



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE CARRERA

TÍTULO: Sistema Prototipo Fly-by-Wire

AUTOR: Jonathan García Abián

DIRECTOR: Enric Pastor Llorens

FECHA: 21 de enero de 2005

Título: sistema Prototipo Fly-by-Wire

Autor: Jonathan García Abián

Director: Enri Pastor Llorens

Fecha: 21 de enero de 2005

Resumen

Este proyecto está destinado a ofrecer una herramienta a la carrera de aeronáutica para realizar experimentos de navegación y seguimiento de aviones, de la forma más real posible. Con este prototipo lo que se pretende es introducir practicas reales a esta carrera.

En este documento se presenta un prototipo para guiado de aviones Radio control (RC). Se ha diseñado la implementación de un sistema FLY by WIRE (FbW) reducido, para incorporarlo en un modelo de RC, capaz de recoger datos referentes a la inclinación del aparato así como la aceleración en cualquier dirección que sufra el avión RC, también este prototipo esta provisto de unas entradas auxiliares para conectar los sensores que se deseen, debidamente acondicionados.

Title: Fly by Wire system prototype

Author: Jonathan García Abián

Director: Enric Pastor Llorens

Date: January, 21st 2005

Overview

This project is destined to offer a tool to the career of aeronautics to realize experiments of navigation and follow-up of planes, of the as real as possible form. With this prototype what is claimed is to introduce real practices to this career.

In this document it is shown a prototype for guided of radio control planes (RC). There has been designed the implementation of a FLY by WIRE (FbW) system limited, to incorporate it in a RC model, capable of gathering information relating to the inclination of the device as well as the acceleration in any direction that suffers the RC plane, also this prototype is provided with a few auxiliary income to connect the sensors that are wished, due equipped.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE de Figuras	III
ÍNDICE de Tablas.....	V
Índice de referencias datasheets planos webs.....	VI
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1. DISEÑO DEL SISTEMA FbW PARA RC	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Esquema general del sistema.....	3
1.3.2. Montaje en el avión RC	6
1.4. Placas de pruebas.....	7
1.4.1. Esquema electrónico	7
1.4.2. Elección de los componentes del diseño	9
1.4.3. PCB completo.....	11
1.4.4. PCB conectores.....	12
Capítulo 2. COMPONENTES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN ...	14
2.1. Introducción.....	14
2.2. Procesador (PIC)	14
2.2.1. Diagrama de bloques del procesador.....	15
2.2.2. Funciones generales	16
2.3. Sensores	19
2.3.1. Acelerómetros e Inclinómetros	19
2.4. Conversor analógico digital (AD)	24
2.4.1. Características.....	25
2.4.2. Descripción general.....	25
2.4.3. Datagramas de tiempos del AD7927.....	26
2.4.4. Aspectos a destacar del producto	27
2.5. Receptor y servos	28
2.5.1. El servomotor.....	28
2.5.2. Composición del servomotor	29
2.5.3. Funcionamiento del servomotor control PWM	29
2.5.4. Principio de funcionamiento de un servo digital	31
2.5.5. Inconvenientes de los servos digitales.....	32
2.6. SPI (Serial Protocol Interface).....	33

2.6.1. Interficie del sistema SPI.....	33
2.6.2. Especificaciones del sistema SPI.....	34
2.6.3. Comunicación entre periféricos.....	35
2.7. Sistema de telemetría para recepción de datos.....	37
2.7.2. Comunicación serie.....	37
2.7.3. UART-Interfaced Data Flow (flujo de datos en la interficie).....	37
Capítulo 3. NAVEGACIÓN INERCIAL.....	41
3.1. Concepto de navegación inercial.....	41
3.2. Sistema de Navegación inercial (INS).....	41
3.3. Limitación de maniobras.....	42
Capítulo 4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	43
4.1. Conclusiones.....	43
4.2. Líneas futuras.....	43

ÍNDICE de Figuras

Fig.1.1. Esquema general del sistema.....	4
Fig.1.2. Esquema de bloques del prototipo	5
Fig.1.3. Posicion del prototipo en el fuselaje del modelo RC.....	6
Fig.1.4. Esquema circuital de la parte digital	8
Fig.1.5. Esquema circuital de la parte de alimentación.....	9
Fig.1.6. Diseño del PCB completo	11
Fig.1.7. Disposición de los conectores y componentes en la placa.....	12
Fig.2.1. Diagrama de bloques del PIC16F737 y PIC16F767.....	15
Fig.2.2. Medición de la inclinación del SCA100T-D02	19
Fig.2.3. Direcciones de medida de las aceleraciones	20
Fig.2.4. Transmisión de datos sobre SPI.....	22
Fig.2.5. Diagrama de tiempos del bus SPI.....	24
Fig.2.6. esquema del filtro de las salidas analógicas del inclinómetro	24
Fig.2.7. Diagrama de bloques funcional del AD7927.....	26
Fig.2.8. Diagrama de tiempos de la interfície serie	26
Fig.2.9. Diagrama de tiempos general	27
Fig.2.10. servomotor	28
Fig.2.11. servomotor desmontado	29
Fig.2.12. PWM para recorrer todo el rango de operación del servo	30
Fig.2.13. Tren de pulsos para control del servo	31

Fig.2.14. Otra posibilidad de pulsos de control.....	31
Fig.2.15. Ciclo de trabajo del 50% en un servo digital a 300 Hz.....	32
Fig.2.16. Caso de Master con un esclavo.....	34
Fig.2.17. Caso de Master con más de un esclavos	34
Fig.2.18. SPI Transfer Format with CPHA = 0	35
Fig.2.19. SPI Transfer Format with CPHA = 1	36
Fig.2.20. Xstream OEM RF module	37
Fig.2.21. Diagrama de bloques interno del Xstream OEM RF module.....	37
Fig.2.22. Flujo de datos en una interficie UART	38
Fig.2.23. Aplicación del circuito, conexión con un host.....	38
Fig.2.24. System Block Diagram – Wireless Link between hosts	39
Fig.2.25. Especificaciones tiempos (“A” y “B” asociados a la figura anterior).....	39
Fig.2.26. características del modulo de RF presentadas por el fabricante	40
Fig.3.1. Sistema INS (navegación inercial).....	41

ÍNDICE de Tablas

Tabla 1.1. lista de componentes	10
Tabla 1.2. Conectores	12
Tabla 2.1. Modos CCP – Timers requeridos.....	17
Tabla 2.2. Interacción de dos módulos CCP	17
Tabla 2.3. selección de condensadores para el oscilador de cristal	18
Tabla 2.4. DIGITAL INTERFACE SPECIFICATION.....	22
Tabla 2.5. Comandos SPI.....	22
Tabla 2.6. Señales del sistema SPI	34
Tabla 2.7. Modos de transmisión sobre SPI.....	35

Índice de referencias datasheets planos webs

VTI technologies:

[Acelerómetro DN_SCA1000_260804.pdf](#)

[Inclinómetro DN_SCA100T_260804.pdf](#)

[AN1_PositionSensing.pdf](#)

[AN2_TiltSensing.pdf](#)

[TN5_Supply_Voltage_Regulation.pdf](#)

[TN6_Internal_temperature_sensing.pdf](#)

[TN7_Frequency_Response.pdf](#)

[TN8_Self_Test_Function.pdf](#)

[TN9_EMCprotection.pdf](#)

[TN10_RS485_Interface.pdf](#)

[TN11_Mechanical_Installation.pdf](#)

[TN12_Stand_Alone_Product_Range.pdf](#)

[TN13_Angle_vs_Digital_output.pdf](#)

[AN14_OffsetCalibration.pdf](#)

[TN15_SPI_Interface_Specification.pdf](#)

[TN17_Voltage_to_Angle.pdf](#)

[TN18_Advanced_Output_Filtering_Prior.pdf](#)

[TN20_Low_Power_Operation.pdf](#)

[AN21_Rotational_Angle_of_Vertical.pdf](#)

AD

[Conversor A/D_748245523AD7927_0.pdf](#)

PIC16F767

[Data_sheet_pic16F767](#)

[Data_sheet_errata_pic16F767](#)

[Instruction_set](#)

[Memory_programming_specification](#)

[Voltaje_reference](#)

Regulador LM7805

[LM7805.pdf](#)

Módulo Xstream

[adv-manual_xstream_programming-and-configuration.pdf](#)

[datasheet_xstream_oem-rf-module.pdf](#)

[product-manual_xstream_oem-rf-module.pdf](#)

[mechanical-drawing.pdf](#)

Documentos interesantes sobre líneas futuras

[MT9_brochure.pdf](#)

[Video_demostración](#)

[Pagina_web_sobre_el_producto](#)

Esquemas

[Circuito_digital](#)

[Circuito_alimentacion](#)

INTRODUCCIÓN

Los últimos aviones comerciales que llegan al mercado utilizan un sistema de control del vuelo en el que desaparecen todas las conexiones mecánicas intermedias que hay entre el bastón de mando y los martinets hidráulicos de las superficies aerodinámicas. Estos sistemas se denominan de pilotaje por mando eléctrico o sistemas (FbW). La simplicidad conceptual de (FbW) es notable. Las señales eléctricas de mando se transmiten por cables, se podría decir que la tecnología (FbW) consiste, en su plano dinámico, en reemplazar los sistemas mecánicos de control por sistemas eléctricos.

El sistema (FbW) incluye la facultad adicional de realimentación, en estos sistemas donde existe una conversión mecánica a eléctrica y seguramente a digital, es necesario tener un lazo de realimentación para controlar en todo momento que lo que teóricamente se convierte, realmente este sucediendo como preveíamos. Con un sistema de realimentación también es posible corregir pequeñas desviaciones que se puedan producir por errores de tolerancias.

En este trabajo final de carrera se presenta el primer diseño de un sistema FLY by WIRE para un avión radio control, también incorpora tecnología para poder hacer el seguimiento del recorrido gracias a un sistema de telemetría. Además, se dan las directrices para iniciar la creación de prototipos mas complejos de sistemas de guiado de aviones. El objetivo será el de ofrecer a la carrera de aeronáutica un material con el que poder realizar prácticas de aviónica en aparatos de vuelo reales.

El trabajo esta dividido en 3 capítulos claramente diferenciados, en el primero se muestra el diseño del sistema (tanto la parte digital como la parte mecánica). El segundo capítulo contiene la explicación del protocolo de comunicación SPI entre los sensores/el ADC y el microprocesador y el protocolo de comunicación serie UART, que utiliza la parte de telemetría. En este mismo capítulo están explicados los distintos componentes así como los comandos que se utilizan para controlarlos. Por ultimo, en el tercer capítulo tenemos el concepto y las bases de la navegación inercial.

Con este proyecto lo que se pretende que cualquier estudiante pueda coger el prototipo y realizar experimentos de seguimiento, programando algoritmos de navegación inercial, o simplemente hacer el seguimiento de una aeronave en un vuelo real.

Capítulo 1. DISEÑO DEL SISTEMA FbW PARA RC

1.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es ofrecer una visión global del diseño del sistema basado en el (FbW) para un modelo de radio control.

Para ello, en la sección 1.1, se describen los objetivos, que se pretenden alcanzar, planteando las diferentes situaciones que se pretenden solventar con el sistema.

En la sección 1.2 se realiza una descripción del sistema completo para dar una visión global del trabajo desarrollado. Las características y objetivos generales del proyecto, descritas en el punto anterior, permiten deducir los principales requisitos del sistema de navegación en función de la aplicación a la que se destina.

En la sección 1.3 se realiza una descripción de la arquitectura general del sistema, y de las diferentes partes del mismo explicando cual es su función. También se presenta como es el montaje en el modelo.

Por último, en la sección 1.4, se presentan las placas de pruebas diseñadas, para poder programar en ellas cualquier algoritmo de navegación, así como las limitaciones de las mismas a la hora del diseño.

1.2. Objetivos específicos

El objetivo principal del proyecto es hacer una placa prototipo de experimentación, con componentes relacionados con la aviónica, el prototipo esta específicamente diseñado para introducirlo en un aeroplano de radio control pero también esta provisto de distintos conectores, entre ellos conectores para alimentación externa y salidas de testeo para poder experimentar con el en cualquier laboratorio, y así poder hacer diversas practicas sobre el, en laboratorio o en campo abierto.

Se pretende que el sistema conste de un módulo de telemetría, para obtener en tiempo real todas las medidas que capten los sensores. Estos datos serán analizados en un ordenador, ya que el sistema carece de la capacidad de cálculo necesaria para obtener los resultados que se pretenden. Esta telemetría, además de los datos registrados por los sensores, tiene que aportar datos sobre los tiempos en los cuales se obtengan las muestras, esto es para que los datos de aceleraciones o inclinaciones, estén referenciados a una base de tiempos y así el ordenador que los reciba pueda calcular parámetros como espacio recorrido, o el momento de un cambio de dirección.

También se puede enfocar a la evaluación de implementaciones de INS (Sistema de Navegación Inercial), mediante los datos recogidos por el sistema, en tiempo real o posteriormente intentar calcular con la mayor exactitud posible

el recorrido exacto realizado por el aparato. En este caso no sería necesario montarlo en el avión se podría utilizar fácilmente en un laboratorio.

Otro objetivo que se ha tenido en cuenta a la hora del diseño, es que el sistema tenía que ser capaz de dirigirse por el mismo, tenía que tener plena libertad para manipular los servomotores mediante el control directo de estos, para poder limitar las maniobras que pueda hacer el avión. Un sistema que pueda controlar en todo momento, si una maniobra, es potencialmente peligrosa para su integridad, un giro brusco que podría causar fuerzas g's excesivas. Con este motivo se pueden programar unas pautas de estabilización del aparato por si esto sucede, y el mismo, se posicionaría en una línea de vuelo estable, o en una ruta circular de vuelo para.

Este punto es interesante, ya que la inmensa mayoría de aviones comerciales cuentan con estos sistemas, minimiza la posibilidad de accidente.

1.3. Esquema general del sistema

Como se muestra en la figura 1.1, el sistema, se compone de dos partes separadas, una es la estación base situada en un sitio fijo, y la otra es una estación móvil, montada en el modelo RC, la estación base, es la que se encarga de recibir todos los datos, recogidos y enviados por la estación móvil, conectando esta a un ordenador, es posible, tanto el seguimiento del vuelo (recorrido efectuado por el avión), como mostrar cualquier medida realizada por los sensores que hay montados en el sistema.

En la estación móvil, es donde están todos los sensores. La comunicación entre estos y la estación base se realiza mediante un radio enlace, gestionado por un micro controlador conectado a un radio MODEM de largo alcance, y se encarga de enviar a la estación base todos los datos recogidos durante el vuelo, para que la estación base, con mayor capacidad de cálculo, pueda trabajar con ellos.

