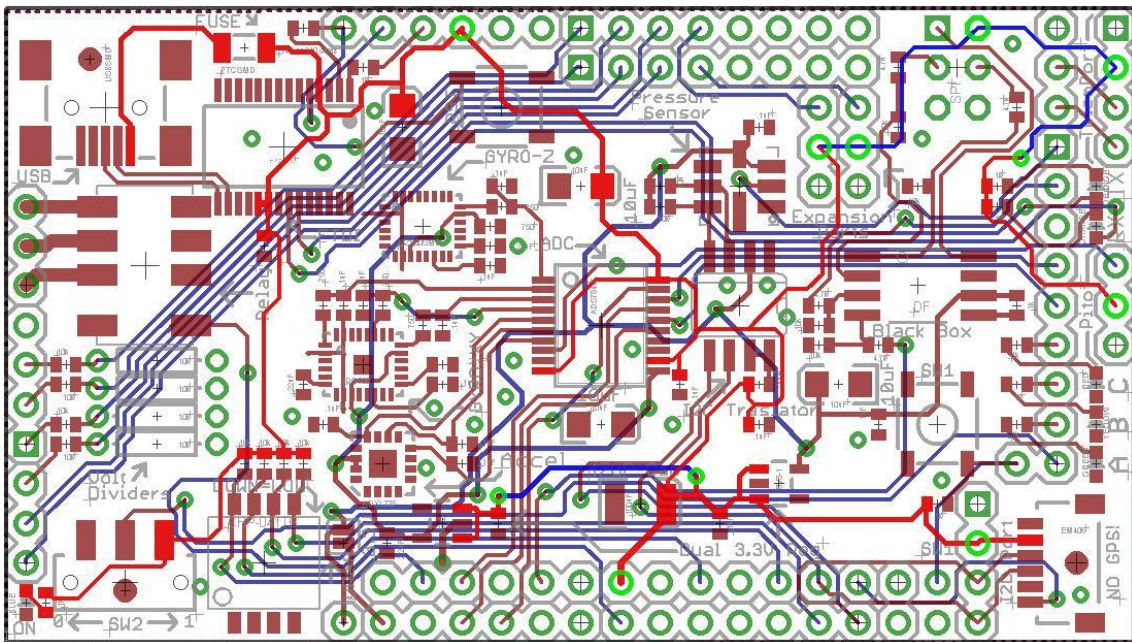


Fig. 2.14 Representació de la placa IMU. Ressaltat amb vermell (i blau) la línia d'alimentació de 5V.

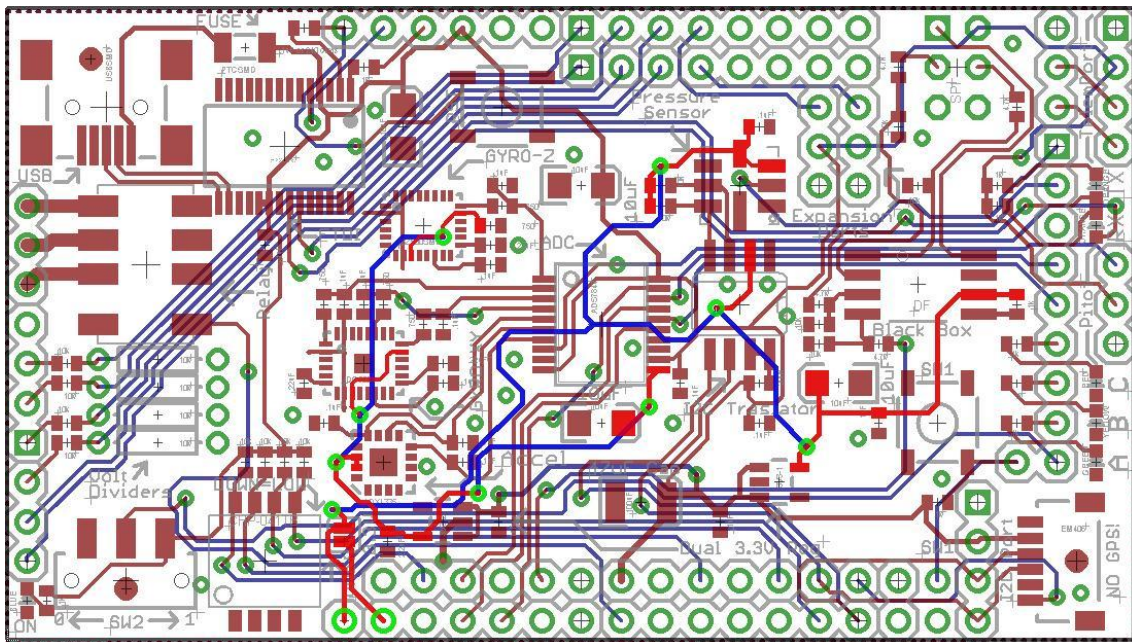


Fig. 2.15 Representació de la placa IMU. Ressaltat amb vermell (i blau) les línies d'alimentació de 3.3V.

2.2.2. Busos de senyal

Dins la placa podem classificar els busos de senyal segons si són analògics o digitals. N'hi ha dels dos tipus i dins dels digitals, també es poden subclassificar. Anem a veure quins busos són cadascun, d'on surten, on van a parar, qui els comparteix i quin protocol fan servir.

Comencem per les línies de transmissió analògiques. Generalment són línies molt curtes, que es dirigeixen dels dispositius analògics (giroscòpis, i acceleròmetre) al convertidor ADC. Com que porten senyals purament analògiques i sense modular, les línies no es poden compartir. A més, al ser senyals analògiques són totes molt sensibles a les interferències electromagnètiques de les línies veïnes, i per això totes les línies tenen un filtre per eliminar el soroll.

El busos digitals, per la seva banda, tenen una filosofia ben diferent. Com ja hem vist abans (apartat 2.1.4) a dins les plaques ens és molt més útil fer servir senyals digitals per la seva resistència al soroll o per la seva capacitat de multiplexar, entre altres. Per tant, totes les comunicacions entre dispositius es fan de forma digital. Aquí podem distingir dos tipus de busos, els que utilitzen el protocol I²C i els que utilitzen el protocol SPI.

I²C o *Inter-Integrated Circuit* és un tipus de bus sèrie en línies compartides. Aquest bus inventat per Philips utilitza dues línies bidireccionals, l'SDA o *Serial Data Line* i l'SCL o *Serial Clock*. En comptes de les tres línies habituals (de dades, adreces i control), aquest bus només n'utilitza dues, i una d'elles és la senyal de rellotge, per tant, la comunicació de control, adreces i dades es fa a través de la mateixa línia de transmissió, l'SDA.

Com en tots els busos, els dispositius connectats a un bus I²C poden ser màsters o esclaus. Un dispositiu màster és un que pot iniciar transmissions a dins del bus, ja sigui enviant o rebent informació d'algun esclau. En aquest tipus de bus, s'hi poden connectar fins a 112 nodes, ja que utilitza un espai d'adreces de 7 bits i qualsevol d'aquests pot ser màster, esclau o un híbrid, és a dir, un dispositiu que pugui actuar tant com a màster o com a esclau. Per tant, ja tenim una de les característiques principals d'aquest bus; es tracta d'un bus multimàster.

L'I²C és un bus síncron on la senyal de rellotge és produïda i sincronitzada per qualsevol màster que hi hagi al circuit. Això presenta avantatges i inconvenients, però per l'ús que li donem nosaltres a la nostra placa, és molt més efectiu. De fet, gràcies a això es pot controlar l'accés al bus d'una manera fàcil i àgil.

El procés d'intercanvi d'informació comença en algun dispositiu màster que envia un bit d'*start* al bus. Si no està ocupat per una altra transmissió, aquest dispositiu ha de transmetre l'adreça de l'esclau amb el que vol interactuar i el rol de cadascun, si seran emissors o receptors d'informació. En cada procés de transmissió s'envia i rep només un byte, després del qual el dispositiu receptor ha d'enviar un bit d'*acknowledge* per corroborar que tot ha anat bé. Després d'això el màster que operava el bus perd l'arbitratge del mateix (perd l'exclusivitat).

A la placa de l'IMU shield trobem una sola línia I²C on hi ha connectats el sensor de pressió instal·lat a la placa (3) , un I²C *translator*, que permet l'adaptació d'aquest sensor de pressió a la resta de la instal·lació del bus, un port d'expansió I²C per dispositius auxiliars i el port pel magnetòmetre (6). Aquesta línia (doble, SDA i SCL) està directament connectada al microprocessador.

L'altre tipus de bus que trobem a la placa és l'SPI o *Serial Peripheral interface Bus*. L'SPI també és un bus sèrie síncron que treballa amb la filosofia màster/esclau, però ara, a diferència de l'I²C, es tracta d'un bus monomàster. La idea és que un sol màster controla una sèrie de dispositius esclaus a través d'una línia anomenada SS (Slave Select) o CS (Chip Select) independent per cada esclau.

Mentre que el bus I²C només utilitzava dues línies de transmissió (una pel rellotge i l'altre per les adreces, dades i control), aquí s'utilitzen quatre línies:

- CS: Chip Select, una línia independent per cada dispositiu esclau. Quan el màster envia un 0 per alguna d'aquestes línies, activa la transmissió amb l'esclau corresponent.
- MOSI o DIN i MISO o DOOUT: *Master Output Slave Input/Master In Slave Out* o *Data In/Data out* són les dues línies per les dades. Poden treballar simultàniament, és a dir que el màster pot estar enviant dades o instruccions a l'esclau mentre aquest li està enviant també dades o instruccions.

- SCLK: Serial Clock: Senyal de rellotge produïda pel màster. S'ha d'adaptar a la capacitat de rellotge dels esclaus.

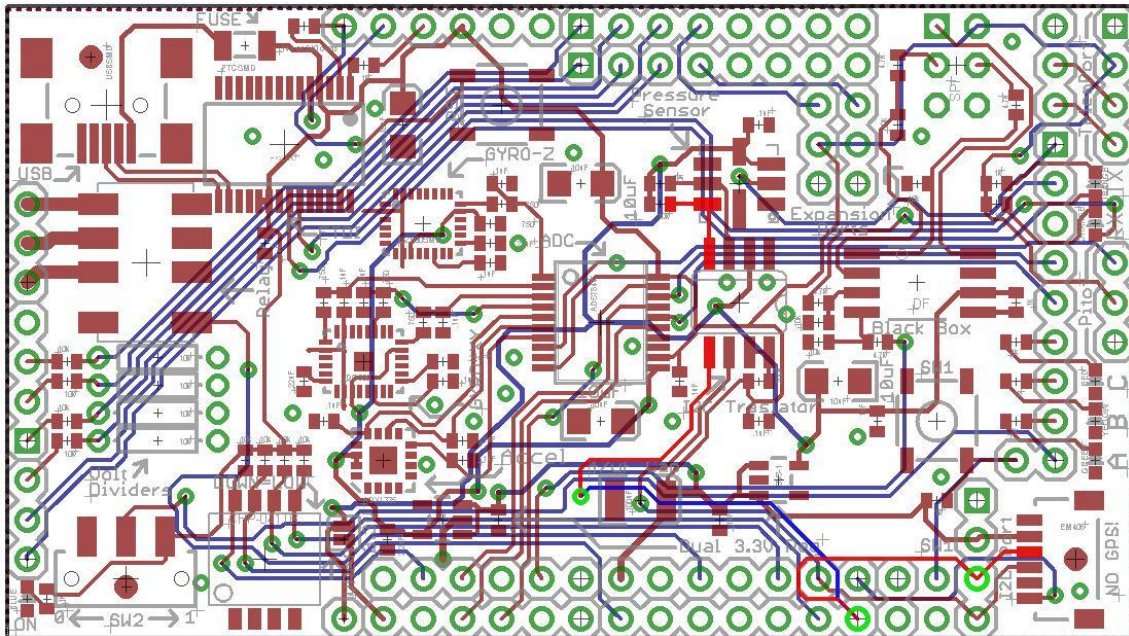


Fig. 2.16 Remarcat amb vermell una de les dues línies del bus I²C de la placa IMU Shield.

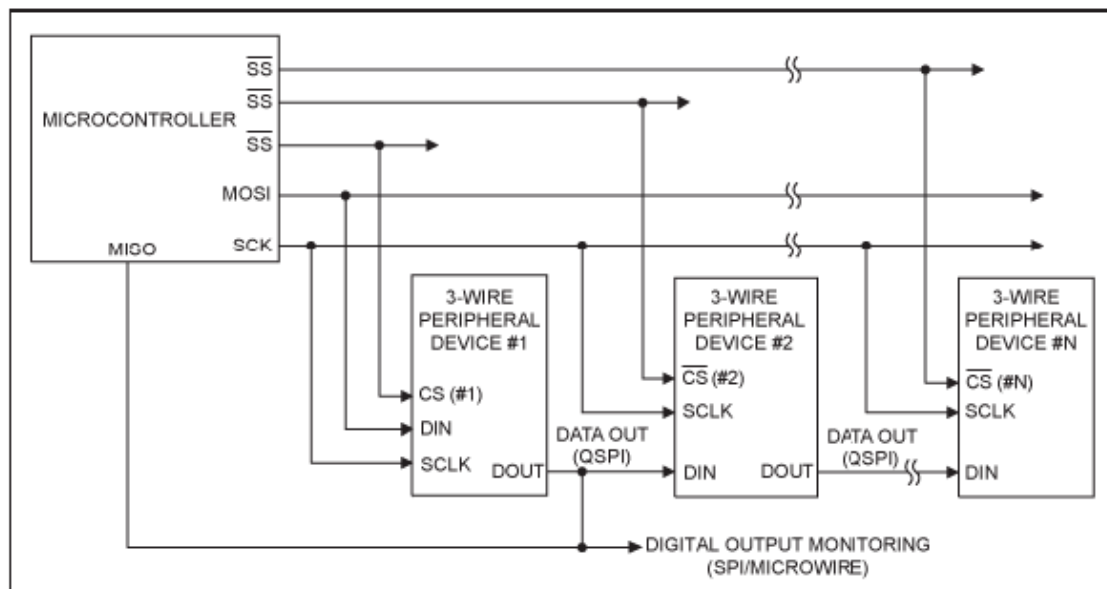


Fig. 2.17 Esquema de la instal·lació d'un bus SPI d'N esclaus.

