



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA TELEOPERACIÓN DE
ROBOT SUBMARINO**

Por:
Danilo Díaz Tarascó

PROYECTO DE GRADO

Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar
como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Sartenejas, Abril de 2016



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA TELEOPERACIÓN DE
ROBOT SUBMARINO**

Por:
Danilo Díaz Tarascó

Realizado con la asesoría de:
Prof. José Cappelletto

PROYECTO DE GRADO
Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar
como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Sartenejas, Abril de 2016



**UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA TELEOPERACIÓN DE
ROBOT SUBMARINO**

Presentado por:

Danilo Díaz Tarascó

Realizado con la asesoría del profesor:

José Cappelletto.

RESUMEN

El Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica de la Universidad Simón Bolívar se encuentra trabajando continuamente, desde el año 2003, en el desarrollo de robots submarinos y tecnologías conexas para actividades de investigación, exploración e inspección submarina. La necesidad de desarrollar una nueva plataforma, más versátil y económica que las precedentes, dio un impulso al prototipo denominado "X-Sub". En base a ello se desarrolló el presente trabajo, el cual contempla el diseño y fabricación de un sistema de telemetría para la teleoperación remota del prototipo. Consta de un microcontrolador de 32 bits que adquiere las señales de los sensores y los centraliza hasta una PC a bordo. Dicha PC lleva un registro de todos los datos y los reenvía a una estación base, de la cual también se reciben las órdenes de control de los motores y demás actuadores a bordo. La arquitectura propuesta provee de capacidades de expansión, modularidad y robustez al diseño. Se diseñaron, simularon y fabricaron todos los circuitos impresos y se hicieron pruebas exhaustivas de operación del sistema.

Palabras claves: Mecatrónica, submarino, teleoperación, telemetría, robots.

DEDICATORIA

“La Ingeniería es el arte de lo posible”

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios por darme vida, a mi familia por apoyarme en todo momento, a la Universidad Simón Bolívar por ser mi segunda casa, al Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica por darme las herramientas, espacio, recursos y un incondicional apoyo en mi desarrollo como estudiante de ingeniería y como persona. Particularmente a mi tutor José Cappelletto por haberme apoyado y soportado durante el desarrollo de este trabajo, al profesor Erick Argüello por prestar ayuda y ser atento en el momento de fabricar el circuito impreso y al profesor Villegas por enseñarme a realizar un montaje de circuito correcto, soldadura de montaje superficial y apoyo en cualquier área de este trabajo de grado.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
Justificación	5
CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	6
1.1. OpenROV	6
1.2. Girona 500.....	10
1.3. Trident	13
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA	15
2.1. Descripción de la plataforma submarina	15
2.2. Descripción de sensores.....	19
2.2.1. Sensor de temperatura externa DS18B20	19
2.2.3. Brújula digital HMC6352.....	21
2.2.4. Sensor de presión MPX5700AP	21
2.2.5. Sensores discretos.....	22
Sensor de agua	22
Nivel de carga de baterías.....	24
Sensor de velocidad lineal por termistores (opcional).....	24
2.3. Descripción de los actuadores.....	26

2.3.1.	Motor BLDC controlado por ESC.....	27
2.3.2.	Driver LED Alta Intensidad.....	30
2.3.3.	Servo Motor para Cámara HD.....	31
2.3.4.	LEDs de Handshake y tarjeta de expansión.....	33
2.4.	Elección de MCU.	33
2.5.	Arquitectura elegida.	36
CAPÍTULO 3. PROCESO DE PROTOTIPADO E IMPLEMENTACIÓN		38
3.1.	Cálculo de ancho de banda.	39
3.2.	Uso de tarjeta de desarrollo DEMOQE128.	43
CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TELEMETRIA		44
4.1.	Diseño del PCB.	44
4.1.1.	Método de fabricación.	44
	Características del método de fabricación.	45
4.1.2.	Máquina de Extrusión de Cobre.	46
4.1.3.	Reglas de diseño.	48
4.1.4.	Diseño de tarjeta de distribución de energía y <i>forward</i> de pines entre pcDuino y tarjeta de adquisición.	50
	Voltajes requeridos.	51
	Requerimientos de pcDuino.	53
	Requerimientos de la tarjeta de adquisición.	53
	Distribución Mecánica.....	53
	Esquemático.....	54
4.1.5.	Diseño de tarjeta de adquisición.	62
	Adquisición de sensores por protocolo I2C.....	63
	Adquisición del Sensor de Temperatura Externa DS18B20.....	63

1-Wire y Protocolo UART.....	65
Sensor de presencia de agua.	67
Adquisición de sensores analógicos.	68
Nivel de Carga de Baterías.	69
Presión absoluta.	70
Diseño de PCB.....	70
Conexión de los actuadores.	73
Capas de Tarjeta de Adquisición.	75
Componentes de la tarjeta.....	78
Distribución mecánica.	80
4.2. Fabricación.	82
4.2.1. Extrusión en la Protomat S62.	82
4.2.2. Soldadura de componentes.	84
4.3. Desarrollo de firmware	86
4.3.1. Adquisición de ángulo con respecto al norte.	86
4.3.2. Adquisición de datos de la IMU.	87
4.3.3. Adquisición de valores analógicos.....	89
4.3.4. Adquisición de temperatura externa.	90
4.3.5. Adquisición de sensores de presencia de agua.	92
4.3.6. Manejo de Servos.....	93
4.3.7. Manejo de ESC.	94
4.3.8. Trama de datos UART.....	99
4.3.9. Flujo general del firmware.....	100
4.4. Uso De Computador A Bordo pcDuino	102
4.5. Diseño de interfaz gráfica.....	106

4.5.1. Interfaz por UART.....	107
4.5.2. Interfaz por TCP/IP.....	110
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	112
5.1. Continuación del proyecto y el desarrollo.....	115
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES.....	118
REFERENCIAS	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Variables Físicas, Sensor y Tipo de Salida.....	18
Tabla 1.2 Descripción de cables del sensor de temperatura DS18B20.	19
Tabla 1.3 Actuadores, Cantidad y Tipo de Entrada.....	27
Tabla 1.4 Características del Motor Turnigy® D2830/11.....	28
Tabla 1.5 Características del servo HITEC® HS-422. [14]	32
Tabla 1.6 Contabilización de puertos de I/O mínimos.	34
Tabla 1.7 Comparación de los MCU MCF51QE128 y MCF51AC256.	34
Tabla 3.1 Características de placa Arduino® Uno.	38
Tabla 3.2 Ancho de banda por sensor.....	40
Tabla 3.3 Porcentaje de ancho de banda ocupado y disponible.	42
Tabla 4.1 Características Técnicas de la Protomat® S62 [16].	47
Tabla 4.2 Componentes de tarjeta de distribución de energía y <i>forward</i> de pcDuino – Tarjeta de procesamiento.	59
Tabla 4.3 Comandos de 1-Wire. [18]	65
Tabla 4.4 Puertos del MCU utilizados.....	72
Tabla 4.5 Componentes de tarjeta de adquisición.	78
Tabla 4.6 Características de señal de control para ESC Hobby King®.	97
Tabla 4.7 Características de señal de control para ESC Sky-Wing.....	98
Tabla 4.8 Trama de envío de datos MCU – PC.....	99
Tabla 4.9 Trama de recepción de datos PC – MCU.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0.1 CAD 3D del primero prototipo de robot submarino desarrollado por el GIDM.....	1
Figura 0.2 Fotos primer robot submarino. [1]	2
Figura 0.3 Imágenes del prototipo “ErSub”. [1].....	3
Figura 0.4 Prototipo “Poseibot”. [1]	4
Figura 1.1 OpenROV 2.8. [3]	7
Figura 1.2 Vista frontal del OpenROV 2.8.....	7
Figura 1.3 Arquitectura OpenROV. [3]	8
Figura 1.4 Vista posterior del OpenROV 2.8	10
Figura 1.5 Girona 500.....	11
Figura 1.6 Vista frontal del Trident	13
Figura 1.7 Partes importantes del Trident.....	14
Figura 1.8 Diagrama de la Arquitectura planteada.....	16
Figura 1.9 Configuración del X-Sub	17
Figura 1.10 Sensor de temperatura DS18B20 [6].....	19
Figura 1.11 Unidad de medición inercial MPU-6050 en la tarjeta GY-521 [7]	20
Figura 1.12 Brújula Digital HMC6352 [8]	21
Figura 1.13 Sensor de Presión MPX5700AP	22
Figura 1.14 Ejemplo de Esquemático de Sensor de Agua.....	23
Figura 1.15 Esquemático de Obtención de carga de Batería	24
Figura 1.16 Termistor de Tecnología <i>Through Hole</i>	25
Figura 1.17 Circuito para medición de flujo por medio de termistores.....	25
Figura 1.18 Grados de libertad en R3. [11]	26
Figura 1.19 Motor utilizado en el X-Sub (mm).....	27

Figura 1.20 ESC Sky-Wing®.	29
Figura 1.21 ESC Hobby King®. [12]	29
Figura 1.22 Conector estándar para ESC y Servos.	30
Figura 1.23 Cara superior (a) e inferior (b) de tarjeta <i>Driver</i> de LEDs. [1]	30
Figura 1.24 Cámara <i>LifeCam Cinema</i> de Microsoft. [13]	31
Figura 1.25 Base para cámara PTZ.	31
Figura 1.26 Servo HITEC HS-422. [14]	32
Figura 1.27 Microservo HITEC® HS-85BB	33
Figura 1.28 Micro-computador pcDuino	36
Figura 1.29 Diagrama de Arquitectura por Módulos.	37
Figura 3.1 Arduino® Uno, placa utilizada para prueba de sensores.	38
Figura 3.2 Densidad Espectral de Potencia vs Frecuencia del oleaje según el modelo de Pierson-Moskowitz. [15]	39
Figura 3.3 DEMOQE128 utilizado.	43
Figura 4.1 Diagrama de funcionamiento de tarjetas.	46
Figura 4.2 Máquina Protomat® S62 de extrusión para prototipado de PCB.	47
Figura 4.3 Brocas de perforación y extrusión de la máquina de prototipado.	48
Figura 4.4 Distancia mínima entre objetos cercanos al microcontrolador	49
Figura 4.5 Distancia mínima entre objetos cercanos	49
Figura 4.6 Ancho de pistas	49
Figura 4.7 Tamaño de vías.	50
Figura 4.8 Diagrama de Voltajes Necesarios.	51
Figura 4.9 Fuente conmutada.	52
Figura 4.10 Pines de pcDuino y Shield para Arduino.	53
Figura 4.11 Esquemático de tarjeta de distribución de energía y bypass de pines.	54

Figura 4.12 Redireccionamiento de Pines.....	55
Figura 4.13 LED de estatus para el pcDuino.....	55
Figura 4.14 Redireccionamiento de pines del pcDuino a la Tarjeta de Procesamiento.	56
Figura 4.15 Esquemático de entradas y salidas de potencia.....	56
Figura 4.16 Esquemático de distribución de energía.....	57
Figura 4.17 <i>Top Layer</i> (Capa superior).	58
Figura 4.18 <i>Botton Layer</i> (Capa Inferior).....	60
Figura 4.19 Vista Frontal 3D de tarjeta de distribución de energía y <i>forward</i> entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.....	61
Figura 4.20 Vista Posterior 3D de tarjeta de distribución de energía y <i>forward</i> entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.....	61
Figura 4.21 Vista isométrica 3D de tarjeta de distribución de energía y <i>forward</i> entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.....	62
Figura 4.22 MCU MCF51QE128CLH en SMD.....	62
Figura 4.23 Circuito de Comunicación I2C Implementado.....	63
Figura 4.24 Diagrama de conexión básico por 1-Wire.....	64
Figura 4.25 Circuito discreto de Maxim para UART drenador abierto. [17]	66
Figura 4.26 Circuito simplificado para UART a 1-Wire. [19]	66
Figura 4.27 Circuito de UART a 1-Wire planteado.	67
Figura 4.28 Circuito para detectar presencia de agua.....	68
Figura 4.29 Circuito para obtener nivel de carga de baterías.	69
Figura 4.30 Circuito para obtener nivel de presión con el sensor MPX5700AP.....	70
Figura 4.31 Esquemático de Tarjeta de Adquisición.....	71
Figura 4.32 Conector hembra de RJ45 para PCB.....	73
Figura 4.33 Conexión para servos y selección de fuente de alimentación.	74
Figura 4.34 Diagrama de conexión de señales para ESC y luces LED.	74

Figura 4.35 Vista de capa superior de tarjeta de adquisición.....	75
Figura 4.36 Vista de capa inferior de tarjeta de adquisición.....	76
Figura 4.37 Tarjeta de distribución de pines para XBEE.....	76
Figura 4.38 Vista frontal de modelo 3D de tarjeta de adquisición.....	77
Figura 4.39 Vista posterior de modelo 3D de tarjeta de adquisición.....	77
Figura 4.40 Vista Isométrica de modelo 3D de tarjeta de adquisición.....	78
Figura 4.41 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista isométrica.....	80
Figura 4.42 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista de etapa de potencia.....	81
Figura 4.43 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista lateral.....	81
Figura 4.44 Disposición de las tarjetas en la baquelita a utilizar en el proceso de fabricación....	82
Figura 4.45 Protomat S62 realizando extrusión de cobre.....	83
Figura 4.46 PCB fabricado en la Protomat S62 y el pcDuino.....	84
Figura 4.47 Acercamiento a la soldadura del MCU y el diodo 1N4148.....	85
Figura 4.48 Tarjetas de adquisición y distribución integradas con el pcDuino.....	86
Figura 4.49 Diagrama para obtener ángulo con respecto al norte con brújula electrónica HMC6352.	87
Figura 4.50 Inicialización de IMU.....	88
Figura 4.51 Obtención de datos de la IMU.....	89
Figura 4.52 Pasos para medir con el ADC las variables físicas de interés.....	90
Figura 4.53 Pasos para activar dispositivo esclavo por 1-Wire.....	91
Figura 4.54 Pasos para obtener temperatura externa de sensor 1-Wire.....	92
Figura 4.55 Señales para controlar un servo.....	93
Figura 4.56 Configuración del <i>duty cycle</i> de la PWM para servo.....	94
Figura 4.57 Receptor de radiofrecuencia utilizado para observar las señales de control para ESC.	95

Figura 4.58 Radiocontrol utilizado para las pruebas.....	95
Figura 4.59 PWM del ESC Hobby King para estado neutro.....	96
Figura 4.60 PWM del ESC Hobby King para avanzar.....	96
Figura 4.61 PWM del ESC Hobby King para retroceder.....	97
Figura 4.62 Fases para Inicializar ESC.....	98
Figura 4.63 Flujo general del firmware.....	101
Figura 4.64 Pines de puerto serial.....	103
Figura 4.65 Diagrama de Flujo de funcionamiento de pcDuino.	104
Figura 4.66 Diagrama de flujo de conexión por protocolo TCP/IP.....	105
Figura 4.67 Diagrama de interfaz de <i>Simulink</i> para analizar espectro de aceleración.	106
Figura 4.68 Puerto UART auxiliar en la tarjeta de adquisición.	107
Figura 4.69 Diagrama de Simulink® para transmisión de información de <i>joystick</i>	108
Figura 4.70 Diagrama de Simulink® para recepción de datos por UART.....	109
Figura 4.71 Puerto de <i>ethernet</i> utilizado para comunicar el pcDuino con la estación base.	110
Figura 4.72 Diagrama de Simulink® para interfaz por TCP/IP.	111
Figura 5.1 Sistema de telemetría en prueba.....	112
Figura 5.2 Sistema de telemetría real y renderizado 3D.....	113
Figura 5.3 Transistores 2N3906 utilizados como sustituto en la tarjeta de adquisición.....	114
Figura 5.4 Tarjeta de Adquisición y sus puertos de adquisición, control, alimentación y expansión.	115
Figura 5.5 Repositorio público para mantenimiento y actualización constante del proyecto.	116

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- AUV: *Autonomous Underwater Vehicle* (Vehículo Autónomo Submarino).
- BEC: *Battery Eliminator Circuit* (Circuito Eliminador de Batería).
- BLDC: *Brushless Direct Current* (Motor sin Escobillas de Corriente Directa).
- ESC: *Electronic Speed Controller* (Controlador Electrónico de Velocidad).
- HDMI: *High-Definition Multimedia Interface* (Interface Multimedia de Alta Definición).
- I2C: *Inter-Integrated Circuit* (Circuitos Inter-Integrados).
- IMU: *Inertial Measurement Unit* (Unidad de Medición Inercial).
- IP: *Internet Protocol* (Protocolo de Internet).
- LDO: *Low Dropout* (Baja Caída).
- MAC: *Media Access Control* (Control de Acceso a Media).
- PC: *Personal Computer* (Computador Personal).
- PCB: *Printed Circuit Board* (Tarjeta de Circuito Impreso).
- PTZ: *Pan-tilt-zoom* (Panorámica-Inclinación-Acercamiento).
- PWM: *Pulse Width Modulation*. (Modulación por Ancho de Pulso).
- ROV: *Remote Operated Vehicle* (Vehículo Teleoperado).
- SCL: *Serial Clock* (Reloj Serial).
- SDA: *Serial Data* (Data Serial).
- SO: Sistema Operativo.
- SSH: *Secure Shell* (Consola Segura).
- UART: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (Receptor-Transmisor Asíncrono Universal).

INTRODUCCIÓN

El Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica (GIDM) de la Universidad Simón Bolívar, en búsqueda del conocimiento y desarrollo de nuevas y mejores tecnologías desde el año 2003 está desarrollando prototipos de plataformas submarinas para la exploración, inspección e investigación de las profundidades marinas. La necesidad de plantear una nueva plataforma, más versátil y más económica dio un impulso al prototipo llamado X-Sub.

Antecedentes

Dentro del GIDM, se ha estado trabajando en el desarrollo de plataformas robóticas submarinas desde el año 2003. El primer prototipo de robot submarino fue desarrollado conjuntamente con el Laboratorio de Dinámica de Máquinas y el Prof. Manuel Rivas. Éste prototipo tuvo una primera fase de diseño en CAD (ver Figura 0.1) y fabricación, a cargo del estudiante de mecánica, B. Magalhaes como parte de su proyecto de grado en ingeniería mecánica. [1]

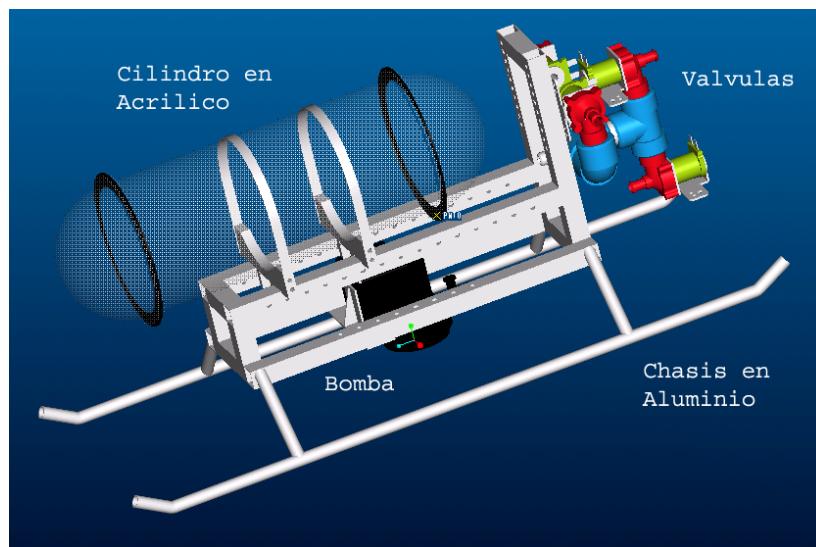


Figura 0.1 CAD 3D del primero prototipo de robot submarino desarrollado por el GIDM.

Una vez realizado el análisis mecánico, se desarrolló parte de la instrumentación básica, electrónica de potencia y control. Esto como parte de la tesis de pregrado de F. León y J.

Sus características más relevantes:

- Chasis cilíndrico de policarbonato (PC)
- Dimensiones: 40 x 18 x 22 cm
- Propulsión: 1 bomba electro-sumergible + 4 válvulas electro-actuadas (ON/OFF)
- Alimentación: Interno, 1 batería 12V 7Ah, A.G.M. (plomo-ácido)
- Autonomía de 4 horas.
- Sistema de iluminación por LEDs de alto brillo.
- Control activo de inclinación.
- Teleoperación mediante enlace serial + inalámbrico
- Interfaz en LabView 6.1 ®

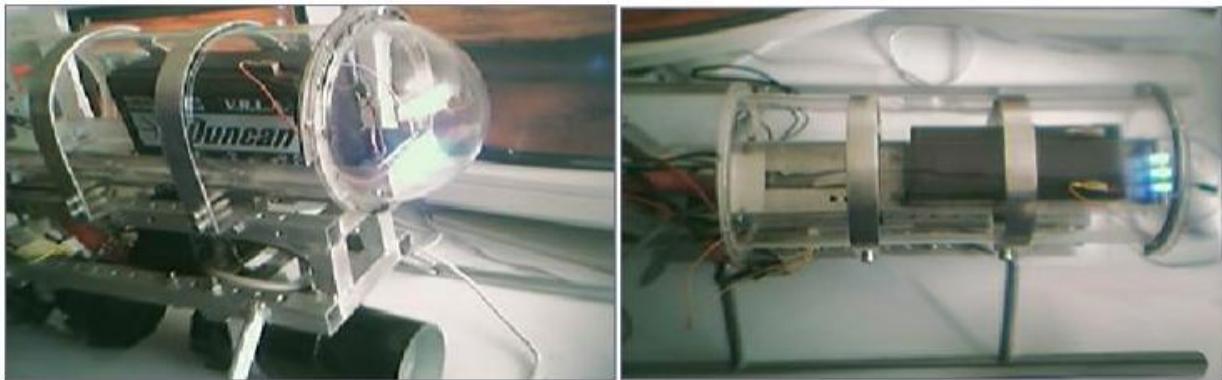


Figura 0.2 Fotos primer robot submarino. [1]

Las bombas y válvulas operaban a 110VAC, lo cual exigió la adición de un inversor de voltaje DC-AC en el interior del ROV (*Remote Operated Vehicle*). La electrónica necesaria para un robot submarino en cuanto a sensores estaba ausente.

En el año 2005, se desarrolló un segundo prototipo de ROV llamado "ErSub", mostrado en la Figura 0.3. Este fue desarrollado por C. Ruella dentro del GIDM, bajo la supervisión del prof. L. Fermín. En base a lo aprendido en el primer prototipo, este nuevo ROV incluyó una serie de modificaciones tanto en el chasis como en el sistema electrónico. Éstas se reflejan en las principales características que se destacan a continuación:

- Chasis tubular doble de PVC.
- Dimensiones: 36 x 18 x 15 cm.
- Propulsión: 3 motores DC de 6V.
- Alimentación: 1 batería 7.2@1600 mAh, NiMH.
- Autonomía de 1,5 horas.
- Sensores de inclinación, presión y profundidad.
- Control activo de profundidad.
- Teleoperación mediante enlace serial.
- Interfaz en LabView 8.0. [1]



Figura 0.3 Imágenes del prototipo “ErSub”. [1]

Los problemas más relevantes de este prototipo era la falta de rigidez del chasis y la necesidad de mantenimiento de los motores y de los sellos basados en estoperas.

A partir del año 2005, se empezó con el desarrollo de la nueva y más reciente plataforma ROV dentro GIDM, llamada "Poseibot" mostrada en la Figura 0.4. Esta plataforma fue desarrollada inicialmente por C. Ruella y M. Cabrera y representa un salto cualitativo y cuantitativo importante dentro de la línea de investigación de robots submarinos dentro del GIDM y en Venezuela. A saber, es el primer ROV operativo desarrollado en la academia venezolana.

En esta plataforma han trabajado no menos de una docena de estudiantes de pregrado, y algunos estudiantes de postgrado. Producto de estos trabajos se han logrado varias publicaciones nacionales y en conferencias y revistas internacionales, aparte de servir como plataforma de prueba para distintos algoritmos de navegación, control y teleoperación desarrollados dentro del grupo.

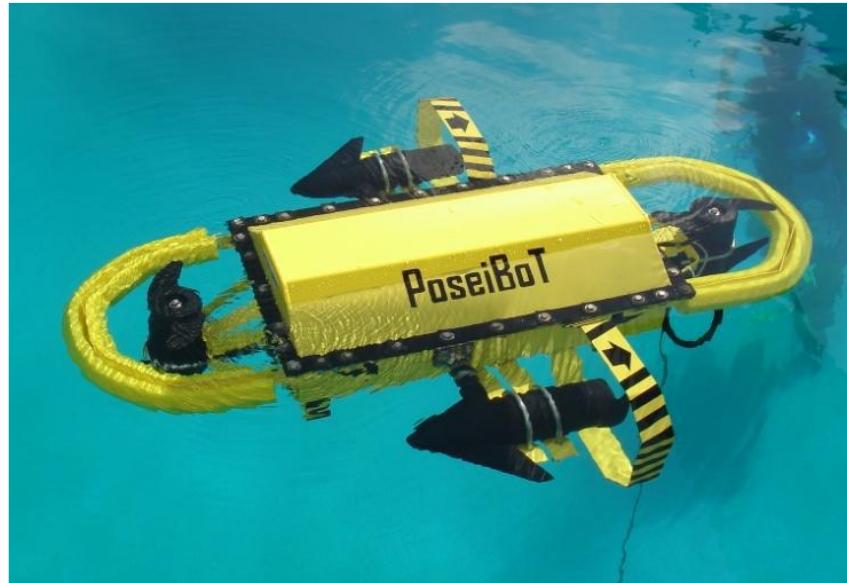


Figura 0.4 Prototipo “Poseibot”. [1]

A continuación, se mencionan algunos detalles técnicos correspondientes al Poseibot:

- Chasis monopieza de aluminio 3,5 mm de espesor.
- Dimensiones: 62 x 39 x 40 cm (sin motores).
- Propulsión: 4 Motores DC, 12V.
- Alimentación: 4 x Baterías 12V@28Ah, Plomo AGM.
- Autonomía de 2,5 horas.
- Sensores de aceleración triaxial, brújula, presión interna y externa, temperatura, nivel de carga y profundidad.
- Control activo de profundidad.
- Teleoperación mediante enlace serial sobre Ethernet.
- Boya de retransmisión WiFi.
- Cámara USB-IP. [1]

En lo que respecta al sistema de telemetría, fue actualizado en el 2012 por A. Makhoul y J. Guzmán, diseñando un sistema de microcontroladores esclavos que se comunican mediante un bus I2C. Conjuntamente se dispone de un sistema de alimentación compuesto por fuentes conmutadas adecuadas a las necesidades y en conjunto, buscaron mejorar las dimensiones, capacidad, robustez y modularidad.

El trabajo de actualización del Poseibot es de gran importancia dado que crea un hito en la línea de investigación del GIDM. Hubo un cambio de paradigma en el momento de diseñar y esto se demuestra en los cambios realizados:

- Expansibilidad mediante desarrollo de módulos de expansión.
- Reducción del tamaño de la electrónica.
- Aumento de la eficiencia de los reguladores conmutados.
- Actualización del sistema de luces con leds de alta intensidad.

Justificación

Entendiendo el contexto y relevancia, este trabajo de grado busca dar un paso en el avance de esta línea de investigación; desarrollando y planteando un sistema de telemetría que permita la expansión y actualidad sin perder los pilares de un buen diseño de ingeniería.

El X-Sub tiene de base una filosofía totalmente distinta a la llevada en los anteriores diseños. Busca cumplir las tareas básicas con los requerimientos de hoy en día en un paquete pequeño, de sencillo mantenimiento, fácil de transportar y eficiente. Esto, utilizando los desarrollos de tecnologías emergentes en el ámbito de máquinas eléctricas, diseño de circuitos y un equipo de vanguardia, X-Sub busca crear un hito y competir entre los ROVs de alto desempeño a nivel mundial.

El X-Sub cuenta con un equipo de trabajo multidisciplinario que abarca áreas como la electrónica, inteligencia artificial, mecánica y biología. Esto permite que los desarrollos que se realicen contengan un criterio consensuado en un gran espectro de aspectos.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

El mundo de los robots submarinos ROV (*Remote Operated Vehicle* o vehículo de operación remota) y AUV (*Autonomous Underwater Vehicle* o vehículo autónomo submarino) sigue creciendo año tras año y no debe sorprender. El 70% por ciento de la superficie de la Tierra está cubierta de océanos. El 95% del fondo de los océanos sigue sin mapear [2]. De hecho, se conoce más sobre la superficie de la Luna que de las profundidades oceánicas. Tanto es así, que doce hombres han puesto pie en la Luna, pero sólo dos lo hicieron en la Fosa de las Marianas, la parte más profunda de nuestros mares, con aproximadamente 11 kilómetros de profundidad.

La inherente necesidad del ser humano de ir hacia lo desconocido para expandir nuestras fronteras no tiene límite. Esto se ve reflejado en el aumento de proyectos que buscan expandir estas fronteras submarinas.

La línea de investigación del GIDM apunta en este sentido y como todo, permite satisfacer otras necesidades que hay hoy en día tanto en Venezuela como a nivel mundial. Es ampliamente conocido el riesgo que conlleva el mantenimiento de tuberías submarinas o los derrames petroleros y estos desarrollos pueden ser parte de la solución.

A continuación, se presentarán algunos de los proyectos de ROV más relevantes que entran dentro de la categoría en la que pretende estar el dispositivo a desarrollar. Esto se tomó en cuenta para el propósito de este trabajo de grado.

1.1. OpenROV.

OpenROV (ver Figura 1.1) es un robot subacuático económico y de código abierto para exploración y educación, mantenido por una comunidad de exploradores oceánicos profesionales y amateur, y de apasionados por la tecnología. Su filosofía es de ser absolutamente *open source* o de desarrollo libre. Actualmente posee tres dispositivos a la venta.

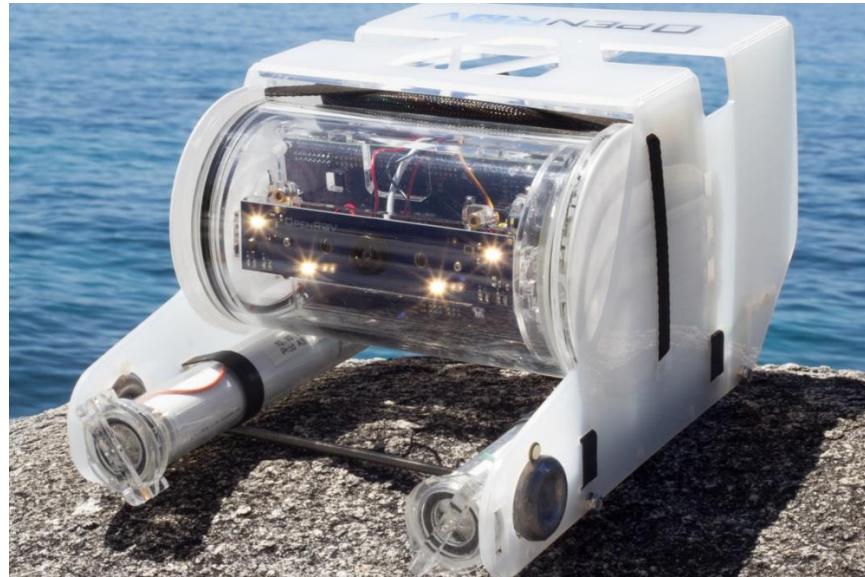


Figura 1.1 OpenROV 2.8. [3]

Estos robots son similares y en sus distintas versiones no ha habido muchos cambios fundamentales (ver Figura 1.2).

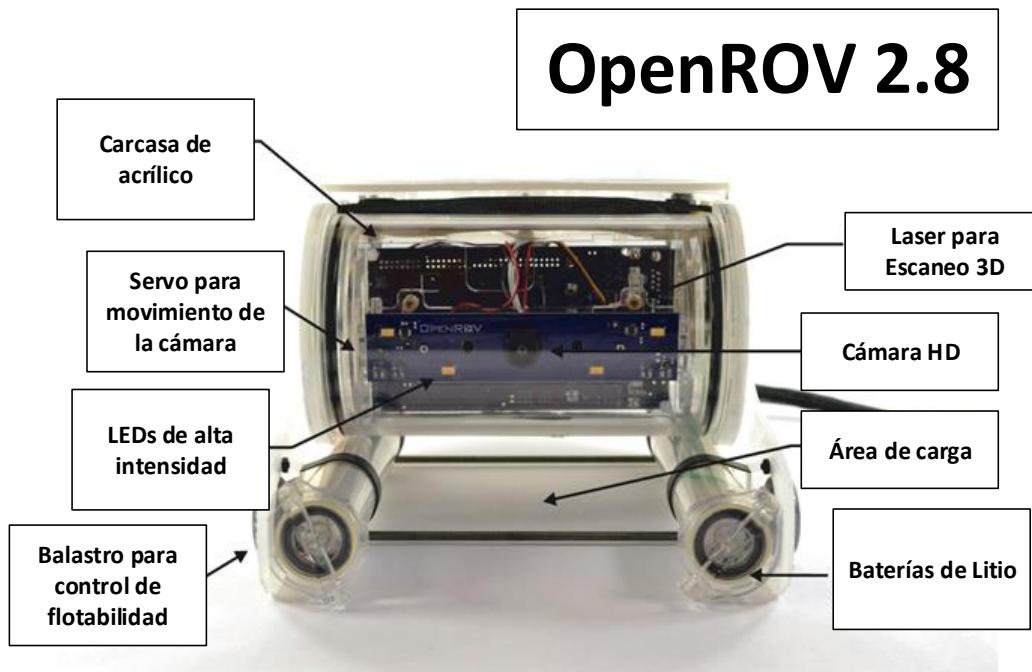


Figura 1.2 Vista frontal del OpenROV 2.8.

Todos los modelos desarrollados por la comunidad de OpenROV poseen la siguiente arquitectura (ver Figura 1.3).

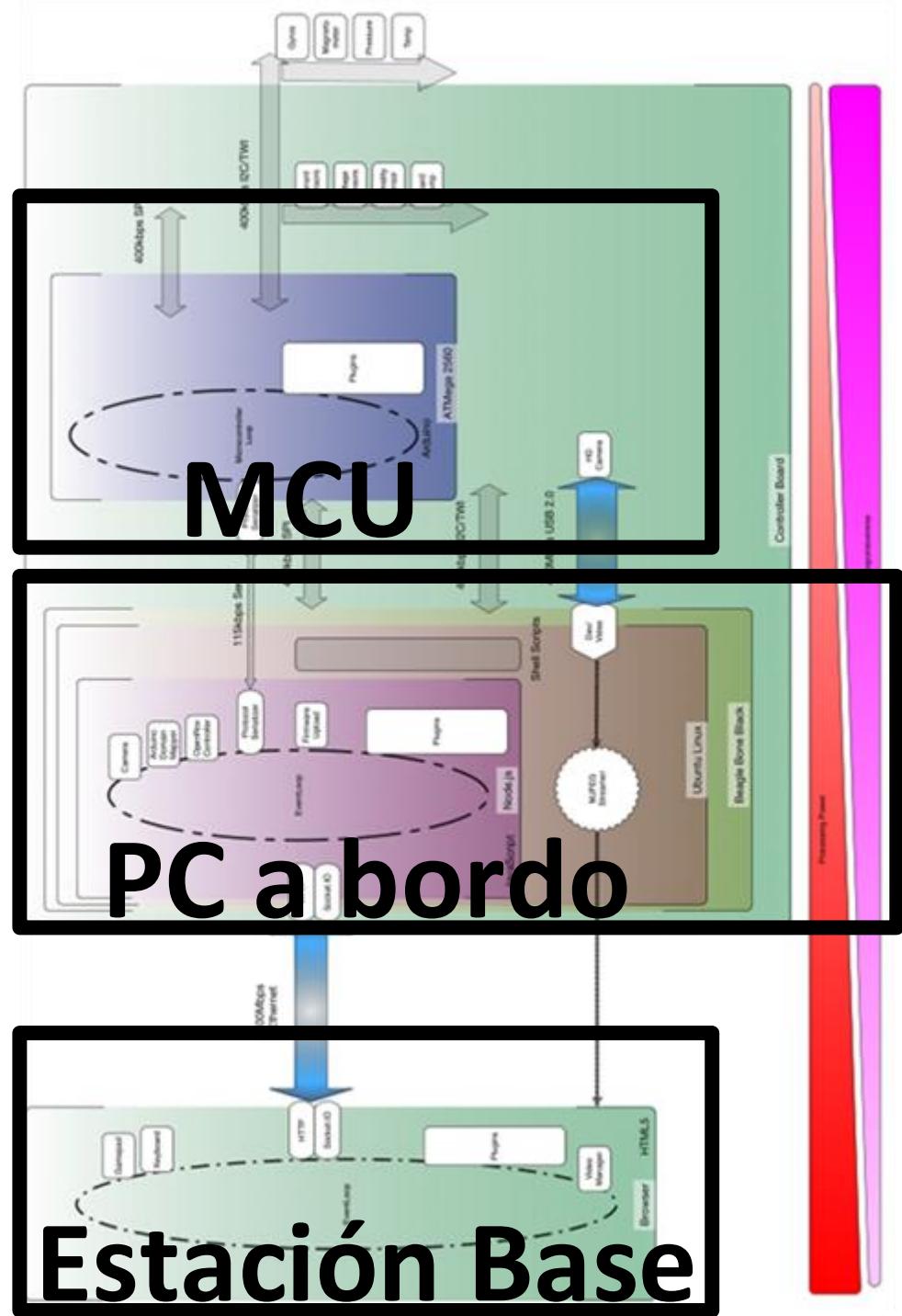


Figura 1.3 Arquitectura OpenROV. [3]

En general, sus características entran dentro de los parámetros presentados a continuación. Cabe destacar que por su condición de *open source*, la comunidad que da soporte a este proyecto hace modificaciones para adaptar esta plataforma a la aplicación que sea necesaria.