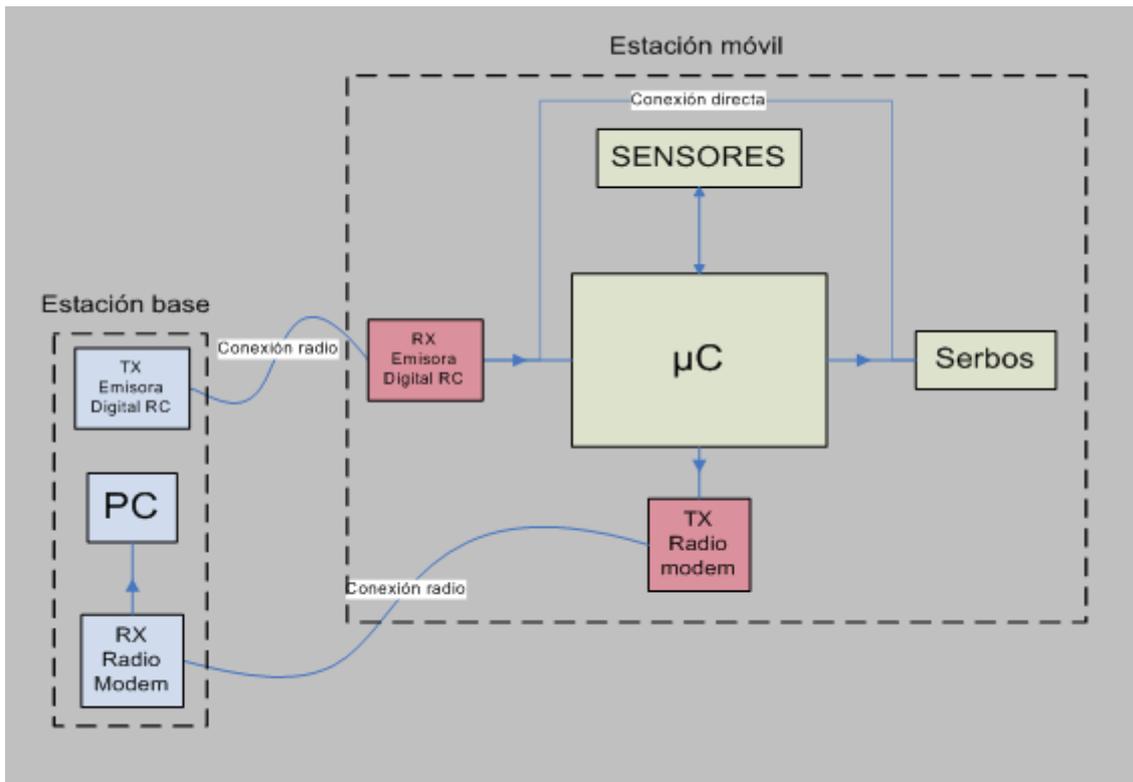


Fig.1.1.Esquema general del sistema

En la estación, tenemos como componente central, un μC (micro controlador) encargado de gestionar el flujo de datos entrada/salida I/O, que necesitan los diferentes periféricos.

En primer lugar, tenemos un sistema de comunicación mediante bus SPI (Serial Protocol Interface) para la comunicación con los acelerómetros, inclinómetros y el convertor A/D.

El μC consta también de dos entradas de tipo PIO (Port Input Output) genéricas, para conectar posibles sensores auxiliares. También incorpora puertos de entrada de pulso modulados en PWM (Pulse Wide Modulation), estos puertos, se utilizan para leer la información que se recibe de la emisora digital, que esta destinada a controlar los servomotores. El μC , también consta de puertos de salida PWM, pero estos, implementados por software y utilizando puestos PIO normales.

Por último nos queda el sistema de telemetría, que mediante un puerto USART (The Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter), el μ C se comunica con un radio módem de largo alcance para transmitir a la estación base todos los datos que se requiera.

Todos los sistemas de comunicación nombrados en este apartado, se explicarán mas en profundidad a lo largo del capítulo 2, en la parte relativa a Protocolos de comunicación.

En la figura 1.2 tenemos un esquema de los diferentes periféricos y sus sistemas de comunicación con la unidad central, el μ C.

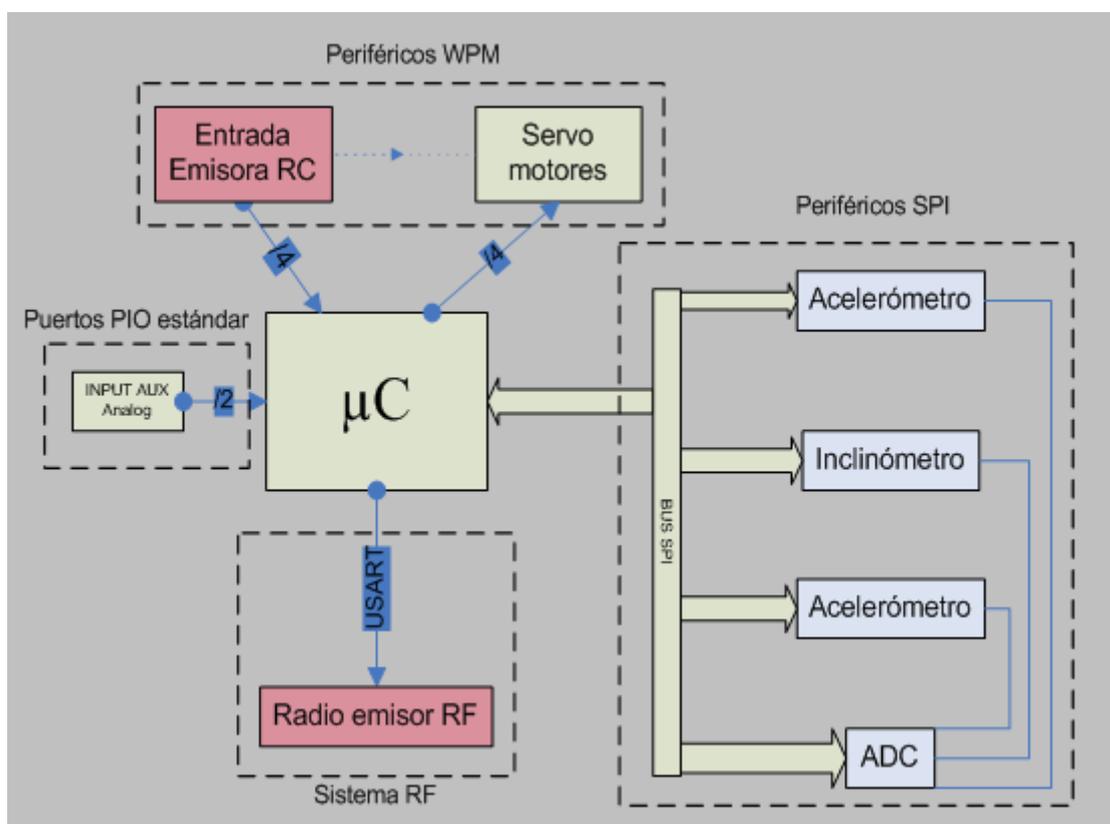


Fig.1.2.Esquema de bloques del prototipo

1.3.2. Montaje en el avión RC

Como base para incorporar la plataforma de laboratorio se ha escogido un modelo de radio control Bipe Radar de la casa Aviomodelli, un modelo de fácil manejo y muy estable con todo lo necesario para volar.

El conjunto de Radio control esta completado, por una emisora digital de 8 canales y los diferentes servomotores, también digitales (por sus mayores ventajas frente a inconvenientes con los servomotores analógicos), así como el receptor de radio, y todo lo necesario para su instalación.

Para la instalación del prototipo, se ha buscado el lugar más idóneo para no intervenir demasiado en el punto de equilibrio del modelo. Como puede verse en la figura 1.3 que la posición donde se ha decidido instalarlo debajo del depósito de carburante, ya que este es el punto de equilibrio y como el depósito varia su masa por efecto de gastar combustible añadir un poco más de peso en este punto no afecta a la estabilidad del modelo.

La antena del sistema de telemetría, se ha previsto montarla en la parte superior trasera del fuselaje, para evitar posibles interferencias con el motor o con la antena del receptor de la propia emisora RC que está situada en la parte inferior del avión.

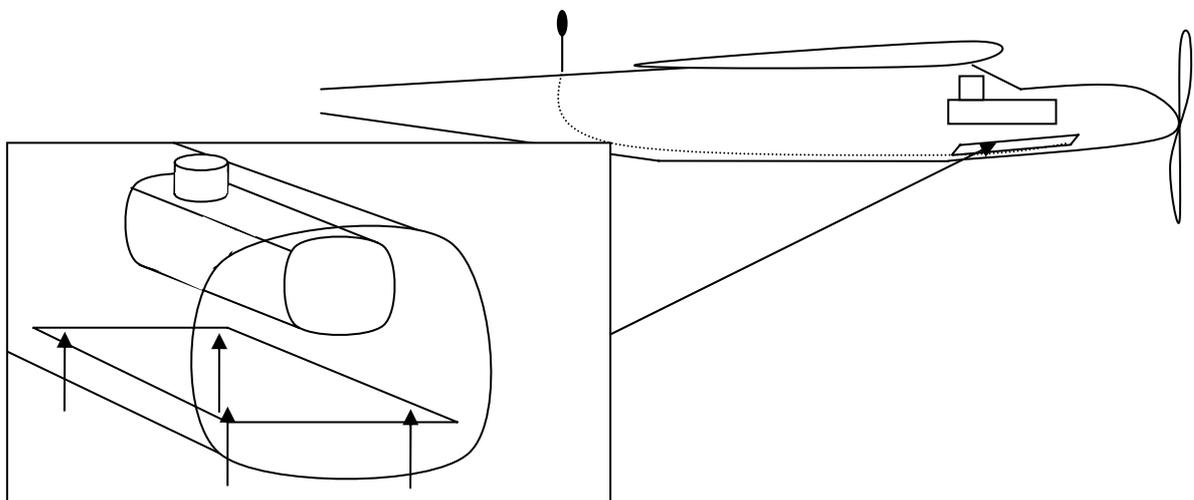


Fig.1.3. Posición del prototipo en el fuselaje del modelo RC

1.4. Placas de pruebas

1.4.1. Esquema electrónico

El esquema electrónico, mostrado en la figura 1.4, está diseñado con el software Multisim 7. Está dividido en dos partes, la parte digital donde se puede ver las conexiones entre todos los dispositivos y la parte de alimentación donde están los diferentes rectificadores para poder ofrecer las tensiones que necesitan los dispositivos.

El esquema está centrado en los dos acelerómetros (SCA 1000 y SCA 1020) y el inclinómetro (SCA 100T) de la casa VTI technologies, puesto que estos tenían unas salidas analógicas y unos pins de testeo, además del ya nombrado bus SPI, se optó por añadir un convertor A/D (AD 7927) y un conector externo para poder interactuar con estas entradas y salidas en un laboratorio, y así poder verificar el correcto funcionamiento de los sensores.

Todo el sistema está controlado por un μ C de la marca Microchip (pic 17F767), este está conectado mediante el bus SPI a los componentes dotados con la misma tecnología, los acelerómetros, el inclinómetro y el convertor A/D. Utilizando también los puertos PIO, como entradas de sensores auxiliares y como salidas moduladas en PWM para generar la señal necesaria para comunicarse con los servos, así como un puerto USART para hacer el enlace entre el último de los componentes utilizados, un módulo de radio frecuencia de largo alcance, el Xtream RF module.

También se ha incorporado un conector para programar el μ C, y así poder cargar en él, diferentes compilaciones. Sin necesidad de retirar el componente para su grabado.

Debido a que, hoy en día existe mucha polución de radio frecuencia, y que de toda la información que se transmite la que tiene mayor riesgo de distorsionarse es la de más alta frecuencia. Puesto que todo conductor actúa como una pequeña antena, cuando se expone a estos campos electromagnéticos, esta señal recibida puede mezclarse con la nuestra señal útil. En nuestro caso como tenemos un sistema digital, si la interferencia es similar a la frecuencia de trabajo de los componentes, puede variar dicho funcionamiento por completo.

Para evitar este problema, se ha montado un pequeño filtro a la entrada de cada sensor, como muestra el fabricante véase el datasheet EMCprotecton en la sección VTI del CD que incorpora este TFC.

Otro problema que nos puede surgir, es obtener falsas medidas de los acelerómetros, debidas a vibraciones que pueda producir el motor, o turbulencias durante el vuelo. Esto se arregla incorporando un filtro pasa bajos antes del convertor A/D para las salidas analógicas del sensor, y programando el mismo para el rango de frecuencias deseado en el caso de utilizar la salida digital.

Por el gran tamaño de los esquemas en la figura que se muestra a continuación veremos el esquema reducido para verlo a tamaño real véase en el anexo.

