

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS POR
ULTRASONIDOS PARA EL ROBOT E-PUCK**

Gonzalo Comín Forcada

2012

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por

Presidente: Dr D. Félix Monasterio-Huelin Maciá

Vocal: Dr D. Carlos González Bris

Secretario: Dr D. Álvaro Gutiérrez Martín

Suplente: Dr D. Francisco Javier Jiménez Leube

para juzgar el Proyecto Fin de Carrera titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS POR ULTRASONIDOS PARA
EL ROBOT E-PUCK**

del alumno D. Gonzalo Comín Forcada
dirigido por D. Álvaro Gutiérrez Martín

Acuerdan otorgar la calificación de: _____

Y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal, la presente diligencia

Madrid, a _____ de _____ de _____

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Fdo: _____ Fdo: _____ Fdo: _____

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS ESPECIALES
APLICADAS A LA TELECOMUNICACIÓN**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS POR
ULTRASONIDOS PARA EL ROBOT E-PUCK**

**Autor:
Gonzalo Comín Forcada**

**Director:
Álvaro Gutiérrez Martín**

2012

Resumen

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha desarrollado un sistema de detección de obstáculos mediante ultrasonidos para el robot *e-puck*. Se ha diseñado, fabricado y validado una tarjeta electrónica, *Echo 5*, compatible con el robot *e-puck*, donde se incorporan las cápsulas de ultrasonidos, la electrónica de adaptación, así como el microcontrolador que gobierna la tarjeta y se comunica con el controlador maestro existente en el robot. De igual forma se ha diseñado e implementado el firmware que incorpora el procesador y las librerías que permiten la comunicación con el *e-puck*. Este sistema permite la detección de obstáculos, eliminando las interferencias existentes entre los sensores de infrarrojo incluidos en el robot y la tarjeta de comunicación local, distribuida y situada, *e-RandB*, diseñada previamente en el mismo departamento.

PALABRAS CLAVE: Sistema de Detección de Obstáculos, Ultrasonidos, *e-puck*.

Agradecimientos

Este curso ha sido magnífico. El esfuerzo que he dedicado a este proyecto se ha visto compensando por el hecho de haber vivido el que hasta ahora ha sido el mejor periodo de mi vida. Y no debería terminarlo sin mencionar a los culpables.

Comenzaré con mi familia, gracias a mis padres Enrique y Esther, que me han regalado estos años en Madrid, y a mi hermana Belén, que me ha aguantado toda la vida.

Gracias a mis amigos de Zaragoza, Miguel, Jose, Guillermo, Javi, David, Alberto, Diego y Jesús, y a mi querido riojano Moisés, porque con vosotros da igual donde estéis, siempre estáis ahí.

Gracias a los que compartís el día a día conmigo, mis compañeros de piso Alejandro, Víctor, Blanca y Sandra, y mis vecinos Miguel, Ernesto, Juan, y de nuevo Jose, por vivir con mis batallas y mis horarios de inadaptado.

Gracias a mis amigos de Ingeniería, a los que dejé en Zaragoza y a los que me encontré en Madrid, especialmente a Adrián, Enrique y Daniel, sin quienes el tiempo que he pasado estudiando en Madrid no hubiera sido lo mismo, y que me hicieron sentir como en casa. Gracias a todos por pasar conmigo momentos duros y tranquilos, sin vosotros hacer esta carrera no habría sido lo mismo.

Gracias a mis compañeros de laboratorio, Eduardo, Manuel, Iñaki y Marina, quienes hicieron que las horas de trabajo se pasaran volando, y quienes me han ayudado cada vez que lo he necesitado. Y gracias a Félix por dejarme ideas en las que pensar cada vez que hacía una visita al laboratorio.

Muchas, muchas gracias a Álvaro Gutierrez Martín, mi tutor, que me ha ofrecido esta oportunidad y me ha ayudado en todo momento a pesar de ser la persona más ocupada que he conocido, vas a ser un papá genial.

Gracias a Juanma, de RBZ, quien me ayudó enormemente en los aspectos de diseño hardware y fabricación de las tarjetas, y al resto de la empresa, por esos días en los que descubrí cómo trabajan los ingenieros.

Gracias especialmente a Laura, que apareció en mi vida junto con este proyecto

y ha compartido todo lo que me pasaba por la cabeza todo este tiempo.

Y para finalizar, gracias a mi abuelo, José Forcada Gómez, porque es quien desde pequeño me inculcó la pasión por las máquinas y herramientas, quien me hizo acabar estudiando Ingeniería.

Dejo de mencionar a muchas personas, lo sé, podría pasar horas escribiendo nombres. A todos los que formáis parte de mi vida, muchas gracias.

Muchas gracias a todos.

Índice general

Resumen	IV
Agradecimientos	V
Índice General	VII
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XII
Lista de acrónimos	XIV
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Encuadre	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Organización	5
2. El Robot <i>e-puck</i>	7
2.1. Introducción	7
2.2. Hardware	9
2.3. Software	13
3. Ultrasonidos	15
3.1. Introducción	15
3.2. Consideraciones fundamentales	16
3.3. Necesidades para el Proyecto Fin de Carrera	18
3.4. Tipología	19
3.4.1. Funcionalidad	19
3.4.2. Cápsula	20
3.4.3. Tamaño	20

3.4.4. Frecuencia de Oscilación	21
3.4.5. Selección de cápsulas	21
4. La tarjeta <i>Echo 5</i>	23
4.1. Hardware	23
4.1.1. Requisitos	23
4.1.2. Restricciones	25
4.1.3. Diseño	26
4.2. Firmware	42
4.2.1. Requisitos	42
4.2.2. Diseño	42
4.3. Librerías	46
4.3.1. Requisitos	46
4.3.2. Diseño	46
5. Experimentos	53
5.1. Transmisión de datos	53
5.1.1. Modelado	54
5.1.2. Análisis de Datos	55
5.2. Caracterización de las mediciones	56
5.2.1. Modelado	57
5.2.2. Análisis de Datos	58
5.3. Movimiento y esquivas	62
5.3.1. Modelado	63
5.3.2. Análisis de Datos	64
6. Conclusiones y líneas futuras	67
6.1. Conclusiones	67
6.2. Líneas futuras	70
6.3. Contribuciones	71
A. Señales de los buses de expansión del <i>e-puck</i>	73
B. Datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>.	77
C. Esquemáticos	85
C.1. Esquemáticos de la tarjeta <i>Echo 5</i>	85
C.2. Esquemático de la tarjeta <i>Spacer</i>	93
Bibliografía	95

Índice de figuras

1.1. Tarjeta <i>e-puck Range & Bearing</i>	3
2.1. Descripción del robot <i>e-puck</i> con sus principales elementos.	8
2.2. Arquitectura del robot <i>e-puck</i>	9
2.3. Señales transmitidas por los conectores del bus de comunicación superior del robot <i>e-puck</i>	12
3.1. Diagrama de radiación de las cápsulas, tanto emisora como receptora.	16
3.2. Forma de onda de la resonancia. La señal superior es el umbral analógico y los dos cursores verticales delimitan la ventana de emisión del pulso de ultrasonidos (8 ciclos del tren de pulsos de 40kHz).	18
3.3. Cápsulas SQ-40-T-10B y SQ-40-R-10B, nótese que tanto el emisor como el receptor tienen el mismo encapsulado.	21
4.1. Tarjeta <i>Echo 5</i>	24
4.2. Elementos fijos de la tarjeta <i>Echo 5</i> , indicados en verde.	25
4.3. Esquemático de la tarjeta <i>Echo 5</i> . En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	26
4.4. Esquemático de los circuitos de alimentación. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	28
4.5. Planos de alimentación de la tarjeta <i>Echo 5</i> . Desde el centro al exterior: alimentación digital, alimentación de emisión y alimentación analógica.	30
4.6. Esquemático de la conexión con el bus del robot. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	31
4.7. Esquemático del conexionado del microcontrolador. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	32
4.8. Esquemático de los circuitos generadores de umbral. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	35

4.9. Señal recibida con un obstáculo situado a (a) 30 cm, (b) 20 cm, (c) 10 cm, (d) 5 cm, (e) 1 cm y (f) fuera de rango del par de cápsulas. La señal superior es el umbral analógico y los dos cursores verticales delimitan la ventana de emisión del pulso de ultrasonidos (8 ciclos).	36
4.10. Esquemático del circuito de emisión. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	38
4.11. Enventanado de la señal de 40kHz. La señal 1, formada por el modulacion amplificada de la señal 2 de 40kHz por la señal 3 generada por el microcontrolador, es enviada a la cápsula emisora.	39
4.12. Esquemático del circuito de recepción. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.	40
4.13. Amplificación de la señal ofrecida por la cápsula receptora y proceso por el detector de envolvente. La señal 1 es la recibida por la cápsula receptora, la 2 es la señal amplificada con offset añadido y la señal 3 es la envolvente de la señal 2.	40
4.14. Detección del eco mediante la comparación con el umbral. Las señales 1 y 2 son el umbral y la envolvente de la señal recibida, la señal 3, en la parte inferior, se envía al detector de flanco del microcontrolador.	41
4.15. Diseño hardware renderizado de la tarjeta <i>Echo 5</i>	41
5.1. Montaje para realizar el experimento 1. Un obstáculo se desliza por una superficie en la que se ha situado una escala.	54
5.2. Comparativa de medidas a corta distancia realizadas por cada uno de los cinco pares de cápsulas de la tarjeta <i>Echo 5</i> (cada tick equivale a 200 ns).	55
5.3. Efecto del suelo en la medición: 1) Cuando se emite el pulso de ultrasonidos, 2) la porción del pulso que rebota en el suelo se acopla con retraso con la reflejada por el obstáculo.	56
5.4. Montaje para realizar el experimento 2. A) El robot <i>e-puck</i> que realiza la medición se sitúa sobre una B) superficie de referencia dotada de ejes para mantener la dirección y una escala angular para medir la rotación del robot con respecto a la pared. Esta superficie opera junto con una C) escala situada en la superficie de movimiento del robot. Los obstáculos para realizar el experimento son una D) pared perpendicular a la escala y otro E) robot <i>e-puck</i>	57
5.5. Diagrama de dispersión de la captura de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).	59

