



TESIS DE GRADO
EN INGENIERIA ELECTRONICA

KIT DE DESARROLLO PARA APLICACIONES DE
SISTEMAS DE CONTROL Y MICROPROCESADORES

Autores:

| | |
|-----------------------|--------|
| Couto, Hernán Pablo | 48.644 |
| Gaviglio, Ignacio | 48.612 |
| Giudice, Pablo Javier | 48.546 |
| Matus, Juan Luis | 43.189 |

Director de tesis:
Ing. Pablo Cossutta
2011

I. PREFACIO. AGRADECIMIENTOS.

Queremos agradecer a nuestras familias y a nuestros seres queridos por habernos acompañado durante toda nuestra carrera en el ITBA. Sin su apoyo y ayuda incondicionales ninguno de nuestros logros habría sido posible.

También queremos agradecer a todos los docentes que a lo largo de estos años han sabido forjarnos como futuros ingenieros electrónicos, brindándonos todo su profesionalismo y dedicación.

A todos ellos, nuestro más sincero agradecimiento.

INDICE

| | | |
|------|---|----|
| I. | PREFACIO. AGRADECIMIENTOS. | 2 |
| II. | RESUMEN. | 8 |
| III. | ABSTRACT | 8 |
| IV. | INTRODUCCIÓN | 9 |
| | 1. HISTORIA Y ANTECEDENTES | 9 |
| | 2. DEFINICIONES. GLOSARIO DE TÉRMINOS | 9 |
| | 3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO | 11 |
| V. | OBJETIVOS. | 12 |
| | 1. FINALIDAD DEL PROYECTO | 12 |
| | 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER | 12 |
| VI. | DEFINICIÓN DE PRODUCTO | 13 |
| | 1. REQUERIMIENTOS. | 13 |
| | 1.1. Encuesta | 13 |
| | 1.2. Resumen de los resultados de la encuesta | 15 |
| | 1.3. Construcción de la Casa de calidad | 16 |
| | 1.3.1. QIC – Quanser: | 16 |
| | 1.3.1. PICDEM™ Mechatronics Demonstration Kit | 17 |
| | 2. ESPECIFICACIONES FUNCIONALES Y DE DISEÑO. | 19 |
| | 2.1. Especificaciones del hardware | 19 |
| VII. | ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD. | 20 |
| | 1. FACTIBILIDAD TECNOLÓGICA. | 20 |
| | 1.1. Propuesta de alternativas de diseño. | 20 |
| | 1.1.1. Sistema de procesamiento. | 20 |
| | 1.1.2. Acelerómetros | 21 |
| | 1.1.3. Giróscopos | 21 |
| | 1.2. Elección de una solución | 22 |
| | 1.3. DFMEA | 23 |
| | 2. FACTIBILIDAD DE TIEMPOS. | 34 |
| | 2.1. Planificación (PERT y simulación de Montecarlo). | 34 |
| | 2.2. Programación (Gantt) | 35 |
| | 3. FACTIBILIDAD ECONOMICA | 36 |
| | 3.1 Mercado | 36 |
| | 3.1.1. QIC – Quanser: | 36 |
| | 3.1.2. PICDEM™ Mechatronics Demonstration Kit | 37 |

| | |
|---|----|
| 3.2 Costos | 37 |
| 3.2.1 Motherboard | 37 |
| 3.2.2. Daughterboard | 38 |
| 3.3 Ciclo de Vida | 38 |
| 3.4 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) | 38 |
| 4. FACTIBILIDAD LEGAL Y RESPONSABILIDAD CIVIL..... | 41 |
| 4.1. Hardware..... | 41 |
| 4.2. Software | 41 |
| VIII. INGENIERÍA DEL DETALLE | 42 |
| 1. HARDWARE..... | 42 |
| 1.1. Diagrama de bloques | 42 |
| 1.2. Descripción detallada de cada bloque..... | 43 |
| 1.3. Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales de cada bloque..... | 49 |
| 1.4. Plan de pruebas de cada modulo | 54 |
| IX. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | 58 |
| 1. DEFINICIÓN DE LOS MÓDULOS | 58 |
| 2. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS | 58 |
| 3. DISEÑO MECÁNICO..... | 60 |
| 4. DETALLES DE CONSTRUCCIÓN Y PRECAUCIONES ESPECIALES DE MONTAJE..... | 60 |
| X. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO | 61 |
| 1. VALIDACIÓN DEL HARD..... | 61 |
| 1.1. Plan y protocolos especiales de medición | 61 |
| 1.2. Medidas..... | 61 |
| 1.4. Resultados..... | 65 |
| XI. ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD | 66 |
| XII. CONCLUSIONES | 69 |
| 1. EXCELENCIAS, OBJETIVOS ALCANZADOS | 69 |
| 2. FALLOS, RECOMENDACIONES PARA FUTUROS DISEÑOS..... | 69 |
| XIII. ANEXOS..... | 71 |
| 1. CÓDIGOS DE SOFTWARE | 71 |
| 1.1. main.c..... | 72 |
| 1.2. AD_driver.c | 75 |
| 1.3. AD_driver.h..... | 79 |
| 1.4. sci.c | 80 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| 1.5. sci.h..... | 83 |
| 1.6. pwm.c..... | 84 |
| 1.7. pwm.h | 87 |
| 1.8. Config.h | 89 |
| 1.9. ivt.c | 90 |
| 3. LISTADO DE PARTES..... | 93 |
| 4. EXPERIENCIAS ACCESORIAS..... | 95 |
| 5. HOJAS DE DATOS DE COMPONENTES Y HOJAS DE APLICACION..... | 97 |
| 7. DETALLE DEL CÁLCULO DE CONFIABILIDAD | 98 |
| 8. SELECCIÓN DE HOJAS DEL MIL-HDBK-217F | ¡Error! Marcador no definido. |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Fotografía del kit de desarrollo de Quanser..... | 17 |
| Fig. 2. Fotografía del kit de desarrollo de Microchip | 17 |
| Fig. 3. Casa de calidad..... | 18 |
| Fig. 4. Simulación Montecarlo con 10000 iteraciones. | 35 |
| Fig. 5. Diagrama de Gantt. Se marcan en rojo las tareas pertenecientes al camino crítico..... | 36 |
| Fig. 6. Diagrama en bloques del hardware. | 42 |
| Fig. 7. Esquemático del módulo de alimentación..... | 43 |
| Fig. 8. Esquemático del módulo de sensores. | 44 |
| Fig. 9. Esquemático del módulo XBee | 45 |
| Fig. 10. Esquemático del módulo de comunicación USB. | 46 |
| Fig. 11. Esquemático del módulo Daughterboard. | 47 |
| Fig. 12. Esquema de conexión del microprocesador en el daughterboard..... | 48 |
| Fig. 13. Circuito de acondicionamiento de los sensores inerciales..... | 50 |
| Fig. 14. Esquema de leds de estado en el XBee. | 51 |
| Fig. 15. Esquema de ubicación de los componentes junto con el correspondiente plano de masa. | 53 |
| Fig. 16. Esquemático de la placa de verificación..... | 55 |
| Fig. 17. PCB del módulo MotherBoard..... | 59 |
| Fig. 18. PCB del módulo DaughterBoard..... | 59 |
| Fig. 19. Tensiones de alimentación de la placa | 62 |
| Fig. 20. Señales de los acelerómetros: amarilla ACELX, verde ACELY y violeta GYRO..... | 62 |
| Fig. 21. Oscilador Daughtherboard HC12X..... | 63 |
| Fig. 22. Señales de control motores. Amarillo ROT, violeta ROTNEG y rosa SD | 64 |
| Fig. 23. Señal PWM y señales de control | 64 |
| Fig. 24. Señal PWM y señales de control en una transición..... | 64 |
| Fig. 25. Sistema de transporte SAETA llevando a un pasajero. | 95 |
| Fig. 26. Ubicación de las tres placas antes de utilizar el kit de desarrollo..... | 96 |
| Fig. 27. Ubicación nueva con el kit de desarrollo y la placa adaptadora. | 96 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA I. Características de acelerómetros..... | 21 |
| TABLA II. Características de giróscopos..... | 21 |
| TABLA III. DFMEA..... | 23 |
| TABLA IV. Tabla de Duraciones del Proyecto..... | 34 |
| TABLA V. Tabla de Precedencias y Asignación de Ejecutores..... | 34 |
| TABLA VI. Costos del MotherBoard | 37 |
| TABLA VII. Costos del DaughterBoard..... | 38 |
| TABLA VIII. Resumen de Costos..... | 38 |
| TABLA IX. VAN..... | 40 |
| TABLA X. Resumen de Confiabilidad por Módulo..... | 66 |
| TABLA XII. Resultados Finales | 68 |

II. RESUMEN

El producto a desarrollar se encuentra orientado al desarrollo e investigación, en el ambiente académico, de sistemas de control y microprocesadores.

El mismo contará con una placa madre, que servirá de interfaz I/O de un microprocesador implementado en una placa aparte, lo que genera versatilidad permitiendo la utilización del mismo sistema con microprocesadores de diversos fabricantes.

La placa madre incluye una fuente, giróscopos, acelerómetros, un modulo de comunicación Xbee y conectores para la entrada y salida de señales y periféricos. La misma constará con opcionales, como placas de potencia, placa de switches y un display.

El sistema apunta a hacer más versátil y económica la investigación y prueba de sistemas de control, ofreciendo infinitas configuraciones que se adapten a diferentes formas de programación.

III. ABSTRACT

The Product developed is targeted for the use in research and development of control systems in the academic environment. The same is composed of two boards, a motherboard that acts as an I/O interface for the daughterboard containing a microprocessor. This allows for versatility since the motherboard can be used with different daughter boards containing microprocessors from different manufacturers.

The motherboard features a power supply, gyroscopes, accelerometers, an XBEE communications module and the I/O connectors for signal collection/distribution and the connection of peripheral devices. The board will be offered with optional additional boards such as switches, displays or power amplifying/controlling boards.

The system is aimed at allowing a versatile and economic research and product testing in the field of system control allowing for customization of the daughterboard to fit every need.

IV. INTRODUCCIÓN

1. HISTORIA Y ANTECEDENTES

Dentro del ambiente académico, específicamente en el área de electrónica, es normal que se dicten materias que requieran de demostrar los conocimientos adquiridos mediante un proyecto, el cual suele requerir desarrollo de software y hardware, especialmente en temas como microprocesadores y sistemas de control. Es típico encontrar proyectos o trabajos prácticos que requieran de hardware en común, el cual muchas veces resulta tedioso armar y desarmar en un protoboard, o fabricar en placas multiperforadas. También suele suceder que un circuito armado para una materia sirve para otra pero se le deben agregar cosas y esto no siempre es simple. Además, hoy en día, con el avance de la tecnología, puede resultar complicada la fabricación de ciertos circuitos debido al reducido tamaño de los componentes.

Debido a esta problemática es que han aparecido en el mercado diversos kits de desarrollo que sirven como placas de propósito general, aunque los mismos suelen estar pensados para que el usuario pueda conocer todas las prestaciones de cierto módulo lanzado al mercado por la empresa, por lo general un microprocesador.

En nuestra experiencia nos ha sucedido esto y hemos trabajado con diversos kits, los cuales son útiles pero no cumplen con los requisitos para poder expandir su uso a distintas materias. Por ende se ha planteado la idea de presentar al mercado una placa de desarrollo versátil, pensada para hacer demostraciones de varias materias con el mismo hardware, haciendo ligeras modificaciones de software, por ejemplo, utilizando o no un módulo.

Esta propuesta logra una menor pérdida de tiempo en el desarrollo de una demostración, con una relación costo / beneficio más baja. Se pueden cumplir las metas de varias materias con un mismo hardware y se puede actualizar la tecnología de microprocesadores con la que se desea trabajar cambiando un único módulo.

2. DEFINICIONES. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

- **Giróscopo:** Circuito integrado que permite medir velocidades angulares. Si bien, la palabra originalmente remite al dispositivo mecánico capaz de medir la orientación basado en el principio de conservación del momento angular, durante este informe se refiere a los giróscopos digitales de tecnología MEMS.
- **MEMS:** del inglés, Microelectromechanical Systems (Sistema micro electro mecánico) se refiere a la tecnología electromecánica del orden de los micrones y sus productos. La técnica de fabricación es heredada de la manufactura de semiconductores. Es un nivel previo antes de llegar a la nanotecnología (NEMS).
- **Acelerómetro:** Circuito integrado que permite medir aceleraciones lineales. Al igual que en el caso del giróscopo, a lo largo de este informe se referirá a acelerómetros digitales construidos con tecnología MEMS. Existen acelerómetros de silicio capaces de medir en 1, 2 o los 3 ejes cartesianos.
- **IMU:** del inglés, Inertial Measurement Unit (Módulo Inercial de Medición) es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.
- **Placa inercial:** Placa que integra los giróscopos y acelerómetros. Ídem IMU.
- **DOF:** Del inglés, “grados de libertad” (Degrees of Freedom), son el conjunto de movimientos y/o rotaciones independientes que puede medir un módulo inercial.
- **ADC:** del inglés, Analog to Digital Converter (Conversor Analógico Digital). Dispositivo electrónico capaz de convertir una señal del campo analógico (por ej. tensión) a un número digital de una precisión dada.
- **GNU:** Proyecto de código libre para reemplazar al sistema operativo no libre UNIX. GNU es un acrónimo recursivo que significa GNU is Not Unix (GNU no es UNIX).
- **GNU GPL:** del inglés, GNU General Public License (Licencia General Pública de GNU). Es un tipo de licencia creado por la Free Software Foundation en 1989 orientado a proteger la distribución,

modificación y uso de software. Su objetivo es proteger al software de intentos de apropiación que restrinjan las libertades de los usuarios.

- MTBF: del inglés, Mean Time Before Failure (Tiempo promedio hasta la falla) es el valor esperado de la duración de un producto.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

Las asignaturas relativas a los sistemas de control son comunes tanto en carreras universitarias como en secundarios técnicos. La existencia de estas asignaturas está íntimamente ligada con el desarrollo industrial, ya que en la mayoría de los procesos productivos se aplica la teoría de sistemas de control. Ya sea, dentro de la química, la mecánica o la electrotecnia, siempre el común denominador de este tipo de sistemas es la medición de uno o más parámetros del ambiente –temperatura, humedad, etc. – que luego son procesados para finalmente tomar decisiones relativas a los actuadores presentes. Por lo tanto, aquí se observan los tres componentes de estos sistemas. Por un lado, el sistema de adquisición; por otro, el sistema de procesamiento o decisión; y por último, el conjunto de los actuadores.

Volviendo al ámbito académico, resulta de gran utilidad para los profesores poder contar con una forma simple de mostrar la teoría vista en clase en ejemplos prácticos y que requieran la intervención de los alumnos.

En la actualidad, existen diversas soluciones diseñadas para el trabajo con microprocesadores pero solo unas pocas se focalizan puntualmente en los sistemas de control. Es decir que existen soluciones que integran un microprocesador, junto con conversores analógico-digitales y salidas digitales pero o bien están orientadas únicamente al público hobbista o bien están pensadas para aplicaciones de más alto nivel de abstracción (procesamiento de audio, video, etc.). Por lo tanto, el objetivo es realizar un dispositivo que sea capaz de actuar en tiempo real y en el cual el usuario programador (alumnos, profesores, etc.) tengan la seguridad de que el microprocesador estará a su completa disposición (ausencia de un sistema operativo, por ej. Linux embebido) tal que su única preocupación sea la de diseñar el sistema de control.

Por otro lado, queremos hacer énfasis en el hecho de que este se tratará de un producto de diseño nacional, lo cual es un punto a favor a la hora de posicionarse como un referente regional. Para el usuario, las ventajas serán claras: menores costos, menores tiempos de respuesta ante fallas y soporte personalizado y en español. Este contacto tan cercano con el cliente puede resultar en un punto fuerte del proyecto, ya que aumenta la posibilidad de ofrecer cursos y capacitaciones a los docentes –y eventualmente alumnos – que serán aquellos que decidirán la compra de los equipos.

Finalmente, queremos remarcar que la experiencia obtenida durante nuestro trabajo sobre el proyecto SAETA (Sistema Electrónico de Transporte Autobalanceado) nos proporciona un conocimiento de primera mano sobre los requerimientos técnicos necesarios en este tipo de desarrollos.

V. OBJETIVOS

1. FINALIDAD DEL PROYECTO

El proyecto es un kit de desarrollo pensado para aplicaciones que involucren sistemas de control y su implementación en microprocesadores. Dicho kit consiste de un módulo con un microprocesador, acelerómetros, giróscopos y comunicación inalámbrica, permitiendo desarrollar sistemas que operen a distancia sin conexión a una computadora.

El kit de desarrollo busca facilitar el estudio e implementación de sistemas de control, preferentemente del tipo de sistemas móviles que requieren sensores de aceleración y velocidad angular, mediante una interface simple y versátil que permita abstraerse del diseño de la misma.

Se busca ingresar al mercado académico y hobbista, destinado al desarrollo de proyectos como puede ser un sistema móvil basado en los principios de un péndulo invertido, aviación y navegación a escala, etc.; permitiendo facilitar la implementación de los mismos y logrando que se desarrollen sistemas complejos y desafiantes utilizando la interface electrónica presentada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER

Dado que el producto está destinado al ambiente académico y hobbista debe cumplir con ciertos requerimientos que lo hagan atractivo para su uso. Esto plantea ciertos objetivos que deben ser alcanzados dentro de cada uno de los módulos que componen al kit de desarrollo, y en la totalidad del mismo.

Entre los principales problemas a resolver podemos enumerar los siguientes:

- Conectividad con distintos periféricos.
- Conexión Inalámbrica. A la hora de utilizar el kit de desarrollo en un proyecto móvil debe ser posible interactuar con el mismo en forma remota. Esto incrementa la practicidad a la hora de la puesta en funcionamiento y permite hacer mediciones a distancia en tiempo real.
- Simple de usar y didáctico. El conexionado debe ser compatible y estándar y el lenguaje de programación debe acercarse a lo que los usuarios conozcan y dominen.
- Tamaño reducido y con prestaciones suficientes. En gran cantidad de proyectos el espacio que ocupa el sistema de control resulta vital en su implementación. De este modo, se busca que el kit tenga las prestaciones necesarias en un espacio reducido y que sea lo más cómodo posible de operar en condiciones de laboratorio o clase.
- El kit por si mismo debería cubrir los requerimientos de forma autónoma como por ejemplo, el control de un carro móvil o un péndulo invertido simple.

VI. DEFINICIÓN DE PRODUCTO

1. REQUERIMIENTOS

Para poder utilizar en forma eficiente los recursos, se plantearon métodos para obtener cuales eran los requerimientos que los potenciales clientes buscan en un producto como el que se ofrece. Para tal fin, se consultó con distintos ingenieros electrónicos, para obtener requerimientos de usuarios experimentados, y se realizó una encuesta entre estudiantes de ingeniería electrónica y profesores (ingenieros electrónicos) para conseguir una opinión de mayor cantidad de personas. De las charlas con usuarios expertos se obtuvieron los primeros indicios de los requerimientos y se los corroboró mediante las encuestas.

Los requerimientos pueden enumerarse en la siguiente lista:

- Programable en C u otro lenguaje de alto nivel
- Versátil
- Que tenga muchos sensores
- Que tenga muchas salidas
- AD's de buena resolución
- Comunicación inalámbrica
- Chico/Liviano
- Bajo consumo
- Que no requiera ventilación
- Económico

La encuesta fue alojada en internet, para que sea sencillo de completar por los encuestados. A continuación se muestra la encuesta junto con los resultados obtenidos

1.1. Encuesta

Sexo

- M
- F

Grupo etario

- <20
- 20-29
- 30-39
- 40-49
- >50
-

Universidad o Instituto al que pertenece

ITBA

UBA

UTN

UNLP

Otro:

Nivel alcanzado

- Estudiante
- Ingeniero o superior

¿Con que lenguaje se siente más cómodo programando?

- Assembler
- C/C++
- Java
- Simulink
- Python

¿Con que familia de microprocesadores suele trabajar?

- Motorola/Freescale
- ARM
- Atmel
- Intel
- Microchip (PIC)

¿Prefiere que el kit tenga un microprocesador propio o uno intercambiable?

- Predefinido
- Intercambiable

Conexión a la PC

- Serial
- USB
- Ambos
- Otro

Según su experiencia, ¿cuáles son las mayores trabas a la hora de implementar un sistema de control o un proyecto de programación en microprocesadores dentro del ámbito educativo?

- Falta de tiempo
- Tiempo de aprendizaje del hardware demasiado alto
- Costos

¿Le parece necesario un módulo inalámbrico?

- Si
- No

¿Con cuántas salidas de PWM cómo mínimo debería contar el kit?

- 1 salida
- 2 o más
- 4 o más
- 6 o más
- 8 o más

¿Con cuántos conversores digitales analógicos (ADC) cómo mínimo debería contar el kit?

- 2 o más
- 4 o más
- 6 o más

- 8 o más

¿Qué precisión considera deseable en un conversor analógico digital (ADC)?

- Menor a 8 bits
- Mayor o igual a 8 bits
- Mayor o igual a 10 bits
- Mayor o igual a 12 bits
- Mayor o igual a 14 bits

¿Le interesaría que el kit tenga giróscopos y acelerómetros incorporados?

- Si
- No

¿Qué otra característica piensa que es necesaria para un kit de desarrollo?

[Pregunta libre]

1.2. Resumen de los resultados de la encuesta

La encuesta fue realizada sobre un total de 25 estudiantes de ing. electrónica (70%) y 10 profesores (30%) en su mayoría del ITBA (90%) aunque también se encuestó a profesionales y estudiantes pertenecientes a otras universidades o institutos (U. Favaloro, 10%).

Un 67% declaró sentirse cómodo programando en C/C++ mientras que un 22% expresó que usualmente programa en Simulink. El resto prefiere trabajar en lenguaje Assembler. Esto indica que si bien el lenguaje C es de los más populares entre los desarrolladores, no debe dejar de lado el conjunto de desarrolladores que prefieren lenguajes por bloques como simulink.

La familia de procesadores de Motorola/Freescale resultó la más elegida (67%), quedando ARM y Microchip en segundo (22%) y tercer lugar (11%) respectivamente. Esto indica una preferencia del mercado por productos de la línea Motorola, pero dado que en esta etapa no se realiza una selección de componentes, este resultado servirá para las siguientes secciones.

A la pregunta sobre la posibilidad de cambiar de microprocesador, la respuesta fue dividida. Mientras que un 67% de los encuestados prefiere uno intercambiable, un 33% prefiere uno predefinido. Dado que se trata de una mayoría (el doble) de interesados en un procesador intercambiable, se tomó esta consideración dentro de las especificaciones.

En relación a la conexión un 56% declaró preferir una programación vía USB mientras que el 11% busca una conexión serial y el 33% prefiere tener disponibles ambas opciones. De esta pregunta se define que la comunicación debe ser del tipo USB+Serie232 (89% de los encuestados)

En cuanto a las trabas a la hora de implementar sistemas de control en ámbitos educativos, un 78% destacó el alto tiempo de aprendizaje del hardware, por lo que se deduce que el módulo debe ser lo más eficiente dentro del punto de vista de versatilidad.

Un 78% determinó que sería útil tener un módulo inalámbrico dentro del kit. Dado que es un valor alto, lo consideraremos como una característica importante.

En relación a los ADC, un 67% se inclinó por la opción de 4 conversores o más mientras que un 22% lo hizo por la opción de 2 conversores y solo un 11% prefirió 6 conversores. Al parecer, 4 conversores puede resultar un estándar adecuado para proyectos de baja escala, como aquellos a los que se apunta. Asimismo, un

44% resaltó que estos conversores deberían tener por lo menos 10 bits de resolución, mientras que un 33% solo consideró como necesarios un rango de 8 bits. El restante se inclinó por 12 o más bits. En conclusión, si se toman por lo menos 10 bits de resolución estaríamos satisfaciendo a un 77% de la demanda. Si se consiguen procesadores con mayor resolución en sus ADCs puede realizarse un balance entre satisfacer a toda la demanda y un aumento de costos.

En cuanto a la cantidad de módulos de PWM se concluye que por lo menos debe contar con 2 salidas (78%) aunque también podrían tomarse 4 salidas (11%) o bien pasar a 6 (11%).

La totalidad de los encuestados aseveró que es interesante tener acelerómetros y giróscopos integrados. Esto puede resultar en una ventaja competitiva frente al resto de los competidores, ya que en ninguno de ellos se los ofrece de forma nativa.