El fet de disposar de dues línies per les dades i de no necessitar adreces (per tenir una línia de CS independent per cada esclau) converteixen aquest bus en molt més ràpid que l'I²C (veure Taula 2.4).

És per aquest fet que a la placa IMU shield hi ha dues línies independents de bus SPI. Una que va directa al convertidor ADC i l'altre a la memòria EEPROM. És molt lògic que aquests dos dispositius estiguin connectats directament al microprocessador mitjançant aquest bus ja que el primordial en aquesta transmissió és la velocitat, sobretot quan es tracta de la memòria EEPROM. A més els ports SPI que van a la memòria EEPROM estan oberts i disponibles ja que a través d'ells és per on es configura el software del controlador.

	Avantatges	Inconvenients
I ² C	Molts dispositius comparteixen el mateix bus	La velocitat està limitada per la capacitat de la línia
	Menys connexions	No es pot rebre i enviar simultàniament
	S'envia un acknowledge	Immunitat al soroll reduïda
SPI	Més velocitat	Moltes connexions necessàries
	Capacitat d'enviar i rebre al mateix temps	No s'envia un acknowledge
	Immunitat al soroll	-

Taula 2.4 Principals avantatges i inconvenients dels dos busos [18]

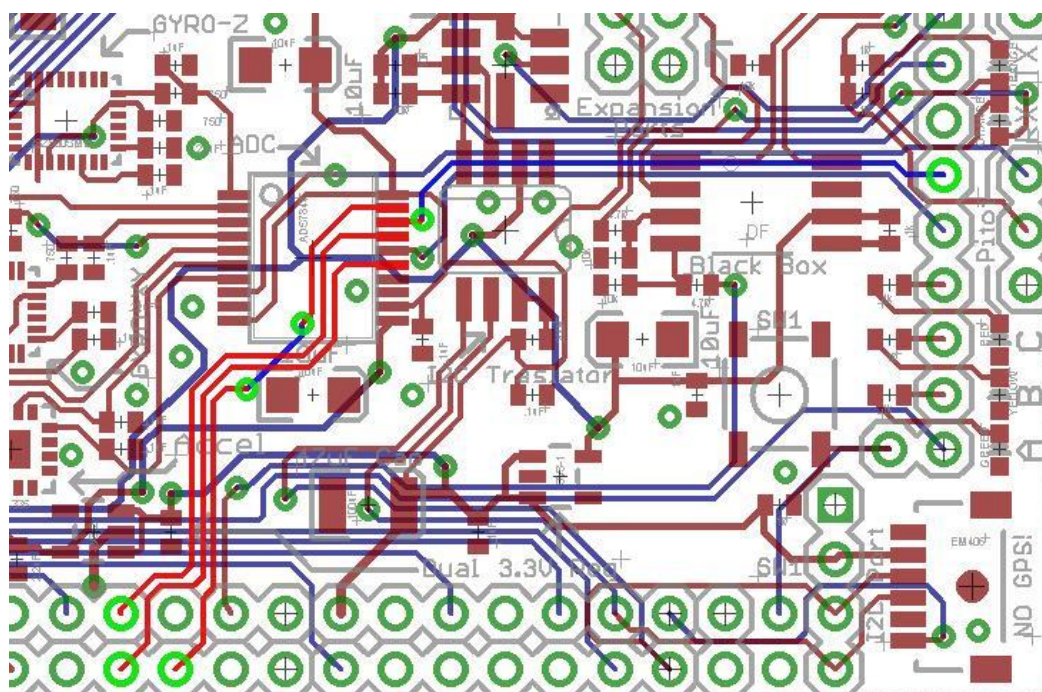


Fig. 2.18 Remarcat amb vermell (i amb blau) les línies del bus SPI que va del convertidor ADC al microprocessador.

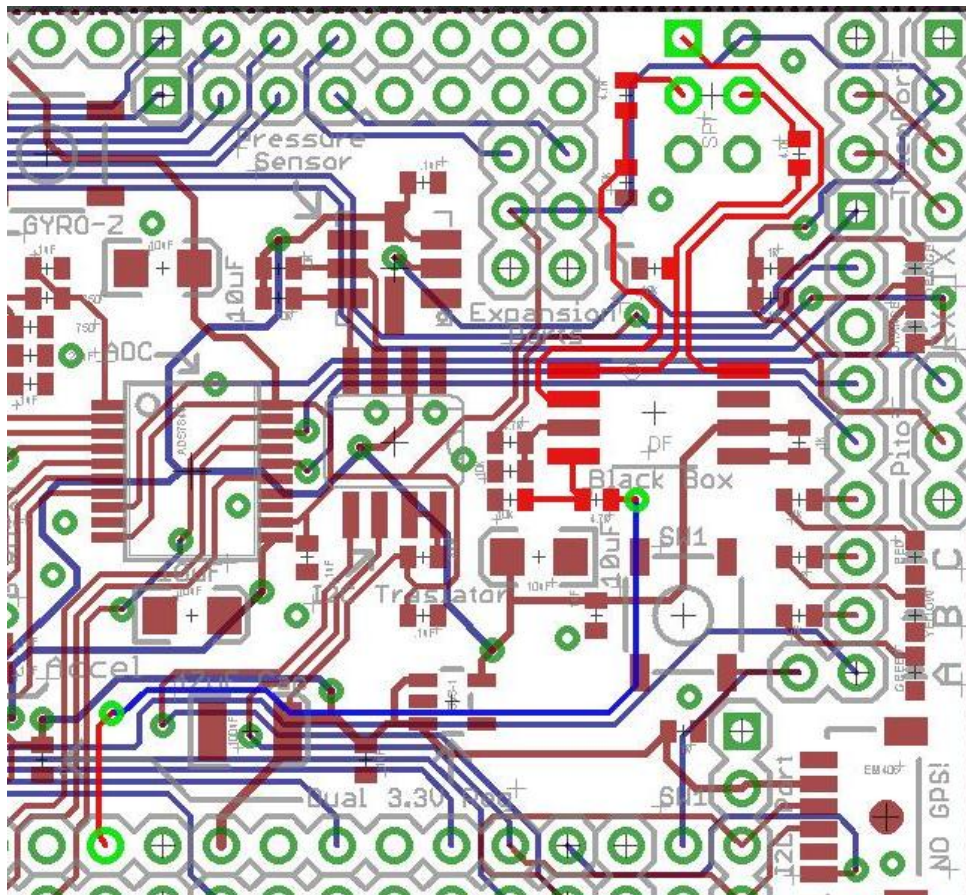


Fig. 2.19 Amb vermell les línies del bus SPI que van de la memòria EEPROM al microprocessador principal passant pel port d'expansió SPI.

2.2.3. Entrada i sortida

Les entrades i sortides de la placa IMU shield són varies, però el destí principal de la majoria és clar, la placa del microcontrolador. La majoria de ports estan destinats al microprocessador, els principals ja els hem anat veient (ADC, bus I2C, EEPROM) encara que l'alimentació també disposa d'unes quantes connexions cap a la placa de l'Ardupilot, tant per transmetre el voltatge si el sistema està alimentat per USB o si ho està a través de l'altra placa a través d'una bateria o del motor de l'UAV.

Però a part de les connexions a la placa del processador, podem classificar les altres igual com ho podríem fer amb els busos de senyal, segons si són analògiques o digitals.

D'entrades o sortides analògiques n'hi ha poques i totes elles, evidentment, estan directament connectades al convertidor ADC. A la placa hi trobem tres pins per connectar un tub pitot extern analògic (un pin per l'alimentació, un altre pel terra i un altre connectat a un dels ports d'entrada del convertidor) i dos *expansion ports* també analògics però directament connectats al microprocessador. Ell mateix és qui s'encarrega de les funcions d'ADC, en aquest cas.

Pel que fa a les entrades i sortides digitals, també les podem classificar segons el protocol que fan servir. Per un costat tenim el port SPI que ja he explicat que serveix per poder actualitzar el software carregat al microprocessador principal. En comptes de les quatre línies necessàries per la comunicació, és un port de sis pins, incloent l'alimentació i el terra.

Al bus I2C, com també s'ha comentat a dalt, disposem d'un dispositiu I/O especial pel magnetòmetre per facilitar la connexió i, a més, a la mateixa línia de transmissió un *expansion port* amb la mateixa filosofia dels altres. En comptes de les dues línies necessàries, quatre pins amb alimentació i terra.

A més dels dos tipus de busos ja descrits a l'apartat 2.2.2, també ens cal parlar d'un parell més, l'USB i l'UART.

L'USB o *Universal Serial Bus* és un protocol industrial que defineix la manera de connectar i comunicar dispositius electrònics entre ells. No entrem en els detalls de la comunicació ja que no tenim connexions USB dins la nostra placa sinó un dispositiu d'entrada-sortida compatible amb un cable USB.

Per poder transmetre, precisament les dades d'aquest cable USB fins al microprocessador, necessitem transformar-les d'alguna manera i aquí és on entra en joc el FT232R, fabricat per FTDI Chips. Aquest dispositiu ens permet passar les dades de USB a UART, *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, és a dir, a un format que el nostre microprocessador sigui capaç d'interpretar. Aquest dispositiu permet passar les dades al protocol RS-232, però en el nostre cas, com que va directament a un microcontrolador no ens cal acabar el procés. Simplement enviem les línies TXD (sortida de les dades), RXD (entrada de dades al dispositiu) i DTR (serveix per iniciar i acabar comunicacions entre el microcontrolador i el convertidor USB/UART) a tres ports del microprocessador.

A més, el FT232R té dos ports destinats a il·luminar dos leds que s'il·luminen quan es produeix una transmissió de dades tant d'entrada al dispositiu com de sortida.

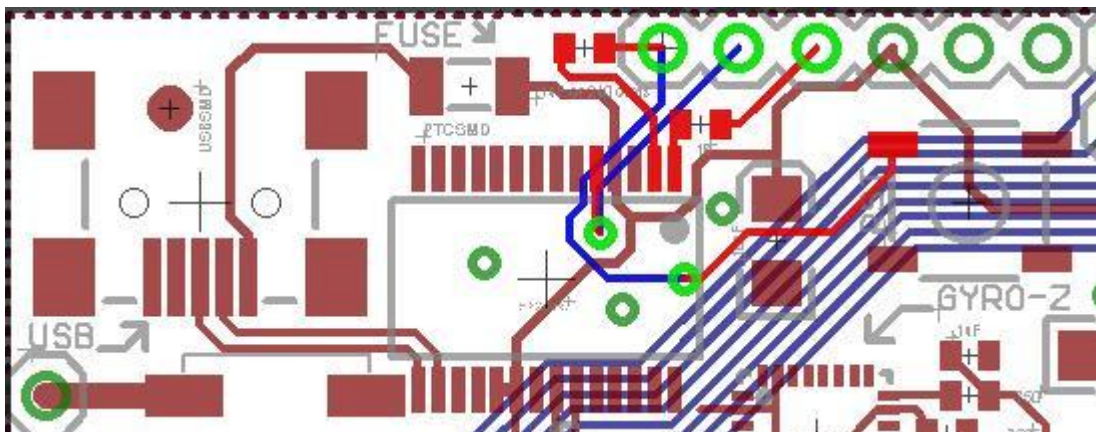


Fig. 2.20 Amb vermell les línies del bus UART des del port USB fins al microprocessador.

CAPÍTOL 3. ARDUPILOT

3.1. Components

En aquesta secció es farà una descripció dels components de l'Ardupilot, tal com s'ha fet a la secció 2.1 pels de l'IMU Shield.

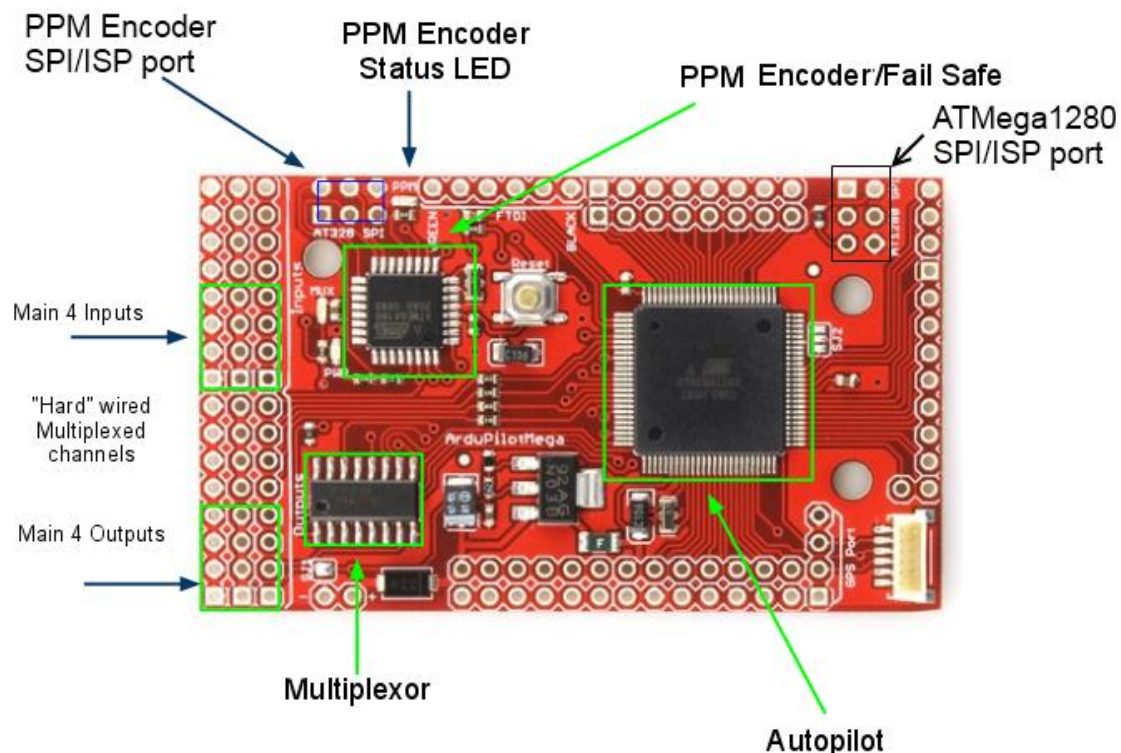


Fig. 3.1 Imatge de la placa Ardupilot amb tots els seus principals elements enumerats [2]

3.1.1. Microprocessador principal

Ara que ja hem vist tots els sensors, és moment de saber a on van a parar totes les dades que aquests recullen. I aquí és on entra el microprocessador de la placa de l'Ardupilot.