5.6. Diagrama de dispersión de la captura de distancias a diferentes ángulos de una pared a (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm y (e) 50 cm del robot (cada tick equivale a 200 ns).	59
5.7. (a) Primera y (b) segunda captura de distancias con un <i>e-puck</i> enfrentado a otro <i>e-puck</i> (cada tick equivale a 200 ns).	60
5.8. Media de las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).	61
5.9. Zona de medidas válidas de la media las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).	62
5.10. Zona de medidas lineales de la media las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).	62
5.11. Zona de aproximación donde la detección de objetos difíciles está comprometida, marcada por la línea roja discontinua que parte del eje del robot. Esta limitación está impuesta por el ángulo de apertura del haz de emisión de las cápsulas, con el límite mas próximo a la zona marcada indicado por líneas rojas continuas.	64
6.1. Tarjeta <i>Spacer</i> diseñada para acompañar a la tarjeta <i>Echo 5</i>	68
B.1. Página 1 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	78
B.2. Página 2 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	79
B.3. Página 3 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	80
B.4. Página 4 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	81
B.5. Página 5 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	82
B.6. Página 6 del datasheet de las cápsulas <i>SQ-40-T-10B</i> y <i>SQ-40-R-10B</i>	83
C.1. Esquemático del circuito de interconexión de la tarjeta <i>Echo 5</i>	86
C.2. Esquemático del circuito de conectores de la tarjeta <i>Echo 5</i>	87
C.3. Esquemático del circuito de alimentación de la tarjeta <i>Echo 5</i>	88
C.4. Esquemático del circuito de procesador y generador de umbral de la tarjeta <i>Echo 5</i>	89
C.5. Esquemático del circuito de emisión de la tarjeta <i>Echo 5</i>	90
C.6. Esquemático del circuito de recepción de la tarjeta <i>Echo 5</i>	91
C.7. Esquemático del circuito de la tarjeta <i>Spacer</i>	93

Índice de tablas

5.1. Comparación entre la distancia real y la medida por la tarjeta <i>Echo 5</i> . Se muestra la media y desviación típica de los valores obtenidos para un total de 50 muestras por posición.	63
---	----

Lista de Acrónimos

US: UltraSounds.

DAC: Digital-to-Analog Converter.

ADC: Analog-to-Digital Converter.

I²C: (i-squared cee) Inter-Integrated Circuit.

UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.

SPI: Serial Peripheral Interface.

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Encuadre

La realización de este Proyecto Fin de Carrera (PFC) está situada dentro del ámbito educativo e investigador del Grupo de Robótica y Sistemas de Control (ROBO-LABO¹) del Departamento de Tecnologías Especiales Aplicadas a la Telecomunicación (TEAT) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Mediante el presente Proyecto Fin de Carrera se continúan los desarrollos ya comenzados sobre el robot *e-puck* en la ETSIT-UPM. Dichos desarrollos llevaron previamente al diseño de la tarjeta *e-puck Range & Bearing (e-RandB)* (Gutiérrez et al., 2008, 2009), ampliamente utilizada en diferentes universidades y centros de investigación en el mundo². Por lo tanto, el presente Proyecto Fin de Carrera contribuirá a incrementar los recursos existentes en el robot *e-puck* potenciando posibles investigaciones futuras tanto a nivel nacional como internacional.

El Proyecto Fin de Carrera se centra en proporcionar una nueva vía de detección de obstáculos para los robots por medio de sensores de ultrasonidos, a la par que soluciona interferencias existentes entre la tarjeta *e-RandB* y los sensores de infrarrojo existentes en el robot, que se comentarán posteriormente .

¹Página web del laboratorio: <http://www.robolabo.etsit.upm.es>

²Página web de la tarjeta *e-RandB*: <http://www.rbz.es/epuck>

1.2. Motivación

El presente Proyecto Fin de Carrera está motivado por la realización de un sistema de detección de obstáculos mediante ultrasonidos que pueda ser utilizado para añadir nuevas funcionalidades al robot *e-puck*³. El robot *e-puck* es un robot desarrollado como hardware y software abierto en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) (Mondada et al., 2009). El robot *e-puck* está orientado a la robótica de enjambre en el ámbito educativo e investigador, dado su bajo precio en comparación con otros robots disponibles en el mercado. Está dotado de numerosos sensores y actuadores. Una característica de los robots *e-puck* es que se pueden desarrollar nuevas tarjetas de expansión gracias al bus I2C y una UART, disponibles en la tarjeta principal del robot. Además, gracias a que es un robot de hardware y software abierto, es posible añadir nuevas funcionalidades y capacidades sensorio-motrices al robot disponiendo de las fuentes originales del robot (tanto hardware como software). Esta potencialidad permite a la comunidad universitaria e investigadora compartir los diseños de hardware y software abierto, para poder avanzar en futuros desarrollos dentro del campo de la robótica.

No existe hoy en día ningún sistema de detección de obstáculos basado en ultrasonidos disponible para el robot *e-puck*. Actualmente, el robot dispone únicamente de un sistema de detección de obstáculos por infrarrojos, ofreciendo por lo tanto una serie de ventajas e inconvenientes. Los sensores infrarrojos son muy susceptibles a las interferencias lumínicas como el sol o a una mala iluminación, o el color de los obstáculos a detectar. Por contra, los ultrasonidos no son afectados por la iluminación o el color del obstáculo. Sin embargo, sí se pueden ver afectados por superficies que absorban el sonido o por la forma del obstáculo, siendo estas insignificantes para los sensores de infrarrojos. Sin embargo, estos últimos presentan una desventaja adicional en el robot *e-puck* debida a la interferencia producida con la tarjeta *e-RandB* (ver Figura 1.1) que utiliza sensores de infrarrojo para proporcionar una comunicación

³Página oficial del robot e-puck: <http://www.e-puck.org>

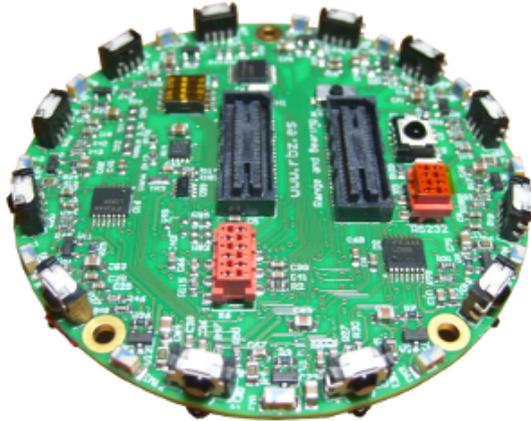


Figura 1.1: Tarjeta *e-puck Range & Bearing*.

local, distribuida y situada a los robots *e-puck*. Por consiguiente, se pretende que este Proyecto Fin de Carrera incremente las capacidades sensoriales del robot *e-puck* a la vez que se resuelven problemas de compatibilidad con la tarjeta *e-RandB*.

Los beneficios que aporta el desarrollo de una tarjeta de detección de obstáculos por ultrasonidos para el robot *e-puck* son:

- Nuevas funcionalidades basadas en las diferencias con el sistema basado en infrarrojos previamente mencionadas.
- Beneficios directos para toda la comunidad de usuarios, al compartir con ellos el diseño de una nueva tarjeta que dota al robot *e-puck* de nuevas capacidades sensoriales.
- Beneficios para el departamento, ya que al incrementar las capacidades sensoriales de los robots, las asignaturas que hacen uso de los mismos se enriquecerán con nuevos diseños de arquitecturas de enjambre basadas en el comportamiento.
- Nuevas oportunidades en el desarrollo de proyectos de investigación basados en el robot *e-puck*.
- Beneficios para el resto de centros (nacionales e internacionales) que desarrollen una labor docente e investigadora con el robot *e-puck*.

1.3. Objetivos

El objetivo fundamental del proyecto es el diseño de la tarjeta *Echo 5*, un sistema de detección de obstáculos por ultrasonidos. Para cumplir dicho objetivo se ha dividido el Proyecto Fin de Carrera en tres subobjetivos:

Diseño hardware: Se diseñarán los esquemáticos y la tarjeta de circuito impreso. Para ello es necesario el estudio de los transmisores, receptores y transceptores de ultrasonidos comerciales existentes para caracterizarlos de modo que se seleccionen los más adecuados para la realización del objetivo impuesto al que seguirá el estudio de las posibles configuraciones de la tarjeta de circuito impreso. Dadas las limitaciones de tamaño y energía, habrá que seleccionar el tipo, número y disposición de emisores, receptores o transceptores de ultrasonidos adecuados para el correcto funcionamiento del robot. Así mismo habrá que decidir el número de capas y formato del sustrato de la tarjeta o incluso estudiar la posibilidad de utilizar varias tarjetas.