- Cámara web de alta definición para video en vivo HD: Se transmite vídeo de alta definición a un computador a través de un cable de dos hilos.
- Tres motores sin escobillas BLDC (*Brushless Direct Current*): Se utilizan para la movilidad del dispositivo. Tienen ventaja sobre los motores DC (*Direct Current*) por no poseer escobillas, lo que hace que sean de muy bajo mantenimiento y puedan estar en contacto directamente con el agua.
- Flotabilidad neutra y altamente maniobrable: El diseño compacto y ligero permite una alta maniobrabilidad utilizando un diseño de tres actuadores. Se puede sumergirse a una profundidad de 100 metros.
- Interfaz web fácil de usar: Para hacer funcionar el vehículo que no necesita una conexión a Internet o descargar el software en su ordenador.
- Expandible: Es posible expandir el dispositivo mediante una conexión con el bus I2C externo de 3.3V para la instrumentación. Esto da acceso al sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) y al de profundidad. Se incluye un canal de PWM (*Pulse Width Modulation*) extra, un canal de control de servo en un cable auxiliar para una fácil integración de componentes adicionales, tales como servos, luces, o cualquier otro dispositivo definidos por el usuario.
- Soporte de la comunidad de OpenROV: Se tiene soporte de la amplia comunidad que da soporte al proyecto OpenROV.

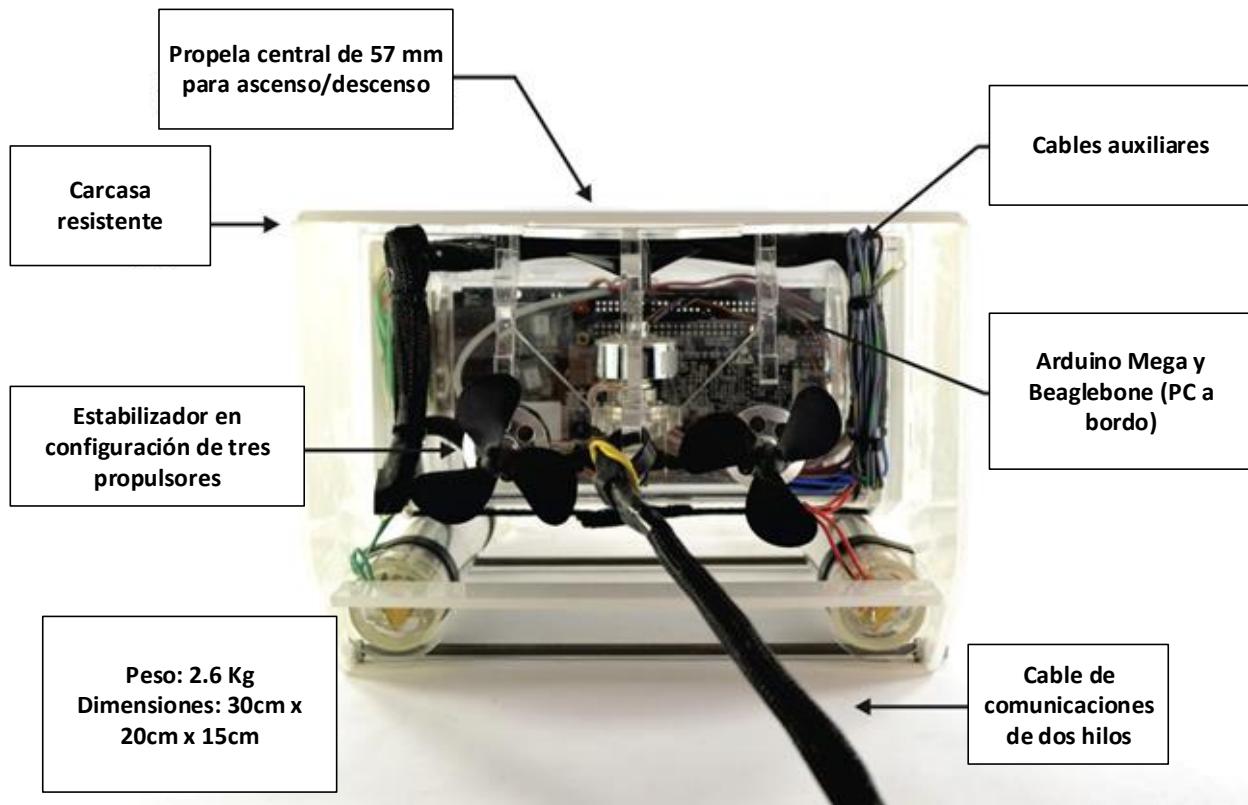


Figura 1.4 Vista posterior del OpenROV 2.8.

1.2. Girona 500.

El Girona 500 es un AUV/ROV desarrollado por la Universidad de Girona (ver Figura 1.5). Este diseño ofrece un buen rendimiento hidrodinámico y un gran espacio para alojar los equipos, manteniendo un tamaño compacto que permite operar el vehículo de pequeñas embarcaciones.

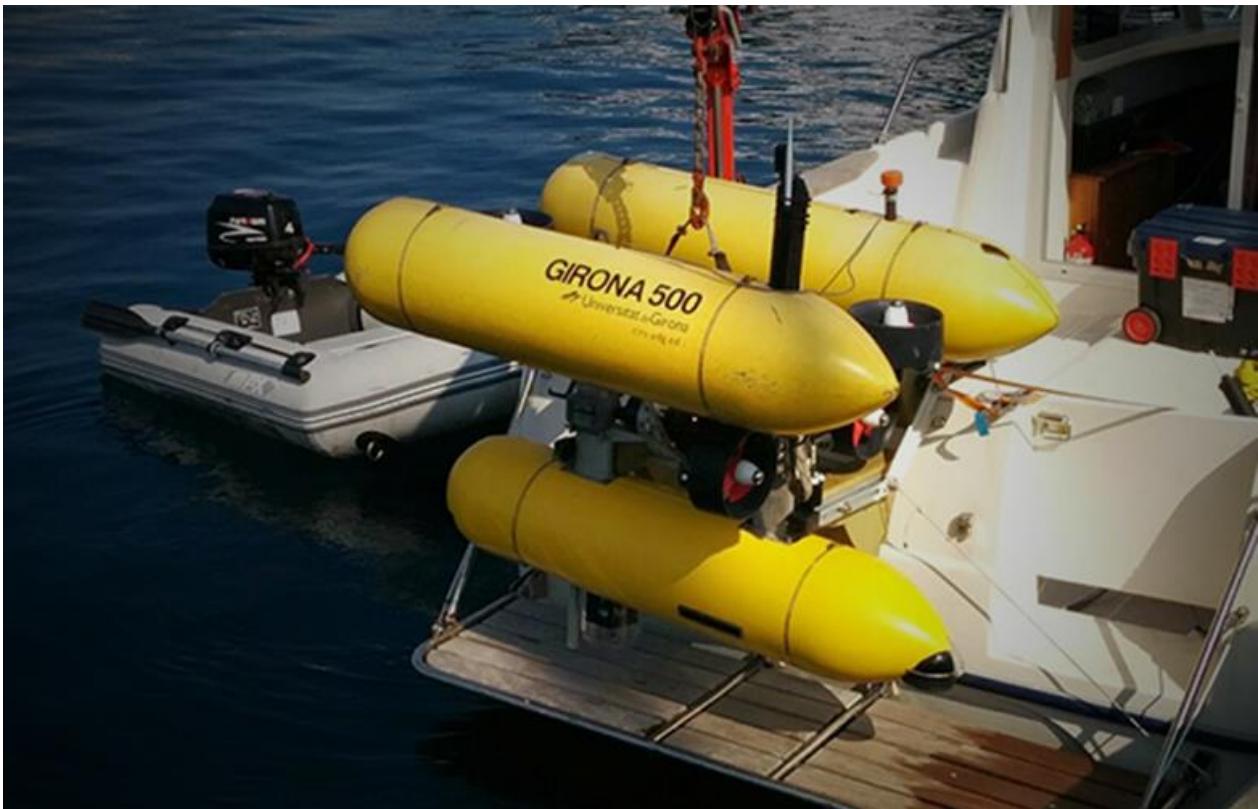


Figura 1.5 Girona 500.

Posee dos tapas superiores, que contienen la espuma de flotación y la electrónica, mientras que el inferior contiene los elementos más pesados, tales como las baterías y la carga útil. Es de flotabilidad positiva.

Esta disposición particular de los componentes hace que la separación entre el centro de gravedad y el centro de flotabilidad (de alrededor de 11 cm) proporciona al vehículo una estabilidad pasiva en cabeceo y balanceo, lo que es adecuado para visión artificial. La característica más notable del Girona 500 es su versatilidad ante distintas tareas. En su configuración estándar, el vehículo está equipado con sensores de navegación típicos (IMU, manómetros, sonares y otros). Además de estos sensores, casi la mitad del volumen de la parte inferior del casco está reservado a la carga útil específica de cada misión, tales como un sistema de formación de imágenes estéreo o un brazo eléctrico para tareas de manipulación.

La misma filosofía se ha aplicado al sistema de propulsión. La configuración básica cuenta con 4 propulsores, dos verticales para accionar la oscilación vertical y cabeceo y dos horizontales para la guiñada y mareas. Sin embargo, es posible reconfigurar el vehículo para operar con sólo 3 propulsores (uno vertical y dos horizontales) y con hasta 8 propulsores para controlar todos los grados de libertad. [4]

A continuación, puede ver las características técnicas más relevantes de este ROV/AUV:

- Dimensiones: 1m x 1m x 1m.
- Diámetro de “torpedos”: 0.3m.
- Peso en el aire: 140 Kg.
- Profundidad máxima: 500m.
- Energía: Arreglo de baterías de iones de litio de 2.2 KWh.
- Sistema de propulsión: 3 propulsores en configuración de 3DOF (3 grados de libertad).
- Volumen disponible para carga útil: 35 litros.
- Interfaces de comunicación: *Ethernet* y UART (por RS-232).
- Alimentación: 24V a 10W.
- Comunicación por WiFi, modem acústico y cable (para trabajar en modo ROV).
- Navegación por GPS en la superficie e inercial debajo del agua.

Los sensores que vienen por defecto son los siguientes:

- Sistema de medición de altitud.
- Giroscopio óptico.
- GPS.
- Sonar de frecuencia dual frontal.
- Sensor de velocidad del sonido.
- Sensor de presión.
- Sonar lateral.
- Sistema de videocámaras e iluminación LED.

1.3. Trident.

Después de cuatro años de diseño, el Trident busca re-imaginar lo que podría ser un avión no tripulado bajo el agua (ver Figura 1.6). Tiene un diseño único que combina la versatilidad y el control de un ROV y la eficiencia de un AUV por sus automatizaciones. El Trident es fácil de usar y viene listo para funcionar. Fue desarrollado por el mismo equipo de OpenROV. [5]

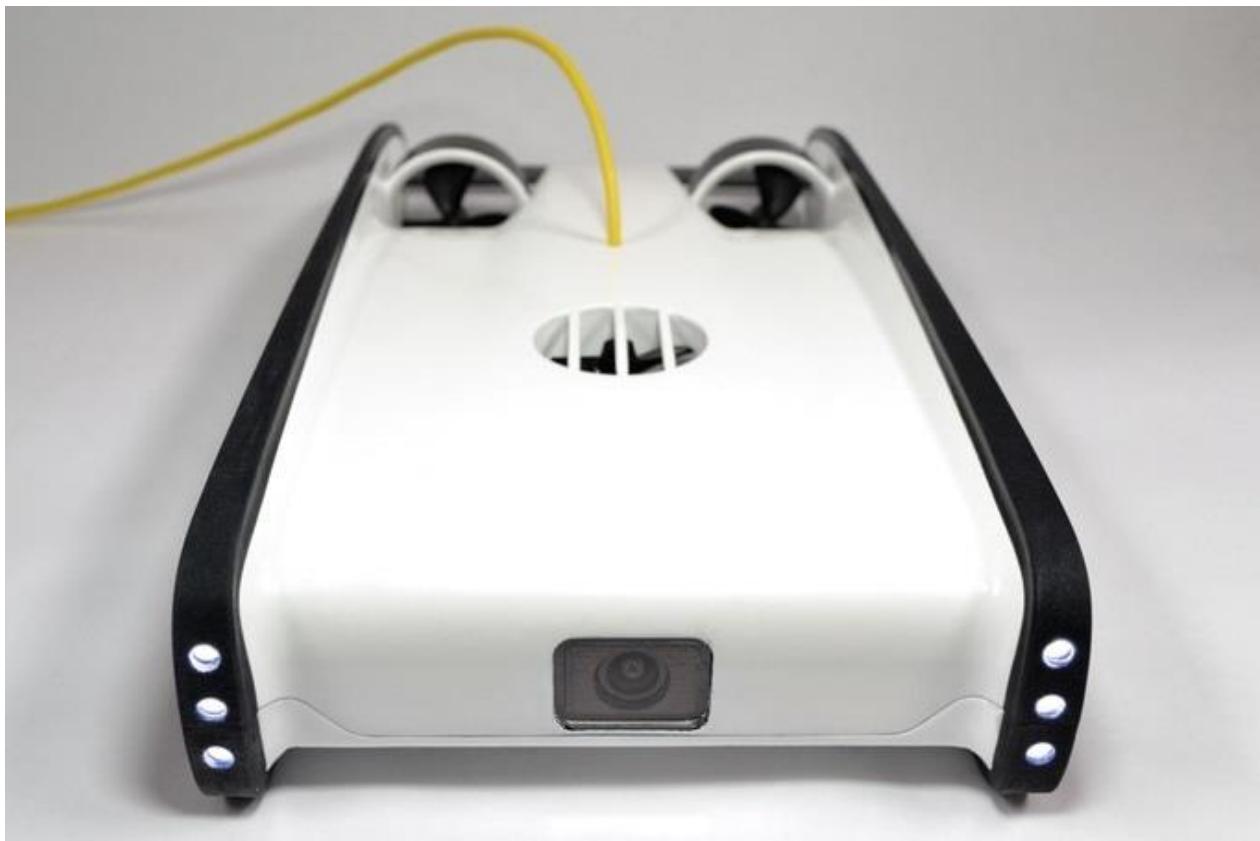


Figura 1.6 Vista frontal del Trident.

Su diseño está basado en el OpenROV, utilizando incluso su interfaz de usuario. Está pensado para ser más un dron comercial que un ROV de investigación.

En la Figura 1.7 se puede observar al Trident con sus partes más importantes.

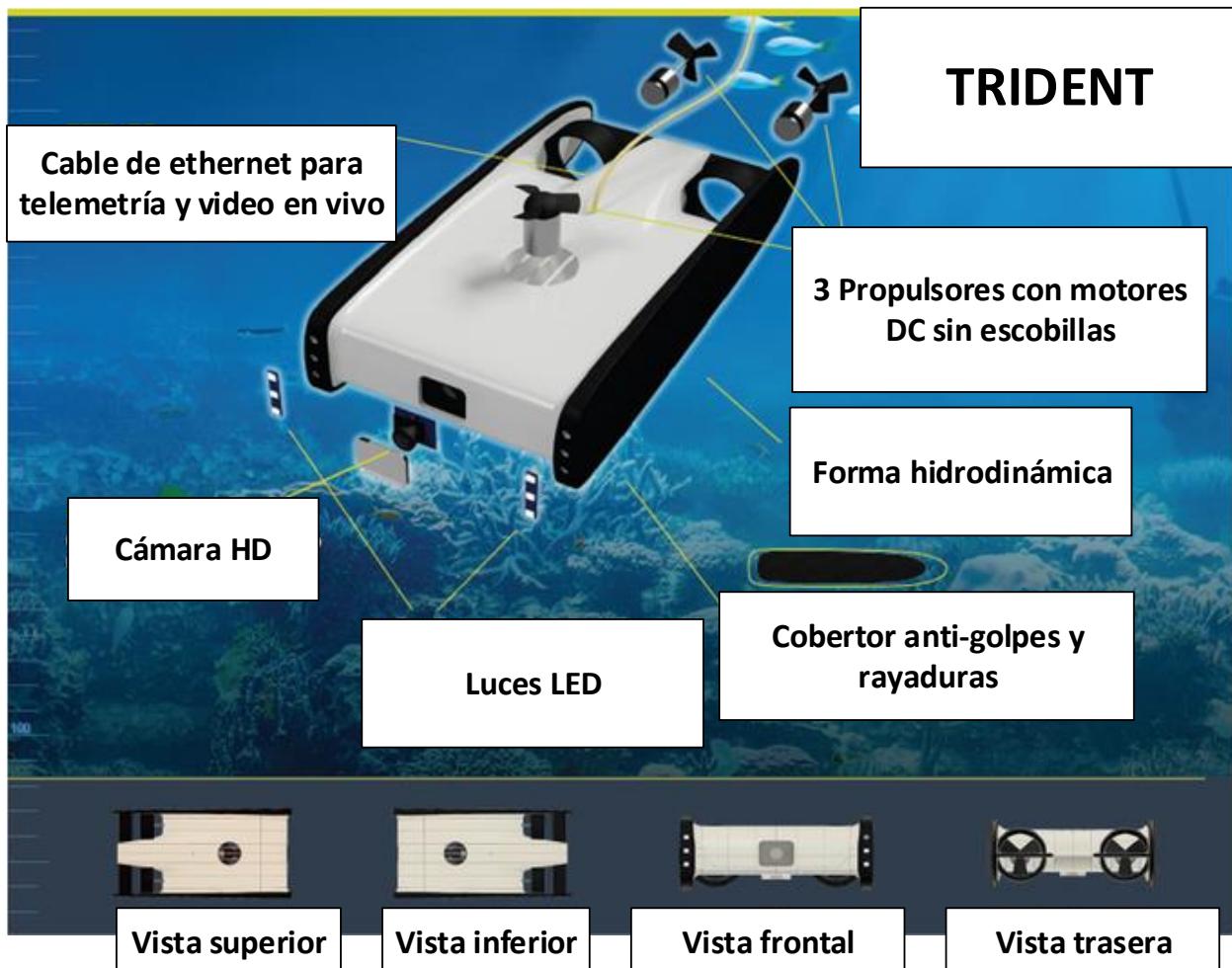


Figura 1.7 Partes importantes del Trident.

Algunas de las características más importantes del Trident:

- 3 propulsores que permiten desenvolver al Trident en 3 grados de libertad.
- Peso: 2.9 Kg.
- Velocidad máxima: 2 m/s.
- Tiempo de uso: 3 horas.
- Sensores: Presión, temperatura externa, nivel de carga de baterías, temperatura externa, acelerómetro y giroscopio.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE ARQUITECTURA

El sistema embebido a diseñar debe solucionar el problema planteado: Se desea que, a través de canales de adquisición, se obtengan los valores de ciertas variables físicas. Ésta data, debe ser transmitida para su “telemetría” y control. Además de realizar perturbaciones en el mundo físico para efectuar las acciones deseadas.

2.1. Descripción de la plataforma submarina.

En base al conocimiento de las necesidades como plataforma, se realizó un diseño de arquitectura basado en:

- Experiencias o iteraciones anteriores.
- Estado del arte.
- Disponibilidad de componentes.
- Filosofía de diseño basada en la facilidad de encuentro y reparación de errores, escalabilidad y sencillez en su construcción.

Para definir la arquitectura, luego de distintas discusiones con el equipo de trabajo del X-Sub, se decidió que la siguiente Figura 1.8 describe un diseño de arquitectura (*grosso modo*).

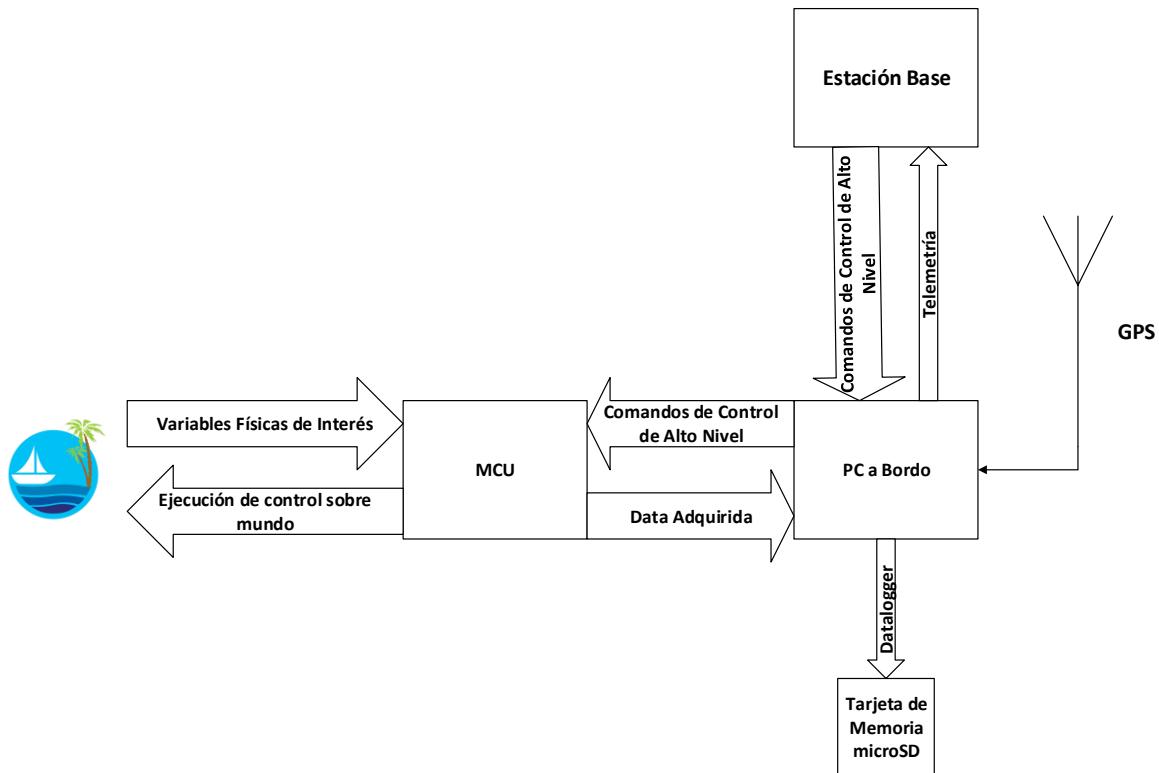


Figura 1.8 Diagrama de la Arquitectura planteada.

En base al estudio del estado del arte, se establecieron las variables físicas necesarias para poder manipular el robot en cuestión, estas variables son las siguientes:

- Aceleraciones en X, Y, Z: Permite obtener el ángulo con respecto al plano. Por odometría se puede obtener velocidad y posición estimadas.
- Velocidad angular en p, q y r (roll, pitch y yaw): Por medio de odometría, permite estimar perturbaciones en la rotación del robot.
- Temperatura Externa: Puede utilizarse para hacer un registro de datos que permita caracterizar un medio marino.
- Temperatura Interna: Puede proveer de alerta de sobrecalentamiento de los sistemas a bordo.
- Velocidades Lineales: En conjunto con la estimación de velocidad por odometría, puede utilizarse para compensar errores acumulativos.
- Orientación con respecto al norte magnético: Permite obtener una referencia para mantener una referencia con respecto a la tierra.
- Presión Relativa: De manera indirecta, permite conocer la profundidad.

- Entrada de Agua: Permite conocer si hay entrada de agua al interior del submarino. Esto se puede utilizar para realizar labores de emergencia.
- Carga de Baterías: Permite conocer el estado de carga de las baterías. En caso de estar en un nivel crítico, se pueden ejecutar modos de bajo consumo o de recuperación de la plataforma.

Una vez definidas las variables físicas, en base al presupuesto y a la disponibilidad en el laboratorio, se procedió la elección de los sensores a utilizar; esto, contrastado con los MCU (*Micro-Controller Unit* o microcontrolador) disponibles y actuadores para realizar acciones en el mundo físico.

Se debe tomar en cuenta los actuadores que finalmente interactuarán con el mundo físico. En este caso, se decidió que se utilizarían 4 motores Brushless (dispuestos como indica la Figura 1.9). La potencia de éstos será manejada por 4 ESC (*Electronic Speed Controller* o controlador electrónico de velocidad) bidireccionales.

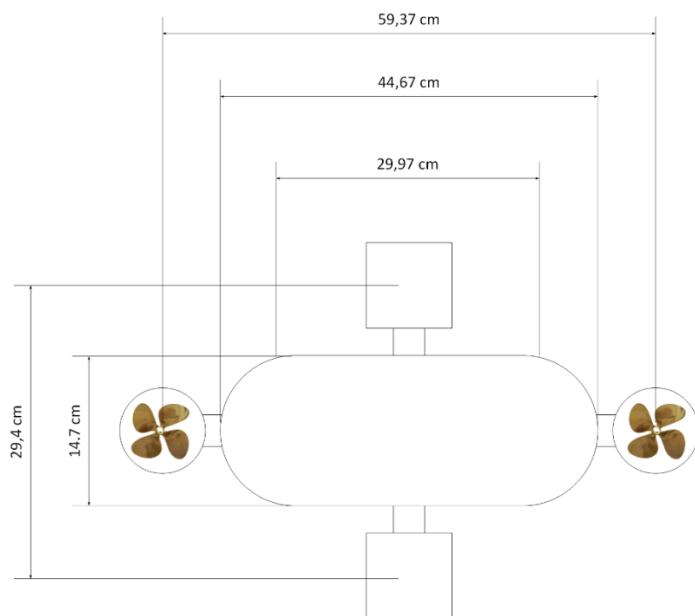


Figura 1.9 Configuración del X-Sub

Para decidir qué MCU utilizar, primero se deben conocer los requerimientos. En base a la arquitectura definida, se necesita un MCU que permita medir las siguientes variables físicas. Cabe

destacar que se deben sobrepasar los requerimientos para posible expansión del sistema a futuro (ver Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Variables Físicas, Sensor y Tipo de Salida

Variables Físicas	Sensor	Tipo de Salida
Temperatura Externa.	DS18B20	1-Wire
Temperatura Interna.	IMU MPU-6050	I2C
Presión Externa hasta 700 kPa.	MPX5700AP	Analógica.
Aceleración en X, Y, Z.	IMU MPU-6050	I2C
Velocidad angular alrededor de X, Y, Z.	IMU MPU-6050	I2C
Ángulo con respecto al norte (Brújula).	HMC6352	I2C
Presencia de agua.	Arreglo de PNP	Digital
Carga de Baterías.	ADC	Analógica
Velocidad Lineal por Termistores (Opcional)	ADC	Analógica

Además, se planteó la incorporación de un sistema de visión con una cámara de alta definición para futuros desarrollos en visión artificial. Es deseable que se puedan realizar distintos movimientos (*pan* y *tilt* o paneo e inclinación) para poder tener un campo de visión amplio y compensar perturbaciones del medio que puedan incidir en la calidad de la imagen. Para ello es necesaria la utilización de 2 servomotores.

2.2. Descripción de sensores.

A continuación, se describen los sensores a utilizar. Su elección está supeditada a la disponibilidad del laboratorio y al presupuesto del mismo.

2.2.1. Sensor de temperatura externa DS18B20.

Este sensor de temperatura con cobertura contra agua puede medir temperaturas de hasta 125°C a través del protocolo 1-Wire con una resolución de 12 bits y precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.



Figura 1.10 Sensor de temperatura DS18B20 [6]

Posee 3 cables de conexión:

Tabla 1.2 Descripción de cables del sensor de temperatura DS18B20.

Descripción	Tipo	Color
Vdd	Alimentación	Rojo
GND	Alimentación	Negro
Data	Comunicación 1-Wire	Blanco

El funcionamiento de este sensor se basa en el cambio de resistividad de un termistor que está térmicamente acoplado a la superficie anodizada previamente acondicionada para intemperie y ambientes hostiles. Esta resistividad es procesada y transmitida por el protocolo 1-Wire.

2.2.2. Unidad de medición inercial MPU-6050

Esta Unidad de Medición Inercial contiene un acelerómetro y un giroscopio. Mide aceleraciones, velocidad angular y temperatura. Posee una resolución de 16 Bits y se comunica utilizando el protocolo de comunicaciones I2C.



Figura 1.11 Unidad de medición inercial MPU-6050 en la tarjeta GY-521 [7]

Algunas de sus características más relevantes:

- Puede ser alimentado con voltaje entre 3V – 5V (Con su regulador de baja caída o *low dropout*).
- Comunicación *I2C*.
- Rango de aceleraciones configurable $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$ (donde $g = 9.8 \frac{m}{s^2}$).
- Rango de velocidad angular configurable $\pm 250^\circ/s, \pm 500^\circ/s, \pm 1000^\circ/s, \pm 2000^\circ/s$.
- Incluye un filtro pasa bajos digital (*DLPF* por *Digital Low Pass Filter*) configurable.

2.2.3. Brújula digital HMC6352.

Este módulo sencillo permite la obtención del ángulo con respecto al norte magnético con una resolución de 16 bits por el protocolo I2C.



Figura 1.12 Brújula Digital HMC6352 [8]

- Interfaz I2C.
- Rango de Alimentación: 2.7V – 5.2V.
- Resolución de 0.5 grados.
- Consumo: 1mA a 3V.

2.2.4. Sensor de presión MPX5700AP.

Este sensor de presión provee de una señal analógica proporcional a la presión aplicada. Esto es de gran utilidad ya que permite conocer de manera indirecta la profundidad a la cual se encuentra el robot submarino.



Figura 1.13 Sensor de Presión MPX5700AP.

- Error máximo de un 2.5%.
- Ideal para utilizar con conversores A/D de MCU.
- Medición de Presión Absoluta.
- Soporta un rango de entre 0 a 700kPa (2.18 a 101.5 psi o de 0 atm a 6.91 atm).
- Voltaje de alimentación: 5V DC.

El funcionamiento de este sensor se basa en la deflexión de un transductor piezo-resistivo. Este transductor está en contacto con la presión externa (la que se desea conocer) y la interna. La diferencia de estas dos presiones se traduce en una deflexión que produce un cambio en la resistividad. Esta resistividad es acondicionada como señal de voltaje para estar disponible en uno de los pines del sensor.

2.2.5. Sensores discretos.

Los sensores presentados a continuación fueron propuestos con componentes discretos dado su costo comercial o inexistencia en el mercado.

Sensor de agua.

Este sensor consiste en dos transistores PNP que comutan si hay presencia de agua, esto se comunica con el MCU de manera digital.

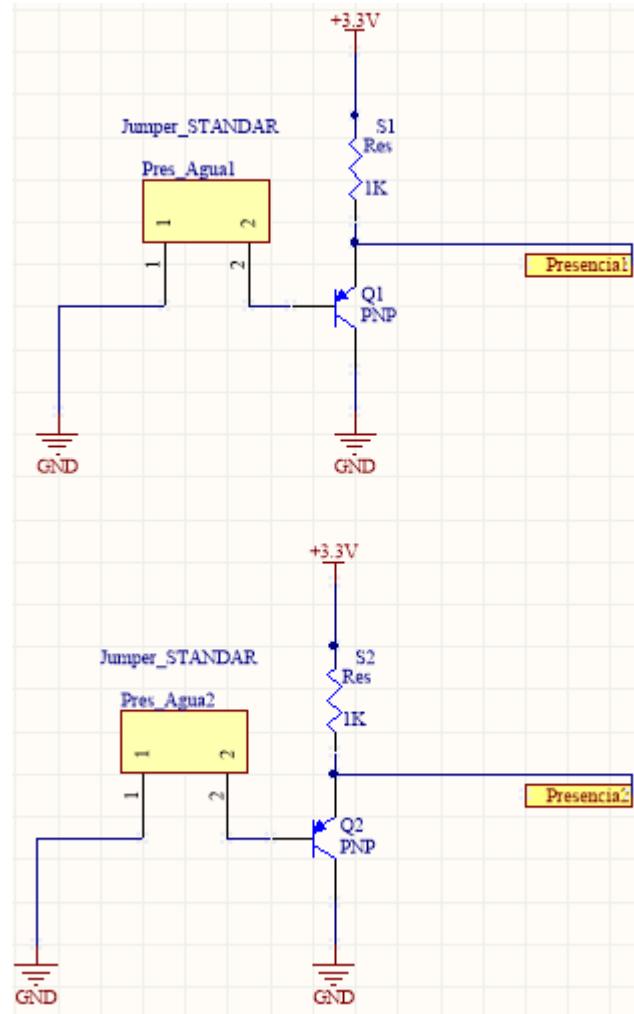


Figura 1.14 Ejemplo de Esquemático de Sensor de Agua.

La propuesta mostrada en la Figura 1.14 muestra una manera sencilla de detectar el agua. Como esta es conductora, al encontrar agua en los terminales 1 y 2, se produce una corriente de base. Esto hace que haya una corriente de colector y se obtenga un voltaje cercano a 0V en la salida. Para saturación, $V_{presencia_i} = 3.3V$. Para corte, $3.3V - V_{res} - 0.7V = 0 \rightarrow V_{res} = 3.3V - 0.7V = 2.6V \rightarrow V_{presencia_i} = 3.3V - V_{res} = 3.3V - 2.6V = 0.7V$. Esto indica que hay 0.7V en la salida hacia el MCU. Como este trabaja con voltajes lógicos CMOS, entra dentro del rango de 0 lógico (entre 0V y 0.8V). Para este caso, $I_c = \frac{V_{res}}{R_{res}} = 2.6 mA$.

- Se puede configurar para 3.3V y 5V para su procesamiento digital.
- Produce 0 lógico al encontrar agua entre los terminales de base y tierra.

Nivel de carga de baterías.

Este sensor consiste en un arreglo de resistencias en forma de divisor de voltaje y una protección de sobre voltaje con un diodo de tipo zener.

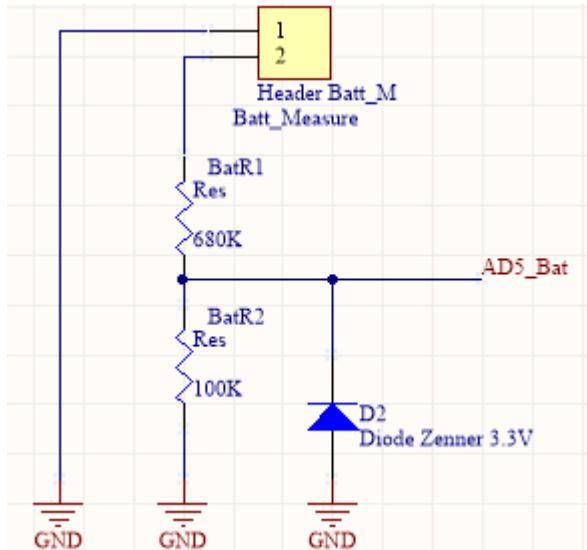


Figura 1.15 Esquemático de Obtención de carga de Batería.

Esta configuración tiene como objetivo proteger al MCU de posibles picos que se generen en los terminales de la batería.

Sensor de velocidad lineal por termistores (opcional).

Este tipo de sensor consiste en un arreglo de termistores (componente electrónico que varía su resistividad dependiendo de la temperatura). Según diversos trabajos de investigación [9], el hecho que se disipe calor en un fluido, se relaciona con el flujo de éste. Si se conoce la superficie por la cual el flujo está pasando, es posible obtener la velocidad lineal. Desarrollos del Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica de la USB han logrado obtener simulaciones exitosas, pero aún no se ha llevado a cabo la implementación en físico. Dada la naturaleza analógica del sensor, se deben tener disponibles canales de ADC para la obtención de los datos.



Figura 1.16 Termistor de Tecnología *Through Hole*.

Un ejemplo de implementar eléctricamente un termistor se puede ver en la Figura 1.17.

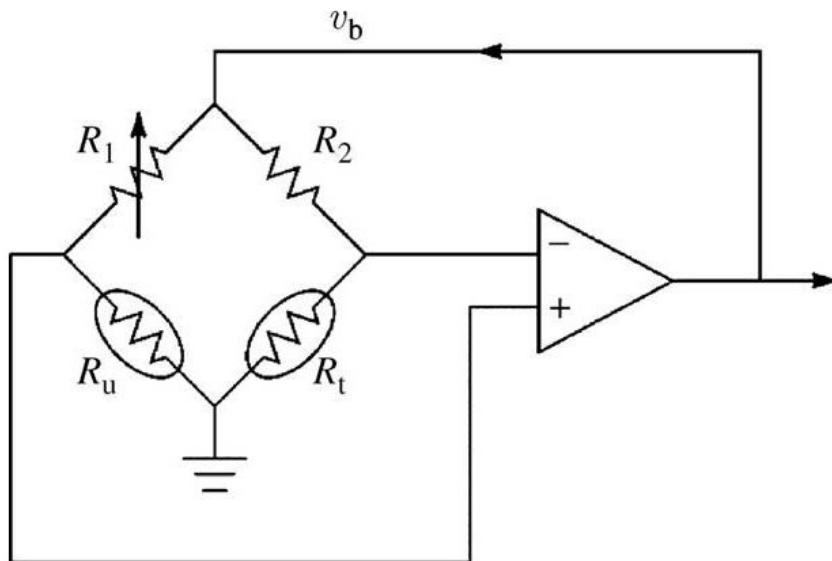


Figura 1.17 Circuito para medición de flujo por medio de termistores.