Un microprocessador és un circuit integrat, programable i que funciona amb una senyal de rellotge que, amb l'ajuda d'uns registres interns fa les mateixes funcions que una CPU (Central Processing Unit), és a dir, accepta senyals digitals com a entrada, les processa, i produeix unes sortides també binàries. De microprocessadors n'hi ha de molts tipus completament diferents, pensats per objectius molt dispars, per tant, ens centrarem en la família de processadors que hi ha a la nostra placa, els Atmel AVR.

En concret, el nostre processador principal és l'AVR ATmega1280, de 8 bits. La tecnologia AVR va ser ideada per dos estudiants noruecs al 1996 al Norwegian

Institute of Technology a la ciutat de Trondheim. Els dos nois van dissenyar una arquitectura de tipus Harvard modificada, és a dir, la memòria té un espai dedicat a les instruccions i un altre a les dades, però també es poden llegir dades de la memòria dedicada als programes amb instruccions especials. Aquesta memòria, la dedicada a les instruccions, és una memòria de tipus flash no-volàtil de 128 KBytes, però no té possibilitat d'ampliació amb memòries externes, totes les instruccions han d'estar gravades en aquesta memòria. A més la quantitat de cicles d'escriptura de la memòria flash; les vegades que es pot esborrar i tornar a escriure, està limitat a 10.000.

La memòria per dades és bastant més petita, començant pels 32 registres (un byte de capacitat cadascun, 8 bits) més 8 KBytes d'SRAM i acabant amb els 4KBytes d'EEPROM. Els registres i l'SRAM s'utilitzen per fer els càlculs i funcions necessàries de l'ASU ja que es tracta d'unitats de memòria volàtils, sent els registres més accessibles i l'SRAM més lenta però amb més capacitat. Tot i això, l'ATmega1280 és un dispositiu RISC, és a dir que totes les operacions es realitzen entre registres per afavorir la velocitat de rellotge del processador.

L'EEPROM és una memòria no volàtil. Com la memòria flash pot conservar el seu contingut quan el circuit no està alimentat. L'EEPROM de l'ATmega1280 no està integrada en el sistema d'adreces del microprocessador i s'hi ha d'accedir com si es tractés d'un dispositiu extern, cosa que fa que aquesta unitat de memòria sigui extremadament més lenta que la memòria interna (Registres i SRAM). De fet, tot i ser un inconvenient, es converteix en un avantatge ja que d'aquesta manera permet ampliar la memòria tant com es vulgui. Al nostre sistema disposem d'una ampliació d'EEPROM situada a la placa de l'IMU Shield de 16 Mbits, és a dir, de 2 MBytes. En aquesta memòria, el microprocessador hi accedeix a través dels ports SPI, en parlarem a l'apartat de busos de senyal (3.2.2).

Per tant, ja hem parlat de l'estructura interna del processador, ens queda veure com treballa. I, de fet, no treballa gaire diferent del que ho fa un processador qualsevol. Fem-ne cinc cèntims:

Un processador executa programes, que són una seqüència de passos o instruccions. Cada instrucció pot ser una operació aritmètica o lògica. Per executar-les, el microprocessador segueix un cicle, que consisteix en fer el fetch de la instrucció (guardar l'adreça de la instrucció següent al PC o *program counter*), guardar la instrucció al *instruction register* (IR), augmentar el PC i executar la instrucció que està guardada al IR (Fig. 3.3

Fig. 3.3 Esquema de l'execució d'un programa

). El problema d'aquest procés és que normalment es triga dos cicles de rellotge en dur-lo a terme, un per fer el fetch i l'altre per executar la instrucció. L'avantatge dels processadors AVR és que poden fer simultàniament el fetch de la següent instrucció mentre s'està executant l'actual, cosa que estalvia temps i augmenta la velocitat del processador.

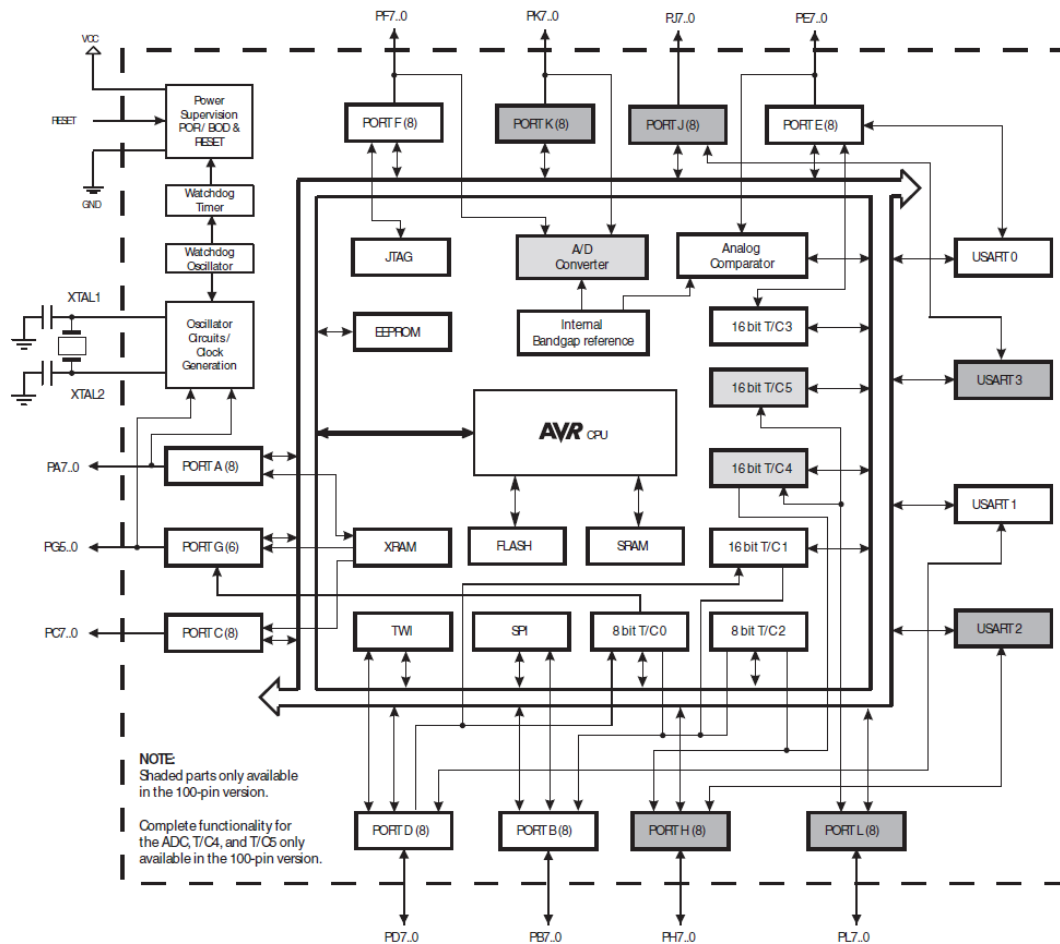


Fig. 3.2 Esquema de blocs de l'AVR ATmega1280

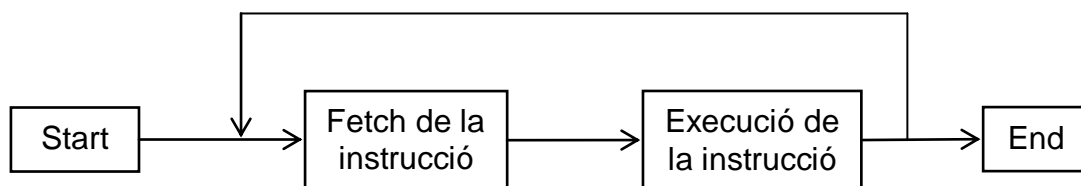


Fig. 3.3 Esquema de l'execució d'un programa

La velocitat de rellotge que presenta l'ATmega1280 és de 16 MHz i a més, 16 MIPS (*million instructions per second*), cosa que el situa entre els més ràpids entre els processadors a 8 bits. Com que algunes operacions o dispositius externs requereixen una velocitat de rellotge inferior, el processador compta amb *clock prescaler*, que pot dividir la senyal de rellotge fins a un factor 1024.

L'ATmega1280 compta amb 86 ports entrada/sortida programables multifunció, bi-direccional i amb resistències *pull-up*. Tots ells compatibles amb una gran varietat de busos sèrie, com ara:

- I²C
- UART/USART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)
- SPI (*Serial Peripheral Interface Bus*)
- USI (*Universal Serial interface*)

3.1.2. Microprocessador secundari (codificador PPM)

El microprocessador secundari instal·lat a la placa és el ATmega328P. És de la mateixa família que l'ATmega1280 i té les mateixes característiques que aquest (veure 3.1.1). La diferència entre aquests dos microprocessadors és, evidentment, les capacitats del processador.

L'ATmega328, per la part de memòria, també compta amb 32 registres de 8 bits cadascun, però la SRAM és de només 2 Kbytes i l'EEPROM d'un. Pel que fa a l'espai per programes i instruccions, és de 32 KBytes, encara que igual que a l'altre processador, també es poden guardar dades en aquesta memòria.

Té 23 línies d'entrada-sortida en lloc de les 86 que tenia l'ATmega1280.

Però llavors, si ja disposem d'un microprocessador més gran i potent, per què necessitem aquest? Doncs la funció d'aquest processador és molt concreta, "comprimir" les dades de sortida dels actuadors de 8 línies en una de sola.

Es connecten les vuit sortides dels actuadors que tenim connectats a la placa i es fan passar per aquest processador, que codifica les dades a una modulació PPM (Pulse Position Modulation). D'aquesta manera, el processador principal rep només una entrada amb totes les dades de tots els actuadors. Això estalvia línies d'entrada i sortida i sobretot, treball del processador.

PPM és un tipus de modulació digital que es basa en la "posició" del pols en l'espai de temps, d'aquesta manera un pols pot tenir tants valors com el microprocessador sigui capaç de dividir un espai temporal (idealment serien infinits valors) sense modificar la potència o la senyal de rellotge. (veure Fig. 3.4).

3.1.3. Multiplexor

Un multiplexor és un dispositiu electrònic que, a partir d'una sèrie d'entrades, en selecciona una i la transmet a través d'una sola línia de sortida. Una altra manera d'entendre-ho és veure-ho com un interruptor d'entrada múltiple però de sortida única. Els multiplexors són útils per poder reduir el nombre de línies d'entrada-sortida que entra en un processador o la càrrega de treball d'aquest.

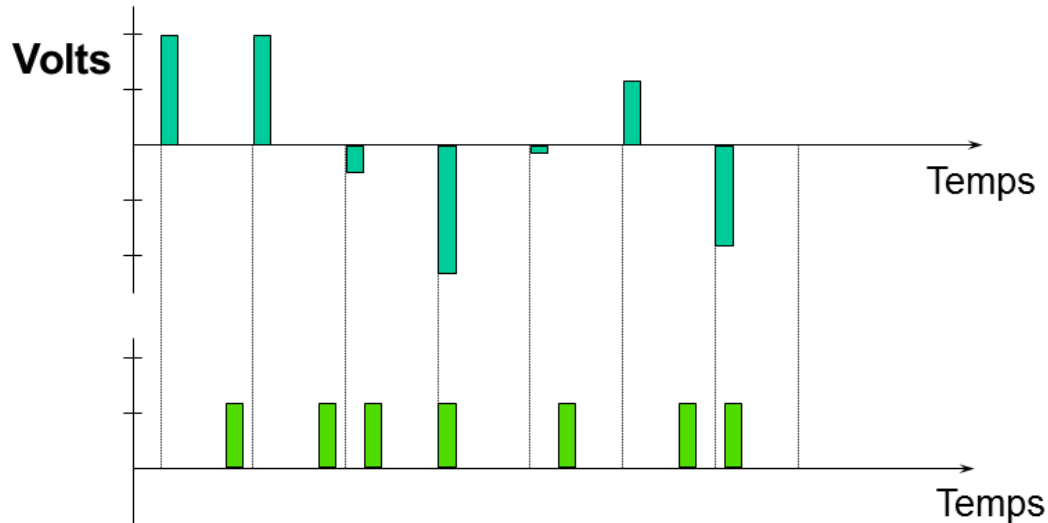


Fig. 3.4 Gràfic del funcionament de la codificació digital PPM [25]

A la nostra placa, però, l'objectiu és diferent. A la placa de l'Ardupilot hi ha instal·lat el 74LS157D, un multiplexor quad 2-Input. Això significa que només disposa de dues entrades de quatre línies cadascuna. A partir d'un bit de selecció, les quatre sortides del multiplexor prenen els valors d'una o altra entrada.