Diseño del firmware: Igualmente se desarrollará el software de la tarjeta, de modo que el microcontrolador se haga cargo de la operación de captura de datos y la posterior puesta a disposición de estos para el robot *e-puck*.

Diseño de la librería para el robot *e-puck*: Por último se desarrollarán las librerías necesarias en el robot *e-puck* para facilitar el manejo de la tarjeta a los usuarios de la tarjeta.

Para la consecución de los objetivos se ha dividido el Proyecto Fin de Carrera en los siguientes hitos:

- Definición de las necesidades del proyecto.
- Lectura de documentación y artículos relacionados con los sistemas de ultrasonidos y el funcionamiento de los emisores, receptores y transceptores.
- Estudio del funcionamiento y características de los distintos emisores, receptores y transceptores disponibles.

- Familiarización con las funciones y librerías para la programación y manejo del robot *e-puck*.
- Estudio del funcionamiento del firmware y hardware de bajo nivel del robot *e-puck* (buses de datos, límites de alimentación, requisitos mecánicos, etc).
- Estudio y familiarización con las herramientas de diseño de circuitos impresos que serán usadas en el Proyecto Fin de Carrera.
- Estudio de las posibilidades de realización de la tarjeta de circuito impreso y decisión del diseño final.
- Diseño de los esquemáticos de la tarjeta.
- Diseño de la tarjeta de circuito impreso.
- Fabricación y puesta a punto de la tarjeta de detección de obstáculos.
- Diseño del firmware de la tarjeta.
- Diseño de la librerías necesarias en el robot *e-puck* que permitan una comunicación con la tarjeta de ultrasonidos.
- Experimentación.

1.4. Organización

En el Capítulo 1 se ha descrito la motivación y el estado del arte del Proyecto Fin de Carrera como continuación y elemento complementario al módulo *e-RandB* para el robot *e-puck*. También se han definido los objetivos a llevar a cabo en el PFC.

En el Capítulo 2 se introduce el robot *e-puck* y sus funcionalidades. Así como su arquitectura describiendo el hardware y software.

En el Capítulo 3 se describen los sistemas de ultrasonidos, cómo funcionan, de qué modelos se dispone en el mercado, sus características y cuales de estas últimas son decisivas para el Proyecto Fin de Carrera.

En el Capítulo 4 se desarrollan los tres grandes aspectos del proyecto, el diseño hardware, con sus requisitos y restricciones, el diseño firmware y sus requisitos y el desarrollo de la librería que facilitará el uso de las nuevas funcionalidades al usuario del robot *e-puck*.

En el Capítulo 6 se describen diversos experimentos que muestran el funcionamiento de la tarjeta *Echo 5*, así como su modelado y posterior análisis.

Finalmente, el Capítulo 6 muestra las conclusiones y líneas futuras.

Capítulo 2

El Robot *e-puck*

En el este capítulo se introduce el robot *e-puck* explicando su arquitectura y diseño hardware y software.

2.1. Introducción

El robot *e-puck* (ver Figura 2.1) es un robot educacional desarrollado como hardware abierto en la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL)¹.

Como se ha mencionado previamente, uno de los principales ámbitos de uso del robot *e-puck* es el educativo, siendo una herramienta muy útil en campos como el procesado de señal, el control automático o la programación de sistemas empujados. Hay que destacar un campo, que sin ser el fundamental para el diseño de la tarjeta *Echo 5*, va a definir ciertas necesidades en cuanto al diseño de la tarjeta. Este campo es el de la robótica de enjambre, campo en el que trabaja el departamento desde el que se ha desarrollado el presente Proyecto Fin de Carrera.

La robótica de enjambre estudia patrones de comportamiento colectivo que emergen mediante la interacción de un gran número de robots entre sí así como con su entorno. Estos robots tienden a ser relativamente simples y estar dotados de unos comportamientos individuales sencillos, siendo el objetivo que los comportamientos

¹En la página web de proyecto (www.e-puck.org) están disponibles librerías, ficheros de fabricación, ejemplos y una amplia documentación sobre el robot y su funcionamiento. Se recomienda visitar la página oficial para una comprensión completa del robot *e-puck* así como el uso y divulgación que está teniendo internacionalmente.

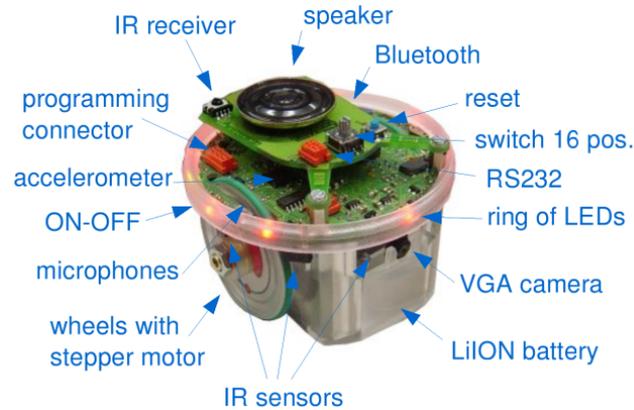


Figura 2.1: Descripción del robot *e-puck* con sus principales elementos.

emergentes sean complejos. La robótica de enjambre evita la centralización del control de los individuos, promoviendo la escalabilidad y el uso de un gran número de individuos. Por esto mismo la comunicación entre unidades y la capacidad que tengan para reconocer su entorno es de vital importancia.

Se pueden destacar unas características que definen el concepto del robot *e-puck*, buscando que sea tanto una herramienta potente como polivalente:

- **Pequeño tamaño:** Para poder operar en un escritorio o una mesa habilitada para tal efecto.
- **Gran cantidad de funcionalidades de serie:** Para que el robot pueda ser usado en diversos campos, a esto hay que sumarle el bus de expansión del que se hablará mas adelante (ver Sección 2.2).
- **Fácil manejo:** El robot puede ser utilizado sin requerir un entrenamiento específico. Se ha buscado que su manejo sea intuitivo para hacer de él una herramienta de enseñanza más eficaz.
- **Bajo precio:** Una característica especialmente importante cuando el ámbito de uso del robot va a ser la educación o la robótica de enjambre, donde se requieren muchas unidades.

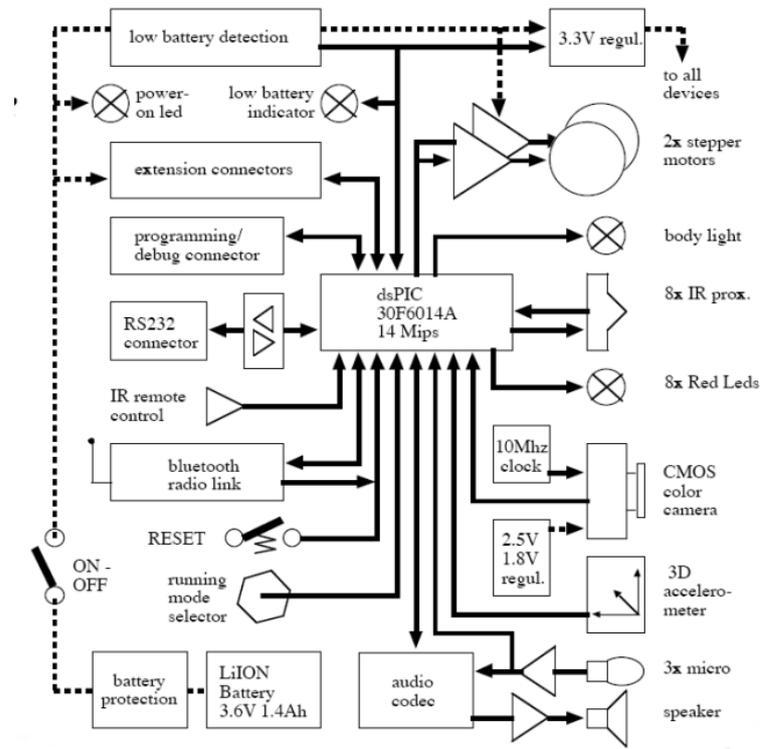


Figura 2.2: Arquitectura del robot *e-puck*.

- **Hardware y software abierto:** Una forma de que los avances y desarrollos sobre el robot puedan ser compartidos y transmitidos con eficacia entre universidades y centros.

2.2. Hardware

El robot *e-puck* está gobernado por un microcontrolador de Microchip², concretamente el dsPIC30F6014A, de 16 bits y dispone de 144KB de Memoria de Programa, 8KB de RAM y 4KB de EEPROM. El mapa sensorial y actuador del robot se puede observar en la Figura 2.2 donde se aprecian los siguientes sensores que aportan información al microcontrolador:

- **Ocho Sensores de Infrarrojo:** Situados en el perímetro del robot permiten

²Web de Microchip: <http://www.microchip.com>

la detección de obstáculos por infrarrojos. Este es el sistema que está causando interferencias con la tarjeta *e-RandB* y cuya funcionalidad asume la tarjeta *Echo 5*.

- **Un acelerómetro de 3 ejes:** Para medir tanto la aceleración del propio robot como la inclinación de este, pudiendo también detectar colisiones y caídas (Navarro et al., 2008).
- **Tres micrófonos:** La existencia de varios micrófonos permiten al robot no sólo capturar el sonido sino poder localizarlo mediante triangulación (Pini et al., 2007).
- **Una cámara CMOS:** En la parte frontal del robot, con una resolución de 640x480 píxeles (Chen et al., 2012).