Como se puede observar en la Figura 1.17, R_1 permite balancear el circuito si hay diferencias entre los termistores R_u y R_t . Implementa el puente de *Wheatstone*. En este circuito, R_1 se calibra para ser igual a R_2 . R_u y R_t son los termistores del sensor de velocidad. El OPAMP sirve para amplificar las diferencias de resistencia en las ramas. Cambios de resistividad generan una diferencia de potencial, siendo amplificado posteriormente. Cabe destacar que el termistor como componente discreto es no lineal con respecto a la temperatura por lo que se debe linealizar la señal obtenida, pero para pequeñas variaciones de temperatura, puede considerarse lineal.

Cuando $V_b = V_{calibración}$ (temperaturas iguales), quiere decir que las ramas del puente están equilibradas ($R1/Ru = R2/Rt$), y como $R1 = R2$, esto quiere decir que la temperatura es la misma en los dos termistores. Igualmente, cuando existe una medición en $V_b > V_{calibración}$ o $V_b < V_{calibración}$ indica el valor de magnitud de la diferencia de temperaturas [10].

2.3. Descripción de los actuadores.

Recordando la definición de actuador: “Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de un regulador o controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control” [10]. Dadas las características del diseño, se decidió que se utilizarán los actuadores descritos en esta sección debido a la dinámica del sistema [1].

El robot X-Sub, como todos los robots móviles que operan en espacios tridimensionales posee 6 grados de libertad. 3 rotacionales y tres traslacionales. Las rotaciones se denominan *roll* (alabeo), *pitch* (cabeceo) y *yaw* (guiñada). En la Figura 1.18 se puede ver una representación de del sistema de referencia fijado al robot X_b, Y_b, Z_b (*body-fixed*).

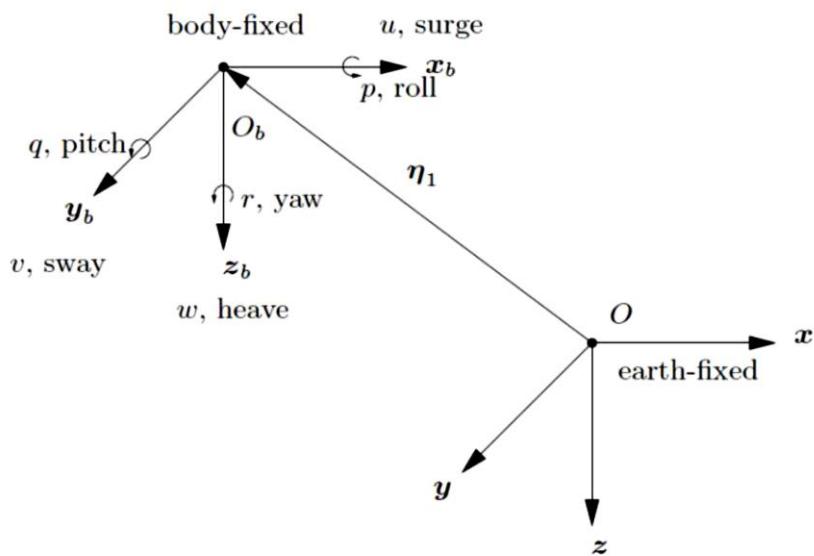


Figura 1.18 Grados de libertad en R^3 . [11]

Se disponen de cuatro motores BLDC (*Brushless Direct Current*) por lo que sólo se pueden tener cuatro grados de libertad controlados de manera independiente.

En la Tabla 1.3, se puede observar una lista de los actuadores propuestos. Esto incluye una tarjeta de expansión que, si bien no es un actuador, puede que ésta conlleve el manejo de estos.

Tabla 1.3 Actuadores, Cantidad y Tipo de Entrada

Actuador	Cantidad	Tipo de Entrada
Motor BLDC controlado por ESC	4	PWM
Driver LED Alta Intensidad	2	PWM
Servo Motor para Cámara HD	2	PWM
Led de notificación de Handshake Auxiliar 1	1	Pin Digital
Led de notificación de Handshake Auxiliar 2	1	Pin Digital
Tarjeta de Expansión	1	I2C

2.3.1. Motor BLDC controlado por ESC.

Para la propulsión del X-Sub se utilizan los motores marca Turnigy® modelo D2830/11 de 1000 KV (1000 rpm/V). Se pueden observar en la Figura 1.19.

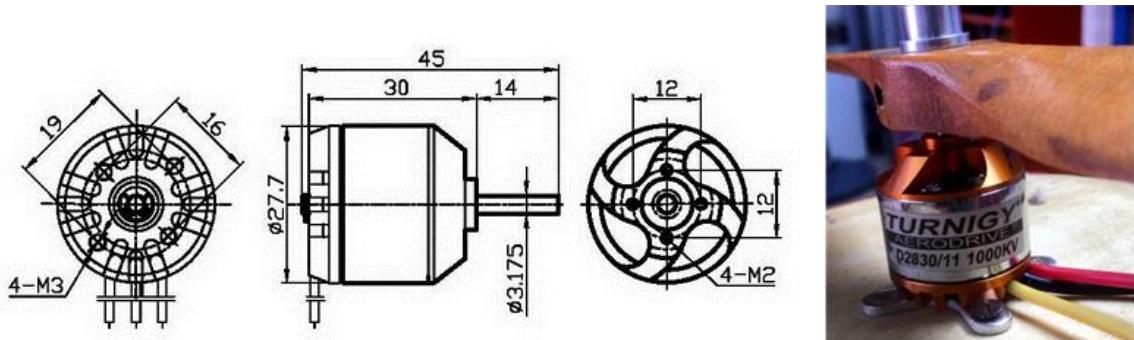


Figura 1.19 Motor utilizado en el X-Sub (mm).

Algunas de sus características más importantes (ver Tabla 1.4):

Tabla 1.4 Características del Motor Turnigy® D2830/11.

Kv (rpm/v)	1000
Peso (g)	52
Máxima Corriente (A)	21
Voltaje Máximo (V)	15
Potencia (W)	210
Largo Total (mm)	45

Para el manejo de este motor trifásico, *sensorless* (sin sensores) se necesita una etapa de acondicionamiento de potencia. Como este trabajo no contempla el diseño de esta etapa, se procedió a utilizar los ESC (*Electronic Speed Controller*) disponibles en el laboratorio.

Uno de estos controladores es el Sky-Wing® (ver Figura 1.20) y se caracteriza por soportar un máximo de 30 amperios y un voltaje compatible con baterías de Lipo (Polímero de Litio) de hasta cuatro celdas (4S, por lo que son 14.8V). Permite el giro del motor en una sola dirección y control a través de una señal PWM. Cabe destacar que la marca es poco conocida y por lo tanto fue difícil conseguir información de este modelo en particular. Por suerte, el manejo de este tipo de dispositivos es relativamente estándar.



Figura 1.20 ESC Sky-Wing®.

El otro ESC disponible es el Hobby King® de 30 amperios y con un rango de voltaje de entrada entre 5V y 13V con reversa (Ver Figura 1.21). Diseñado originalmente para carros manejados por radio control, este ESC es de gran calidad y tiene características relevantes como *Soft-Start* (arranque suave) y un *Battery Eliminator Circuit* (BEC) de 5V a 2A.



Figura 1.21 ESC Hobby King®. [12]

Estos dispositivos son manejados por una señal analógica PWM a través del conector que se puede apreciar en la Figura 1.22.

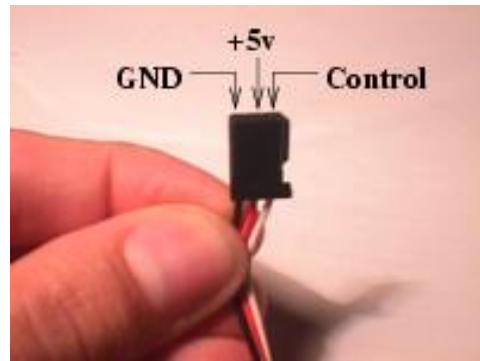


Figura 1.22 Conector estándar para ESC y Servos.

2.3.2. Driver LED Alta Intensidad.

Se desea que el X-Sub tenga dos luces de alta intensidad, por lo que se debe disponer de señales que puedan controlar a un *Driver* (manejador) de potencia. En base a los diseños anteriores [1], se necesitaban dos señales de PWM para hacer el efecto de *Dimming* (atenuación) para la regulación de la luz con el componente TPS61165 fabricado por Texas Instruments®. En la siguiente figura se puede observar la tarjeta diseñada por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Mecatrónica que hace uso del componente mencionado.

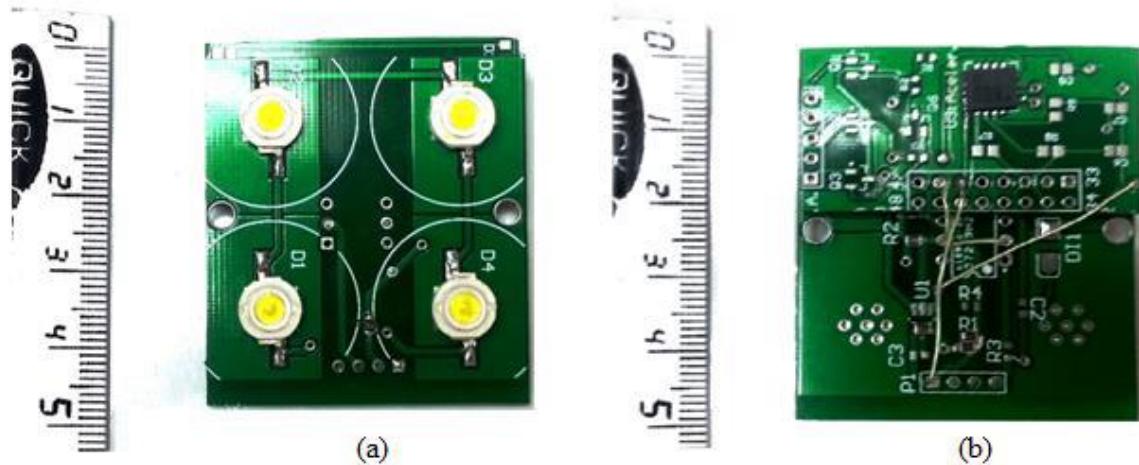


Figura 1.23 Cara superior (a) e inferior (b) de tarjeta *Driver* de LEDs. [1]

2.3.3. Servo Motor para Cámara HD.

Para implementar algoritmos de visión por computadora, se deseaba tener una cámara a bordo del X-Sub. La Figura 1.24 muestra la cámara disponible en el laboratorio, una *LifeCam Cinema* de Microsoft® de una resolución de 720p a 30 cuadros por segundo.



Figura 1.24 Cámara *LifeCam Cinema* de Microsoft. [13]

Esta cámara va sobre una base que permite realizar *pan* y *tilt* (Rotación en plano vertical y horizontal). La combinación de estos elementos es llamada cámara PTZ (*pan-tilt-zoom*).

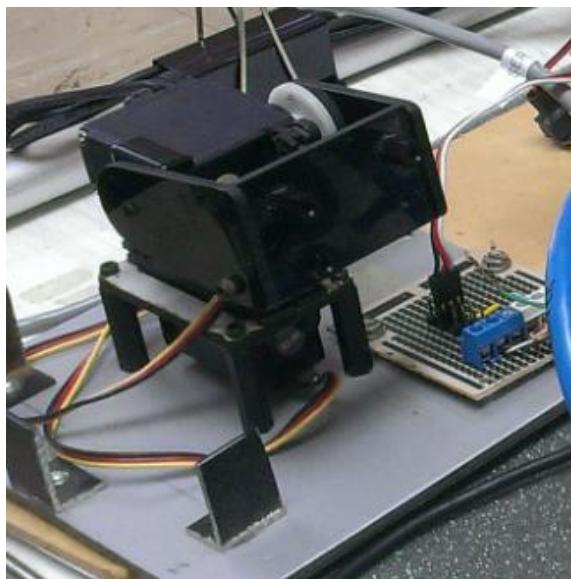


Figura 1.25 Base para cámara PTZ.

La base disponible es la que se puede observar en la Figura 1.25, básicamente conformada por piezas de acrílico y dos servomotores HITEC® HS-422 como el de la Figura 1.25.



Figura 1.26 Servo HITEC HS-422. [14]

Las características más relevantes de los servos utilizados son las siguientes(ver Tabla 1.5):

Tabla 1.5 Características del servo HITEC® HS-422. [14]

Sistema de Control	Control por Anchura de Pulso. 1,5 ms al centro
Tensión de funcionamiento	4,8V a 6 V
Velocidad a 6V	0,16 s/60 grados sin carga
Fuerza a 6V	4,1 Kg · cm
Corriente en reposo	8 mA
Corriente en funcionamiento	150 mA sin carga
Corriente Máxima	1100 mA
Peso	45,5 g
Rodamiento Principal	Metálico
Engranajes	Plástico (Nylon)

Para el manejo de estos servos son necesarias 2 señales de PWM.

Si bien el uso de esta base de *pan* y *tilt* de la Figura 1.26 es para el prototipado, se plantea usar en el futuro microservos. Los disponibles en el laboratorio son HITEC® HS-85BB (ver Figura 1.27).



Figura 1.27 Microservo HITEC® HS-85BB.

2.3.4. LEDs de Handshake y tarjeta de expansión.

Los LEDs de *Handshake* son utilizados para dar una realimentación al usuario del estado de funcionamiento del sistema. En caso de que se desee expandir, se planteó la posibilidad de colocar una tarjeta de expansión por el protocolo I2C.

2.4. Elección de MCU.

En base a los sensores que se utilizaron y a los actuadores planteados en la sección anterior, se necesitan los puertos de entrada y salida (I/O) de la Tabla 1.6:

Tabla 1.6 Contabilización de puertos de I/O mínimos.

Tipo de I/O	Cantidad
PWM	8
Pin Digital	8
I2C	2
ADC	4
SPI	1

Una vez que se conocieron los requerimientos mínimos, se tomó en cuenta la disponibilidad en el laboratorio y en el mercado. Se tenían dos MCU disponibles en el laboratorio, el MCF51QE128 y el MCF51AC256, ambos de Freescale®. A continuación, puede observar una tabla comparativa de sus características más relevantes.

Tabla 1.7 Comparación de los MCU MCF51QE128 y MCF51AC256.

Características	MCF51QE128	MCF51AC256
Tamaño de Bus	32 Bits	32 Bits
Velocidad de Bus	50 MHz	50 MHz
Interno		
Memoria Flash	128 KB	256 KB
Memoria RAM	8 KB	32 KB
Voltaje de Alimentación	1,8V - 3,6 V	2,7V - 5,5 V
Alimentación		
Canales de ADC	24	24
Resolución de ADC	12 Bits	12 Bits
Unidades de I2C	2	1

Unidades de SPI	2	2
PWM Disponibles	12	8
Dimensiones	3,7x3,51 cm	5,05x5,05 cm

Finalmente, se eligió el MCF51QE128 por poseer dos unidades separadas para la comunicación I2C. Esto permite distribuir la carga de comunicación en dos conjuntos de módulos esclavos al “mismo tiempo”, lo que es de mucha ayuda para el caso de posibles expansiones. Además, su tamaño menor lo hace perfecto para esta aplicación dado el espacio reducido que se dispone, las PWM restantes pueden ser utilizadas para posibles aditamentos. Su capacidad reducida en memoria no es relevante para esta aplicación dado que el código del programa para esta aplicación no ocupa mucho espacio dado que sólo consiste en la lectura y consolidación de datos de los sensores.

En cuanto a la PC a bordo, se decidió utilizar una pcDuino recién adquirida por ser capaz de correr una versión reducida de Ubuntu®. Si bien la obtención se puede realizar mediante el MCU y el pcDuino, se decidió que la mejor opción es obtener todos los datos con el MCU dado que permite generar PWM precisas y, al no depender de un Sistema Operativo (SO), se puede implementar en tiempo real.

La pcDuino (ver Figura 1.28) posee puerto Ethernet (100 Mbps), se va a puede utilizar para centralizar los datos, hacer un *datalog* de la información y envío a la estación base; además de realizar control de “bajo nivel”. Sus características son las siguientes:

- 1 GHz ARM Cortex A8.
- 512 MB DRAM.
- Sin memoria Flash interna.
- Lubuntu 12.04 o Android.
- Consumo máximo de 5v – 2000 mA.

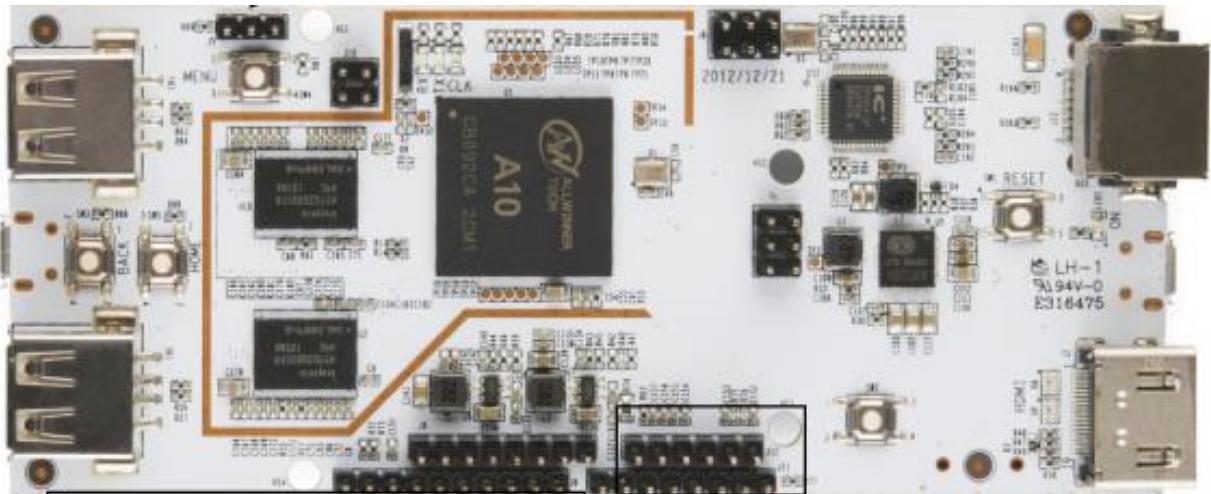


Figura 1.28 Micro-computador pcDuino

2.5. Arquitectura elegida.

En base a lo discutido en las secciones anteriores, se llegó a la arquitectura descrita por la Figura 1.29. Tomando en cuenta la modularidad deseada, la concentración de los actuadores (motores, servos) están centralizados para ser manejados por el MCU, lo cual reduce el cableado y permite usar conexiones estándares. Permite un alto grado de escalabilidad ya que es posible cambiar la PC, posee independencia la parte de procesamiento de alto nivel y aditamentos como GPS que posean anchos de banda distintos a los estudiados.

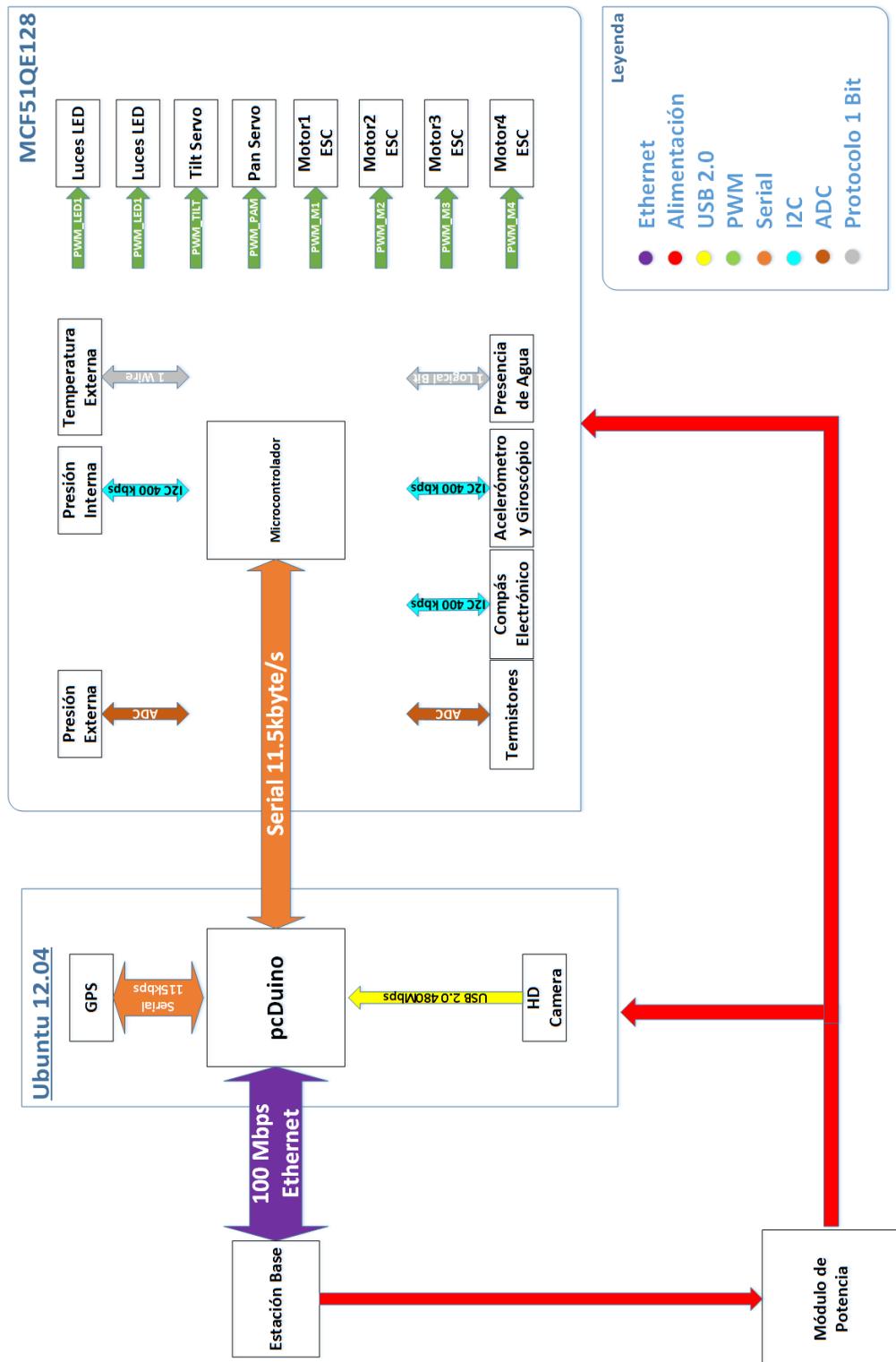


Figura 1.29 Diagrama de Arquitectura por Módulos.

CAPÍTULO 3. PROCESO DE PROTOTIPADO E IMPLEMENTACIÓN

Para comenzar la prueba de los sensores, se decidió que en primera aproximación se debían realizar en una plataforma menos compleja que el ambiente de desarrollo que ofrece Freescale®, así que se utilizó un Arduino® Uno como placa de desarrollo por su amplio soporte y librerías de acceso gratuito.

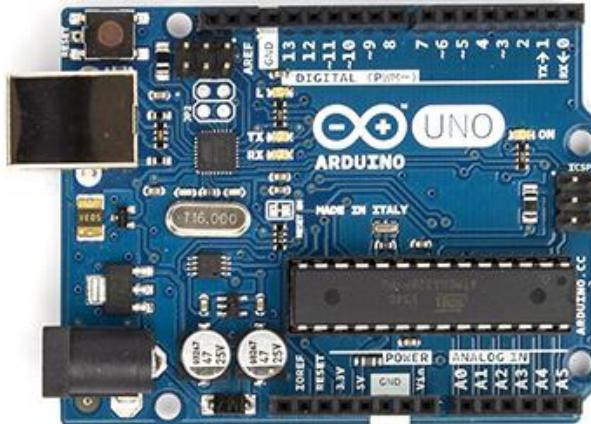


Figura 3.1 Arduino® Uno, placa utilizada para prueba de sensores.

En la siguiente tabla se pueden observar algunas de las características más importantes del Arduino® Uno.

Tabla 3.1 Características de placa Arduino® Uno.

Microcontrolador (MCU)	Atmega328PU
Voltaje de operación	5V
Pines de Entrada/Salida (I/O)	14 (6 PWM)
Pines de entrada analógica	6 (Resolución de 10 Bits)
Corriente máxima por pin	40mA
Memoria FLASH	32 KB (0.5 KB ocupados por el <i>bootloader</i>)
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

3.1. Cálculo de ancho de banda.

Para poder definir por cual tipo de puerto de comunicación se iba a realizar la transmisión de datos MCU – PC, se necesitaba saber si el puerto serial podía cumplir con las especificaciones de ancho de banda. Para ello, se debía conocer la frecuencia a la cual mínima con la cual se debía muestrear las señales deseadas. Por el teorema de *Nyquist*, sabemos que:

Ecuación 1 Teorema de Nyquist.

$$fs > 2f_{max}$$

Donde fs representa la frecuencia de *sample* o muestreo y f_{max} la máxima frecuencia que se va a producir en la señal a muestrear.

. Lo más complicado de analizar es la señal de aceleraciones que se recibirán de la IMU. Esta señal está relacionada directamente con el cambio del oleaje. Para ello, se indagó en los estudios del espectro del oleaje. En las diversas referencias estudiadas, el espectro no presenta potencia por encima de los 0.2 Hz (Ver Figura 3.2), por lo que al aplicar el teorema de *Nyquist*, a frecuencias mayores a 0.4 Hz se puede obtener una señal “fiel” a la continua en tiempo.

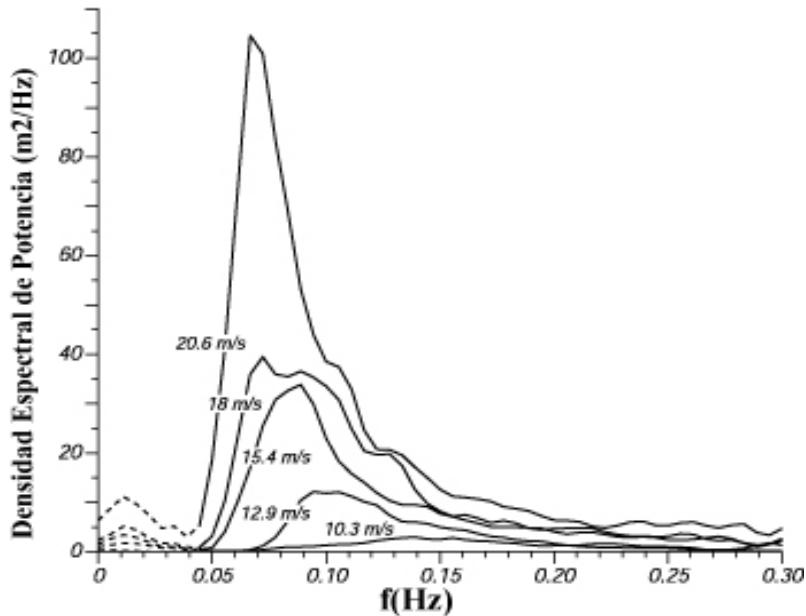


Figura 3.2 Densidad Espectral de Potencia vs Frecuencia del oleaje según el modelo de Pierson-Moskowitz. [15]

Para tener una idea del ancho de banda a utilizar y, por ende, saber si el protocolo UART es idóneo para transmitir los datos deseados, se realizó el cálculo del ancho de banda a utilizar. Es importante resaltar las características del canal de comunicación a utilizar:

- Puerto UART.
- Velocidad de transmisión: 115200 Baudios (Símbolos/s).
- Bit de paridad y fin.

Para este caso, un símbolo consiste en 8 bits más el bit de paridad y bit de fin, lo que quiere decir que para transmitir un byte (8 bits) es necesario transmitir 10 bits. Esto genera una velocidad de transmisión de 11.52 kBytes/s.

Suponiendo una velocidad de muestreo de 50 Hz (dado que es un estándar en trabajos anteriores [1] y que con esta velocidad, se pueden apreciar ciertas perturbaciones de alta frecuencia), en la Tabla 3.2 se puede observar el consumo de ancho de banda por sensor, estimando el número de bytes a enviar y utilizando el canal de comunicación antes mencionado.

Tabla 3.2 Ancho de banda por sensor.

Data a enviar	Sensor	Tipo de Salida	fs (Hz)	Resolución (# Bytes)	Resolución n (# Bits)	Bits a enviar (bits)	Baudios (bits/s)
Temperatura Externa.	DS18B20	1-Wire	50	2	16	20	1000
Temperatura Interna.	IMU MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000
Presión Externa hasta 700 kPa.	MPX570 0AP	Analógi ca.	50	2	16	20	1000

		IMU						
Aceleración en X	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		IMU						
Aceleración en Y	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		IMU						
Aceleración en Z	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		Velocidad angular alrededor de X, Y, Z.	IMU					
	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		Velocidad angular alrededor de X, Y, Z.	IMU					
	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		Velocidad angular alrededor de X, Y, Z.	IMU					
	MPU-6050	I2C	50	2	16	20	1000	
		Ángulo con respecto al norte (Brújula).	HMC635 2	I2C y PWM	50	2	16	20
								1000
Presencia de agua.	Arreglo de PNP	Digital	50	1	8	10	500	
Carga de Baterías.	ADC	Analógica	50	1	8	10	500	

Velocidad Lineal por Termistores	ADC	Analógi ca	50	2	16	20	1000
Bytes de Inicio, Fin	-	UART	50	4	32	40	2000
Total (BW)	-	-	-	28	224	280	14000

El cálculo del ancho de banda (BW) se realizó mediante:

Ecuación 2 Cálculo del ancho de banda.

$$BW = \sum_{i=1}^n fs_i * Bits_i \quad [bits/s]$$

Donde n es la cantidad sensores (En este caso $n = 14$) y $Bits_i$ es la cantidad de bits utilizado por el i-ésimo sensor.

Este sencillo cálculo indica que el canal es idóneo para la transmisión de los datos propuestos.

Tabla 3.3 Porcentaje de ancho de banda ocupado y disponible.

	Bits/s (Bauds)	Bytes/s	Porcentaje ocupado	Porcentaje Disponible
Ancho de banda necesario	14000	1400		
Ancho de banda disponible			12,15%	87,85%

Como se puede observar en la Tabla 3.3, el puerto serial o puerto UART es más que suficiente para las necesidades establecidas en este proyecto.

3.2. Uso de tarjeta de desarrollo DEMOQE128.

Dado que se dispuso utilizar el MCU MCF51QE128 de Freescale®, se usó para las pruebas preliminares de los sensores (una vez que se desarrolló el código para Arduino) la tarjeta de desarrollo DEMOQE128 (Ver Figura 3.3).

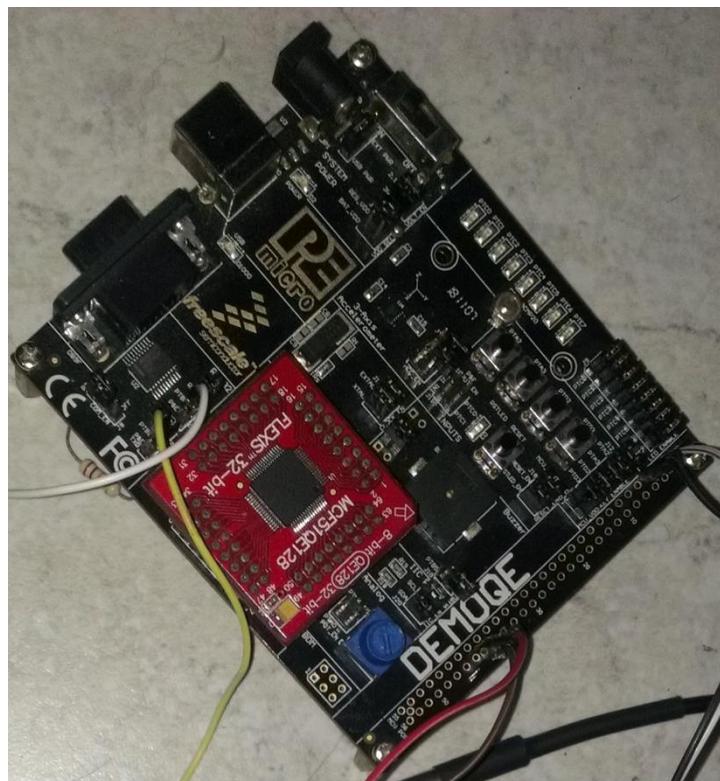


Figura 3.3 DEMOQE128 utilizado.

CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TELEMETRIA

En base a la funcionalidad que se desea, se decidió la fabricación de dos tarjetas:

- Tarjeta de distribución de energía y acople con la pcDuino.
- Tarjeta de adquisición y procesamiento de sensores.

4.1. Diseño del PCB.

Para el diseño, se decidió utilizar *Altium® Designer* por la robustez y la versatilidad. Si bien el aprendizaje de esta es herramienta tiene una dificultad considerable a primera vista, tiene ventajas sobre otras alternativas:

- Permite personalizar los *pads* de cualquier forma, ajustando hasta el más mínimo detalle.
- Tiene una excelente definición de reglas (*Rules* en inglés) que permiten definir de antemano las características que debe cumplir el circuito para ser compatible con el método de fabricación.
- Permite visualización en 3D del PCB (*Printed Circuit Board*). Esto ayuda al diseñador a tener una idea de las dimensiones, distribución y estética de los componentes y la tarjeta que se está diseñando.
- El ruteo de pistas es amigable y busca cumplir las reglas predefinidas.
- El montaje del esquemático es independiente del montaje en PCB, lo que permite hacer distintas versiones del mismo dispositivo (agrega una capa de abstracción).

4.1.1. Método de fabricación.

Para la fabricación de un PCB se tienen múltiples opciones, las siguientes han sido utilizadas en anteriores trabajos similares en la universidad.

- Fabricación por extrusión química: Es el método utilizado casi por unanimidad entre aficionados de la electrónica dada su facilidad y economía. Utiliza como sustrato extrusor cloruro férrico que carcome cobre. Éste método genera desperdicios químicos que, además

de ser peligrosos para la salud humana, son dañinos para el medio ambiente, por lo que el procesamiento de los desperdicios debe ser realizado con cuidado. El terminado de las tarjetas es ideal para prototipos.

- Fabricación por terceros: Se puede contratar a una empresa o tercero que se encargue de la manufactura de la(s) tarjetas. Su costo es elevado y en caso de ser realizado fuera de Venezuela, el tiempo de arribo supera los 40 días (dependiendo de la compañía que lo realice y el costo del envío). El terminado de las tarjetas es profesional
- Fabricación por extrusión mecánica: Consiste en el uso de una máquina tipo CNC que, en base a las órdenes generadas por el programa de diseño circuital (En este caso *Altium Designer*), generalmente llamados archivos *Gerber*, realiza la extrusión del cobre. La terminación de las tarjetas es ideal para prototipos.

En base a los recursos disponibles, se decidió realizar la fabricación en el Laboratorio C dado que se dispone de una máquina que fabrica PCB por extrusión de mecánica.

Características del método de fabricación.

Cuando se está realizando un diseño de PCB no sólo se debe tomar en cuenta las funcionalidades del circuito a fabricar. También se deben realizar consideraciones de suma importancia como el método de fabricación. Esto va a influir considerablemente en el tiempo de ensamblado y también en el desempeño.

En cuanto a los circuitos a diseñar, en base a lo aprendido en el prototipado y a las funciones que se quieren tener, se implementaron dos tarjetas:

- Tarjeta de adquisición y procesamiento: Se encarga de obtener datos, procesarlos y transmitirlos a la pcDuino para su posterior uso.
- Tarjeta de puente y de distribución de energía: Se encarga de comunicar el pcDuino con la tarjeta de adquisición y acondicionar el voltaje de entrada de la batería a bordo para el pcDuino y la tarjeta de adquisición, así como los actuadores.

En la Figura 4.1 se puede observar un diagrama de funcionamiento de las tarjetas. Las flechas rojas indican transmisión de potencia y la flecha bidireccional transmisión de datos.