El 74LS157D té les quatre sortides connectades als 4 servos o actuadors principals del sistema de pilot automàtic. Rep les entrades dels dos processadors, i la línia de decisió està connectada també als dos processadors abans d'arribar al multiplexor. D'aquesta manera, si està seleccionat el control manual de l'aparell o si el processador principal té algun problema, els valors que hi haurà a la sortida dels servos seran els mateixos que a l'entrada mentre que en mode controlat, si l'ATmega1280 després de processar les dades rebudes dels sensors decideix que ha de variar algun aspecte per mantenir el vol horitzontal o fer qualsevol variació sobre l'UAV, intervindrà a la línia de decisió i la sortida del multiplexor serà igual a la del processador principal.

ENABLE	SELECT INPUT	INPUTS		OUTPUT
E	S	I ₀	I ₁	Z
H	X	X	X	L
L	H	X	L	L
L	H	X	H	H
L	L	L	X	L
L	L	H	X	H

Taula 3.1 Taula de la veritat del 74LS157D [20]

3.2. Integració

3.2.1 Busos d'alimentació

L'alimentació de la placa de l'Ardupilot es pot fer de tres maneres diferents. D'una banda, pot venir alimentada des de la placa de l'IMU shield, sempre que aquesta estigui connectada a un port USB d'un ordinador per exemple.

Un segon mètode és el d'alimentar-la mitjançant el circuit RC dels servos o motors que pugui portar l'UAV embarcats. Aquest és el mètode més fàcil segurament, ja que no has d'embarcar cap pila ni bateria a part, però també és segurament, el pitjor en termes de soroll o interferències. A dins la placa, hi ha un fusible a l'entrada d'aquesta línia per evitar que una pujada de tensió sobtada al motor de l'UAV pogués cremar tots els sistemes del pilot automàtic.

I el tercer mètode és el que consisteix en connectar una pila o bateria de 7 a 11 Volts directament al bus d'alimentació. Aquest sistema, però, obliga a passar primer els 7-14 V per un *voltage regulator* per reduir-los a 5 V.

Tots els elements de la placa estan connectats a la mateixa línia. A la Fig. 3.5 es pot veure ressaltada amb vermell la línia d'alimentació de la placa i la Fig. 3.6 és un esquema qualitatiu dels components connectats en aquesta línia.

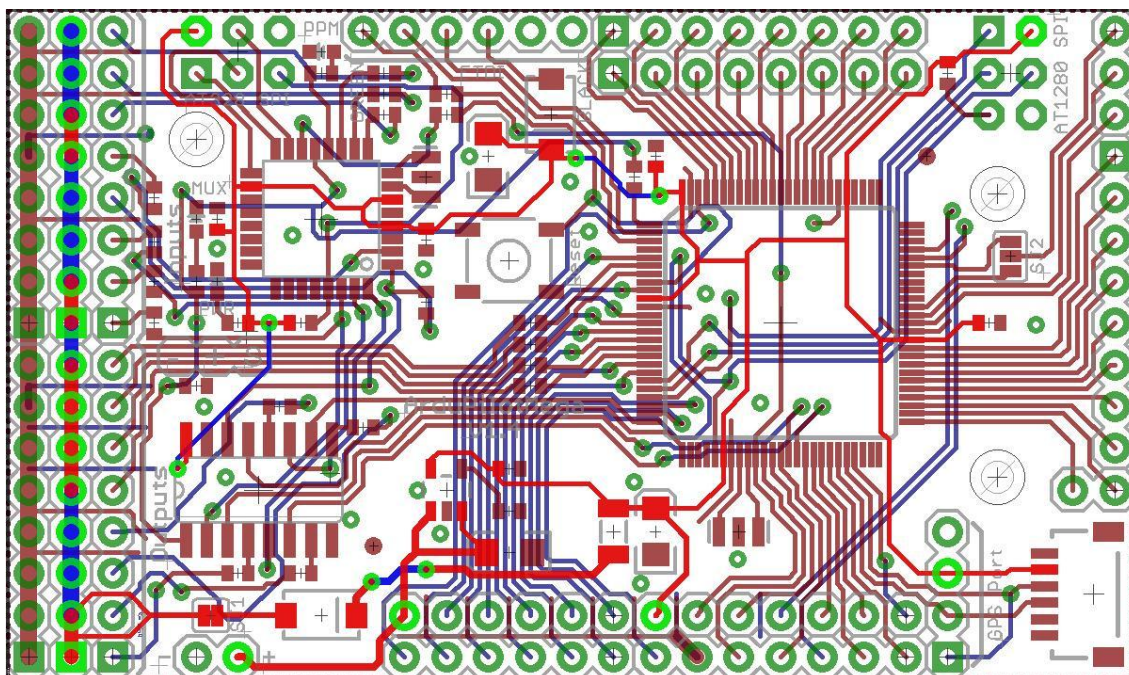


Fig. 3.5 Il·luminat en vermell (o blau) la línia d'alimentació de la placa Ardupilot.

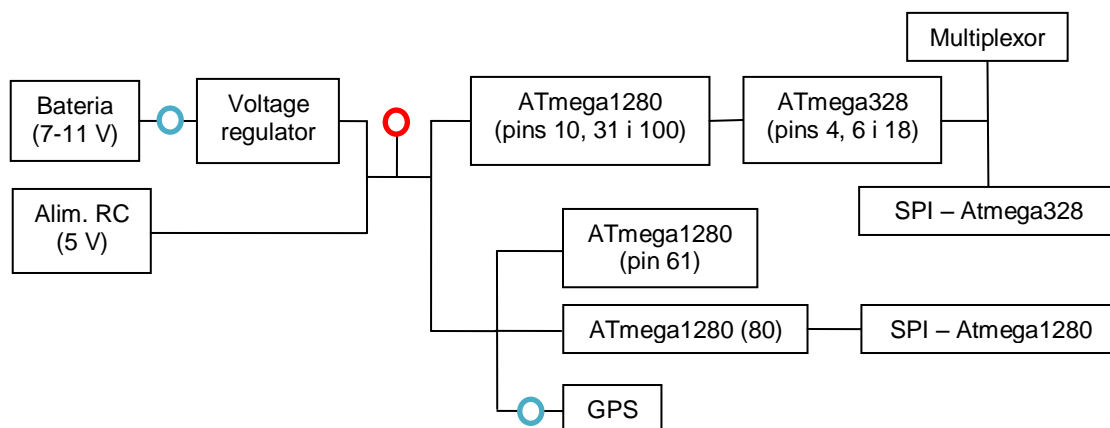


Fig. 3.6 Esquema de blocs del bus d'alimentació de la placa de l'Ardupilot, els punts blaus representen sortides cap a l'altra placa o cap a dispositius externs. El punt vermell és la connexió entre els dos sistemes d'alimentació de les dues plaques.

3.2.2. Busos de senyal

Els busos de senyal que trobem a la placa de l'Ardupilot, igual com hem fet amb els de l'altra placa, els podem classificar segons la seva naturalesa.

De busos analògics n'hi ha molts menys que en l'altra placa, ja que només disposem d'un parell de línies provinents dels dos expansions ports de l'IMU Shield que van directament al microprocessador.

De fet, la majoria dels busos de senyal provinents de l'altra placa van directament al micro sense passar per enlloc abans. Els busos I2C i SPI en són un exemple, així com les línies provinents de l'entrada USB.

Les línies de sortida de senyal sí que són una mica més complicades. No hem d'oblidar en cap moment que l'objectiu principal del nostre sistema és "volar" l'UAV i per fer-ho, necessita uns actuadors sobre les superfícies de vol i motors. Aquests actuadors es controlen a través de les línies d'entrada-sortida (capítol 3.2.3) però hi arriben a través d'un entramat una mica complicat. Les línies dels actuadors principals surten tant del microprocessador principal (ATmega1280) com del secundari (ATmega328) però com que els dos processadors no poden controlar a la vegada els actuadors, abans passen pel multiplexor (apartat 3.1.3).

3.2.3. Entrada i sortida

A la placa de l'Ardupilot és on es troba el gruix d'elements d'entrada i sortida. A la banda esquerra de la placa es pot veure fàcilment que s'hi acumulen multitud de pins I/O distribuïts en tres columnes de 16 pins cadascuna. D'aquestes, però, la primera està tota dedicada a terra i la segona a l'alimentació en cas que s'alimenti el sistema amb els motors o servos. Només la tercera columna

de pins (la més interior a la placa) és la que està dedicada a l'entrada i sortida de dades purament. Per aquestes connexions és per on el pilot automàtic controla els actuadors de l'avió i rep el feedback.

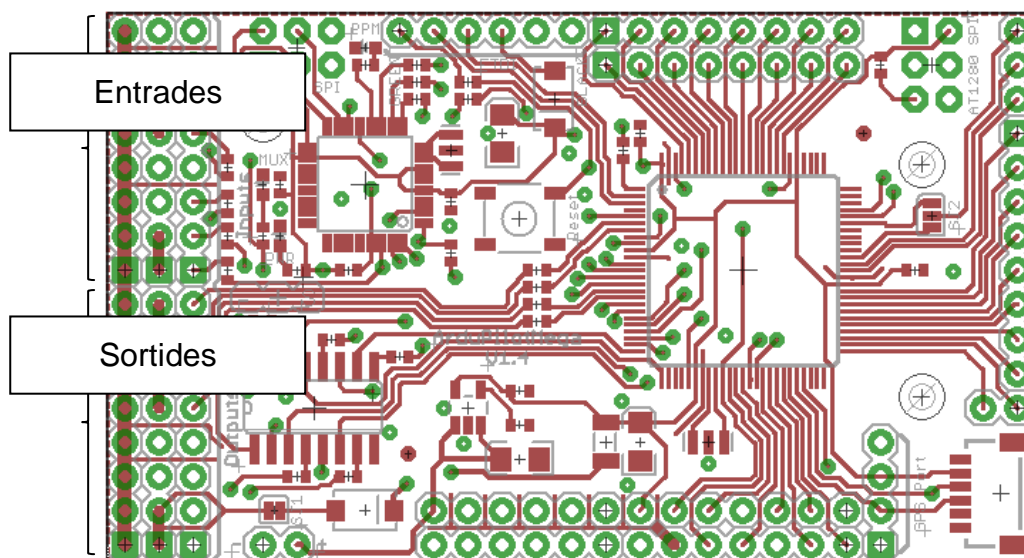


Fig. 3.7 Esquema de les entrades i sortides als actuadors de la placa Ardupilot

Aquests pins estan distribuïts segons si són d'entrada a la placa o de sortida. Les vuit connexions superiors són pins d'entrada mentre que les inferiors són de sortida. Les quatre entrades principals, les inferiors segons la Fig. 3.7, estan connectades al processador secundari mentre que les quatre sortides principals estan connectades al multiplexor. Les entrades i sortides secundàries estan directament connectades a l'ATmega1280.

Aquests sortides digitals als actuadors són digitals amb modulació d'amplitud (PWM).

A part de les entrades i sortides als actuadors, la placa també compta evidentment amb una gran connectivitat amb l'IMU Shield, però com ja he comentat, les línies només són traslladades a aquesta placa pel microprocessador.

Les úniques línies d'entrada-sortida pures amb les que compta aquesta placa són les del port GPS, de modulació I²C, un port d'expansió I²C dedicat exclusivament també a GPS i l'entrada-sortida SPI de l'ATmega328 que serveix per la configuració del seu software intern.

CAPÍTOL 4. GPS I ANTENES

4.1. GPS

El sistema GPS o *Global Positioning System* és un tipus de navegació per satèl·lit. Ara farem una petita introducció del que són els sistemes de navegació per satèl·lit, quins hi ha, què fan, com ho fan i perquè són útils pel nostre sistema de pilot automàtic.

4.1.1 Fonaments

Un sistema de navegació per satèl·lit és un sistema que proporciona la posició geoespacial d'un cos mitjançant un conjunt de satèl·lits. Quan un sistema d'aquests compta amb una cobertura mundial, llavors podem parlar de GNSS o *Global Navigation Satellite System*, per les seves sigues en anglès.

En el passat, abans de l'aventura espacial, els predecessors dels GNSS eren els sistemes com DECCA, LORAN o Omega que, en lloc de satèl·lits comptaven amb estacions terrenes de ràdio. S'enviava una senyal de ràdio des de varies estacions de posicions conegudes cap a un cos, que al calcular les diferències de temps entre les recepcions es podia fer una idea de la posició en la que es trobava.

Més tard, cap al 1960, el primer sistema de posicionament per satèl·lit va ser el Transit, que utilitzava l'efecte Doppler per determinar la posició dels cossos. Sabent la freqüència en la que el satèl·lit enviava la informació i la freqüència rebuda es podia saber la velocitat relativa del satèl·lit respecte el cos. Coneixent amb precisió l'òrbita del satèl·lit i comparant les dades amb les d'altres satèl·lits s'aconseguia monitoritzar la posició del receptor.

Amb la guerra freda els sistemes GNSS van esdevenir una de les prioritats principals de les dues potències mundials en aquell moment, els Estats Units i la URSS. [27]

Els comunistes van desenvolupar i dur a terme el GLONASS, GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, que va estar funcionant a ple rendiment fins a la caiguda de la Unió Soviètica. A partir d'aquell moment i fins ara, el sistema ha anat degenerant i morint per la falta de pressupost. A partir de l'any 2000 Rússia està destinant una gran quantitat de diners a tornar a fer funcionar el GLONASS de forma global. Al 2010 era capaç de proporcionar cobertura en tot el territori rus i es preveu que durant el 2011 o 2012 s'acabi la seva restauració.

Els Estats Units per la seva banda van posar en funcionament al 1978 una constel·lació de 32 satèl·lits d'òrbita MEO anomenada GPS, *Global Positioning System*.

Ara en l'actualitat es troben en fase de desenvolupament avançada dos sistemes més, el Compass i el Galileo.