Finalmente, en la pregunta libre se encontraron requerimientos que no habían sido claramente identificados previamente al diseño de la encuesta. En particular se hace hincapié en la claridad de la documentación y la facilidad para utilizarlo sin gran cantidad de conocimientos previos. Asimismo, se incluye la demanda de disponibilidad de software libre, así como también estabilidad y módulos prediseñados en la plataforma de desarrollo. De aquí se intuye que sería conveniente que el módulo incluya controladores para dispositivos comunes como displays, transmisores inalámbricos o periféricos de interfaz como teclados o leds.

1.3. Construcción de la Casa de calidad

En base a los requerimientos antes mencionados, se propusieron las especificaciones y se realizó la casa de calidad (QFD). A modo de resumen, se muestra a continuación una lista de dichas especificaciones:

- Programable en C.
- La placa es independiente del microprocesador.
- Interfaz USB.
- Más de 4 conversores analógico digital (ADC) accesibles.
- Más de 4 salidas de PWM accesibles.
- Más de 2 puertos de 8 bits cada uno accesibles.
- ADCs de una resolución superior a 10 bits.
- Comunicación inalámbrica vía Xbee
- Tamaño menor a 10cm x 20cm
- Peso menor a 500g
- Consumo inferior a 500mA
- Precio de venta menor a US\$150
- No requiere ventilación forzada

Para realizar un análisis competitivo se tomaron dos kits de desarrollo existentes en el mercado

1.3.1. QIC – Quanser:

Placa de desarrollo especialmente enfocada a ambientes educativos. Posee una configuración Mainboard – Daughterboard que permite utilizar dos microprocesadores de diferente performance. Utiliza procesadores PIC de Microchip, en particular de la familia PIC16F8XX. Posee salidas de PWM y entradas ADC integradas, cuyo número varía según los dos modelos disponibles. El procesador es de la línea Microchip y su precio en Estados Unidos es de US\$208 (Procesador US\$69, CarrierBoard US\$139). En relación al fabricante, Quanser es una de las empresas líderes en equipamiento para educación y sistemas de control.

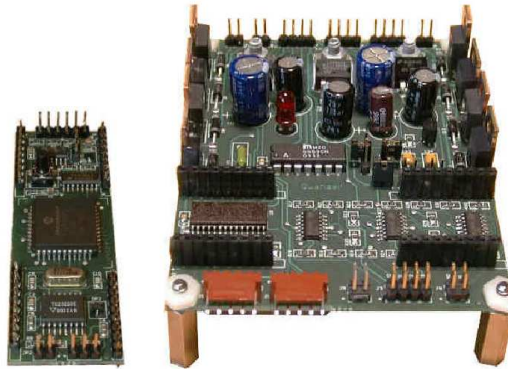


Fig. 1. Fotografía del kit de desarrollo de Quanser.

1.3.1. *PICDEM™ Mechatronics Demonstration Kit*

Kit de desarrollo orientado a proyectos de mecatrónica. Contiene un procesador PIC16F917 a 8MHz. No posee entradas AD pero contiene integrados sensores de temperatura y luminosidad. Asimismo, integra controladores para el manejo de motores, junto con un display y pulsadores. Su precio en Estados Unidos es de US\$150. La ventaja de este kit frente al de Quanser es la inclusión de un motor de DC y otro paso a paso, en la placa, junto con un display y pulsadores. Su principal desventaja es no tener disponibles para el usuario los puertos del ADC.

La empresa Microchip no solo es el desarrollador de este kit sino también del microprocesador que incluye. Del mismo modo, es también el fabricante del microprocesador incluido en el kit de Quanser.

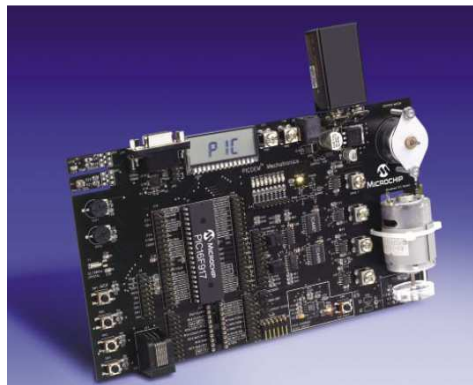


Fig. 2. Fotografía del kit de desarrollo de Microchip

Con las especificaciones ya descriptas, junto con los requerimientos, se construyó la siguiente casa de calidad.

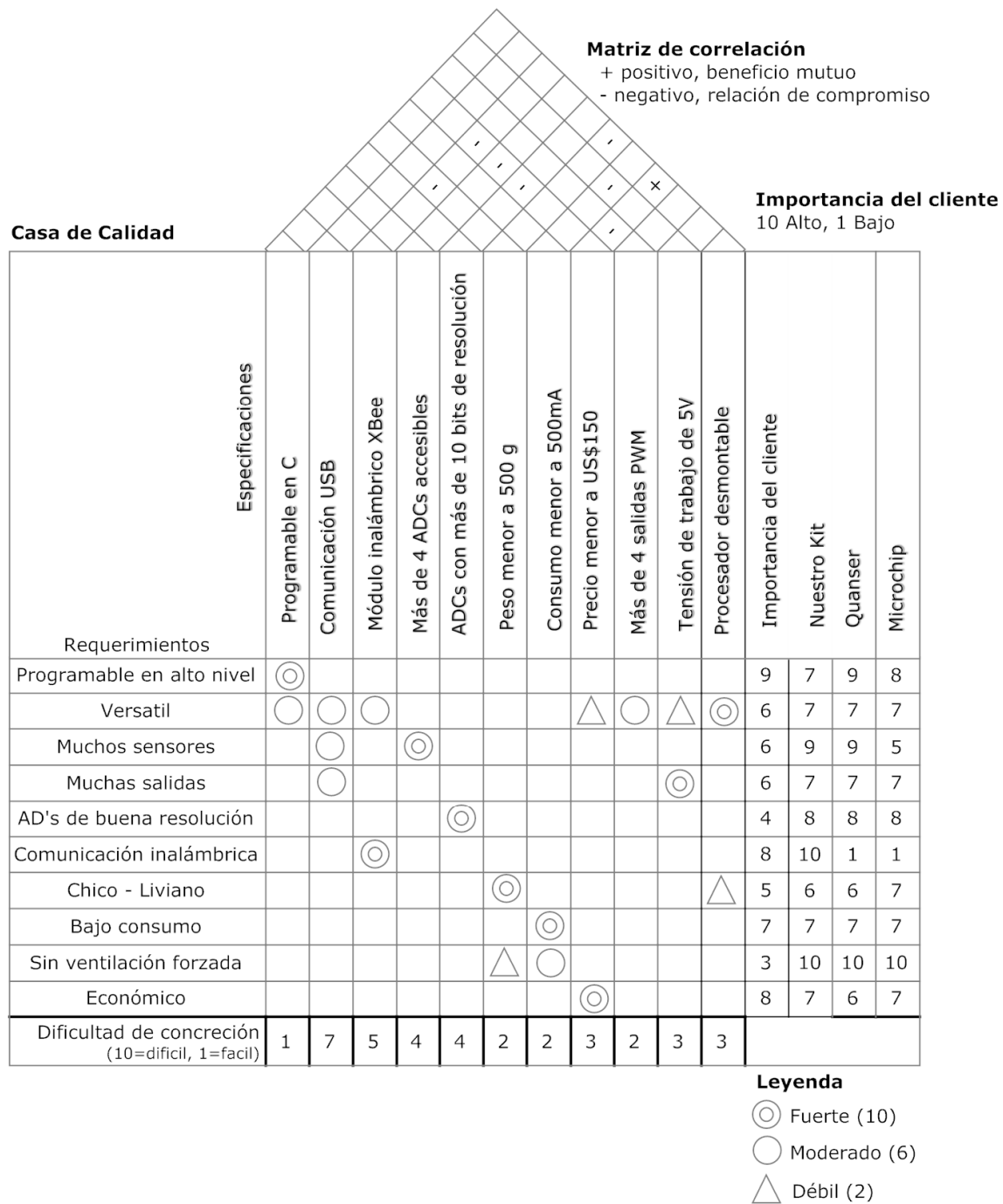


Fig. 3. Casa de calidad.

2. ESPECIFICACIONES FUNCIONALES Y DE DISEÑO.

2.1. Especificaciones del hardware

El kit de desarrollo se divide en dos placas a las que llamaremos Motherboard y Daughterboard. En la primera se incluyen los periféricos, los acelerómetros y la entrada de alimentación. En la segunda placa se incluye el microprocesador. A continuación se detallan las especificaciones de cada una de las placas.

Motherboard

| | |
|-------------------------|---|
| Entrada de alimentación | 5±0.5V o 7V a 24V regulada internamente |
| Entradas/Salidas | 2 Puertos de entrada/salida (8bits) genéricos 4 Periféricos PWM 2 Periféricos ADC 1 Puerto USB |
| Interfaz con el usuario | Led indicador de encendido Comunicación Inalámbrica |
| Interfaz externa | Conector de simple conexionado (tipo DB) |
| Características físicas | Temperatura de funcionamiento: -10°C a 50°C |

Daughterboard

| | |
|-------------------------|---|
| Entrada de alimentación | 5±0.5V y 3.3±0.3V |
| Entradas/Salidas | Zócalo de 48 pines macho |
| Características físicas | Temperatura de funcionamiento: -10°C a 50°C |

VII. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

1. FACTIBILIDAD TECNOLÓGICA

1.1. Propuesta de alternativas de diseño.

1.1.1. Sistema de procesamiento.

Para la realización de un sistema de control existen diversas alternativas de diseño. Existe la posibilidad de utilizar un microprocesador, una placa de desarrollo, un procesador digital de señales (DSP) o una field programmable gate array (FPGA). Todas estas opciones presentan ventajas y desventajas frente al desarrollo en cuestión.

La utilización de un microprocesador presenta una gran flexibilidad frente a las características que la placa de control podría contener. Esto se debe a la existencia de una amplia variedad de opciones en lo que respecta a módulos presentes en el integrado, consumo y costos del mismo. Por otra parte la utilización de un microprocesador requiere un desarrollo de una placa madre que albergue al mismo y permita su correcta utilización. Esto aumenta considerablemente el tiempo de diseño y la complejidad del mismo. Una ventaja que presenta diseñar la placa madre sería la posibilidad de realizar un diseño que permita la utilización de más de un modelo de microprocesador. Utilizando una segunda placa que albergue al procesador y se conecte a la placa madre podría permitirse flexibilidad en la distribución de pines del microprocesador por lo que podría generarse un módulo intercambiable.

Otra opción contempla retirar la necesidad de crear el diseño de una placa madre utilizando una placa de desarrollo. Esta opción acorta significativamente el tiempo de desarrollo del sistema. En contrapunto el diseño dispondría de una menor flexibilidad en lo que respecta a prestaciones dadas y aumenta los costos considerablemente.

La utilización de una DSP generaría condiciones similares a la utilización de una placa de desarrollo pero este último se encuentra orientado a aplicaciones más similares al uso que se propone. De igual manera el costo de un DSP es muy superior al de un microprocesador.

Finalmente se consideró una FPGA pero esta última presentaba enormes dificultades en lo que respecta al diseño. La FPGA permite una flexibilidad absoluta en el diseño pero no provee las facilidades que contiene un microprocesador como ser conversores analógico digitales o una unidad de procesamiento. Además el costo de las mismas es muy elevado en comparación a un microprocesador.

Sensores de orientación

Para definir los sensores que se incluyen en la placa de desarrollo, se consideraron los acelerómetros ADXL203 y ADXL335 y los giróscopos ADXRS613, LY530ALH y LPR530AL. Dentro de todas las opciones existentes, la primera condición que se fijó fue que fuera factible la construcción del prototipo. Uno de los problemas intrínsecos que surge a la hora de elegir modelos de estos sensores, es que dado el pequeño tamaño que tienen y por los encapsulados que poseen, resulta físicamente imposible soldarlos con las herramientas que se cuentan en un laboratorio de electrónica. Debe resaltarse que por ser integrados de gran precisión es necesario que estén soldados de la forma más precisa posible, para evitar ajustes de calibración en las mediciones que se realicen. Con estas consideraciones, se buscó un modelo que estuviera disponible como placa de desarrollo para luego incluirlo en nuestro diseño final como parte integrada.

A continuación se muestra una tabla comparativa que resume las principales características de cada uno.

1.1.2. Acelerómetros

TABLA I. Características de acelerómetros

| Modelo | ADXL203 | ADXL335 |
|------------------------------|----------------|--------------------|
| Rango Completo [g] | ±1.7 | ±3 |
| Sensibilidad [mV/g] | 1000 | 300 |
| Piso de Ruido [mg/√Hz] | 110 | 150 |
| Ancho de Banda Típico [Hz] | 2500 | 1600(X,Y) - 550(Z) |
| Shock Survival [g] | 3500 | 10000 |
| Ejes | 2 | 3 |
| Alimentación [V] | 5 | 1,8 – 3,6 |
| Consumo [mW] | 3,5 | 1,05 |
| Medidas Físicas [mm] | 5×5×2 LCC | 4× 4×1.45 LFCSP |
| Medición Dinámica + Estática | Si | Si |
| Fabricante | Analog Devices | Analog Devices |
| Precio [US\$ x100pcs] | 10,80 | 2,77 |

En la tabla se observa que el ADXL335 tiene un mayor rango trabajo mientras que el ADXL203 tiene mejor sensibilidad (3 veces más). Tal como lo explicita el fabricante, el ADXL203 es un acelerómetro de precisión, capaz de distinguir señales de hasta 0,06° de inclinación en aplicación de bajo ancho de banda (<60Hz). Esta buena performance también se refleja en su precio, que es aproximadamente 3 veces mayor. Por lo tanto, aquí se observa una relación de compromiso en cuanto a rango-sensibilidad-precio. Si bien ambos cumplen con los estándares mínimos necesarios para aplicaciones de control tradicionales, es más probable que sea necesaria más precisión en vez de rango. Por lo tanto, el ADXL203 resulta una opción conveniente.

1.1.3. Giróscopos

TABLA II. Características de giróscopos

| Modelo | ADXRS613 | LY530ALH | LPR530AL |
|---------------------------------------|----------------|-------------|-------------|
| Movimientos | yaw | yaw | pitch,roll |
| Fondo de escala [°/s] | ±150 | ±300 | ±300 |
| Sensibilidad [mV/ °/s] | 12,5 | 3,33* | 3,33* |
| Shock Survival [g] | 2000 | N/A | N/A |
| Medidas Físicas [mm] | 7×7×3 BGA | 5×5×1,5 LGA | 5×5×1,5 LGA |
| Densidad Espectral de Ruido [°/s/√Hz] | 0,04 | 0,035 | 0,035 |
| Tensión de Alimentación [V] | 5 | 3 | 3 |
| Consumo [mW] | 17,5 | 15 | 20,4 |
| Fabricante | Analog Devices | ST | ST |
| Precio | N/A | N/A | 6,72 |

*Utilizando la salida amplificada por 4. En condiciones normales es 0,83 mV/°/s.

Para la elección de un giróscopo es importante definir qué movimientos es capaz de captar. Existen tres movimientos que se definen como yaw (eje z), pitch (eje x) y roll (eje y). Los giróscopos comerciales suelen ser de 1 o 2 ejes y usualmente los de dos ejes son de pitch y roll ya que son los movimientos sobre el eje de la placa. Por otro lado, los de 1 solo eje (ADXRS613 y LY530ALH) suelen tener solamente movimientos de yaw.

En relación a la precisión de los tres sensores, se observa que el ADXRS613 tiene un menor valor de fondo de escala a costa de una mayor sensibilidad, lo que resulta deseable en aplicaciones de control de precisión. Otra de las diferencias entre ambas familias (AD / ST) es la diferencia en la alimentación. Aquí por lo tanto se observa que debe tomarse una decisión en conjunto con la elección del microprocesador. En el caso de usar microprocesadores con tensiones de alimentación de 5V es deseable que el sensor también tenga una alimentación de 5V.

1.2. Elección de una solución

Luego de las diferencias presentadas para cada uno de los componentes principales, se decidió utilizar el microprocesador de Freescale HCS12 por la gran cantidad de periféricos que ofrece, su alta tasa de confiabilidad y las posibilidades de expansión que ofrece. En este marco, resulta natural la inclusión de los acelerómetros y giróscopos de 5V de alimentación (ADXL203 y ADXRS613)

1.3. DFMEA

TABLA III. DFMEA

| Daughterboard | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|---|---|---|--|---|---|---|-----|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN |
| Alimentación | Consumo excesivo | Posiblemente se queman los cables de alimentación. Posiblemente el sistema no arranca o funciona un tiempo corto. | 7 | 2 | Cortocircuito en la alimentación | Reglas contra el ruteo de cortocircuitos | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre las entradas de alimentación. | 2 | 28 |
| Alimentación | Subtensión en la alimentación | El sistema no responde | 6 | 2 | Resistencia excesiva en las pistas de alimentación | Utilización de conectores conocidos/ revisión de largos de las pistas de alimentación | Medición de la alimentación en los dispositivos. | 2 | 24 |
| Alimentación | Ripple excesivo en la alimentación | El sistema responde por períodos aleatorios y luego se reinicia | 5 | 3 | Capacitores de desacople mal calculados, alejados o inexistentes | Revisión de esquemáticos para chequeo de desacoples. | Medición de alimentación en los diferentes dispositivos. | 2 | 30 |
| Comunicación I/O | Comunicación cruzada | El sistema tiene funcionamiento errático | 5 | 2 | Error en el ruteo de las señales | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Medición de continuidad entre pines de comunicaciones. | 2 | 20 |
| Comunicación I/O | Comunicación cortada | El sistema no detecta una de las señales | 4 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Medición de continuidad entre pines de comunicaciones. | 2 | 16 |

| Daughterboard | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|--|--|---|-----|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN |
| Comunicación I/O | Ruido excesivo en la comunicación | Detección errática de una de las señales. | 3 | 3 | Pistas de comunicación demasiado largas/ EMI excesivo | Revisión de esquemáticos/ Reglas contra distancia mínima entre pistas. | Medición de las señales durante el funcionamiento | 2 | 18 |
| Microprocesador | Falta de alimentación | El sistema no arranca | 7 | 1 | Alimentación mal ruteada. | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Medición de tensión en las alimentaciones del integrado. | 1 | 7 |
| Microprocesador | Sobretensión en la alimentación | El microprocesador se quema | 8 | 1 | Error en la selección de la tensión de alimentación del microprocesador | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las alimentaciones y las especificaciones del microprocesador | 1 | 8 |
| Microprocesador | Subtensión en la alimentación | El microprocesador no arranca | 7 | 1 | Error en la selección de la tensión de alimentación del microprocesador | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las alimentaciones y las especificaciones del microprocesador | 1 | 7 |

| Daughterboard | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------------|---|---|---|---|--|--|---|-----|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN |
| Microprocesador | Ripple excesivo en la alimentación | El microprocesador se resetea esporádicamente | 6 | 1 | Error en la selección del ripple mínimo aceptado por el microprocesador | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las alimentaciones y las especificaciones del microprocesador | 1 | 6 |
| Microprocesador | Sobretensión en una entrada | La entrada se quema y deja de responder. El microprocesador puede quemarse. | 8 | 1 | Error en la selección de tensiones de entrada aceptadas por el microprocesador. | Revisión en los circuitos de protección. | Comparación entre la medición de las entradas y las especificaciones del microprocesador | 1 | 8 |
| Microprocesador | Sobretensión en una salida | La salida cesa de funcionar/ puede quemar circuito de protección. | 8 | 1 | Error en la selección de tensiones de salida provistas por el microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las salidas y las especificaciones de la placa | 1 | 8 |

| Daughterboard | | | | | | | | | |
|-----------------|--|---|---|---|---|--|--|---|-----|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN |
| Microprocesador | Subtensión en una salida | La salida no cumple con especificación. La salida puede no ser detectada. | 6 | 1 | Error en la selección de tensiones de salida provistas por el microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las salidas y las especificaciones de la placa | 1 | 6 |
| Microprocesador | Subtensión en una entrada | La entrada no se detecta | 6 | 1 | Error en la selección de tensiones de entrada aceptadas por el microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Comparación entre la medición de las entradas y las especificaciones del microprocesador | 1 | 6 |
| Microprocesador | Cantidad de puertos de salida insuficientes | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Ruteo imposible | 1 | 5 |
| Microprocesador | Cantidad de puertos de entrada insuficientes | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Ruteo imposible | 1 | 5 |

| Daughterboard | | | | | | | | | |
|-----------------|---|--|---|---|---|---|--------------------------|---|-----|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN |
| Microprocesador | Cantidad de salidas PWM insuficientes | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Ruteo imposible | 1 | 5 |
| Microprocesador | Cantidad de pines para comunicación SCI insuficientes | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Ruteo imposible | 1 | 5 |
| Microprocesador | Falta de entrada para USB | No se cumple con la especificación | 6 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Ruteo imposible | 1 | 6 |
| Microprocesador | Velocidad de procesamiento insuficiente | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Medición de performance. | 1 | 5 |
| Microprocesador | Memoria interna insuficiente | No se cumple con la especificación | 5 | 1 | Error en la selección del microprocesador. | Revisión en la selección del microprocesador | Imposible programación. | 1 | 5 |
| Microprocesador | Imposibilidad de programación | No es posible modificar el programa del microprocesador. | 8 | 2 | Error en el ruteo del sistema de programación | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Imposible programación. | 1 | 16 |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|--|--|--|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| Entradas A/D | Sobretensión a la salida | La entrada deja de responder. Posiblemente se quema el pin correspondiente del microprocesador. | 6 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de sistema de protección y sus valores | Medición de la salida del conversor | 2 | 24 | |
| Entradas A/D | Subtensión a la salida | La entrada deja de responder. | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de sistema de protección y sus valores | Medición de la salida del conversor | 2 | 20 | |
| Entradas A/D | Saturación de la salida en baja tensión | Medición de tensiones bajas tienen error. | 4 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de sistema de protección y sus valores | Medición de la salida del conversor | 2 | 16 | |
| Entradas A/D | Saturación de la salida en alta tensión | Medición de tensiones altas tienen error. | 4 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de sistema de protección y sus valores | Medición de la salida del conversor | 2 | 16 | |
| Entradas A/D | El conversor no tiene suficientes bits | Baja precisión en la medición | 5 | 1 | Incorrecta selección de los conversores | Revisión de componentes seleccionados con respecto a las especificaciones. | Medición de la salida del conversor | 1 | 5 | |
| Entradas A/D | Señal no llega al conversor | La entrada no funciona | 6 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Reglas de ruteo contra pistas faltantes. | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre la entrada y el conversor | 2 | 24 | |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|--------------|---|---------------------------------|---|---|--|--|---|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| Entradas A/D | Señal del conversor no llega al pin de salida | La entrada no funciona | 8 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Reglas de ruteo contra pistas faltantes. | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre el conversor y la salida | 2 | 32 | |
| Salidas PWM | Sobretensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Salidas PWM | Subtensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Salidas PWM | Saturación de la salida en baja tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Salidas PWM | Saturación de la salida en alta tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Salidas PWM | La señal no llega a la salida | La salida no funciona | 7 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Reglas de ruteo contra pistas faltantes. | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre el puerto y la salida | 2 | 28 | |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|--------------|---|---------------------------------|---|---|--|--|--|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| Puertos O | Sobretensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Puertos O | Subtensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Puertos O | Saturación de la salida en baja tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Puertos O | Saturación de la salida en alta tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| Puertos O | La señal no llega a la salida | La salida no funciona | 7 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Reglas de ruteo contra pistas faltantes. | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre el puerto y la salida | 2 | 28 | |
| SCI | Sobretensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|--------------|---|---------------------------------------|---|---|--|--|-------------------------|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| SCI | Subtensión en la salida | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado o ausente | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| SCI | Saturación de la salida en baja tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| SCI | Saturación de la salida en alta tensión | Salida fuera de especificación | 5 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 20 | |
| SCI | Niveles de tensión de entrada incorrectos | La entrada no funciona | 7 | 2 | Acondicionamiento de la señal mal diseñado. | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 28 | |
| Puertos I | Saturación de la salida en baja tensión | La entrada no puede ser interpretada. | 6 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 24 | |
| Puertos I | Saturación de la salida en alta tensión | La entrada no puede ser interpretada. | 6 | 2 | Sistema de protección mal diseñado | Revisión de los esquemáticos y de los valores de las protecciones. | Medición de las salidas | 2 | 24 | |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|---|---|--|---|--|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| Puertos I | Señal del puerto no llega al pin de salida | La entrada no funciona | 7 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Reglas de ruteo contra pistas faltantes. | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo/ Medición de continuidad entre el puerto y la entrada | 2 | 28 | |
| Comunicación Daughterboard | Conexiones cruzadas | Las conexiones cruzadas no funcionan. | 6 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo / medición de las conexiones | 2 | 24 | |
| Comunicación Daughterboard | Conexiones faltantes | Las conexiones faltantes no funcionan | 6 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo / medición de las conexiones | 2 | 24 | |
| Comunicación Daughterboard | Conexiones erróneas | Las comunicaciones que se encuentran mal conectadas no funcionan | 6 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo / medición de las conexiones | 2 | 24 | |
| Giróscopo/ Acelerómetro | Alimentación errónea | El giróscopo y el acelerómetro no funcionan. Posiblemente se quemen. | 6 | 1 | Error en la selección de la tensión de alimentación del giróscopo / acelerómetro | Revisión en la selección del giróscopo /acelerómetro | Medición de alimentación del giróscopo / acelerómetro y comparación con hoja de datos. | 1 | 6 | |

| Motherboard | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---|---|---|--|---|---|---|-----|--|
| Ítem/Función | Modo de Falla | Potenciales efectos de la falla | S | O | Causas | Control de prevención | Control de detección | D | RPN | |
| Giróscopo/ Acelerómetro | Menor cantidad de bits que lo especificado | Las mediciones de aceleración y ángulo no tendrán la precisión especificada | 4 | 1 | Error en la selección de la cantidad de bits del giróscopo/ acelerómetro | Revisión en la selección del giróscopo /acelerómetro | Revisión de mediciones del instrumento | 1 | 4 | |
| Giróscopo/ Acelerómetro | señales no llegan a los puertos | Las mediciones de aceleración y ángulo no funcionan | 6 | 2 | Error de ruteo o cortocircuito | Revisión de esquemáticos / Reglas contra unión de nets diferentes | Informe de ruteo generado por el programa de ruteo / medición de las conexiones | 2 | 24 | |
| Alimentación | Sobretensión | Las protecciones se queman/ posiblemente se queman algunos componentes. | 8 | 3 | Error en el diseño de la fuente | Revisión de esquemáticos / utilización de fuentes ya probadas | Medición de la alimentación. | 2 | 48 | |
| Alimentación | Subtensión | El microprocesador no arranca/ el sistema no funciona | 7 | 3 | Error en el diseño de la fuente | Revisión de esquemáticos / utilización de fuentes ya probadas | Medición de la alimentación. | 2 | 42 | |
| Alimentación | Ripple excesivo | Posiblemente el microprocesador se resetea esporádicamente. | 5 | 3 | Error en el diseño de la fuente | Revisión de esquemáticos / utilización de fuentes ya probadas | Medición de la alimentación. | 2 | 30 | |

2. FACTIBILIDAD DE TIEMPOS.

2.1. Planificación (PERT y simulación de Montecarlo)

En esta sección se presenta un análisis de factibilidad temporal mediante el método PERT. Para la realización de dicho análisis, primero se debieron identificar las etapas de interés junto a las sub-etapas que las componen, para luego establecer tiempos optimistas, pesimistas y medios para dichas tareas.