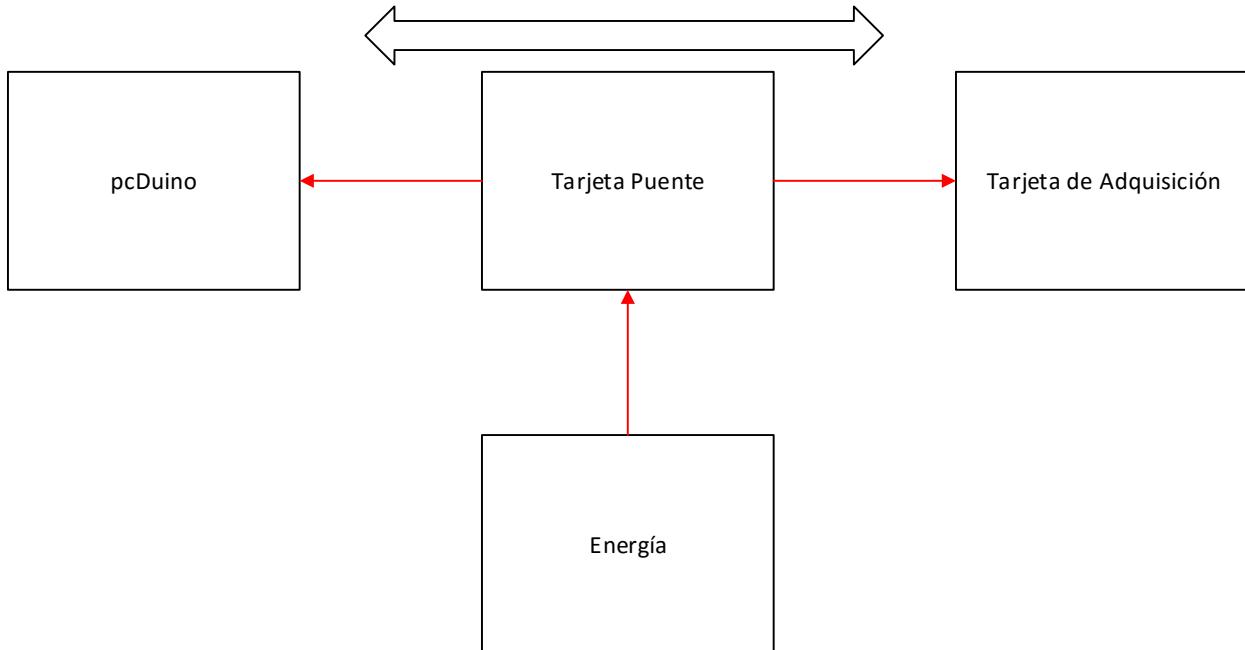


Figura 4.1 Diagrama de funcionamiento de tarjetas.

En base a la búsqueda de versatilidad, pero sin llegar a realizar un diseño genérico, se decidió que las tarjetas pasaran del estándar de pines del pcDuino a un estándar de Arduino®. Esto permite la colocación de aditamentos comerciales que funcionan bajo este concepto.

4.1.2. Máquina de Extrusión de Cobre.

La máquina utilizada en la fabricación de las tarjetas diseñadas es una Protomat® S62 (ver Figura 4.2).



Figura 4.2 Máquina Protomat® S62 de extrusión para prototipado de PCB.

Sus características principales:

Tabla 4.1 Características Técnicas de la Protomat® S62 [16].

Consumo:	200 W
Peso:	55 kg (121 lb)
Dimensiones (Alto × Ancho × Profundidad)	670 mm × 540 mm × 760 mm (26.4" × 21.3" × 29.9")
Humedad Permitida:	60 % max.
Velocidad de desplazamiento:	150 mm/s (6"/s) max.
Rendimiento en perforación:	150 perforaciones/min. max.
Cambio de herramienta:	Automático
Ajuste de Profundidad de Extrusión:	Manual
Resolución (X/Y):	0.25 µm (0.01 Mil)
Precisión de Posicionamiento:	+/- 20 µm (0.8 Mil)
Mínimo Diámetro de Perforación:	0.2 mm (8 Mil)

En la Tabla 4.1 se pueden observar las características más importantes de la máquina de prototipado. En base a estas características se realizaron los diseños pertinentes. Cabe destacar que el uso de esta máquina es restringido dado el costo de las láminas de cobre que utiliza. Esto conllevó a una revisión exhaustiva de las tarjetas diseñadas para verificar su compatibilidad con la máquina.

En estas revisiones, se recalcó la importancia de homogeneizar el diseño para evitar un desgaste de las brocas de la máquina.



Figura 4.3 Brocas de perforación y extrusión de la máquina de prototipado.

Estas brocas son cambiadas por la máquina de manera automática al avanzar en el proceso de fabricación.

4.1.3. Reglas de diseño.

En base a la Protomat® S62, se definieron las siguientes reglas de diseño:

- Distancia entre objetos (Cercanos al MCU): Debido a que los terminales del microcontrolador se encuentran a una distancia de 7.5 mils (1.905 mm), se definió como distancia mínima alrededor del microcontrolador 7 mils (0.178 mm).

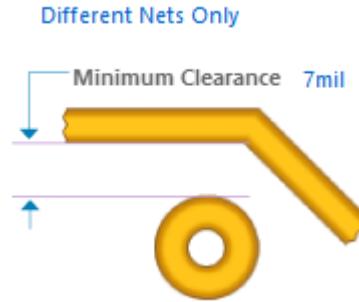


Figura 4.4 Distancia mínima entre objetos cercanos al microcontrolador

- Distancia entre objetos (lejanos al MCU): Se utilizó 10 mils (0.254 mm) como mínimo.

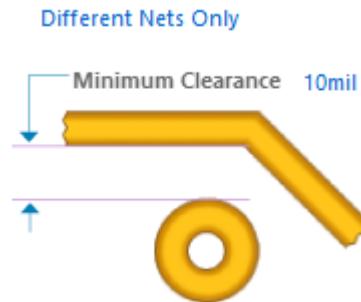


Figura 4.5 Distancia mínima entre objetos cercanos

- Ancho de pistas:
 - Mínimo: 10 mils (0.254 mm).
 - Preferido 12 mils (0.305 mm).
 - Máximo 40 mils (1.016 mm).

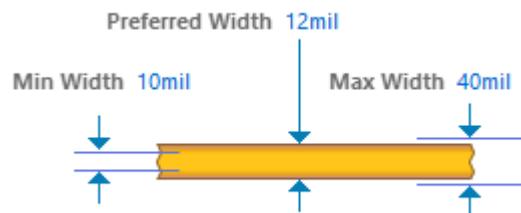


Figura 4.6 Ancho de pistas

- Tamaño de vías:
 - Diámetro:
 - Mínimo: 50 mils (1.27 mm).

- Preferido: 50 mils (1.27 mm).
- Máximo: 50 mils (1.27 mm).
- Tamaño de agujero:
 - Mínimo: 25 mils (0.635 mm).
 - Preferido: 25 mils (0.635 mm).
 - Máximo: 25 mils (0.635 mm).

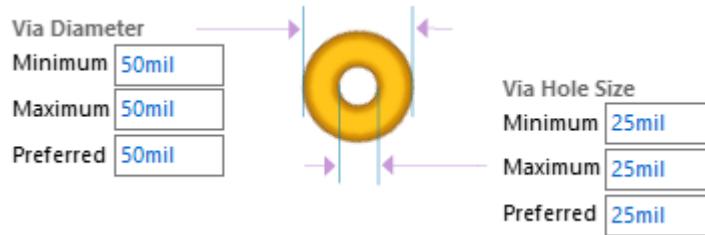


Figura 4.7 Tamaño de vías.

- Tamaño de *pads*:
 - Diámetro:
 - 65 mils (1.651 mm).
 - Tamaño de agujero:
 - 35 mils (0.889 mm).

4.1.4. Diseño de tarjeta de distribución de energía y *forward* de pines entre pcDuino y tarjeta de adquisición.

En base a los requerimientos, se contempló lo siguiente en la tarjeta puente:

- Voltajes necesarios para el funcionamiento del sistema.
- Distribución mecánica de los pines del pcDuino y “Compatible con Arduino”.
- Indicación de funcionamiento.
- Optimización del espacio.
- Rigidez mecánica.

Voltajes requeridos.

En base a los requerimientos, se puede observar en la Figura 4.8 un diagrama de voltajes necesarios. Los 12V provienen de una batería.

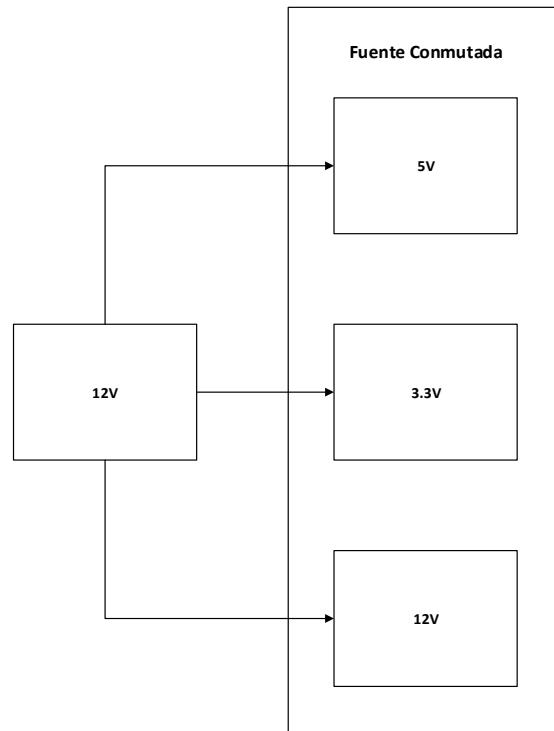


Figura 4.8 Diagrama de Voltajes Necesarios.

Estos voltajes son provistos por una tarjeta comutada diseñada previamente en el grupo de investigación. Esta incluye un convertidor *step-down* TPS5450 y un regulador de voltaje de 3.3V TPS76833.

Características del TPS5450:

- Amplio rango de voltaje de entrada: 5,5V a 36V.
- Corriente continua a la salida de hasta 5A (pico hasta 6A).
- Eficiencia mayor al 90%.
- Amplio rango de voltaje de salida, ajustable hasta 1,22 V.
- Compensación interna de la realimentación para disminuir la cantidad de componentes externos.
- Frecuencia de conmutación fija a 500kHz para disminuir el tamaño del filtro a la salida.

- Posee protección contra subidas de voltaje, limitación a la salida de la corriente máxima y un sistema térmico de apagado.

Utilizar este tipo de “regulador” conmutado permite aumentar la eficiencia de la regulación del voltaje por medio de la disminución de pérdida de potencia en forma de calor generada por los reguladores lineales.

En cuanto al regulador lineal de 3.3V, permite un voltaje estable e ideal para el MCU, así como para los sensores digitales.

Características del TPS76833:

- Rango de voltaje de entrada: 2.7V a 10V.
- Caída de voltaje baja: típicamente 230mV.
- Corriente de reposo muy baja: $85\mu A$.
- Respuesta transitoria rápida.
- Circuito de apagado de protección térmica.

Esta tarjeta (Ver Figura 4.9) fue diseñada para deslizarse en un conector de 6 pines estándar. La altura del capacitor y el área que va a ocupar debe tomarse en cuenta a la hora de colocar a los componentes de la tarjeta en su lugar.

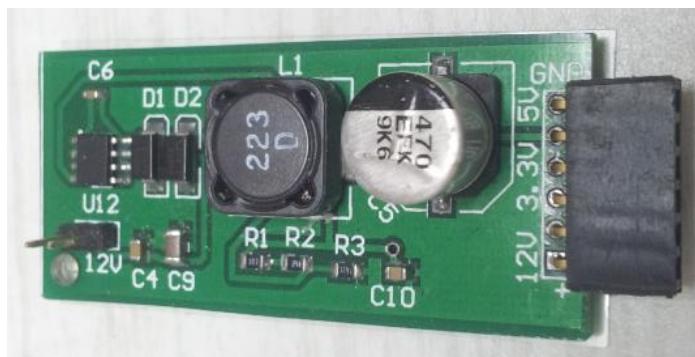


Figura 4.9 Fuente conmutada.

Requerimientos de pcDuino.

La pcDuino se alimenta por USB 5V@2A. A través de su salida de pines es posible acceder a este punto de conexión. El diseño debe adaptarse a la fuente de la alimentación: USB o por tarjeta puente. Esto se puede lograr compartiendo los puntos de 5V, pero guardando el cuidado de no sobrepasar el amperaje máximo soportado por la tarjeta al alimentarse por USB.

Requerimientos de la tarjeta de adquisición.

Se estimó un consumo cercano a 300mA entre todos los sensores, MCU. Esta potencia estará distribuida en 3.3V, 5V y 12V.

Distribución Mecánica.

Como se puede ver en la Figura 4.10, la disposición de los pines en el pcDuino está en un formato similar al de Arduino (compartiendo el número de pines) pero en una disposición distinta. La forma como están soldados los pines obliga a utilizar el formato de shield en forma reversa, es decir, la parte superior del *shield* debe apuntar al pcDuino.

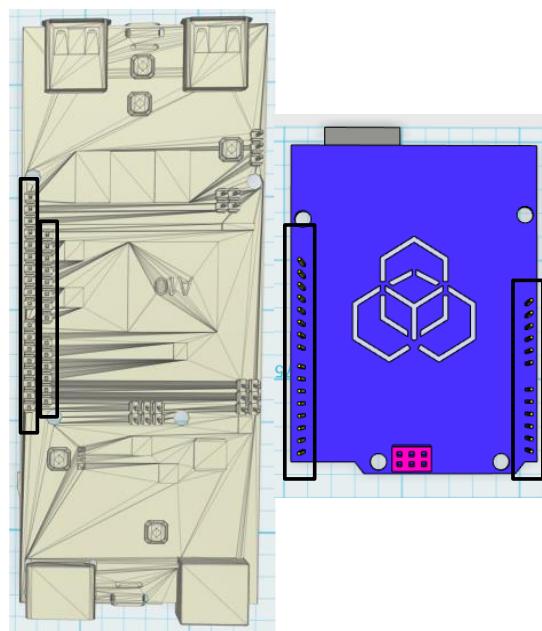


Figura 4.10 Pines de pcDuino y Shield para Arduino.

Para que se puedan conectar las tarjetas, se decidió que se iban a diseñar en el formato “*piggy-back*” en donde los pines hembras de una tarjeta encajan en los de la otra tarjeta. Esto, teniendo en cuenta la rigidez mecánica, es una solución ideal para sistemas expandibles y modulares.

Esta disposición de los pines trae como consecuencia que los ejes deben estar desfasados para que las pistas puedan interconectarse de forma correcta y mantener el formato de Arduino® deseado.

Esquemático.

Esta tarjeta se subdivide en dos partes: *bypass* de pines (ver Figura 4.11) y Distribución de Potencia (Ver Figura 4.16).

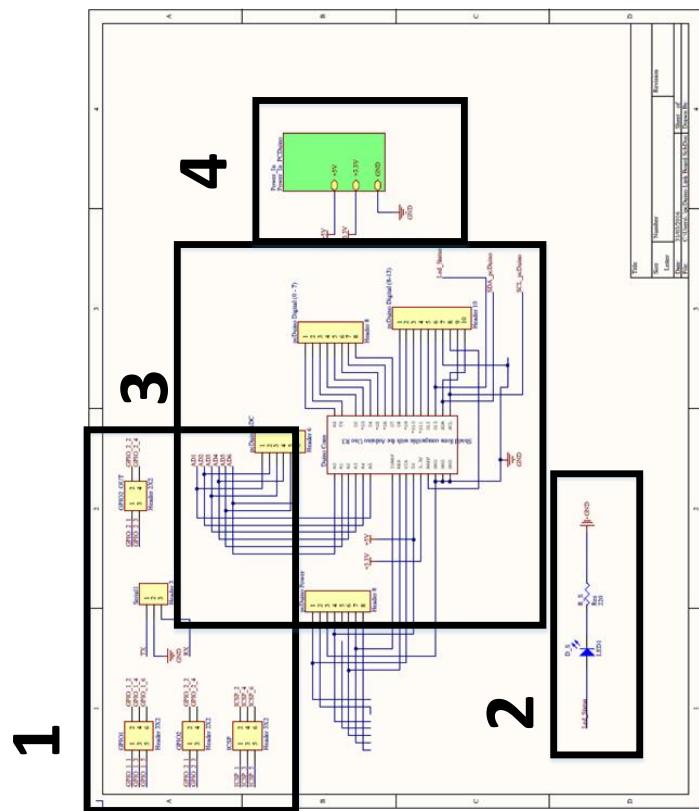


Figura 4.11 Esquemático de tarjeta de distribución de energía y *bypass* de pines.

En la Figura 4.11 se pueden ver las secciones numeradas:

- Sección 1: *Forward* o redireccionamiento de pines del pcDuino para permitir acceso de ellos (Ver Figura 4.12).

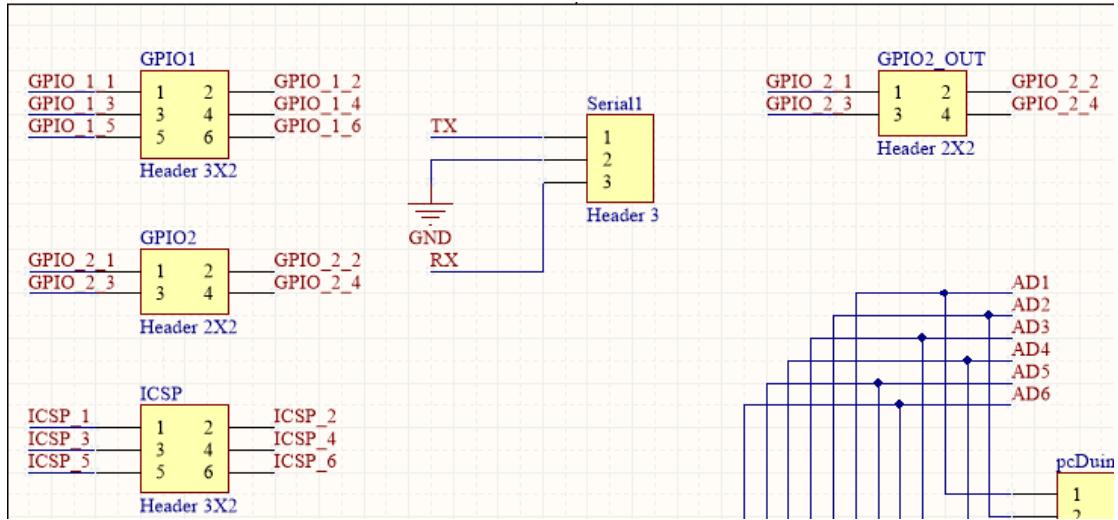


Figura 4.12 Redireccionamiento de Pines.

- Sección 2: LED de indicación de estatus del sistema. Se comunica con un pin digital al pcDuino (Ver Figura 4.13).

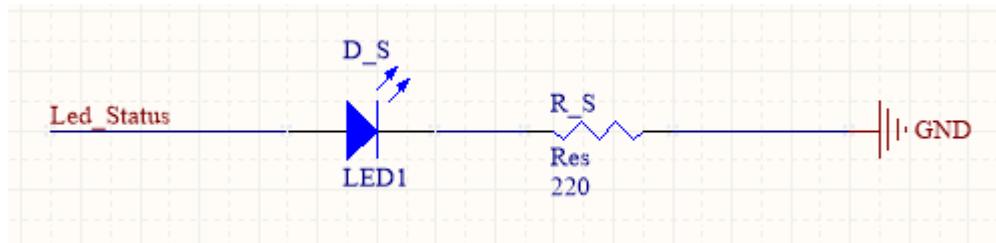


Figura 4.13 LED de estatus para el pcDuino.

- Sección 3: Redireccionamiento de pines del pcDuino a la tarjeta de procesamiento (Ver Figura 4.14).

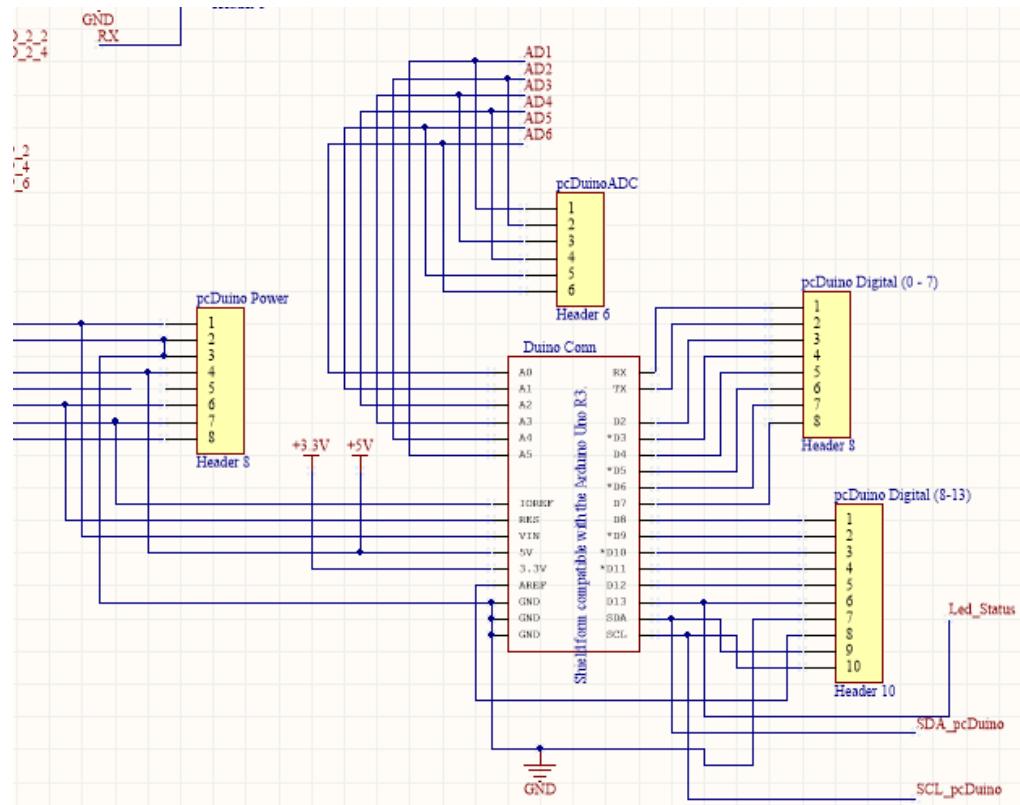


Figura 4.14 Redireccionamiento de pines del pcDuino a la Tarjeta de Procesamiento.

- Sección 4: Distribución de potencia (Ver Figura 4.15 y Figura 4.16).

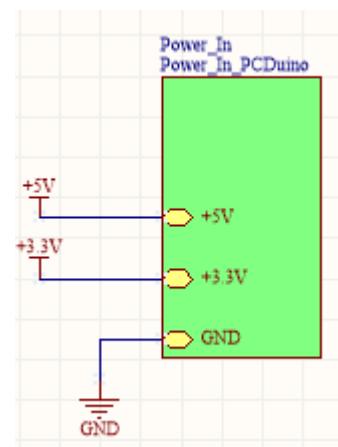


Figura 4.15 Esquemático de entradas y salidas de potencia.

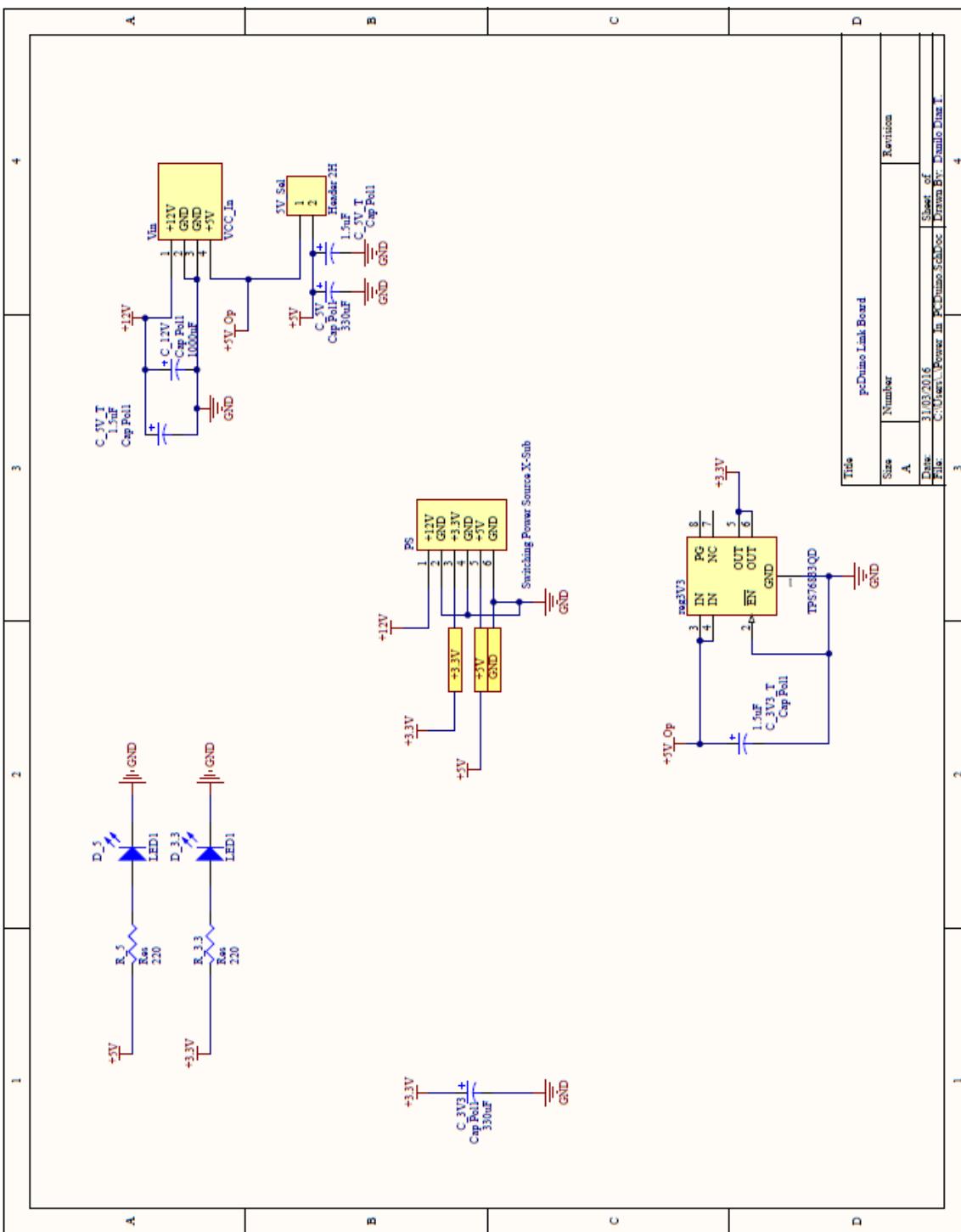


Figura 4.16 Esquemático de distribución de energía.

Se puede observar en la Figura 4.16 que se utilizó un regulador TPS76833QD de 3.3V LDO (*Low Dropout* o de baja caída de tensión). Esto es para que, en caso de requerirlo, se pueda alimentar al sistema sólo con una entrada de 5V.

En base a este conjunto de esquemáticos, se procedió a realizar el diseño de la tarjeta (ver Figura 4.17). Mide 92.75 mm (3651.65 mils) x 68.18 mm (2684.14 mils).

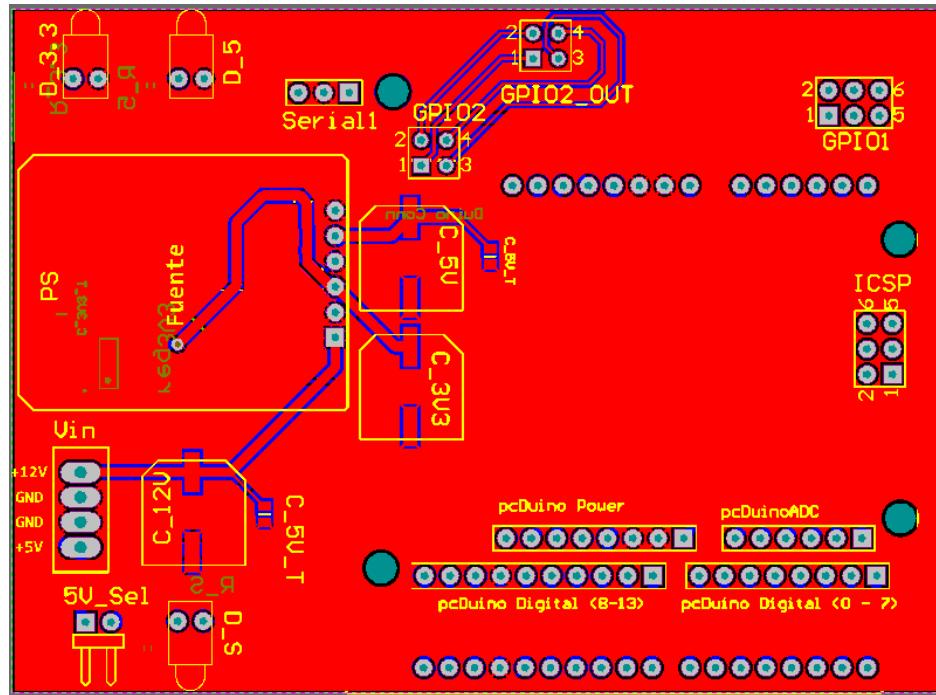


Figura 4.17 *Top Layer* (Capa superior).

Algunas características importantes:

- Posee un *jumper* que permite seleccionar si se desea sólo utilizar 5V como fuente de alimentación de la tarjeta (llamado 5V_Sel).
- El conector seleccionado para la alimentación es de estándar ATX.
- La fuente utilizada para la regulación es la de la Figura 4.9, utilizando pines de 90 grados de inclinación para su conexión.
- Incorpora agujeros con estándar mecánico de Arduino® para compatibilidad y rigidez.

Tabla 4.2 Componentes de tarjeta de distribución de energía y *forward* de pcDuino – Tarjeta de procesamiento.

Nombre	Descripción	Nombre en la Tarjeta	Footprint	#
Seleccionador de Regulación	2 pines para <i>Jumper</i>	5V_Sel	HDR1X2H	1
Capacitores de Bypass 10uF y 100uF	Capacitor Polarizado SMD	C_5V, C_12V	CAPR5-4X5	2
Conector para Shield de Arduino	Set de Pines de 6, 8, 10	Duino Conn	UNO_R3_S HIELD	1
Leds de Indicación	LEDs TH	D_3.3, D_5, D_S	LED-1	3
Pines de Bypass de GPIO y ICSP	Header 3X2	GPIO1, ICSP	HDR2X3	2
Pines de Bypass de GPIO2	Header 2X2	GPIO2, GPIO2_OUT	HDR2X2	2
Pines de Forward pcDuino	pcDuino Digital (0 - 7), pcDuino Power	pcDuino Digital (0 - 7), pcDuino Power	HDR1X8	2
Pines de Forward pcDuino	pcDuino Digital (8-13)	pcDuino Digital (8-13)	HDR1X10	1
Pines de Forward pcDuino	pcDuino ADC	pcDuinoADC	HDR1X6	1
Fuente de Regulación Conmutada	12V de Entrada, Salida: 5V, 3.3V	PS	Fuente_Switching	1
Resistencias para Leds	Resistencias de 220 Ohm 1/10 W	R_3.3, R_5, R_S	0603	3
Forward de Serial de Debugging	Set de 3 Pines	Serial1	HDR1X3	1

Entrada de Alimentación	Entrada de 5V y 12V ATX	Vin	Vcc_In	1
------------------------------------	----------------------------	-----	--------	---

En la Figura 4.18 puede observar la cara inferior del PCB.

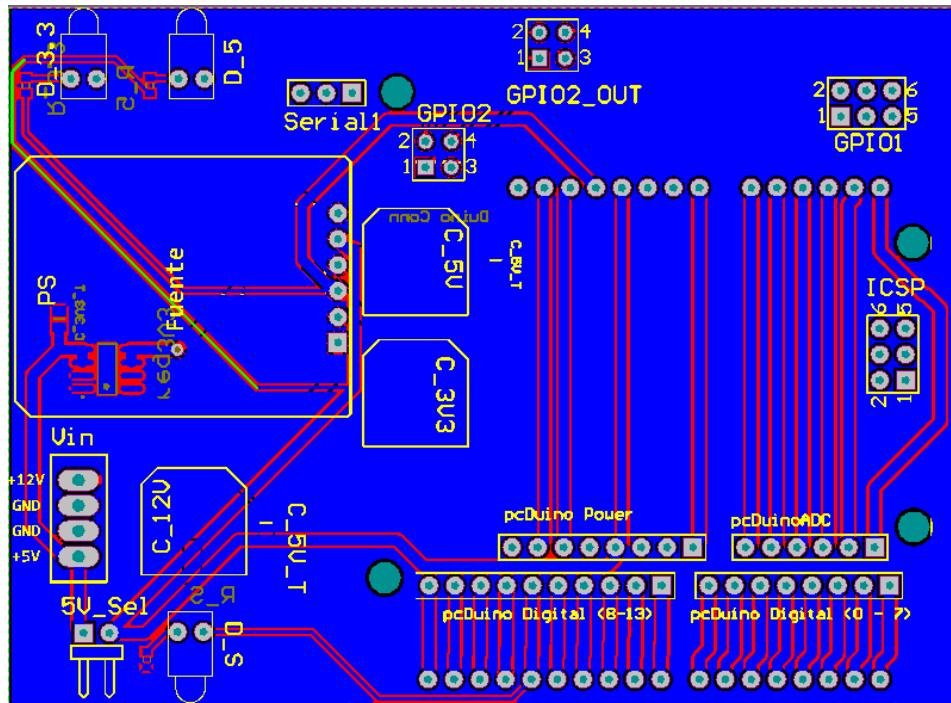


Figura 4.18 Bottom Layer (Capa Inferior).

Como estrategia de “ruteo” (proceso de colocar pistas), se decidió implementar planos de tierra (GND) en las dos capas del PCB. Esto facilita el trabajo de pasar los distintos puntos a través de la tarjeta.

Aprovechando las ventajas de Altium® Designer, a continuación puede ver una vista frontal de la tarjeta en un modelo 3D (Ver Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21).

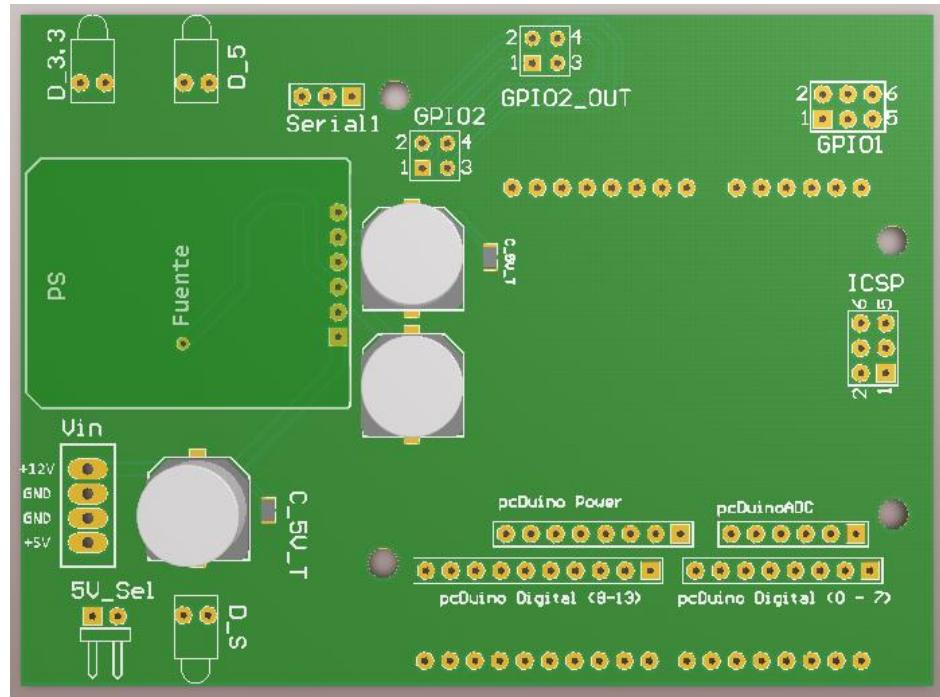


Figura 4.19 Vista Frontal 3D de tarjeta de distribución de energía y *forward* entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.

En la parte posterior se puede observar el regulador de 3.3V LDO (Ver Figura 4.20).

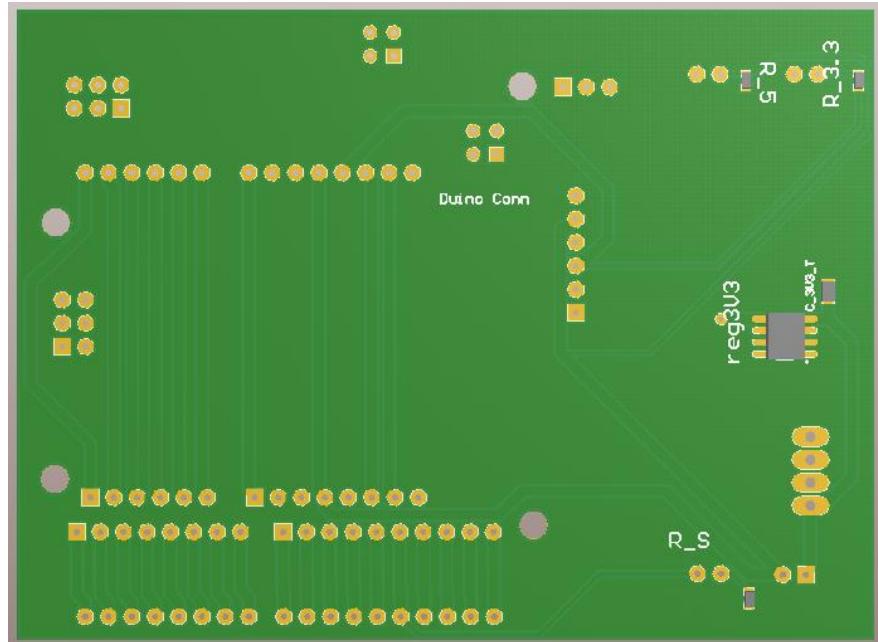


Figura 4.20 Vista Posterior 3D de tarjeta de distribución de energía y *forward* entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.

Una vista isométrica (Ver Figura 4.21).