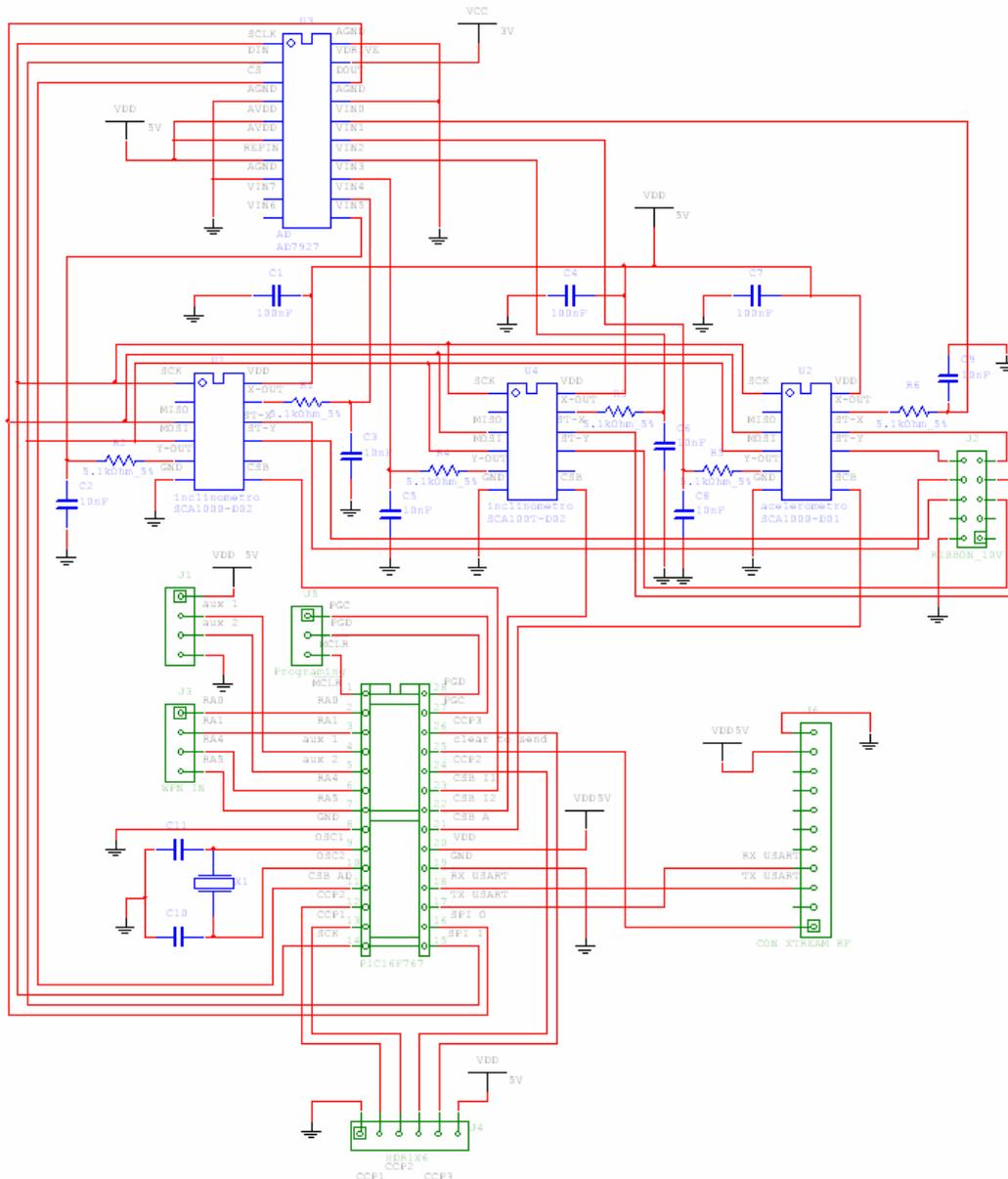


Fig.1.4.Esquema circuital de la parte digital

En la figura siguiente 1.5 vemos la distribución de alimentaciones para las distintas partes del sistema.

Se ha optado por utilizar un regulador bastante conocido, como es el LM7805 para obtener una tensión de 5 V lo mas estable posible. Se ha decidido separar la alimentación de los componentes digitales de la alimentación de los servomotores, puesto que estos últimos tienen un consumo mayor, y así evitar posibles picos de tensión en los delicados chips.

También tenemos un rectificador LM7805 montado de manera que podamos escoger su tensión de salida en función de la resistencia R2. La tensión obtenida de este rectificador, se utilizara para la entrada de referencia del conversor A/D, así como para ofrecer una alimentación extra al conector de los sensores auxiliares.

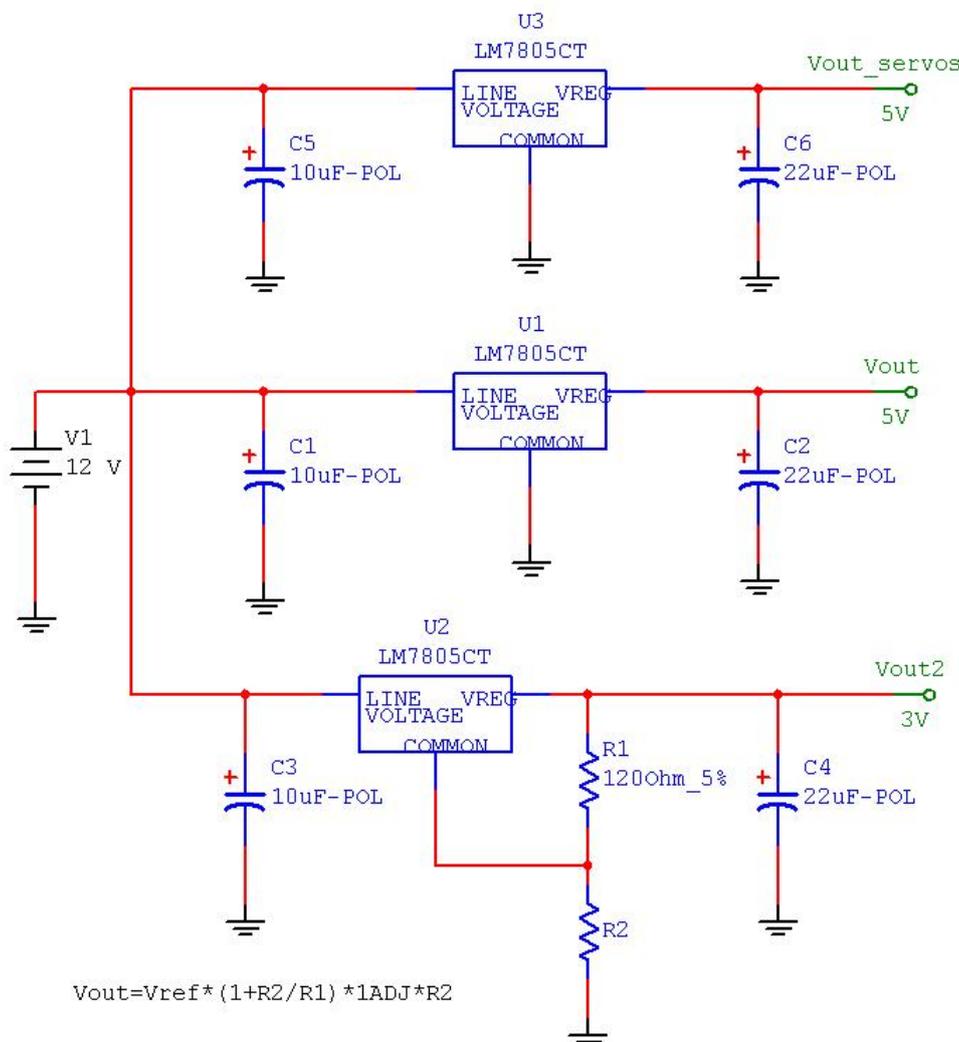


Fig.1.5.Esquema circuital de la parte de alimentación

1.4.2. Elección de los componentes del diseño

A la hora de comenzar con el diseño, los primeros componentes en los que se pensó dados los objetivos del mismo, fueron inclinómetros y acelerómetros. Entre varios modelos con distintas características se optó por un inclinómetro con un rango de medida de $\pm 90^\circ$, rango suficiente para poder detectar hasta un picado del aparato, con respecto a los acelerómetros se decidió incorporar dos de dos ejes de medición, uno que midiera los ejes X e Y y el otro los ejes Z e Y,

podemos ver que el eje Y se repite, esto nos dará una redundancia que por otro lado servirá para detectar posibles errores en las medidas.

Los acelerómetros y el inclinómetro están provistos de dos tipos de salidas, una analógica y otra digital. Para la salida analógica se necesitaba un conversor A/D para poder transmitir la información desde el modelo RC. Para ello se acabó eligiendo un conversor de bajo consumo con una entrada de 8 puertos multiplexados en tiempo, otra característica que decantó la balanza hacia este AD en concreto fue la posibilidad de programar la secuencia y el número de puertos a decodificar.

Por otro lado también se busco que todos los componentes del proyecto (acelerómetros, el inclinómetro y el conversor) contasen con un puerto de comunicaciones serie, bajo el protocolo SPI (Serial Protocol Interface), lo cual facilitaba enormemente la posterior comunicación mediante un radio enlace.

Para poder realizar la adquisición de los datos de los sensores y controlar el conversor, todos ellos con puerto de comunicaciones SPI, se optó por un microcontrolador también provisto de un puerto SPI. Este microcontrolador a su vez disponía de un puerto USART, que se utilizó para el sistema de telemetría compuesto por un radio MODEM de largo alcance y bajo consumo que también contaba con este tipo de puerto de comunicación.

Tabla 1.1. lista de componentes

cantidad	componente	valor	encapsulado	comentarios
1	Pic16F767	-	SOL28	Micro controlador
1	SCA 100T-D02	-	-	Inclinómetro
1	SCA1000-D01	-	-	Acelerómetro
1	SCA1000-D02	-	-	Acelerómetro
1	AD7927	-	TSSO6X6	Conversor A/D
1	Xtal	4MHz	HC-18	Cristal de cuarzo
3	regulador 5V	LM7805	TO-220	Montar con mica
2	C	15pF	SMD 0805	
6	C	10nF	SMD 0805	Se puede montar 1206
3	C	100nF	SMD 0805	Se puede montar 1206
3	C	10uF	CAP100RP	C de 25V o superior
3	C	22uF	CAP100RP	C de 25V o superior
6	R	5K	SMD 0805	10% tolerancia

1.4.3. PCB completo

Como en todo diseño, existen unas limitaciones. En este caso, una de las más críticas, es el espacio. Por las reducidas dimensiones de la parte de fuselaje que queda disponible. El diseño entero esta comprendido en 6,5cm por 15.2cm.

Debido a este reducido espacio y a la cantidad de componentes, era indispensable realizar el diseño de un circuito impreso de doble cara.

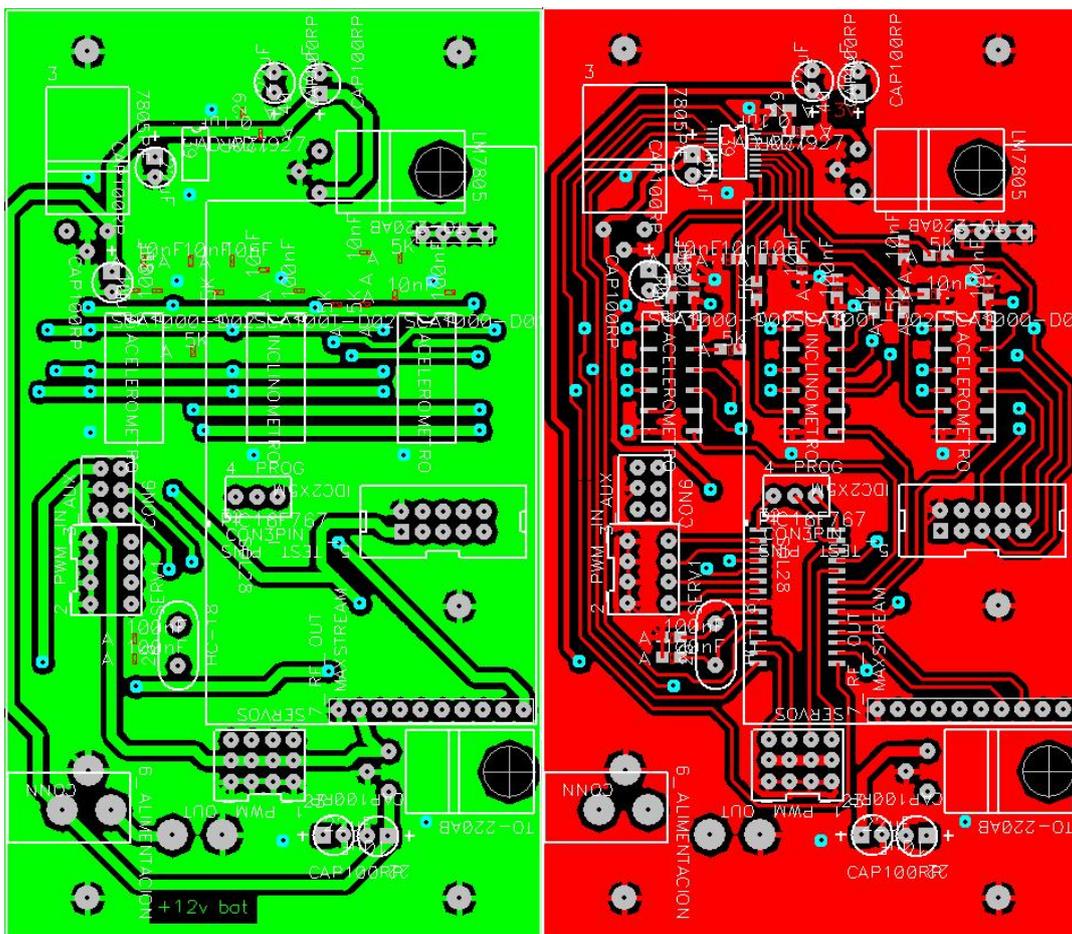


Fig.1.6.Diseño del PCB completo

conector	Nº pins / pin	Descripción	
TEST	10	1	Alimentación 5V
		2	Conexión de tierra
		3-4	NC
		5	Auto testeo para el eje X
		6	Auto testeo canal 2
		7	Auto testeo para el eje Y
		8	Auto testeo canal 1
		9	Auto testeo canal 1
		10	Auto testeo canal 2
		Xstream	11
2	Se utiliza para entrar en modo dormido NC		
3	Salida de datos del radio módem		
4	Entrada de datos del radio módem		
5	Recuest to send activado por comandos binarios NC		
6	Reiniciar la transmisión del radio módem NC		
7	Led indicador de recepción NC		
8	Indica que esta encendido NC		
9	Método de backup para la introducción comandos NC		
10	Alimentación 5V		
11	Conexión a tierra		
12-15	Usados para estabilidad mecánica NC		

El diseño de la placa se ha realizado con el software de diseño de circuitos impresos avanzado P-cad 2002, basado en auto cad (famoso programa por su potencia de calculo). Las dimensiones de la placa estan minimizadas para poder montarla dentro del fuselaje del avión. Podemos ver el la figura 1.7 la distribución de componentes en las diferentes caras de la placa, para así facilitar la conexión de los distintos conectores.

Capítulo 2. COMPONENTES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

2.1. Introducción

El objetivo de este capítulo, es explicar los componentes, explicando las características que han hecho que sean escogidos para formar parte del sistema. Y el protocolo de comunicación que utilizan.

Como componentes básicos con los que contamos son el procesador, una serie de sensores de inclinación y aceleración, un conversor A/D y un módulo de comunicación vía radio.

Los dos protocolos que se han utilizado son:

El SPI (Serial Protocol Interface) un protocolo de comunicaciones serie que puede comunicar un maestro con más de un periférico esclavo, mediante un bus de comunicaciones compartido por todos los dispositivos.

AUSART (The Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) también conocido como SCI (Serial Communications Interface). La USART se puede configurar como un sistema asíncrono full-duplex para poder comunicarse con otro periférico.