El microcontrolador controla los siguientes actuadores:

- **Dos motores paso paso:** Controlan el movimiento del robot, tienen una resolución de mil pasos por revolución.
- **Ocho LEDs rojos alrededor del anillo:** Permiten una interacción tanto con el usuario como con otros robots mediante el uso de la cámara. Hay que mencionar que sobre estos LEDs se encuentra un anillo de difusión que también hace las funciones de paragolpes. Como se verá en el Capítulo 6, cuando la tarjeta *Echo 5* se sitúa inmediatamente sobre el robot, este anillo causa grandes resonancias y acoplos entre las cápsulas, por lo que, dada la imposibilidad de prescindir de este anillo, ha habido que descartar la posición inferior como un posible lugar para la tarjeta *Echo 5*.
- **Un LED verde que ilumina el cuerpo del robot:** Permite que el usuario obtenga información visual del comportamiento interno del robot.
- **Un LED apuntando frontalmente:** Al generar un haz concentrado apuntado hacia la misma zona que la cámara permite medir distancias mediante el tamaño

de la proyección, siendo estas mucho mayores que las que permiten los Sensores de Infrarrojo. De nuevo esta funcionalidad también va a ser asumida por la tarjeta *Echo 5*.

- **Un altavoz:** Situado en la tarjeta de expansión *e-jumper* (Mondada et al., 2009) y conectado con un códec de audio, pensado para trabajar con varios robots y los micrófonos anteriormente mencionados (Mondada and Gribovski, 2008).

Se disponen de los siguientes sistemas de interfaz con el usuario:

- **Comunicación bluetooth:** Permite la comunicación entre el robot y un ordenador y un máximo de 7 robots.
- **Tres LEDs:** Uno indica si el robot está conectado por medio de bluetooth (naranja), y los otros dos señalan si el robot está encendido (verde) y el estado de la batería (rojo). En lo que a este Proyecto Fin de Carrera atañe, el segundo es importante puesto que se ha observado que una alimentación deficiente afecta severamente al rendimiento de la tarjeta *Echo 5*.
- **Un conector para programación:** Permite la programación del robot a través del ICD de Microchip³.
- **Un receptor de infrarrojos:** Situado en la tarjeta de expansión *e-jumper* que permite al robot recibir señales de un mando a distancia.
- **Comunicación RS232:** Permite la comunicación entre el robot y un ordenador a través de un puerto serie.
- **Un botón de reset:** Realiza un reset hardware al robot. Este reset reinicia el programa, así como permite la entrada del bootloader para cargar nuevos programas.

³Web de Microchip: <http://www.microchip.com>

XRS TX	1	2	RS TX	BATT1	1	2	BATT2
XRS RX	3	4	RS RX	EX_PGC	3	4	EX_PGD
SEL0	5	6	SEL2	VBAT	5	6	VBAT
SEL1	7	8	SEL3	EX_MCLR	7	8	REMOTE
XBodyLed	9	10	BodyLed	GNDBAT	9	10	GNDBAT
XAudioOn	11	12	AudioOn	I2C_SDA	11	12	SPK+
XFrontLed	13	14	FrontLed	I2C_SCL	13	14	SPK-
XBT_RX	15	16	BT_RX	GND_3.3A	15	16	GND_3.3B
XBT_TX	17	18	BT_TX	V3.3A	17	18	V3.3B
XBattLow	19	20	BattLow	CamClk	19	20	Y0
XLED3	21	22	LED3	CamReset	21	22	Y1
XSDI	23	24	EX_SDI	VSYNC	23	24	Y2
XSDO	25	26	EX_SDO	Href	25	26	Y3
XFSYNC	27	28	FSYNC	PWDN	27	28	Y4
XMCLK	29	30	MCLK	PCLK	29	30	Y5
XLED5	31	32	LED5	EX_PIC_RESET	31	32	Y6
XAxeX	33	34	AxeX	ENABLE_LDO	33	34	Y7
XAxeY	35	36	AxeY	VanalogA	35	36	VanalogB
XAxeZ	37	38	AxeZ	RS_RX_10V	37	38	RS_TX_10V
V3.3C	39	40	GND_3.3C	GNDanalogA	39	40	GNDanalogB

Figura 2.3: Señales transmitidas por los conectores del bus de comunicación superior del robot *e-puck*.

- **Un conmutador de 16 posiciones:** Situado en la tarjeta de expansión *e-jumper* permite al usuario seleccionar comportamientos o parámetros previamente programados en el robot.

Además de disponer de los mencionados elementos, el robot *e-puck* también está equipado de unos buses de comunicación para dotarlo de nuevas funcionalidades mediante tarjetas de expansión. Hay tres tipos de tarjetas que pueden desempeñar este cometido, tarjetas de circuito situadas en el espacio del chasis del robot y conectadas al robot mediante un bus I2C (denominadas *bottom*), tarjetas superiores que no habilitan conectores para que el bus de comunicación continúe al estar su cara superior ocupada con otros componentes (denominadas *top*) y por último, y el que será el caso de la tarjeta *Echo 5*, tarjetas superiores que permiten que el bus de expansión continúe al habilitar conectores tanto en su cara inferior como superior (denominadas *sandwich*).

Las tarjetas *top* y *sandwich* se conectan con el robot *e-puck* mediante dos buses (ver Figura 2.3), uno que permite realizar o no la conexión de ciertas señales del robot, denominado *Jumper*, y otro que transmite señales de alimentación y comunicación a las tarjetas superiores denominado *Mechanical support*. Estos buses habilitan un bus

I2C y una UART⁴ además de transmitir las señales listadas en el Apéndice A.

En el caso de la tarjeta *Echo 5* la comunicación se realizará por I2C dado que no requiere altos requerimientos de velocidad y así se deja la UART libre para ser usada por otras tarjetas, como la tarjeta *e-RandB*, con requisitos mas restrictivos.

2.3. Software

Los creadores del robot *e-puck* han desarrollado una serie de librerías para controlar todos los periféricos que vienen de serie:

- **e_uart_char.h:** Controla el funcionamiento de las UARTs disponibles en el robot.
- **e_epuck_ports.h:** Controla las definiciones de los puertos del microcontrolador del robot.
- **e_init_port.h:** Inicializa los puertos del robot.
- **e_prox.h:** Controla el funcionamiento de los sensores de proximidad por infrarrojo situados alrededor del robot.
- **e_motors.h:** Controla el funcionamiento de los dos motores paso a paso que mueven el robot.
- **e_agenda.h:** Controla las interrupciones del microcontrolador del robot.
- **e_led.h:** Controla los LEDa del robot.
- **e_remote_control.h:** Controla la recepción de comandos desde un control remoto mediante el receptor de infrarrojo que también se ha habilitado en la tarjeta *Echo 5*.
- **e_accelerometer.h:**Controla el funcionamiento de los acelerómetros del robot.

⁴Un sistema para implementar comunicación asíncrona entre dos dispositivos

- **btcom.h:** Controla la comunicación por bluetooth, que permite comunicar el robot con un ordenador.
- **e_ground_sensor.h:** Controla los sensores de suelo de la tarjeta de expansión situada en la parte inferior del robot, esta tarjeta no viene de serie con el robot, pero ha de mencionarse dada su gran utilidad y el hecho de que está presente en todos los robots *e-puck* del laboratorio.

También se ha puesto a disposición de los usuarios un compilador para crear un fichero binario a partir del programa principal creado para el robot *e-puck* (*main.c*). Para realizar la compilación se utiliza una modificación de *GCC*, esta modificación así como la inclusión del compilador de los paquetes *debian* han sido realizadas por el desarrollador D. Alexandre Campo⁵.

La descarga de los binarios al robot se realiza mediante el enlace bluetooth. Se ha desarrollado una aplicación (*epuckupload*) que comprueba la MAC del robot, crea el enlace con el mismo y descarga el binario. Para recibir los datos enviados por el robot se ha desarrollado otra aplicación (*ircomtest*), que permite recibir en el ordenador los datos enviados por el enlace bluetooth del robot⁶.

⁵Para más información sobre el “port” de los ficheros y los paquetes *debian* generados ver: <http://iridia.ulb.ac.be/e-puck/wiki/tiki-index.php>

⁶Página del Laboratorio de Arquitecturas Robóticas Inteligentes donde se encuentra este software: <http://www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/lari/>

Capítulo 3

Ultrasonidos

La tarjeta *Echo 5* utiliza unas cápsulas de ultrasonidos para realizar la detección de obstáculos. En este apartado se va a tratar su naturaleza y limitaciones, así como los modelos disponibles en el mercado, sus características, y cuales de estas últimas son decisivas para el diseño de la tarjeta *Echo 5*.

3.1. Introducción

El ultrasonido es una onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del espectro auditivo del oído humano (aproximadamente 20.000 Hz). En la naturaleza, algunos animales hacen uso de ellos para conseguir el mismo objetivo que este proyecto, detectar obstáculos. Esto es debido a que las ondas acústicas a altas frecuencias son reflejadas con mayor intensidad por los objetos.

Los ultrasonidos son conocidos desde el siglo XVII, y hoy en día son muy utilizados en la industria (medición de distancias, caracterización interna de materiales, ensayos clínicos no destructivos, etc...) por ello se dispone de una gran variedad de emisores y receptores.

Esencialmente, una cápsula de ultrasonidos tiene un elemento (por ejemplo un cristal en los modelos piezoeléctricos) que vibra al ser excitado con una señal eléctrica. Esta vibración puede ser la propia cobertura de la cápsula en los modelos cerrados o una membrana protegida por una rejilla o similar en las abiertas.

