

Sistema de Intercomunicación entre Piccolo II y Motores HKS

Ing. Javier Alejandro Escudero
jaescudero@iua.edu.ar

Instituto Universitario Aeronáutico, Especialidad de Sistemas Embebidos
Av. Fuerza Aérea 6500 (5010), Córdoba, Córdoba, Argentina

Abstract. En este trabajo se analiza la problemática al momento de interconectar un piloto automático y un motor de combustión interna. Se propone el desarrollo de un Sistema Embebido que permita solucionar en forma efectiva dicha problemática, realizando previamente una secuencia de pasos para configurar el hardware.

I. Introducción.

En estos tiempos, contamos con un crecimiento abrumador en el desarrollo de dispositivos auto controlados, en especial en el campo de la Aeronáutica, con el desarrollo de UAV (Unidad Autónoma de Vuelo). [A1]

El fin de estos desarrollos es obrar en el campo de la seguridad, en relevamiento de terrenos, conservación o mantenimiento en el tendido de líneas de media y alta tensión, en agricultura de precisión; por citar algunos casos. [A2]

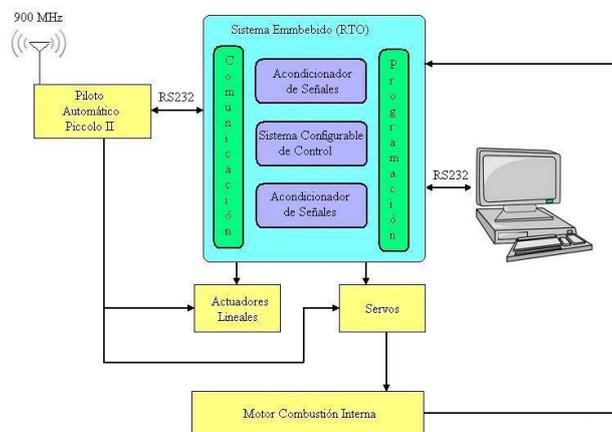


Fig. N° 1 Diagrama en bloque del Sistema Embebido

La gran mayoría de estos desarrollos se basan en la conexión de un autopiloto con motores (eléctricos o a combustión interna) y servos que controlen la unidad.

El problema se plantea al momento de enlazar un motor de combustión interna y el autopiloto, ya que se debe tener en cuenta el tamaño del motor (cantidad de variables a manejar y sensar) y las prestaciones que nos brinda el autopiloto. En este trabajo se propone el diseño de un Sistema Embebido, que nos permita acoplar en

forma directa un autopiloto y todos los sensores y actuadores intervinientes en el control del motor, independientemente de su envergadura. Utilizando una configuración previa y asequible, realizada por el usuario (Fig N° 1).

De aquí en adelante en el presente trabajo denominaremos al "Sistema Embebido" como el "Equipo", por razones de simplicidad.

II. Requerimientos del Sistema

En esta sección se hará un análisis de los requerimientos del sistema y se planteará un modelo del sistema en el que se describen las partes involucradas y los lineamientos básicos de funcionamiento.

En base a las interfaces del Piloto Automático y a las necesidades de los usuarios con respecto al motor a conectar o comandar, es que se desprenden los requerimientos del equipo, principalmente en lo que respecta al hardware del mismo.

A. Definición de Interfaces y requerimientos del diseño

De acuerdo con las especificaciones de los fabricantes (Pilotos Automáticos y motores), serán necesarios los siguientes tipos de interfaces:

- Digital Commands Output Low Voltage (DCOLV) – Comandos digitales de salida de bajo voltaje.
- Digital Commands Output High Voltage (DCOHV) – Comandos digitales de salida de alto voltaje.
- Digital Inputs (DI) – Entradas digitales.
- Temperature Sensing (TS) – Sensado de Temperaturas.
- Analog Input (AN) – Entradas analógicas.
- Pulse Width Modulation (PWM) – Modulación por ancho de pulso.
- Serial Interface (SI) – Interface serial.