2.2. Procesador (PIC)

Para la elección del procesador central del sistema, se estuvo pensando en un μ C complejo de 32 bits, por su mayor capacidad de cálculo y su gran número de entradas y salidas. Pero al final escogimos el PIC16F767 por que es mucho más sencillo de conectar a una placa de circuito impreso que el μ C complejo, y puede ser programado con la misma facilidad que se programa en el lenguaje C++, ya que existen, en el mercado compiladores en C++ y además el departamento de arquitectura de computadores lo posee.

Pero el motivo de mas peso por lo que se ha escogido este microcontrolador, es que consta de un sistema de bajo consumo que en nuestro caso es muy importante, puesto que el prototipo estará montado en un avión radio control y alimentado por unas baterías y este, debe tener la mayor autonomía posible.

2.2.1. Diagrama de bloques del procesador

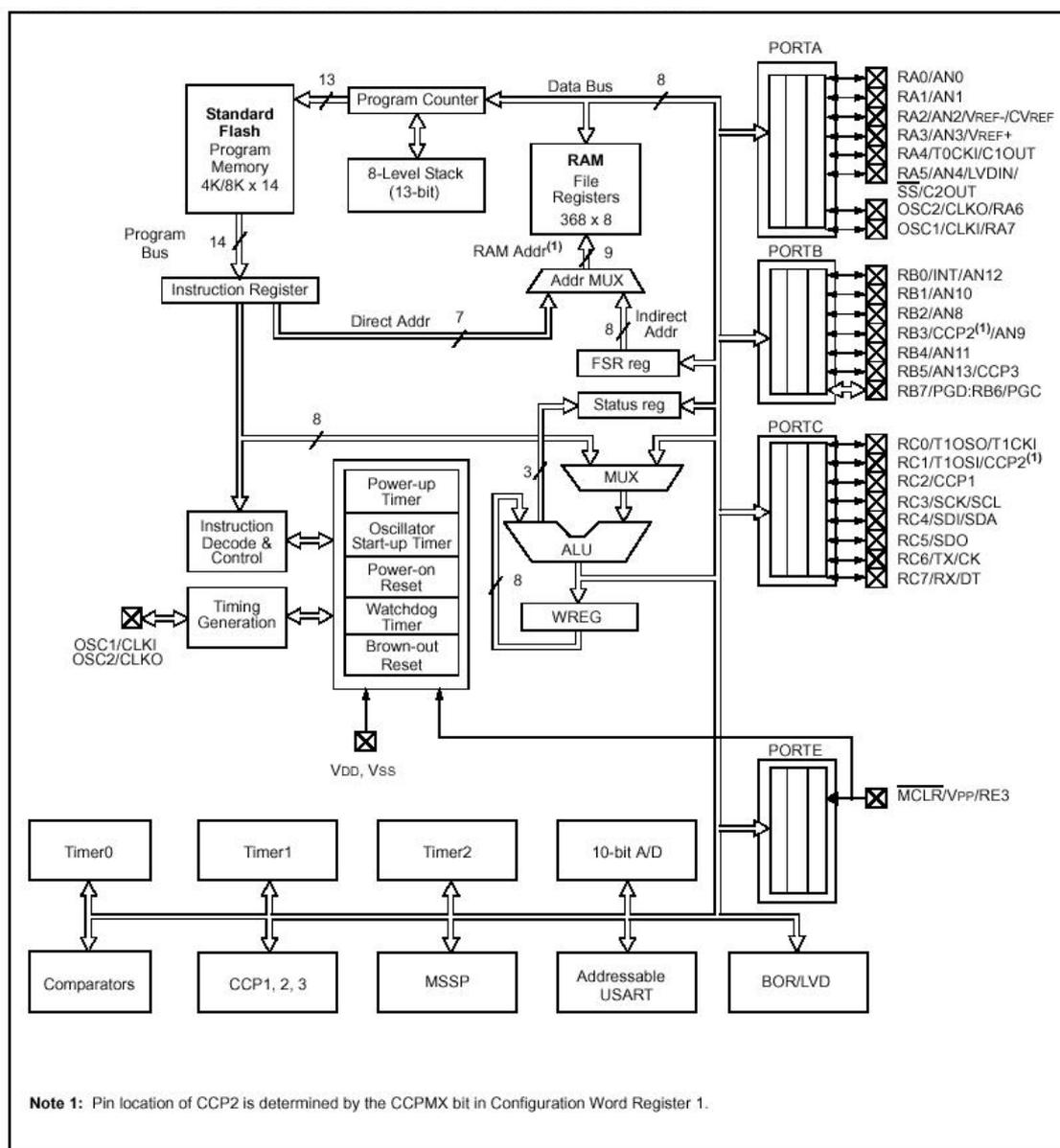


Fig.2.1.Diagrama de bloques del PIC16F737 y PIC16F767

La nueva familia de PIC16F está provista de redundancia en relojes y con la peculiaridad de poder apagarse realmente, los nuevos PIC16F737/747/767/777 tienen 3 modos de tecnología de nanopotencias integradas para ofrecer un control total de la energía consumida por el sistema. Estos componentes cuentan con 3 puertos PWM para 3 motores de control por fase.

Este microcontrolador tiene palabras de 4K y 8K de la memoria flash estándar

de programa. El PIC16F7x7 también permite llegar hasta los 5 MIPS funcionando a 20MHz, 368 bytes de RAM y un puerto serie síncrono master. También incluye osciladores multifrecuencia hasta 8 MHz y interficies serie una USART, un SPI y un I2C.

2.2.2. Funciones generales

Ahora procederemos en explicar los periféricos que utilizamos en el prototipo.

2.2.2.1. MASTER SYNCHRONOUS SERIAL PORT (MSSP)

El módulo puerto de sincronización serie (The Master Synchronous Serial Port (MSSP) es una interficie serie, utilizada para comunicaciones entre otros dispositivos periféricos y micro controladores. Este periférico puede ser una EEPROM serie. El módulo MSSP puede operar en dos modos:

- Serial Peripheral Interface (SPI™)
 - Modo de maestro
 - Modo de esclavo
- Inter-Integrated Circuit (I2C™)
 - Modo de maestro
 - Modo de esclavo (con direccionamiento de llamada general)

El modo SPI permite transmitir y recibir simultáneamente, datos sincronizadamente de 8 bits. Soporta los cuatro modos de SPI, para establecer una comunicación.

Los tres pins que normalmente se utilizan son:

- Serial Data Out (SDO) – RC5/SDO
- Serial Data In (SDI) – RC4/SDI/SDA
- Serial Clock (SCK) – RC3/SCK/SCL

Un pin adicional, se utiliza en el modo de esclavo:

- Slave Select (SS) – RA5/AN4/LVDIN/SS/C2OUT

2.2.2.2. CAPTURE/COMPARE/PWM MODULES

Cada módulo Capture/Compare/PWM (CCP) contiene un registro de 16-bit con el que puede operar como:

- Registro de captura de 16-bits
- Comparador de registro de 16-bits
- Registro PWM Master/Slave Duty Cycle

Tabla 2.1. Modos CCP – Timers requeridos

CCP Mode	Timer Resource
Capture	Timer1
Compare	Timer1
PWM	Timer2

Tabla 2.2. Interacción de dos módulos CCP

CCPx Mode	CCPy Mode	Interaction
Capture	Capture	Same TMR1 time base
Capture	Compare	Same TMR1 time base
Compare	Compare	Same TMR1 time base
PWM	PWM	El PWMs tendrá la misma frecuencia y ratios (interrupción TMR2). Se alinea con el flanco de bajada
PWM	Capture	None
PWM	Compare	None

2.2.2.3. ADDRESSABLE UNIVERSAL SYNCHRONOUS ASYNCHRONOUS RECEIVER TRANSMITTER (AUSART)

The Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (AUSART) (direccionable transmisor receptor síncrono asíncrono universal) es uno de los dos módulos de entrada salida serie. (AUSART también conocido como Serial Communications Interface or SCI.) El AUSART se puede configurar como un sistema asíncrono full-duplex que puede comunicarse con dispositivos periféricos, como por ejemplo terminales CRT y ordenadores personales, o configurado como un sistema síncrono half-fuplex que pueda comunicarse con dispositivos periféricos como circuitos integrados A/D o D/A, serial EEPROMs, etc.

El AUSART se puede configurar como prosigue:

- Asynchronous (full-duplex)
- Synchronous – Master (half-duplex)
- Synchronous – Slave (half-duplex)

2.2.2.4. ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

El conversor Analógico-a-Digital (A/D) cuenta con 11 entradas para el PIC16F737 y PIC16F767. Este conversor A/D permite conversiones de una entrada analógica al correspondiente número digital de 10-bits. Otra ventaja del

convertor A/D es que incorpora un tiempo de adquisición programable. Esta característica permite al usuario seleccionar un nuevo canal para la conversión y activar el GO/DONE bit inmediatamente. Cuando el GO/DONE bit está activado, se muestrea el canal activado por el tiempo de adquisición programado previamente y se empieza con la conversión.

Los módulos tienen cinco registros:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)
- A/D Control Register 2 (ADCON2)

El registro ADCON0, controla el funcionamiento del módulo A/D y la fuente de reloj. El registro ADCON1, configura las funciones de los pines de los puertos, la justificación y la tensión de las fuentes de referencias. El ADCON2, configura el tiempo de adquisición programable.

Se puede encontrar información adicional en el *"PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual"* (DS33023) and in Application Note AN546 *"Using the Analog-to-Digital (A/D) Converter"* (DS00546).

2.2.2.5. Crystal Oscillator/Ceramic Resonators

En los modos XT, LP o HS, se conecta un resonador de cristal o cerámico a los pines OSC1/CLKI y OSC2/CLKO para establecer una oscilación (ver Tabla 2.3). El oscilador del PIC16F7X7 necesita un cristal de corte paralelo. El uso de un cristal de corte serie puede dar una frecuencia diferente de las que el fabricante asegura.

Tabla 2.3. selección de condensadores para el oscilador de cristal

Osc Type	Cristal Freq	Valores típicos de condensadores Testeado:	
		C1	C2
LP	32 kHz	33 pF	33 pF
	200 kHz	15 pF	15 pF
XT	200kHz	56 pF	56 pF
	1 MHz	15 pF	15 pF
	4 MHz	15 pF	15 pF
HS	4 MHz	15 pF	15 pF
	8 MHz	15 pF	15 pF
	20 MHz	15 pF	15 pF

*(solo para guiado de diseño)

2.2.2.6. Puertos de entrada/salida

Algunos pins de estos puertos están multiplexados con otras funciones para los diferentes periféricos del componente. En general, cuando un periférico está activado, la opción de puerto de entrada salida no se usa para este propósito.

2.3. Sensores

En este apartado además de nombrar los componentes utilizados en el prototipo explicaremos también cómo se comunican estos entre sí mediante el sistema SPI de comunicaciones serie, y los diferentes comandos que se utilizan para facilitar esta comunicación.

2.3.1. Acelerómetros e Inclinómetros

Para los cálculos inerciales, que en definitiva es la base del proyecto que tenemos entre manos, los componentes estrella para poder calcular la posición y velocidad en cualquier punto de un plano tomando como referencia el punto inicial del desplazamiento, son sin duda acelerómetros e inclinómetros.

En este caso hemos escogido el SCA100T-D02 como inclinómetro con un rango de $\pm 90^\circ$ y los SCA1000-D01 y SCA1020-D02 como acelerómetros con dirección de medida "X" e "Y" y "Z" e "Y" respectivamente dependiendo del plano en el que se monte el componente.

Veamos estas figuras, para comprender la función exacta que realizan estos sensores en el proyecto, en la figura 2.3 podemos ver el recorrido de 180° que podemos medir con el inclinómetro SCA100T-D02.

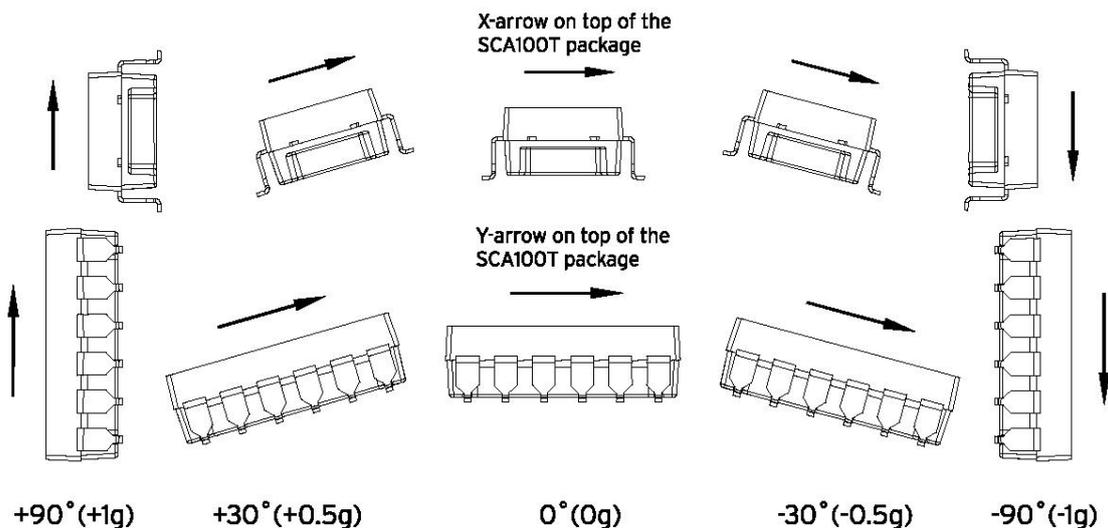


Fig.2.2.Medición de la inclinación del SCA100T-D02

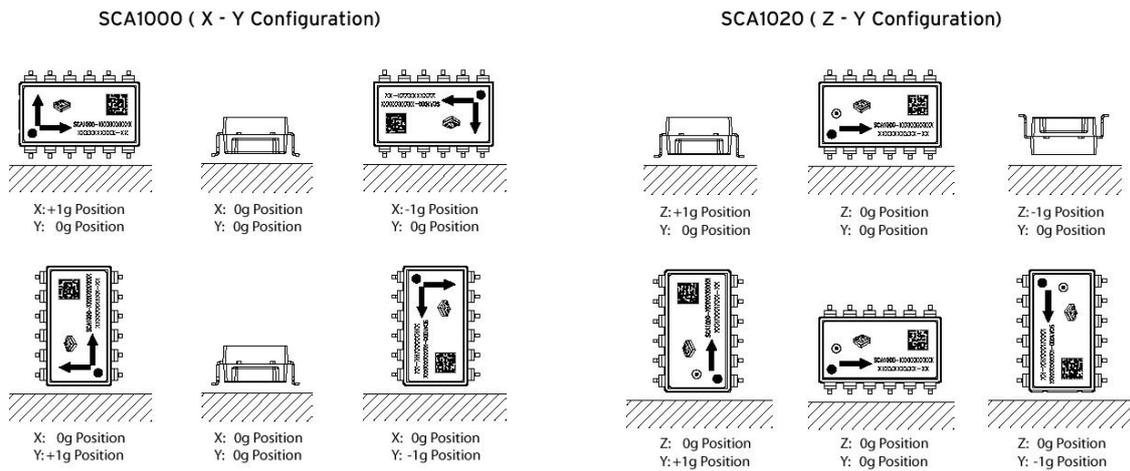


Fig.2.3. Direcciones de medida de las aceleraciones

Las flechas dibujadas en el encapsulado de los chips anteriores muestran la dirección positiva de aceleración que puede medir cada chip, en el proyecto se utiliza un acelerómetro en X-Y (SCA1000D01) y otro en Z-Y (SCA1020D02), cabe destacar que en el caso de este último que solo tiene una flecha la dirección positiva del eje Z es hacia arriba montando el chip plano en una placa.