El Compass és un sistema de posicionament Xinès que en principi només estava planejat que fos un sistema regional, és a dir, amb cobertura sobre el territori Xinès. Recentment, però, la Xina ha indicat el seu objectiu de convertir-lo en global per l'any 2020. El sistema regional (de 12 satèl·lits) s'estima que estigui operatiu durant l'any 2012.

El sistema Galileo, per la seva banda, és el sistema GNSS europeu. L'any 2002, la unió europea i l'Agència Espacial Europea van acordar introduir una alternativa al GPS totalment obert a la població civil. El projecte que inicialment es va projectar per estar enllestit al 2010 a un cost de 3 bilions d'euros, s'ha anat allargant i ara no s'espera que estigui operatiu abans del 2020.

Per tant, avui en dia l'únic sistema global de navegació per satèl·lit 100% operatiu és el GPS. Vegem com funciona:

Cada satèl·lit GPS envia contínuament un missatge de navegació de 1500 bits a una velocitat de 50 bits per segon. Aquest missatge està dividit en tres parts, la primera conté la hora a la qual el missatge ha estat transmès, la segona la informació detallada de l'òrbita del satèl·lit i la darrera, la informació de la salut del satèl·lit i informació sobre òrbites dels altres satèl·lits de la constel·lació.

El receptor llavors, utilitza la informació que rep del satèl·lit per calcular la seva posició. Sabent l'hora exacta a la que ha rebut el missatge i restant-li la continguda a la informació rebuda pot saber el temps de "viatge" de la informació. Multiplicant aquest temps per la velocitat de la llum (a la que viatgen les ones electromagnètiques) s'obté la distància exacta al satèl·lit.

Amb les dades d'un sol satèl·lit s'obté una esfera al voltant del mateix de radi la distància calculada. Amb dos satèl·lits tenim un cercle format per la intersecció de les dues circumferències. Amb tres satèl·lits s'aconsegueixen dos punts resultants de la intersecció de l'esfera amb el cercle i, ja finalment amb un quart satèl·lit podem descartar un d'aquests dos punts i aconseguir la posició exacta del cos. D'aquesta manera necessitem sempre un mínim de quatre satèl·lits a la vista per poder determinar la posició 3D d'un cos. Amb receptors en cotxes o vaixells, amb tres satèl·lits en tenim prou perquè podem descartar automàticament el punt que no es troba sobre la superfície de la terra sense necessitar-ne un quart, però en objectes voladors necessitem com a mínim els quatre satèl·lits visibles.

Quatre satèl·lits a la vista són el mínim però, en qualsevol cas, com més satèl·lits estiguin a la vista i com més sigui capaç de processar el nostre receptor millor, ja que així es poden corregir els possibles errors produïts per la desviació del rellotge del receptor o per l'efecte de la ionosfera sobre les ones electromagnètiques enviades pels satèl·lits.

El receptor GPS que fem servir al nostre sistema de pilot automàtic és el MT3329 de l'empresa taiwanesa Mediatek. Aquest receptor és capaç de processar 66 canals simultanis, però donat que només hi ha 32 satèl·lits GPS

en òrbita i que és impossible que mai estiguin tots a la vista, és una dada poc reveladora.

Aquest receptor compta amb una antena plana o *patch antenna* amb un diagrama de radiació aproximadament com el de la Fig. 4.1 instal·lada sota una coberta de plàstic per protegir-la de l'exterior que li dóna una exactitud en la mesura de la posició d'uns 3 metres aproximadament.

MediaTek MT3329 GPS	
Tamany	16mm x 16mm x 6mm (8g)
Freqüència d'actualització	10 Hz
Consum de corrent	3,3 V - 48 mA (acquisition) / 37 mA (tracking)
Nombre de canals	66
Antena	Build-in patch antenna
Exactitud	Autonomous: 3 m (2D RMS) / SBAS: 2,5 m (2D RMS)
Compatibilitat	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN

Taula 4.1 Principals característiques del MT3329

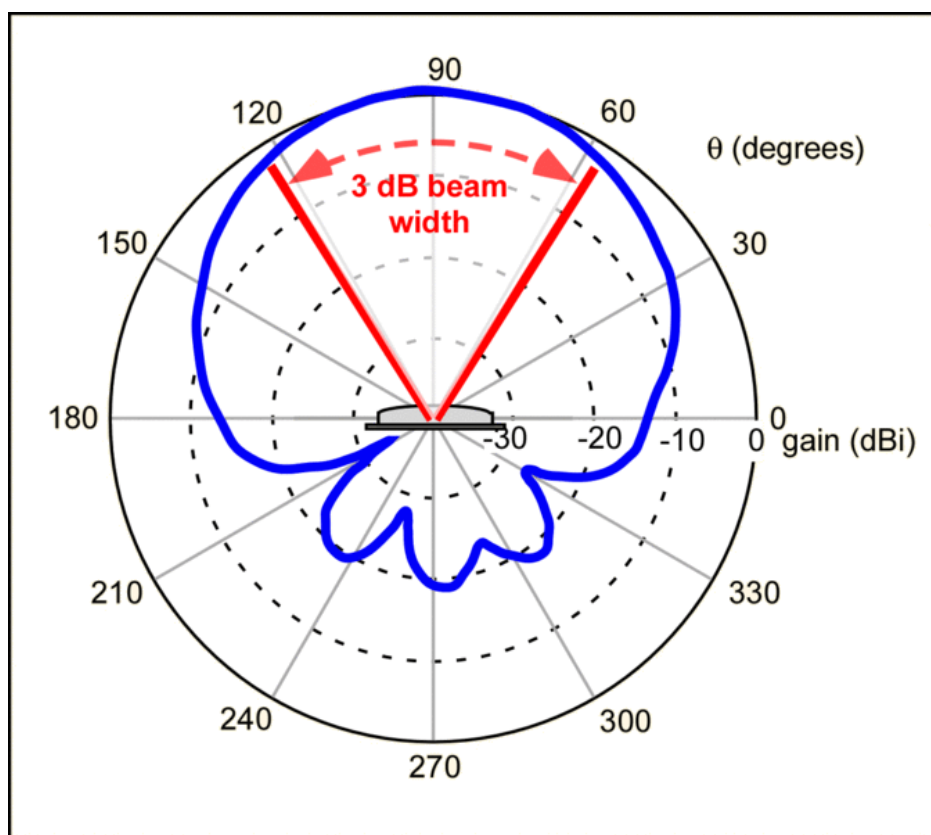


Fig. 4.1 Esquema aproximat del diagrama de radiació d'una *patch antenna*. [27]

4.1.3 Connexió amb el sistema

La connexió del GPS MT3329 amb el sistema es fa a través de la placa de l'Ardupilot. La connexió semblant que es troba a l'altra placa està destinada al magnetòmetre i utilitza una connexió sèrie I2C mentre que l'entrada del GPS n'utilitza una de UART.

Per poder adaptar aquest sistema a l'Ardupilot, primer necessitem una petita placa on situar el GPS. Com que aquest sistema necessita una línia de visió directa amb els satèl·lits, no pot anar incorporat a les plaques que, normalment, van embarcades dins de l'UAV. Aquest petit dispositiu on situem el MT3329 disposa de 6 canals de sortida (dels que realment només se'n aprofiten cinc) en lloc de les deu línies del MT3329.

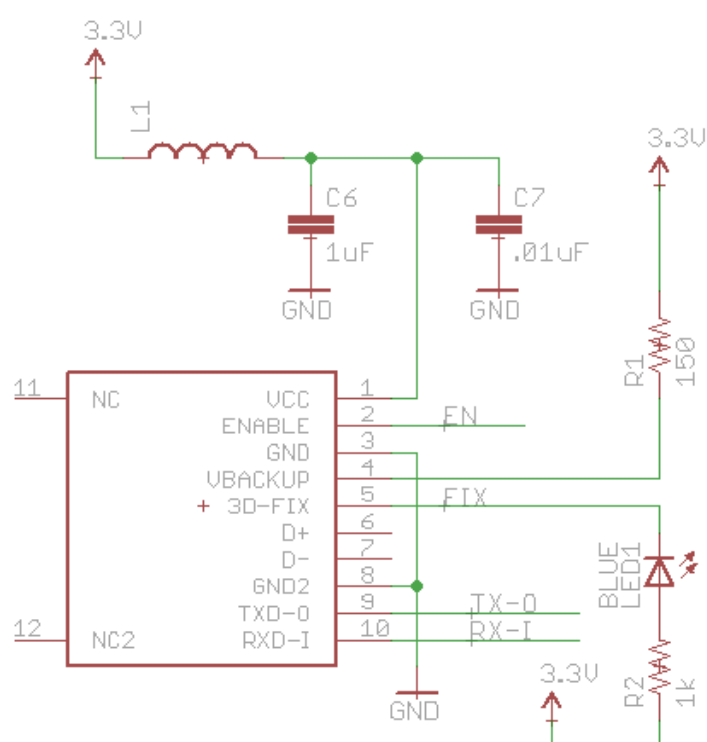


Fig. 4.2 Esquema de les connexions del GPS a la placa

Com ja hem vist, l'MT3329 pot oferir la seva sortida tant en format USB com UART. Pel nostre microprocessador és molt més útil la senyal UART que la USB per tant, deixem els ports D+ i D-, sortides USB, sense connectar. L'alimentació de 3.3 V prové d'un *Voltage regulator* que hi ha a la placa, ja que recordem que l'alimentació que li arriba de la placa principal és de 5 V.

Per tant a la placa de l'ardupilot hi arriben sis canals, un d'obert, dos de terra, un d'alimentació i el TXD i RXD, que com ja hem vist a l'apartat 2.2.3 són les línies d'entrada de dades i de sortida de dades del dispositiu. Aquestes dues línies passen per el port d'expansió de GPS i es dirigeixen, llavors, cap al

microcontrolador principal. Això deixar clar que no es poden connectar simultàniament dos dispositius GPS, un al port GPS i l'altre al port d'expansió perquè el bus de dades no utilitza cap protocol per poder ser compartit.

4.2 Antenes

Ja hem parlat del port de telemetria (apartat 2.2.3) situat a la placa de l'IMU Shield però ara anem a veure què s'hi connecta i com funciona.

Per poder comunicar-nos sense cables amb el nostre UAV necessitem una antena embarcada. Aquesta antena és, en el nostre cas, el mòdul XBee Pro 900. Aquest mòdul, que en realitat compta amb l'antena XBee i la placa on va muntat, s'encarrega de transmetre les dades que el microprocessador envia al port de telemetria cap a una antena terrena connectada a un ordinador.

Per fer-ho, el mòdul XBee es comunica amb el microprocessador de forma asíncrona UART, és a dir, les dades s'envien en sèrie sense utilitzar cap protocol de compartició de bus. La informació que l'ATmega1280 li envia, s'emmagatzema en un buffer intern i es va transmetent a través de l'antena a una velocitat màxima de 156 kbps. Com que la connexió sèrie amb el microprocessador és molt més ràpida que la RF, aquest bus es pot arribar a omplir. Per evitar que això passi i que, per tant, es pugui perdre informació pel camí el mòdul XBee té una línia de control CTS que envia un 1 quan el buffer està ple perquè deixi d'enviar informació.

D'igual manera, en la recepció de dades també hi ha un buffer i una línia de control RTS. En aquest cas, però, és molt més difícil que el buffer s'ompli abans que es pugui transmetre al microcontrolador, però per si això passés, la línia de control RTS enviaria un bit per evitar que es perdés informació.

Desgraciadament amb la nostra interfície aquestes dues línies de control resten sense connectar amb el microcontrolador és a dir que s'ha d'anar amb compte a l'hora de programar-lo per evitar saturar els buffers.

CAPÍTOL 5. INTEGRACIÓ DEL HARDWARE

Ara que ja hem vist cada component per separat, les connexions de les plaques i les entrades i sortides, és moment de veure com s'integra tot el sistema per aconseguir un pilot automàtic capaç.

Com ja hem vist a l'apartat 1.2, un pilot automàtic d'un avió és un sistema l'objectiu del qual és mantenir l'avió en vol anivellat o fer-lo realitzar maniobres controlades. Per fer-ho, el sistema de pilot automàtic necessita un feedback provinent dels sensors distribuïts per l'avió. En un avió comercial els sensors són múltiples i estan repartits per tot el fuselatge. La filosofia d'aquests sensors, és, però, la mateixa que la dels sensors dels que disposem al nostre pilot automàtic.