TABLA IV. Tabla de Duraciones del Proyecto

| Tarea | Tiempo Optimista (días) | Tiempo Pesimista (días) | Tiempo Medio (días) | Tiempo Estimado (días) |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| Definición del proyecto | 15 | 30 | 20 | 20.83 |
| Investigación de mercado | 20 | 40 | 30 | 30 |
| Definición del producto | 10 | 18 | 14 | 14 |
| Análisis de Factibilidad | 20 | 35 | 25 | 25.83 |
| Definición de la Motherboard | 8 | 12 | 10 | 10 |
| Módulo de alimentación | 10 | 20 | 14 | 14.33 |
| Módulo PWM | 7 | 20 | 15 | 14.5 |
| Módulo SCI/USB | 5 | 7 | 5 | 5.33 |
| Módulo ADC | 5 | 7 | 5 | 5.33 |
| Módulo I/O | 5 | 7 | 5 | 5.33 |
| Módulo Wless | 7 | 14 | 10 | 10.16 |
| Módulo de sensores | 7 | 14 | 10 | 10.16 |
| Layout Motherboard | 15 | 30 | 20 | 20.83 |
| Definición de la Daughterboard | 8 | 12 | 10 | 10 |
| Módulo de alimentación | 4 | 14 | 6 | 9 |
| Layout Daughterboard | 7 | 14 | 7 | 8.16 |

Luego de haber definido los tiempos correspondientes a las etapas y sub-etapas del proyecto, se realiza una tabla detallada con un análisis de precedencias y con el ejecutor de cada tarea.

TABLA V. Tabla de Precedencias y Asignación de Ejecutores.

| o. | Tarea | Tiempo Estimado (días) | Precedencia | Ejecutor |
|----|------------------------------|------------------------|-------------|---------------------------------|
| | Definición del proyecto | 20.83 | | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| | Investigación de mercado | 30 | 1 | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| | Definición del producto | 14 | 2 | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| | Análisis de Factibilidad | 25.83 | 3 | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| | Definición de la Motherboard | 10 | 4 | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| | Módulo de alimentación | 14.33 | 5 | Gaviglio |
| | Módulo PWM | 14.5 | 6 | Couto |
| | Módulo SCI/USB | 5.33 | 6 | Giudice |

| | | | | |
|---|--------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------|
| | Módulo ADC | 5.33 | 6 | Gaviglio |
| 0 | Módulo I/O | 5.33 | 6 | Matus |
| 1 | Módulo Wless | 10.16 | 6 | Giudice |
| 2 | Módulo de sensores | 10.16 | 6 | Couto |
| 3 | Layout Motherboard | 20.83 | 7,8,9,10,11,12,16 | Matus |
| 4 | Definición de la Daughterboard | 10 | 4 | Couto, Gaviglio, Giudice, Matus |
| 5 | Módulo de alimentación | 9 | 14 | Couto |
| 6 | Layout Daughterboard | 8.16 | 15 | Matus |

2.2. Programación (Gantt)

Para el análisis de programación del proyecto, primero se desarrolla un estudio estadístico del camino crítico mediante el método Montecarlo. Para realizar el mismo se corrieron diez mil (10000) iteraciones del proceso aplicando distribuciones beta para cada tarea, utilizando como parámetros característicos los presentados en la TABLA IV. El resultado obtenido es la finalización del proyecto entre 163,7 y 188,2 días laborales a partir de la fecha de inicio propuesta, con una probabilidad del 90%. En la Fig.4 se puede apreciar el resultado de dicha simulación, junto a sus parámetros característicos y la aproximación gaussiana más adecuada.

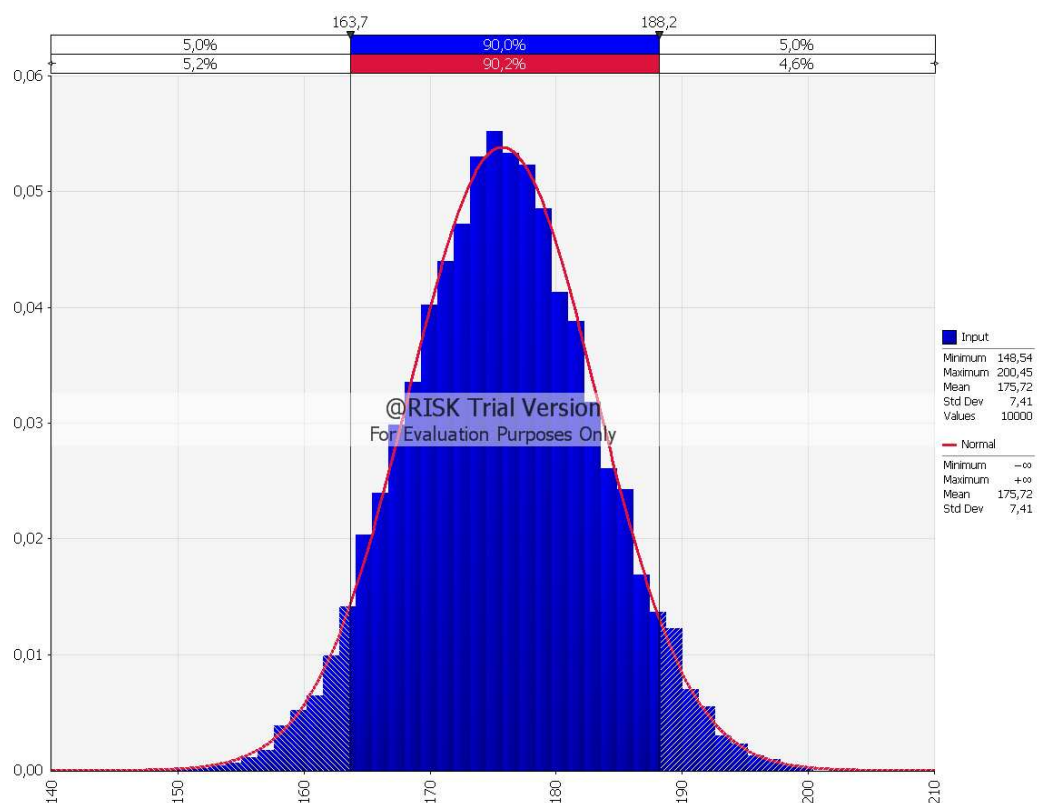


Fig. 4. Simulación Montecarlo con 10000 iteraciones.

A continuación se presenta un diagrama de Gantt del proyecto. El mismo se realizó teniendo en cuenta las precedencias, duraciones de la TABLA V. y los resultados obtenidos del análisis de Montecarlo. Además se tuvo en cuenta que las tareas realizadas por un solo ejecutor no pueden ser realizadas en simultáneo.

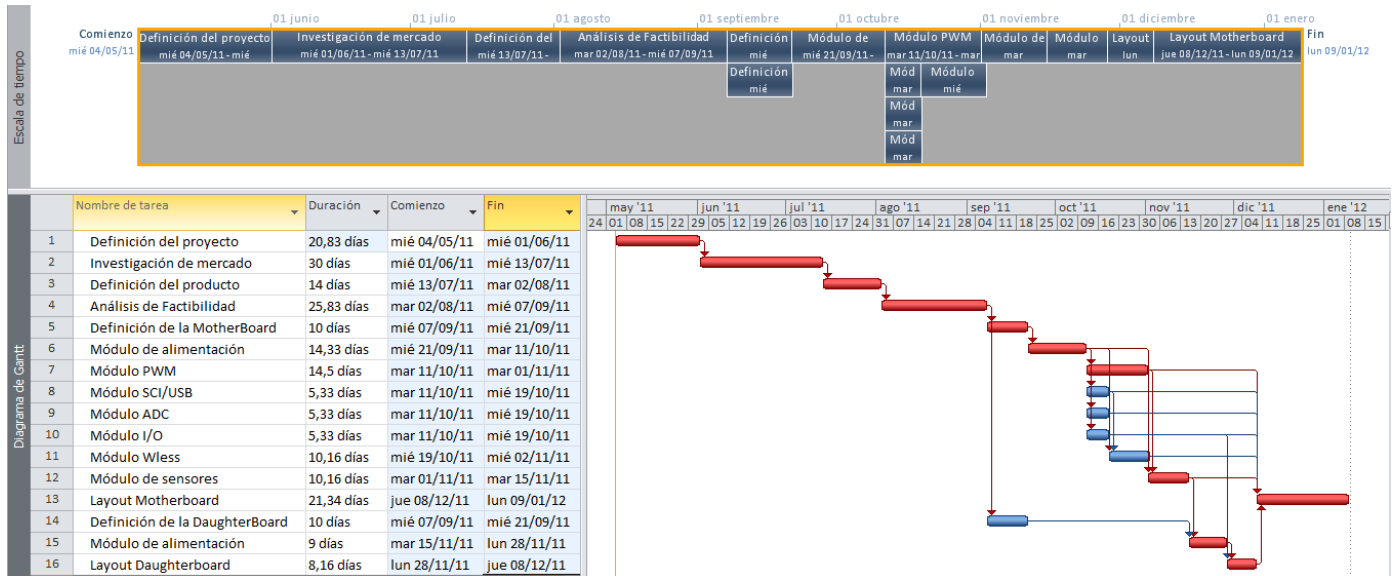


Fig. 5. Diagrama de Gantt. Se marcan en rojo las tareas pertenecientes al camino crítico

3. FACTIBILIDAD ECONOMICA

Para comenzar el análisis económico primero deberemos concluir si nuestro producto es un tomador de precios o si el mismo fijara un precio de mercado. Para ello comenzaremos por analizar el mercado actual en la Argentina.

3.1 Mercado

El producto será insertado en un nicho comercial carente en la Argentina, los kits de desarrollo para aplicaciones mecatrónicas y de control no se encuentran presentes en el mercado Argentino, pudiendo conseguir los mismo solamente en el exterior.

A continuación se presentan los costos de algunos kits comparables del mercado internacional, como se mencionaron anteriormente en el presente informe. Actualmente no hay kits nacionales comparables.

3.1.1. QIC – Quanser:

Placa de desarrollo especialmente enfocada a ambientes educativos. Posee una configuración Motherboard – Daughterboard que permite utilizar dos microprocesadores de diferente performance.

Microcontrolador: PIC
 Motherboard: US\$ 139
 Daughterboard: US\$ 69
 Total: US\$208

No incluye tasas aduaneras ni envío.

3.1.2. PICDEM™ Mechatronics Demonstration Kit

Kit de desarrollo orientado a proyectos de mecatrónica.

Microcontrolador: PIC

Kit: US\$150

No incluye tasas aduaneras ni envío.

3.2 Costos

Nuestro sistema consta de dos partes de hardware, un Motherboard y una Daughterboard, a continuación hacemos un desglose de los costos de cada uno:

3.2.1 Motherboard

TABLA VI. Costos del Motherboard

| Motherboard | | | |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Descripción | Cantidad | P Unitario | P Total |
| IMU | 1 | \$ 24,000 | \$ 24,00 |
| 93C56 | 1 | \$ 0,520 | \$ 0,52 |
| Capacitor SMD | 18 | \$ 0,029 | \$ 0,53 |
| Polarized Capacitor (Radial) | 4 | \$ 0,083 | \$ 0,33 |
| Diode 1N5819 | 3 | \$ 0,029 | \$ 0,09 |
| Zener 5.1V | 1 | \$ 0,049 | \$ 0,05 |
| Zener 27V | 1 | \$ 0,049 | \$ 0,05 |
| LED SMD | 2 | \$ 0,024 | \$ 0,05 |
| Ferrite Bead | 2 | \$ 0,028 | \$ 0,06 |
| FT2232C | 1 | \$ 3,700 | \$ 3,70 |
| DB_37 | 1 | \$ 0,600 | \$ 0,60 |
| Plug 2,5mm | 1 | \$ 0,200 | \$ 0,20 |
| Bornera 2 vías - 5,08mm | 1 | \$ 0,320 | \$ 0,32 |
| Resistencia SMD | 12 | \$ 0,015 | \$ 0,17 |
| Pines comunes rectos | 1 | \$ 0,003 | \$ 0,00 |
| LM1117IMP-3.3 | 1 | \$ 0,540 | \$ 0,54 |
| LM1117MP-5.0 | 1 | \$ 0,540 | \$ 0,54 |
| MAX3232ECAE | 1 | \$ 0,700 | \$ 0,70 |
| Polyswitch 900mA | 2 | \$ 0,155 | \$ 0,31 |
| Xbee | 1 | \$ 19,000 | \$ 19,00 |
| Cristal | 1 | \$ 1,350 | \$ 1,35 |
| | | Total (USD) | \$ 53,10 |

3.2.2. Daughterboard

TABLA VII. Costos del Daughterboard

| Daughterboard | | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| Descripción | Cantidad | P Unitario | P Total |
| Capacitor Electrolítico | 5 | \$ 0,120 | \$ 0,60 |
| Capacitor SMD | 13 | \$ 0,029 | \$ 0,38 |
| Resistencia SMD | 16 | \$ 0,015 | \$ 0,23 |
| HC12 | 1 | \$ 20,000 | \$ 20,00 |
| Header 2x3 | 2 | \$ 0,500 | \$ 1,00 |
| Header 2x2 | 1 | \$ 0,500 | \$ 0,50 |
| Header 1x40 | 1 | \$ 0,700 | \$ 0,70 |
| MC34064 | 1 | \$ 2,700 | \$ 2,70 |
| Cristal | 1 | \$ 1,570 | \$ 1,57 |
| Zener | 1 | \$ 0,165 | \$ 0,16 |
| switch | 1 | \$ 0,500 | \$ 0,50 |
| Total (USD) | | | \$ 7,09 |

3.3 Ciclo de Vida

El ciclo de vida de nuestro producto se estima en un rango de 3 a 5 años, ya que con las constantes evoluciones de la electrónica, sería erróneo calcular una vida útil mayor. Pero como el mismo se ideó con el concepto Motherboard – Daughterboard, solamente la Daughterboard estaría sujeta a este límite de vida útil, ya que es solo el microcontrolador el que se encuentra sujeto a evolución en principio. El Motherboard será realizado con componentes SMD, y por esa razón, su vida útil es mayor. Como el mismo carecerá de componentes perecederos, como capacitores electrolíticos, no estaría sujeto a un desgaste importante.

Entonces concluimos que nuestro producto tendría un ciclo de vida de la siguiente forma:

- Motherboard: 5 a 8 años
- Daughterboard: 2 a 4 años

3.4 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

Para el presente cálculo, debemos estimar un volumen de producción y una demanda del mercado. Dado el perfil técnico del producto, la demanda en principio, no se espera que sea alta. La capacidad de producción depende en gran medida de la inversión en mecanismos de ensamble, por lo tanto es un factor limitante solo al principio de la producción. La demanda se estima en 5 equipos por año el primer año y calculando que se duplica en cada periodo.

Como se vio en el punto 3.1, el precio de mercado quedará fijado en aproximadamente unos 150 dólares, que junto a las ventajas respecto a los equipos actualmente en el mercado y el hecho de ser un equipo de industria argentina, es un valor más que competitivo.

TABLA VIII. Resumen de Costos

| Costo | |
|----------------------|---------------|
| Motherboard | -53,10 |
| Daughterboard | -7,09 |
| Costo total | -60,19 |

| Precio de venta | |
|---------------------------------|--------------|
| Motherboard | 100 |
| Daughterboard | 50 |
| Total de ventas | 150 |
| Margen bruto de ganancia | 89,81 |

Para el cálculo del valor actual neto y la tasa interna de retorno, nos basamos en el promedio de la vida útil del producto, lo que nos deja un tiempo de 4 años. Para los ingresos brutos se tomo una tasa del 3% y los impuestos a las ganancias un 33%.

TABLA IX. VAN

| Año | 1 | | | | | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Trimestre | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | |
| Ingresos | | | | | | | | |
| Unidades Vendidas | 0 | 2 | 4 | 5 | 7 | 25 | 35 | 40 |
| Precio de Venta | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 | \$ 150,00 |
| Ingresos Totales | \$ 0,00 | \$ 300,00 | \$ 600,00 | \$ 750,00 | \$ 1.050,00 | \$ 3.750,00 | \$ 5.250,00 | \$ 6.000,00 |
| Gastos | | | | | | | | |
| Ingresos Brutos | | \$ -9,00 | \$ -18,00 | \$ -22,50 | \$ -31,50 | \$ -112,50 | \$ -157,50 | \$ -180,00 |
| IVA 21% | | \$ -63,00 | \$ -126,00 | \$ -157,50 | \$ -220,50 | \$ -787,50 | \$ -1.102,50 | \$ -1.260,00 |
| Inversión inicial en Prototipo | \$ -155,60 | | | | | | | |
| Publicidad | \$ -200,00 | \$ -200,00 | \$ -100,00 | \$ -100,00 | \$ -100,00 | \$ -500,00 | \$ -300,00 | \$ -200,00 |
| Servicios | | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -200,00 | \$ -200,00 | \$ -200,00 |
| Mejora continua y desarrollo | | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -50,00 | \$ -200,00 | \$ -100,00 | \$ -50,00 |
| | | | | | | | | |
| Costos de producción | | \$ -150,38 | \$ -300,75 | \$ -375,94 | \$ -526,32 | \$ -1.879,71 | \$ -2.631,60 | \$ -3.007,54 |
| Gastos Totales | \$ -355,60 | \$ -522,38 | \$ -644,75 | \$ -755,94 | \$ -978,32 | \$ -3.679,71 | \$ -4.491,60 | \$ -4.897,54 |
| Flujo Resultante | \$ -355,60 | \$ -222,38 | \$ -44,75 | \$ -5,94 | \$ 71,68 | \$ 70,29 | \$ 758,40 | \$ 1.102,46 |
| Impuestos a las ganancias | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ -23,65 | \$ -23,19 | \$ -250,27 | \$ -363,81 |
| | | | | | | | | |
| Flujo Final | \$ -355,60 | \$ -222,38 | \$ -44,75 | \$ -5,94 | \$ 48,03 | \$ 47,09 | \$ 508,13 | \$ 738,65 |
| | | | | | | | | |
| Tasa | 10% | | | TIR | 29% | IB | 3 | % |
| Valor Actual Neto | \$ 365,00 | USD | | Cambio Dólar | 4 | IG | 33 | % |
| | | | | | | | | |
| Costo variable de produccion X placa | | | Periodo | Inversion | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Materiales | \$ 60,19 | | FFN | \$ -355,60 | \$ -225,05 | \$ 47,09 | \$ 508,13 | \$ 738,65 |
| Mano de Obra | \$ 10,00 | | | | | | | |
| Alquiler | \$ 5,00 | | | | | | | |
| Total | \$ 75,19 | | | | | | | |

4. FACTIBILIDAD LEGAL Y RESPONSABILIDAD CIVIL

4.1. Hardware

Debido a que se trata de una placa de desarrollo, la misma trabajará con tensiones bajas, cómo máximo 12V, la misma será provista con su correspondiente fuente (220V – 12V) homologada por el IRAM, que será adquirida a un proveedor que cuente con certificación de seguridad eléctrica (marca o sello IRAM). La manufactura de dicho sistema se realizara con componentes e insumos presentes en el mercado nacional, por lo tanto al ser adquiridos dentro del país, dentro de su valor se encuentran incorporados los correspondientes impuestos y cargos aduaneros. El único componente que será importado es el conjunto de giróscopos y acelerómetros (de ahora en más placa inercial), los cuales serán adquiridos a través de una firma local, la cual nos ofrece el costo puesto en la argentina con todos los cargos e impuestos propios inherentes.

La placa de desarrollo constara con un modulo de comunicación inalámbrica Xbee, pero al ser de corto alcance (limitado a menos de 30 metros) que no requiere autorizaciones por utilización de frecuencia, siempre y cuando no interfiera con otros equipos.

4.2. Software

El kit de desarrollo se entrega sin ningún software. Por lo tanto no hay inconvenientes legales respecto a dicho asunto.

VIII. INGENIERÍA DEL DETALLE

1. HARDWARE

1.1. Diagrama de bloques

A continuación se muestra un diagrama en bloques del hardware. Como puede observarse, el microprocesador ocupa el lugar central del mismo. A la izquierda se ven las entradas de alimentación, que pueden ser de 3 orígenes distintos. El primero, es una alimentación externa regulada de 5V. El segundo, alimentación de 5V provenientes directamente del puerto USB y el tercero, el de una batería de 9V. En todos los casos, se convierte a 3.3V mediante un regulador lineal.

A la derecha del diagrama se ven las partes relacionadas con la comunicación con la computadora. Se prevén dos tipos de conexiones: la primera y más básica es la necesaria para la programación y será de tipo USB, por razones de compatibilidad. La segunda, es un enlace inalámbrico mediante un módulo Xbee. En el caso de que el microprocesador no tenga una salida USB en forma nativa, será necesario un módulo de conversión serial RS-232 a USB.

Finalmente, hacia abajo y arriba del microprocesador, se encuentran los pines de entrada y salida, respectivamente. Dentro de las entradas, se prevé que los giróscopos y acelerómetros tengan un circuito para amplificar sus salidas analógicas y aumentar el rango dinámico en las aplicaciones que lo necesiten.