Con el inclinómetro podemos tener un indicador del ladeado y del picado del avión RC y controlando los servos que actúan sobre estas superficies podemos mantener el avión volando estable en línea recta. Por otro lado, midiendo las diferentes aceleraciones que tenga el avión y haciendo una suma vectorial de las tres aceleraciones para después integrar el valor resultante a lo largo del tiempo podemos calcular la velocidad en los puntos de medida. Y por ultimo con este resultado si volvemos a integrar respecto del tiempo, obtenemos el espacio recorrido.

Tenemos que tener cuidado de calcular también las coordenadas de la suma vectorial para poder tener también la dirección en la que se ha producido el movimiento. Hay que destacar que los datos calculados, por falta de espacio de memoria en los registros del microprocesador se tienen que enviar directamente por el sistema de telemetría.

2.3.1.2. Datagramas de los acelerómetros e inclinómetro

Ahora pasaremos a explicar los diagramas de tiempo para la comunicación entre estos dispositivos (esclavos) y el microprocesador (el master). (para mas información en el anexo podemos encontrar los datasheets completos)

Timing Diagrams (diagramas de tiempos)

Como se puede ver en la figura 2.4 cada transmisión empieza con un flanco de bajada del CSB y termina con un flanco de subida. Durante la transmisión, el SCK y CSB controlan la transmisión de comandos y datos de acuerdo con las reglas siguientes:

Los comandos y los datos se intercalan; MSB primero y LSB después como se ve en la figura 2.5.

Cada paquete de bits de datos/estado de salida se intercalan en la salida en los flancos de bajada del SCK (en el bus MISO).

Cada BIT se muestrea en el flanco de subida del SCK (en el bus MOSI).

Después de seleccionar el dispositivo con el flanco de bajada del CSB, se recibe un comando de 8-bits. El comando define las operaciones a realizar.

El flanco de subida del CSB termina todas las transmisiones y resetea el contador interno y el registro de comandos.

Si se recibe un comando invalido, vuelcan datos al chip y el MISO permanece en estado de alta impedancia hasta el flanco de bajada del CSB. Esto reinicializa la comunicación serie.

Para realizar otros comandos de los de la tabla 2.5 debe cargarse correctamente el contenido del registro cerrado. Si se carga tal orden sin poner el contenido de registro cerrado correcto, ninguno de los datos se cambiara en el chip y los restos de MISO en estado alto de impedancia hasta el flanco decreciente de CSB.

La transmisión de datos al MOSI continua inmediatamente después de recibir el comando en todos los casos donde se escribirán los datos en los registros internos ASIC's.

La transferencia de datos desde la MISO empieza con el flanco de bajada del SCK inmediatamente después de que se haya leído en el flanco de subida del SCK el ultimo bit del comando SPI.

La velocidad de transferencia de datos máxima excede 1MHz del ratio de reloj

Los comandos de SPI pueden ser comandos individuales o combinación de comandos y datos. En el caso de datos y comandos combinados, la entrada de datos mantendrá ininterrumpidamente el comando SPI y la salida de datos será procesada en paralelo con la entrada de datos.

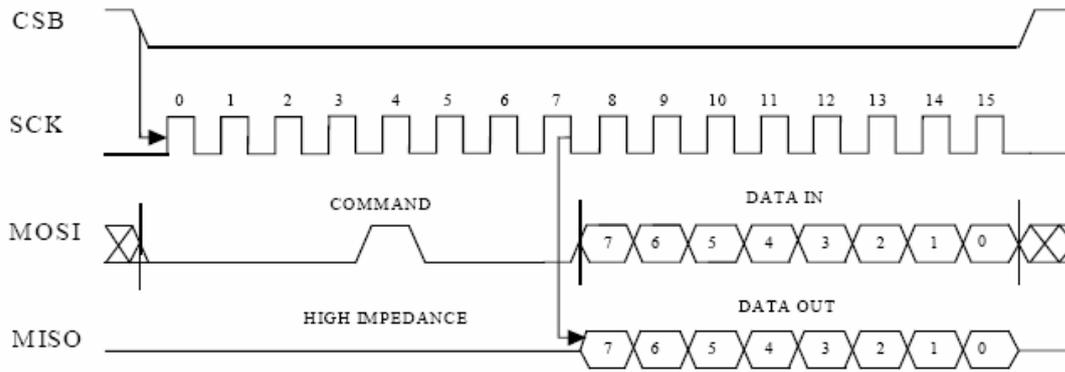


Fig.2.4. Transmisión de datos sobre SPI

Después de encenderlo, el circuito arranca en modo de medida. Este es el modo normal de operación que se usa en las aplicaciones más habituales.

Tabla 2.4. DIGITAL INTERFACE SPECIFICATION

Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Units
Digital output load	@ 500 kHz			1	nF
SPI clock frequency ⁽¹⁾				500	kHz
Internal AD conversión			150		µs
Data transfer time	@ 500 kHz		38		µs

Note1. La frecuencia mínima del SPI depende de la frecuencia de reloj del microcontrolador master.

2.3.1.3. Comandos SPI

La interfície SPI utiliza un registro de instrucciones o comandos de 8 bits. La lista de comandos esta presente en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Comandos SPI.

Command	Command format	Description:
MEAS	00000000	Measure mode (normal operationmode alter power on)
RWTR	00001000	Read and write temperatura data register
STX	00001110	Activate Self test for X-channel
STY	00001111	Activate Self test for Y-channel
RDAX	00010000	Read X-channel acceleration trough SPI
RDAY	00010001	Read Y-channel acceleration trough SPI

*Los comandos en cursiva se utilizan solamente en los SCA100T de dos ejes.

Measure mode (MEAS) es el modo de operación estándar después de encender el dispositivo. Durante una operación normal, el comando MEAS es el comando de salida desde el modo self test.

Read temperature data register (RWTR) lee el registro de temperatura durante una operación normal sin afectar dicha operación. Los datos del registro de temperatura se cargan cada 150 μ s. La operación de carga se desactiva siempre que la señal CSB este baja, por eso CSB debe estar en nivel alto como mínimo 150 μ s antes que el comando RWTR para garantizar unos datos correctos. En la figura 3 podemos ver la transferencia de datos, en la cual se transfieren los datos pero primero el MSB. Que los datos se escriban en el registro de temperatura durante el comando RWTR no importa en el funcionamiento normal pero se recomienda escribir todo ceros después.

Self test for X-channel (STX) activa la función de auto testeo para el canal X (canal 1). Se activa una bomba de carga interna y se aplica una tensión alta al elemento electrodo del sensor de aceleración del canal X. Esto ejerce una fuerza electroestática que desvía el rayo del sensor y simula una aceleración positiva. El auto testeo del canal X se desactiva mediante el comando MEAS.

Self test for Y-channel (STY) activa la función de auto testeo para el canal Y (canal 2). Se activa una bomba de carga interna y se aplica una tensión alta al elemento electrodo del sensor de aceleración del canal Y. Esto ejerce una fuerza electroestática que desvía el rayo del sensor y simula la aceleración positiva. El auto testeo del canal Y se desactiva mediante el comando MEAS. Nótese que este comando solo es valido para los SCA100T de 2 ejes.

Read X-channel acceleration (RDAX) accede al señal de aceleración guardada en registro X de datos de aceleración del canal X del conversor AD (canal 1). Durante una operación normal, los datos del registro de aceleración X se carga cada 150 μ s. la operación de carga se desactiva siempre que la señal de CSB es baja, e ahí que el CSB debe estar en nivel alto al menos 150 μ s previo a la orden de RDAX para garantizar que los datos sean correctos. La salida de datos es una palabra digital de 11 bits que es alimentada hacia fuera MSB primero y LSB último. (Mirar Figuras 3 y 4).

Read Y-channel acceleration (RDAY) accede al señal de aceleración guardada en registro Y de datos de aceleración del canal Y del conversor AD (canal 2). Durante una operación normal, los datos del registro de aceleración X se carga cada 150 μ s. la operación de carga se desactiva siempre que la señal de CSB es baja, e ahí que el CSB debe estar en nivel alto al menos 150 μ s previo a la orden de RDAX para garantizar que los datos sean correctos. La salida de datos es una palabra digital de 11 bits que es alimentada hacia fuera MSB primero y LSB último. Nótese que este comando solo es valido para los SCA100T de 2 ejes.

Además de realizar lecturas de los sensores, mediante el bus SPI se pueden realizar con las salidas analógicas que poseen estos componentes, para que estas señales no se distorsionen por interferencias externas o por el mismo

ruido ambiente, es necesario montar un filtro pasa-bajos como se muestra en la figura 2.6.

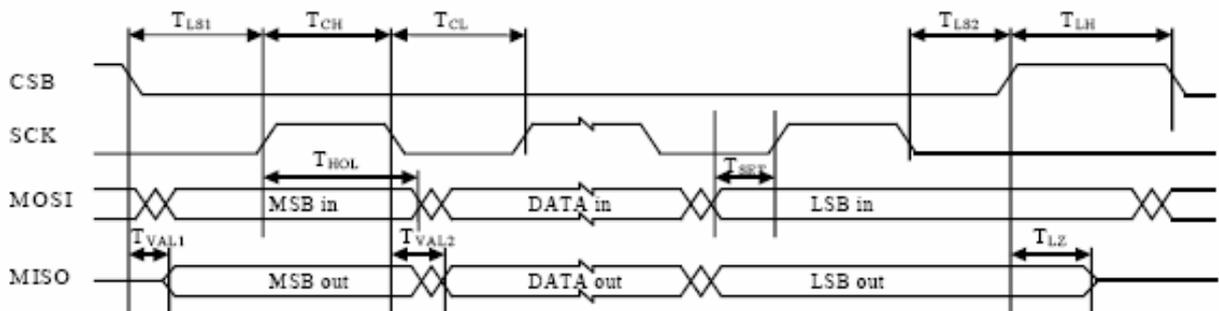


Fig.2.5.Diagrama de tiempos del bus SPI

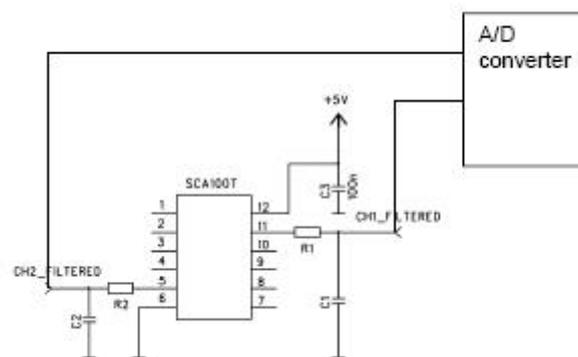


Fig.2.6.esquema del filtro de las salidas analógicas del inclinómetro

2.4. Conversor analógico digital (AD)

Era necesario incorporar una conversor analógico digital en la placa prototipo, ya que muchos de los sensores que existen actualmente ofrecen una salida analógica y hay que digitalizarla para poder operar más fácilmente con ella y poder después, una vez obtenido el resultado deseado, transmitirla a la estación base.

De toda la cantidad de modelos de conversores analógico-digitales escogimos el AD7927 de Analog devices un ADC con 8 canales de 200kSPS y 12-Bits con secuenciador en un encapsulado TSSOP de 20 pins.

2.4.1. Características

Rápido ratio de salida: 200 kSPS

Específico para AVDD entre 2.7 V y 5.25 V

Bajo consumo:

3.6 mW Max at 200 kSPS con 3 V de alimentación

7.5 mW Max at 200 kSPS con 5 V de alimentación

8 (Single-Ended) entradas secuenciales

Gran ancho de banda de entrada:

70 dB Min SINAD a 50 kHz de Frecuencia de entrada

Alimentación y velocidad de reloj Flexible

No tiene retrasos Pipeline

Interficie SPI™/QSPI™/ serie de alta velocidad

Compatible con MICROWIRE™/DSP

Modo de apagado: 0.5 μ A Max

20-patas en encapsulado TSSOP

2.4.2. Descripción general

El AD7927 es un ADC de 12 bits, de alta velocidad y bajo consumo con 8 canales. El dispositivo opera con una única alimentación de entre 2.7V a 5.25V y puede trabajar con velocidades de hasta 200 kSPS. El dispositivo está provisto por un filtro de bajo ruido y un amplificador de Track-and-hold que puede trabajar con frecuencias de entrada de hasta 8MHz.

Los procesos de conversión y adquisición de datos se controla usando el CS (chip select) y el serial Clock signal (señal de reloj serie) haciendo mucho más fácil la interficie entre el conversor y el microprocesador o DSP. La señal de entrada se muestrea en los flancos de bajada del CS y la conversión por lo tanto iniciada en este punto. Por esto no hay retrasos de pipeline asociados a este dispositivo.

El AD7927 utiliza técnicas de diseño avanzadas para alcanzar un muy bajo consumo al mayor ratio de salida. En los ratios más elevados, el AD7927 consume 1.2mA con 3V y no más de 1.5mA con una alimentación de 5V.

Por la configuración del Registro de Control, la entrada analógica para el dispositivo puede ser seleccionada como 0 V a la RefIN o 0 V a $2 \times$ RefIN, con salida codificada en binario directo o en binario complemento a 2. El AD7927 destaca por tener ocho entradas single-ended analógicas con un secuenciador de canal para permitir una selección preprogramada de canales convertida secuencialmente.