B. Especificaciones Eléctricas de las Interfaces

- | | | | |
|---------|--|------------------|---------------|
| • DCOLV | 5V | Current | 10 mA a 50 mA |
| • DCOHV | 12V a 24V | Current | 500 mA a 3 A |
| • DI | 5V | | |
| • TS | Thermocouples J y K, Termistor NTC y PTC | | |
| • AN | 0 a 5V | Acquisition Time | < 10 μ S |
| • PWM | 1,51 mS \pm 600 μ S | Master Clock | 15 ~ 20 mS |
| • SI | I2C y RS232 | | |

C. Estrategia de Diseño

En base al Piloto Automático Piccolo II (Fig. N° 2) [\[A3\]](#) y el motor HKS (Fig. N° 3) a comandar (HKS 700) [\[A4\]](#), es que se desprenden un número de entradas y salidas, pero

realizando un estudio sobre la mayoría de los motores utilizados para este fin y los pilotos automáticos, se llegó a la conclusión que la plataforma de hardware debe contar con:



Fig. N° 2 Piloto Automático Picollo II



Fig. N° 3 Motor HKS 700E

- 16 salidas DCOLV –
- 16 salidas DCOHV – Activación de servos, calentadores de combustible para el ingreso al carburador, control del apagado automático para recupero, etc.
- 16 entradas DI – Fines de carrera, ángulo de pérdida, nivel bajo de batería, etc.
- 10 entradas TS – Sensado temperatura de cabeza de cilindro, temperatura de salida de gases de escape, temperatura de aceite, presión de aceite, etc.
- 10 entradas AN – Nivel de combustible, sondeo del flujo de combustible, consumo eléctrico, ángulo de pérdida, etc.
- 10 salidas PWM – Control de servos.
- 4 puertos SI – Comunicación con el payload del piloto automático (RS232), comunicación con la plataforma de configuración y carga de tablas (RS232), almacenamiento de información

En este marco, considerando restricciones en los tiempos del proyecto, disponibilidad de herramientas de desarrollo y costos, la elección de un microprocesador de la familia Microchip proporciona la flexibilidad necesaria puesto que esta provee capacidad de conexiones múltiples, bajo costo (US\$ 8,4)^[A5], disponibilidad comercial local, programación en C y abundantes recursos de desarrollo.

D. Selección de la plataforma

Para el desarrollo se eligió trabajar con un microcontrolador de 16 bits debido a su alta prestación, perteneciente a la empresa Microchip Technology Inc ^[A6], ya que cuenta con un gran procesamiento de datos (40 MIPS), a su vez cumple con los requisitos de cantidad de entradas/salidas, conectividad RS232, I2C, SPI y prestaciones de espacio en memoria adecuadas para este desarrollo (16 KB de RAM).

Una vez seleccionado el microcontrolador, se desarrollaron los restantes componentes de hardware y software, actividades que involucraron:

- Diseño de la plataforma de hardware de acuerdo con los requerimientos de interfaces del fabricante del Piloto Automático y del Motor.
- Diseño y fabricación del circuito impreso, listados de materiales y documentación del desarrollo.
- Densidad de componentes en la placa (400 componentes), soldadura por olas y horno de termo-fusión.
- Diseño e implementación de la aplicación embebida en la plataforma seleccionada (PIC 24HJ256GP610) [\[A7\]](#) mediante Compilación CSS [\[A8\]](#) para la configuración de las entradas/salidas, ingreso de tablas para sensores, configuración de envío de telemetría a través de la plataforma de hardware con el payload.
- Implementación de un software para la plataforma de configuración (PC) que nos permita seleccionar todos los parámetros necesarios para la configuración en formato visual.

III. Diseño del Hardware del Equipo

Una vez finalizada la etapa de definición de requerimientos de diseño se pudo avanzar con la elaboración de los planos esquemáticos-eléctricos, del hardware del equipo que hace de nexo entre el microcontrolador y las interfaces de conexión.

El diseño fue sometido a varios procesos de revisión por estar involucrado directamente en el manejo, control y recuperación de un UAV de gran envergadura; de manera de realizar la detección de defectos lo más temprano posible en el ciclo de vida del proyecto. Los procesos de revisión típicos son la revisión preliminar de diseño (PDR por Preliminary Design Review) [\[A9\]](#) y revisión crítica de diseño (CDR por Critical Design Review). [\[A10\]](#) Una vez establecida la línea de base de los requerimientos de diseño, se realiza la PDR con el objetivo de saber si se han comprendido esos requerimientos y se está en condiciones de avanzar con la fase de diseño de detalle. En este análisis, se presenta el sistema como un diagrama en bloques.