Cuando se aplica una señal eléctrica para hacer funcionar las cápsulas de

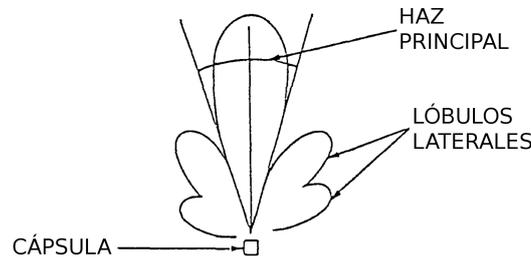


Figura 3.1: Diagrama de radiación de las cápsulas, tanto emisora como receptora.

ultrasonidos hay que tener en cuenta que tiene que oscilar exactamente a la frecuencia para la que ha sido diseñada la cápsula, ya que estas son muy selectivas en cuando se trata de eficiencia al transformar la señal.

El sistema de detección se basará en la emisión de un pulso de ultrasonidos cuyo lóbulo es de forma cónica. Midiendo el tiempo entre la emisión y la recepción del eco se puede establecer la distancia entre las cápsulas y el obstáculo detectado mediante la Ecuación 3.1.

$$d = \frac{1}{2}Vt \quad (3.1)$$

Donde $V = 343m/s$ es la velocidad del sonido a $20^{\circ}C$, y t es el tiempo transcurrido desde el comienzo de oscilación, hasta la recepción del pulso

3.2. Consideraciones fundamentales

Debido a la naturaleza física de los ultrasonidos habrá que tener en cuenta los siguientes puntos:

- El lóbulo principal de un emisor de ultrasonidos es de forma cónica (ver Figura 3.1), y el eco recibido indica la presencia de un obstáculo en el campo de acción del emisor, pero no su posición lateral ya que se puede encontrar en cualquier zona del cono acústico. Por lo tanto solo se obtendrá información sobre la distancia al objeto y no su posición espacial.

- La señal de eco recibida por el receptor depende de la cantidad de energía acústica reflejada por el objeto, lo que a su vez depende en gran medida de su geometría y la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie receptora ha de ser comparable a la longitud de la onda de ultrasonido incidente.
- Los factores ambientales también afectan a la señal de eco, la diferencia de temperatura del aire afecta a la velocidad de propagación de la onda.
- La geometría del entorno podrá causar singularidades, como falsos ecos debidos a múltiples rebotes de la señal (efecto conocido como diafonía o *cross talk* (Jiménez and González, 2008)). Dentro de este aspecto es mucho más preocupante la modulación de la señal de eco debida a estos rebotes o al acoplo entre cápsulas. La modulación puede causar que ciertos ecos sean indetectables.
- Las ondas de ultrasonidos tienen el mismo ángulo de incidencia que de reflexión cuando son reflejadas por una superficie, por lo tanto dependiendo del ángulo de las superficies del obstáculo a detectar, este presentará mayor o menor señal de eco o ninguna en absoluto si el ángulo es muy grande. En este caso las superficies rugosas son mas fácilmente detectables debido a la mayor dispersión que causan en la señal sonora.
- Ha de observarse que el funcionamiento de una cápsula emisora situada muy cerca de una receptora causa en esta última cierta resonancia mecánica al transmitir el tren de pulsos (ver Figura 3.2). Ocurre a causa de los lóbulos laterales del diagrama de radiación de la cápsula emisora (ver Figura 3.1), y por ello es muy sensible tanto a los elementos que rodean al emisor como al receptor, así como a la proximidad entre estos. Esta resonancia es muy difícil de evitar mecánicamente, y menos con las restricciones de tamaño del robot *e-puck* (ver Sección 4.1), especialmente al estar las cápsulas de ultrasonidos encerradas entre dos tarjetas de circuito. Así pues, la tarjeta *Echo 5* deberá ser capaz

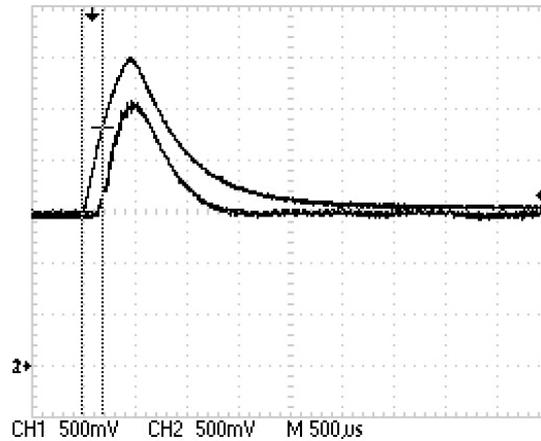


Figura 3.2: Forma de onda de la resonancia. La señal superior es el umbral analógico y los dos cursores verticales delimitan la ventana de emisión del pulso de ultrasonidos (8 ciclos del tren de pulsos de 40kHz).

de detectar ecos dentro de la zona afectada por esta resonancia, ya que tiene gran presencia cuando el rango de medida es pequeño (aproximadamente 2cm). La resonancia se presentará como un pico de señal en el receptor observable en los primeros momentos de emisión. En la Figura 3.2 se puede observar que la curva inferior, que representa la señal recibida por la cápsula receptora al no existir ningún obstáculo, aumenta su valor instantes después de la emisión (limitada temporalmente por los dos cursores verticales). Hay que mencionar que la resonancia aumenta de valor y se retrasa en el tiempo cuanto mayor es la ventana de emisión, puesto que su efecto se va acumulando.

3.3. Necesidades para el Proyecto Fin de Carrera

En lo que respecta a la emisión de ultrasonidos, las necesidades del proyecto son:

- **Medición de distancias pequeñas:** En los alrededores del robot se deberían poder distinguir pequeñas variaciones de distancia hasta por lo menos un centímetro de proximidad.
- **Limitación espacial:** Los materiales usados han de ser lo suficientemente

pequeños como para poder ser utilizados en la pequeña área disponible en una tarjeta de expansión para el robot *e-puck* (ver Sección 2.2).

- **Apertura del haz:** Dada la forma circular de la tarjeta y su pequeño tamaño, solo se podrán emitir haces de ultrasonidos en una cantidad limitada de direcciones, por lo tanto, en la búsqueda de los materiales adecuados primarán aquellos que nos permitan emitir un haz con una directividad limitada.
- **Consumo energético:** Al ser un sistema usado en un robot con una capacidad limitada de batería (ver Sección 2.2), el consumo energético debe reducirse lo máximo posible para no comprometer la autonomía del mismo.

3.4. Tipología

En este apartado se caracterizarán los dispositivos disponibles en el mercado para la emisión y detección de ultrasonidos, seleccionando de este modo las características más adecuadas.

En el mercado existen diferentes tipos de ultrasonidos en base a la funcionalidad, apertura, tamaño, cápsula o frecuencia de oscilación. Se realizará un análisis de cada uno de estos factores para conseguir hallar el tipo de cápsulas que más se ajusten a las necesidades del proyecto.

3.4.1. Funcionalidad

Respecto a la funcionalidad de las cápsulas a utilizar, se puede realizar la detección mediante emisores y receptores o mediante transceptores. En el primer caso necesitamos dos cápsulas diferentes, la emisora está especialmente diseñada para transformar la señal eléctrica en una onda acústica y la receptora para realizar la tarea inversa. Al estar diferenciadas, el circuito electrónico para hacerlas funcionar es más sencillo, y no se depende del tiempo de relajación de la membrana emisora cuando se trata de limitar el sistema en distancia mínima. Por otra parte, los transceptores realizan la doble tarea de emisión y recepción, presentando un ahorro de espacio,

pero complicando el diseño al compartir la señal emitida y recibida el mismo medio. Además, la cápsula no puede comenzar una detección fiable hasta que la membrana, que es usada tanto para emitir como para recibir, deje de vibrar. Este tiempo de relajación es del orden de los milisegundos, lo que hace el uso de transceptores inviable para las necesidades del proyecto, ya que impondrían una distancia mínima muy superior a la necesaria (1.2ms de tiempo de relajación equivalen a 20cm).

3.4.2. Cápsula

Respecto al hecho de que la cápsula sea abierta o cerrada, la diferencia entre las dos posibilidades es que las cápsulas cerradas están protegidas contra el polvo y otros agentes contaminantes al ser el elemento vibrante la propia carcasa de la cápsula, mientras que en las abiertas la membrana vibradora está expuesta al exterior. Esto hace que necesiten mas potencia que sus equivalentes cerradas para realizar el mismo tipo de trabajo en el caso de las transmisoras y ser menos sensibles en el caso de las receptoras. Las cápsulas cerradas tienen un diagrama de dispersión menos concentrado que sus equivalentes abiertas, además, éste está dividido en varios lóbulos de importante magnitud. Dadas estas características, y dado que la tarjeta no va a operar en entornos hostiles, la mejor elección en cuanto a su diagrama de dispersión y su consumo energético son las cápsulas abiertas.

3.4.3. Tamaño

Otro aspecto a tener en cuenta es el tamaño, cuanto mas grande es la cápsula, mayor es la membrana, lo que hace que requiera, y por extensión acepte, más potencia de funcionamiento. Esto tiene implicaciones directas en cuanto a consumo y distancia máxima detectable, aumentando las dos cuanto mayor es la cápsula. Por otra parte cuanto mayor es el elemento vibrante mayor es la directividad de su diagrama de dispersión. Así pues, teniendo en cuenta la importante restricción en cuanto a tamaño y consumo que impone el formato de la tarjeta, y la poca directividad y distancia de detección necesaria, la mejor opción es una cápsula tan pequeña como sea posible.



Figura 3.3: Cápsulas SQ-40-T-10B y SQ-40-R-10B, nótese que tanto el emisor como el receptor tienen el mismo encapsulado.