El tiempo de conversión del AD7927 se determina por la frecuencia del SCLK, como este siempre se utiliza como reloj maestro para controlar la conversión. El tiempo de conversión puede ser de 800 ns con un reloj de 20MHz

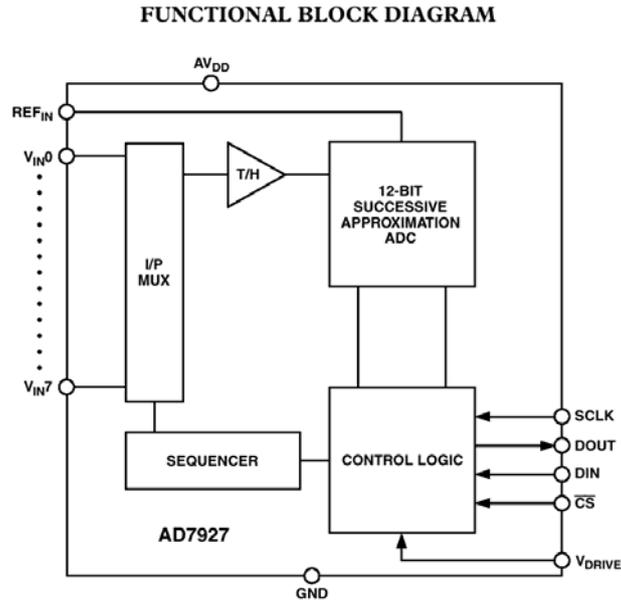


Fig.2.7.Diagrama de bloques funcional del AD7927

2.4.3. Datagramas de tiempos del AD7927

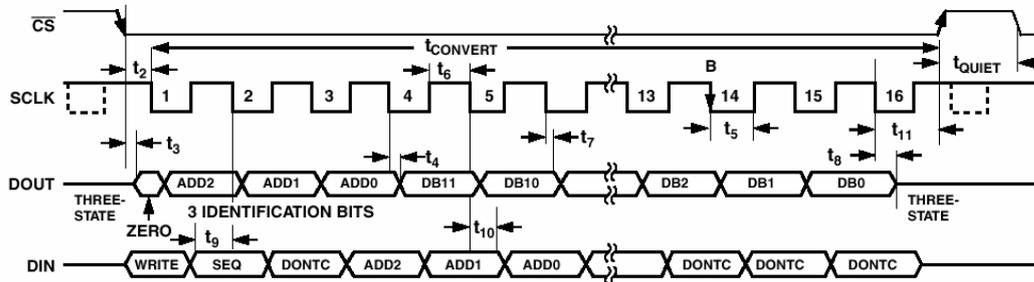


Fig.2.8.Diagrama de tiempos de la interfície serie

En la figura 2.8 se muestra el detalle del diagrama de tiempos para la interfície serie del AD7927. el reloj serie proporciona el reloj de conversión y también controla la transferencia de la información desde y hacia el AD7927 durante cada comunicación.

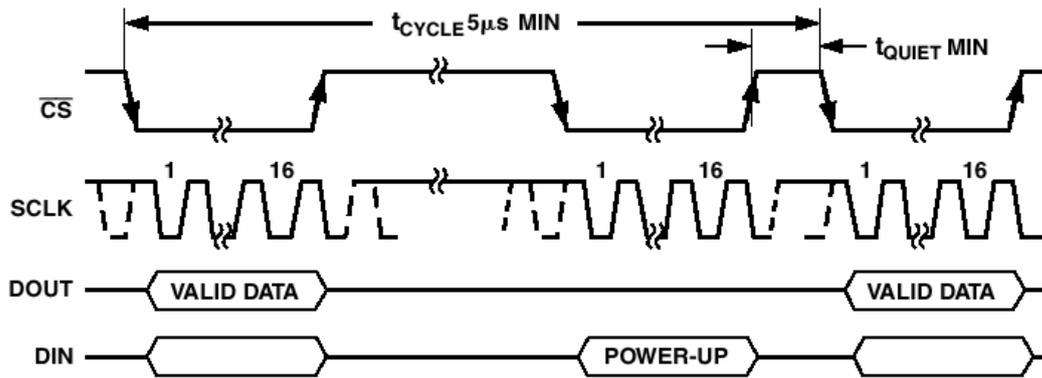


Fig.2.9. Diagrama de tiempos general

2.4.4. Aspectos a destacar del producto

1. Alto rendimiento con un consumo bajo.

El AD7927 ofrece hasta 200 kSPS ratio de salida. Con el ratio de salida máximo y con una alimentación de 3V, el AD7927 disipa una potencia máxima de 3.6mW.

2. Ocho entradas Single-Ended con un secuenciador de canal.

Una secuencia consecutiva de canales, con la cual el ADC puede convertirlos cíclicamente o configurar las entradas previamente, para después convertirlos.

3. Operación de una sola fuente de alimentación con función VDRIVE.

El AD7927 se alimenta con una señal de alimentación de entre 2.7 V a 5.25 V. La función VDRIVE permite conectar directamente la interficie serie con otro sistema independiente con una alimentación de 3V o 5V.

4. Flexible Power/Serial Clock Speed Management.

El ratio de conversión se determina mediante la señal de reloj, permitiendo reducir el tiempo de conversión gracias a incrementar la velocidad del reloj serie. El dispositivo cuenta con varios modos de apagado automático para maximizar la eficiencia energética en ratios de salida bajos. La corriente que consume en el estado de standby completo es de 0.5mA.

5. No tiene retardo en pipeline.

El dispositivo destaca por una aproximación sucesiva estándar ADC con control exacto del instante de muestreo mediante una entrada de CS, como se observa en la figura 2.9.

2.5. Receptor y servos

Los servomotores y el receptor utilizados son los típicos que se pueden encontrar en cualquier sistema de radio control de un avión teledirigido. Hay que destacar que los servos elegidos son de tipo digital por sus significativas mejoras, respecto de los analógicos. En este apartado, veremos su funcionamiento interno para poder decodificar la información que se transmite y poder modificarla para reutilizarla posteriormente una vez adecuada.

2.5.1. El servomotor

Los servos son un tipo especial de motor de c.c. que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata, en cualquier posición dentro de su intervalo de operación. Para ello, el servomotor espera un tren de pulsos que se corresponde con el movimiento a realizar. Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por ruedas dentadas y un circuito de realimentación, todo en una misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de 180° aproximadamente.

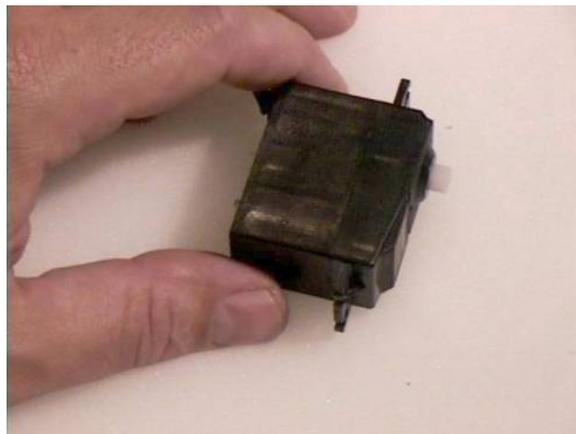


Fig.2.10.servomotor

Se dice, que el servo es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado, ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que exista una señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar elementos de control como palancas, pequeños ascensores y timones. También se usan en radio-control, marionetas y, por supuesto, en robots. Los Servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños. Un motor como el de las imágenes superiores, posee internamente una circuitería de control y es sumamente potente para su tamaño. Un servo normal o estándar, como el HS-300 de Hitec, proporciona un

par de 3 kg-cm a 4.8 V, lo cual es bastante para su tamaño, sin consumir mucha energía. La corriente que requiere depende del tamaño del servo. Normalmente el fabricante indica cual es la corriente que consume. Eso no significa mucho si todos los servos van a estar moviéndose todo el tiempo. La corriente depende principalmente del par, y puede exceder un amperio si el servo está enclavado.

2.5.2. Composición del servomotor

En la siguiente figura 2.11 se muestra la composición interna de un servomotor. Se puede observar el motor, la circuitería de control, un juego de piñones, y la caja. También se pueden ver los 3 cables de conexión externa:

Uno (rojo) es para alimentación, Vcc (~ +5volts);

Otro (negro) para conexión a tierra (GND);

El último (blanco o amarillo) es la línea de control por la que se le envía la señal codificada para comunicar el ángulo en el que se debe posicionar.

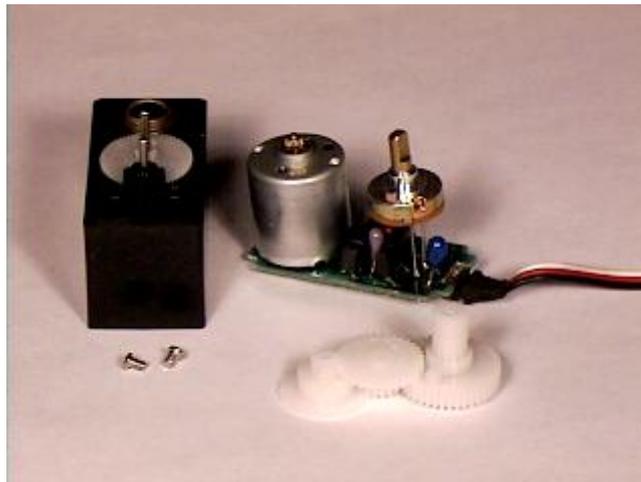


Fig.2.11.servomotor desmontado

2.5.3. Funcionamiento del servomotor control PWM

La modulación por anchura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*), es uno de los sistemas más empleados para el control de servos. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período (normalmente), con el objetivo de modificar la posición del servo según se desee.

Para la generación de una onda PWM en un microcontrolador, lo más habitual es usar un *timer* y un comparador (interrupciones asociadas), de modo que el microcontrolador quede libre para realizar otras tareas, y la generación de la señal sea automática y más efectiva. El mecanismo consiste en programar el *timer* con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción de *overflow* del *timer*, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produzca la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo. En la actualidad, muchos microcontroladores, como el 68HC08, disponen de hardware específico para realizar esta tarea, eso sí, consumiendo los recursos antes mencionados (*timer* y comparador).



Fig.2.12.PWM para recorrer todo el rango de operación del servo

El sistema de control de un servo, se limita a indicar en que posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos, tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que dejarían al motor en ambos extremos (0° y 180°). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180°. Si se sobrepasan los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

El período entre pulso y pulso (tiempo de OFF) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso. Se suelen emplear valores ~ 20 ms (entre 10 ms y 30 ms). Si el intervalo entre pulso y pulso es inferior al mínimo, puede interferir con la temporización interna del servo, causando un zumbido y la vibración del eje de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a un estado dormido entre pulsos. Esto provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá

fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.

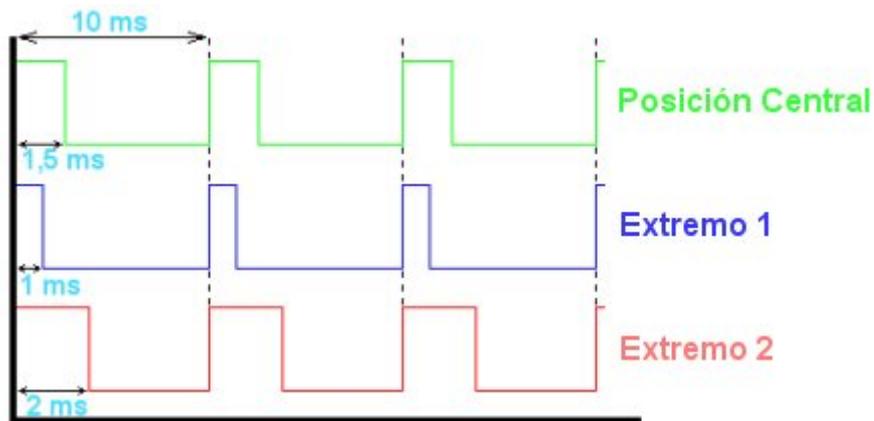


Fig.2.13.Tren de pulsos para control del servo

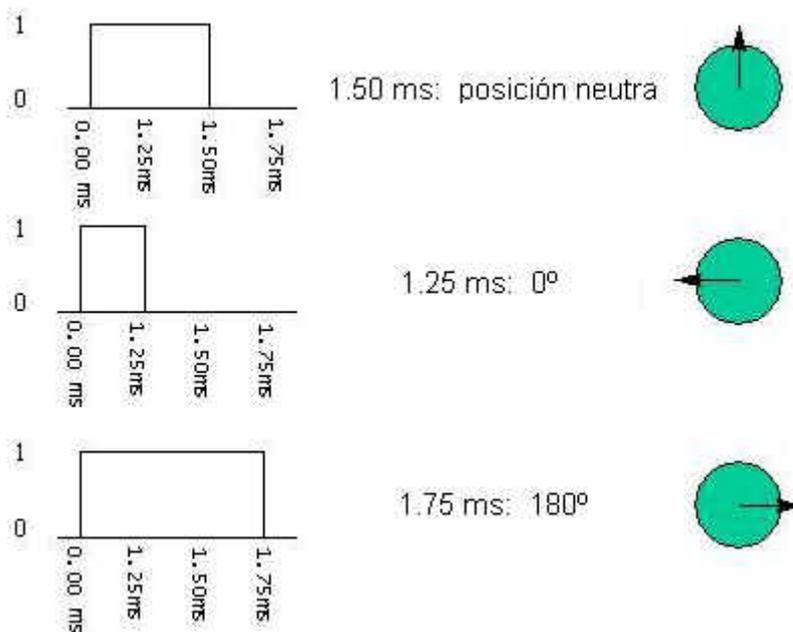


Fig.2.14.Otra posibilidad de pulsos de control

2.5.4. Principio de funcionamiento de un servo digital

En primer lugar, al llevar integrado un microprocesador, es capaz mediante la aplicación de parámetros de funcionamiento, de variar la forma en la que se envía potencia al servomotor, esto significa que modifica el ancho de los pulsos y por tanto el ciclo de trabajo en función de unos parámetros de funcionamiento internos (ya no solo en función de la señal enviada por el receptor) de forma que optimice el rendimiento del servomotor, también es posible modificar el funcionamiento de nuestro servo en función de nuestras necesidades, por

ejemplo, invertir el sentido de giro, la velocidad de desplazamiento, ancho de pulso neutro, etc, etc.

En segundo lugar, es capaz de aumentar la frecuencia de trabajo. Si con un servo estándar teníamos 50 ciclos por segundo, ahora podremos tener hasta 300 ciclos por segundo, con lo cual la duración del periodo baja hasta los $1/300 = 3,33$ ms. Lógicamente, al disminuir el periodo proporcionalmente, también disminuirá el ancho de pulso manejable, pero el ciclo de trabajo permanecerá constante, con lo cual conseguimos enviar pulsos mucho más estrechos pero con más frecuencia.