Finalizada la PDR comienza la etapa de desarrollo y antes de fabricar la placa se realiza la CDR donde se estudia a nivel de circuitos y en detalle cada una de las interfaces involucradas y los posibles modos de fallo. En este análisis se presentan planos esquemáticos muy detallados de cada circuito.

Por último se realiza un análisis independiente de modos de falla (FMEA Failure mode and effects analysis). [\[A11\]](#) En caso de detectar riesgos de que el fallo de un componente se propague y dañe el hardware de vuelo.

Se utilizan en la implementación, prácticas de Ingeniería de Software consistentes con la complejidad del desarrollo realizado, la criticidad de los entregables y la necesidad de alcanzar estrictos requerimientos de calidad.

Diseñado el esquemático se desarrolla el diseño del circuito impreso (PCB) teniendo en cuenta aspectos de Interferencia y compatibilidad electromagnética

(EMI/EMC) [\[A12\]](#) e integridad de las señales entre otros. Llegando al desarrollo final como el que podemos observar en la Fig. N° 4.



Fig. N° 4 Vista Bottom Layer del PCB

A. Según el motor a conectar, se debe tener en cuenta:

- AN. Señales analógicas necesarias para el control del funcionamiento del motor. Nivel de combustible, flujo de combustible, consumo eléctrico, nivel de batería, posición del paso de las hélices, etc. Ampliación de señales AN Fig. N° 5.
- TS. Utilizados para medir temperatura del aceite, presión de aceite, presión de combustible (para estos, se debe tener en cuenta la alinealidad de los mismos, por ende se establece la posibilidad de introducir por software la tabla de cada termistor), como también cantidad de cilindros del motor. Esto nos determina una cierta cantidad de señales TS, las cuales deben tener la posibilidad de conectar termocuplas de tipo “J” (para controlar la temperatura de la cabeza de cilindro) y “K” (para controlar la temperatura de salida de gases).
- DCOLV y DCOHV. Estas señales se utilizan para el calentamiento previo del combustible antes de ingresar al carburador, por lo tanto se necesita una señal por cada carburador, activación de bomba eléctrica de combustible, activación de la electroválvula de cierre del paso de combustible, puesta en funcionamiento de la bomba mecánica auxiliar de combustible, encendido de los CDI (unidad de Control de los Inyectores),

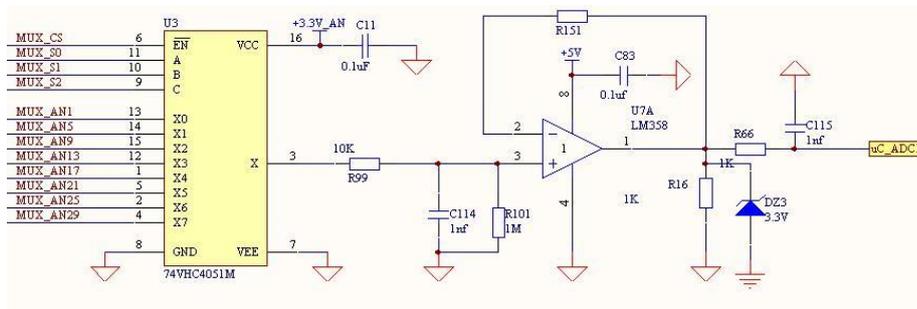


Fig. Nº 5 Circuito eléctrico ampliación de canales analógicos

B. Según el autopiloto a conectar, se debe tener en cuenta:

- SI. Cantidad de canales payload. Esto nos determina los canales de comunicación serial, la capacidad de tratamiento de datos, la velocidad, etc. Todo esto será programable desde la plataforma de configuración.
- Cantidad de interfaces. Algunas señales podrán ser conectadas directamente entre autopiloto y motor, previo al ingreso por un sistema de acondicionamiento de señales.