3.4.4. Frecuencia de Oscilación

Para finalizar se ha de decidir a qué frecuencia van a operar las cápsulas, buscando una mayor disponibilidad comercial de materiales así como una banda de frecuencias que sea altamente conocida como para poder encontrar documentación suficiente, se ha decidido utilizar cápsulas de ultrasonidos sintonizadas a 40 KHz.

3.4.5. Selección de cápsulas

En resumen, el sistema de sensores del proyecto constará de parejas de cápsulas emisoras y receptoras abiertas y tan pequeñas como sea posible. Siendo los modelos escogidos el *SQ-40-T-10B* y *SQ-40-R-10B* (ver Figura 3.3) de Multicomp, propiedad de Farnell¹, por ajustarse a estas directrices. Se ha incluido el datasheet de las cápsulas en el Apéndice B.

¹Página web de Farnell, distribuidor de Multicomp: <http://es.farnell.com>

Capítulo 4

La tarjeta *Echo 5*

En este Capítulo se exponen los diseños del hardware, firmware y librerías implementadas en el Proyecto Fin de Carrera.

4.1. Hardware

Todos los esquemáticos de los diseños hardware se encuentran en el Apéndice C.

4.1.1. Requisitos

La tarjeta *Echo 5* (ver Figura 4.1) está gobernada por el microcontrolador dsPIC33FJ256GP710PT¹, que dispone de detectores de flanco, comparadores de salida (usados para la generación de una señal PWM), conversores A/D y buses de comunicación SPI e I2C. Las funciones fundamentales del hardware han de ser:

- Transformar la señal digital que el microcontrolador es capaz de crear en un tren de pulsos a 40 KHz de amplitud suficiente como para poder activar el emisor de ultrasonidos. La señal digital será un pulso que determinará el tiempo de emisión del emisor.
- Transformar el eco recibido por el receptor de ultrasonidos en una señal digital que pueda ser detectada por el microcontrolador. La señal digital consistirá en

¹Página web de Microchip: <http://www.microchip.com>



Figura 4.1: Tarjeta *Echo 5*.

un flanco de subida detectable por uno de los detectores de flanco de los que dispone el microcontrolador.

Además, junto con estos requisitos básicos, se han de cumplir otros directamente relacionados con ellos o con las funcionalidades fundamentales del robot *e-puck*:

- Hay que proporcionar una señal de umbral al circuito que adecúe la señal de eco para el microcontrolador. Esta señal será controlada digitalmente por un pin del microcontrolador. El umbral ha de tener una forma que por un lado evite que la resonancia mecánica entre cápsulas desencadene una falsa detección, y por otro nos permita detectar el eco mas tenue posible, para poder detectar objetos pequeños.
- Se ha de proveer al circuito de la alimentación adecuada, teniendo en cuenta que desde el robot a la tarjeta llega directamente la tensión de la batería, unos 3,5 V. En la tarjeta se habrá de tener una tensión estable de 3,3 V para operar los diversos circuitos integrados. Junto a esto, para la emisión de ultrasonidos se habrá de obtener una tensión comprendida entre 9 y 10 V. Por último deberá haber un LED que indique que la tarjeta está alimentada.

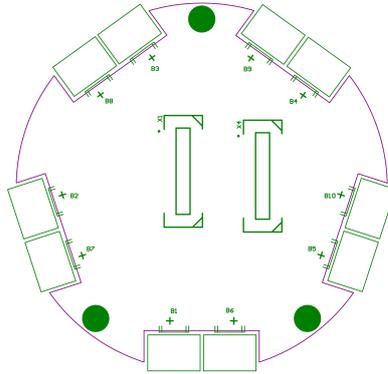


Figura 4.2: Elementos fijos de la tarjeta *Echo 5*, indicados en verde.

- El microcontrolador estará conectado con el robot mediante una conexión I2C, junto con esto habrá que proveer el resto de conexiones necesarias como la señal de reseteo, que deberá ser activable desde la tarjeta mediante un interruptor.

4.1.2. Restricciones

Dada la naturaleza del proyecto, el diseño de la tarjeta estará sujeto a ciertas restricciones impuestas por el hecho de tratarse de una tarjeta de expansión de funcionalidades para el robot *e-puck*.

La primera de ellas es el área. La tarjeta con todos los componentes soldados no debe sobresalir de la planta del robot, para evitar impactos contra otros robots y obstáculos, con lo que la tarjeta debe permanecer contenida en una circunferencia de 70 mm de diámetro. A esta limitación en área hay que añadir la posición fija tanto de los taladros para situar los tornillos de anclaje, como los los conectores del bus que comunica con el robot y las cápsulas de ultrasonidos (ver Figura 4.2).

A su vez, habrá que tener en cuenta que los emisores y receptores de ultrasonidos habrán de estar situados en el plano horizontal, siendo necesario realizar un troquelado en la tarjeta para tal efecto, restando con esto área utilizable. Es necesario colocarlos de esta forma cuando se tiene en cuenta que en caso de haber varias tarjetas de expansión en el robot, estas están normalmente separadas 9 mm entre una y otra. Atendiendo a este último punto habrá que tener en cuenta el orden de colocación que

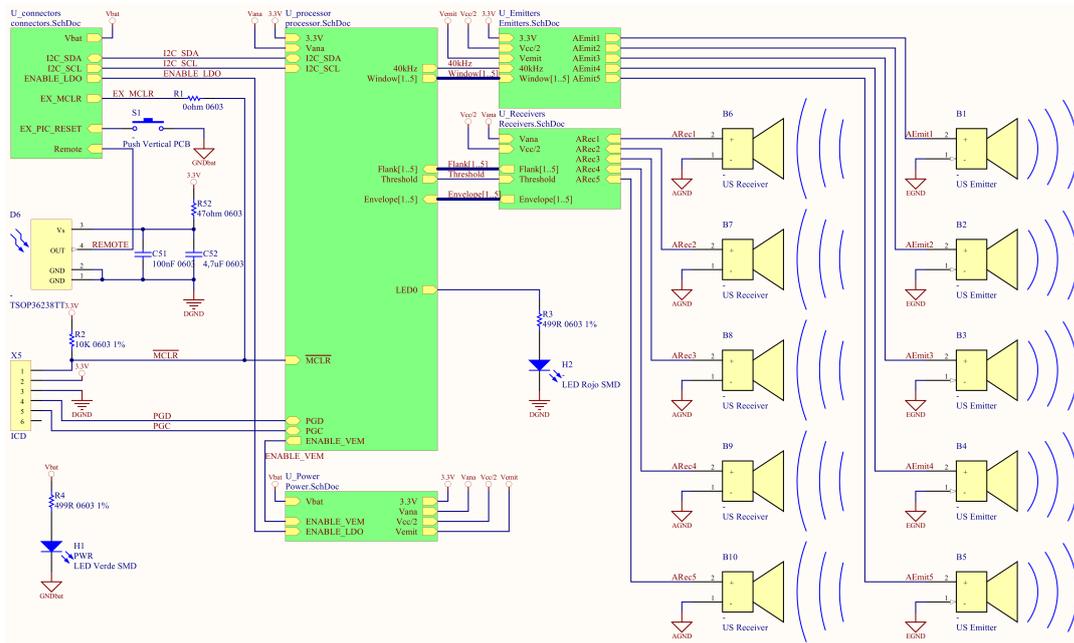


Figura 4.3: Esquemático de la tarjeta *Echo 5*. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

tendrán la tarjeta *Echo 5* y la tarjeta *e-RandB*. Observando la distribución de los componentes de la tarjeta *e-RandB* se aprecia que requiere más espacio por la parte superior al encontrarse en dicha cara todos los receptores/emisores de infrarrojos, mientras que en la inferior apenas sobresale ningún componente. Así pues esta tendrá que situarse sobre la tarjeta *Echo 5*, pudiendo ser a la inversa si se dota de espacio suficiente.

La segunda dimensión en cuanto a restricciones es el consumo energético. Al tratarse de un robot alimentado con una batería, se tratará de economizar el gasto energético lo máximo posible para dotar a éste de la mayor autonomía.

4.1.3. Diseño

Arquitectura: En primer lugar, se va a establecer la arquitectura general de la tarjeta. Como se puede observar en la Figura 4.3, la tarjeta va a disponer de un microcontrolador que gobernará la misma. El microcontrolador se comunica con el

robot mediante dos conectores, con los que comparte las señales necesarias para utilizar el protocolo I2C (I2C_SDA, I2C_SCL). Con estos también comparte la señal de reset para programación (\overline{MCLR}). A su vez se dispone de un conector, donde se conecta el debugger (ICD) para habilitar su programación, con el que el microcontrolador comparte las señales PGC, PGD y \overline{MCLR} . Un pin del microcontrolador estará conectado con un LED, su utilidad será permitir la monitorización física de ciertas variables y eventos gestionados por el microcontrolador para facilitar su programación y mas tarde añadir información durante el funcionamiento de la placa (ver Sección 4.2).

La gestión de energía se realiza mediante la señal ENABLE_LDO obtenida de los conectores, que indica al circuito de alimentación si puede alimentar a la tarjeta o no. A la vez, a este circuito va a parar desde el microcontrolador la señal ENABLE_VEM que permite activar o desactivar el elevador de tensión.

Los emisores y receptores estarán situados en 5 pares situados alrededor de la tarjeta. Para poder hacerlos funcionar habrá que realizar un acondicionamiento entre las señales del microcontrolador y las de las cápsulas de ultrasonidos.