Debido a las características constructivas y de funcionamiento de cualquier motor eléctrico, se da la circunstancia de que es precisamente esta situación en la que se obtiene un mayor rendimiento del mismo, ya que con frecuencias muy altas, no se descarga la bobina equivalente creada por el inducido del motor, y los picos de corriente son menores, es por tanto más efectivo. En general, en un motor, el rendimiento es proporcional a la frecuencia de trabajo. Con este aumento de potencia, no solo se consigue aumentar la velocidad de respuesta ante una variación del comando de posicionamiento, si no que la variación del aumento o disminución de la potencia suministrada al aumentar la frecuencia, proporciona una disminución de la banda muerta, una aceleración / deceleración mucho más rápida y suave, mayor resolución en el posicionamiento y un mayor par. Dicho aumento de par se ve reflejado tanto en funcionamiento estático como dinámico, es decir, cuando el servo está detenido en una posición, la fuerza que hay que ejercer sobre el brazo del mismo para conseguir que gire, es muy superior a la de un servo estándar, asimismo, el par de giro suministrado, cuando está realizando un desplazamiento es tres veces superior al de un servo estándar.

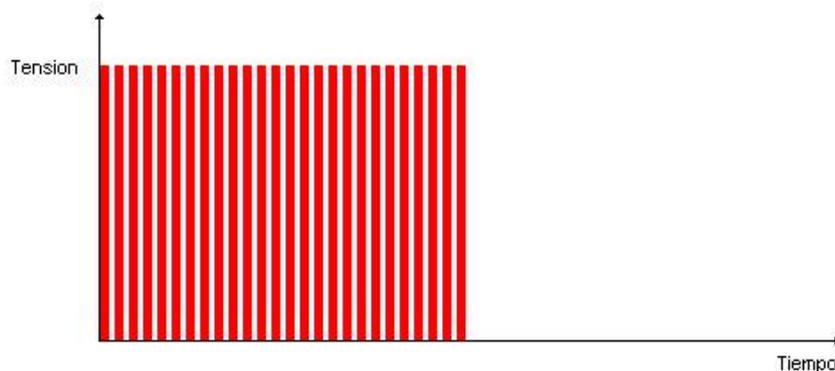


Fig.2.15.Ciclo de trabajo del 50% en un servo digital a 300 Hz

2.5.5. Inconvenientes de los servos digitales

Hasta ahora, no hemos hablado más que de ventajas en los servos digitales, por tanto, ha llegado la hora de hablar de sus inconvenientes. El principal inconveniente que presentan, es el consumo de potencia al mantener un ciclo de trabajo idéntico al de un servo estándar, pero al aumentar la frecuencia, lógicamente también aumenta el consumo, dicho aumento de consumo sería,

aproximadamente un 60% superior a un servo estándar de “similares” prestaciones. Es por ello que dependiendo del número de servos que vayamos a instalar y las características de consumo de los mismos, tendremos que tener cuidado de vigilar la carga de nuestras baterías, o incluso sustituirlas por otras de mayor capacidad, de modo que nos aseguremos, que nunca nos vayamos a quedar sin baterías.

Otro inconveniente añadido que se nos plantea a la hora de montar un servo digital, es que, debido a la gran potencia consumida y a que generalmente demandan tensiones de alimentación superiores, no deberemos usar el sistema “BEC”. De insistir en usarlo podemos llegar a quemar la electrónica del receptor, o estar expuestos a fallos de recepción debidos a la caída de tensión en el receptor. Para esquivar este problema debemos conectar el cable de alimentación directamente a la batería, puenteando por tanto el sistema de alimentación desde el receptor (este punto, depende de las características eléctricas del servo por una parte y del receptor por otra).

2.6. SPI (Serial Protocol Interface)

El sistema SPI como ya indica su nombre, es un sistema de comunicación serie entre periféricos, es un sistema de bajo coste y baja velocidad para comunicaciones de corta distancia, como por ejemplo, entre pequeños procesadores y sus periféricos.

Es un sistema full duplex, muy fácil de implementar entre dos hosts. Si este sistema se utiliza para más de dos hosts, empieza a perder sus ventajas pero el sistema de bus, basado en el protocolo I²C, funciona mejor. Sin embargo, SPI es capaz de ofrecer ratios mucho mayores, pudiendo llegar a las decenas de megahercios.

2.6.1. Interficie del sistema SPI

El sistema esta formado por un componente maestro y uno o más componentes esclavos. El maestro, se define normalmente como un microcomputador provisto de un reloj SPI (SPI clock), y los esclavos, como cualquier circuito integrado, reciben el reloj SPI del maestro. El ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) en los productos de la tecnología VTI siempre opera, como componentes esclavos en modo de operación maestro-esclavo.

SPI, es una interficie serie síncrona de 4 hilos, la comunicación de datos se activa mediante una señal baja, aplicada en la entrada Slave Select (SS) o en el Chip Select (CSB). Los datos, se transmiten mediante 3 conexiones: conexión para la entrada de datos serie (MOSI), la de salida de datos (MISO) y la señal de reloj (SCK).

2.6.2. Especificaciones del sistema SPI

En el sistema SPI, existe un Master (sistema encargado de la comunicación) y uno o mas esclavos como podemos ver en estos diagramas.

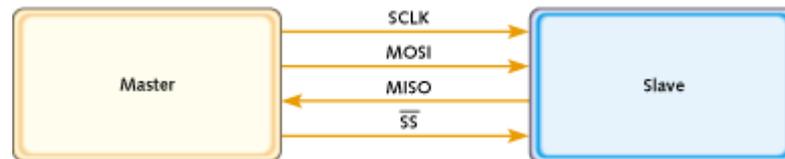


Fig.2.16.Caso de Master con un esclavo

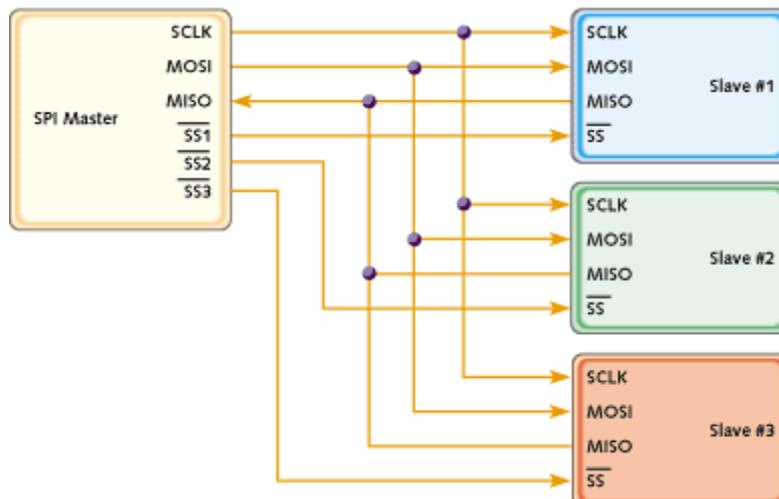


Fig.2.17.Caso de Master con más de un esclavos

Tabla 2.6. Señales del sistema SPI

Signal Name	Description
SCLK	Clock
MOSI	Master out - Slave in
MISO	Master in - Slave out
SS	Slave select

2.6.3. Comunicación entre periféricos

El master, genera una señal de reloj y la envía a los esclavos. La línea de selección, slave line, se utiliza para indicar con que esclavo se esta intentando comunicar el Master.

Como se puede ver, todas las señales excepto la de selección de esclavo son comunes a todos los esclavos, por eso, el master debe indicar cual de los esclavos esta activo durante la comunicación.

Podemos imaginar, que con más de uno o dos esclavos, el número de salidas del master y el número de pistas en la placa, serian demasiadas para justificar el uso de este protocolo.

SPI usa un par de parámetros llamados clock polarity (CPOL) y clock phase (CPHA), para determinar, cuando los datos son validos dependiendo del señal de reloj. Estos deben establecerse, tanto en el dispositivo maestro como en los esclavos, para que la comunicación funcione correctamente. Mediante estos dos parámetros, determinamos cual es el momento idóneo de muestreo.

Podemos ver un ejemplo de los 4 modos distintos que podemos tener.

Tabla 2.7. Modos de transmisión sobre SPI

CPOL/CPHA	Leading Edge	Trailing Edge	SPI Mode
0/0	Sample, rising	Setup, falling	0
0/1	Setup, rising	Sample, falling	1
1/0	Sample, falling	Setup, rising	2
1/1	Setup, falling	Sample, rising	3

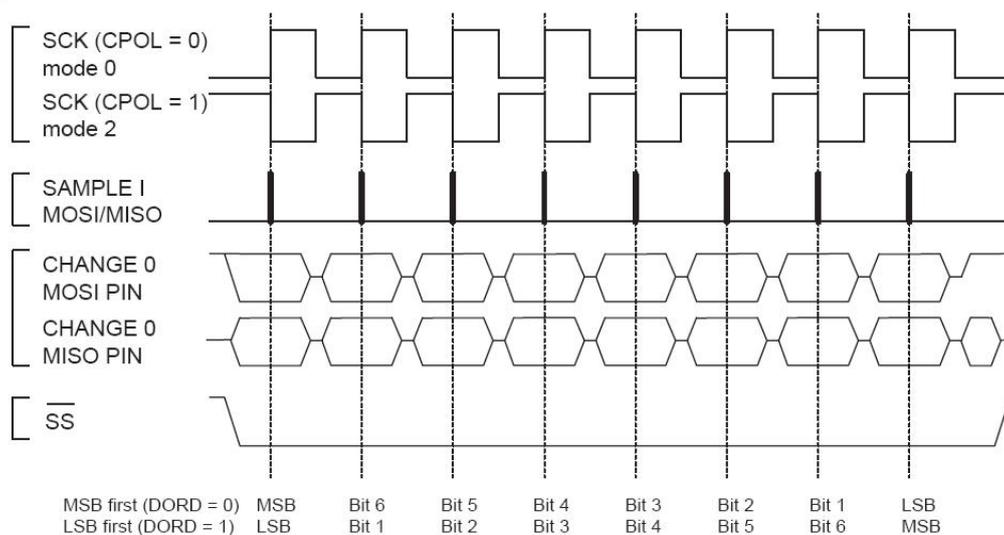


Fig.2.18. SPI Transfer Format with CPHA = 0

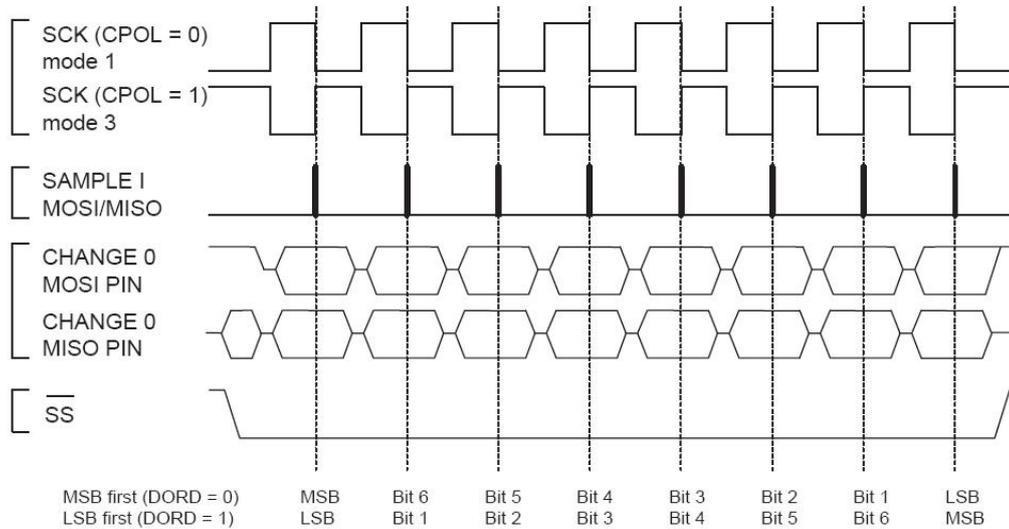


Fig.2.19.SPI Transfer Format with CPHA = 1

En este ejemplo (figuras 2.18 y 2.19), se puede observar que tanto el MSB como el LSB se pueden transmitir en primer lugar, dependiendo de como está configurado el hardware SPI.

La comunicación entre el master y los esclavos funciona como procede:

1. El Master pone en nivel bajo la línea slave select del esclavo con el que quiere interactuar. Esto indica al esclavo, que debe prepararse para iniciar la comunicación.
2. El master, genera la señal de clock de acuerdo con el modo SPI. Tanto el master como el esclavo transmiten un bit por ciclo de reloj.
3. Después de un byte, el Master pone la línea slave select en nivel alto.

Aquí, esta descrito todo sobre el protocolo SPI. No hay más conocimiento o estándar de comunicaciones avanzado, que se pueda implementar por encima de esta capa. Lo que ha sido descrito aquí, es todo lo que el protocolo SPI proporciona. No hay ninguna conformidad de conexión, o reconocimiento o cualquier norma de comunicación avanzada asociada con ello. Así aquellos tendrían que ser puestos en práctica sobre esta capa de ser necesario. SPI es un fabuloso y pequeño protocolo, para aquellas situaciones que requieran una simple comunicación entre dos hosts.

2.7. Sistema de telemetría para recepción de datos

Para realizar la telemetría de todos los datos que se generen durante el vuelo del avión de radio control se realizara mediante un radio enlace con el Xstream OEM RF module.



Fig.2.20.Xstream OEM RF module

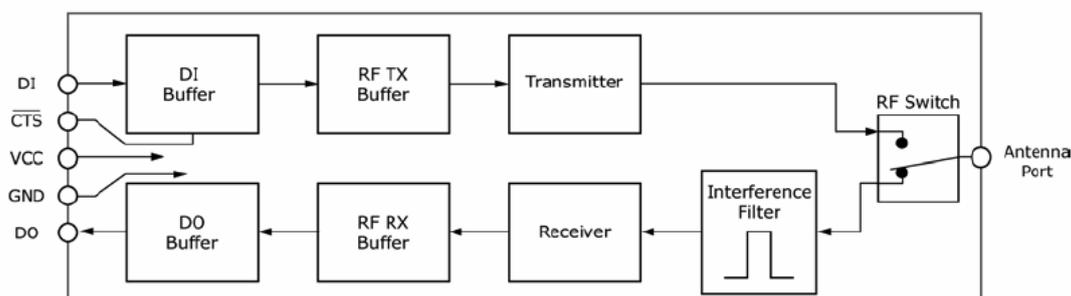


Fig.2.21.Diagrama de bloques interno del Xstream OEM RF module

Este módulo, es una emisora de Radio Frecuencia de largo alcance.