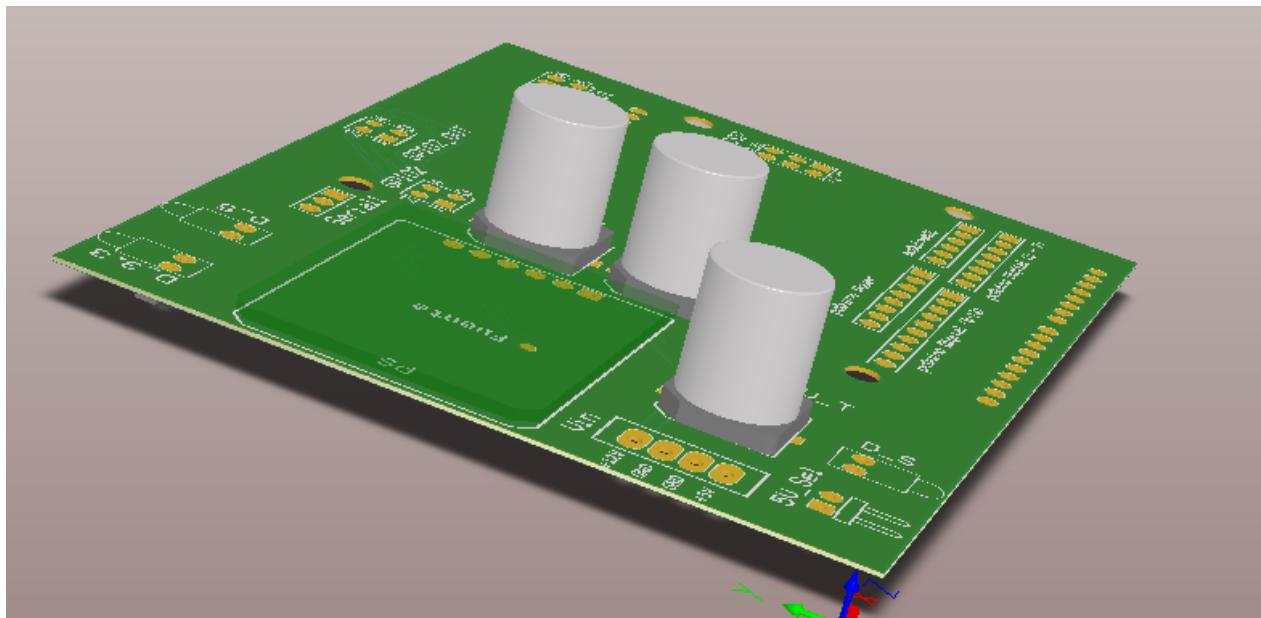


Figura 4.21 Vista isométrica 3D de tarjeta de distribución de energía y *forward* entre pcDuino y tarjeta de adquisición y procesamiento.

4.1.5. Diseño de tarjeta de adquisición.

Esta tarjeta debía contemplar la adquisición de los sensores de la Tabla 1.1. Para reducir al máximo el tamaño de la tarjeta y minimizar los futuros costos de fabricación, se decidió utilizar el MCU MCF51QE128 soldado directamente en la tarjeta (Ver Figura 4.22).



Figura 4.22 MCU MCF51QE128CLH en SMD.

A continuación, se describirá cada uno de los circuitos esquemáticos para la adquisición de los sensores. Esto en base del proceso de prototipado con la tarjeta de desarrollo DEMOQE128.

Adquisición de sensores por protocolo I2C.

El protocolo I2C utiliza dos líneas para poder comunicar dispositivos entre sí. Una lleva el reloj que permite mantener sincronizados a los dispositivos (CLK) y otra de transmisión de datos (SDA). Ambas líneas necesitan resistencias de *pull-up* hacia la alimentación o referencia lógica VDD. Cualquier dispositivo conectado a estas líneas es de drenador o colector abierto (*Open Collector*).

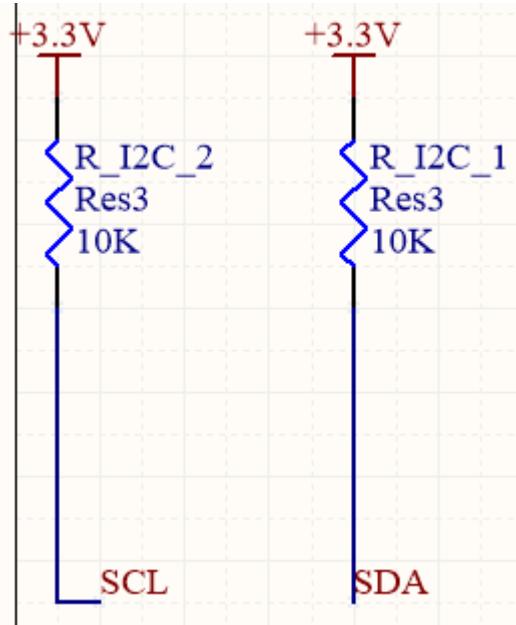


Figura 4.23 Circuito de Comunicación I2C Implementado.

Las resistencias de *pull-up* son de 10 kOhm por su uso en la tarjeta de desarrollo DEMOQE128. Las pruebas a través de esta tarjeta fueron satisfactorias y por ende este valor cumple con sus funciones.

Adquisición del Sensor de Temperatura Externa DS18B20.

El sensor DS18B20 utiliza un protocolo de comunicaciones llamada 1-Wire. Fue desarrollado por la empresa Dallas Semiconductors (actualmente Maxim) y es muy controvertido por la

cantidad de procesamiento que debe utilizarse para poder operar con el protocolo si no se dispone de un hardware dedicado que lo procese.

El 1-Wire es un protocolo serial utilizando una sola línea de datos además de referencia de tierra para la comunicación. El 1-Wire es multi-maestro, multi-esclavo. Cada dispositivo esclavo 1-Wire tiene un ID (número de identificación) de 64 bits único e inalterable, que sirve como dirección del dispositivo. Este ID identifica el tipo de dispositivo y la funcionalidad. Por lo general, los dispositivos esclavos 1-Wire funcionan en el rango de voltaje de 2.8V (mínimo) a 5.25V (máximo). La mayoría de los dispositivos 1-Wire no tienen pin de fuente de alimentación; que toman su energía desde el bus 1-Wire (alimentación parásita) [17]. Este no es el caso del sensor DS18B20 que se desea utilizar. En la Figura 4.24 se puede observar un diagrama básico de conexión para el protocolo 1-Wire.

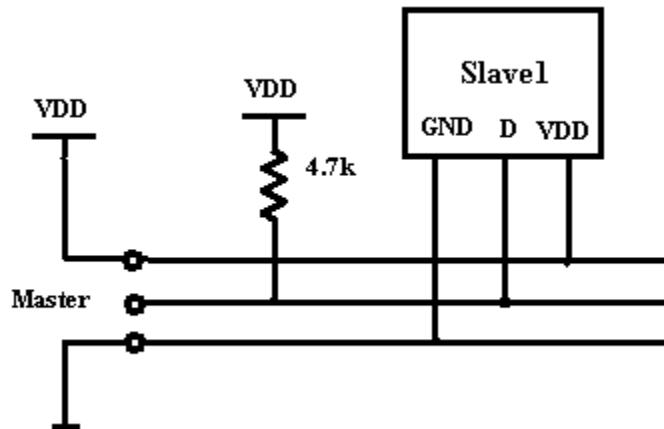


Figura 4.24 Diagrama de conexión básico por 1-Wire.

La comunicación por 1-Wire se llevan a cabo en tres fases: la activación del bus, selección del dispositivo y el intercambio de datos. La primera trae a todos los dispositivos esclavos conectados a un estado de “alerta”. La segunda utiliza un comando de la Tabla 4.3 y se repite hasta encontrar el dispositivo deseado para que posteriormente se envíen comandos de solicitud de datos. [18]

Tabla 4.3 Comandos de 1-Wire. [18]

Comando	Valor	Descripción	Comentarios
Saltar de ROM	0xCC	Ignora los ID de los dispositivos.	Se utiliza generalmente cuando hay solo un dispositivo en el bus. Sin embargo, puede ser utilizado para enviar mensajes subsecuentes a todos los dispositivos.
Leer ROM	0x33	Lee el ID del dispositivo	Se usa solo cuando hay un esclavo.
Buscar ROM	0xF0	Enumera los ID	
Seleccionar ROM	0x55	Selecciona un dispositivo con un ID específico	Los próximos 64 bits a ser escritos serán el ID del dispositivo.

Todas las comunicaciones 1-Wire se basan en períodos de tiempo específicos. Por ejemplo, si el dispositivo maestro coloca la línea de comunicación en “bajo”, el esclavo lo detectará. Éste espera un período específico ($15\mu s$) a continuación muestrea la línea. Si el maestro quiere escribir un 1 libera la línea de forma rápida; el esclavo ve la línea en “alto” y lee esto como un 1. Si el maestro tiene la línea de baja lo “suficiente”, el esclavo detecta y lee un 0.

1-Wire y Protocolo UART.

En base al cómo se leen los 1 y 0, la compañía Maxim desarrolló un método para utilizar el protocolo con UART como alternativa a su protocolo. Convenientemente, el UART a 9600 baudios y 115200 baudios proporcionan velocidades de lectura y escritura que se ajustan a los utilizados por 1-Wire durante el *reset* y el intercambio de datos. Esto, configurando 8 bits por palabra, sin paridad y un bit de parada. Debido a que el 1-Wire consiste en comprobar si la línea es alta o baja después de un tiempo establecido (a *grosso modo*), los bits individuales se señalizan mediante el envío de los valores máximo y mínimo de la UART: 0xFF y 0x00 respectivamente. Esto genera una señalización con la cual el dispositivo 1-Wire puede interpretar como una señal. [18]

Como los dispositivos 1-Wire son *open-drain* (drenador abierto), se debe adaptar la salida del UART para cumplir esta función.

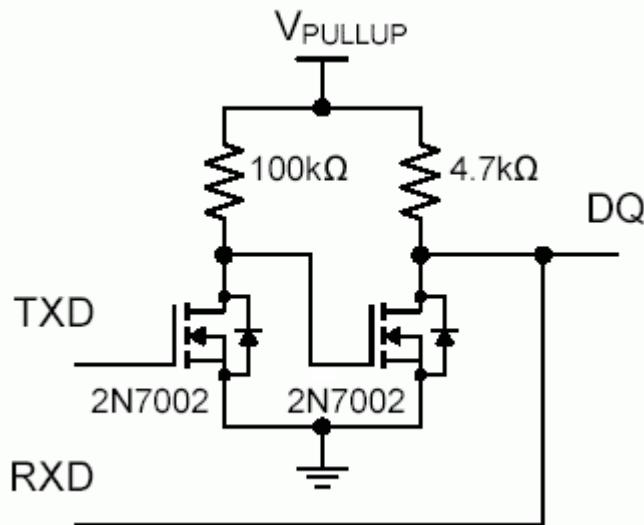


Figura 4.25 Circuito discreto de Maxim para UART drenador abierto. [17]

La manera más sencilla de hacer esta adaptación es con el uso de un diodo de señal “rápido” como el 1N4148. Este resulta ser ampliamente recomendado para este propósito. En la Figura 4.26 se puede observar el circuito simplificado. [19]

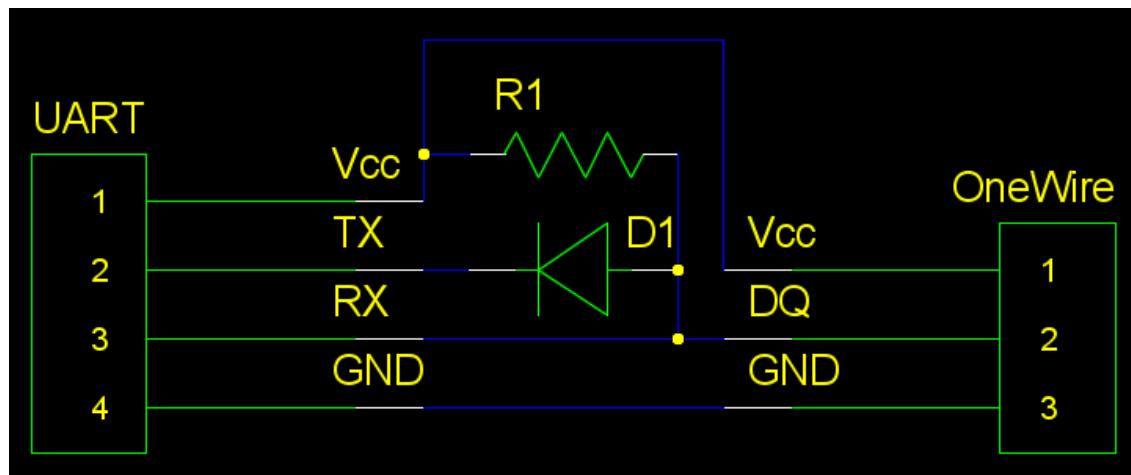


Figura 4.26 Circuito simplificado para UART a 1-Wire. [19]

La resistencia R1 puede ser omitida porque no se va a utilizar el modo “parásito” para alimentar al sensor. El circuito que se planteó implementar es el siguiente.

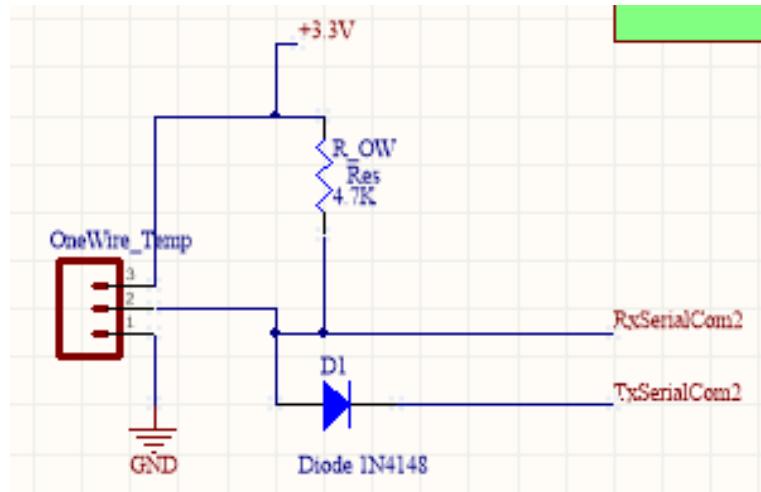


Figura 4.27 Circuito de UART a 1-Wire planteado.

Tabla 4.3

Sensor de presencia de agua.

Los sensores de este tipo que se encuentran en el mercado son demasiado grandes y costosos, se resolvió utilizar un método para la detección de agua muy parecido al que había sido implementado previamente en la plataforma. Consiste en aprovechar la capacidad de conducción de electricidad que posee el agua para generar una situación de corto circuito entre dos conexiones que nos indique la presencia de la misma. [1]

Para ello se elaboró un circuito sencillo compuesto por un transistor PNP y una resistencia colocados en la configuración que se muestra en la Figura 4.28. Para aumentar la seguridad y que se pueda detectar en distintas zonas del robot se decidió que deben colocarse dos. La base del transistor debe ir conectada a una tira conductora que debe encontrarse separada por una distancia muy pequeña (aproximadamente 1mm) a otra tira paralela que está conectada a tierra.

Cuando el agua toca ambas tiras, la base del transistor se conecta a tierra con lo cual pasa de corte a saturación, produciéndose un cambio de la salida de 3,3V a 0,6V. Es por ello que se diseñaron

cinco de estos circuitos y se colocaron en las zonas críticas donde se quiere detectar la presencia del líquido.

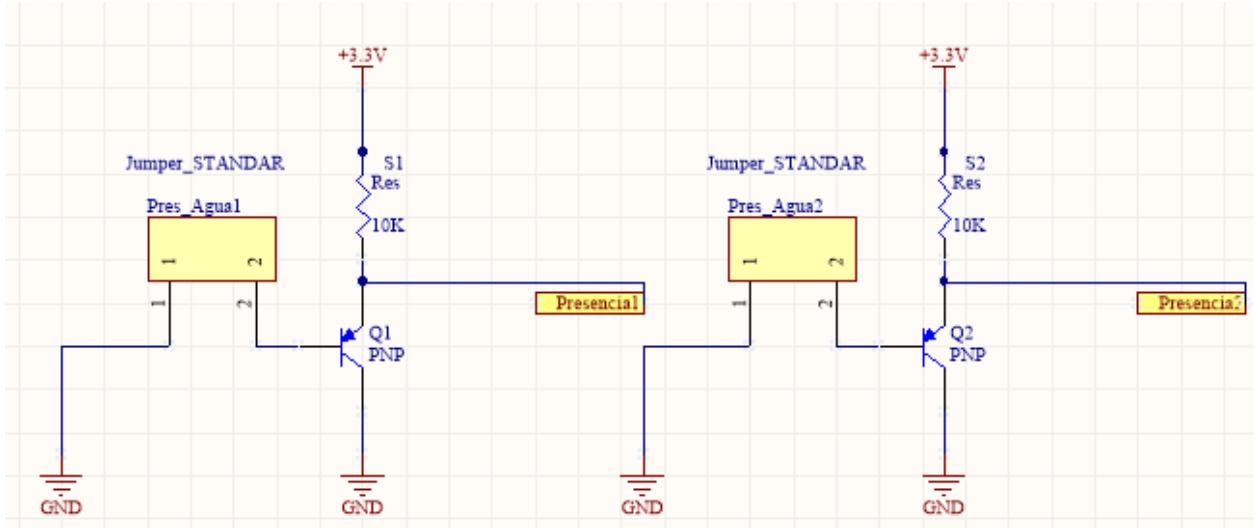


Figura 4.28 Circuito para detectar presencia de agua.

Si un evento de este estilo llegara a ocurrir en cualquiera de las zonas del submarino, sería necesario que se realice una acción inmediata para poder salvar el robot submarino.

Adquisición de sensores analógicos.

Dentro de esta categoría entra la carga o nivel de las baterías y el sensor de presión. Hay algunas características de los canales ADC del microcontrolador que son importantes de resaltar:

- Rango de voltaje: 0V – 3.3V.
- Resolución máxima: 12 bits ($2^{12} = 4096$).
- Voltaje de cada paso: $\frac{3.3V}{4096} = 805.7\mu V$

Las señales obtenidas deben adecuarse a este canal. Es por ello que se realizó la obtención de la siguiente forma.

Nivel de Carga de Baterías.

En la Figura 4.29, se puede observar el circuito diseñado para obtener la carga de baterías. Este posee dos partes: Una de protección y otra de adecuación del nivel de voltaje.

La protección viene dada por un voltaje zener de 3.3V. Esto hace que en caso de existir una falla y que la entrada sea excedida, “nunca” puedan haber más de 3.3V en el MCU.

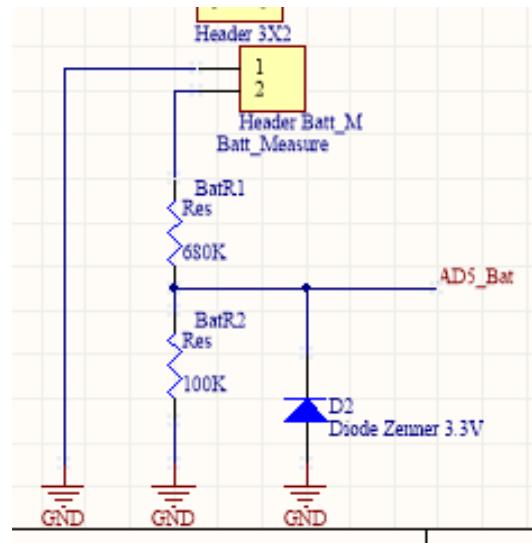


Figura 4.29 Circuito para obtener nivel de carga de baterías.

En cuanto a la adecuación del nivel de voltaje se decidió utilizar un divisor de voltaje que permite hasta 24V de entrada, dejando un margen de error.

$$V_{mcu} = V_{batería} * \frac{R2}{R1 + R2} = 24V * \frac{100k\Omega}{100k\Omega + 680k\Omega} = 3.07V$$

Y para 12V de entrada:

$$V_{mcu} = 1.54V$$

Suponiendo que obtenga con una resolución de 8 bits (256 pasos), los 3.3V se dividen en pasos de 12.9 mV que es suficiente para poder medir los voltajes de carga.

Presión absoluta.

Para la medición de la presión con el sensor analógico MPX5700AP (ver Figura 1.13), se debe disminuir el nivel de voltaje de un rango de 0V – 5V a 0V – 3.3V. Para evitar problemas de acoplamiento de impedancias, se decidió utilizar un OPAMP en configuración seguidor. Esta configuración fue utilizada en trabajos anteriores como los de A. Makhoul y J. Guzmán. La planteada se puede observar en la Figura 4.30.

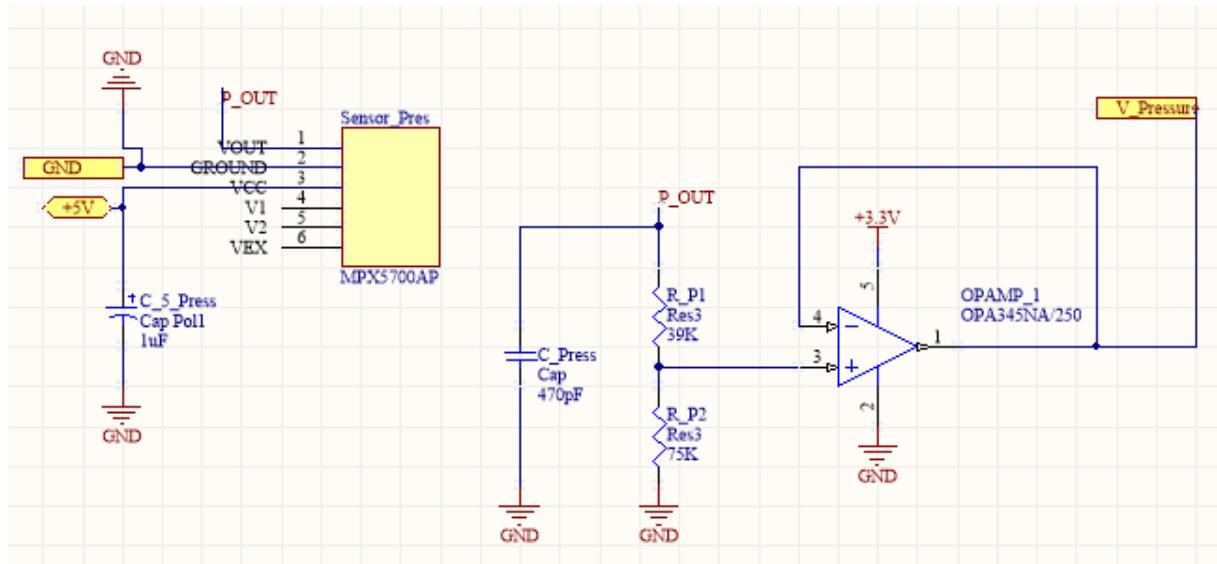


Figura 4.30 Circuito para obtener nivel de presión con el sensor MPX5700AP.

El capacitor de 470pF es recomendado por el fabricante para eliminar ruido de alta frecuencia. El divisor de voltaje permite disminuir el voltaje dispensado por el sensor de presión.

El OPAMP utilizado es un OPA345NA en configuración seguidor. Es *rail to rail* o riel a riel. Esto quiere decir que el voltaje de salida se puede acercar a los 0V y a los 3.3V.

Diseño de PCB.

En base a los circuitos previamente estudiados, se obtuvo el siguiente esquemático (Ver Figura 4.31).

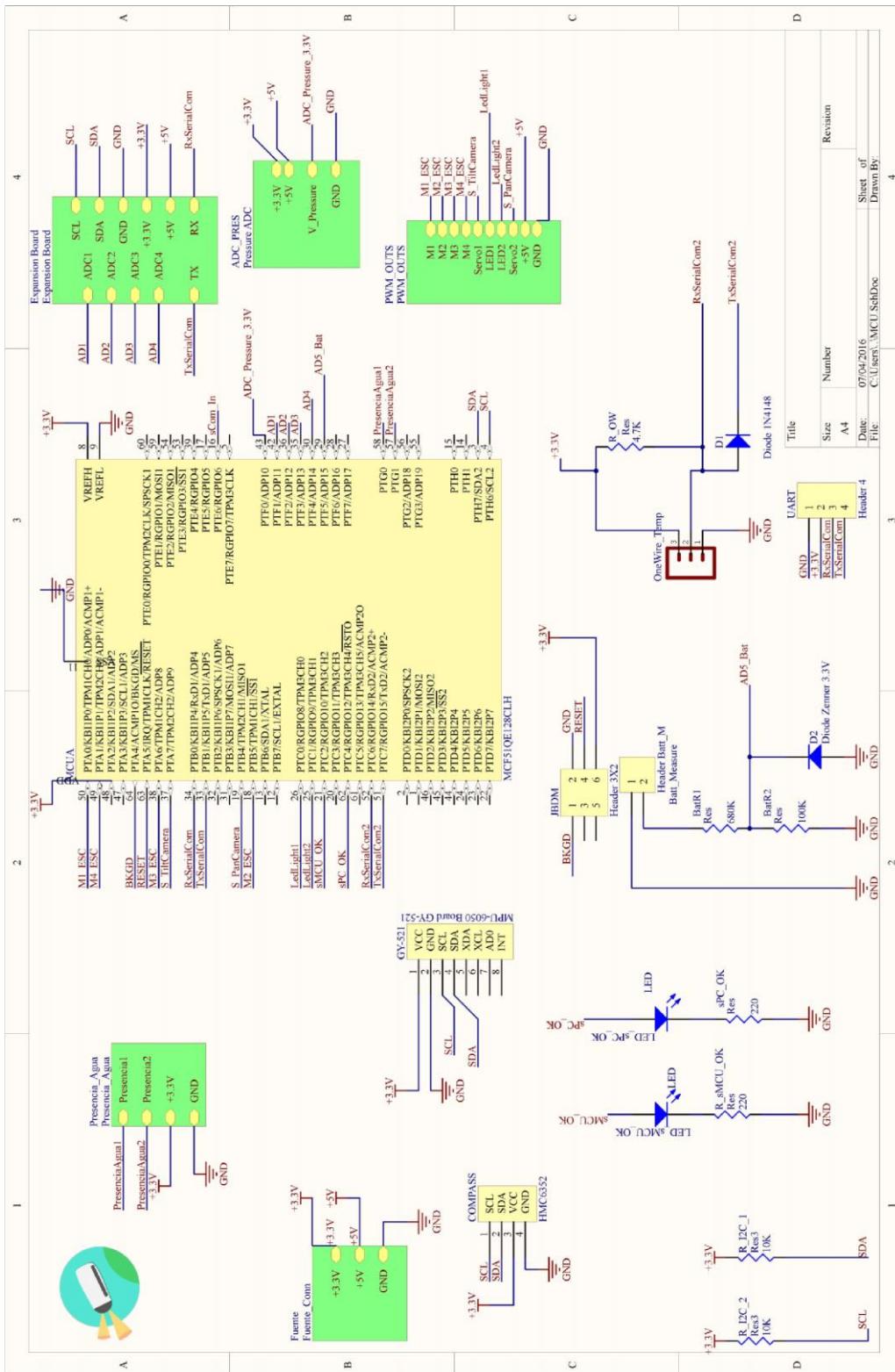


Figura 4.31 Esquemático de Tarjeta de Adquisición.

Para que la selección de puertos del MCU se realizara de forma ideal, se desarrolló una tabla que contempla la representación en el *firmware* de los distintos entes de la tarjeta, el pin de la tarjeta de desarrollo utilizada, el puerto del MCU y el tipo de conexión.

Tabla 4.4 Puertos del MCU utilizados.

Nombre y Tipo de Señal	DEMOQE PINOUT	Puerto	Tipo de Conexión
VDD (3.3V DC)	1	-	Alimentación
VSS - GND (GND)	3	-	Alimentación
M1_ESC (PWM)	14	PTA0	Salida
M2_ESC (PWM)	23	PTB5	Salida
M3_ESC (PWM)	22	PTA6	Salida
M4_ESC (PWM)	16	PTA1	Salida
S_PanCamera (PWM)	19	PTB4	Salida
S_TiltCamera (PWM)	24	PTA7	Salida
sMCU_OK (Bit)	33	PTC2	Salida
sCom_In (Bit)	54	PTE6	Salida
sPC_OK (Bit)	37	PTC4	Salida
RESET_INTERRUPT (Bit)	2	PTA5	Entrada
Rx SerialCom (Serial)	7	PTB0	Entrada
Tx SerialCom (Serial)	5	PTB1	Salida
LedLight1 (PWM)	13	PTC0	Salida
LedLight2 (PWM)	15	PTC1	Salida
Press_In (Analógica)	18	PTF0	Entrada

IMU SCL (I2C)	42	PTB7	Salida
IMU SDA (I2C)	44	PTB6	Entrada/Salida
Brújula SCL (I2C)	42	PTB7	Salida
Brújula SDA (I2C)	44	PTB6	Entrada/Salida
PresenciaAgua1	46	PTG0	Entrada
PresenciaAgua2	48	PTG1	Entrada
AD1 (Analógica)	20	PTF1	Entrada
AD2 (Analógica)	41	PTF2	Entrada
AD3 (Analógica)	43	PTF3	Entrada
AD4 (Analógica)	45	PTF4	Entrada
Nivel_Bat (Analógica)	47	PTF5	Entrada

Conección de los actuadores.

Una vez planificadas las conexiones, se desarrolló el diseño del PCB. Se decidió que la manera más conveniente de distribuir la señal a los actuadores era mediante conexiones por RJ45 y cable de red *Ethernet*. El conector disponible en el mercado es el que se puede observar en la Figura 4.32.



Figura 4.32 Conector hembra de RJ45 para PCB.

Se buscó la forma de que la alimentación fuera versátil, de manera que se planteó la colocación de un *jumper* para la selección de alimentación: Interna o externa (Ver Figura 4.33).

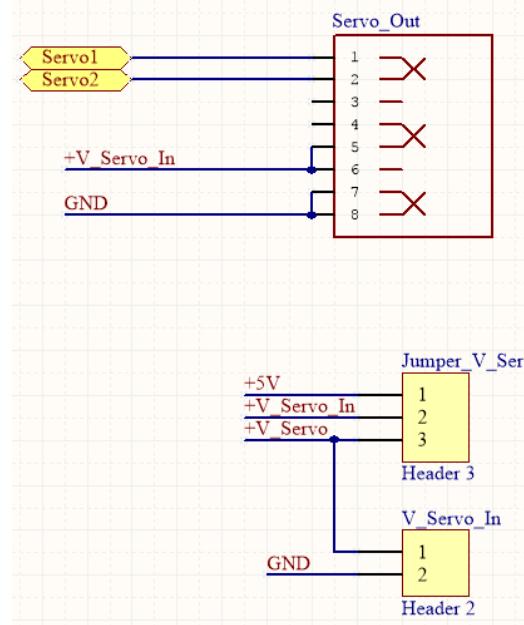


Figura 4.33 Conexión para servos y selección de fuente de alimentación.

A través de la colocación del *jumper* en los pines entre los pines 1 y 2 se selecciona la alimentación provista por la tarjeta de distribución de potencia. Con los pines 2 y 3 se selecciona una alimentación externa a través del conector de dos pines.

En cuanto a las salidas PWM de los motores y luces LED, se planteó la siguiente configuración (Ver Figura 4.34).

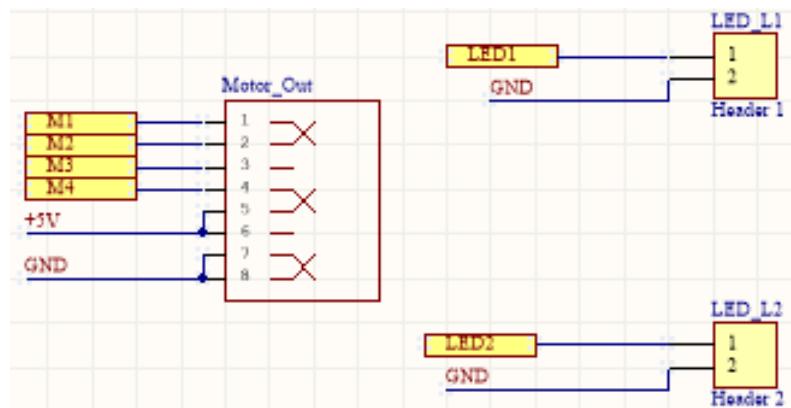


Figura 4.34 Diagrama de conexión de señales para ESC y luces LED.

Hay que recordar que la alimentación de los ESC debe hacerse de manera cuidadosa por la gran cantidad de potencia que utilizan. Esto se realiza de manera externa.

Capas de Tarjeta de Adquisición.

La tarjeta resultante tiene dimensiones de 9.31 cm x 5.39 cm. Observe en la Figura 4.35 la capa superior en rojo y en la Figura 4.36 la capa inferior en azul.

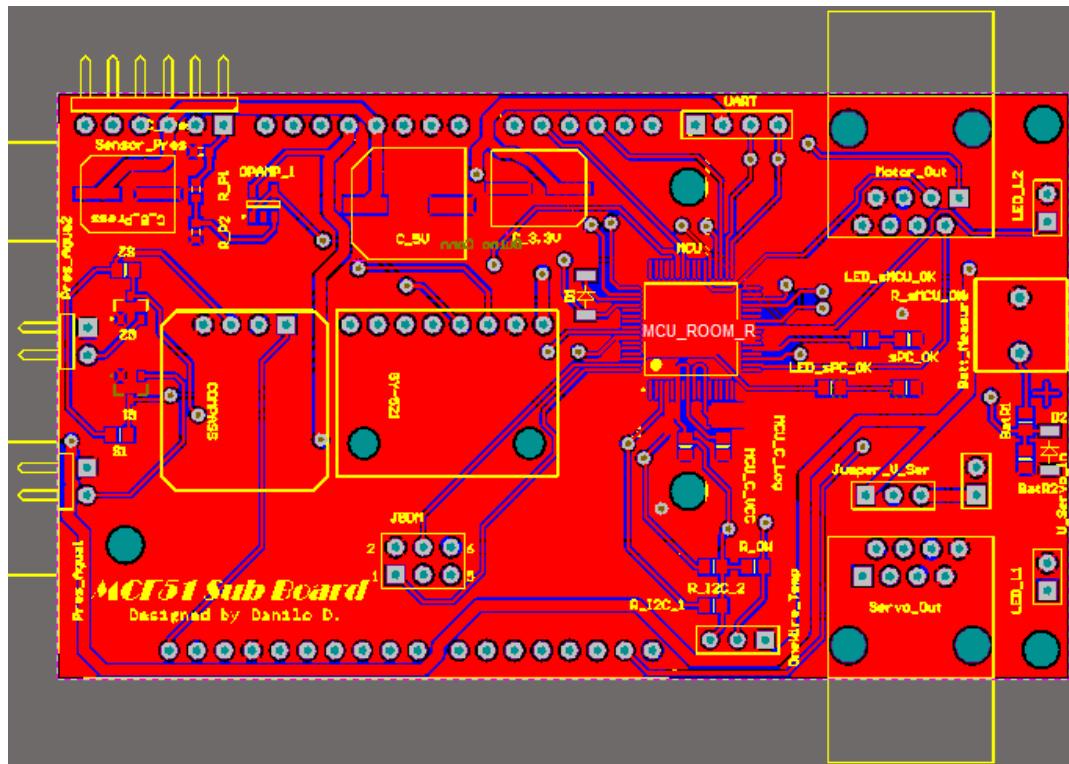


Figura 4.35 Vista de capa superior de tarjeta de adquisición.

Se buscó estandarizar las pistas de alimentación (basado en las reglas de diseño previamente establecidas en este trabajo) en 40 mils (0.10 cm).

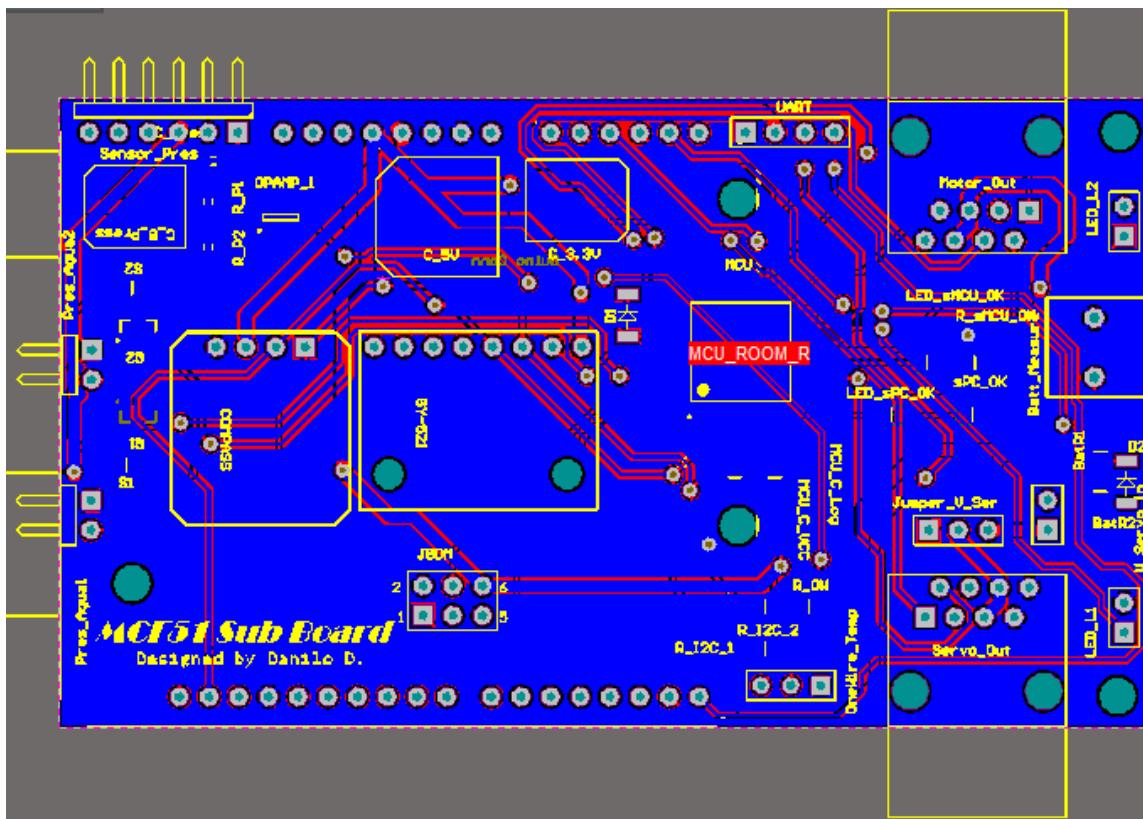


Figura 4.36 Vista de capa inferior de tarjeta de adquisición.