C. Según la aviónica del modelo, se debe tener en cuenta:

- PWM. Salida para conectar servos digitales, para el control del tren de aterrizaje, dirección del tren de aterrizaje, aceleración del motor, control de flaps, control de elevones, control del timón, aceleración, etc.
- DI. Fines de carreras, determina la cantidad de estas señales, las cuales se utilizan para control de la posición del tren de aterrizaje, limitar aceleración del motor, control del cebador, luces exteriores [\[A13\]](#). Utilizadas para señalar una posición, el rumbo, y el estado. Comúnmente su utilización es recomendado por convenciones internacionales o autoridades civiles, etc.

IV. Diseño de la Aplicación Embebida del Equipo

Para la programación embebida se utilizaron los recursos de desarrollo provistos por el fabricante Microchip (Mplab), utilizando el compilador CSS. El lenguaje es un derivado de C adecuado para los requerimientos de los microcontroladores de la familia Microchip.

En primera medida se validan todas las entradas/salidas digitales, analógicas, de comunicación, etc, comprobando que el software sea capaz de comandar y leer todos los puertos del microcontrolador que habían sido asignados a las distintas interfaces. Este proceso se simplifica aplicando pequeños segmentos de código aplicados a verificar un aspecto en particular.

Una vez corroborado el correcto funcionamiento de todas las entradas/salidas de la plataforma embebida, se pone el énfasis en la interfaz con el piloto automático. Y

todo el proceso de control de la unidad. El software Mplab provee un entorno de trabajo, que nos permite realizar una depuración del programa paso a paso.

V. Diseño de la Plataforma de Configuración (PC)

Para la programación de dicha plataforma se utilizó el lenguaje Visual Basic, ya que nos permite una programación muy simple y visual, trabajar fácilmente con ventanas, casilla de verificación, botón de opción, lista desplegable, botón de comando, etc, como otras.

En esta plataforma debimos poner mayor énfasis en dos grandes procesos, que nos permiten manejar la carga de datos:

- A. Según el motor. Determinar:
 - a.1. Cantidad de Cilindros
 - a.1.1. Temperatura Cabeza de Cilindro (termocupla Fig. N°6, configuración de la ganancia [\[A13\]](#))
 - a.1.2. Temperatura Gases de Escape de Cilindro (termocupla, configuración de la ganancia)
 - a.1.3. Encendido de CDI (Unidad Control de Inyección)
 - a.2. Cantidad de Carburadores
 - a.2.1. Pre calentamiento de combustible de entrada
 - a.2.2. Testeo flujo de combustible
 - a.3. Temperatura de Aceite (termistor, ingreso de tabla de calibración)
 - a.4. Presión de Aceite (termistor, ingreso de tabla de calibración)
 - a.5. Presión de Combustible (termistor, ingreso de tabla de calibración)
 - a.6. Flujo de Combustible (ingreso de tabla de calibración)
 - a.7. Variables control de flujo de combustibles (electroválvula, bomba eléctrica, bomba mecánica)

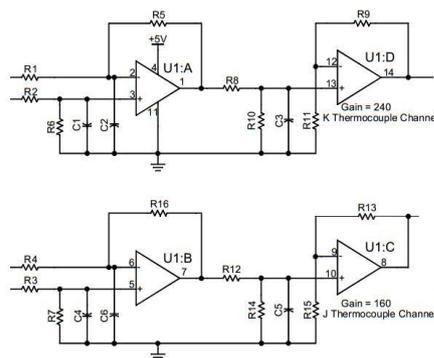


Fig. N° 6 Circuitos Acondicionadores de señales provenientes de Termocuplas

- B. Según el Piloto Automático. Cantidad de interfaces seriales, cantidad de payload, configuración de velocidades de comunicación, etc.

VI. Validación y Verificación

La validación y verificación (V&V) del diseño requiere consideraciones especiales. A nivel de verificación se procede a revisar unitariamente cada interfaz en particular, los niveles de tensión, corrientes, tiempos de transitorios, flancos y tolerancias.

Posteriormente se realizó la integración con el piloto automático de manera de verificar la comunicación y recolección de datos del mismo. Se testearon 20 cambios de estado para cada variable, realizando un chequeo exhaustivo de su correcto reflejo de la información en la plataforma perteneciente al piloto automático.