Un cop tens aquests sensors instal·lats, necessites algun dispositiu que sigui capaç de recollir les dades que aquests proporcionen i processar-les per poder-ne extreure una sortida. Vegem un esquema resum dels elements del nostre sistema de pilot automàtic, l'Ardupilot:

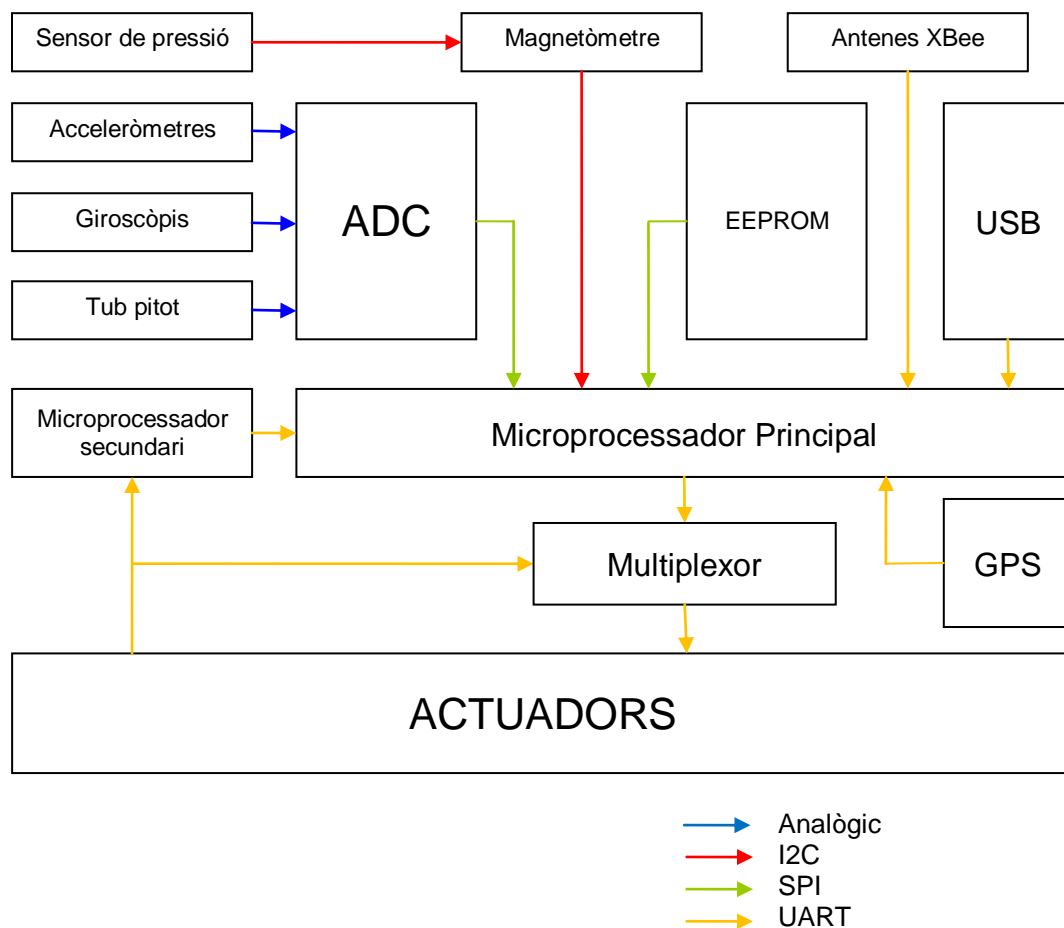


Fig. 5.1 Esquema qualitatiu de la distribució d'elements i la seva connectivitat entre ells a l'Ardupilot.

Mirant aquest esquema podem veure com les dades de tots els sensors (acceleròmetre, magnetòmetre, giroscopis, tub pitot, sensor de pressió i GPS) acaben al microprocessador principal. Aquest opera amb elles i, a partir de l'*imput* que rep dels actuadors, modifica el seu estat. És clar que aquest esquema està molt simplificat i en realitat les plaques estan plenes de petits circuits d'acondicionament de senyal, de línies d'alimentació, d'interruptors, de leds, d'elements d'adaptació de senyals, etc... Aquests elements ja els hem anat veient durant tot el treball.

També hem anat veient les entrades i sortides que tenia cada placa individualment i que, ara, un cop vist tot el sistema agafen més significat. La Fig. 5.2 mostra un resum de les entrades i sortides principals.

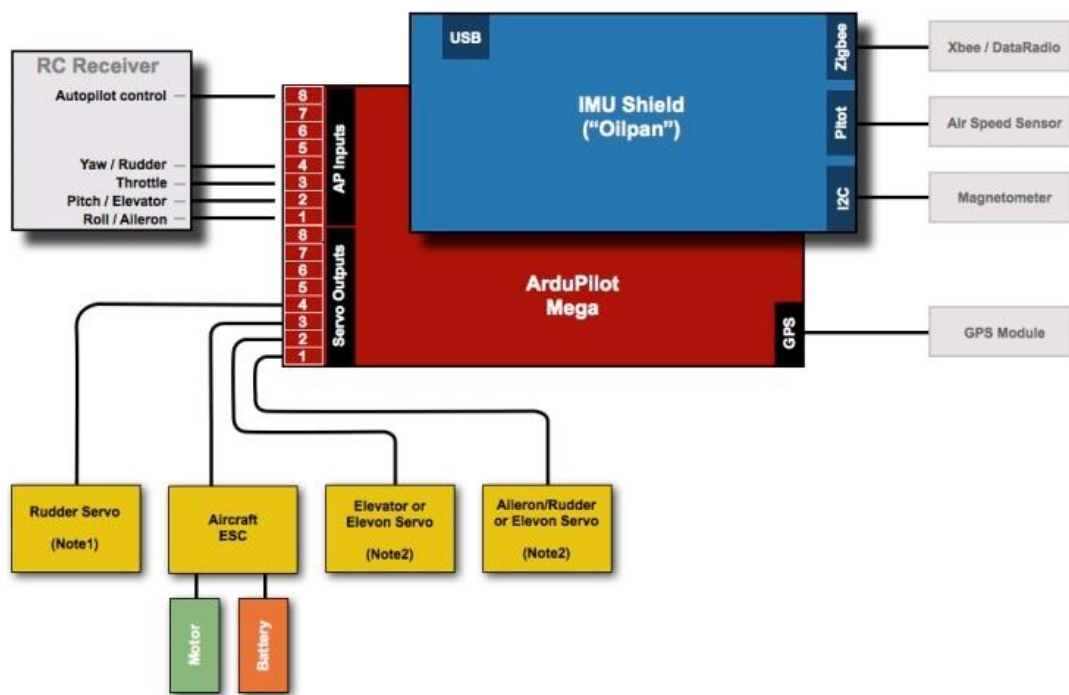


Fig. 5.2 Esquema de les principals entrades i sortides de l'ArduPilot [2]

Per tant ara ja hem vist tots els detalls del sistema, només ens queda saber com s'instal·la en un UAV. El pas principal és el de l'alimentació. Com ja s'ha anat repetint durant tot el treball, l'ArduPilot necessita una font d'alimentació externa ja sigui el circuit RC de l'avió, una bateria o el cable USB quan està connectat a un ordinador.

Un cop resolt el problema de l'alimentació de la placa, s'ha de connectar als dispositius externs necessaris per a què el pilot automàtic serveixi d'alguna cosa, això és, l'equip de ràdio control (RC) i els servos.

L'equip RC necessari ha de tenir com a mínim 5 canals (Rudder, Throttle, Elevators, Ailerons i un canal extra pel control del pilot automàtic) tot i que és molt recomanable que en tingui 7 o més.

Les connexions bàsiques del circuit RC són les mostrades a la taula 5.1. Com que només les quatre primeres entrades són controlades pel multiplexor, és necessari que la línia de control del pilot automàtic estigui connectada en una de les altres 4 per si hi hagués algun problema amb el processador.

Canal RC	Funció	Entrada APM
1	Roll	IN1
2	Pitch	IN2
3	Throttle	IN3
4	Yaw	IN4
5	Autopilot Control	IN8

Taula 5.1 Equivalència de connexions del sistema RC embarcat [2]

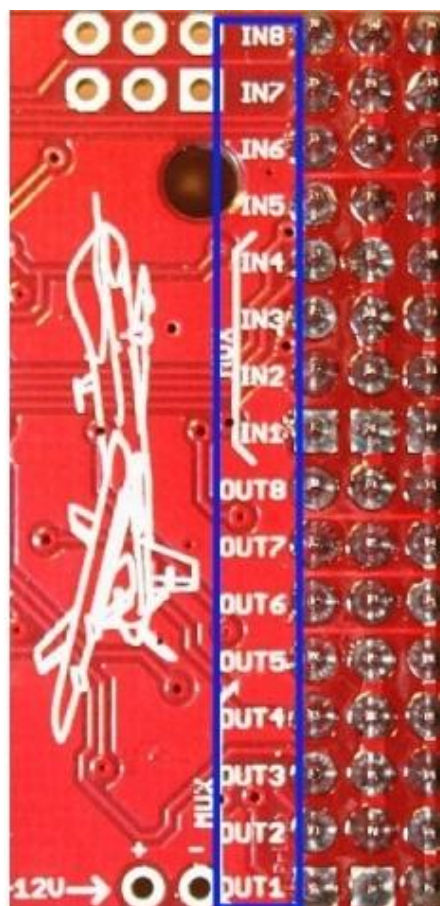


Fig. 5.3 Imatge de les entrades i sortides pels servos i equips RC de l'Ardupilot [2]

És important remarcar també que encara que s'estigui alimentant la placa Ardupilot amb una pila o bateria externa, l'equip de RC ha d'estar alimentat autònomament ja que els pins de connexió al circuit RC no proporcionen alimentació.

Pel que fa als servos, la cosa varia molt més. El nombre de servos que es poden connectar és molt dispar depenent del tipus de vehicle aeri que es faci servir i del tipus de control que tingui aquest. Pot ser que el timó de profunditat i els alerons siguin sistemes totalment diferenciats o pot ser que l'UAV estigui controlat per "elevons" que són la combinació d'aleró més *elevator*.

Per tant la premissa bàsica per la connexió dels servos és començar pel número OUT més petit possible, l'1 si no n'hi ha cap altre de connectat i seguir pujant sempre recordant que només els 4 primers ports estan controlats pel multiplexor i poden ser maniobrats manualment en cas de fallada del microprocessador.

Per seleccionar i configurar el tipus de servos connectats es pot fer a través de les dades emmagatzemades a la memòria EEPROM (veure Annex C).

CAPÍTOL 6. CONCLUSIONS

Durant tot el projecte hem anat veient la importància que estan agafant els avions no tripulats o UAV en la societat aeronàutica d'avui en dia. Per la seva facilitat de maniobra, el seu baix cost o la capacitat d'assolir riscos que vides humanes no poden assolir, s'estan tornant dia a dia més i més importants.

Per controlar aquests UAVs també hem vist que ens cal un sistema de pilot automàtic capaç de pilotar i navegar l'avió, és a dir, mantenir la seva estabilitat davant de possibles pertorbacions externes i ser capaç de seguir un *camí* prèviament programat.

Durant tot el treball hem estudiat el sistema de pilot automàtic per UAVs Ardupilot, basat en la plataforma oberta Arduino. Hem vist tots els elements dels que es compon, com es connecten entre ells i quins protocols fan servir. També hem vist les entrades i sortides i un petit resum de la integració de tot el hardware per fer-nos una idea final de com és el sistema.

L'objectiu del treball era posar la primera pedra per una possible implementació de l'Ardupilot en investigacions del centre de recerca ICARUS, per ser una plataforma de baix cost i fàcilment reprogramable i espero, personalment, haver-ho aconseguit.

L'únic pas que quedaria per arribar a una futura implementació del sistema seria fer un petit anàlisi del software necessari a l'ordinador per poder fer-lo volar, fer el pla de vol i configurar-lo correctament.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Analog Devices. *ADXL335*. Datasheet, Norwood, MA: Analog Devices Inc., 2010.
- (2) Anderson, Chirs. *Ardupilot Mega Instruction*. s.f. <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/home?wl=en>.
- (3) Anderson, Chris. *Ardupilot Mega home page*. s.f. <http://www.diydrones.com/profiles/blogs/ardupilot-mega-home-page>.
- (4) Atmel. *ATmega1280/V*. Datasheet, Atmel Corporation, 2010.
- (5) Atmel. *ATmega328P*. Datasheet, Atmel Corporation, 2009.
- (6) Atmel Corporation. *Two-wire serial EEPROM*. Datasheet, Literature Requests, 2007.
- (7) Barometric Studies Group, Smiths Aviation Division. "Evolution of the Modern Altimeter." *Flight Global*, 1968: 1066.
- (8) Bosch Sensortec. *BMP085 Digital Pressure Sensor*. Datasheet, Reutlingen, Alemanya: Bosch Sensortec GmbH, 2009.
- (9) Burr Brown. *ADS7844*. Datasheet, Tucson, AZ: Burr Brown Corporation, 1998.
- (10) Digi. *XBee-Pro 900*. Datasheet, Digi International Inc., 2009.
- (11) Esfandyari, Jay, Roberto De Nuccio, y Gang Xu. «Introduction to MEMS gyroscopes.» *ElectroIQ*. 15 de Novembre de 2010. <http://www.electroiq.com/articles/stm/2010/11/introduction-to-mems-gyroscopes.html>.
- (12) FAA. «RVSM Gerenal Information.» *Federal Administration Authority*. 5 de Maig de 2011. http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/enroute/rvsm/ (último acceso: 13 de Juny de 2011).
- (13) FTDI Chip. *FT232RT USB UART IC*. Datasheet, Glasgow, United Kindom: Future Technology Devices International Limited, 2010.
- (14) Honeywell. *HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC*. Datasheet, Plymouth, MN: Honeywell International Inc., 2010.
- (15) InvenSense. *Integrated Dual-Axis Gyro - IDG500*. Datasheet, Sunnyvale, CA: Invensense Inc., 2008.
- (16) InvenSense. *ISZ-500 Single-Axis Z-Gyro Product Specification*. Datasheet, Sunnyvale, CA: Invensense, Inc., 2010.

- (17) InvenSense. «MEMS Technology.» *InvenSense*. s.f. <http://invensense.com/mems/technology.html>.
- (18) Maxim Integrated Products. «SPI/I2C Bus Lines Control Multiple Peripherals.» 21 de Juny de 2007. <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4024>.
- (19) MediaTek. *MediaTek 3329*. Datasheet, MediaTek, s.f.
- (20) Motorola. *Quad 2-Input Multiplexer*. Datasheet, Motorola Literature Distribution, s.f.
- (21) NXP Semiconductors. *PCA9306*. Datasheet, NXP B.V., 2010.
- (22) Pastor Llorens, Enric. «Arquitectura dels sistemes informàtics.» *Aviònica*, s.f.
- (23) Philips Semiconductors. «The I2C Specification.» Gener de 2000. <http://www.semiconductors.philips.com/i2c>.
- (24) Scheck, William. «Lawrence Sperry: Genius on Autopilot.» *Aviation History Magazine*, s.f.
- (25) Valavanis, Kimon P. *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy*. Springer, 2007.
- (26) Valenzuela, Jose Luís. «Transmision de señales en Sistemas digitales.» *Comunicaciones*, s.f.
- (27) Villardi de Montlaur, Adeline. «Autopilots.» *Control and Guidance*, s.f.
- (28) *Wikipedia*. s.f. <http://www.wikipedia.org/>.