Se colocaron pines auxiliares para hacer *debugging* del firmware por puerto UART. Esto con el estándar del conocido transmisor inalámbrico XBEE con su tarjeta de distribución de pines (Ver Figura 4.37).

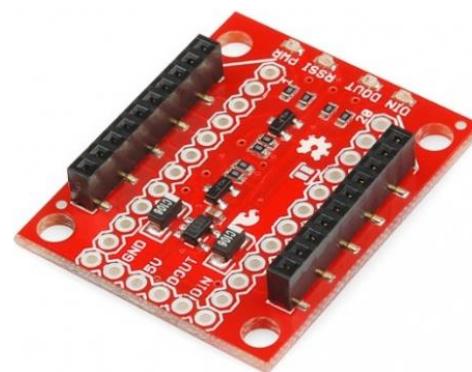


Figura 4.37 Tarjeta de distribución de pines para XBEE.

En la Figura 4.38 se puede observar una vista frontal de un modelo 3D de la tarjeta.

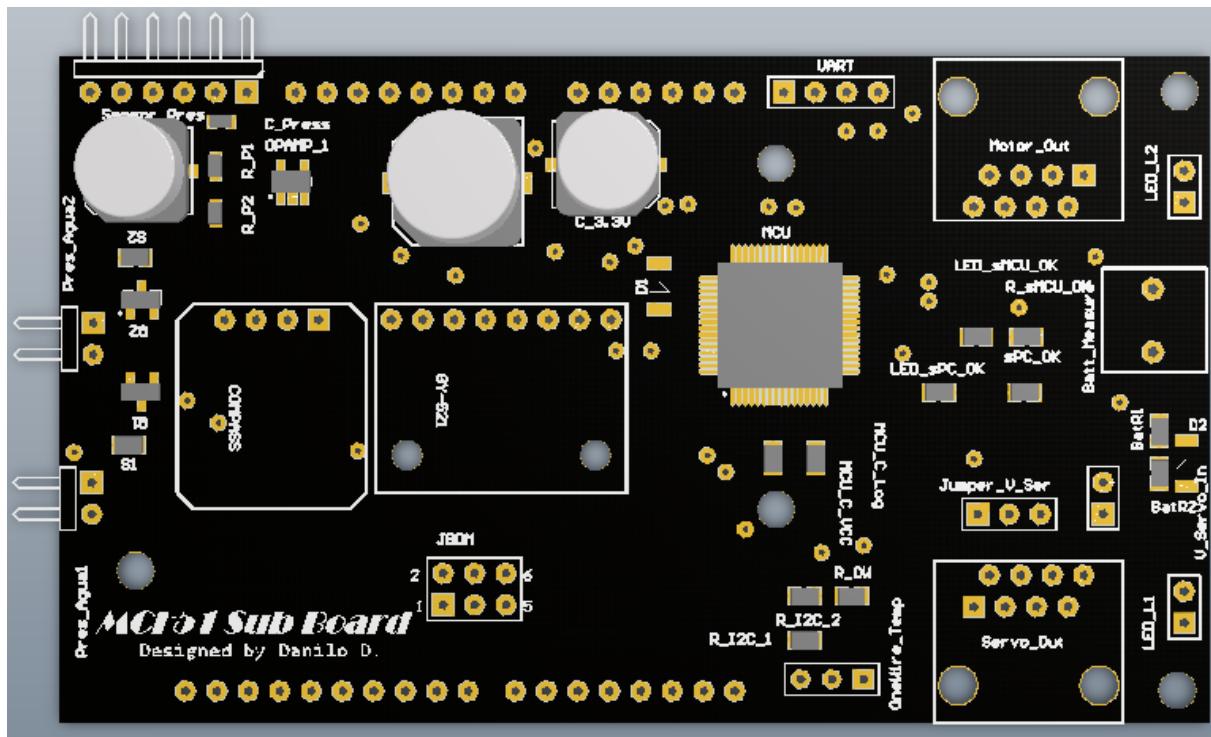


Figura 4.38 Vista frontal de modelo 3D de tarjeta de adquisición.

En la parte inferior no se colocaron componentes, buscando simplificación en el diseño, además de disminuir el número de vías (conexiones entre capas). Puede ver una vista 3D de la parte inferior de la tarjeta en la Figura 4.39.

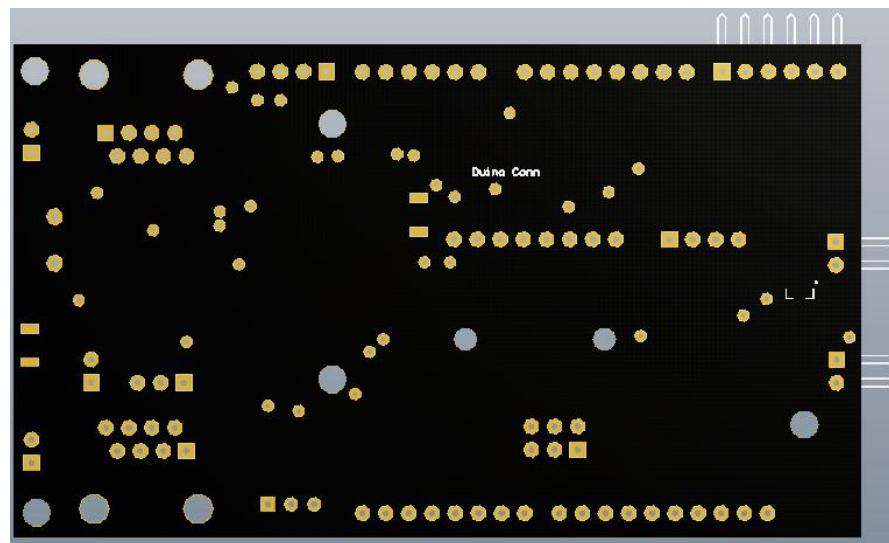


Figura 4.39 Vista posterior de modelo 3D de tarjeta de adquisición.

Y una vista isométrica en la Figura 4.40.

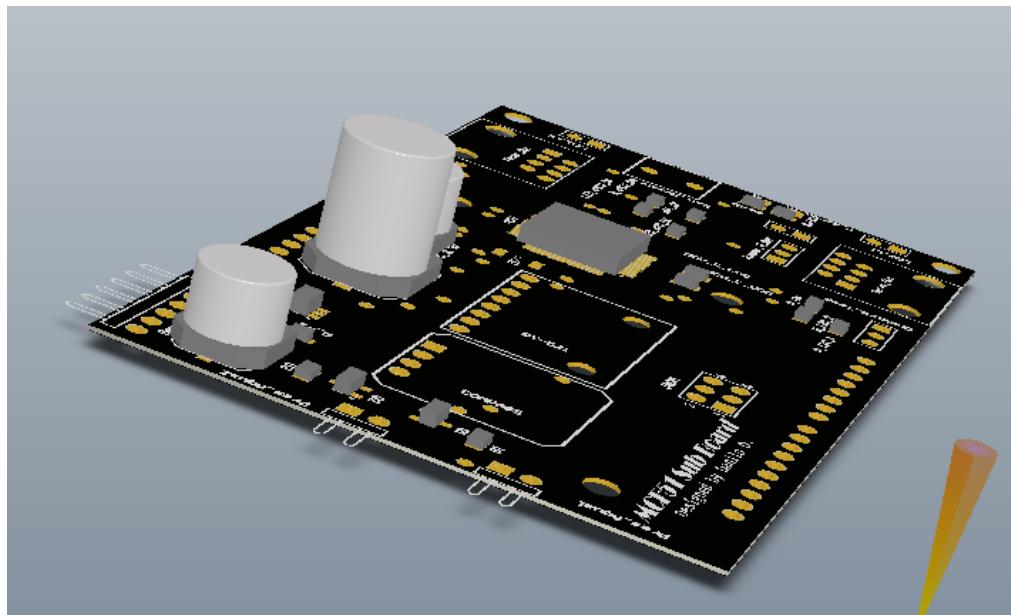


Figura 4.40 Vista Isométrica de modelo 3D de tarjeta de adquisición.

Componentes de la tarjeta.

En la Tabla 4.5 se pueden observar los componentes de la tarjeta de adquisición.

Tabla 4.5 Componentes de tarjeta de adquisición.

Nombre	Footprint	Cantidad
BatR1, BatR2, R_OW, R_sMCU_OK, S1, S2, sPC_OK	6-0805_L	7
Batt_Measure	5.08mm 200 mil Screw Terminal SF	1
COMPASS	HMC6352_SF	1
C_3.3V, C_5_Press	Capacitor S Panasonic	2

C_5V	C Panasonic Size Cap Pol	1
C_Press	J1-0603	1
D1	miniMELF	1
D2	miniMELF	1
Duino Conn	UNO_R3_SHIELD_NOLABELS	1
GY-521	GY-521	1
JBDM	HDR2X3	1
Jumper_V_Ser	HDR1X3	1
LED_L1	HDR1X2	1
LED_L2, V_Servo_In	HDR1X2	2
LED_sMCU_OK, LED_sPC_OK	6-0805_L	2
MCU MCF51QE128	840F-02_N	1
MCU_C_Log, MCU_C_VCC	6-0805_L	2
Motor_Out, Servo_Out	RJ45-8	2
OneWire_Temp	HDR1X3	1
OPAMP_1	TI-DBV5_N	1
Pres_Agua1, Pres_Agua2	HDR1X2H	2
Q1, Q2	SOT-23B_L	2
R_I2C_1 (10 K), R_I2C_2(10 K)	6-0805_L	2
R_P1, R_P2	J1-0603	2
Sensor_Pres	HDR1X6H	1
UART	HDR1X4	1

Distribución mecánica.

Para comprobar que las dimensiones de las tarjetas diseñadas estuvieran correctas y que cada una de ellas encajara según el diseño se decidió realizar un renderizado en el entorno 123D® de los modelos 3D. Se puede ver una vista isométrica en la Figura 4.41.

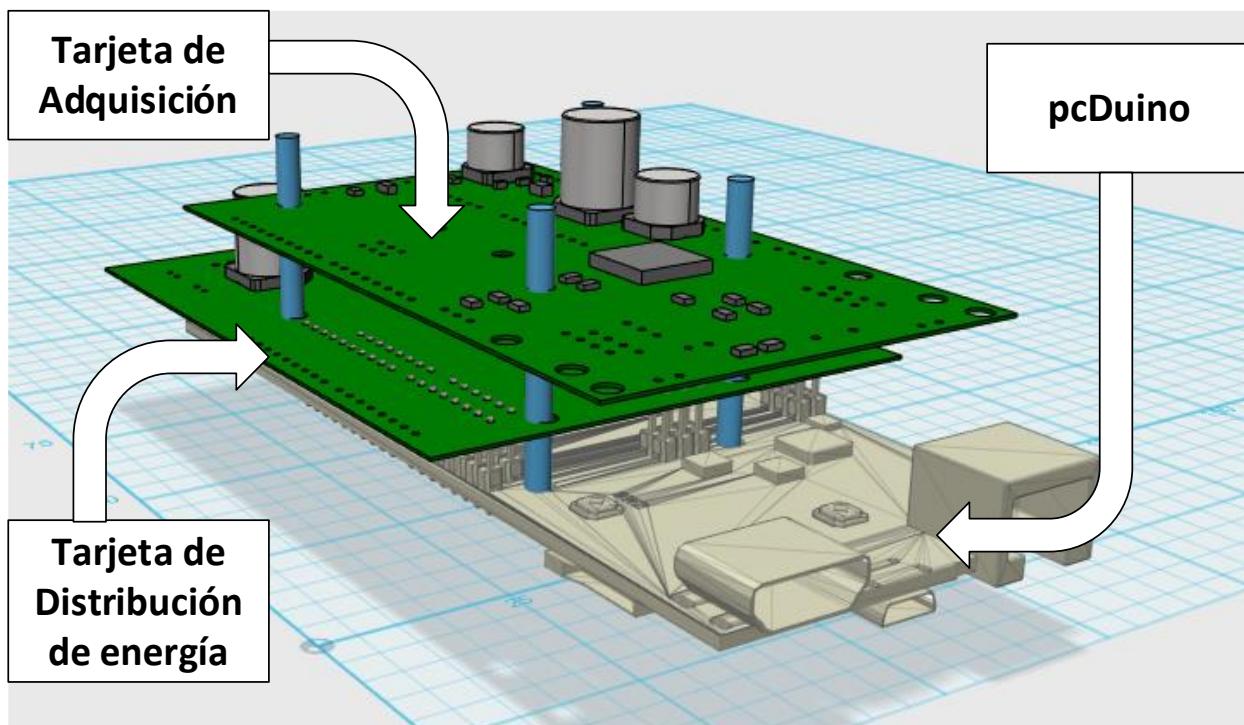


Figura 4.41 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista isométrica.

En la Figura 4.42 se pueden detallar los separadores azules. Estos permiten ver si la disposición de los agujeros es correcta.

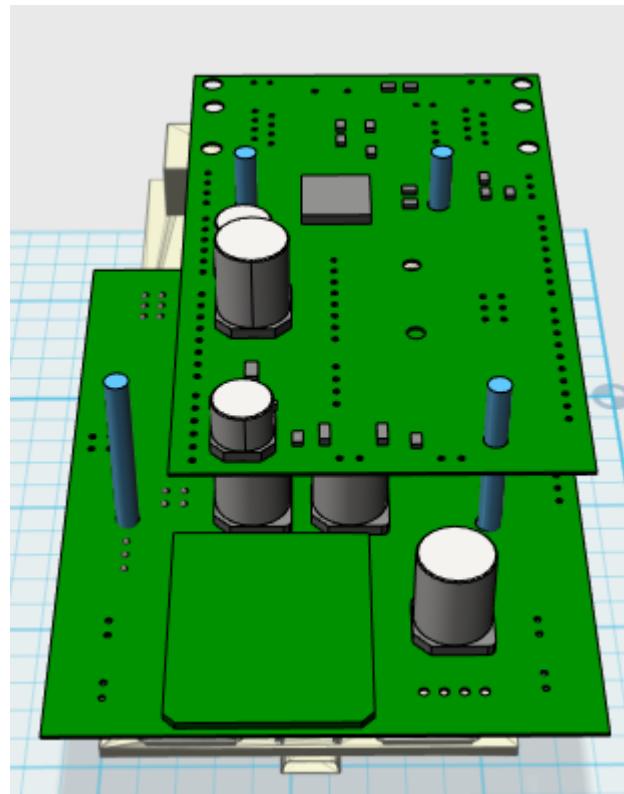


Figura 4.42 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista de etapa de potencia.

La Figura 4.43 permite detallar la coincidencia de los pines del pcDuino y los *pads* de la tarjeta de distribución de potencia.

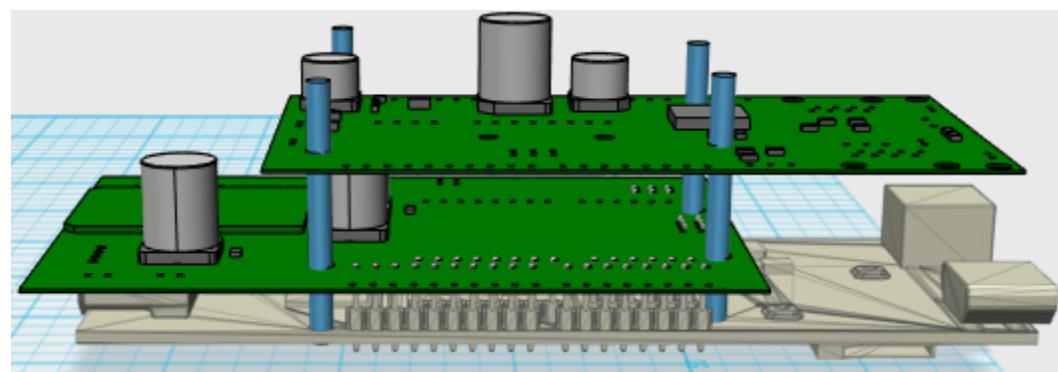


Figura 4.43 Renderizado de modelos de tarjeta. Vista lateral.

Todo este proceso apunta a que los diseños están listos para fabricación.

4.2. Fabricación.

Para la fabricación de las tarjetas, se debieron generar una serie de archivos que permiten a la Protomat S62 realizar las acciones necesarias sobre el cobre de la baquelita. Estos archivos son llamados archivos *Gerber*.

4.2.1. Extrusión en la Protomat S62.

El método de generación de estos archivos se realizó según las especificaciones del ingeniero Erick Argüello. Él administra la máquina y, en conjunto con el profesor Guillermo Villegas, asesoran en el proceso de fabricación. En la Figura 4.44 se puede observar cómo se dispusieron las tarjetas en el software de la máquina. Cabe destacar que se colocaron de esa forma para utilizar una baquelita de desperdicio. Esto disminuye los gastos que corren por el Laboratorio C.

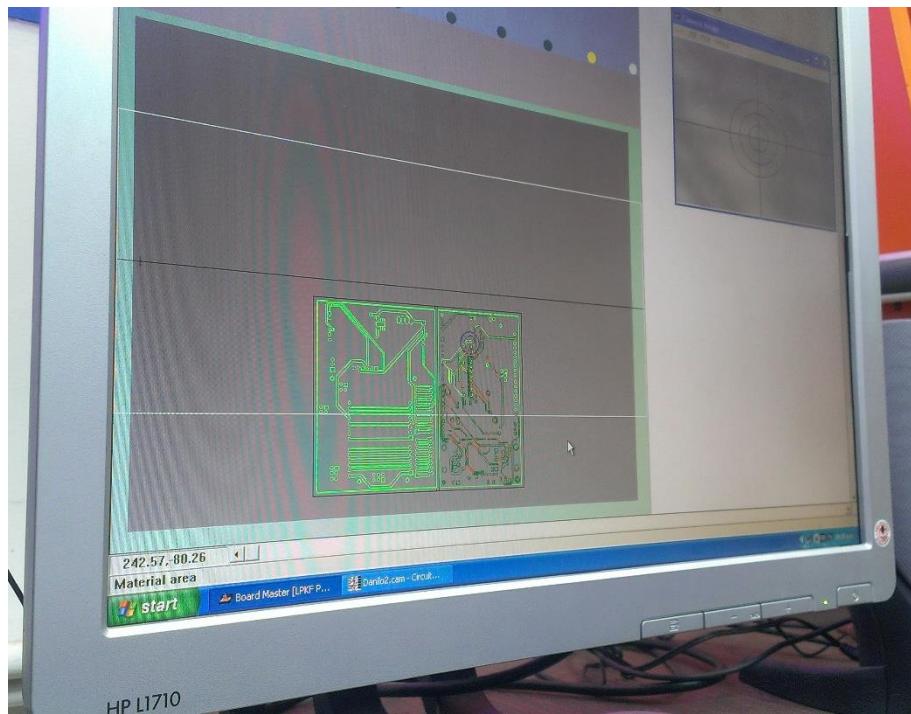


Figura 4.44 Disposición de las tarjetas en la baquelita a utilizar en el proceso de fabricación.

Este diseño también toma en cuenta la optimización de los recursos de la máquina como el corte a través de fresado. Se buscaron unir las tarjetas en el borde para no gastar la broca de corte. Esto mediante el paso de la broca cortando en la intersección de las tarjetas una sola vez.

Al suministrarle los archivos, la máquina procede a realizar los cortes necesarios. En la Figura 4.45 se puede ver a la máquina realizando extrusión del cobre de la baquelita.

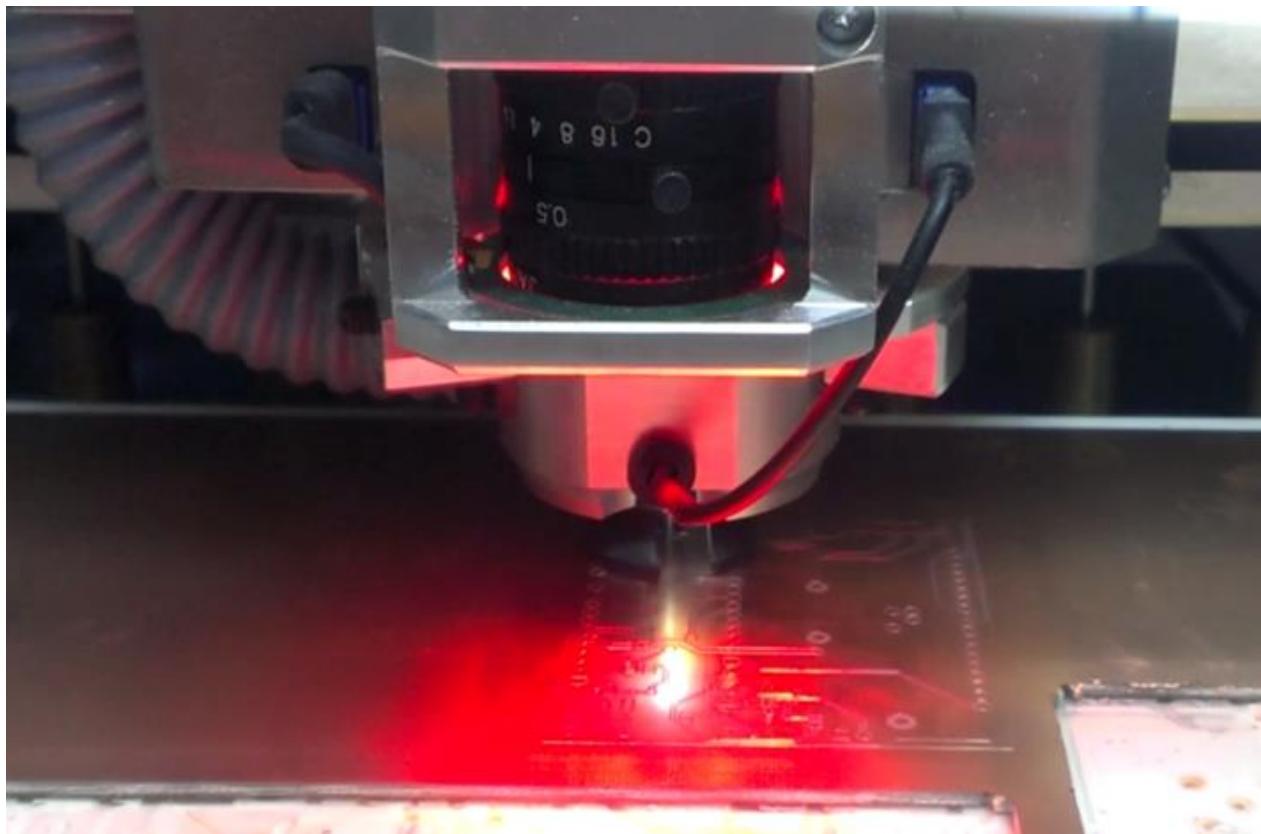


Figura 4.45 Protomat S62 realizando extrusión de cobre.

El resultado se puede apreciar en la Figura 4.46, la máquina produjo dos PCB de calidad y fieles al diseño estipulado.

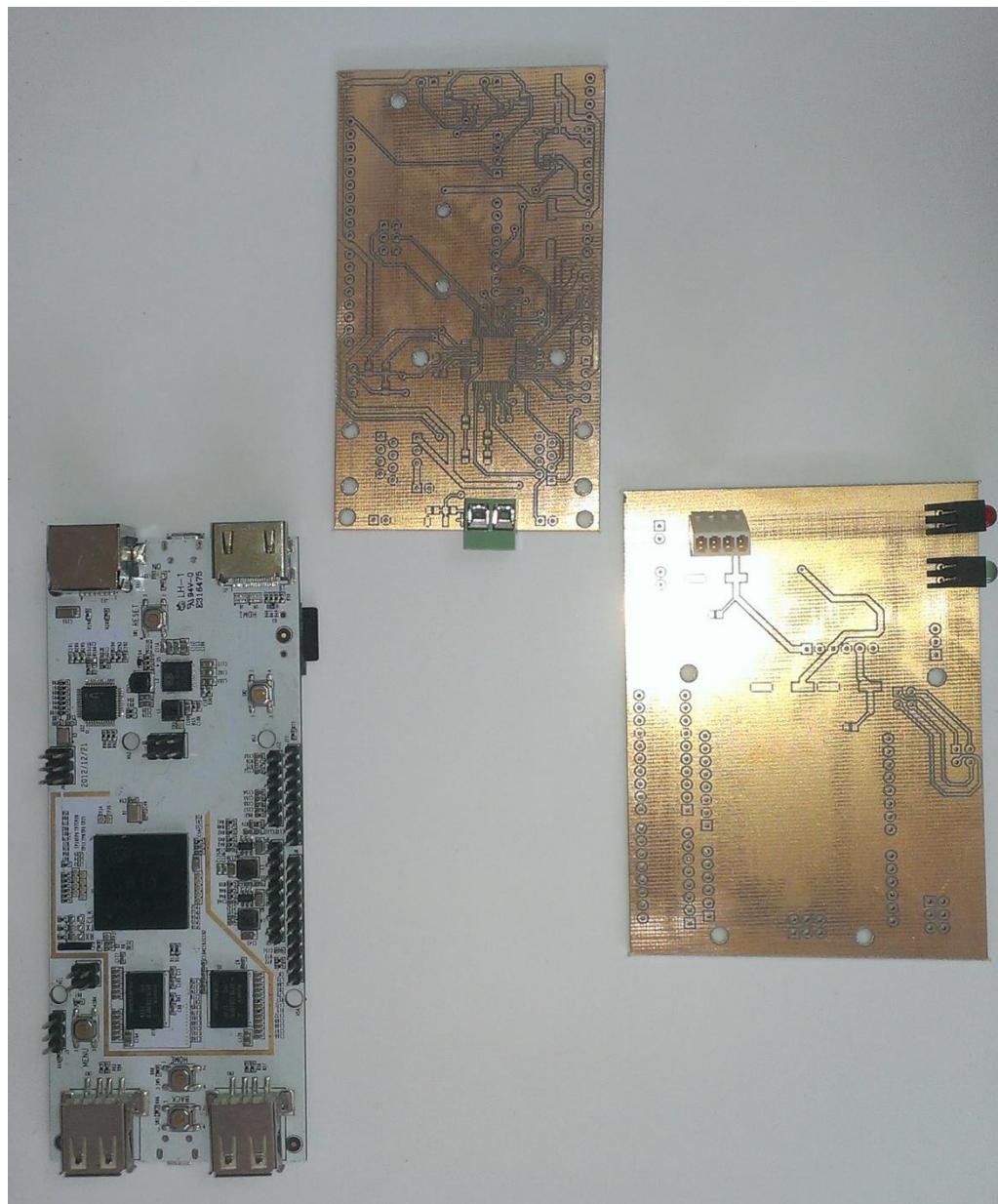


Figura 4.46 PCB fabricado en la Protomat S62 y el pcDuino.

4.2.2. Soldadura de componentes.

Una vez obtenido el PCB en bruto, se debe limpiar con mucho cuidado con alcohol y lijar suavemente para eliminar la capa más superficial de cobre. Esto es para que el estaño se adhiera más fácil.

Para la protección de las pistas, se “estaña” toda la superficie del PCB. Esto se realiza aplicando pasta para soldar y estaño de manera juiciosa sobre el cobre. Es importante no excederse en la cantidad de estaño para mantener un acabado profesional.

Una vez estañados los PCB, se procede a realizar la soldadura. Es recomendable empezar por los de mayor cantidad. En este caso el microcontrolador. Por comodidad, es recomendable tener a mano una lista de los componentes y los componentes clasificados. Esto permite optimizar el tiempo de soldadura.

Como este diseño contempla el uso de componentes de soldadura superficial, se tuvo que aprender una técnica desarrollada por el profesor Guillermo Villegas. Esta consiste en fijar el componente y después movilizarlo hasta su lugar. Esto permite crear una buena conexión entre los *pads* del componente y los terminales de éste, siempre recordando utilizar pasta de soldar o resina para las conexiones. En la Figura 4.47 se puede observar un ejemplo de cómo quedaron las soldaduras.

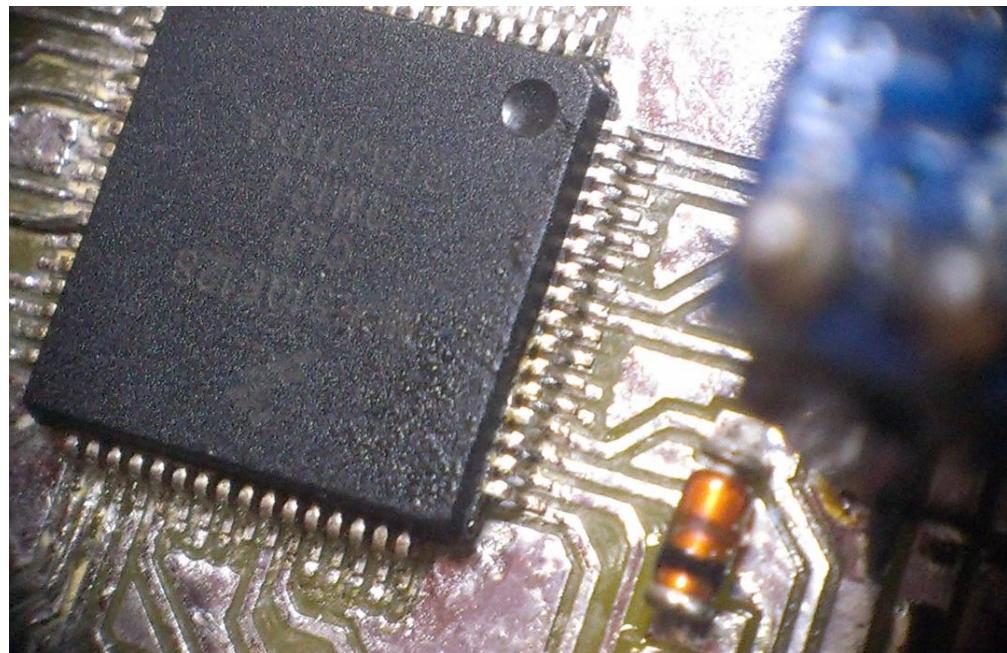


Figura 4.47 Acercamiento a la soldadura del MCU y el diodo 1N4148.

Una vez que se soldaron todos los componentes y se armaron las tarjetas en conjunto, se obtuvieron las tarjetas que se pueden apreciar en la Figura 4.48.

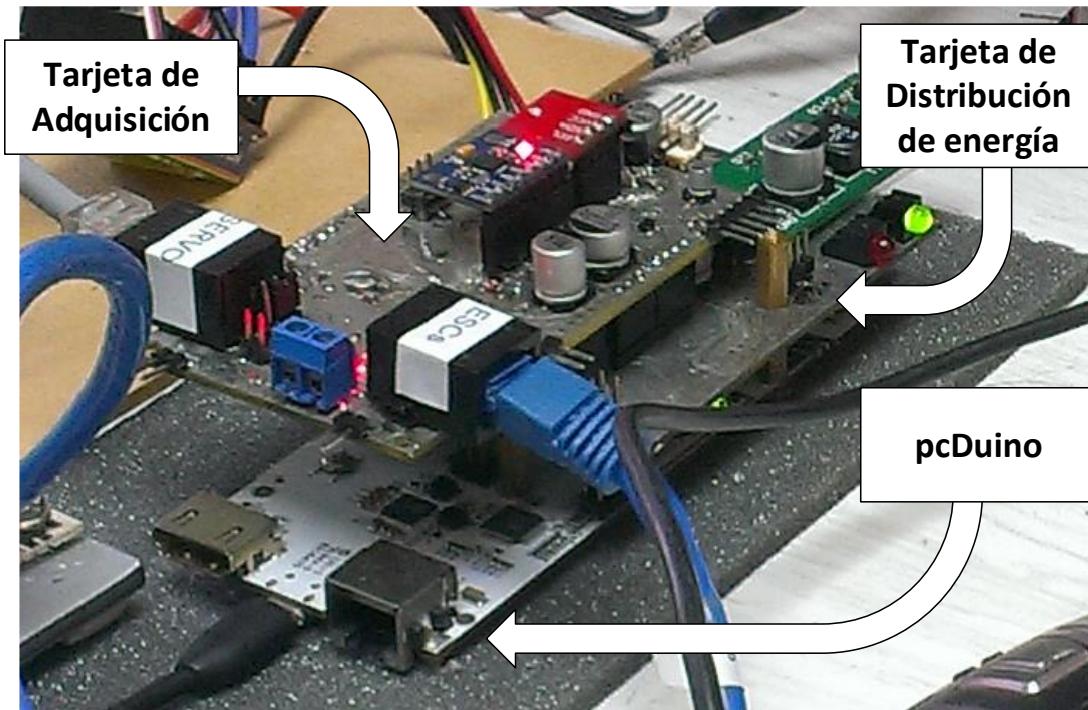


Figura 4.48 Tarjetas de adquisición y distribución integradas con el pcDuino.

4.3. Desarrollo de firmware

El desarrollo del firmware se realizó tomando en cuenta dos ejes principales:

- Sencillez de diseño (fácil de entender).
- Modularidad.

A continuación, se describirán las distintas partes desarrolladas en el firmware del MCU.

4.3.1. Adquisición de ángulo con respecto al norte.

Para obtener el ángulo con respecto al norte magnético de la brújula electrónica HMC6352, se realizó lo mencionado en la Figura 4.49. Este valor va desde 0° hasta 360° con pasos de $0,1^\circ$.

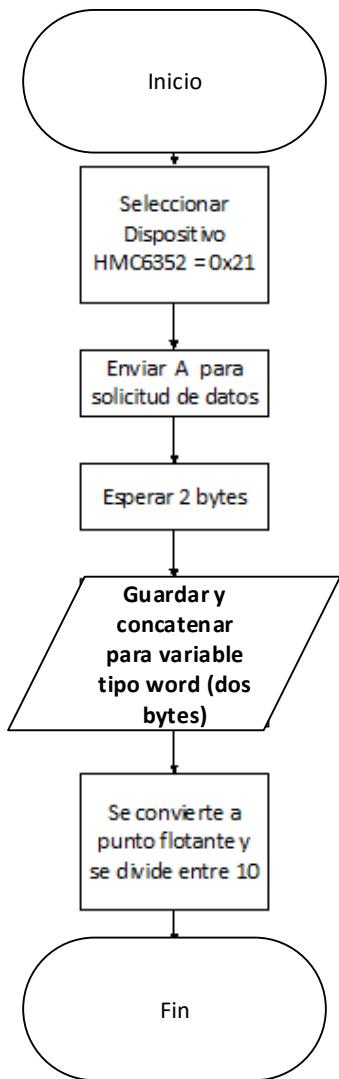


Figura 4.49 Diagrama para obtener ángulo con respecto al norte con brújula electrónica HMC6352.

4.3.2. Adquisición de datos de la IMU.

Para obtener los datos de la IMU, se realizó lo mencionado en la Figura 4.50 para inicializar el sensor.

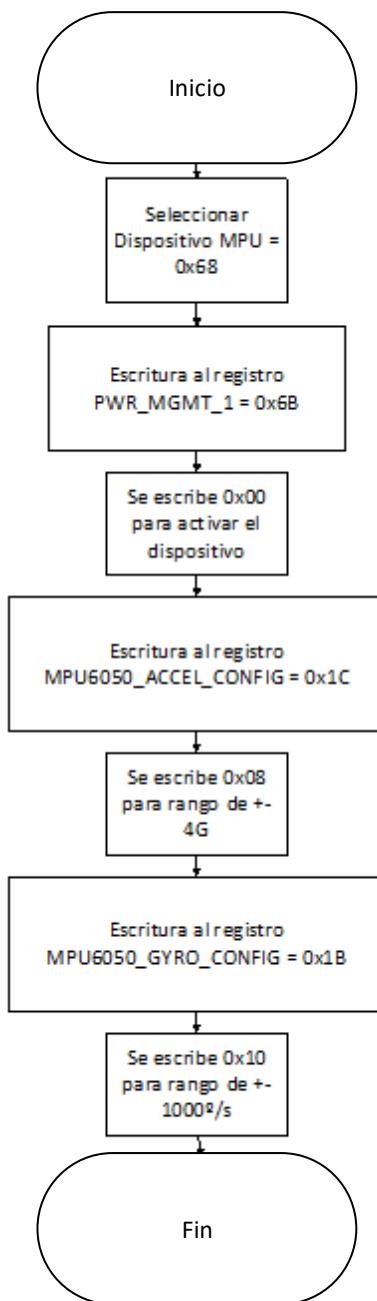


Figura 4.50 Inicialización de IMU.