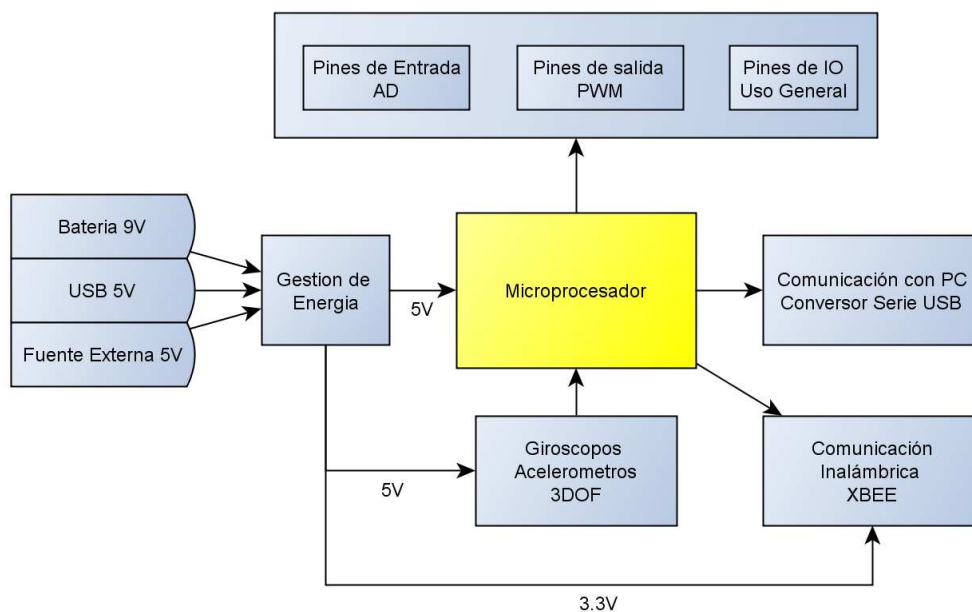


Fig. 6. Diagrama en bloques del hardware.

1.2. Descripción detallada de cada bloque.

El kit se divide en dos placas diferentes: Motherboard y Daughterboard. A continuación se muestran los esquemáticos de cada una de los subsistemas que componen a cada uno de los sistemas más pequeños.

Motherboard

- Alimentación

El bloque alimentación integra todo lo relacionado con el suministro eléctrico y condicionamiento del mismo, para el correcto funcionamiento del sistema.

Para aumentar la versatilidad, el mismo se diseñó de manera tal que le permita al usuario tener alternativas de alimentar el circuito. Está diseñado para funcionar con la tensión que provee el puerto USB, introducirle 5V externos o a través de un terminal DB37 que permite alimentaciones de 6V a 24V (Puede funcionar con un pack de 4 Pilas, una batería de 9V o baterías de Gel, entre otros).

El bloque contiene también los elementos de filtro y protecciones eléctricas necesarias. Los filtros están calculados para filtrar las oscilaciones de alta ($C=0.1\mu\text{F}$, $f>100\text{KHz}$) y baja ($C=100\mu\text{F}$, $f<100\text{Hz}$) frecuencia, para evitar que los elementos constitutivos de la placa de desarrollo fallen o entre en falla por ruido en la alimentación. Los valores de los componentes de filtrado surgen del estudio de la curva de operación de los reguladores lineales, así como las tolerancias mínimas de ruido y ripple soportados por el microcontrolador y demás periféricos.

Las protecciones están presentes en casos de inversión (Diodo), sobre tensión (Diodo Zener) y/o sobre corriente (Polyswitch) (el mismo trabaja en conjunto con el Diodo en caso de inversión).

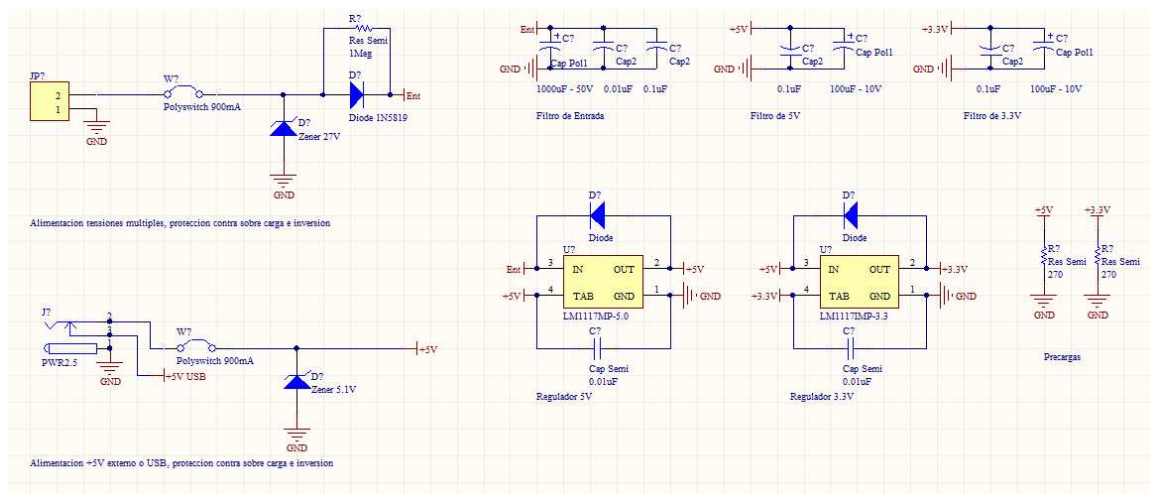


Fig. 7. Esquemático del módulo de alimentación.

- **Giróscopos y Acelerómetros**

Este módulo consiste en un grupo de tres sensores inerciales y los acondicionadores de señal correspondientes para cada uno. Los mismos son 2 acelerómetros (miden aceleración lineal) correspondientes a dos ejes cartesianos (X e Y, según como se instale el kit) y un giróscopo que mide velocidad angular en el movimiento de X hacia Y, brindando 3 grados de libertad al usuario. Además se proporciona la posibilidad de utilizarlos amplificados en caso de manejar leves variaciones o utilizar su salida de forma directa en caso de necesitar todo el rango de medición. Este tipo de sensores son esenciales para el tipo de proyectos para los que está destinada la placa desarrollada y los 3 grados de libertad, sumados a la posibilidad de instalar en cualquier posición el módulo, dan versatilidad al kit de desarrollo.

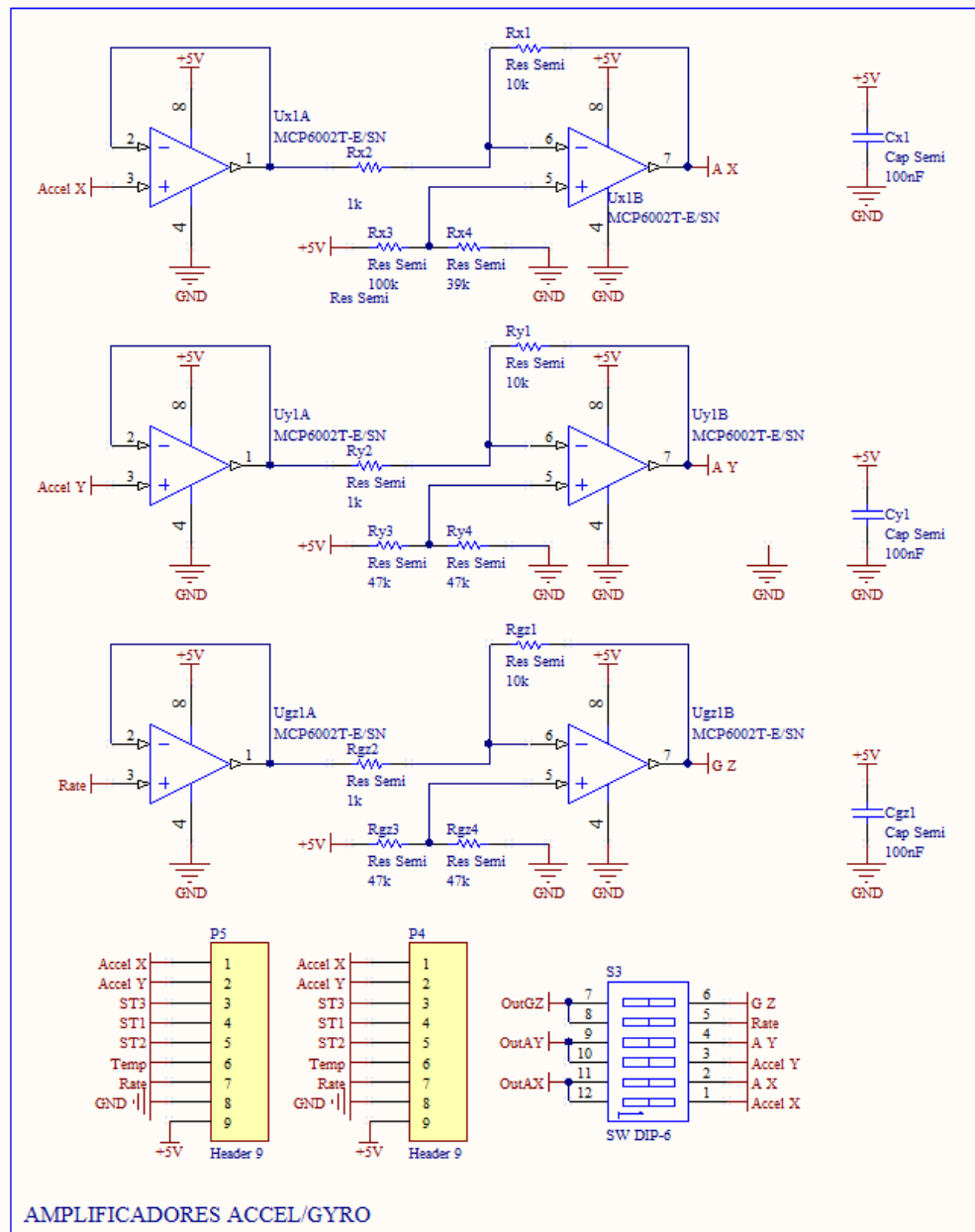


Fig. 8. Esquemático del módulo de sensores.

- Comunicación Xbee

El Xbee es un módulo de comunicación compatible con el protocolo Zigbee que se encuentra en rápido crecimiento. El protocolo permite una comunicación serial en la banda de 2.4GHz de corto alcance. Los módulos requieren de pocos componentes para funcionar, se pueden programar previamente a ser agregados a la placa de desarrollo y permiten una comunicación serial entre dos puntos de forma transparente.

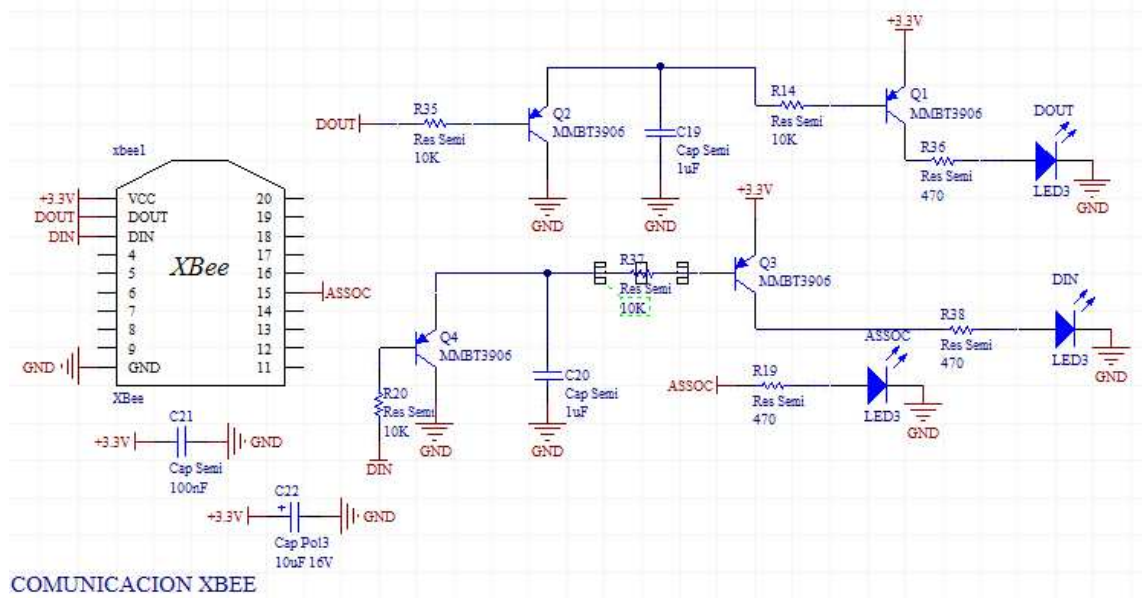


Fig. 9. Esquemático del módulo Xbee

- Comunicación USB

El módulo de comunicación USB junto con un conversor USB serie permite la programación de microprocesadores que no disponen de conexión para USB directa mediante dicho protocolo. Además admite alimentar el kit de desarrollo desde la conexión estándar. Por otra parte permite realizar comunicaciones a dispositivos que posean una conexión USB que hoy en día es una conexión que se encuentra en una amplia gama de dispositivos.

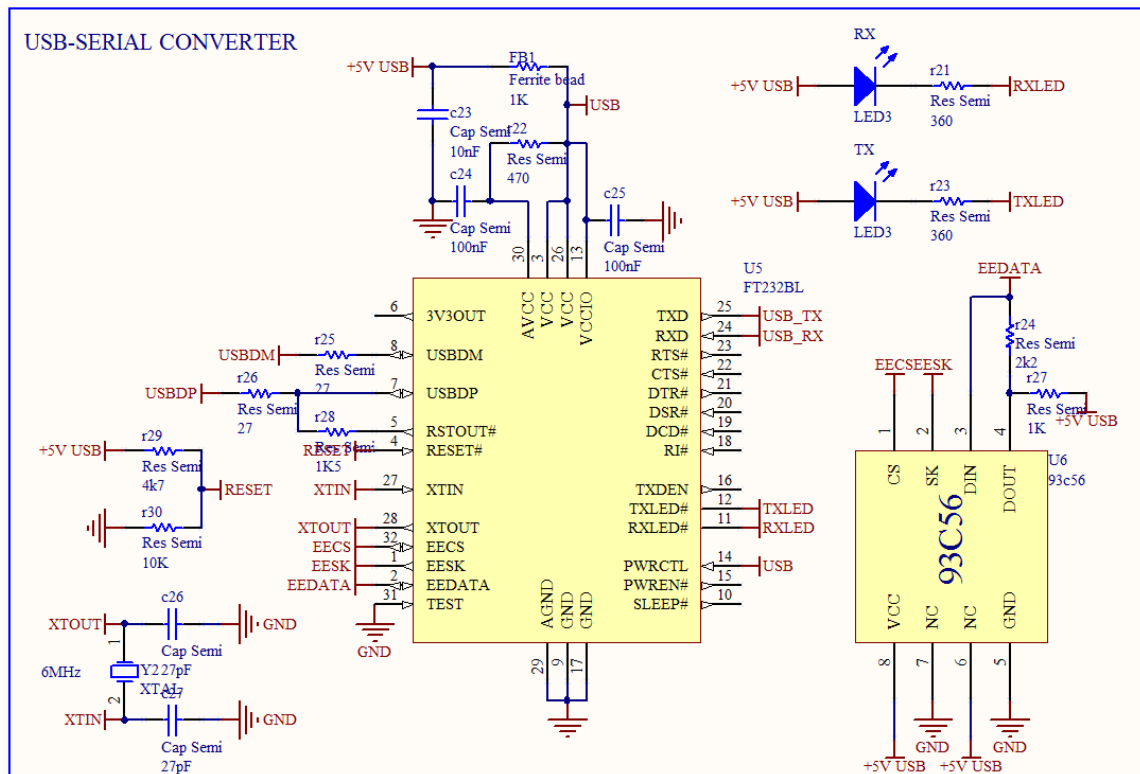


Fig. 10. Esquemático del módulo de comunicación USB.

Daughterboard

El circuito del Daughterboard es básicamente la conexión de los pines y puertos del microprocesador MC9S12 de Freescale, junto con la configuración para su programación (BDM), el circuito de Reset, los desacoplos de la alimentación, la configuración del PLL interno y el circuito del oscilador.

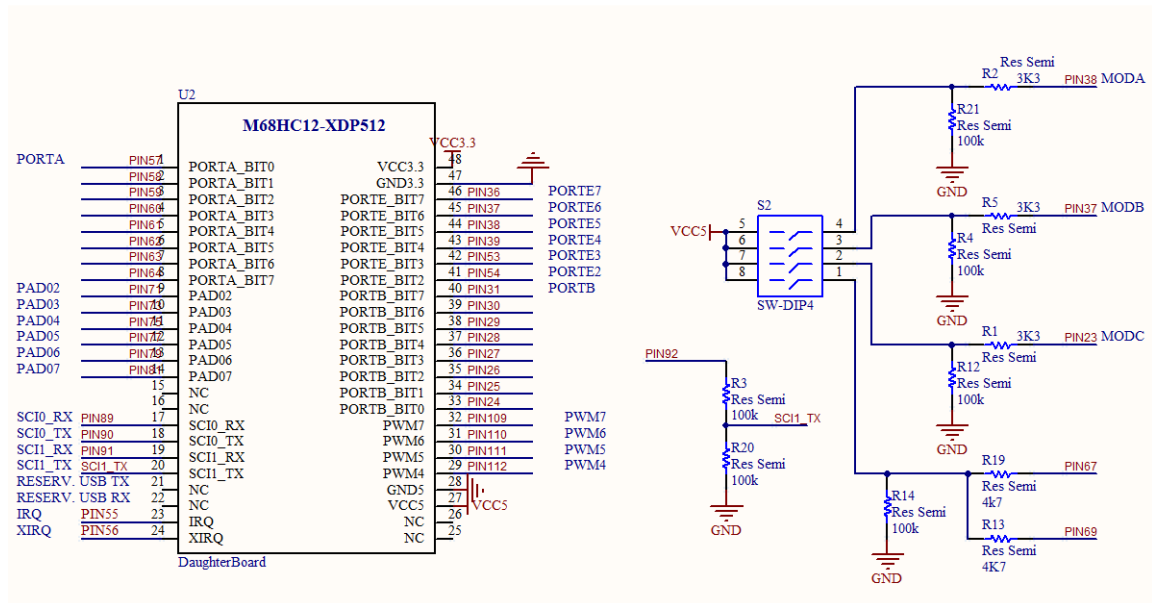


Fig. 11. Esquemático del módulo Daughterboard.

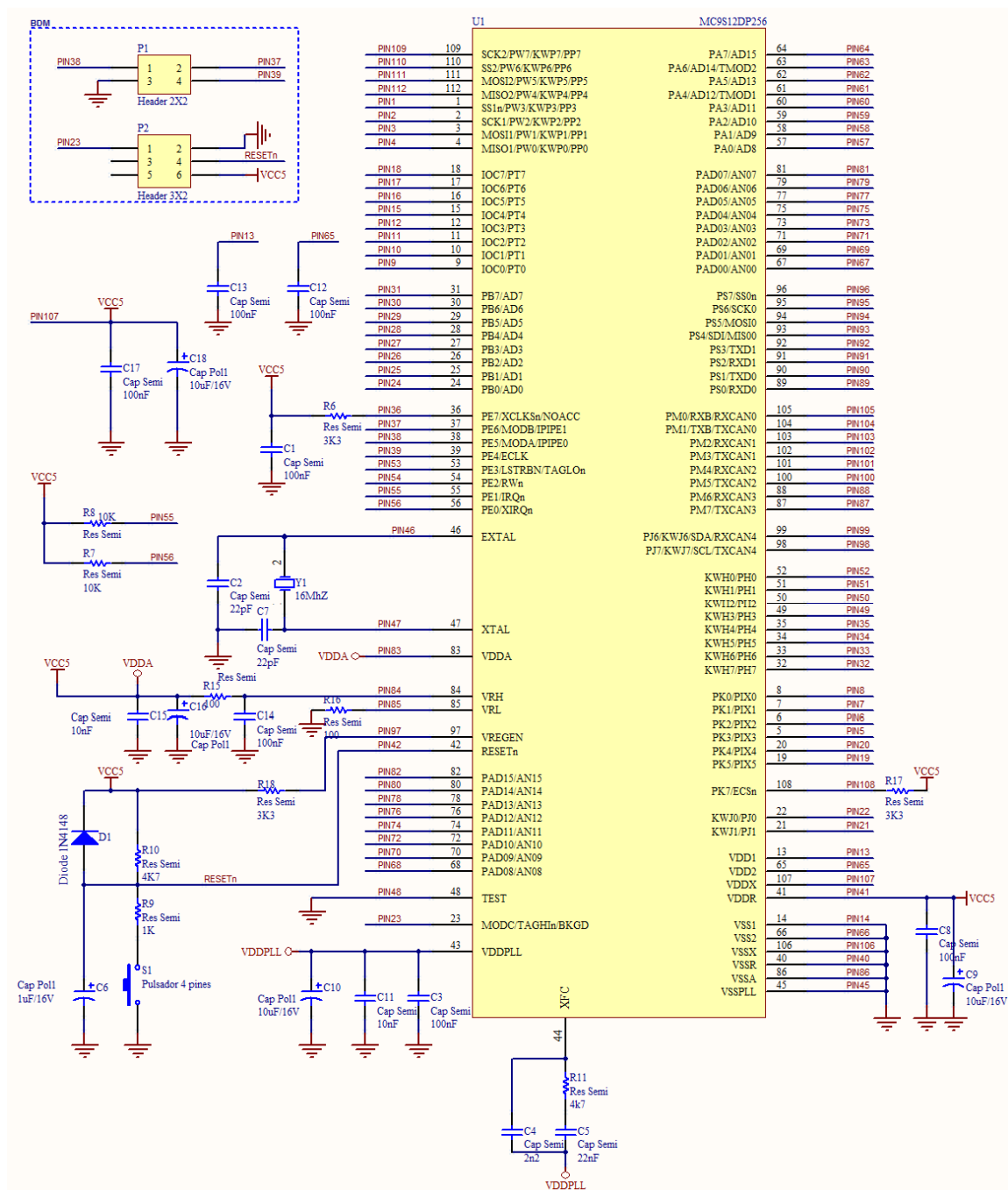


Fig. 12. Esquema de conexión del microprocesador en el Daughterboard.

1.3. Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales de cada bloque

Motherboard

Alimentación

El componente principal que forma el bloque de alimentación es el integrado LM1117, en sus versiones de 3.3V (U4) y 5V (U3). El mismo fue elegido por sus características de caída de tensión (Low Dropout) y la versatilidad de su encapsulado.

El resto de los componentes se agrupan en protecciones pasivas de la placa, en protecciones pasivas de los reguladores y filtrado o desacople.

Las protecciones pasivas de la placa están implementadas por los componentes D7, D8, D11, W1, W2, C28. El diodo 1N5819 (D8) cumple una doble función, no permitir que el capacitor C28 (Electrolítico 100uF 25V) se descargue y proteger el circuito de alimentación de posibles inversiones, se eligió este componente por su velocidad de reacción, bastante superior al de un diodo rectificador común. Si bien C28 es parte del filtro y desacople de fuente, su función es también, oponerse a los picos de tensión transitorios. Los Fusibles (Polyswitchs, W1, W2) cumplen doble función, primero deben proteger al sistema de corto – circuitos y al mismo tiempo trabajan en conjunto con los diodos Zener D7 ($V_z = 27$) y D11 ($V_z = 5.1V$), en el momento que estos llegan a su punto máximo de circulación de corriente los fusibles se abren, protegiendo los zener y lo que es más importante, al circuito.

Las protecciones pasivas de los reguladores están conformadas por los componentes D9, D10, C35, C36, R32, R33. Los diodos D9 y D10 (1N5819) cumplen la función de proteger a los reguladores lineales de inversiones de corriente cuando se apaga el sistema, de esta manera cuando la carga de los capacitores de desacople de fuente C29, C30, C33 y C34, intentan descargarse a través de los regulador los diodos ofrecen un camino alternativo, protegiendo los mismos. Los capacitores C35 y C36 son los desacoples requeridos por el fabricante del regulador para mantener bajo control las diferencia de potencial entre la entrada del mismo y la salida. Las resistencias R32 y R33, son la precarga de los reguladores, para que en ocasión de arranque los mismos se encuentren en su área de trabajo, requiriéndole las mismas 20mA, la corriente mínima de regulación.

El filtrado o desacople está compuesto por los componentes C28, C29, C30, C31, C32, C33 y C34. Los mismos se organizan en: Desacople de fuente (C28, C31, C32), desacople de 5V (C33, C29) y desacople de 3.3V (C34, C30). Para el cálculo de los valores de capacidad de utilizo la ecuación (1), donde f_c es la frecuencia de corte, R_c es la carga y C_d el valor del capacitor de desacople buscado.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_c C_d} \quad (1)$$

Entonces, para un capacitor de 0.1uF, observamos que la frecuencia de corte queda en 100Khz, mientras que para un valor de 100uF queda en 100Hz, corroborando lo explicado anteriormente, de esa manera las altas frecuencias y las bajas frecuencias se encuentran filtradas.