Una estrategia similar se utilizó para verificar unitariamente los comandos hacia y desde el motor, controlando los parámetros eléctricos y de tiempo, para que se encuadraran dentro de las especificaciones. Los resultados del test fueron documentados e incluidos en la documentación del sistema.

La integración con la PC se resuelve también con un criterio de verificación unitaria, luego se validó mediante ciclos extendidos de comunicaciones y transferencias de datos, verificando la conectividad entre la plataforma de configuración y el equipo.

VII. Resumen del proyecto

La duración total del proyecto implicó aproximadamente año y medio de trabajo desde la definición de requerimientos, hasta la concepción de un equipo como el descrito en este trabajo.

El enfoque utilizado cumple con todas las etapas de un ciclo de vida de tipo iterativo incluyendo requerimientos, diseño, construcción, etapas de testing, integración de hardware y software y validación. El esfuerzo total de desarrollo es del orden de 2 personas-año donde algunas etapas fueron tercerizadas tales como la fabricación de PCB, poblado de la placa, soldadura por horno y por olas, este diseño constituye una pieza de relevante importancia en la cadena de tests de integración y ensayo.

VIII. Conclusiones

Se planteo como eje central para este trabajo el desarrollo de una interfaz que me permita realizar la conexión directa entre autopilotos automáticos con motores de cualquier envergadura.

Se propuso una serie de pasos lógicos para enfrentar el caso, como son, iniciar con un relevamiento y estudio de requerimientos, en base a los cuales se planteó un modelo para la solución del problema. Una vez verificada la validez del modelo, se procede a analizar los riesgos emergentes del modelo que puedan malograr el proceso. Una vez detectados los riesgos se procede a plantear soluciones a los mismos de forma de eliminarlos o mitigarlos. Con toda esa información, se procede luego al diseño del sistema y planteamiento final de la solución. Esa serie de pasos lógicos nos aseguran un buen diseño y que luego cuando se avance en la implementación no se deban pagar costos innecesarios debidos a problemas no considerados.

Se planteo un modelo configurable de hardware, con sus respectivos software, se desarrollo, se implementó, se le realizaron todos los pasos de testing y finalmente,

se puso en marcha interactuando con dos pilotos automáticos (Picolo II y Kestrel Autopilots) y un motor HKS 700E.

Como cosas pendientes, que escapan a la extensión y profundidad de este trabajo, quedaría el diseño del hardware en un formato más compacto y comercializable.

Referencias

- [A1] La Nación. <http://www.lanacion.com.ar/1565916-el-avance-de-los-drones-civiles-generan-fascinacion-y-preocupacion>
- [A2] Drones Argentina. <http://www.drones-argentina.com.ar/category/argentina/>
Drones (UAV). <http://autoblog.com.ar/2013/07/del-donto-p1-al-freedom/>
- [A3] Cloud Cap Technology, a Goodrich Company: Piccolo II. http://www.cloudcaptech.com/piccolo_II.shtm
- [A4] HKS CO., LTD: HKS 700E. http://www.hks-power.co.jp/hks_aviation/products/700e/index.html
- [A5] Proveedor <http://www.elemon.com.ar/elemon/Cotizar.aspx>
- [A6] Microchip Technology Inc. <http://www.microchip.com/>
- [A7] PIC 24HJ256 <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en024693>
- [A8] CSS Compiler. <http://www.csscompiler.com/>
- [A9] NASA - <http://www.nasa.gov/>
http://www.nasa.gov/pdf/206051main_Preliminary_Design_Review_Req_508.pdf
- [A10] NASA - <http://www.nasa.gov/>
http://www.nasa.gov/pdf/207360main_Critical_Design_Review_Requirements.pdf
- [A11] NASA <http://www.nasa.gov/offices/oc/e/0803.html>
- [A12] NASA http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/639521main_EMI-EMC_User_Test_Planning_Guide.pdf
- [A13] Flaps45. <http://flaps45.com/vueling2/instruccion/ATA33%20Lucas.pdf>
- [A14] Microchip – Simplified Thermocouple Interfaes and PICmicro. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00844a.pdf>