ANNEX A. ENSAMBLATGE DEL HARDWARE

Elements necessaris per l'ensamblatge de l'Ardupilot:

- Evidentment, l'Ardupilot Mega kit que consta de:
 - 1 Placa IMU
 - 1 Placa Ardupilot mega
 - 1 Cable adaptador pel mòdul GPS
 - 1 GPS MediaTek MT3329
 - 1 3x16 pin headers amb angle
 - 5 cables extensius pels servos.
 - 2 Conn header Male 36, rectes
 - 1 Conn header Female 2POS
 - 1 Conn header Female 2x03POS
 - 1 Conn header Female 08POS
 - 1 Conn header Female 11POS
 - 1 Conn header Female 2x13POS
 - 1 Conn header Female 14POS

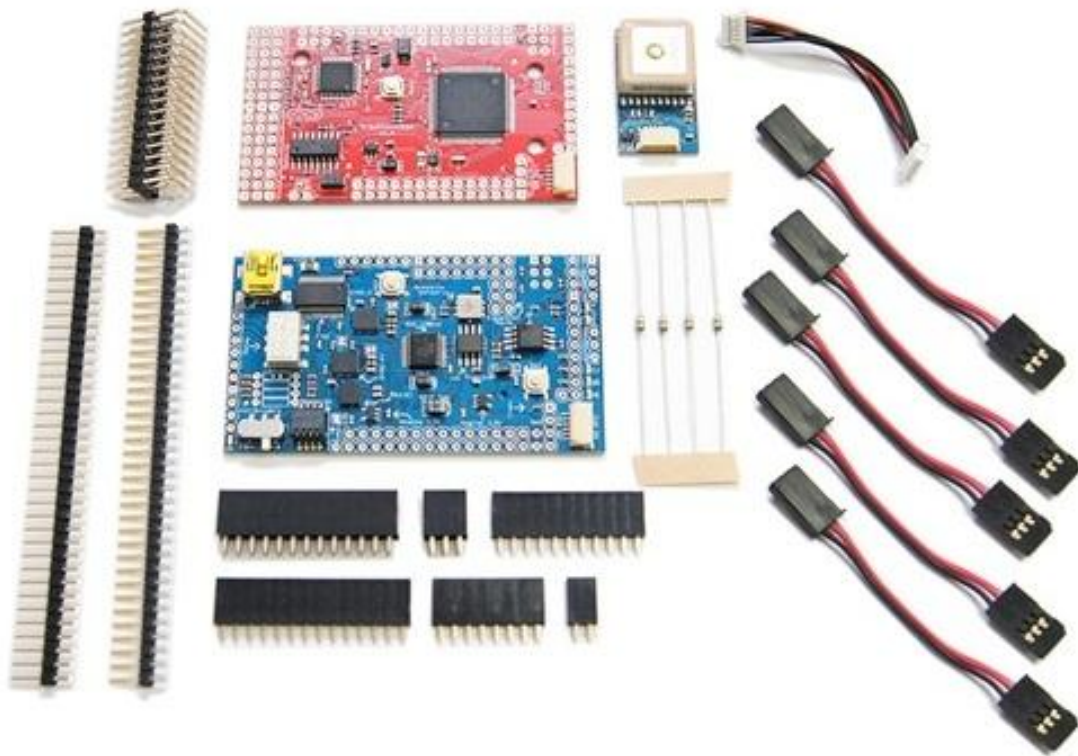


Fig. A.1 Tots els elements dels que consta l'Ardupilot Mega kid que es pot comprar junt o per separat cada element.

- Un soldador electrònic

El primer pas és soldar els pin headers amb angle pel circuit RC de l'UAV.

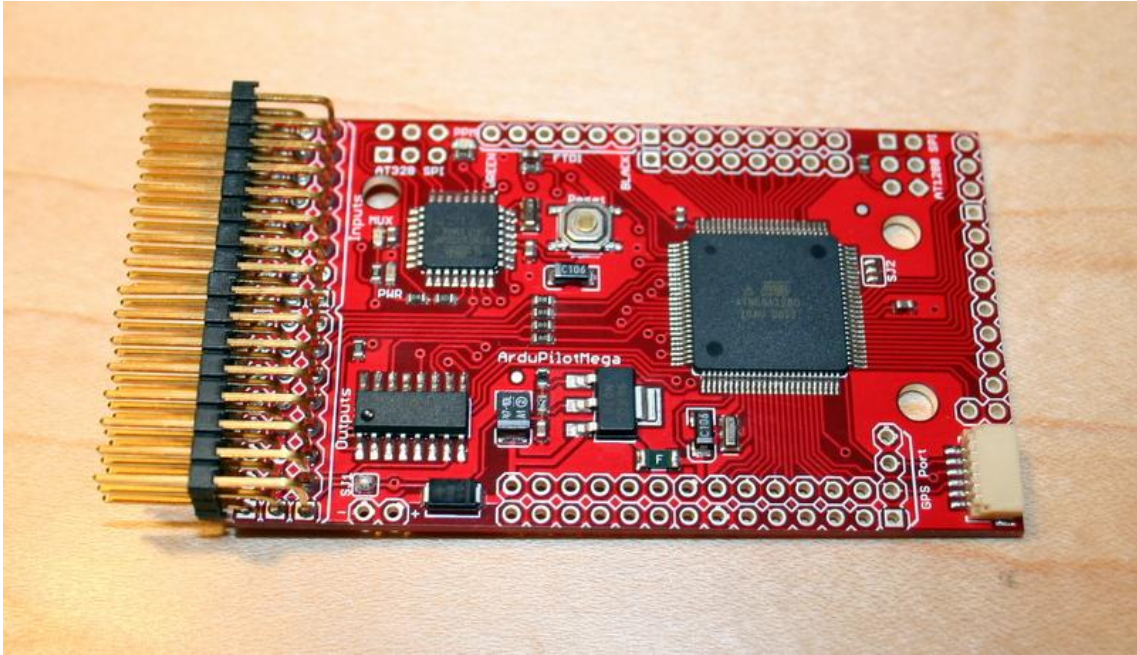


Fig. A.2 Placa Ardupilot amb els pin headers amb angle soldats.

El següent pas és tallar els male headers per a què encaixin als female headers. Per tant, s'han d'enganxar en cada grup de female headers i tallar els que sobrin. Al final del procés hi hauria d'haver un male header per cada female.

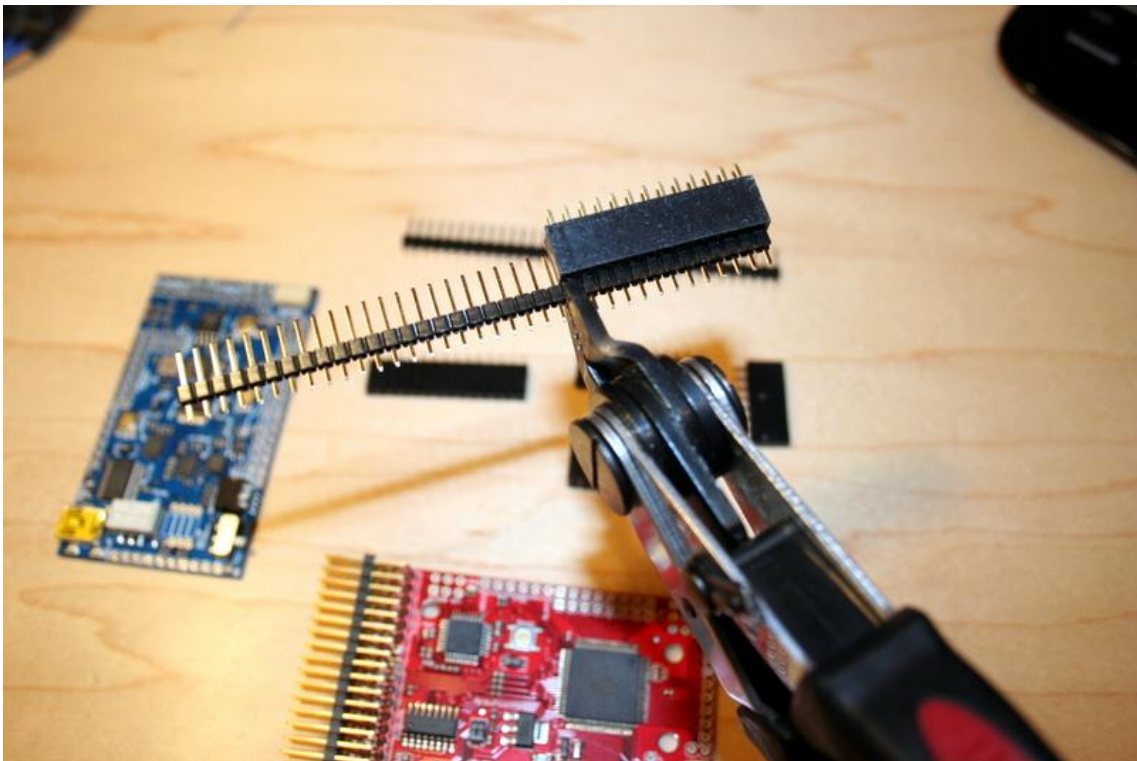


Fig. A.3 Tallant els male headers per a què encaixin en a les femelles.

Ara es desenganxen els mascles de les femelles i es fan encaixar als pins de la placa Ardupilot. Amb l'ajuda d'algun objecte pla es fa girar la placa amb els mascles encaixats i es solden els pins al darrere de la placa

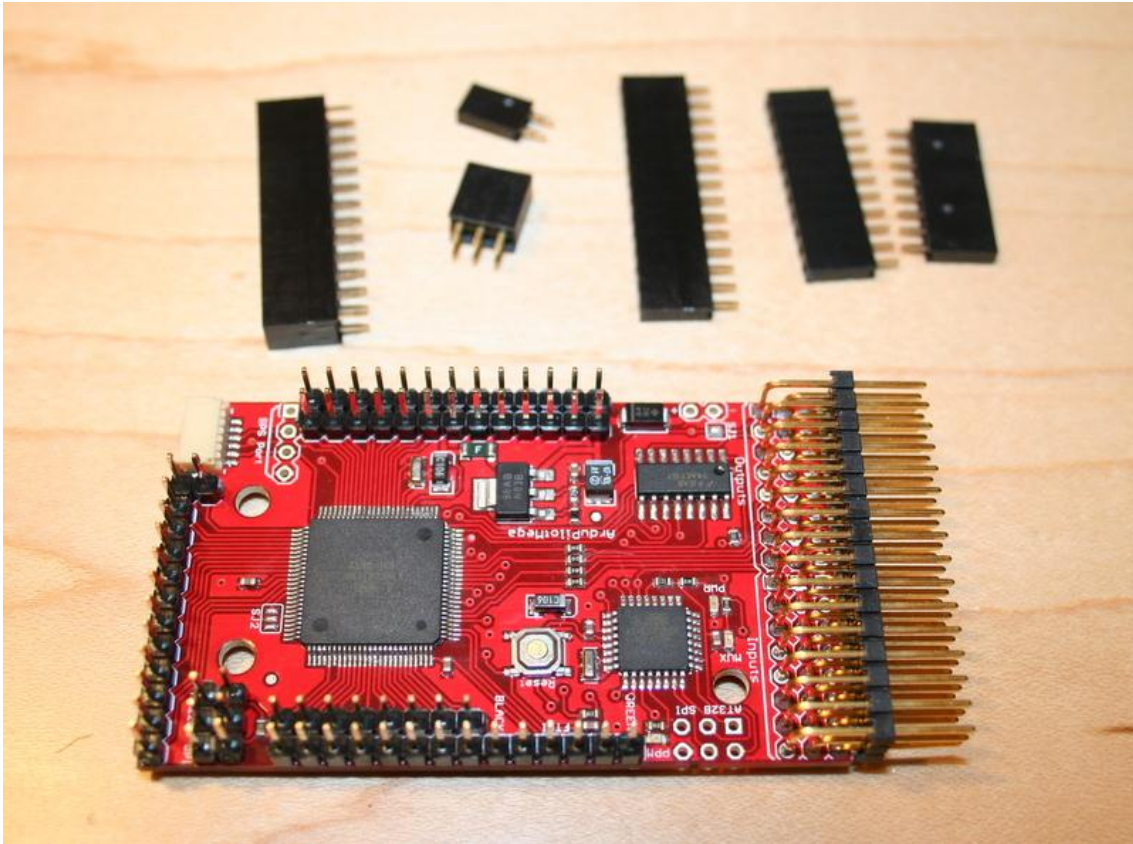


Fig. A.4 Placa Ardupilot amb els pin headers mascles ja soldats als forats corresponents

Quan això estigui fet, s'ha de tornar a posar la placa amb els mascles mirant cap amunt, acoplar-hi els female headers i fer encaixar la placa IMU a sobre assegurant-se de que tots els pins femella encaixen correctament als forats adequats i soldar-los.