Todos los componentes fueron calculados de manera de poder cumplir con la vida útil prevista para el sistema (Potencia disipada y corrientes máximas).

Giróscopos y Acelerómetros

Para el tipo de aplicaciones a las que está enfocado el kit de desarrollo y debido a la disponibilidad de componentes en el país, se decidió utilizar dos acelerómetros integrados (ADXL203) y un giróscopo (ADXRS613). Se optó por utilizar una placa integrada del tipo IMU (Inertial Measurement Unit) de 3 grados de libertad con los integrados ya soldados dado que el tipo de footprint que presentan los mismos hacen

imposible la construcción de un prototipo sin equipos especiales de soldadura. Esta placa se acoplará con un conector común al módulo Motherboard.

Se optó por estos integrados dado que la precisión que brindan cumple con los requerimientos estudiados para las aplicaciones a las que se destina el producto.

Para brindar más versatilidad al kit, se decidió agregar a este módulo la posibilidad de amplificar la señal que entregan los sensores para el caso en el que no se los utilice en todo su rango de operación, pasando de operar en los 360° de giro a tener un rango máximo de $\pm 25^\circ$.

Para el circuito de acondicionamiento se utilizaron amplificadores operacionales reel to reel MCP6002 para poder aprovechar al máximo el rango de 0 a 5v. En la configuración realizada se utiliza un buffer a la entrada para no cargar los sensores ya que son muy sensibles en este aspecto y un amplificador con selección de offset. Respecto a las resistencias de los tres circuitos acondicionadores se calculan de la misma forma. Estas se dividen en dos bloques:

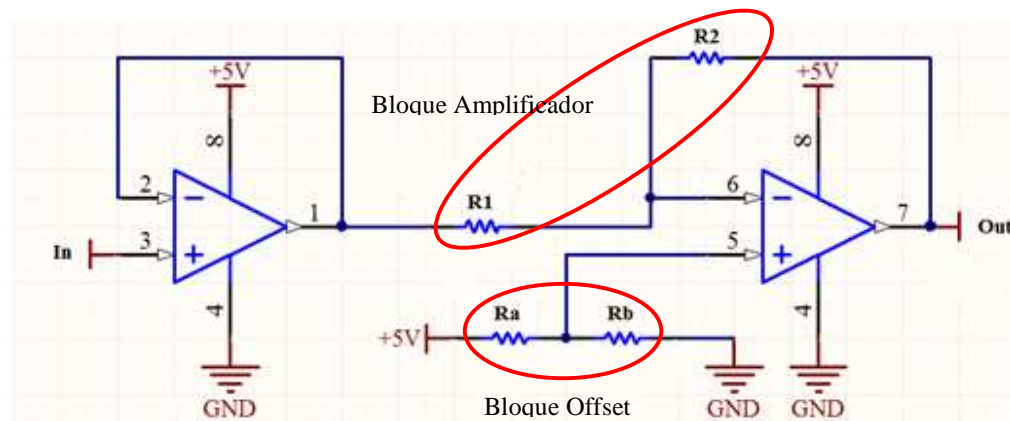


Fig. 13. Circuito de acondicionamiento de los sensores inerciales.

El bloque que establece el offset debe reducir a la mitad la tensión de alimentación para que la señal a la salida se encuentre centrada en el valor medio. Por este motivo ambas resistencias deben ser del mismo valor. Además se desea que el consumo de este bloque sea bajo, pero también la corriente que atraviesa las resistencias no debe ser comparable con la corriente de polarización que utiliza el amplificador. Dado que esta última es del orden de los nA, se optó por utilizar dos resistencias de 47k Ω , con lo cual la corriente ronda en los μ A, dando un buen margen a la corriente y asegurando un consumo bajo. También es importante mencionar que el valor utilizado se eligió ya que es un valor común en todo el módulo Motherboard, lo cual permite comprar componentes en cantidad y conseguir mejores precios, además de ser más cómodo y rápido soldar componentes del mismo valor.

El bloque amplificador se calculó para que en un rango de $\pm 25^\circ$, la salida pase de variar aproximadamente 0,5V a 5V centrada en 2,5V. Esto resulta en una amplificación de 10 veces, por lo cual dada la ecuación del amplificador:

$$Ganancia = -\frac{R_2}{R_1}$$

Se toma R_2 de 100k Ω y R_1 de 10k Ω . Dichos valores se toman de forma que el bloque disipe la menor potencia posible, añadiendo el menor ruido posible al circuito. El hecho de que el amplificador sea inversor, afecta la salida de los sensores, por lo cual se debe tener en cuenta que la señal amplificada se invierte respecto a la no amplificada. Además se añade al circuito un buffer para evitar problemas de impedancias con los sensores inerciales.

Comunicación Xbee

El módulo XBEE fue diseñado para requerir la mínima cantidad de componentes posible. El integrado seleccionado es un XBEE-PRO (que puede ser reemplazado con un XBEE sin requerir ningún cambio en la placa). El XBEE-PRO permite comunicaciones de hasta 1.5km en zonas descampadas y de 90m en zonas urbanas, permitiendo comunicaciones a distancias aceptables para el desarrollo de sistemas mecatrónicos móviles.

Para la operación mínima del módulo no se requieren componentes, solo conectarlo a una alimentación de 3.3V y a las líneas de envío y recepción de datos serie correspondientes. Para la comodidad del usuario a la hora de comprobar si el sistema se está comportando de manera correcta se optó por una instalación que además incluye tres leds que indican el estado del módulo:

- Led amarillo (ASSOC): muestra el estado del módulo según se está listo para usar, en espera o enviando/recibiendo datos,
- Led rojo (DIN): indica recepción de datos,
- Led verde (DOUT): indica envío de datos.

Estos leds permiten al usuario controlar visualmente si el módulo se encuentra activo y la correcta recepción/envío de datos.

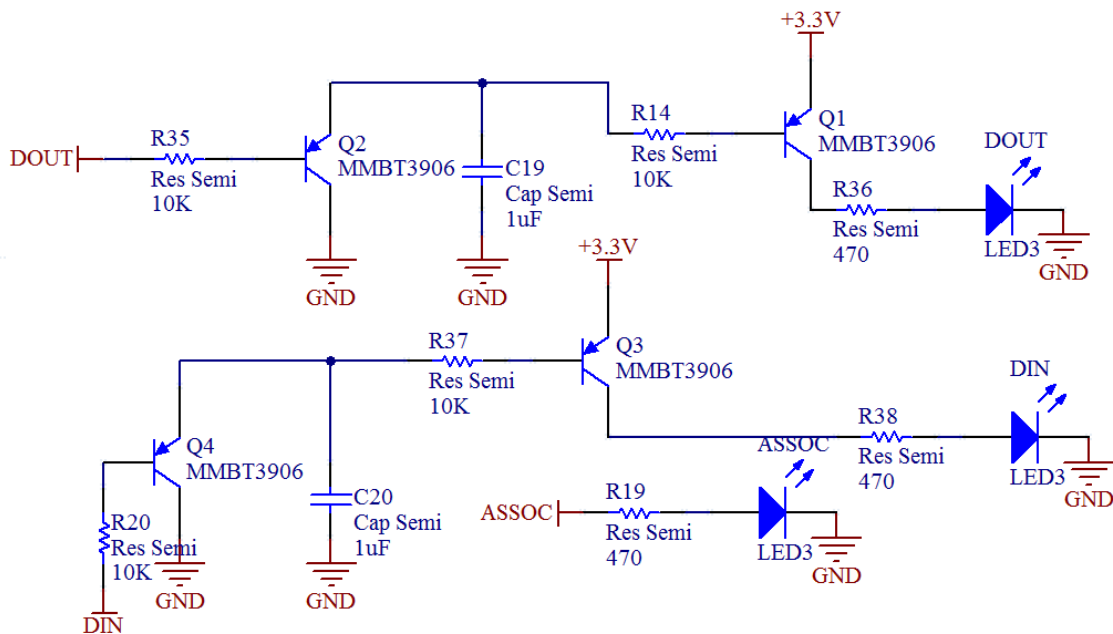


Fig. 14. Esquema de leds de estado en el Xbee.

Como el módulo es incapaz de entregar la corriente necesaria para el manejo de los leds de envío y recepción directamente, y que la señal de control es pulsada y de alta frecuencia, se optó por la utilización de dos transistores PNP MMBT3906 (transistores de uso general) para controlar los leds de transmisión y recepción. Los transistores amplifican la corriente mientras que el capacitor y la resistencia actúan como pasabajos para reducir el parpadeo del led.

Los dos circuitos (correspondientes a DIN y DOUT) son completamente análogos. Por lo tanto, para simplificar la notación se analizará el circuito correspondiente a DIN (transistores Q3 y Q4).

Dado que la señal de DIN es binaria, puede tomar solamente dos valores: 0 y 3.3V. De este modo, el análisis que se realiza puede separarse en dos partes (DIN=0, DIN=3.3V).

Caso 1: DIN=0

En este caso se observa que Q4 se polariza en saturación y entre el emisor y el colector circula la corriente de saturación del transistor. La tensión de saturación entre emisor y colector es 300mV por lo tanto, por R37 circula una corriente igual a:

$$I_{R37} = \frac{3,3V - 0,9V - 0,3V}{10K\Omega} = 210\mu A$$

En este momento, el transistor Q3 también se encuentra polarizado en saturación y por lo tanto entre el colector y emisor circulará una corriente igual a:

$$I_{R38} = \frac{3,3V - 0,9V - 1,8V}{470\Omega} = 1,2\mu A$$

Donde el led se enciende y sobre él cae una tensión de 1,8V (se asume la tensión de caída para un led rojo) circulando entonces aproximadamente 1mA.

Cabe resaltar que este análisis no contempla en ningún momento la existencia del capacitor entre colector y emisor de Q4. En este caso se observa que la carga y descarga de ese capacitor funciona como un filtro pasabajos para la señal de entrada. La frecuencia de corte se calcula como

$$f_{LP} = \frac{1}{2\pi R37 * C20} \cong 160Hz$$

Debe remarcarse que no resulta determinante para el funcionamiento del circuito que la frecuencia de corte sea exactamente la estipulada ya que su único objetivo es permitir al usuario determinar la presencia o ausencia de paquetes en el canal de comunicaciones y no determinar con exactitud el inicio y fin de un paquete, o incluso su contenido, en forma visual. Esto sugiere por lo tanto, que estos componentes pueden elegirse acorde a disponibilidad y no requieren ser de alta precisión.

Caso 2: DIN=3,3V

En este caso, ambos transistores se encuentran en corte y por lo tanto no circula corriente en emisor y colector. El capacitor, si se encontraba descargado, se carga hasta llegar a VCC-VBEon, que es aproximadamente igual a 2,4V. En este momento Q4 también se corta dejando de circular corriente por él, apagándose el led e indicando que no hay datos siendo transmitidos.

Comunicación USB

El puerto USB inalterado y la opción serie se seleccionan mediante dos llaves que se encuentran en el Motherboard. Las señales seleccionadas se envían a dos conectores que corresponden a los pines del Daughterboard.

En lo que respecta al conversor USB-serie, el mismo se alimenta directamente del puerto USB, actuando como esclavo, y se desenergiza si el mismo se encuentra desconectado minimizando el consumo de energía.

El módulo USB-serie se compone principalmente de dos integrados, un FT232BL, el conversor propiamente dicho, y un 93c56, una memoria EEPROM para almacenar la configuración del conversor. Tomando en cuenta que son integrados digitales y que todas sus entradas de configuración se controlan por nivel los integrados no requieren muchos más componentes.

Para comodidad del usuario se decidió agregar dos leds que mostraran el estado del USB. Un led rojo parpadea cuando un paquete está siendo recibido y uno verde parpadea cuando se envía un paquete.

Daughterboard

Cada uno de los valores de los componentes de estos bloques se encuentra especificado por el fabricante, así como también la forma de disponerlos en el PCB. Por lo tanto, se decidió respetar los valores sugeridos por el fabricante, por el hecho de no contar con especificaciones internas como para intentar maximizar alguna variable del diseño.

Se tomo especial cuidado en respetar la forma en la que el plano de masa está diseñado, buscando que sea igual a la que el fabricante especifica en su hoja de datos.

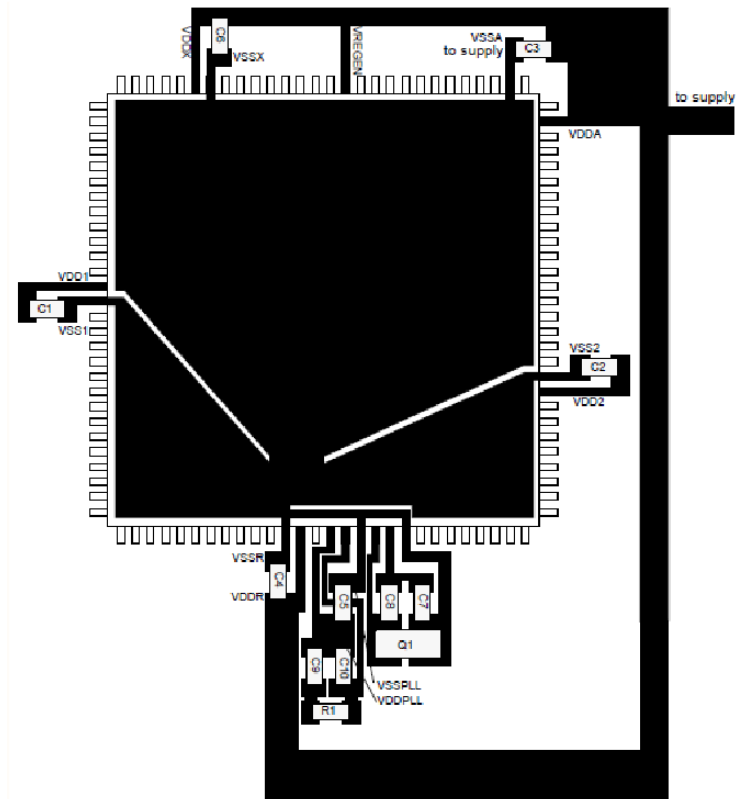


Fig. 15. Esquema de ubicación de los componentes junto con el correspondiente plano de masa.

1.4. Plan de pruebas de cada modulo

El plan de pruebas se divide en dos secciones, la comprobación del correcto funcionamiento de los protocolos de comunicación de la placa (USB y XBEE) y la comprobación del correcto funcionamiento de los puertos, los PWM, los ADC, el giróscopo y los acelerómetros.

Para comprobar el correcto funcionamiento de los protocolos de comunicación se conectan las líneas de envío y recepción del USB, y similarmente las del XBEE. En esta topología ambos se comportan como un loopback por lo que todos los datos enviados deben recibirse nuevamente por el canal. Utilizando las terminales provistas por los fabricantes y una laptop se corrobora que este sea el caso. De no serlo uno de los módulos presenta problemas y debe ser inspeccionado.

Para realizar esta experiencia se debe desconectar la Daughterboard y colocar el XBEE en su zócalo. Una vez hecho esto se conectan, del zócalo del Daughterboard, los pines 17 con 18 y 19 con 20. Una vez realizado esto, se conecta un cable USB a la placa y se le envían datos desde una laptop utilizando una terminal. Si en la misma se reciben los mismos datos enviados la placa funciona correctamente. Luego similarmente se conecta el módulo XBEE a una laptop y se le envían datos desde una terminal provista por el fabricante de los módulos. Si se reciben los datos enviados desde la laptop entonces el módulo funciona correctamente. Debe tomarse en cuenta que el módulo XBEE requiere que la placa esté alimentada por lo que la misma debe conectarse de alguna de las maneras disponibles en el kit.

Para revisar el correcto funcionamiento de las demás entradas y salidas de la placa de desarrollo se provee una placa de pruebas. La misma permite corroborar el correcto funcionamiento de los puertos de entrada/salida, los PWM, los ADC, los acelerómetros y los giróscopos. La placa de pruebas se compone de una serie de leds y un programa que debe ser cargado en el microprocesador de la Daughterboard. Al tener la placa un display completamente visual la misma permite la comprobación visual del correcto funcionamiento del módulo.

Fig. 16. Esquemático de la placa de verificación.

PWMs y ADCs

La placa de pruebas genera tres señales analógicas controladas por tres potenciómetros lineales. Las mismas son suministradas a las tres entradas ADC de la placa. Mediante el programa las mismas se convierten en señales PWM que reflejan en promedio la tensión recibida y se las muestra en tres leds rojos de la placa de pruebas. Por lo tanto la modificación de la posición de cada uno de los potenciómetros debería generar un cambio en la intensidad de uno de los tres leds mencionados correspondientemente. De no ser así uno de estos módulos no se encuentra funcionando correctamente.

Puertos y acelerómetros:

Cada acelerómetro se ingresa al microprocesador dentro de la placa de desarrollo. Las señales son convertidas por tres ADCs internos del microprocesador. El programa de prueba convierte estas señales en ocho niveles que luego se muestran encendiendo el bit correspondiente en los puertos A y B. Por lo tanto modificar la inclinación de la placa de desarrollo debería mover correspondientemente el bit encendido de la placa de pruebas.

Giróscopo

Similarmente a los acelerómetros el giróscopo se encuentra conectado internamente a un ADC del microprocesador. La señal se digitaliza y se la reenvía a la placa de desarrollo mediante un PWM cuyo ciclo de trabajo es equivalente a las cuentas registradas por el ADC. Esta señal se encuentra conectada a un led en la placa de pruebas por lo que el mismo debería encenderse cuando la placa se encuentra realizando un movimiento rotacional.

Puerto E

El puerto E se encuentra conectado a un contador binario por lo que el mismo debería modificarse acordeamente incrementando su valor a medida que pasa el tiempo.

El plan de pruebas principal para los dos módulos será utilizando el kit de desarrollo en una aplicación existente y funcional que utilice todos los periféricos provistos por el mismo. Dicha aplicación permitirá evaluar la correcta adquisición de información, el correcto manejo de los puertos, una comunicación eficiente y un correcto funcionamiento global. De esta forma se podrá detectar fácil y rápidamente el mal funcionamiento de las partes.

Como plan de pruebas secundario se pueden realizar diversas evaluaciones para examinar los módulos por separado sin afectar al resto.

Motherboard

• Alimentación

Teniendo los diversos módulos desconectados (Sensores, Xbee y Daughterboard), se alimenta el Motherboard y se chequea el correcto funcionamiento de los reguladores, además de que a todos los módulos llegue la tensión de forma correcta.

• Giróscopos y Acelerómetros

Previo a acoplar el módulo de sensores se prueban los acondicionadores de señal ingresando con una señal sinusoidal de 2.5V de valor medio y 500mV pico a pico, y se chequea que la salida de los mismos sea 10 veces la señal de entrada centrada en el mismo valor medio o que con el bypass se tiene la misma señal de entrada. Luego de esta revisión se asegura que la señal de salida de los sensores se amplificará correctamente o se puenteará sin problemas.

• Comunicación Xbee

Se acopla el módulo Xbee al Motherboard y se puentea el pin de transmisión con el de recepción realizando un loopback. Con esta conexión se utiliza el programa terminal proporcionado por el fabricante y se verifica que el módulo reciba lo que envía.

- Comunicación USB

Este módulo se prueba de la misma forma que el módulo Xbee, se realiza un loopback y se verifica que se reciba lo mismo que se envía.

Daughterboard

Las pruebas sobre este circuito se reducen a conectarlo con el programa bootloader que provee el fabricante y cargar el programa monitor para verificar que la comunicación se realice con éxito.

IX. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

1. DEFINICIÓN DE LOS MÓDULOS

El prototipo que se presenta consta de dos módulos físicos. El primero es el Daughterboard el cual corresponde a la placa que lleva el microprocesador con las conexiones de los distintos periféricos necesarios. El segundo es el Motherboard, en el cual se acopla el módulo anterior. Este módulo presenta integrados diversos sub-módulos correspondientes a los periféricos necesarios para las aplicaciones a las cuales se enfoca el producto. Dichos sub-módulos son: Interfaz PWM, Interfaz I/O, Interfaz A/D, Conversor Serie-USB, Interfaz Xbee, Sensores Inerciales y sus acondicionadores de señal, y el módulo de Alimentación (El diagrama en bloques se puede apreciar en la Fig. 6). El Motherboard presenta diversas facilidades para que el usuario sienta comodidad al utilizar el kit, se provee un conector DB-37 mediante el cual se puede acceder a todas las líneas de entrada, salida y alimentación mencionadas en las especificaciones, se puede alimentar mediante una conexión externa de 5V, una conexión externa de 7V a 30V regulada a 5V internamente o mediante USB (la cual es también utilizada para la programación del microprocesador). Finalmente, cabe destacar que el sub-módulo de sensores, provee de un dip-switch mediante el cual se puede seleccionar si amplificar o no los sensores de forma simple y rápida.

2. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS IMPRESOS

Basados en los circuitos esquemáticos previamente diseñados y presentados, se procedió al diseño de los circuitos impresos (PCB's). Como característica principal de los PCB's es que fueron diseñados para la construcción de los mismos en plaquetas doble capa. Además, se tuvo especial cuidado en la ubicación de los sub-módulos con el fin de lograr un layout lo más simple posible y con una longitud de pistas corta. También se ubicaron los filtros de desacople de cada integrado lo más cerca de los mismos dado que de esto depende su eficiencia. En las Fig. 17 y Fig. 18 se puede apreciar el diseño final del Motherboard y del Daughterboard respectivamente.

3. DISEÑO MECÁNICO

Como se menciono anteriormente, el sistema es una placa de desarrollo en configuración Motherboard – Daughterboard, la misma no requiere una estructura mecánica de portabilidad debido a la ausencia de partes mecánicas, cables flexibles o móviles. La misma se presentara con una base de acrílico transparente y tapa del mismo material. La misma permite el acceso a todos los conectores periféricos y mediante espacios calados el acceso al resto de las placas de expansión.

Los conectores elegidos, son estándar en el mercado, conector USB, conector DB37 y conector header hembra.

Para el puerto I/O se selecciono el conector tipo DB37 debido a su robustez y su versatilidad (Muy fácil de conseguir), en contrapuesta de los puertos que normalmente usan las placas de desarrollo, los cuales son muy difíciles de conseguir, inclusive a un alto precio. El conector tiene 37 conexiones, más 2 de masa, es compacto, robusto y de un precio módico.

Mecánicamente lo único que podemos recomendar en nuestros manuales, es colocar pegamento o silicona en los componentes que quedan separados de la placa en altura, como por ejemplo los capacitores electrolíticos, en caso de aplicaciones móviles de alta vibración, pero según las pruebas realizadas hasta el momento el comportamiento de la misma en dichas condiciones es adecuado.

4. DETALLES DE CONSTRUCCIÓN Y PRECAUCIONES ESPECIALES DE MONTAJE

Los circuitos impresos que componen nuestro sistema son poco complejos, con montaje superficial estándar, en una sola capa. Los mismos fueron desarrollados siguiendo las pautas de fabricación de los proveedores nacionales de circuitos impresos.

El montaje, está pensado para ser realizado con una maquina pick & place convencional y el soldado realizado por doble ola, ambos procedimientos bien establecidos en nuestros país.

Las directivas para la utilización del sistema por el usuario, estarán debidamente asentadas en el correspondiente manual del usuario, junto con las precauciones necesarias a la hora de colocar o retirar las placas de expansión.

X. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

1. VALIDACIÓN DEL HARD

1.1. Plan y protocolos especiales de medición

En lo que respecta a las mediciones se cumplió con el plan especificado en el punto "Pruebas de cada módulo". Dichas pruebas se llevaron a cabo utilizando la placa de pruebas propuesta y su correspondiente código (que puede encontrarse en el anexo).

Tomando en consideración que, exceptuando las señales de los giróscopos y acelerómetros, todas las señales del prototipo son señales digitales de 0-5V ó 0-3.3V, no se requieren protocolos especiales de medición. De todas formas para corroborar el correcto funcionamiento del sistema el mismo fue probado en un clon de Segway llamado SAETA. Para dicha prueba fue necesaria la creación de una placa adaptadora para realizar el conexonado y portar el código del sistema de transporte para el microprocesador utilizado.

Las pruebas realizadas en SAETA fueron un éxito, logrando que el sistema funcione en las mismas condiciones que se encontraba (pero ahora con una electrónica mucho más simple). Esta prueba adicional asegura el completo funcionamiento del módulo ya que el mismo es utilizado en su totalidad.

1.2. Medidas

Inicialmente se comprobó el correcto funcionamiento de la comunicación USB ya que la misma no requiere de los demás módulos para funcionar correctamente. La misma fue conectada en un loopback y se utilizó un programa terminal desde una laptop para comprobar la recepción de la información enviada sin alteraciones. Dicha prueba se realizó sin escollos por lo que el sistema no requirió mayores atenciones.