2.7.2. Comunicación serie

El XStream OEM RF Module se comunica con un host a través de un puerto serie asíncrono CMOS. Como es un puerto serie, el XStream Module puede comunicarse directamente con cualquier interficie UART o dispositivo RS-232/485/422. [las especificaciones de tiempos estas ilustradas en la figura 2.25]

2.7.3. UART-Interfaced Data Flow (flujo de datos en la interficie)

Los dispositivos que poseen una interficie UART se pueden conectar directamente a través de los contactos del Módulo XStream OEM RF Como se muestra en la figura 2.23.

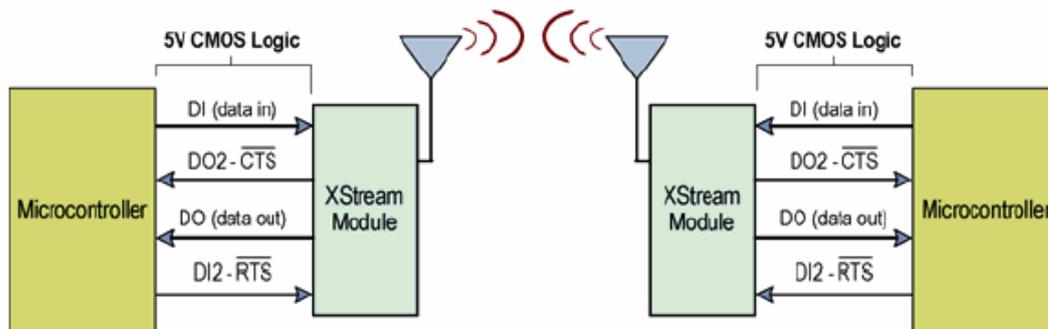


Fig.2.22.Flujo de datos en una interficie UART
(Enlace wireless entre hosts)

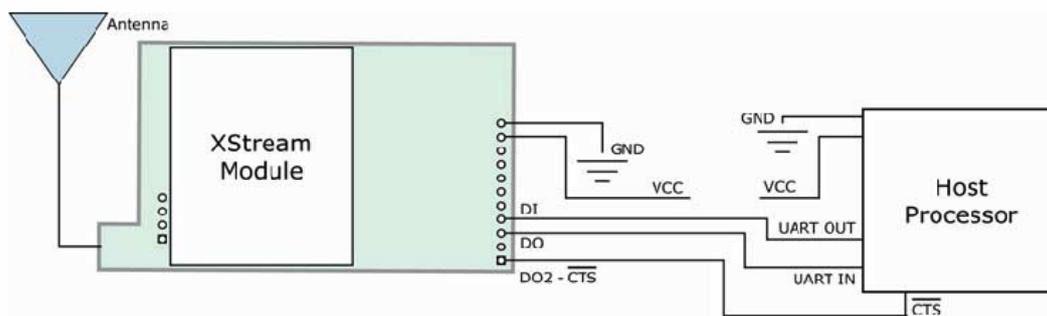


Fig.2.23.Aplicación del circuito, conexión con un host

Las señales del módulo están disponibles a través del conector de 11 pins. Todos los pins operan en niveles de VCC CMOS. Normalmente se usan cinco señales en el MaxStream module:

- DI: pin 4 – Data In (entrada de datos)
- DO: pin 3 – Data Out (salida de datos)
- VCC: pin 10 – Power (alimentación)
- GND: pin 11 – Ground (masa)
- DO2- : pin 1 – Data Output 2 - Clear-to-Send (salida de datos 2 “borrar para enviar”)

Los 6 pins que quedan se utilizan para funciones adicionales. Para mas detalles de cada pin ir al manual “XStream Advanced Programming & Configuration”, que se puede encontrar en los anexos.

El diagrama siguiente muestra Módulos XStream Modules ofreciendo un link Wireless entre hosts.

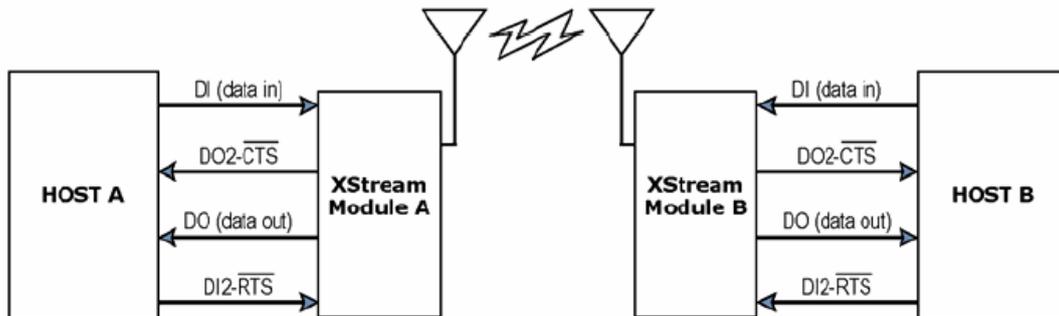


Fig.2.24.System Block Diagram – Wireless Link between hosts

La secuencia del flujo de datos RF se inicia cuando se recibe el primer byte de los datos en el buffer DI del modulo de transmisión XStream. Mientras el Módulo XStream no recibe datos de RF, los datos almacenados en el Buffer DI se empaquetan para luego ser transmitidos al Módulo XSTREAM B.

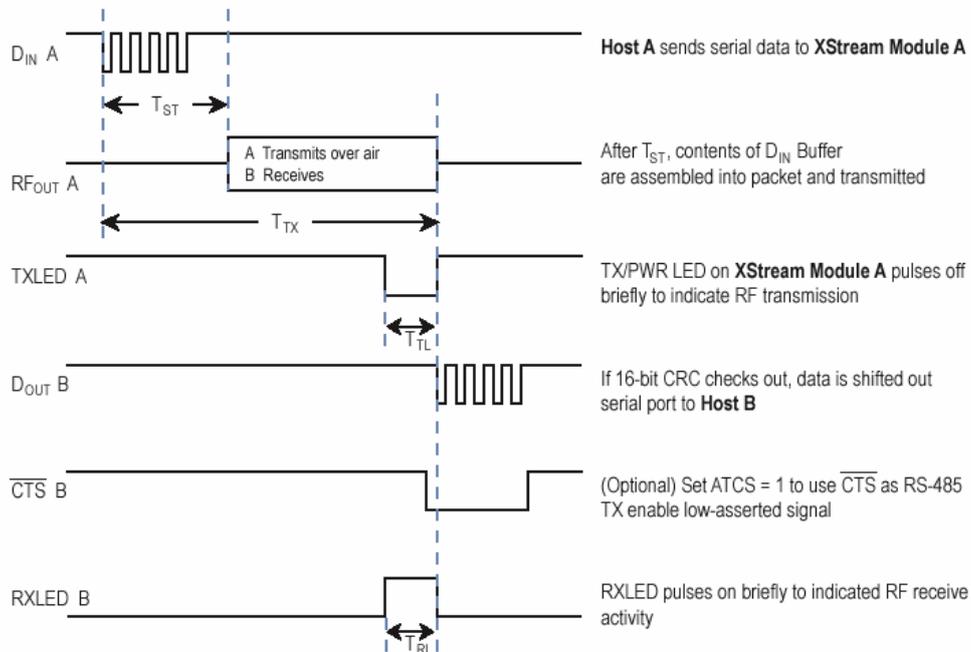


Fig.2.25.Especificaciones tiempos (“A” y “B” asociados a la figura anterior)

En nuestro caso se ha diseñado para que este modulo solo trabaje en un sentido, desde la estación móvil a la estación base y de forma continuada. Esto significa que el host A en nuestro caso, el que esta montado en el avión, estará en todo momento enviando tramas de datos. Y el host B, la estación base, estará en todo momento en modo de recepción.

ADDITIONAL FEATURES	APPLICATIONS
<ul style="list-style-type: none"> • Plug-and-communicate (no configuration required) • Transparent operation supports existing software & systems • Simple configuration using software & standard AT commands • Retries & acknowledgements for guaranteed packet delivery • RS-232/422/485 protocol & multi-drop bus support • Peer-to-peer, point-to-point & point-to-multipoint networks • Up to 65,000 network addresses available • Allows up to 7 Frequency Hopping Spread Spectrum independent pairs (networks) to operate in close proximity • Low power modes for current consumption as low as 1 mA • Host interface baud rates from 1200 bps to 57600 bps • XON / XOFF or hardware flow control • Signal strength reporting for link quality monitoring & debugging • Support for multiple data formats (7/8 bits, Even/Odd/No Parity) 	<p data-bbox="874 573 1015 629">Monitoring of remote systems</p>  <p data-bbox="874 689 1054 745">Production reporting of active systems</p>  <p data-bbox="874 813 1050 869">Home automation & building control</p>  <p data-bbox="874 931 1043 987">Supervisory control & data acquisition</p> 
<p data-bbox="252 981 339 1010">Options</p> <ul style="list-style-type: none"> • 900 MHz or 2.4 GHz license-free ISM bands • 9600 bps or 19200 bps over-the-air data rates • Integrated wire antenna or antenna connector (RPSMA or MMCX) • Commercial (0° to +70° C) or industrial (-40° to +85° C) grades 	<p data-bbox="874 1055 1059 1111">Vehicle management & asset tracking</p> 

Fig.2.26.características del modulo de RF presentadas por el fabricante

Capítulo 3. NAVEGACIÓN INERCIAL

3.1. Concepto de navegación inercial

La navegación inercial, basada en el guiado inercial, es un sistema incorporado, completamente independiente de la información visual o electrónica desde el exterior del avión en el cual opera. Consta de un tipo de acelerómetro, estabilizado por giróscopos que registran la magnitud de aceleración de un avión en dirección norte-sur y este-oeste a la vez desde un punto inicial conocido; las aceleraciones se convierten en una posición precisa del avión mediante el cálculo electrónico.

3.2. Sistema de Navegación inercial (INS)

Es un sistema autónomo de navegación y entrega a los pilotos datos de posición, velocidad, rumbo, desviación lateral y ángulo de deriva.

Digamos que básicamente consta de tres acelerómetros, que se encargan de medir cada uno de ellos las aceleraciones que sufre la nave en cada uno de los 3 ejes, para luego obtener la aceleración total y luego por múltiples integraciones la velocidad y el espacio recorrido.

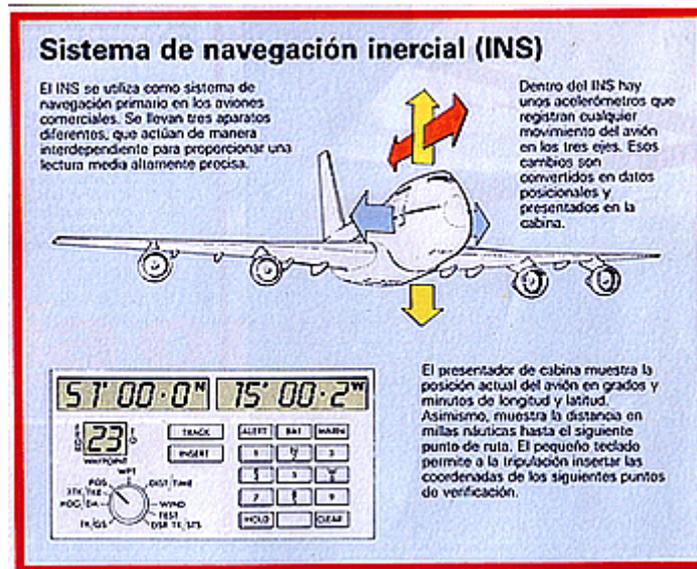


Fig.3.1.Sistema INS (navegación inercial)

Como es obvio el sistema también utiliza microprocesadores y además de las aceleraciones recoge varios datos más, lo que redundará en mayor precisión y funcionalidad del sistema.

3.3. Limitación de maniobras

Una de las aplicaciones mas importantes en los sistemas Fly by Wire, es corregir los movimientos bruscos que el piloto ejerce sobre la palanca de control, o recuperar el control del aparato cuando este, entra en una caída en picado, o realiza un giro demasiado brusco y el piloto pierde el control. Estos sistemas tienen preprogramadas secuencias de actuación sobre las superficies aerodinámicas para estabilizar el avión lo antes posible.

Estos sistemas, incluso pueden tomar el control absoluto del aparato, si por ejemplo, la palanca de control realiza maniobras imposibles, también reduce la brusquedad en los movimientos que el piloto hace con la palanca, para que el avión no sufra movimientos bruscos, y a la vez sea mas estable.

Estos sistemas están actuando durante todo el vuelo, continuamente están rectificando las ordenes que le llegan desde la palanca de mando, suavizando la orden que se envía a los motores hidráulicos que actúan sobre los alerones del avión.

Capítulo 4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

4.1. Conclusiones

Se ha diseñado la primera versión de una futura herramienta de estudio y experimentación para los estudiantes de la carrera de aeronáutica, puesto que se ha diseñado una herramienta abierta, los estudiantes podrán realizar varios experimentos con ella.

Se podrá estudiar el comportamiento de un avión frente a variaciones de ángulo de sus alerones, se podrá realizar el seguimiento de su ruta, así como implementar y probar algoritmos de estabilización.

Es obvio que con este proyecto, se ha abierto una línea de investigación para la carrera de aeronáutica, y ofrecerá un gran número de proyectos derivados directamente de este, así como nuevas prácticas para la carrera.

4.2. Líneas futuras

Como ya se dijo en la introducción, este pretende ser el primer prototipo de un proyecto mayor, en el futuro y con un avión RC con más capacidad y con más superficie de ala para poder levantar un peso mayor, se acoplarán giróscopos con mejor precisión a la hora de precisar la orientación en el espacio, un procesador con mayor capacidad de cálculo, para aumentar las posibilidades que ofrezca en vuelo, y poder incorporar algoritmos más complejos capaces de controlar un mayor número de variables y poder llegar a implementar un piloto automático.

Por otro lado, se puede utilizar el prototipo introduciéndolo en el interior de una superficie aerodinámica y dentro de un túnel de viento medir la inclinación que sufre dicha superficie.

Incluso se podría llegar a utilizar sin muchas variaciones en otras carreras como automoción, midiendo deceleraciones bruscas, puesto que los sensores miden un número grande de g's.

Como se puede ver, este prototipo tiene un gran abanico de posibles implementaciones.