Una vez realizados los pasos de inicialización, se realizan los pasos de la Figura 4.51 para obtener los valores de las variables físicas de interés.

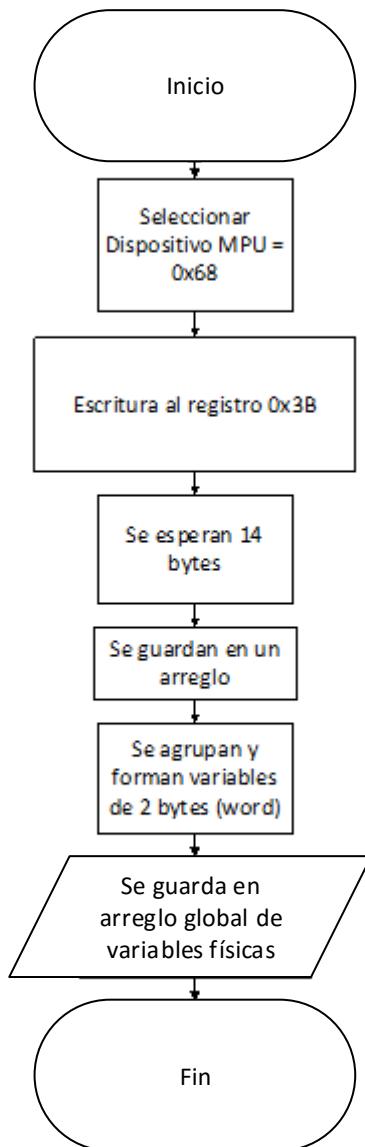


Figura 4.51 Obtención de datos de la IMU.

4.3.3. Adquisición de valores analógicos.

Para la obtención de valores analógicos a través de los ADC del MCU, se realizan los pasos que se indican en la Figura 4.52.

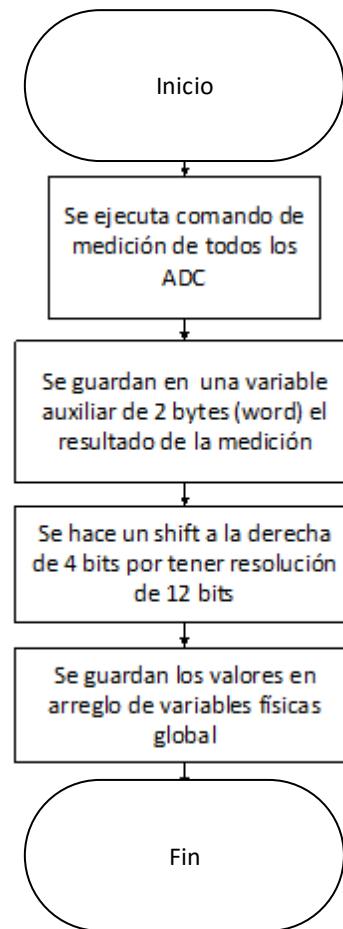


Figura 4.52 Pasos para medir con el ADC las variables físicas de interés.

4.3.4. Adquisición de temperatura externa.

Para activar el sensor de temperatura por 1-Wire, se realizaron los pasos de la Figura 4.53.

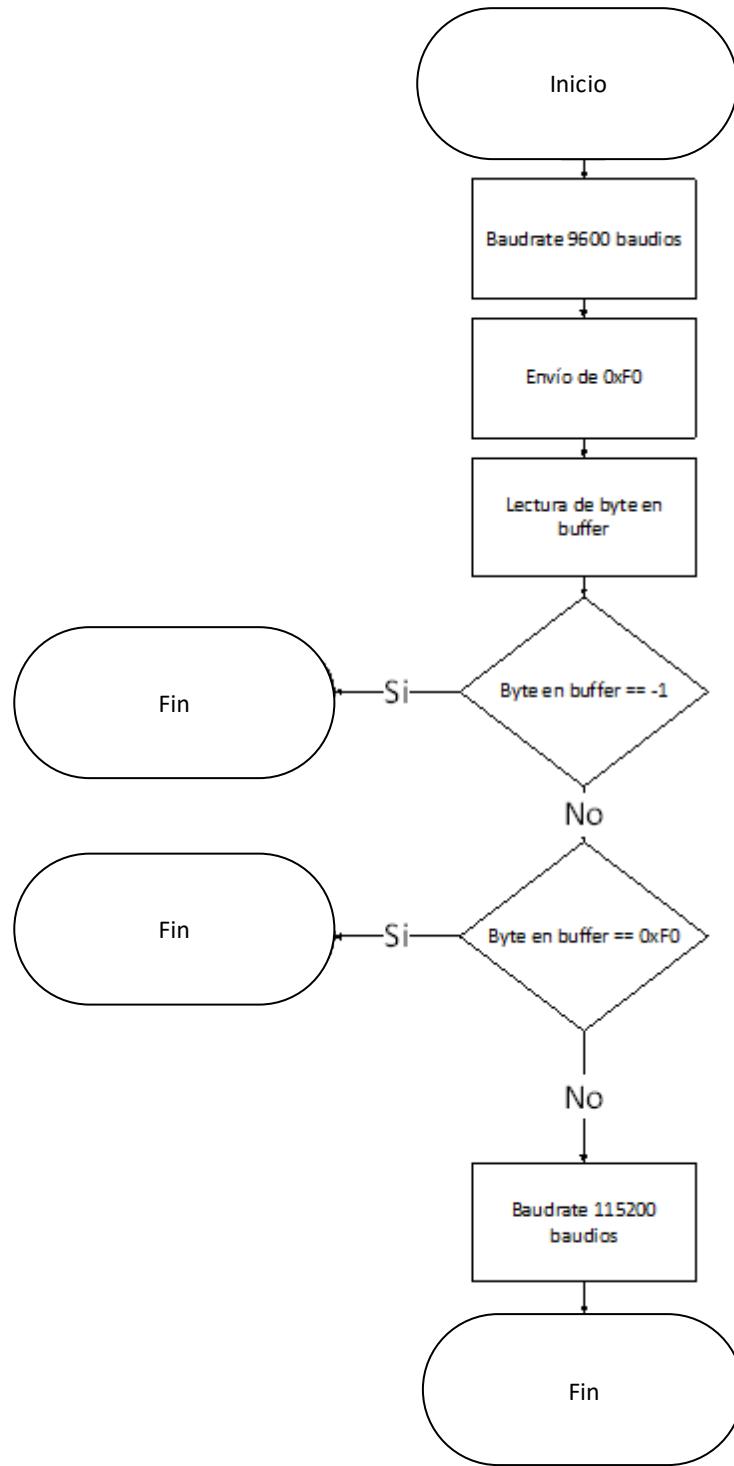


Figura 4.53 Pasos para activar dispositivo esclavo por 1-Wire.

Para la obtención de los bytes resultantes de la medición de temperatura se utilizó la librería de 1-Wire a UART realizada Z. Chi por [19]. En base a esta librería se realizaron los siguientes pasos para la obtención de la temperatura externa (Ver Figura 4.54).

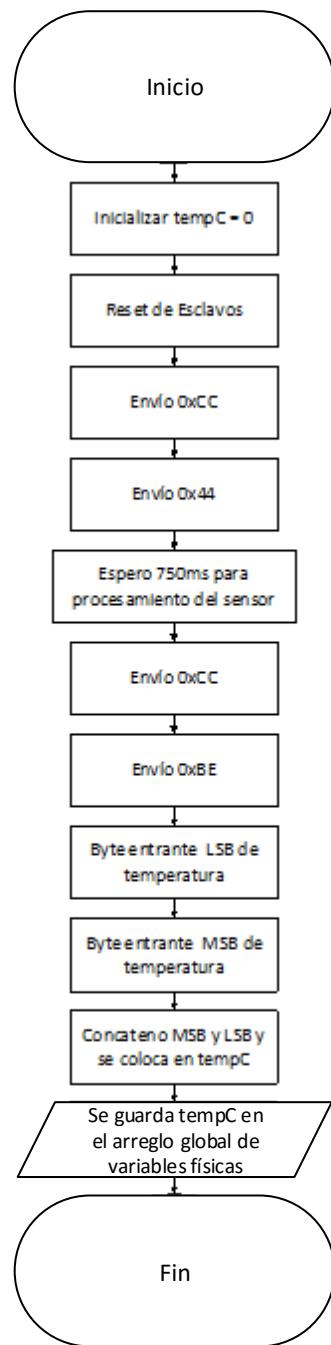


Figura 4.54 Pasos para obtener temperatura externa de sensor 1-Wire.

4.3.5. Adquisición de sensores de presencia de agua.

Para adquirir los sensores de presencia de agua, por ser los más simples de procesar, se ve el estado del pin asignado y se guarda en el arreglo global de variables físicas.

4.3.6. Manejo de Servos.

El manejo de servos está ampliamente documentado. La mayoría utiliza señales PWM a 50Hz como estándar. La Figura 4.55 muestra cómo se genera la señal para distintas posiciones del rotor del servo.

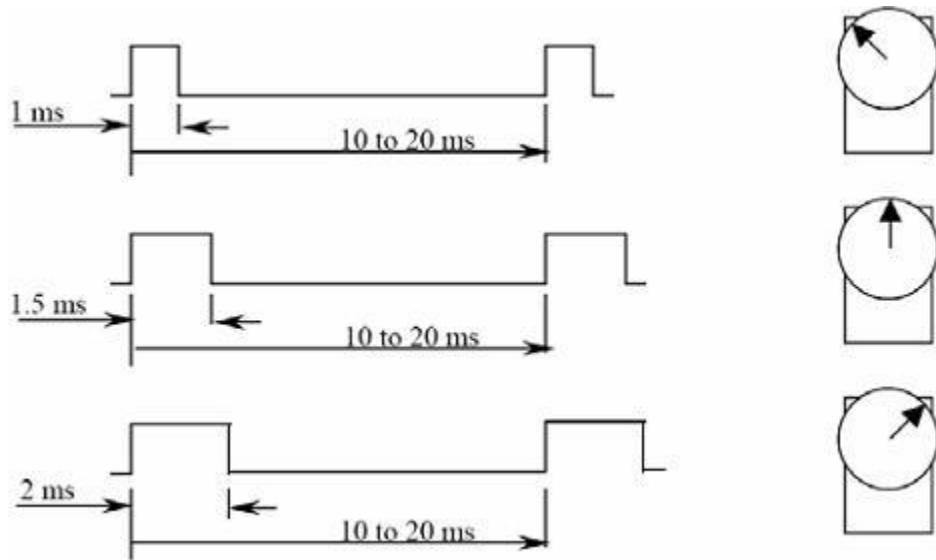


Figura 4.55 Señales para controlar un servo.

A continuación, puede ver la serie de pasos que se realizan en el MCU para controlar la posición rotacional de un servo. Se desarrollaron varias opciones. Entre ellas sólo cambia la resolución. Al final se decidió utilizar una resolución de 8 bits dado que facilita el procesamiento del byte recibido por puerto serial. Vea la Figura 4.56.

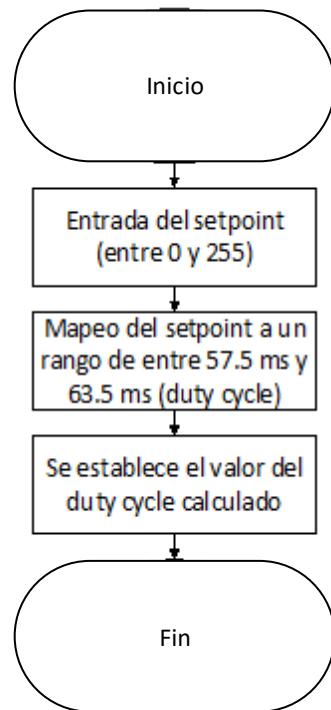


Figura 4.56 Configuración del *duty cycle* de la PWM para servo.

Los valores de mapeo del *setpoint* fueron ajustados de manera empírica hasta su correcto funcionamiento.

4.3.7. Manejo de ESC.

Si bien el uso de ESC para motores trifásicos sin escobillas está bastante extendido, encontrar las características de la señal PWM que debe manejar al ESC no es tarea fácil. Es por ello que se decidió replicar la señal que genera un receptor de radiofrecuencia disponible en el laboratorio (Ver Figura 4.57). Este receptor está diseñado para controlar distintos tipos de ESC y servos.



Figura 4.57 Receptor de radiofrecuencia utilizado para observar las señales de control para ESC.

Para obtener la señal del receptor de radio frecuencia, se colocó en el osciloscopio la salida del canal 3 (etiquetado como CH3). El receptor recibe una señal modulada emitida por un radiocontrol (ver Figura 4.58).



Figura 4.58 Radiocontrol utilizado para las pruebas.

Se capturaron los momentos en los que el radiocontrol se encontraba en neutro (ver Figura 4.59), avanzar (ver Figura 4.60) y retroceder (ver Figura 4.61) al máximo.

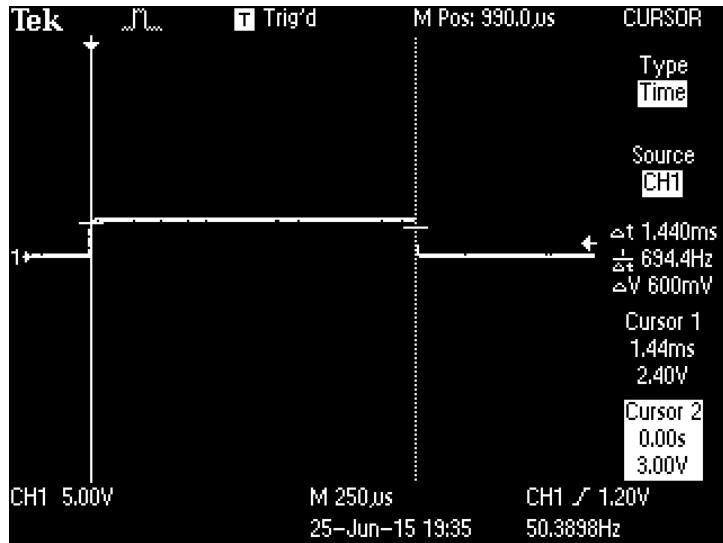


Figura 4.59 PWM del ESC Hobby King para estado neutro.

Se puede observar una frecuencia de $f = 50.39 \text{ Hz}$ (resulta un período $T = 19.8 \text{ ms}$). Esto implica que para estar en neutro, se debe generar una PWM con un *duty cycle* de $dc = 1.44 \text{ ms} / 19.8 \text{ ms} = 0.073$ es decir, de 7.3%.

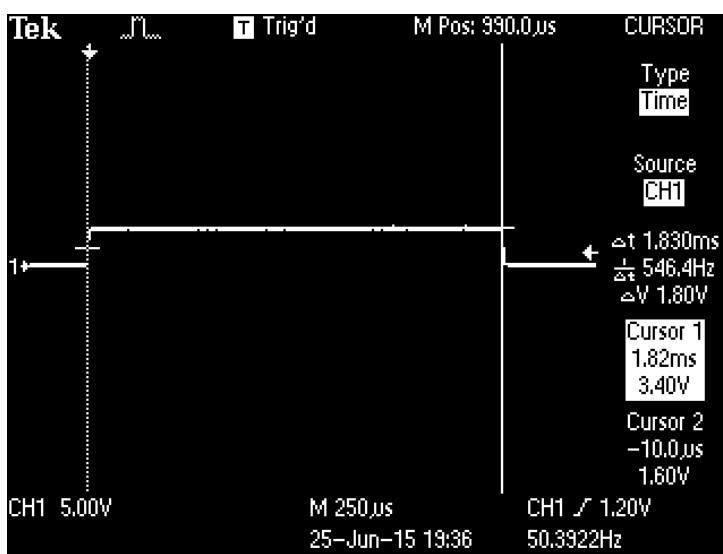


Figura 4.60 PWM del ESC Hobby King para avanzar.

Para avanzar $dc = 1.83 \text{ ms}/19.8 \text{ ms} = 0.0924$. Esto es 9.24%.

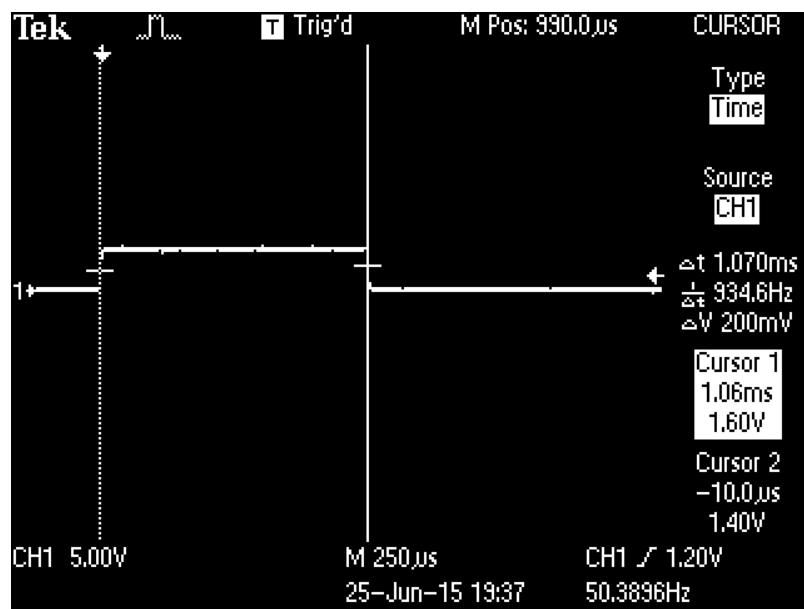


Figura 4.61 PWM del ESC Hobby King para retroceder.

Para retroceder $dc = 1.07 \text{ ms}/19.8 \text{ ms} = 0.054$. Esto es 5.4%.

En la Tabla 4.6 puede observar las características de la señal para el ESC Hobby King®.

Tabla 4.6 Características de señal de control para ESC Hobby King®.

	Período (ms)	Tiempo en alto (ms)	DC (%)
Neutro	19.8	1.44	7.23
Avanzar	19.8	1.83	9.24
Retroceder	19.8	1.07	5.40

Al encender el ESC es importante que, en su entrada, se tenga una señal con el *duty cycle* neutro por un tiempo cercano a los 3 segundos. Esto configura el “centro” o la referencia con la cual va a trabajar.

En la Figura 4.62 se puede observar las fases para inicializar el ESC Hobby King. Cabe destacar que se esperan 5 segundos por seguridad. El ESC emitirá 7 pitidos al estar configurado.

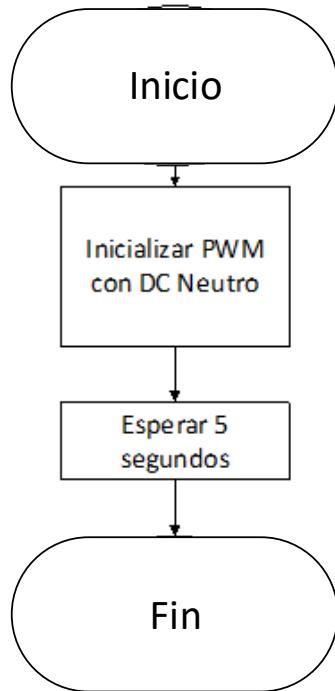


Figura 4.62 Fases para Inicializar ESC.

Si se desea utilizar el ESC ya configurado, se puede mapear el *duty cycle* entre el valor de neutro y avanzar (si se desea esa dirección de giro) o desde neutro a retroceder.

En el caso de que se desee utilizar el ESC Sky-Wing, el procedimiento es similar. En la Tabla 4.7 se puede observar las características de la señal a emitir. Cabe destacar que este ESC es unidireccional y, por lo tanto, sólo permite girar el motor en una sola dirección.

Tabla 4.7 Características de señal de control para ESC Sky-Wing.

	Período (ms)	Tiempo en alto (ms)	DC (%)
Neutro	19.8	1.07	5.40
Avanzar	19.8	1.83	9.24

El proceso de inicializar este ESC Sky-Wing es el mismo que el Hobby King (ver Figura 4.62).

4.3.8. Trama de datos UART.

Para la comunicación UART, se diseñó una trama de datos sencilla. Se utilizó el número hexadecimal 0xFF como byte de fin y, por ende, está prohibido. En la Tabla 4.8 se puede observar la trama de envío del MCU hacia la PC (en este caso, la pcDuino).

Tabla 4.8 Trama de envío de datos MCU – PC.

#	Descripción	#	Descripción
1	Estatus	15	Velocidad Angular X LSB
2	Temperatura Externa MSB	16	Velocidad Angular Y MSB
3	Temperatura Externa LSB	17	Velocidad Angular Y LSB
4	Temperatura Interna MSB	18	Velocidad Angular Z MSB
5	Temperatura Interna LSB	19	Velocidad Angular Z LSB
6	Presión Relativa MSB	20	Velocidad Lineal MSB
7	Presión Relativa LSB	21	Velocidad Lineal LSB
8	Aceleración X MSB	22	Ángulo Brújula MSB
9	Aceleración X LSB	23	Ángulo Brújula LSB
10	Aceleración Y MSB	24	Presencia de Agua
11	Aceleración Y LSB	25	Nivel de baterías
12	Aceleración Z MSB	26	XOR
13	Aceleración Z LSB	27	Fin de trama (0xFF)
14	Velocidad Angular X MSB		

Es importante destacar que en este caso MSB significa *Most Significant Byte* o Byte más significativo y LSB *Less Significant Byte* o Byte menos significativo.

El byte de XOR consiste en realizar la operación de OR exclusivo (bit a bit) del byte 1 al 25. Esto permite (en primera aproximación), conocer si la trama llegó correctamente.

En cuanto a la recepción de comandos desde el PC al MCU, se tiene la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Trama de recepción de datos PC – MCU.

#	Descripción
1	Velocidad de Motor 1
2	Velocidad de Motor 2
3	Velocidad de Motor 3
4	Velocidad de Motor 4
5	Ángulo de servo <i>tilt</i>
6	Ángulo de servo <i>pan</i>
7	PWM Led 1
8	PWM Led 2
9	Estatus PC
10	Fin de Trama (0xFF)

4.3.9. Flujo general del firmware.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que muestra el funcionamiento del firmware. Cabe destacar que la versión final fue simplificada para objeto de este trabajo (ver Figura 4.63).

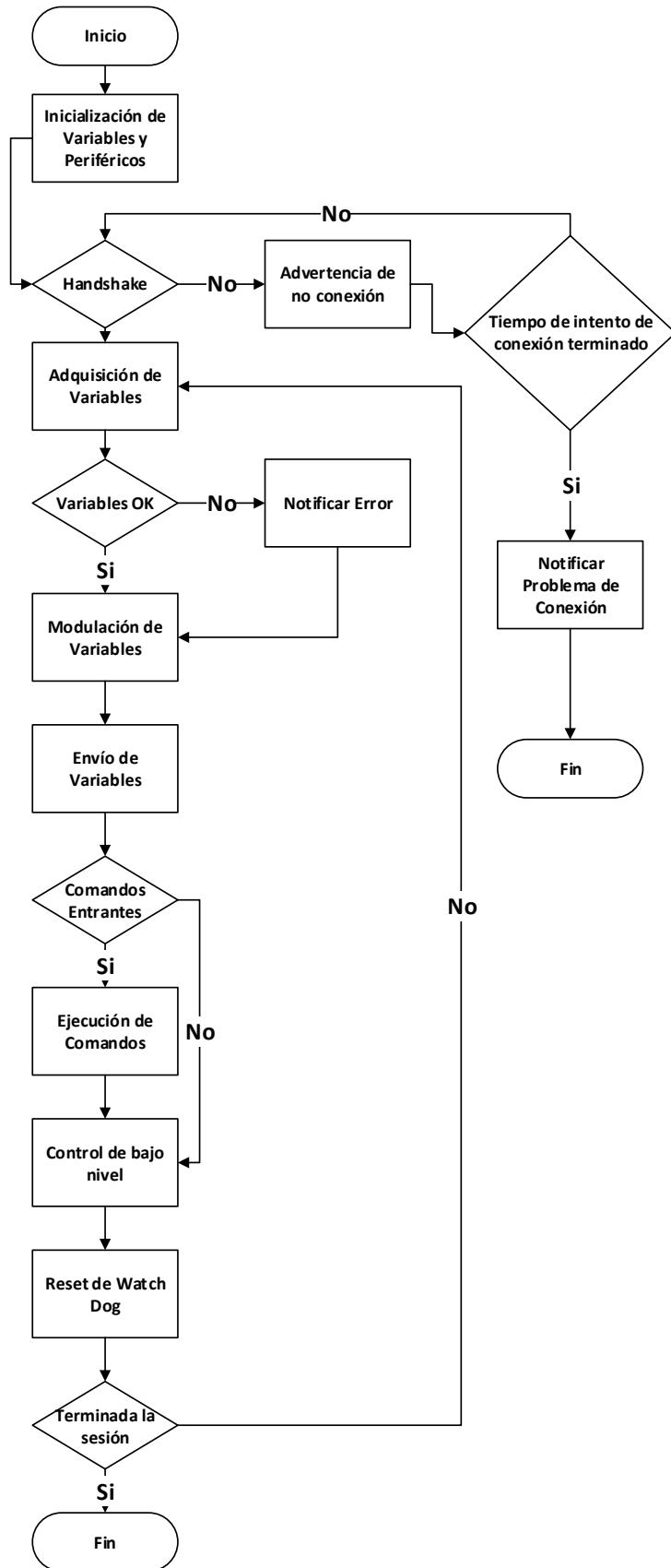


Figura 4.63 Flujo general del firmware.

4.4. Uso De Computador A Bordo pcDuino

Para utilizar el computador a bordo pcDuino, se debió instalar Lubuntu 12.04 (distribución de Linux) para posible implementación de ROS (*Robot Operative System*) a futuro. Dado que no es conveniente tener que acoplar una pantalla con HDMI al pcDuino, se debió encontrar una forma de comunicar la PC desde donde se va a tener acceso y el pcDuino. Esto se realizó a través de la consola serial y de SSH (*Secure Shell*, en español: intérprete de órdenes segura). Para obtener acceso a la interfaz gráfica (GUI), fue necesaria la instalación de *Putty* como cliente de SSH acoplado con *Xming*, que permite utilizar el SSH como puente para obtener la GUI del SO.

En Lubuntu, se procedió a realizar un script que mantiene el MAC *Address* fijo, ya que, por defecto, cada vez que inicia la pcDuino, este cambia. Éste MAC *Address* fijo permite que el *router* o enrutador de la red local le asigne un IP fijo, lo que facilita la conexión periódica al pcDuino. Una vez realizado el script, se realizó la instalación de los siguientes paquetes:

- *Nano*: Editor de texto.
- *Nautilus*: Permite la conexión con *Xming* para transmisión de GUI por SSH.

La conexión inicial con el pcDuino se realizó mediante un cable FTDI, que se conectó al TX y RX, a 115200 baudios en el puerto de “*Debugging*”, a través del cual se accedió a la consola.

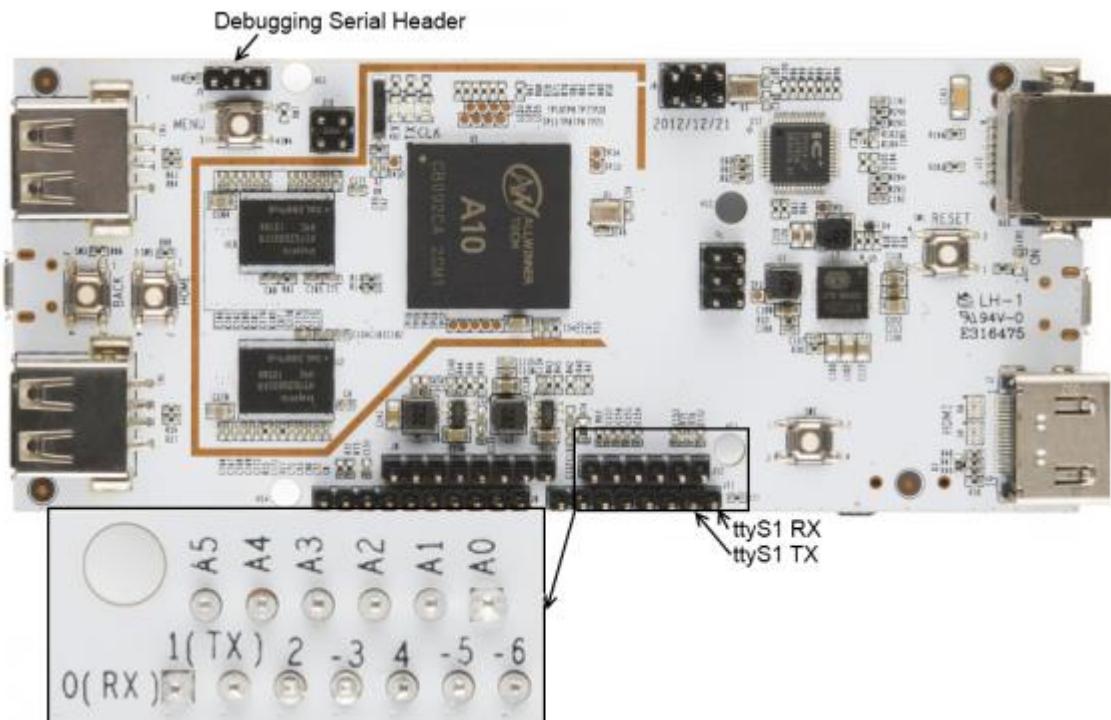


Figura 4.64 Pines de puerto serial

Como se puede observar en la Figura 4.64, el pcDuino trae dos puertos UART, uno de ellos es para acceder a la consola de Linux y otro para comunicación. Se pueden utilizar los demás pines creando puertos UART por software.

Cabe destacar que esta versión de pcDuino, se debe instalar el SO en una tarjeta de memoria. La única disponible era de 8 GB de capacidad de almacenamiento. Esto hizo que se tuvieran que desinstalar paquetes como el Python 3.2.

En la Figura 4.65 se puede observar lo que realiza la pcDuino al momento de encender.

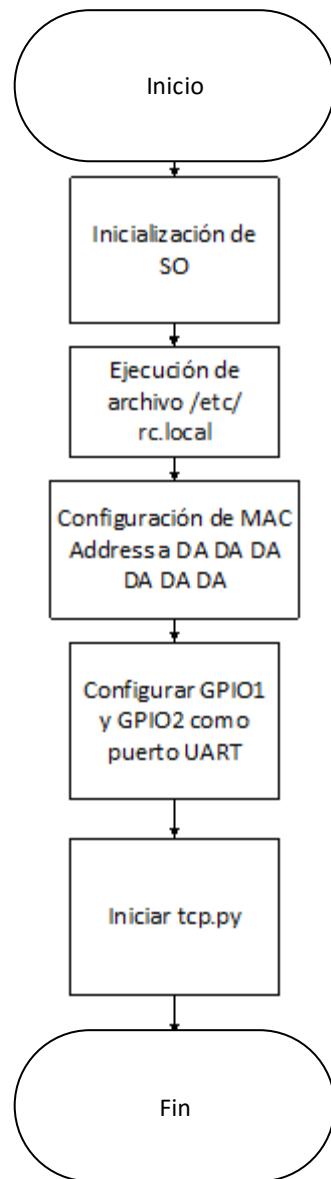


Figura 4.65 Diagrama de Flujo de funcionamiento de pcDuino.

El archivo `tcp.py` mencionado, dispone de un programa realizado en Python 2.7 y resulta en la interfaz pcDuino – MCU a través del protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol*).

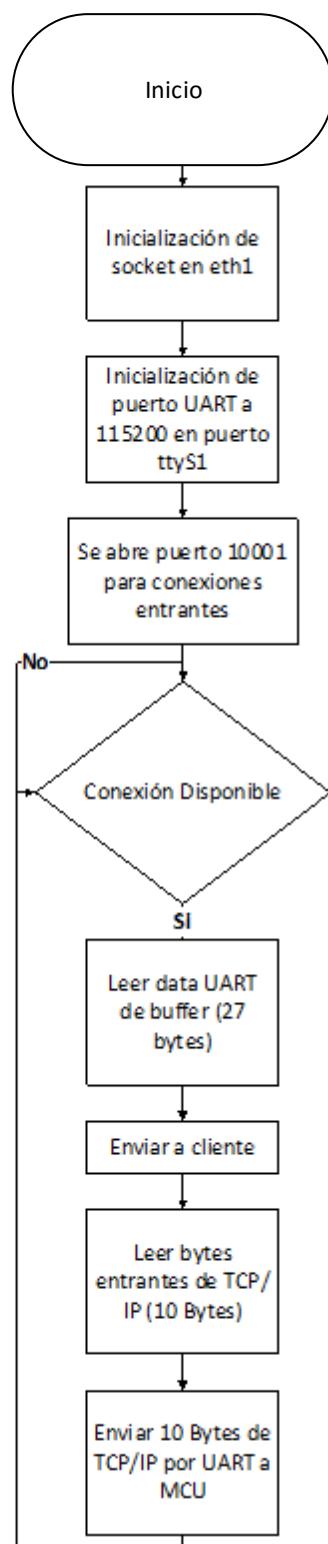


Figura 4.66 Diagrama de flujo de conexión por protocolo TCP/IP.

4.5. Diseño de interfaz gráfica.

La primera opción para realizar la interfaz gráfica fue utilizar Python. Python es un lenguaje de alto nivel muy útil para resolver problemas que requieran un alto grado de abstracción. Esta ventaja trae como consecuencia que el manejo de bits a bajo nivel sea tedioso y laborioso.

La segunda opción fue la de utilizar LabView® dado que es ampliamente usado para la creación de interfaces de instrumentos virtuales. La programación gráfica y los problemas al utilizar el VISA *Driver* (driver utilizado para el manejo de puerto serial), hicieron que la realización de la interfaz no fuera viable.

De tercera opción se utilizó Simulink® de Matlab® dado que se había realizado con anterioridad la prueba de los sensores que se comunican por I2C con el MCU Arduino Uno. La lógica de simulación se puede ver en la Figura 4.67.

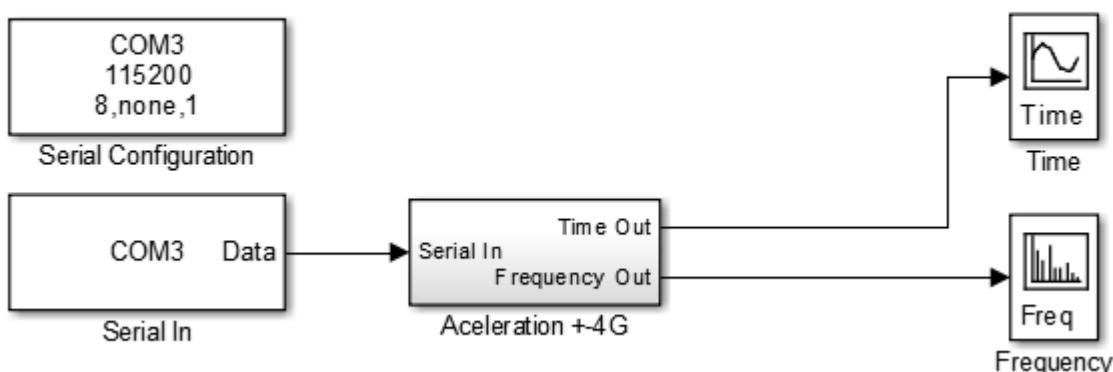


Figura 4.67 Diagrama de interfaz de *Simulink* para analizar espectro de aceleración.

Simulink® resultó una herramienta muy fácil de utilizar dada la sencillez de implementar código de Matlab® en la lógica de diagramas. Se logró obtener datos, pero la velocidad de actualización de la simulación no permitía ver en tiempo real las gráficas, además que el buffer de entrada perdía datos por el tiempo que tardaba en utilizar los datos almacenados.

Se utilizaron dos tipos de interfaces: UART y TCP/IP. Hay que recordar que la interfaz en la aplicación final es a través de TCP/IP, pero las primeras pruebas se realizaron a través de UART conectando directamente un conversor de UART a USB por los puertos auxiliares de la tarjeta de adquisición.

4.5.1. Interfaz por UART.

En la Figura 4.68 se puede observar el puerto UART auxiliar de la tarjeta de adquisición.