Luego se progresó a alimentar la placa con los 5V provistos por el dispositivo USB. Se comprobó mediante un multímetro el correcto funcionamiento del regulador de 3.3V de la placa. Una vez comprobado esto, se prosiguió a conectar el módulo XBEE en una topología loopback y a comprobar el correcto funcionamiento de la misma en la misma forma que el módulo USB. De la misma manera este módulo no presentó problemas por lo que el mismo no requirió otras mediciones.

Posteriormente se modificó el método de alimentación y se pasó a una alimentación de 9V externa provista por una fuente de laboratorio. Una vez realizada la conexión se comprobó el correcto funcionamiento del regulador de 5V.

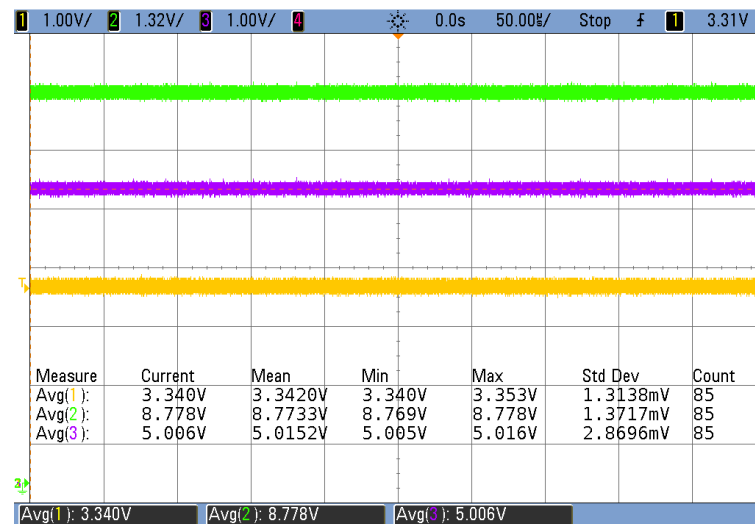


Fig. 19. Tensiones de alimentación de la placa

Como se observa en la Fig. 19 los reguladores funcionan correctamente por lo que se procedió a la verificación del correcto funcionamiento de los giróscopos, acelerómetros y sus respectivos amplificadores.

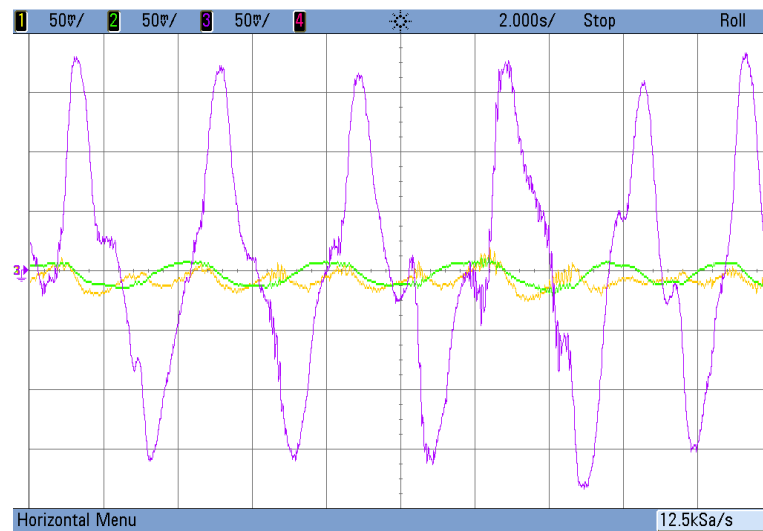


Fig. 20. Señales de los acelerómetros: amarilla ACELX, verde ACELY y violeta GYRO

Como muestra la Fig. 20 la salida de los giróscopos y acelerómetros sin amplificar es la esperada (los datos se tomaron mientras se movía la placa manualmente de forma sinusoidal sobre el eje del giróscopo). Esto indica que tanto la alimentación del módulo inercial como el conexionado de sus salidas es correcto por lo que puede procederse a la medición de los amplificadores. Para esto se removió la placa de acelerómetros y giróscopos y se inyectó en las salidas correspondientes a los mismos, señales sinusoidales de amplitud y frecuencia conocidas. Se verificó que las salidas poseían señales de igual frecuencia y amplitudes diez veces mayores.

Seguidamente se conectó la placa Daughterboard. Se alimentó la misma con una fuente externa de 9V limitando la corriente de la misma como precaución. Una vez correctamente alimentada se procedió a verificar que el cristal estuviera generando la señal de reloj apropiada.

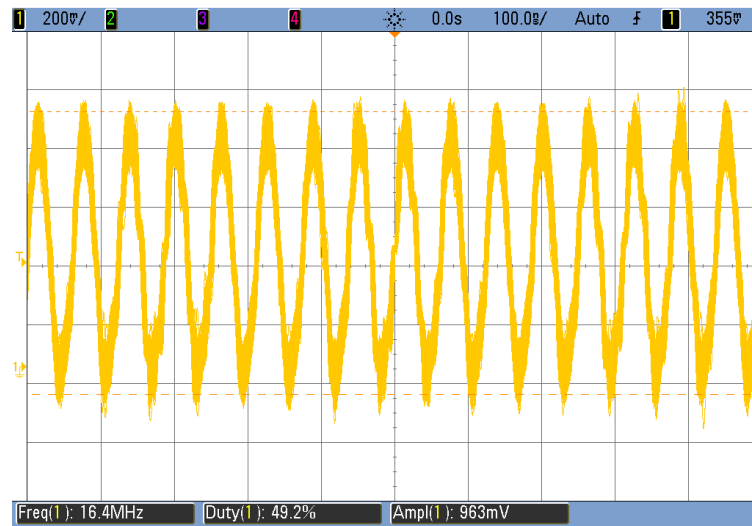


Fig. 21. Oscilador Daughterboard HC12X

Una vez terminada la comprobación del reloj se cargó en la memoria interna del microprocesador un bootloader para poder realizar las subsiguientes programaciones mediante el puerto USB del Motherboard y simultáneamente comprobar la correcta alimentación del microprocesador y el correcto conexionado de los circuitos de programación. El programa se cargó con éxito en el primer intento por lo que se pudo proseguir rápidamente con la comprobación de los puertos del mismo utilizando la placa de verificación y el programa correspondiente.

Al haberse diseñado la placa de verificación para que la comprobación de la misma sea visual no se requirieron más mediciones eléctricas del módulo.

Tanto los puertos como los ADCs y los PWMs se encontraban correctamente cableados y funcionando (aunque se requirió la reparación de la placa de verificación por problemas en el proceso de manufactura de la misma, particularmente pistas cortadas).

Al arribar a esta instancia la comprobación de los módulos por separado se finalizó y se prosiguió a la prueba en SAETA para corroborar que los módulos fueran capaces de funcionar en simultáneo y mantener el sincronismo entre los mismos. A continuación se muestran tres mediciones de parte del puerto A del módulo trabajando en conjunto con los PWMs para controlar uno de los motores de SAETA.

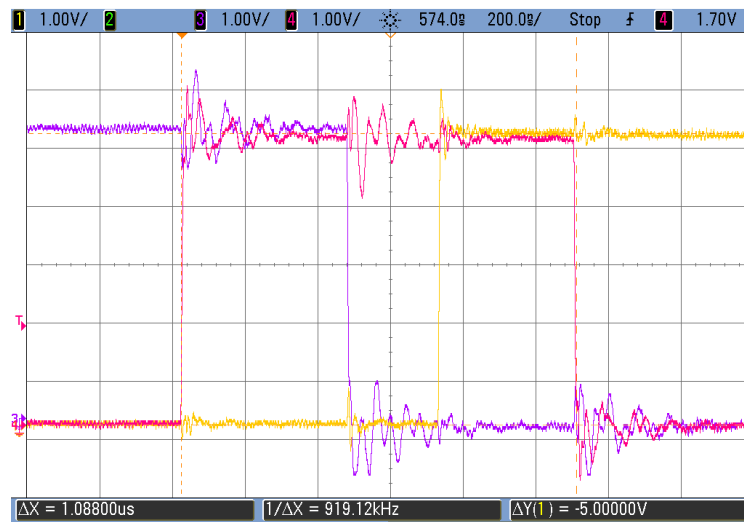


Fig. 22. Señales de control motores. Amarillo ROT, violeta ROTNEG y rosa SD

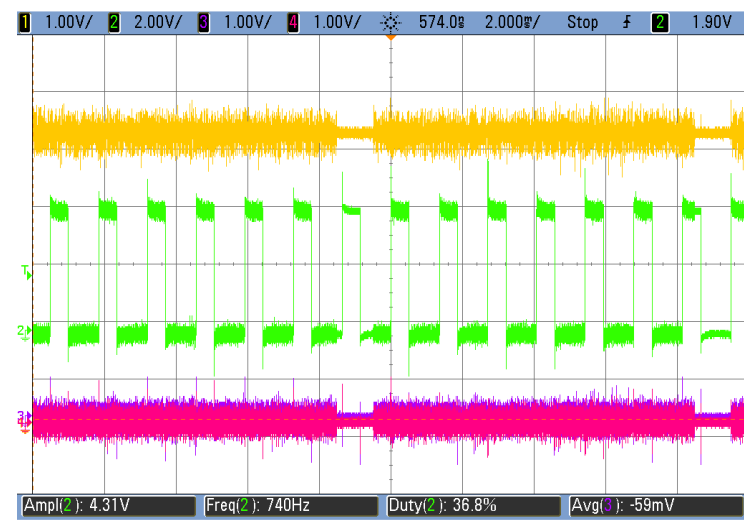


Fig. 23. Señal PWM y señales de control



Fig. 24. Señal PWM y señales de control en una transición

1.3. Evaluación

La comunicación USB-serie del dispositivo funciona correctamente y permite la programación del microprocesador.

La comunicación inalámbrica mediante el módulo XBEE funciona correctamente hasta 115600 baud (máxima transferencia permitida por el módulo).

Tanto los giróscopos como los acelerómetros se encuentran correctamente conectados al microprocesador. Los amplificadores de los mismos se encuentran dentro de los rangos especificados.

Los tres puertos de entrada / salida del microprocesador funcionan correctamente y son capaces de transmitir datos a 24MHz.

Los cuatro PWMs se encuentran correctamente conectados y funcionan en todas las frecuencias generables por el microprocesador.

Los tres ADCs funcionan en todo su rango.

Todos los módulos de alimentación se encuentran correctamente regulados y soportan la carga máxima provista por el sistema.

Todos los módulos funcionan correctamente en conjunto.

1.4. Resultados

Una vez terminadas las mediciones del diseño se concluye que el mismo cumple con todas las especificaciones listadas sin necesidad de un re-diseño de ningún tipo.

XI. ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD

El tiempo entre fallas resulta una variable de interés dentro del diseño de un producto. En este caso se analiza el tiempo hasta la falla y no el tiempo entre fallas debido a que no es un producto reparable. Por lo tanto, en esta sección se calcula el MTBF para el total del sistema pasando previamente por el cálculo del MTBF de cada elemento. A tal fin, se utilizó la norma militar estadounidense MIL-HDBK-217F. En la norma se establece que la variable aleatoria que define la duración de cada componente tiene una distribución de tipo exponencial y ofrece una forma sencilla de calcular el parámetro característico de la distribución en base a las características propias de cada elemento. De este modo, se calcula el parámetro λ_e para cada elemento del sistema y luego se calcula el parámetro λ_s como la suma de los λ_e . En este caso particular, se puede observar que para que el kit de desarrollo funcione, deben funcionar todas las partes. Por lo tanto se trata de un sistema enteramente serie.

En la mayoría de los casos, la constante de tiempo depende del lugar donde se emplace el sistema. En la norma se establecen categorías que van desde ambientes benignos en tierra con temperatura y humedad controladas, pasando por ambientes marinos y llegando hasta ambientes aéreos o inclusive dentro de misiles. En este caso particular, en todos los casos se utilizó el parámetro Gm (Ground Mobile, Móvil en tierra) ya que si bien puede ser usado dentro de un laboratorio en condiciones estáticas se optó por el caso de uso más típico que es sobre rodados. No se utilizó la situación aérea ya que se consideró como un caso extremo y no reflejaría el valor medio que puede tener la vida media del producto. No obstante, dado que el factor móvil en tierra es aproximadamente la mitad que el valor del factor dentro de, por ejemplo, un avión de carga no tripulado, puede decirse como estimación que la vida útil del producto sería la mitad en el aire que en la tierra. Por otro lado, si el kit de desarrollo fuese usado dentro de una embarcación puede decirse como aproximación que su MTBF será aproximadamente igual al del caso terrestre móvil.

A continuación se muestran los resultados para cada uno de los módulos junto con el resultado total. El detalle de los cálculos puede verse en el anexo.

TABLA X. Resumen de Confiabilidad por Módulo.

| Módulo | Parte | Valor | Cantidad | λ_e Unitario | MTBF | λ_e Total |
|--------|-------------------|-------|----------|----------------------|-------|-------------------|
| USB | 93c56 | - | 1 | 0,834 | 1,20 | 0,834 |
| USB | FT232BL | - | 2 | 0,600 | 1,67 | 1,200 |
| USB | Conector Mini-USB | - | 1 | 2,009 | 0,50 | 2,009 |
| USB | Cristal | 6Mhz | 2 | 0,462 | 2,16 | 0,924 |
| USB | Ferrite Bead | - | 1 | 0,029 | 34,72 | 0,029 |
| USB | Resistencia | 27 | 2 | 0,052 | 19,23 | 0,104 |
| USB | Resistencia | 360 | 2 | 0,052 | 19,23 | 0,104 |
| USB | Resistencia | 470 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| USB | Resistencia | 1k5 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| USB | Resistencia | 2k2 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| USB | Resistencia | 4k7 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| USB | Resistencia | 10k | 2 | 0,052 | 19,23 | 0,104 |
| USB | Capacitor | 27p | 2 | 0,019 | 52,39 | 0,038 |
| USB | Capacitor | 10n | 1 | 0,037 | 27,33 | 0,037 |
| USB | Capacitor | 100n | 2 | 0,047 | 21,22 | 0,094 |
| USB | led | verde | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |
| USB | led | rojo | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |

| Módulo | Parte | Valor | Cantidad | λ_e Unitario | MTBF | λ_e Total |
|---------------|----------------|-----------|----------|----------------------|--------|-------------------|
| USB | Dip Switch | x4 | 4 | 0,720 | 1,39 | 2,880 |
| | | | | | | |
| XBEE | MMBT3906 | PNP | 4 | 0,013 | 79,14 | 0,051 |
| XBEE | Resistencia | 470 | 3 | 0,052 | 19,23 | 0,156 |
| XBEE | Resistencia | 10k | 4 | 0,052 | 19,23 | 0,208 |
| XBEE | led | rojo | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |
| XBEE | led | Amarillo | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |
| XBEE | led | verde | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |
| XBEE | Modulo XBEE | - | 1 | 0,400 | 2,50 | 0,400 |
| XBEE | Capacitor | 100n | 1 | 0,047 | 21,22 | 0,047 |
| XBEE | Capacitor | 1u | 2 | 0,114 | 8,80 | 0,227 |
| XBEE | Capacitor | 10u | 1 | 0,146 | 6,83 | 0,146 |
| XBEE | Pines Hembra | 2mm | 2 | 0,291 | 3,43 | 0,582 |
| | | | 0 | | | |
| Giróscopos | MCP6002T-E/SN | opamp | 3 | 0,150 | 6,67 | 0,450 |
| Giróscopos | Resistencia | 1K | 3 | 0,052 | 19,23 | 0,156 |
| Giróscopos | Resistencia | 39k | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| Giróscopos | Resistencia | 100k | 1 | 0,057 | 17,48 | 0,057 |
| Giróscopos | Resistencia | 10k | 3 | 0,052 | 19,23 | 0,156 |
| Giróscopos | Resistencia | 47k | 4 | 0,052 | 19,23 | 0,208 |
| Giróscopos | Capacitor | 100n | 3 | 0,047 | 21,22 | 0,141 |
| Giróscopos | Pines Hembra | 0 | 1 | 0,291 | 3,43 | 0,291 |
| Giróscopos | Dip switch | x6 | 6 | 0,720 | 1,39 | 4,320 |
| Giróscopos | Placa Inercial | 0 | 1 | 0,400 | 2,50 | 0,400 |
| | | | | | | |
| Alimentación | LM7805 | REG 5V | 1 | 0,400 | 2,50 | 0,400 |
| Alimentación | LM1117MP | REG 3V | 1 | 0,400 | 2,50 | 0,400 |
| Alimentación | Polyswitch | 900ma | 2 | 0,080 | 12,50 | 0,160 |
| Alimentación | PWR2.5 | 0 | 1 | 0,053 | 18,94 | 0,053 |
| Alimentación | Zener | 5.1V | 1 | 0,144 | 6,94 | 0,144 |
| Alimentación | Zener | 27V | 1 | 0,144 | 6,94 | 0,144 |
| Alimentación | 1n5819 | Schottky | 2 | 0,008 | 124,70 | 0,016 |
| Alimentación | 1n5819 | Schottky | 1 | 0,086 | 11,61 | 0,086 |
| Alimentación | Resistencia | 270 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| Alimentación | Resistencia | 360 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(50V) | 1 | 0,037 | 27,33 | 0,037 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(10V) | 2 | 0,037 | 27,33 | 0,073 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(50V) | 1 | 0,047 | 21,22 | 0,047 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(10V) | 2 | 0,047 | 21,22 | 0,094 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(10V) | 2 | 0,216 | 4,63 | 0,432 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(50V) | 1 | 0,216 | 4,63 | 0,216 |
| Alimentación | led | verde | 1 | 0,010 | 98,81 | 0,010 |
| | | | | | | |
| Conexión | DB37 | Macho | 1 | 0,917 | 1,09 | 0,917 |
| | | | | | | |
| Daughterboard | MC9S12XDP512 | - | 1 | 2,888 | 0,35 | 2,888 |
| Daughterboard | 1n4148 | Diodo | 1 | 0,010 | 98,45 | 0,010 |

| Módulo | Parte | Valor | Cantidad | λ_e Unitario | MTBF | λ_e Total |
|---------------|----------------|---------|----------|----------------------|-------|-------------------|
| Daughterboard | Cristal | 16MHz | 1 | 0,026 | 38,46 | 0,026 |
| Daughterboard | Pulsador | (RESET) | 1 | 0,720 | 1,39 | 0,720 |
| Daughterboard | Resistencia | 100 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| Daughterboard | Resistencia | 3k3 | 7 | 0,052 | 19,23 | 0,364 |
| Daughterboard | Resistencia | 4k7 | 5 | 0,052 | 19,23 | 0,260 |
| Daughterboard | Resistencia | 10k | 2 | 0,052 | 19,23 | 0,104 |
| Daughterboard | Resistencia | 1k8 | 1 | 0,052 | 19,23 | 0,052 |
| Daughterboard | Capacitor | 22p | 2 | 0,019 | 53,58 | 0,037 |
| Daughterboard | Capacitor | 2n2 | 1 | 0,031 | 32,29 | 0,031 |
| Daughterboard | Capacitor | 10n | 2 | 0,037 | 27,33 | 0,073 |
| Daughterboard | Capacitor | 22n | 1 | 0,040 | 25,06 | 0,040 |
| Daughterboard | Capacitor | 100n | 6 | 0,047 | 21,22 | 0,283 |
| Daughterboard | Capacitor | 1u | 1 | 0,094 | 10,61 | 0,094 |
| Daughterboard | Capacitor | 10u | 2 | 0,143 | 7,01 | 0,285 |
| Daughterboard | Capacitor | 100u | 3 | 0,216 | 4,63 | 0,648 |
| | | | | | | |
| Varios | Conexiones PCB | 0 | 1 | 0,950 | 1,05 | 0,950 |

Resultado final

TABLA XI. Resultados Finales

| Parámetro | Valor |
|---|--------|
| λ_p del sistema [1/millón de horas] | 26,916 |
| MTBF del sistema [millones de horas] | 0,037 |
| MTBF del sistema [años] | 4,34 |

Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el tiempo hasta la falla es de 4,34 años (4 años y 4 meses). Este es un valor acorde a lo esperable para este tipo de productos ya que si bien se busca que sean lo más duraderos posibles no debe olvidarse que se trata del caso en que se use en forma continua dentro de un sistema móvil y por lo tanto sería una de las condiciones más extremas. En el caso de ser utilizado dentro de un laboratorio, este valor puede duplicarse o incluso cuadruplicarse.

XII. CONCLUSIONES

1. EXCELENCIAS, OBJETIVOS ALCANZADOS

A lo largo del diseño y desarrollo del producto presentado, se pudo constatar que las soluciones propuestas para los problemas establecidos, fueron las correctas. Se ha contemplado durante todo el proceso que los materiales requeridos para la fabricación del producto fuera accesible en el país y que el mismo se pudiera ensamblar completamente en el país. Es importante mencionar que se buscó la mejor relación entre costo y beneficio, con el fin de satisfacer las necesidades del cliente a un costo accesible.

El producto en sí tiene varios puntos fuertes que se deben mencionar. El diseño modular, separando el kit en un Motherboard y un Daughterboard, tiene la especial ventaja de poder utilizar los sensores y periféricos del kit con el microcontrolador/microprocesador que el cliente esté familiarizado, lo cual le otorga mucha versatilidad al producto.

La integración de un conversor serie/USB permite al usuario programar cualquier tipo de microprocesador utilizando un puerto USB únicamente, esto es una gran ventaja ya que hoy en día las computadoras de venta masiva carecen de puerto serie y por lo general se debe comprar cables conversores por separado.

Al ser un producto pensado para proyectos móviles ya que se incluyen diversos sensores inerciales, resulta de mucha comodidad la integración de un módulo de comunicación inalámbrica para poder realizar ajustes de forma remota sin afectar el sistema con cables externos que pueden llegar a ser molestos e incómodos.

Finalmente, el último punto fuerte del producto que se mencionará, es el conector DB-37 que se incorpora en la Motherboard, ya que permite un fácil conexión del kit a una interfaz externa correspondiente al proyecto que se esté desarrollando. Mismo se podría utilizar el mismo kit en diversos proyectos cambiando de uno a otro sin mayores inconvenientes.

2. FALLOS, RECOMENDACIONES PARA FUTUROS DISEÑOS

Gracias a la experiencia del equipo en sistemas que requieren de las prestaciones que otorga el producto desarrollado, se encontraron pocos obstáculos en el diseño del mismo.

Debido a la disponibilidad de componentes en el país, se utilizaron sensores inerciales de 3 grados de libertad, lo cual es muy útil pero pueden existir aplicaciones que requieran mayor complejidad. Más allá de que esto es una limitación, se puede considerar cambiar el tipo de sensores inerciales según la necesidad combinando acelerómetros y giróscopos. Como futuro diseño se podría cambiar el módulo de sensores por uno más completo con 6 grados de libertad (acelerómetros y giróscopos de 3 ejes), lo que daría mayor versatilidad y robustez al producto. Asimismo, este cambio conllevaría la utilización de 3 conversores analógico-digitales extra, lo cual habría que realizar el estudio de si es posible con los microprocesadores más comunes.

Un fallo que ocurrió en el proceso de diseño fue respecto a las tensiones de alimentación de los integrados que utiliza el producto, hoy en día la tecnología se encuentra en un punto medio donde esto no es universal para todos los productos y por lo tanto existen integrados que manejan 5V y otros 3.3V, lo cual hace compleja la interconexión de integrados que deben intercambiar datos entre sí. En un principio se pensó alimentar todo con 3.3V, pero luego se encontró que esto era problemático ya que se necesitaban conversores de tensión que afectaban las señales, por lo cual se decidió usar 5V y solamente llevar a 3.3V la alimentación del módulo de comunicación inalámbrica, con lo cual se debía añadir únicamente un divisor resistivo para adaptar las señales y así el sistema funcionaba sin mayores inconvenientes. En un futuro diseño se podría

estudiar de forma más intensa la disponibilidad de integrados en el mercado, que cumplan la misma función, pero que estén normalizados todos a la misma tensión de alimentación.

Finalmente, otro aspecto que se podría mejorar es en cuanto a las llaves mecánicas que se utilizan para la selección de la amplificación de los sensores inerciales, las cuales se podrían cambiar por un selector digital lo cual ayudaría a incrementar el MTBF de dicho módulo ya que se estarían eliminando partes con desgaste mecánico y además daría la opción de cambiar la amplificación “en caliente” lo cual podría llegar a ser útil en alguna aplicación.