Entre el microcontrolador y los emisores se encuentra el circuito de emisión, que recibe del microcontrolador la señal de 40kHz (denominada 40kHz) y las ventanas de emisión (Window[1..5]). Este circuito se encargará de excitar los emisores mientras dure la señal de emisión.

Entre el microcontrolador y los receptores se encuentra el circuito de recepción. Están comunicados por la señal de umbral (Threshold), que indica a los comparadores del circuito de recepción que valor comparar con la señal recibida, las señales de flanco (Flank[1..5]), que pasan a tener valor alto en el momento en que se recibe el eco, permitiendo que el microcontrolador lo capture en el momento preciso. Por último, al microcontrolador también le llegan las señales del filtrado envolvente de la señal recibida (Envelope[1..5]), que estarán conectadas a los conversores analógico-digital del microcontrolador para permitir posibles tratamientos de estas señales.

Se dispondrá de un circuito encargado de adecuar las diferentes alimentaciones

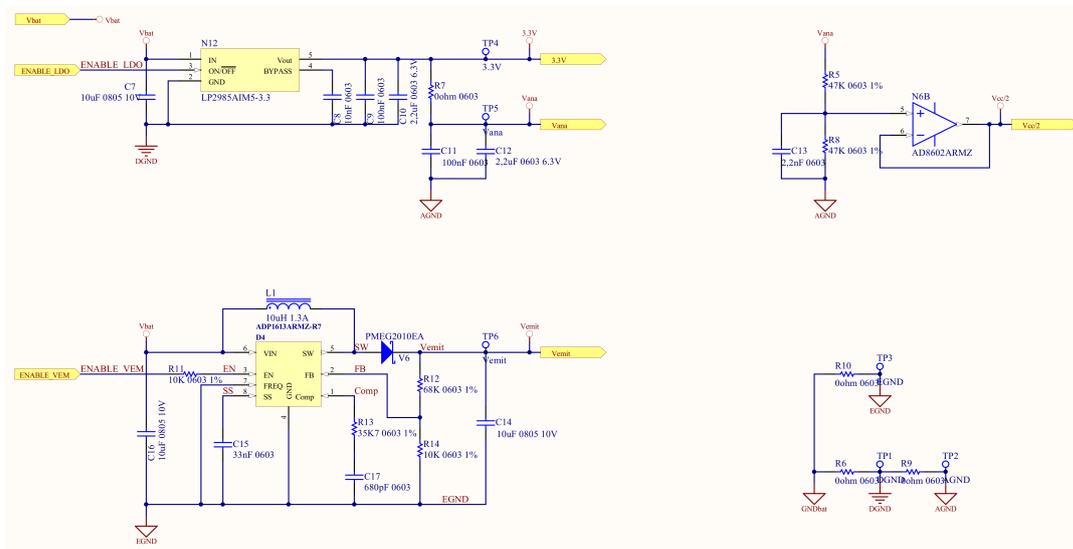


Figura 4.4: Esquemático de los circuitos de alimentación. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

que harán falta para que funcionen los distintos circuitos. A este circuito le llega la tensión de la batería del robot *e-puck*, que también alimentará un LED para indicar que la tarjeta está en funcionamiento.

También se ha habilitado un sensor de infrarrojo para poder enviar comandos al robot mediante un mando a distancia. Se ha implementado, a pesar de que esta funcionalidad está disponible tanto en la tarjeta *e-RandB* como en la *e-Jumper*, para permitir el uso del mando a distancia aunque el usuario sólo disponga de la tarjeta *Echo 5* como única tarjeta de expansión para el robot *e-puck*.

Por último, se ha dispuesto un pulsador para poder resetear el robot desde la tarjeta. A él llega la señal (EX_PIC_RESET) desde el circuito de conectores.

A continuación se explicará el diseño de cada uno de los subcircuitos, comenzando con el de alimentación.

Alimentación: El circuito de alimentación (ver Figura 4.4) ha de suministrar, a partir de la tensión de la batería del robot *e-puck*, las siguientes alimentaciones:

- **Alimentación digital de 3.3V (3.3V):** Con esta tensión se alimentarán tanto

los circuitos integrados como el microcontrolador y las puertas AND. Tiene su propio plano de masa y alimentación en la tarjeta (ver Figura 4.5). Se obtiene mediante una fuente de alimentación lineal a partir de la tensión de la batería.

- **Alimentación analógica de 3.3V (Vana):** Con esta tensión se alimentarán tanto los circuitos analógicos de la tarjeta, como todo el sistema de recepción. Tiene su propio plano de masa y alimentación en la tarjeta (ver Figura 4.5). Se obtiene a partir de la alimentación digital conectando su plano al de esta por un solo punto y dotándola de condensadores, de modo que estén lo mas aisladas posible en cuanto a interferencias.
- **Alimentación de emisión de 9.6 V (Vemit):** Con esta tensión se alimentarán los amplificadores operacionales que generan la señal que controla los emisores y la carga del circuito generador del umbral de recepción. Tiene su propio plano de masa y alimentación en la tarjeta (ver Figura 4.5). Es generada mediante un convertor DC-DC del que se obtendrá una tensión de 9.6 V a partir de la tensión de la batería. Este tipo de convertor requiere un posicionamiento cuidadoso en la tarjeta, al ser muy vulnerable a las interferencias.
- **Tensión de referencia con valor mitad de la tensión de alimentación ($V_{cc}/2$):** Se obtiene a partir de la alimentación analógica. Con ella se alimenta un divisor de tensión que a su vez es la entrada de un amplificador operacional en modo seguidor de tensión.

Se puede observar en la Figura 4.4 que las masas están conectadas mediante resistencias y en un orden específico para evitar interferencias. A la de batería están conectadas las de emisión y alimentación digital, y a esta última la de alimentación analógica.

La generación de energía para la tarjeta está controlada desde el robot *e-puck* mediante la señal `ENABLE_LDO`, y la generación de la tensión de emisión desde el microcontrolador mediante la señal `ENABLE_VEM`.

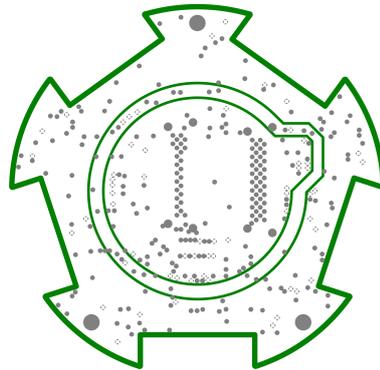


Figura 4.5: Planos de alimentación de la tarjeta *Echo 5*. Desde el centro al exterior: alimentación digital, alimentación de emisión y alimentación analógica.

Por último ha de mencionarse el punto crítico que supone el diseño hardware de la red del elevador de tensión, cuyos componentes habrán de localizarse lo más próximos posibles entre si y comunicados mediante planos de señal que permitan tanto una resistencia a interferencias como una mejor disipación de calor.

Conectores: El circuito de los conectores es muy simple (ver Figura 4.6), habilita la interconexión entre sus pines que de otra forma sería realizada por la tarjeta *e-Jumper*², que aun viniendo de serie con el robot *e-puck*, pudiera no ser utilizada junto con la tarjeta *Echo 5*. Por otra parte se extraen de los conectores las señales necesarias (ver Apéndice A) para comunicar y alimentar la tarjeta, estas señales son:

- **EX_MCLR:** Señal de reseteo durante la programación.
- **I2C_SDA e I2C_SCL:** Señales de datos y reloj respectivamente, permitirán la conexión con el robot mediante el protocolo I2C.
- **EX_PIC_RESET:** Señal para resetear el robot desde la tarjeta.

²La tarjeta *e-Jumper*, además de interconectar los pines, dota al robot *e-puck* de un altavoz, un conmutador, un interruptor de reseteo y un receptor de infrarrojo para el uso de un mando a distancia. Las funcionalidades del interruptor y el receptor de infrarrojo también están implementada tanto en la tarjeta *e-RandB* como en la tarjeta *Echo 5*.

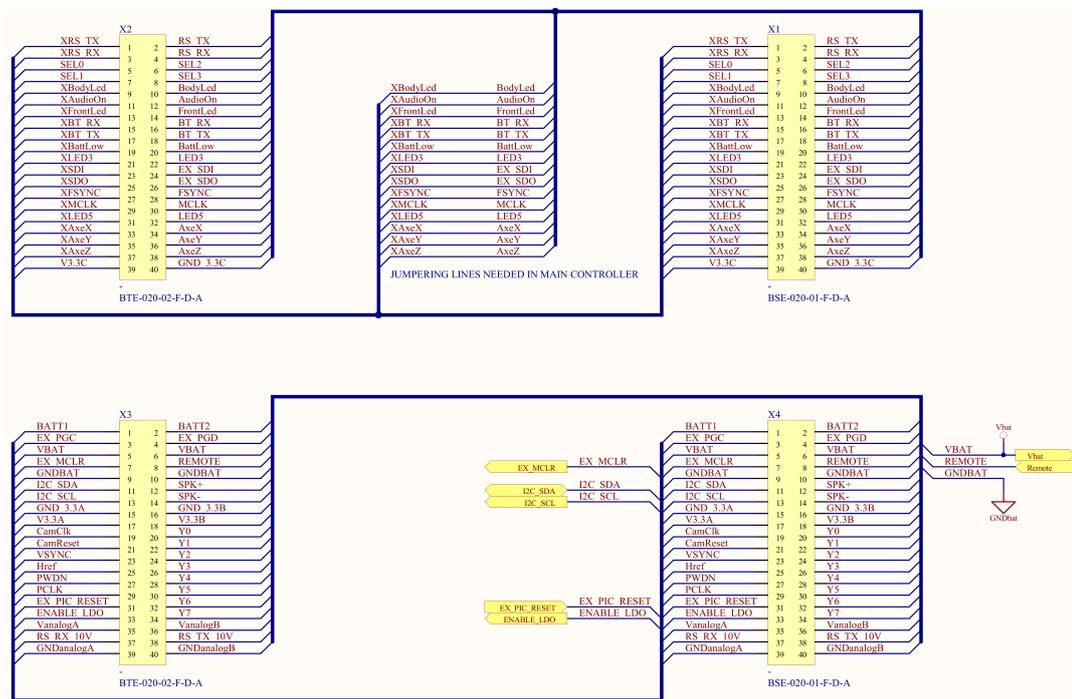


Figura 4.6: Esquemático de la conexión con el bus del robot. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

- **ENABLE LDO:** Indica si el nivel de batería es demasiado bajo en el robot *e-puck*. Esta señal hace que se corte la alimentación si la batería está muy baja.
- **VBAT:** La tensión de la batería.
- **REMOTE:** La señal del receptor de infrarrojo para el mando a distancia.
- **GNDBAT:** La masa de la batería.