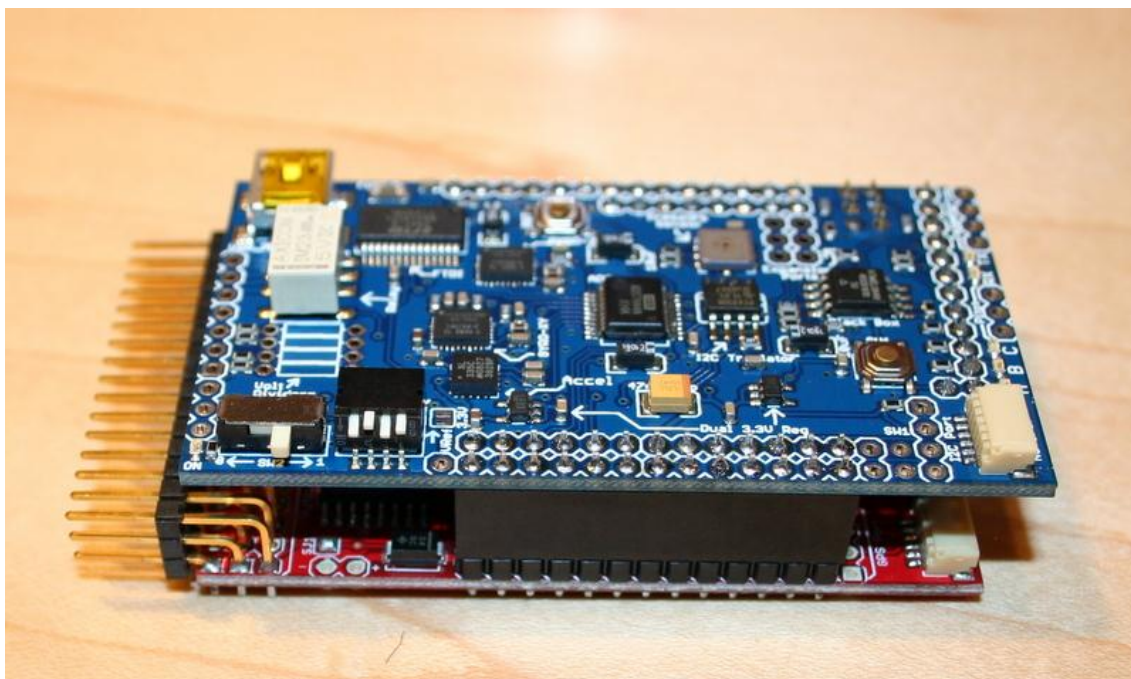


Fig. A.5 Les dues plaques j asoldades amb els seus corresponents connectors.

Per últim enganxar el mòdul GPS a l'entrada de la placa de l'Ardupilot, NO a la semblant que hi ha a la de l'IMU shield que és pel magnetòmetre.

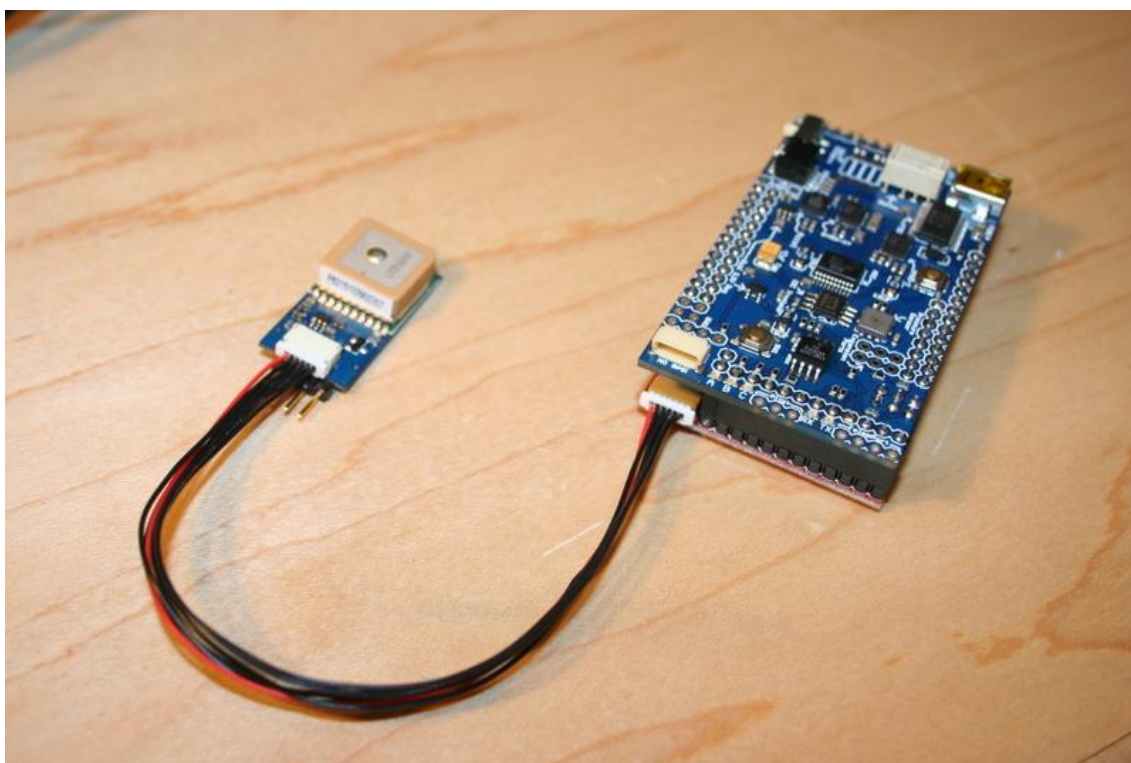


Fig. A.6 Ardupilot complet amb el GPS enganxat al port corresponent.

ANNEX B. ARDUPILOT HARDWARE SETUP

Abans de poder fer servir el hardware de l'Ardupilot per volar s'ha de fer un start-up connectant-lo a l'ordinador per configurar els paràmetres inicials. Això es fa mitjançant un CLI o *Command Line interpreter*, com l'Arduino Serial Monitor, encara que es pot fer amb qualsevol altre.

Els passos a seguir són els següents:

- Assegurar-se que la posició del switch de l'IMU Shield és la més pròxima als servos i apretar el botó *Reset* de la placa (això s'ha de fer cada cop que es canvia la posició del switch).
- Assegurar-se que el cable USB està connectat al PC.
- Obrir el CLI que s'estigui utilitzant i configurar-lo a 115200 baud rate.

Un cop en aquest punt a la pantalla del Serial Monitor s'hauria de veure el menú inicial de l'APM (Ardupilot Mega). A partir d'aquí es poden dur a terme totes les funcions necessàries però les més habituals per començar són:

- "logs" – Lectura o setup del "log" (utilitzat després dels vols).
- "setup" – Per iniciar els paràmetres bàsics.
- "test" – Iniciar el mode test.

El mode setup prepara l'APM pel primer vol i configura els paràmetres bàsics. Els comandaments bàsics dins el menú setup són:

- "reset" – Reconfigura els valors per defecte.
- "radio" – Serveix per modificar els valors per defecte de les comunicacions amb un comandament a distància de l'UAV.
- "modes" – Configura els modes de vol a través del comandament a distància.
- "compass" – Activa el magnetòmetre, els comandaments són "compass on" i "compass off".
- "declination" – Introdueix la declinació magnètica local pel magnetòmetre. S'ha d'introduir de forma decimal: 20° 35' E seria 20.35.
- "battery" – Permet el control de l'estat de la bateria. Les 4 opcions són:
 - 0 = Battery monitoring disabled
 - 1 = Monitoring 3 cell battery
 - 2 = Monitoring 4 cell battery
 - 3 = Monitoring battery volts
 - 4 = Monitoring both volts and current
- "show" – Mostra els paràmetres a l'EEPROM.
- "erase" – Esborra la memòria EEPROM.

El mode "logs" permet llegir els registres de vol guardats a la memòria EEPROM de 16 Mb. Abans de fer-ho servir per primer cop, però, s'ha d'esborrar la memòria per evitar possibles resultats erronis.

El mode "test" permet saber si tots els subsistemes de l'Ardupilot estan treballant correctament. El mode test compta amb 19 tests separats i independents de 19 diferents sistemes:

- "pwm": Mostra les sortides actuals en cada canal.

- "radio": Mostra les lectures actuals de radio en cada canal.
- "failsafe": Mostra els paràmetres *failsafe*.
- "battery": Mostra el voltatge actual de la bateria.
- "relay": Comprova el relé *onboard* (s'encen i s'apaga cada 5 segons, s'hauria de sentir un débil "click")
- "waypoints": Mostra els waypoints configurats en aquell moment.
- "xbee": Mostra les dades d'entrada del mòdul XBee, sempre que n'hi hagi un connectat.
- "eedump": Volca les dades actuals a la memòria EEPROM *onboard*.
- "modeswitch": Mostra el mode actual configurat.
- "dipswitches": Mostra la posició del switch DIP.
- "adc": Mostra les dades de sortida de l'ADC sense tractar.
- "gps": Mostra les dades actuals del mòdul GPS, serà 0 si no n'hi ha cap de connectat. Perquè aquest test sigui efectiu s'ha de provar a l'exterior.
- "rawgps": Mostra les dades del GPS sense tractar, útil només en la solució de problemes.
- "imu": Mostra les coordenades x, y i z calculades al moment.
- "gyro": Mostra les dades dels giroscopis i acceleròmetre sense tractar.
- "airspeed": Si hi ha un tub pitot connectat, mostra les dades que aquest proporciona.
- "airpressure": Mostra les dades del sensor de pressió *onboard*.
- "compass": Mostra les dades del magnetòmetre, si és que n'hi ha un connectat.
- "current": Mostra les dades del sensor de corrent, si n'hi ha algun de connectat.

ANNEX C. CONFIGURACIÓ DELS PARÀMETRES PID

La forma de configurar els paràmetres PID (*Proportional Integral and Derivative controller*) del pilot automàtic és bastant senzilla si s'utilitza el software Mission Planner, disponible per descarregar gratuïtament a <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/downloads/list>.



Fig. C.1 Captura de pantalla del Mission Planner de l'Ardupilot.

O també es poden descarregar configuracions prèviament fetes per alguns UAVs d'aquest lloc web <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/downloads/detail?name=SkyWalker062311.param&can=2&q=>.

La configuració dels paràmetres PID serveix sobretot per ajustar els valors del pilot automàtic al tipus d'UAV utilitzat. Per fer-ho manualment s'ha de fer pel mètode de prova-error. Amb l'UAV al terra i el pilot automàtic engegat, es pot desestabilitzar i comprovar com responen els alerons o compensadors i després seguir fent proves en vol per acabar d'ajustar els paràmetres el més exactament possible.

El codi de configuració per l'UAV Skywalker, que es pot aconseguir per menys de 100€ és el següent:

```
ALT_HOLD_RTL,10000
ALT_MIX,1
ALT2PTCH_D,0
ALT2PTCH_I,0
ALT2PTCH_IMAX,500
ALT2PTCH_P,1
ARSPD_FBW_MAX,22
ARSPD_FBW_MIN,6
ARSPD_OFFSET,1341
ARSPD_RATIO,1.994
```

ARSPD2PTCH_D,0.399
ARSPD2PTCH_I,0.02
ARSPD2PTCH_IMA,500
ARSPD2PTCH_P,1
BATT_CAPACITY,1760
BATT_MONITOR,4
COMPASS_DEC,0.157
ELEVON_CH1_REV,0
ELEVON_CH2_REV,0
ELEVON_MIXING,0
ELEVON_REVERSE,0
ENRGY2THR_D,0.05
ENRGY2THR_I,0
ENRGY2THR_IMAX,20
ENRGY2THR_P,0.5
FLTMODE_CH,8
FS_GCS_ENABL,0
FS_LONG_ACTN,0
FS_SHORT_ACTN,0
GND_ABS_PRESS,83943
GND_TEMP,28
HDNG2RLL_D,0.079
HDNG2RLL_I,0
HDNG2RLL_IMAX,500
HDNG2RLL_P,0.8
INVERTEDFLT_CH,0
KFF_PTCH2THR,0
KFF_PTCHCOMP,0.3
KFF_RDDRMIX,0.5
KFF_THR2PTCH,0
LIM_PITCH_MAX,2500
LIM_PITCH_MIN,-2500
LIM_ROLL_CD,4500
LOG_BITMASK,380
MAG_ENABLE,1
PTCH2SRV_D,0.3
PTCH2SRV_I,0
PTCH2SRV_IMAX,500
PTCH2SRV_P,3.3
RC1_MAX,1920
RC1_MIN,1117
RC1_REV,-1
RC1_TRIM,1444
RC2_MAX,1825
RC2_MIN,1023
RC2_REV,-1
RC2_TRIM,1426
RC3_MAX,1920
RC3_MIN,1117
RC3_REV,1
RC3_TRIM,1500
RC4_MAX,1919
RC4_MIN,1118
RC4_REV,-1
RC4_TRIM,1520
RC5_MAX,1500
RC5_MIN,1500
RC5_REV,1
RC5_TRIM,1500

```
RC6_MAX,1500
RC6_MIN,1500
RC6_REV,1
RC6_TRIM,1500
RC7_MAX,1500
RC7_MIN,1500
RC7_REV,1
RC7_TRIM,1500
RC8_MAX,1824
RC8_MIN,1136
RC8_REV,1
RC8_TRIM,1500
RLL2SRV_D,0.199
RLL2SRV_I,0
RLL2SRV_IMAX,500
RLL2SRV_P,3
SONAR_ENABLE,0
SR3_EXT_STAT,1
SR3_EXTRA1,10
SR3_EXTRA2,10
SR3_EXTRA3,0
SR3_POSITION,3
SR3_RAW_CTRL,2
SR3_RAW_SENS,10
SR3_RC_CHAN,3
SWITCH_ENABLE,1
SYSID_MYGCS,255
SYSID_SW_MREV,8
SYSID_SW_TYPE,0
SYSID_THISMAV,1
THR_FAILSAFE,1
THR_FS_VALUE,950
THR_MAX,100
THR_MIN,0
THR_SLEWRATE,0
TRIM_ARSPD_CM,1400
TRIM_AUTO,1
TRIM_PITCH_CD,0
TRIM_THROTTLE,35
WP_INDEX,2
WP_LOITER_RAD,60
WP_RADIUS,30
WP_TOTAL,6
XTRK_ANGLE_CD,2000
XTRK_GAIN_SC,100
YW2SRV_D,0
YW2SRV_I,0
YW2SRV_IMAX,15
YW2SRV_P,0
```


D.2 Ardupilot