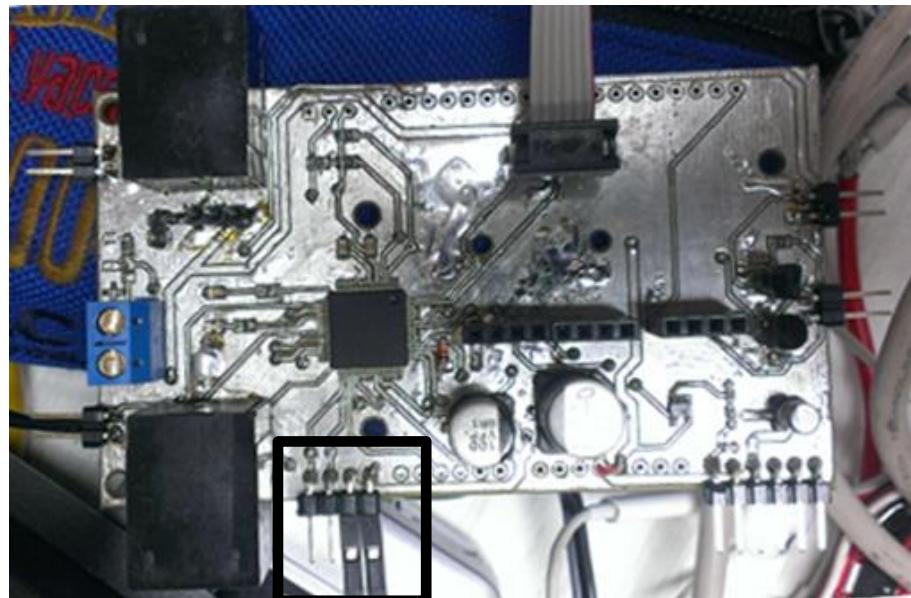


Figura 4.68 Puerto UART auxiliar en la tarjeta de adquisición.

La interfaz se divide en dos partes: Transmisión y recepción.

La transmisión toma datos de un *joystick* disponible en el laboratorio, convierte los datos (de -1 a 1) a un rango admisible por puerto UART (0 a 254, 255 reservado). Ver Figura 4.69.

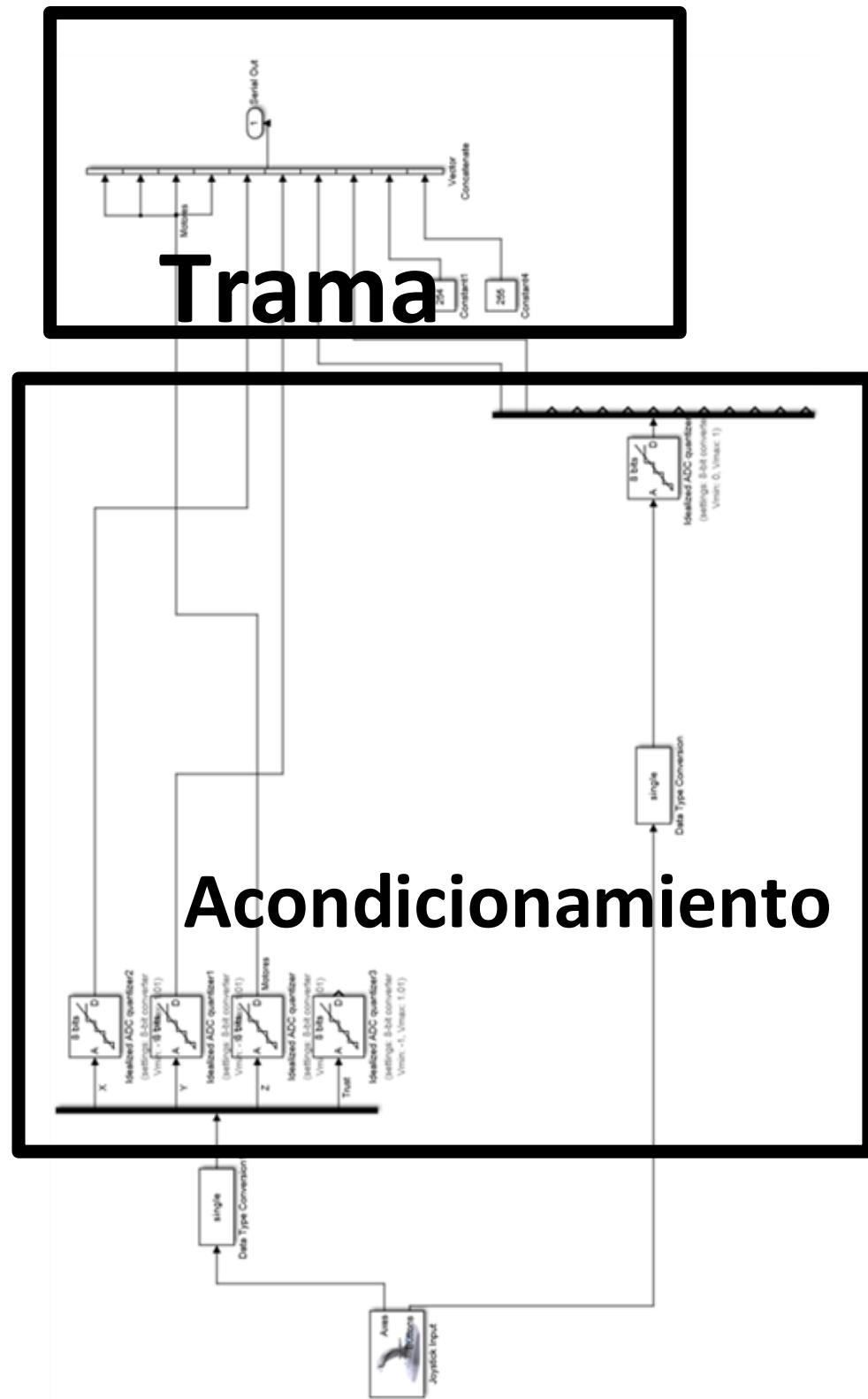


Figura 4.69 Diagrama de Simulink® para transmisión de información de joystick.

Como el propósito es probar la electrónica diseñada, se manda la misma señal a los 4 ESC. La trama enviada es la de la Tabla 4.9.

En cuanto a la recepción de datos, se creó el diagrama de *Simulink* mostrado en la Figura 4.70.

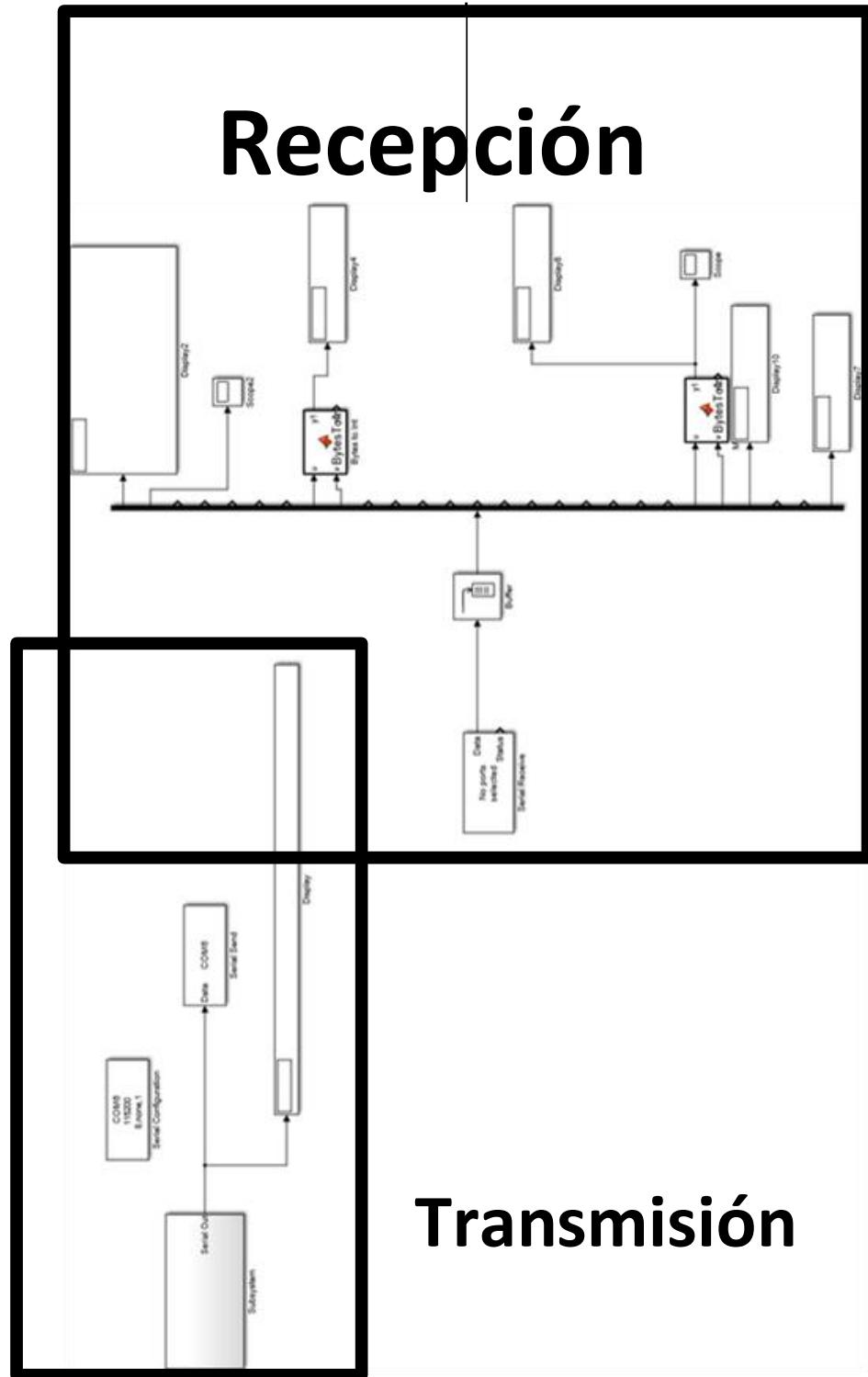


Figura 4.70 Diagrama de Simulink® para recepción de datos por UART.

Como se puede observar, se incluye en el mismo programa la recepción y envío para poder tener bidireccionalidad. Los bytes entrantes entran a un *buffer* de 27 bytes. Esto genera un arreglo que se descompone y permite el trato individual de los datos. Estos se pueden observar con un osciloscopio virtual disponible en Simulink®. En el caso de que cierto dato conlleve el uso de dos bytes, se concatenan para generar una variable de dos bytes (tipo *word*).

4.5.2. Interfaz por TCP/IP.

Es importante recordar que la transmisión real se va a realizar por puerto *ethernet* dado que tiene un ancho de banda de unos 100 Mbps. En la Figura 4.71 se puede observar donde se encuentra localizado dicho puerto en el pcDuino.



Figura 4.71 Puerto de *ethernet* utilizado para comunicar el pcDuino con la estación base.

La interfaz por TCP/IP fue realizada de manera similar a la anterior (por UART). La modularidad que posee Simulink® permitió adaptar las etapas de transmisión y adquisición anteriores, como se puede ver en la Figura 4.72.

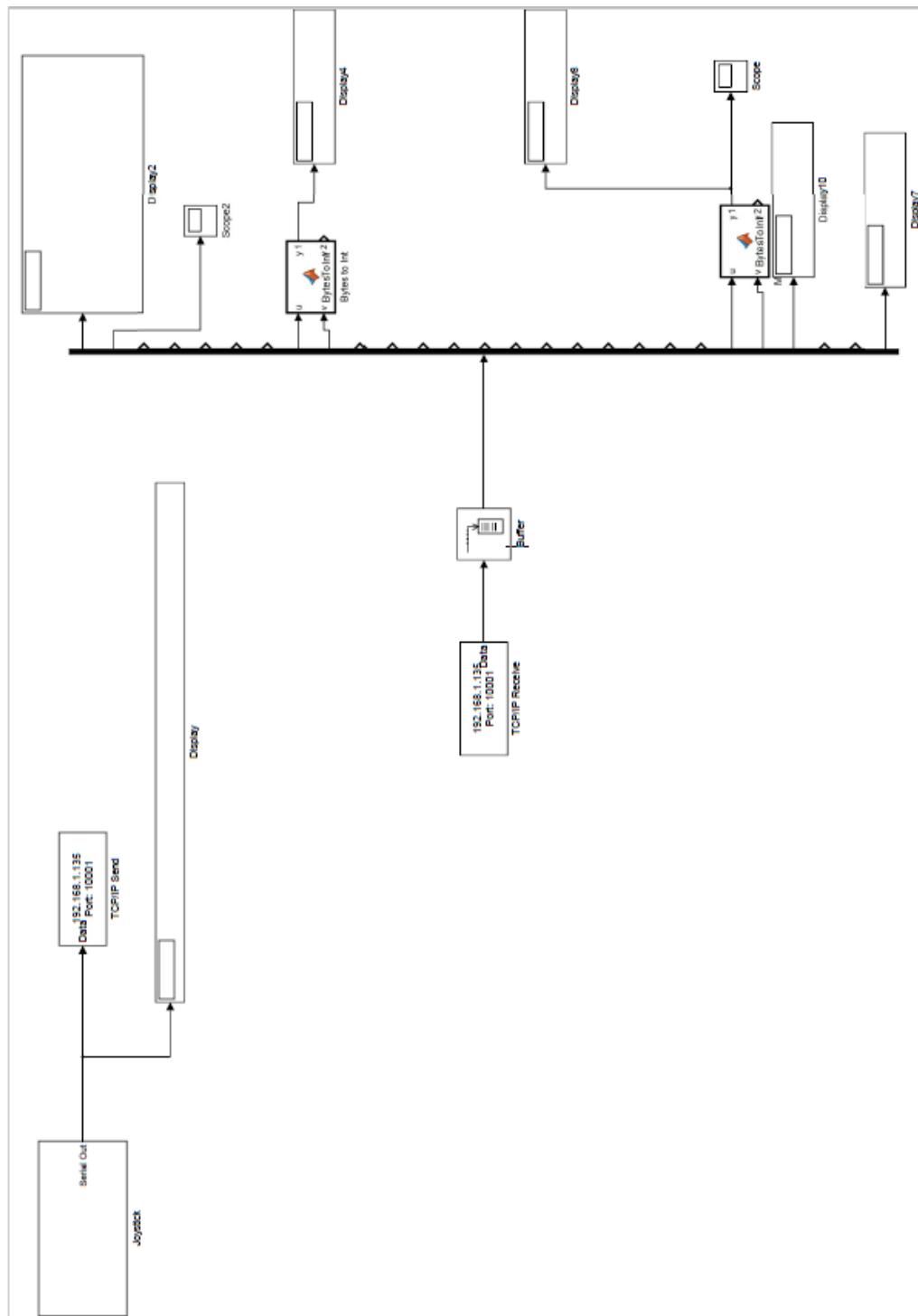


Figura 4.72 Diagrama de Simulink® para interfaz por TCP/IP.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Este proyecto es multifactorial. Conlleva un compendio de áreas de electrónica bastante amplio. Desde comunicaciones, conocimiento de fabricación de PCB hasta diseño de sistemas embebidos. En la Figura 5.1 puede observar el sistema completo.

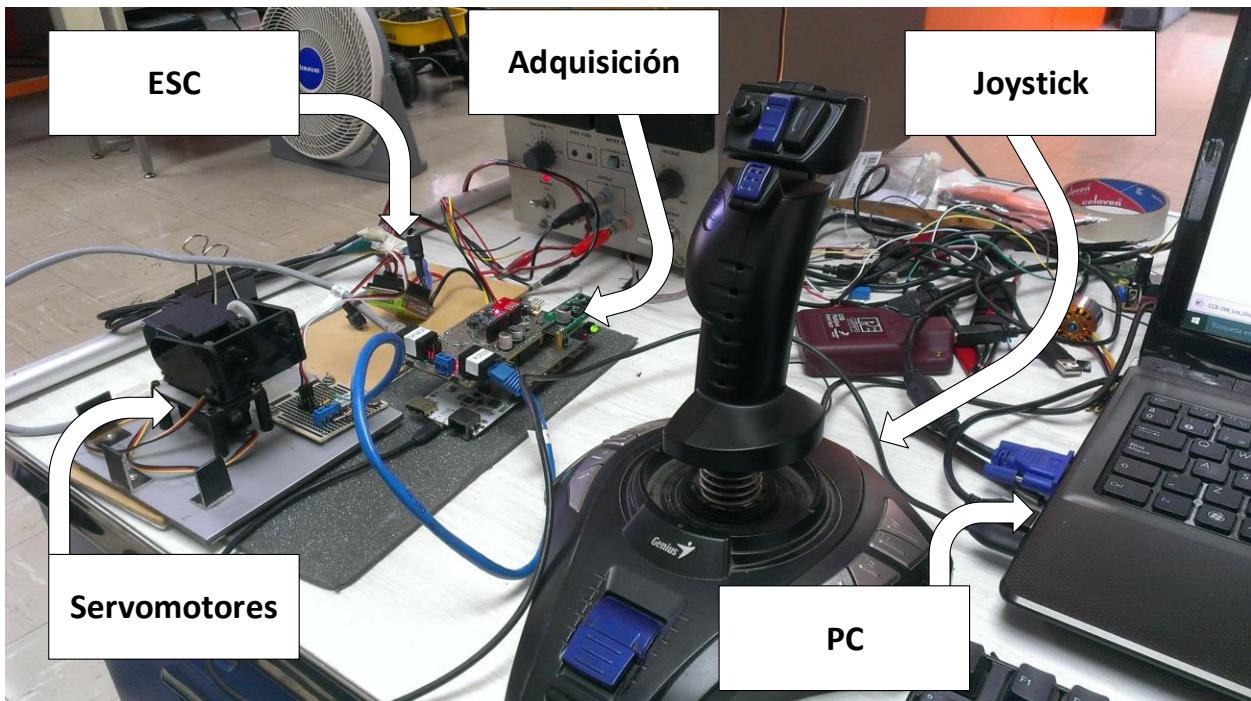


Figura 5.1 Sistema de telemetría en prueba.

La electrónica desarrollada, en cuanto a cómo fue planteada, se pudo realizar de manera satisfactoria. En la Figura 5.2 se puede ver una comparación del conjunto de tarjetas fabricadas y un renderizado de las tarjetas diseñadas.

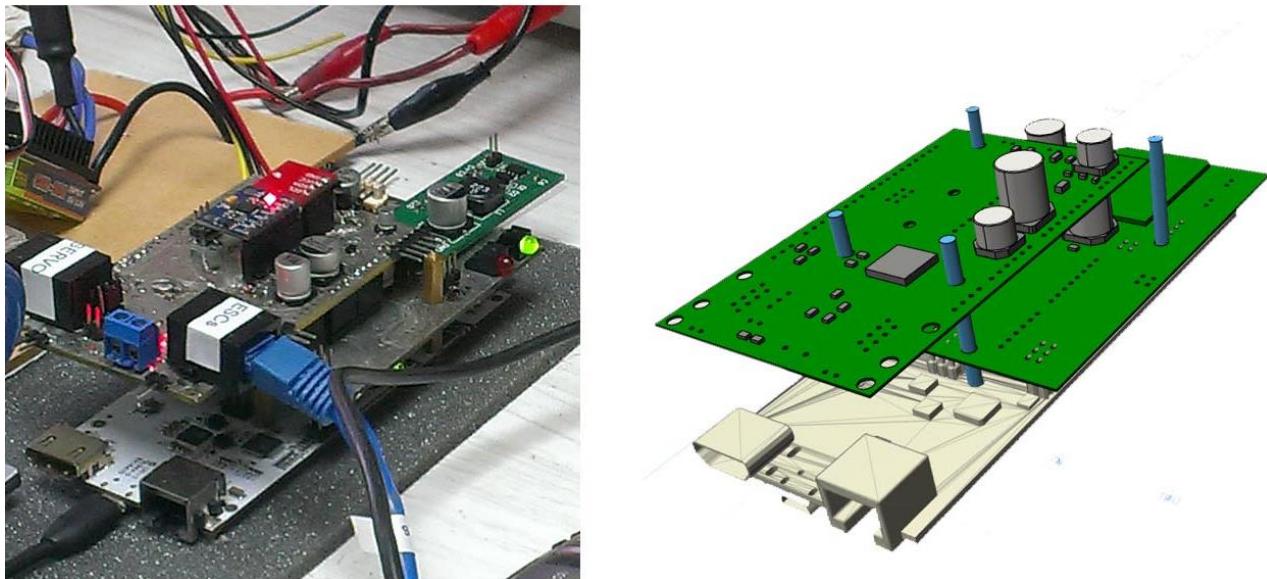


Figura 5.2 Sistema de telemetría real y renderizado 3D.

Se puede observar la similitud de las tarjetas fabricadas con respecto a lo diseñado. La metodología empleada dio los resultados deseados en cuanto a la fabricación de las tarjetas, pero hubo algunos detalles en cuanto a la adquisición.

El sensor de temperatura DS18B20 generó problemas en la adquisición de los datos. La señal generada por la propuesta del fabricante del sensor y diseñador del protocolo produjeron medidas erróneas y no permitía que el muestreo realizado por el MCU fuera regular.

Si bien el diseño de las tarjetas permitió un resultado decente, no se contempló que la Protomat S62 no crea *pads* de pines con conexión multicapa. Esto generó una dificultad en la soldadura de los componentes y, por lo tanto, afectó el acabado.

El *footprint* de los transistores utilizados para detectar la presencia de agua no fue el mismo que el encontrado en el mercado por lo que debió realizar una adaptación para utilizar transistores de tecnología TH 2N3906. Esto no afectó el funcionamiento, pero sí el acabado de la tarjeta.

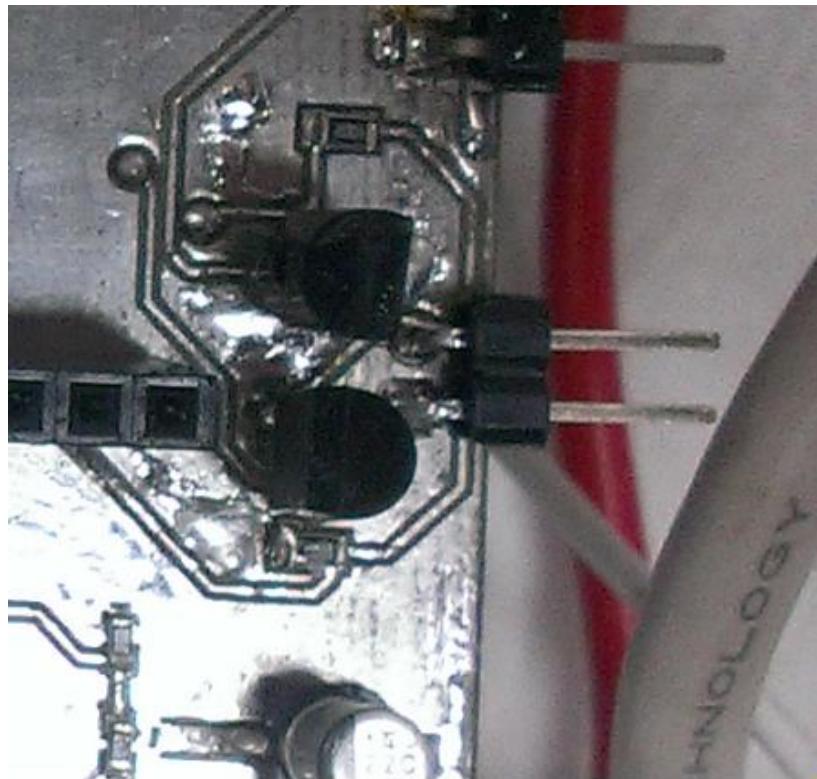


Figura 5.3 Transistores 2N3906 utilizados como sustituto en la tarjeta de adquisición.

El diseño modular hizo que las pruebas con los servomotores y con un motor BLDC fueran realizadas con éxito. En conjunto, se tiene un sistema robusto, que va a permitir el desarrollo de capas de mayor abstracción y, por ende, permitir los fines últimos de esta línea de investigación.

En cuanto a la interfaz gráfica, la transmisión de datos al microcontrolador funcionó según lo esperado pero la recepción no se pudo realizar en tiempo real dado que *Simulink* y sus módulos de comunicación UART permiten muy poco control sobre el tiempo de muestreo de la señal y el orden de prioridad al tener múltiples accesos.

En la Figura 5.4, se puede observar cómo acceder a los pines de adquisición, control, alimentación y expansión del sistema de telemetría.

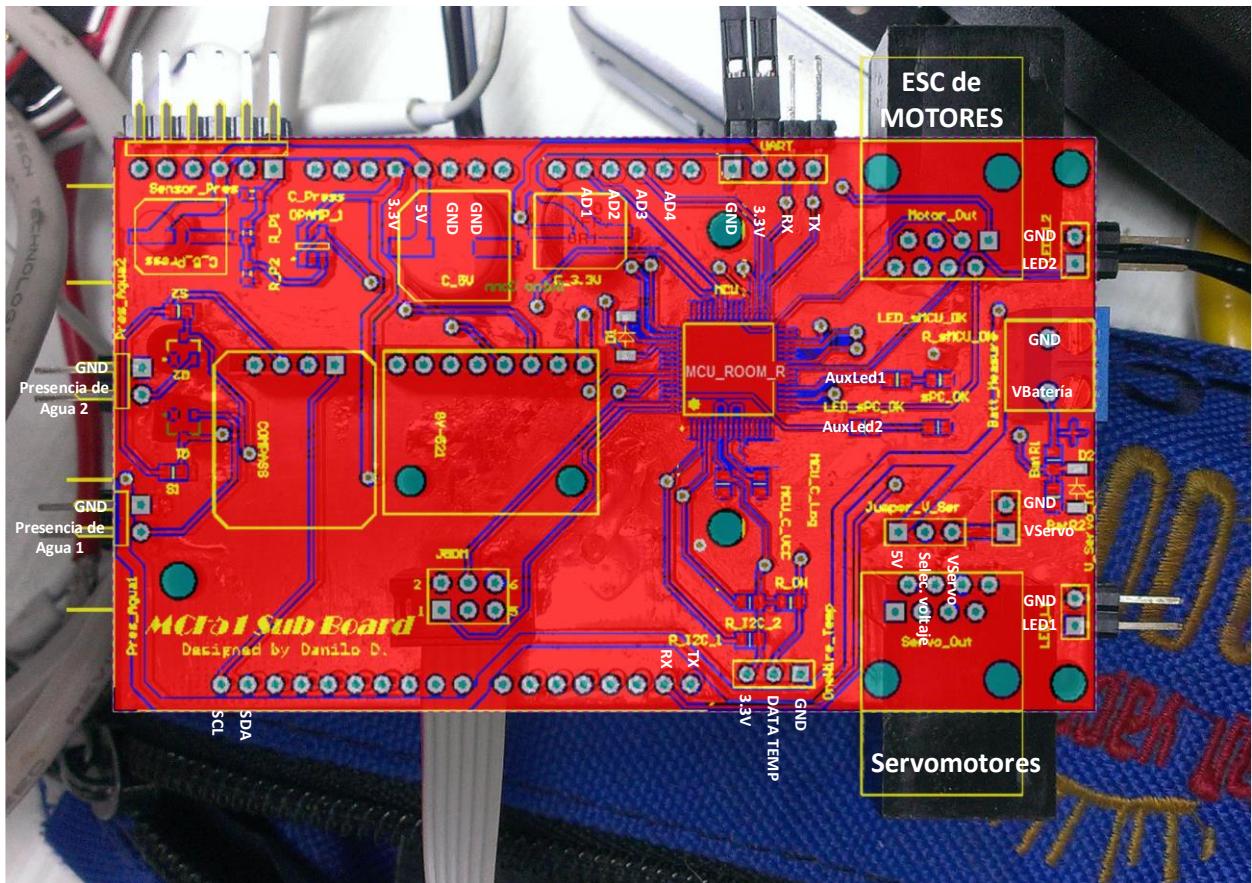


Figura 5.4 Tarjeta de Adquisición y sus puertos de adquisición, control, alimentación y expansión.

5.1. Continuación del proyecto y el desarrollo.

Las exigencias del mundo de hoy exigen a los investigadores mantener actualizadas sus líneas de investigación. Es por ello que se implementó como método para mantener este proyecto un repositorio público, así como una wiki de libre acceso con todos los desarrollos producidos en este trabajo de grado y que a futuro trabajos que den valor agregado a esta línea de investigación (ver Figura 5.5).

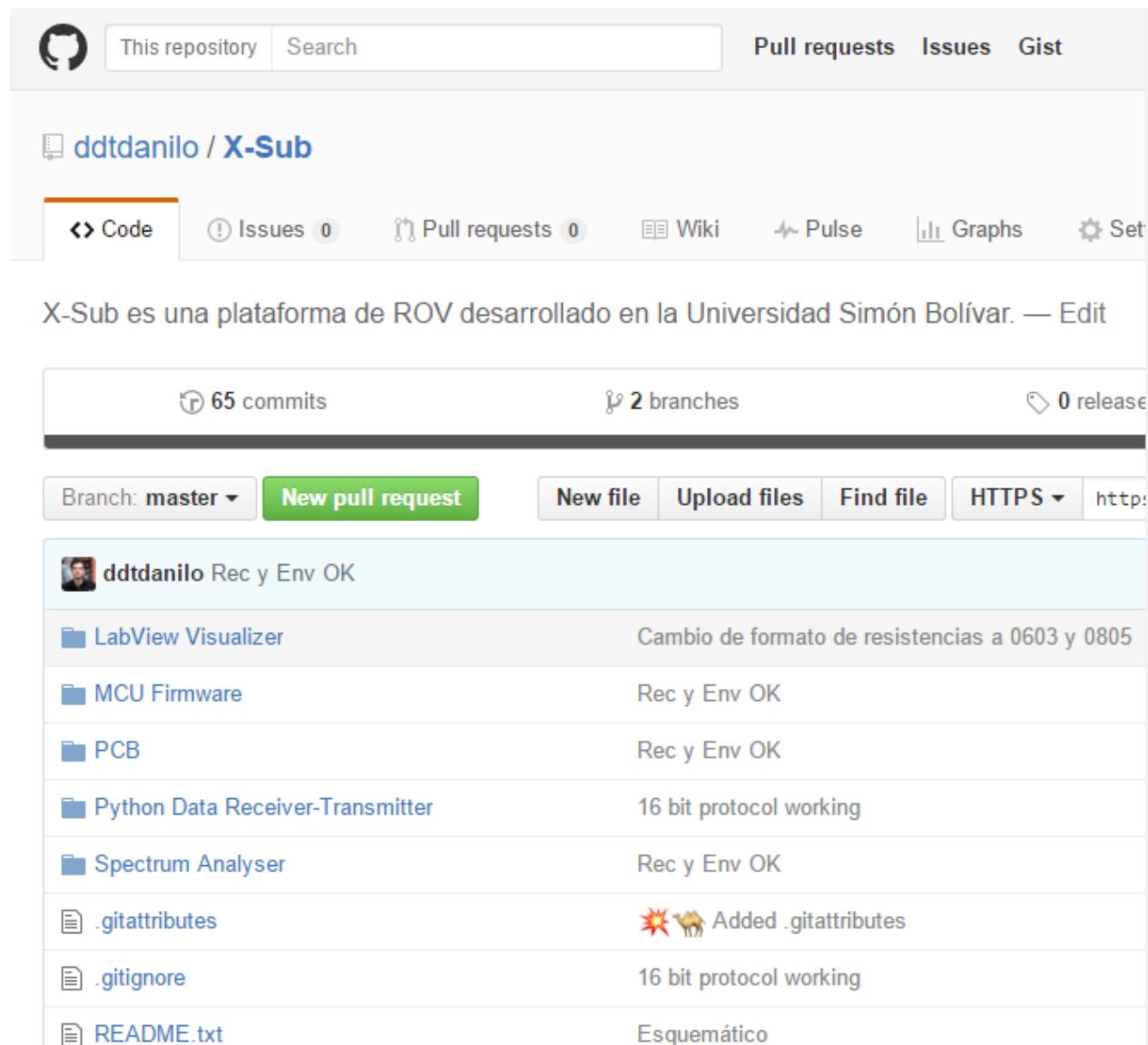


Figura 5.5 Repositorio público para mantenimiento y actualización constante del proyecto.

El repositorio es de dominio público y se puede acceder a través del servicio GitHub® a través de la dirección web <https://github.com/X-Sub/Telemetry-System> [20]. Este ha sido utilizado para el mantenimiento de las distintas etapas de este desarrollo. Estas versiones están abiertas al público en general.

CONCLUSIONES

En base a todo el trabajo de investigación, desarrollo, fabricación e implementación, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se logró fabricar un conjunto de tarjetas modulares en base al estándar mecánico de Arduino. Esto permite versatilidad a la hora de diseñar futuras expansiones.
- Se logró implementar un protocolo de I2C para la comunicación entre los módulos y dispositivos del sistema de telemetría, lo que permite la introducción de cualquier dispositivo del mercado que sea capaz de comunicarse esta manera y facilita el proceso de una expansión a futuro.
- Se diseñó un firmware que es modular y adaptable a las necesidades y aplicaciones que se deseen ejecutar en el ROV, así como robusto en cuanto a fallas.
- Se diseñó un protocolo de comunicación que permite agrupar de forma organizada los datos capturados y transmisión de comandos a través de cambios de estatus.
- Se diseñó un hardware capaz de dar una realimentación visual rápida en base a LEDs dispuestos en la tarjeta de adquisición y distribución de energía.

RECOMENDACIONES

Para la continuación de esta línea de investigación, se recomienda:

- Se recomienda una implementación de ROS basada en nodos para la conexión de la computadora a bordo y la estación base. Esto permitirá ejecutar distintos módulos desarrollados por separado y así, dar la capa de abstracción necesaria para continuar esta línea de investigación en campos distintos a la electrónica.
- Se recomienda implementar un algoritmo distinto para la adquisición de temperatura para el sensor DS18B20.
- En el momento de diseñar un PCB, se recomienda tomar en cuenta que no se producen vías ni conexiones multicapa en la máquina utilizada, por lo que el diseño debe contemplar el hecho de que los componentes TH sólo se pueden soldar por la parte inferior de la tarjeta.
- Al momento de empezar el proceso de rutear las pistas del PCB, se recomienda esconder todos los terminales que conlleven conexión de tierra. Esto con la finalidad de no saturar la vista y simplificar las conexiones a realizar mediante la colocación de un plano de tierra.
- Se recomienda implementar un sistema de detección de errores basado en CRC (Verificación por redundancia cíclica) en los protocolos de comunicación.

REFERENCIAS

- [1] J. A. G. G. Samuel Alberto Makhoul Quintana, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL ROBOT SUBMARINO POSEIBOT, Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012.
- [2] E. Carletti, «Axxon - Nuestros océanos siguen manteniendo muchos misterios,» 12 Junio 2010. [En línea]. Available: <http://axxon.com.ar/noticias/2010/06/nuestros-oceanos-siguen-manteniendo-muchos-misterios/>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [3] OpenROV, «OpenROV | Robots de Exploración Submarina,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.openrov.com/>.
- [4] Universidad de Girona, «Girona Underwater vision and robotics - Girona 500,» [En línea]. Available: <http://cirs.udg.edu/wp-content/uploads/2015/11/Girona500-1.pdf>. [Último acceso: Abril 2016].
- [5] Trident development team, «Trident the underwater drone for everyone,» [En línea]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/openrov/openrov-trident-an-underwater-drone-for-everyone/description>. [Último acceso: Abril 2016].
- [6] «Electronilab,» [En línea]. Available: <http://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-ds18b20-tipo-sonda/>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [7] «Arduino Playground. MPU-6050,» [En línea]. Available: <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [8] C. M. -. HMC6352, «Sparkfun Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/retired/7915>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [9] H. L. J.-X. R. W.-L. H. Y.-P. Z. Xin-Gang Liang, «Correlation of Spherical Thermistor for the Measurement of Low Velocity Air Flow,» [En línea]. Available: <http://download.springer.com/static/pdf/875/art%253A10.1007%252Fs11630-998-0032-y.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs11630-998-0032->

- y&token2=exp=1458936565~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F875%2Fart%25253A10.1007%25252Fs11630-998-003. [Último acceso: Marzo 2016].
- [10] C. d. Wikipedia, «Actuador - Wikipedia La Enciclopedia Libre,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Actuador>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [11] G. Antonelli, Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems, Berlín: Springer Tracts in Advanced Robotic, 2006.
- [12] Hobby King®, «HobbyKing® ™ Brushless Car ESC 30A w/ Reverse,» [En línea]. Available: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_11742_HobbyKing_Brushless_Car_ESC_30A_w_Reverse.html. [Último acceso: Marzo 2016].
- [13] Microsoft, «Microsoft LifeCam Cinema,» [En línea]. Available: <https://www.microsoft.com/accessories/en-us/products/webcams/lifecam-cinema/h5d-00013>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [14] Hitec, «SERVO MOTOR HITEC HS422 S330165,» [En línea]. Available: <http://www.superrobotica.com/download/s330165/hs422.pdf>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [15] «Ocean Wave Spectra,» [En línea]. Available: http://www.wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra. [Último acceso: Febrero 2016].
- [16] L. L. & Electronics, «ProtoMat S62 User Manual,» [En línea]. Available: https://hci.rwth-aachen.de/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=812.
- [17] Maxim Semiconductors, «Overview of the 1-Wire Protocol,» [En línea]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1796>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [18] Electric Imp, Inc., «Implementing a 1-Wire Bus on the imp,» [En línea]. Available: <https://electricimp.com/docs/resources/onewire/>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [19] C. Zhang, «Onewire over UART,» [En línea]. Available: <https://github.com/dword1511/onewire-over-uart>. [Último acceso: Marzo 2016].

- [20] D. Díaz, «Repositorio de X-Sub,» [En línea]. Available: <https://github.com/X-Sub/Telemetry-System>. [Último acceso: Abril 2016].
- [21] S. Nilsson, «Realtime Plotter,» 2015. [En línea]. Available: <https://github.com/sebnil/RealtimePlotter>.
- [22] A. Schlegel, «Processing GUI controlP5,» 30 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://www.sojamo.de/libraries/controlP5/>.
- [23] E. White, *Making Embedded Systems. Design Patterns for Great Software*, O'Reilly Media, 2011.