XIII. ANEXOS

1. CÓDIGOS DE SOFTWARE

El proyecto de la placa de evaluación consta de los siguientes archivos:

- AD_driver.c
- AD_driver.h
- config.h
- ivt.c
- main.c
- pwm.c
- pwm.h
- sci.c
- sci.h

A continuación se incluyen el código fuente de cada uno de estos archivos.

1.1. main.c

```
/*-----*
|          Instituto Tecnológico de Buenos Aires          |
|          Ingeniería Electrónica                         |
|          Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica       |
|          Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control |
|
|          Software de placa de verificación              |
|          2012                                           |
|
|          Couto, Gaviglio, Giudice, Matus                |
|-----*/
Archivo: main.c
Descripción:
El siguiente programa prueba todas las salidas y entradas
analógicas y digitales de la placa de evaluación.
Periodicamente convierte una muestra de las entradas
analógicas de los potenciómetros y las copia en las
salidas PWM (variación de la intensidad de los leds).
También cada 1000 ciclos incrementa en uno el contador
binario del puerto E.
*-----*/

#include "mc9s12xdp512.h"
#include "stdio.h"
#include "config.h"
#include "pwm.h"
#include <ctype.h>
#include "sci.h"
#include "AD_driver.h"

extern char dato_nuevo;
extern unsigned int ADRESULT[6];

void ad_conversion_print(char channel);
void pll_init(void);
void num2led(char port, int num);

#define PUERTOA 1
#define PUERTOB 2
#define SUBIR 0
#define BAJAR 1

unsigned char contdir = SUBIR;

void main(void)
{
    int k=10000;

    //Inicialización.
    #ifdef FLASH
```



```

pll_init();
#endif
PWM_init();
scil_init(BAUD_RATE_DIVIDER_57600, PARIDAD_OFF, OCHO_BITS);
ad_init(6);

PORTA=0;
PORTB=0;
PORTE=0;

DDRA=0xFF;
DDRB=0xFF;
DDRE=0xFC;

_asm cli;

//Inicio del programa.
(void)printf("Inicio programa de prueba Placa de Desarrollo
V1.4\n");

for(;;) {

    ad_start(START_PORT); //esperamos por una nueva medicion
del AD
    while(!dato_nuevo)
        ;

    dato_nuevo=0;
    num2led(PUERTO A, ADRESULT[0]);
    num2led(PUERTO B, 1023-ADRESULT[1]);

    PWM_duty_set(4, (char)(ADRESULT[3]/4));
    PWM_duty_set(5, (char)(ADRESULT[4]/4));
    PWM_duty_set(6, (char)(ADRESULT[5]/4));
    PWM_duty_set(7, (char)(ADRESULT[2]/4));
    k++;
    if(k>1000) { //funciona como un prescaler para hacer más
lento el contador

        (void)printf("%d %d %d %d %d %d\n", ADRESULT[0], \
ADRESULT[1], ADRESULT[2], ADRESULT[3], ADRESULT[4], ADRESULT[5]);
        k=0;
        if(contdir==SUBIR)
            PORTE+=4;
        else
            PORTE-=4;
        }
    }
}

```

```

void pll_init(void) {
    SYNRR = 2;
    REFDV = 1;
    while(!(CRGFLG & 0x08));
    CLKSEL = 0x80;
}

/*
num2led
Muestra un numero en los puertos A o B
port: PUERTO A {default}
      PUERTO B
num:
    número entre 0 y 1023
*/
void num2led(char port, int num){

    switch(port){
    case PUERTO B:
        PORTB=1<<(num/128);
        break;
    case PUERTO A:
    default:
        PORTA=1<<(num/128);
        break;
    }

}

void interrupt irqserv (void)
{
    contdir=SUBIR;
    (void)printf("IRQ\n");
}

void interrupt xirqserv (void)
{
    contdir=BAJAR;
    (void)printf("XIRQ\n");
}

```

1.2. AD_driver.c

```
/*-----*
|          Instituto Tecnológico de Buenos Aires          |
|          Ingeniería Electrónica                         |
|          Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica       |
|          Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control |
|
|          Software de placa de verificación              |
|          2012                                           |
|
|          Couto, Gaviglio, Giudice, Matus                |
*-----*/

Archivo: AD_driver.c
Descripción:
A continuación se incluye un driver para el ADC.
Está basado en interrupciones. Antes de usar el periférico
debe inicializarse con un llamado a la función
    ad_init(...)
Para iniciar una conversión se llama a
    ad_start(...) y
para leer los resultados hay que ver el arreglo ADRESULT[6].
Para ello debe definirse como extern en el archivo donde
está el código.
La variable dato_nuevo indica si el dato que se está leyendo
es nuevo o no. Se recomienda usar esta variable como flag.
Una vez que se detecta un nuevo dato (dato_nuevo=1) se lee
el dato, se fuerza dato_nuevo=0 y se espera nuevamente
a que tome el valor 1.

*-----*/
#include "mc9s12xdp512.h"
#include <stdio.h>
#include "AD_driver.h"
#include "sci.h"
#include "pwm.h"

// #define DEBUG 1
// #undef DEBUG

#define PIN_DEBUG 1
// #undef PIN_DEBUG

////////////////////////////////////
/
#define PRESCALER_BITS_MASK
ATD0CTL4_PRS0_MASK+ATD0CTL4_PRS1_MASK+ATD0CTL4_PRS2_MASK+ATD0CTL4_
PRS3_MASK+ATD0CTL4_PRS4_MASK
#define ATD0_PRESC 5 //Definición del prescaler.
Admite frec de bus entre
#define L 5
#define CONVERSION_SEQ_LEN_L 1<3 //Por default la longitud es 1;
```

```

#define INIT_SEQ_PORT          0 //La secuencia L comienza a partir
del canal 0
#define AD_CHANNELS            8
#define COUNTNOISE    5
#define SISTCHANGE    1
#define NSISTCHANGE    0

////////////////////////////////////
//
//                               Driver del AD 0
////////////////////////////////////
//

static unsigned char seq_len_L=NRO_CANALES_INICIAL; //Contiene la
longitud de secuencia L, por defecto es 1.

int conversion_values[AD_CHANNELS];

//Variables que almacenen las mediciones de los sensores.
unsigned int  ADRESULT[6];

unsigned char dato_nuevo;

////////////////////////////////////
////
//          Funcion AD_init
//  Recibe la longitud seq_len de la conversion en canales
consecutivos.
////////////////////////////////////
////
void ad_init(unsigned char seq_len)
{
    //CONFIGURACION DEL ATDCTL 2
    ATD0CTL2_ADPU=1; //Prendo el AD0
    ATD0CTL2_AFFC=1; //Modo de borrado rapido de flag de fin de
conversion
                                //Cuando leo el dato, automaticamente se borra
el flag.
    ATD0CTL2_ASCIE =1;

    //CONFIGURACION DEL ATDCTL 3
    if(seq_len<8) {

        seq_len_L=seq_len;
        ATD0CTL3=seq_len<<3; //Seteo la longitud de conversion L.
                                //El shift siver porque los bits que setean
L
                                //se encuentran a parti del b3.
    }else
        ATD0CTL3= CONVERSION_SEQ_LEN_L;

```

```

//CONFIGURACION DEL ATDCTL 4
ATD0CTL4= ATD0_PRESC; //Seteo Prescaler
ATD0CTL4_SRES8=0;//Resolucion de 10bits
ATD0CTL4_SMP0=1; //SMP0=1 SMP1=0 => 4 ciclos para la segunda
fase de conversion

//CONFIGURACION DEL ATDCTL 5
ATD0CTL5_DSGN=0;//Conversion NO SIGNADA. Signada es solo valido
para DJM=0
ATD0CTL5_DJM=1;//Conversion alineada a la derecha
ATD0CTL5_MULT=1;//Convierte los L canales de entrada a partir
del 0
ATD0CTL5_SCAN=0;//Realiza una unica conversion de de longitud L
}

////////////////////////////////////
//
//      Funcion ad_start_conv
//Esta funcion inicia L conversiones (definidas al llamar a
ad_init).
//Las L conversiones se realizan a partir del canal especificado
//por la constante INIT_SEQ_PORT.
//
//Ejemplo: si L=2 e   INIT_SEQ_PORT=4.
//      Se realizan conversiones en los puertos 4 y 5.
////////////////////////////////////
//
void ad_start(unsigned char start_port)
{
    //Si el AD esta disponible entonces inicio una conversion.
    if(!ATD0STAT0_SCF && start_port<8) {
        ATD0CTL5_Cx=start_port;
    }
    //Escribimos en el registro ATDCTL5 para inicial conversion
    //Escribimos los bits CC CB CA, que setean a partir de que
canal
    //se van a hacer las L conversiones.
}

////////////////////////////////////
//
//      Funcion AD0_get_data
//
// Devuelve el resultado del canal especificado por la variable
// de entrada channel.
////////////////////////////////////
//
int ad0_get_data(char channel)
{
    //Si la conversion termino y el canal es valido

```

```

        //Entonces retorno el dato del canal.
        if(ATD0STAT0_SCF && channel<seq_len_L)
            return ATD0DR_ARR[channel];

        else
            return 0;
    }

    ///////////////////////////////////////////////////
    //
    //                      Funcion ad0_interrupt
    //  Esta es la funcion de interrupcion del AD, que al terminar un
    //  ciclo de conversion, guarda los valores en las variables
    //  respectivas a cada
    //  sensor.
    ///////////////////////////////////////////////////
    void interrupt ad0_interrupt (void)
    {
        char sistsum=0;
        char cont=0;
        char c;
        #ifdef PIN_DEBUG
            //PORTE ^= PORTE_BIT2_MASK;
        #endif

        //Limpio el flag
        ATD0CTL2|= ATD0CTL2_ASCIF_MASK;

        for(c=0;c<6;c++)
            ADRESULT[c]=ATD0DR_ARR[c];

        dato_nuevo=1;
    }

    void ad0_set_num_channels(unsigned char seq_len){

        //CONFIGURACION DEL ATDCTL 3
        if(seq_len<8) {

            seq_len_L=seq_len;
            ATD0CTL3=seq_len<<3;//Seteo la longitud de conversion L.
                                //El shift sirve porque los bits que
setean L
                                //se encuentran a partir del b3.
        }else
            ATD0CTL3= CONVERSION_SEQ_LEN_L;
    }

```

1.3. AD_driver.h

```
/*-----*
|
|      Instituto Tecnológico de Buenos Aires
|      Ingeniería Electrónica
|      Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica
|      Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control
|
|      Software de placa de verificación
|      2012
|
|      Couto, Gaviglio, Giudice, Matus
|
|-----*
Archivo: AD_driver.h
Descripción:
definición de constantes para el ADC.
*-----*/

#define MAX_CHANNELS      6
#define MAX_BLOCK_SIZE   100

#define UNICO 1
#define BLOQUES 2

#define NRO_CANALES      4
#define NRO_CANALES_INICIAL  1

#define ATD0_ENABLE_INTERRUPT_IRQ  1
#define ATD0_DISABLE_INTERRUPT_IRQ 0

#define START_PORT 2

#define AD_INPUT_CHANNEL  2

void ad_init(unsigned char);
void ad_start(unsigned char);
int ad0_get_data(char channel);
void interrupt ad0_interrupt (void);
void ad0_set_num_channels(unsigned char seq_len);

#define GYRO_AD_CHANNEL      2
#define ACCEL_X_AD_CHANNEL  0
#define ACCEL_Z_AD_CHANNEL  1
#define SENSOR_GIRO         3
#define AD_REFERENCE        1024/2-1
```

1.4. sci.c

```
/*-----*
|
|      Instituto Tecnológico de Buenos Aires
|      Ingeniería Electrónica
|      Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica
|      Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control
|
|      Software de placa de verificación
|      2012
|
|      Couto, Gaviglio, Giudice, Matus
|
*-----*/
Archivo: sci.c
Descripción:
Driver del puerto serie RS-232. Incluye funciones tanto
para el sci0 como el sci1. También se incluye acceso a
funciones como TERMIO_PutChar(...) y TERMIO_GetChar() que
son las que se ocupan de redirigir el stdin/out presente
en funciones como printf().
*-----*/
// Funciones para la comunicacion por puerto Serie (SCI)
#include "mc9sl2xdp512.h"
#include "sci.h"
#include "stdio.h"

/*****
 * Servicios de SCI0
 * Funciones de envío y recepción de datos por puerto serie.
 * Los accesos a los streams stdout, stdin, stderr entran y salen
 por acá.
 *****/
void TERMIO_PutChar(char ch)
{
    while (!(SCI0SR1 & SCI0SR1_TDRE_MASK));
    SCI0DRL = ch;
}

char TERMIO_GetChar(void)
{
    while (!(SCI0SR1 & SCI0SR1_RDRF_MASK));
    return SCI0DRL;
}

char sci0_hit(void) {
    return (SCI0SR1 & SCI0SR1_RDRF_MASK);
}
```



```

/*****
Servicios de SCI1
*****/
void scil_putchar(char ch)
{
    while (!(SCI1SR1 & SCI1SR1_TDRE_MASK));
    SCI1DRL = ch;
}

char scil_getchar(void)
{
    while (!(SCI1SR1 & SCI1SR1_RDRF_MASK));
    return (SCI1DRL); //el bit más significativo es el de
    paridad! no tenerlo en cuenta
}

char scil_hit(void){
    return (SCI1SR1 & SCI1SR1_RDRF_MASK);
}

/*****
SCI1_INIT
Rutina de inicialización del BaudRate, paridad y número de bits
para el SCI1. El SCI0 es inicializado por el programa monitor
por lo cual no requiere de inicializaciones extra.
*****/
void scil_init(unsigned char baud_rate_divider, unsigned char
paridad, unsigned char bits) {

    SCI1BD = baud_rate_divider;

    if(paridad == PARIDAD_IMPAR){

        SCI1CR1 |= SCI1CR1_PE_MASK; //Activo paridad
        SCI1CR1 |= SCI1CR1_PT_MASK; //Paridad Odd (impar)

    } else if( paridad == PARIDAD_PAR){

        SCI1CR1 |= SCI1CR1_PE_MASK; //Activo paridad
        SCI1CR1 &= ~SCI1CR1_PT_MASK; //Paridad Even (par)
    } else {

        SCI1CR1 &= ~SCI1CR1_PE_MASK; //desactivo paridad
    }

    if (bits == OCHO_BITS)
        SCI1CR1 &= ~SCI1CR1_M_MASK; //8bits
    else if (bits == NUEVE_BITS)
        SCI1CR1 |= SCI1CR1_M_MASK; //9bits

```

```
//Receive Enable
SCI1CR2 |= SCI1CR2_RE_MASK;

//Transmit Enable
SCI1CR2 |= SCI1CR2_TE_MASK;
}

void scil_putstr(char* str){
    int k=0;
    while(str[k]!=0){
        scil_putchar(str[k]);
    }
}
```

1.5. sci.h

```
/*-----*
|
|      Instituto Tecnológico de Buenos Aires
|      Ingeniería Electrónica
|      Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica
|      Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control
|
|      Software de placa de verificación
|      2012
|
|      Couto, Gaviglio, Giudice, Matus
|
|-----*
Archivo: sci.h
Descripción:
definición de constantes para el módulo SCI.
*-----*/

void TERMIO_PutChar(char ch);
char TERMIO_GetChar(void);
char sci0_hit(void);

void scil_putchar(char ch);
char scil_getchar(void);
char scil_hit(void);
void scil_init(unsigned char baud_rate_divider, unsigned char
paridad, unsigned char bits);
void scil_putstr(char*string);

#define PARIDAD_PAR      3
#define PARIDAD_IMPAR    4
#define PARIDAD_OFF      1
#define BAUD_RATE_DIVIDER_9600 156
#define BAUD_RATE_DIVIDER_57600 26 /*Baud rate divider para
24Mhz*/
#define OCHO_BITS        8
#define NUEVE_BITS       9
```

1.6. pwm.c

```
/*-----*
|
|      Instituto Tecnológico de Buenos Aires
|      Ingeniería Electrónica
|      Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica
|      Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control
|
|      Software de placa de verificación
|      2012
|
|      Couto, Gaviglio, Giudice, Matus
|
*-----*/

Archivo: pwm.c
Descripcion:
Driver para el manejo del PWM (Pulse Width Modulation).
El acceso es simple y se basa en una inicialización
mediante:
    PWM_init()
y modificación del status mediante PWM_increment(),
PWM_decrement(), etc.
Para modificar los parámetros iniciales (duty, frecuencia)
se deben modificar las constantes en el archivo pwm.h
*-----*/

//libs
#include "mc9s12xdp512.h"
#include "pwm.h"

//vars
const unsigned char Prescale[] = {48,64,80,96,112}; //Valores del
Prescaler para control del periodo
unsigned char PerDut;

void PWM_init(void)
{
    //PWM7
    PWMPOL |= PWMPOL_PPOL7_MASK;           //Polarity CH6 = HIGH
    PWMCLK &= ~PWMCLK_PCLK7_MASK;          //Define clock source
for CH6 = Clock B
    PWMPRCLK |= 119;                        //Prescale Clocks by
1
    PWMCAE &= ~PWMCAE_CAE7_MASK;           //Align LEFT CH6
    PWMPER7 = PERIODO_Def;                 //initial period
    PWMDTY7 = DUTY_Def;                   //initial duty

    PWME |= PWME_PWME7_MASK;              //Enable PWM CH6

    //PWM6
    PWMPOL |= PWMPOL_PPOL6_MASK;           //Polarity CH7 = HIGH
    PWMCLK &= ~PWMCLK_PCLK6_MASK;          //Define clock source
for CH7 = Clock B
```

```

    PWMCAE &= ~PWMCAE_CAE6_MASK;           //Align LEFT CH7
    PWMPER6 = PERIODO_Def;                  //initial period
    PWMDTY6 = DUTY_Def;                    //initial duty

    PWME |= PWME_PWME6_MASK;                //Enable PWM CH7

    //PWM5
    PWMPOL |= PWMPOL_PPOL5_MASK;            //Polarity CH7 = HIGH
    PWMCLK &= ~PWMCLK_PCLK5_MASK;          //Define clock source
for CH7 = Clock B
    PWMCAE &= ~PWMCAE_CAE5_MASK;            //Align LEFT CH7
    PWMPER5 = PERIODO_Def;                  //initial period
    PWMDTY5 = DUTY_Def;                    //initial duty

    PWME |= PWME_PWME5_MASK;                //Enable PWM CH7

    //PWM4
    PWMPOL |= PWMPOL_PPOL4_MASK;            //Polarity CH7 = HIGH
    PWMCLK &= ~PWMCLK_PCLK4_MASK;          //Define clock source
for CH7 = Clock B
    PWMCAE &= ~PWMCAE_CAE4_MASK;            //Align LEFT CH7
    PWMPER4 = PERIODO_Def;                  //initial period
    PWMDTY4 = DUTY_Def;                    //initial duty

    PWME |= PWME_PWME4_MASK;                //Enable PWM CH7

}

unsigned char PWM_duty_get(unsigned char rueda)
//Devuelve el valor de duty actual
{
    unsigned char val=0;
    switch(rueda){
        case 4:
            val = PWMDTY4;
            break;

        case 5:
            val = PWMDTY5;
            break;

        case 6:
            val = PWMDTY6;
            break;

        case 7:
            val = PWMDTY7;
            break;
    }
    return val;
}

```

```

void PWM_duty_set(unsigned char rueda,unsigned char val)
//Setea el valor de duty
{
    switch(rueda){
        case 4:
            PWMDTY4=val;
            break;

        case 5:
            PWMDTY5=val;
            break;

        case 6:
            PWMDTY6=val;
            break;

        case 7:
            PWMDTY7=val;
            break;
    }
}

void PWM_duty_increment(unsigned char rueda)
//Incrementa el duty en uno
{
    if((PWM_duty_get(rueda)+1)<=255)
        PWM_duty_set(rueda,PWM_duty_get(rueda)+1);
}

void PWM_duty_decrement(unsigned char rueda)
//Decrementa el duty en uno
{
    if((PWM_duty_get(rueda)-1)>= 0)
        PWM_duty_set(rueda,PWM_duty_get(rueda)-1);
}

void PWM_period_set(unsigned char index)    //Setea el periodo
siendo 1 el menor y 5 el mayor.           // 1 <= INDEX <= 5
{
    if(index >= 1 & index <= 5)
        PWMPRCLK = Prescale[index-1];
}

void PWM_Stop(unsigned char rueda)
{
    PWM_duty_set(rueda,0);
}

```

1.7. pwm.h

```
/*-----*
|
|      Instituto Tecnológico de Buenos Aires
|      Ingeniería Electrónica
|      Tesis de Grado en Ingeniería Electrónica
|      Proyecto Kit de Desarrollo para sistemas de control
|
|      Software de placa de verificación
|      2012
|
|      Couto, Gaviglio, Giudice, Matus
|
*-----*/
Archivo: pwm.h
Descripción:
definición de constantes para el módulo PWM.
*-----*/

#ifndef _PWM
#define _PWM

//defs
#define RUEDA_DERECHA      0x00      //Canal 6
#define RUEDA_IZQUIERDA   0xF0      //Canal 7
#define FORWARD           0x0F
#define BACKWARD          0xF0

#define PERIODO_Def       255
#define DUTY_Def          127

//Puertos físicos
#define SD_BIT_IZQ        PORTA_PA0 //SD = SHUTDOWN
#define FWD_BIT_IZQ       PORTA_PA1 //FWD = FORWARD
#define REV_BIT_IZQ       PORTA_PA2 //REV = BACKWARD

#define SD_BIT_DER        PORTA_PA3 //SD = SHUTDOWN
#define FWD_BIT_DER       PORTA_PA4 //FWD = FORWARD
#define REV_BIT_DER       PORTA_PA5 //REV = BACKWARD

#define DDR_SD_BIT_IZQ    DDRA_DDRA0 //SD = SHUTDOWN
#define DDR_FWD_BIT_IZQ   DDRA_DDRA1 //FWD = FORWARD
#define DDR_REV_BIT_IZQ   DDRA_DDRA2 //REV = BACKWARD

#define DDR_SD_BIT_DER    DDRA_DDRA3 //SD = SHUTDOWN
#define DDR_FWD_BIT_DER   DDRA_DDRA4 //FWD = FORWARD
#define DDR_REV_BIT_DER   DDRA_DDRA5 //REV = BACKWARD

// Funciones internas
void PWM_init(void);
unsigned char PWM_duty_get(unsigned char rueda);
```

```
// Funciones Servicios
void PWM_duty_set(unsigned char rueda,unsigned char val);
void PWM_period_set(unsigned char index);
void PWM_duty_decrement(unsigned char rueda);
void PWM_duty_increment(unsigned char rueda);
void PWM_Stop(unsigned char rueda);
void PWM_sentido_set(unsigned char rueda,unsigned char sentido);
void mover_rueda(unsigned char rueda, unsigned char val, unsigned
char sentido);
void PWM_Emer_Shtdwn(void);
#endif
```


1.8. Config.h

```
#ifndef _CONF
#define _CONF

/* Definir RAM o FLASH según necesite. */
/* No olvidar cambiar el Target! (RAM o Flash) */

#define RAM
//#define FLASH

#if !defined(FLASH) && !defined(RAM)
#error Debe definir ya sea Flash o RAM
#endif
#if defined(FLASH) && defined(RAM)
#error No puede compilar para RAM y Flash a la vez!
#else
#ifdef FLASH
#warning Recuerde que el PLL es inicializado para 24MHz de bus por
el programa Monitor, pero en modo Flash el PLL no es inicializado
por nadie.
#endif
#endif

#endif
```

1.9. ivt.c

```
//Vectores de interrupción para MonS12X

#include "config.h"

#ifndef NOTUSED
#define NOTUSED ((const *)0xFFFF)
#endif

extern void _Startup(); /* startup routine */
extern void interrupt ad0_interrupt (void);
extern void interrupt irqserv (void);
extern void interrupt xirqserv (void);

#pragma CODE_SEG __NEAR_SEG NON_BANKED /* Interrupt section for
this module. Placement will be in NON_BANKED area. */

__interrupt void UnimplementedISR(void) {
    asm BGND; /* Unimplemented ISRs trap.*/
}

#pragma CONST_SEG VECTORS

void (* const interrupt_vector_table[])() = {
    NOTUSED,      // VECT119 spurious
    NOTUSED,      // VECT118 Reserved119
    NOTUSED,      // VECT117 Reserved118
    NOTUSED,      // VECT116 Reserved117
    NOTUSED,      // VECT115 Reserved116
    NOTUSED,      // VECT114 Reserved115
    NOTUSED,      // VECT113 Reserved114
    NOTUSED,      // VECT112 Reserved113
    NOTUSED,      // VECT111 Reserved112
    NOTUSED,      // VECT110 Reserved111
    NOTUSED,      // VECT109 Reserved110
    NOTUSED,      // VECT108 Reserved109
    NOTUSED,      // VECT107 Reserved108
    NOTUSED,      // VECT106 Reserved107
    NOTUSED,      // VECT105 Reserved106
    NOTUSED,      // VECT104 Reserved105
    NOTUSED,      // VECT103 Reserved104
    NOTUSED,      // VECT102 Reserved103
    NOTUSED,      // VECT101 Reserved102
    NOTUSED,      // VECT100 Reserved101
    NOTUSED,      // VECT99  Reserved100
    NOTUSED,      // VECT98  Reserved99
    NOTUSED,      // VECT97  Reserved98
    NOTUSED,      // VECT96  Reserved97
    NOTUSED,      // VECT95  Reserved96
    NOTUSED,      // VECT94  Reserved95
    NOTUSED,      // VECT93  Reserved94

```

```

NOTUSED, // VECT92 Reserved93
NOTUSED, // VECT91 Reserved92
NOTUSED, // VECT90 Reserved91
NOTUSED, // VECT89 Reserved90
NOTUSED, // VECT88 Reserved89
NOTUSED, // VECT87 Reserved88
NOTUSED, // VECT86 Reserved87
NOTUSED, // VECT85 Reserved86
NOTUSED, // VECT84 Reserved85
NOTUSED, // VECT83 Reserved84
NOTUSED, // VECT82 Reserved83
NOTUSED, // VECT81 Reserved82
NOTUSED, // VECT80 Reserved81
NOTUSED, // VECT79 xsramav
NOTUSED, // VECT78 xsei
NOTUSED, // VECT77 xst7
NOTUSED, // VECT76 xst6
NOTUSED, // VECT75 xst5
NOTUSED, // VECT74 xst4
NOTUSED, // VECT73 xst3
NOTUSED, // VECT72 xst2
NOTUSED, // VECT71 xst1
NOTUSED, // VECT70 xst0
NOTUSED, // VECT69 pit3
NOTUSED, // VECT68 pit2
NOTUSED, // VECT67 pit1
NOTUSED, // VECT66 pit0
NOTUSED, // VECT65 Reserved65
NOTUSED, // VECT64 api
NOTUSED, // VECT63 lvi
NOTUSED, // VECT62 iic1
NOTUSED, // VECT61 sci5
NOTUSED, // VECT60 sci4
NOTUSED, // VECT59 sci3
NOTUSED, // VECT58 sci2
NOTUSED, // VECT57 pwmesdn
NOTUSED, // VECT56 portp
NOTUSED, // VECT55 can4tx
NOTUSED, // VECT54 can4rx
NOTUSED, // VECT53 can4err
NOTUSED, // VECT52 can4wkup
NOTUSED, // VECT51 can3tx
NOTUSED, // VECT50 can3rx
NOTUSED, // VECT49 can3err
NOTUSED, // VECT48 can3wkup
NOTUSED, // VECT47 can2tx
NOTUSED, // VECT46 can2rx
NOTUSED, // VECT45 can2err
NOTUSED, // VECT44 can2wkup
NOTUSED, // VECT43 can1tx
NOTUSED, // VECT42 can1rx
NOTUSED, // VECT41 can1err

```

```

NOTUSED,      // VECT40  canlwkup
NOTUSED,      // VECT39  can0tx
NOTUSED,      // VECT38  can0rx
NOTUSED,      // VECT37  can0err
NOTUSED,      // VECT36  can0wkup
NOTUSED,      // VECT35  flash
NOTUSED,      // VECT34  eeprom
NOTUSED,      // VECT33  spi2
NOTUSED,      // VECT32  spi1
NOTUSED,      // VECT31  iic0
NOTUSED,      // VECT30  Reserved30
NOTUSED,      // VECT29  crgscm
NOTUSED,      // VECT28  crgplllck
NOTUSED,      // VECT27  timpabovf
NOTUSED,      // VECT26  timmdcu
NOTUSED,      // VECT25  porth
NOTUSED,      // VECT24  portj
NOTUSED,      // VECT23  atd1
ad0_interrupt, // VECT22  atd0
NOTUSED,      // VECT21  scil
NOTUSED,      // VECT20  sci0
NOTUSED,      // VECT19  spi0
NOTUSED,      // VECT18  timpaie
NOTUSED,      // VECT17  timpaaovf
NOTUSED,      // VECT16  timovf
NOTUSED,      // VECT15  timch7
NOTUSED,      // VECT14  timch6
NOTUSED,      // VECT13  timch5
NOTUSED,      // VECT12  timch4
NOTUSED,      // VECT11  timch3
NOTUSED,      // VECT10  timch2
NOTUSED,      // VECT9   timch1
NOTUSED,      // VECT8   timch0
NOTUSED,      // VECT7   rti
irqserv,      // VECT6   irq
xirqserv,     // VECT5   xirq
NOTUSED,      // VECT4   swi
NOTUSED,      // VECT3   trap
NOTUSED,      // VECT2   cop
NOTUSED,      // VECT1   clkmon
_Startup,     // VECT0   reset
};

```

3. LISTADO DE PARTES

Si bien el listado de todas las partes está incluido en el cálculo de confiabilidad, a continuación se incluye un resumen del mismo indicando módulo, nombre y cantidad de cada uno de los mismos.

| Módulo | Parte | Valor | Encapsulado | Cant. |
|------------|-------------------|----------|--------------|-------|
| USB | 93c56 | - | DIP-8 | 1 |
| USB | FT232BL | - | LQFP-32_N | 2 |
| USB | Conector Mini-USB | - | SMD | 1 |
| USB | Cristal | 6Mhz | el que haya | 2 |
| USB | Ferrite Bead | - | 300mil axial | 1 |
| USB | Resistencia | 27 | 1206 | 2 |
| USB | Resistencia | 360 | 1206 | 2 |
| USB | Resistencia | 470 | 1206 | 1 |
| USB | Resistencia | 1k5 | 1206 | 1 |
| USB | Resistencia | 2k2 | 1206 | 1 |
| USB | Resistencia | 4k7 | 1206 | 1 |
| USB | Resistencia | 10k | 1206 | 2 |
| USB | Capacitor | 27p | 1206 | 2 |
| USB | Capacitor | 10n | 1206 | 1 |
| USB | Capacitor | 100n | 1206 | 2 |
| USB | led | verde | 3.5x2.8mm | 1 |
| USB | led | rojo | 3.5x2.8mm | 1 |
| USB | Dip Switch | x4 | 0 | 4 |
| | | | | |
| XBEE | MMBT3906 | PNP | SOT23_N | 4 |
| XBEE | Resistencia | 470 | 1206 | 3 |
| XBEE | Resistencia | 10k | 1206 | 4 |
| XBEE | led | rojo | 3.5x2.8mm | 1 |
| XBEE | led | Amarillo | 3.5x2.8mm | 1 |
| XBEE | led | verde | 3.5x2.8mm | 1 |
| XBEE | Modulo XBEE | - | - | 1 |
| XBEE | Capacitor | 100n | 1206 | 1 |
| XBEE | Capacitor | 1u | 1206 | 2 |
| XBEE | Capacitor | 10u | 1206 | 1 |
| XBEE | Pines Hembra | 2mm | 0 | 2 |
| | | | | |
| Giróscopos | MCP6002T-E/SN | opamp | SOIC-SN8_N | 3 |
| Giróscopos | Resistencia | 1K | 1206 | 3 |
| Giróscopos | Resistencia | 39k | 1206 | 1 |
| Giróscopos | Resistencia | 100k | 1206 | 1 |
| Giróscopos | Resistencia | 10k | 1206 | 3 |
| Giróscopos | Resistencia | 47k | 1206 | 4 |
| Giróscopos | Capacitor | 100n | 1206 | 3 |
| Giróscopos | Pines Hembra | 0 | 100mil | 1 |
| Giróscopos | Dip switch | x6 | 0 | 6 |
| Giróscopos | Placa Inercial | 0 | 0 | 1 |
| | | | | |

| Módulo | Parte | Valor | Encapsulado | Cant. |
|---------------|--------------|-----------|-------------|-------|
| Alimentación | LM7805 | REG 5V | SMD | 1 |
| Alimentación | LM1117MP | REG 3V | SMD | 1 |
| Alimentación | polyswitch | 900ma | 0 | 2 |
| Alimentación | PWR2.5 | 0 | 2.5" | 1 |
| Alimentación | Zener | 5.1V | 400mil | 1 |
| Alimentación | Zener | 27V | 400mil | 1 |
| Alimentación | 1n5819 | schottky | 400mil | 2 |
| Alimentación | 1n5819 | schottky | 400mil | 1 |
| Alimentación | Resistencia | 270 | 1206 | 1 |
| Alimentación | Resistencia | 360 | 1206 | 1 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(50V) | 1206 | 1 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(10V) | 1206 | 2 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(50V) | 1206 | 1 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(10V) | 1206 | 2 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(10V) | 1206 | 2 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(50V) | 1206 | 1 |
| Alimentación | led | verde | 1206 | 1 |
| | | | | |
| Conexión | DB37 | Macho | 37 | 1 |
| | | | | |
| Daughterboard | MC9S12XDP512 | - | - | 1 |
| Daughterboard | 1n4148 | DIODO | 400mil | 1 |
| Daughterboard | Cristal | 16MHz | 0 | 1 |
| Daughterboard | Pulsador | (RESET) | 0 | 1 |
| Daughterboard | Resistencia | 100 | 1206 | 1 |
| Daughterboard | Resistencia | 3k3 | 1206 | 7 |
| Daughterboard | Resistencia | 4k7 | 1206 | 5 |
| Daughterboard | Resistencia | 10k | 1206 | 2 |
| Daughterboard | Resistencia | 1k8 | 1206 | 1 |
| Daughterboard | Capacitor | 22p | 1206 | 2 |
| Daughterboard | Capacitor | 2n2 | 1206 | 1 |
| Daughterboard | Capacitor | 10n | 1206 | 2 |
| Daughterboard | Capacitor | 22n | 1206 | 1 |
| Daughterboard | Capacitor | 100n | 1206 | 6 |
| Daughterboard | Capacitor | 1u | 1206 | 1 |
| Daughterboard | Capacitor | 10u | 1206 | 2 |
| Daughterboard | Capacitor | 100u | 5x6.8 | 3 |

4. EXPERIENCIAS ACCESORIAS

Una de las principales motivaciones a la hora de comenzar este proyecto, fue nuestro trabajo previo en el proyecto SAETA. Este fue el primer proyecto para el cual ideamos esta plataforma de desarrollo y por lo tanto la relación entre ambos proyectos fue simbiótica.

SAETA es el prototipo de un dispositivo de transporte para una persona. Consiste en un robot de dos ruedas motorizadas individualmente ubicadas en los laterales del mismo, las cuales proporcionan la potencia, estabilidad y maniobrabilidad necesaria para un viaje rápido y confortable. Lo interesante de este sistema es que es auto equilibrante, dando libertad al usuario de disfrutar del paseo sin necesidad de hacer equilibrio, permitiendo acelerar, frenar y doblar con completa seguridad.

Como todo vehículo de transporte la función principal de SAETA, es llevar personas de un lado a otro. Debido a la tecnología utilizada la función de SAETA, puede ser fácilmente programada, dando al dispositivo una gran versatilidad en cuanto a su uso. En los países más desarrollados se utilizan sistemas similares a SAETA para cumplir funciones de vigilancia y seguridad, transporte en zonas turísticas, inclusive puede reemplazar al clásico carrito de golf.



Fig. 25. Sistema de transporte SAETA llevando a un pasajero.

Si bien SAETA es en teoría simplemente un caso particular dentro del clásico problema físico del “péndulo invertido”, es notablemente más complicada su implementación en la práctica. En un principio, lo que se buscaba demostrar era el correcto funcionamiento de un controlador PID pero existen diversos obstáculos para poder llegar hasta la aplicación del sistema de control.

Para empezar, fue necesario el diseño mecánico del prototipo. Para ello hubo que realizar planos de cada pieza y luego mandarlas a fabricar o bien torneirlas por nuestra cuenta. Una vez que se alcanzó este objetivo, fue necesario el diseño de la parte eléctrica (motores, cableado interno, etc.) para que finalmente se pudieran montar los sensores y el microprocesador. Como puede verse, el sistema de control no pudo

probarse sino hasta que se completaron las otras dos instancias. Si bien el proyecto del kit de desarrollo no busca ahorrar tiempo en el diseño mecánico de los prototipos, contar con un kit de desarrollo confiable habría sido de gran ayuda.

Originalmente, sobre la base de SAETA había 3 placas amuradas sobre un acrílico que se interconectaban entre sí mediante cables. Estas eran: el microprocesador, la placa con el módulo inercial y finalmente la placa de comunicación inalámbrica (Xbee).

Una vez que estuvo finalizado el prototipo del kit de desarrollo, se lo colocó sobre SAETA para reemplazar el sistema existente. A primera vista se observa que se ha ganado no solamente en prolijidad sino también en rigidez y durabilidad dada la inexistencia de cables que comuniquen los distintos módulos. Estos se encuentran ahora conectados internamente dentro del kit de desarrollo. Otro aspecto interesante de notar es que no se necesitaron hacer grandes cambios a la estructura preexistente. Solamente fue necesario fabricar una placa adaptadora que fuera capaz de ordenar los cables –que antes se conectaban pin a pin sobre el microprocesador– al conector DB-37.



Fig. 26. Ubicación de las tres placas antes de utilizar el kit de desarrollo.

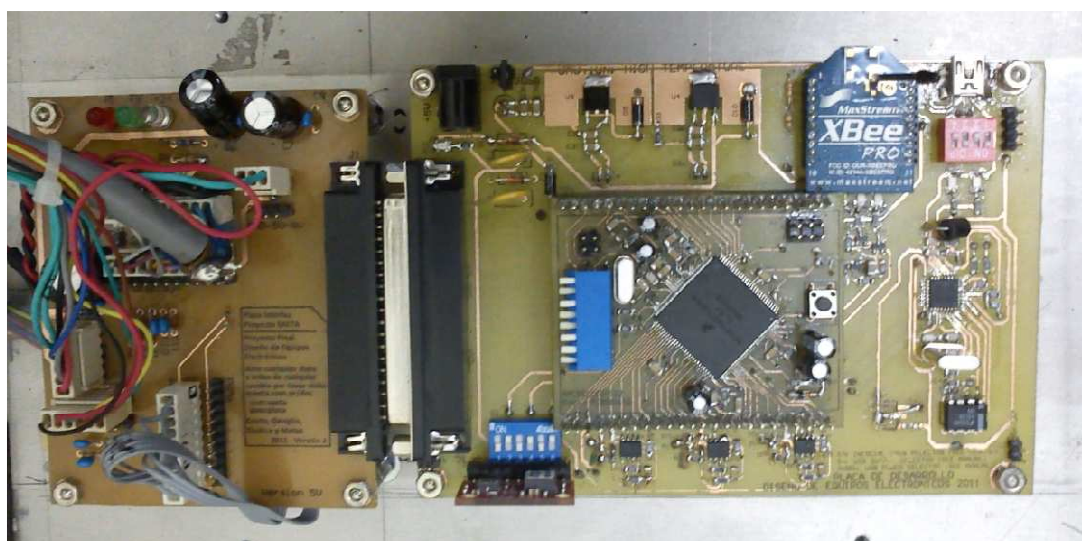


Fig. 27. Ubicación nueva con el kit de desarrollo y la placa adaptadora.

5. HOJAS DE DATOS DE COMPONENTES Y HOJAS DE APLICACION

- ✓ 1N4148: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf
- ✓ 1N5819: <http://www.oup.com/us/pdf/microcircuits/students/diode/1n5817-fair.pdf>
- ✓ NMC93C56: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/320/462316_DS.pdf
- ✓ ADXL203: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL103_203.pdf
- ✓ ADXRS613: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS613.pdf
- ✓ FT232DL/BQ: <http://pdf1.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view/197628/FTDI/FT232BQ.html>
- ✓ LM1117MP: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117-n.pdf>
- ✓ LM7805: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>
- ✓ MAX3222: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
- ✓ MC9S12XDP512:
http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S12XDP512RMV2.pdf
- ✓ MC912DP256: http://www.eng.uwo.ca/electrical/e-shop/micros/MC912DP256%20Manual%20r1_1.pdf
- ✓ MCP6002: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21733f.pdf>
- ✓ MMBT3906: <http://www.fairchildsemi.com/ds/2N/2N3906.pdf>
- ✓ Xbee-PRO: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-series1-module#docs>
- ✓ MIL-HDBK-217F

7. DETALLE DEL CÁLCULO DE CONFIABILIDAD

| Modulo | Parte | Valor | Encapsulado | Cant. | Confiabilidad | | | | | | | | | | | | | | λ_p Unitario (/10^6 hs) | MTBF Unitario (/10^6 hs) |
|------------|--------------|----------|--------------|-------|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|--------|-------|---------|-------------|---------|---------|--|-----------------------------------|
| | | | | | λ_b | π_E | π_Q | π_R | π_{CV} | π_T | π_S | π_C | C_1 | C_2 | π_L | π_{CYC} | π_A | π_K | | |
| USB | 93c56 | - | DIP-8 | 1 | 1 | 4,00 | 2,00 | 1 | 1 | 2,80 | 1 | 1 | 0,0009 | 0,003 | 1 | 0,401 | 1 | 1 | 0,83 | 1 |
| USB | FT232BL | - | LQFP-32_N | 2 | 1 | 4,00 | 2,00 | 1 | 1 | 0,80 | 1 | 1 | 0,29 | 0,017 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,60 | 2 |
| USB | Mini-USB | - | SMD | 1 | 0,046 | 8,00 | 2,00 | 1 | 1 | 0,91 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2,01 | 0,50 |
| USB | Cristal | 6Mhz | el que haya | 2 | 0,022 | 10,00 | 2,10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,46 | 2 |
| USB | Ferrite Bead | - | 300mil axial | 1 | 0,0006 | 12,00 | 4,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,03 | 35 |
| USB | Resistencia | 27 | 1206 | 2 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 360 | 1206 | 2 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 470 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 1k5 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 2k2 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 4k7 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Resistencia | 10k | 1206 | 2 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| USB | Capacitor | 27p | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 0,59 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,02 | 52 |
| USB | Capacitor | 10n | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,04 | 27 |
| USB | Capacitor | 100n | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| USB | led | verde | 3.5x2.8mm | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| USB | led | rojo | 3.5x2.8mm | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| USB | Dip Switch | x4 | | 4 | 0,04 | 18,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,72 | 1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XBEE | MMBT3906 | PNP | SOT23_N | 4 | 0,00074 | 9,00 | 8,00 | 0,77 | 1 | 2,80 | 0,11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,7 | 0,01 | 79 |
| XBEE | Resistencia | 470 | 1206 | 3 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| XBEE | Resistencia | 10k | 1206 | 4 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| XBEE | led | rojo | 3.5x2.8mm | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| XBEE | led | Amarillo | 3.5x2.8mm | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| XBEE | led | verde | 3.5x2.8mm | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| XBEE | Capacitor | 100n | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| XBEE | Capacitor | 1u | 1206 | 2 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,41 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,11 | 9 |
| XBEE | Capacitor | 10u | 1206 | 1 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,53 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,15 | 7 |
| XBEE | Pines Hembra | 2mm | | 2 | 0,04 | 8,00 | 2,00 | 1 | 1 | 0,91 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,29 | 3 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Giróscopos | MCP6002T | opamp | SOIC | 3 | 1 | 0,50 | 2,00 | 1 | 1 | 0,15 | 1 | 1 | 0,01 | 0,003 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,15 | 7 |
| Giróscopos | Resistencia | 1K | 1206 | 3 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |

| Modulo | Parte | Valor | Encapsulado | Cant. | Confiabilidad | | | | | | | | | | | | | | λ_p Unitario (/10^6 hs) | MTBF Unitario (/10^6 hs) |
|--------------|--------------|-----------|-------------|-------|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|-------------|---------|---------|--|-----------------------------------|
| | | | | | λ_b | π_E | π_Q | π_R | π_{CV} | π_T | π_S | π_C | C_1 | C_2 | π_L | π_{CYC} | π_A | π_K | | |
| Giróscopos | Resistencia | 39k | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Giróscopos | Resistencia | 100k | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1,1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,06 | 17 |
| Giróscopos | Resistencia | 10k | 1206 | 3 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Giróscopos | Resistencia | 47k | 1206 | 4 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Giróscopos | Capacitor | 100n | 1206 | 3 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| Giróscopos | Pines Hembra | | 100mil | 1 | 0,04 | 8,00 | 2,00 | 1 | 1 | 0,91 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,29 | 3 |
| Giróscopos | Dip switch | x6 | | 6 | 0,04 | 18,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,72 | 1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Alimentación | polyswitch | 900ma | | 2 | 0,01 | 8,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,08 | 13 |
| Alimentación | PWR2.5 | | 2.5" | 1 | 0,001 | 8,00 | 2,00 | 1 | 1 | 1,10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0,05 | 19 |
| Alimentación | Zener | 5.1V | 400mil | 1 | 0,002 | 9,00 | 8,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,14 | 7 |
| Alimentación | Zener | 27V | 400mil | 1 | 0,002 | 9,00 | 8,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,14 | 7 |
| Alimentación | 1n5819 | schottky | 400mil | 2 | 0,003 | 9,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 0,054 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 125 |
| Alimentación | 1n5819 | schottky | 400mil | 1 | 0,003 | 9,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 0,58 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,09 | 12 |
| Alimentación | Resistencia | 270 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Alimentación | Resistencia | 360 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(50V) | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,04 | 27 |
| Alimentación | Capacitor | 10n(10V) | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,04 | 27 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(50V) | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| Alimentación | Capacitor | 100n(10V) | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(10V) | 1206 | 2 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,78 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,22 | 5 |
| Alimentación | Capacitor | 100u(50V) | 1206 | 1 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,78 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,22 | 5 |
| Alimentación | led | verde | 1206 | 1 | 0,00023 | 8,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 99 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Conexión | DB37 | Macho | 37 | 1 | 0,021 | 8,00 | 2,00 | 1 | 1 | 0,91 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 0,92 | 1 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Daughter | MC9S12XDP512 | - | - | 1 | 1 | 4,00 | 1 | 1 | 1 | 0,60 | 1 | 1 | 0,28 | 0,68 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2,89 | 0 |
| Daughter | 1n4148 | DIODO | 400mil | 1 | 0,0038 | 9,00 | 5,50 | 1 | 1 | 1 | 0,054 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,01 | 98 |
| Daughter | Cristal | 16MHz | | 1 | 0,026 | 10,00 | 0,10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,03 | 38 |
| Daughter | Pulsador | (RESET) | | 1 | 0,04 | 18,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,72 | 1 |
| Daughter | Resistencia | 100 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Daughter | Resistencia | 3k3 | 1206 | 7 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Daughter | Resistencia | 4k7 | 1206 | 5 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Daughter | Resistencia | 10k | 1206 | 2 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |

| Modulo | Parte | Valor | Encapsulado | Cant. | Confiabilidad | | | | | | | | | | | | | | λ_p Unitario (/10^6 hs) | MTBF Unitario (/10^6 hs) |
|----------|----------------|-------|-------------|-------|---------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|-------------|---------|---------|--|-----------------------------------|
| | | | | | λ_b | π_E | π_Q | π_R | π_{CV} | π_T | π_S | π_C | C_1 | C_2 | π_L | π_{CYC} | π_A | π_K | | |
| Daughter | Resistencia | 1k8 | 1206 | 1 | 0,0013 | 8,00 | 5,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 19 |
| Daughter | Capacitor | 22p | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 0,58 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,02 | 54 |
| Daughter | Capacitor | 2n2 | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 0,96 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,03 | 32 |
| Daughter | Capacitor | 10n | 1206 | 2 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,04 | 27 |
| Daughter | Capacitor | 22n | 1206 | 1 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,23 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,04 | 25 |
| Daughter | Capacitor | 100n | 1206 | 6 | 0,0012 | 9,00 | 3,00 | 1 | 1,45 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,05 | 21 |
| Daughter | Capacitor | 1u | 1206 | 1 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,34 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,09 | 11 |
| Daughter | Capacitor | 10u | 1206 | 2 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,51 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,14 | 7 |
| Daughter | Capacitor | 100u | 5x6.8 | 3 | 0,0077 | 12,00 | 3,00 | 1 | 0,78 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,22 | 5 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Varios | Conexiones PCB | | | 1 | 0,000017 | 7,00 | 2,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 285 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,95 | 1 |