Microcontrolador: Este circuito (ver Figura 4.7), muestra el conexionado del microcontrolador a cuyos pines están conectadas las alimentaciones y todas las señales necesarias. Podemos observar que se ha habilitado la posibilidad de montar un circuito para generar una tensión de referencia. Sus componentes no se montan en un principio ya que durante los experimentos se ha observado que la señal de referencia del circuito analógico es lo suficientemente estable y limpia. También es destacable la necesidad

tanto de un oscilador de cristal para estabilizar la frecuencia de funcionamiento del microcontrolador, como de un gran número de condensadores para estabilizar su tensión de alimentación.

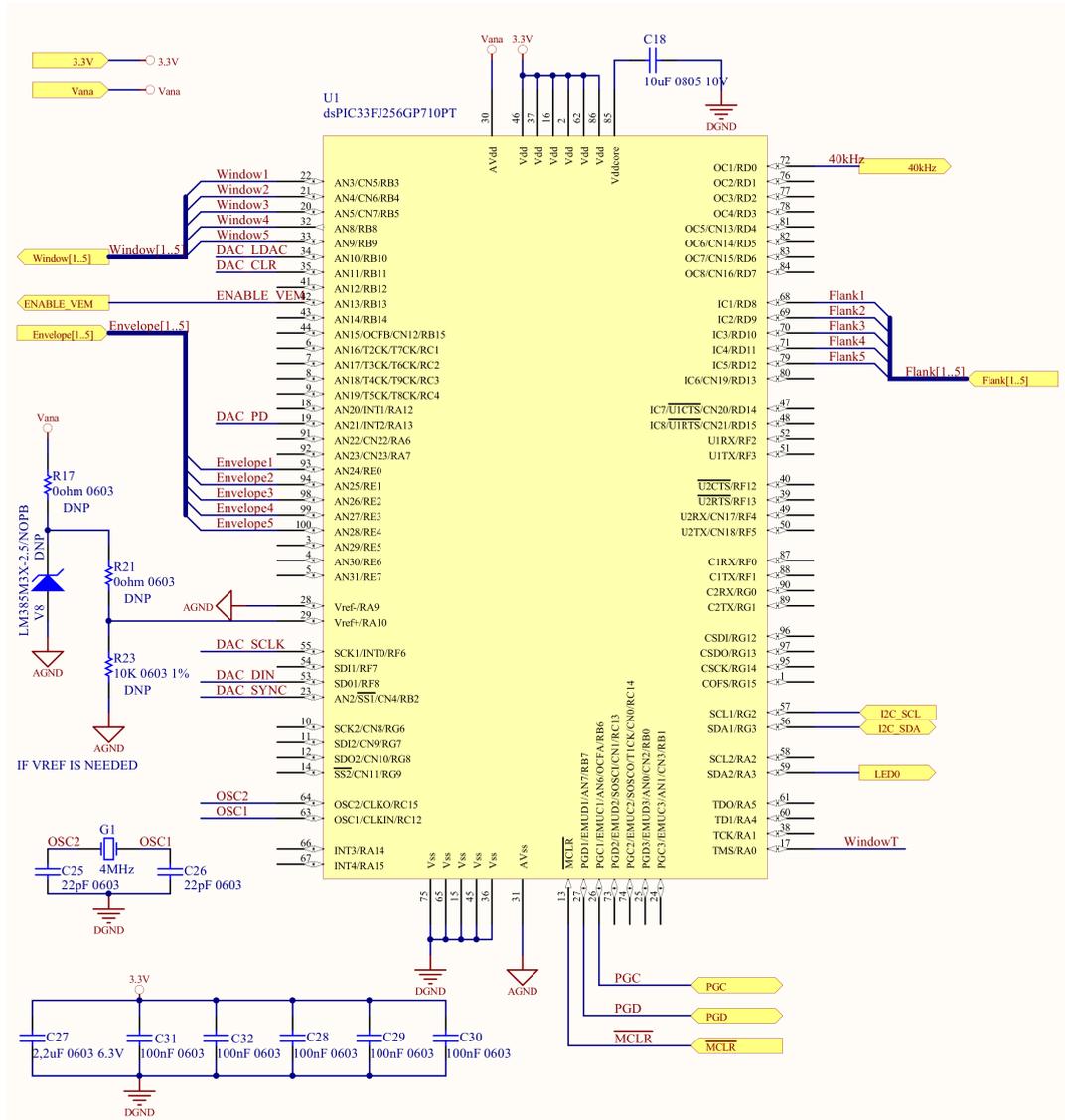


Figura 4.7: Esquemático del conexionado del microcontrolador. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

El microcontrolador gestiona las siguientes señales:

- **Vana y AGND:** Alimentación y masa analógica.
- **3.3V y DGND:** Alimentación y masa digital.
- **OSC1 y OSC2:** Señales que comunican el microcontrolador con el cristal que gobierna su frecuencia de funcionamiento.
- **PGC y PGD:** Señales para comunicar el microcontrolador con el el debugger (ICD).
- **$\overline{\text{MCLR}}$:** Señal de reseteo durante la programación también controlada por el debugger (ICD).
- **ENABLE_VEM:** Selecciona si ha de generarse la tensión de emisión en el circuito de alimentación mediante el elevador de tensión.
- **LED0:** Señal para controlar un LED para monitorizar variables o eventos.
- **Window[1..5]:** Señales que gobiernan la emisión de cada una de las cinco cápsulas.
- **Envelope[1..5]:** Señal de eco recibida convenientemente amplificada y pasada por un detector de envolvente para cada uno de los cinco receptores.
- **40kHz:** Señal de 40kHz que será modulada en el circuito de emisión.
- **Flank[1..5]:** Flancos que indican la recepción de un eco por parte del la respectiva cápsula receptora.
- **I2C_SDA e I2C_SCL:** Señales de datos y reloj respectivamente del bus I2C.
- **WindowT:** Señal que controla la generación del umbral analógico.
- **DAC_LDAC, DAC_LDAC, DAC_PD, DAC_SCLK, DAC_DIN y DAC_SYNC:** Señales que controlan el DAC encargado de general el umbral de forma digital.

Umbral: Se van a detectar elementos próximos a las cápsulas mediante el uso de un umbral dinámico que se ajuste a la forma de onda de la señal recibida y pasada por un filtro detector de envolvente. Hay que tener en cuenta que los distintos pares de cápsulas tendrán una resonancia inevitablemente diferente debido a la variabilidad en el montaje.

En la Figura 4.8 se muestran dos circuitos generadores del umbral, separados mediante unas resistencias a modo de jumper (R15 y R16). El circuito inferior generará la tensión de umbral a partir de un pulso generado por el microcontrolador (WindowT). Para esto, el pulso es amplificado hasta la tensión de emisión (Vemit, 9.6 V), y luego se usa esa tensión para atacar una red de resistencias y condensadores.

El objetivo de esta red es obtener una señal de forma que el umbral se sitúe por encima del pico de resonancia mecánica entre cápsulas en todo momento. En la Figura 4.9 se puede observar como será la forma de onda al producirse el eco a distintas distancias para las cápsulas seleccionadas, especialmente en la zona de resonancia, donde el eco amplificado podrá llegar a saturar el rango dinámico de la señal sin que influya la forma del umbral. Es crucial que el valor de la tensión umbral se mantenga en todo momento, especialmente en su máximo, entre el valor máximo de la señal recibida (la tensión de alimentación, 3.3 V) y el valor de la resonancia mecánica. De este modo se puede comparar el umbral con la señal recibida, aunque ésta tenga el valor de la alimentación al estar saturando los amplificadores de recepción.

La resistencia R20 controla la amplitud del pico del umbral mientras que la resistencia R18 controla el suavizado de la curva de carga del condensador. Si a esto se añade el control desde el microcontrolador de la duración de la ventana de emisión, también se puede controlar la dilatación temporal de la señal.

Con el divisor formado por las resistencias R19 y R22 se sitúa el valor de base del umbral. Se ha de notar que dado el uso del diodo si se tomara $V_{cc}/2$ para obtener este valor la línea de base no se correspondería con $V_{cc}/2$, por lo que se ha debido adaptar el valor. Además si el tiempo de ciclo de captura es muy largo, al descargarse completamente el condensador se pueden producir errores al ser activado

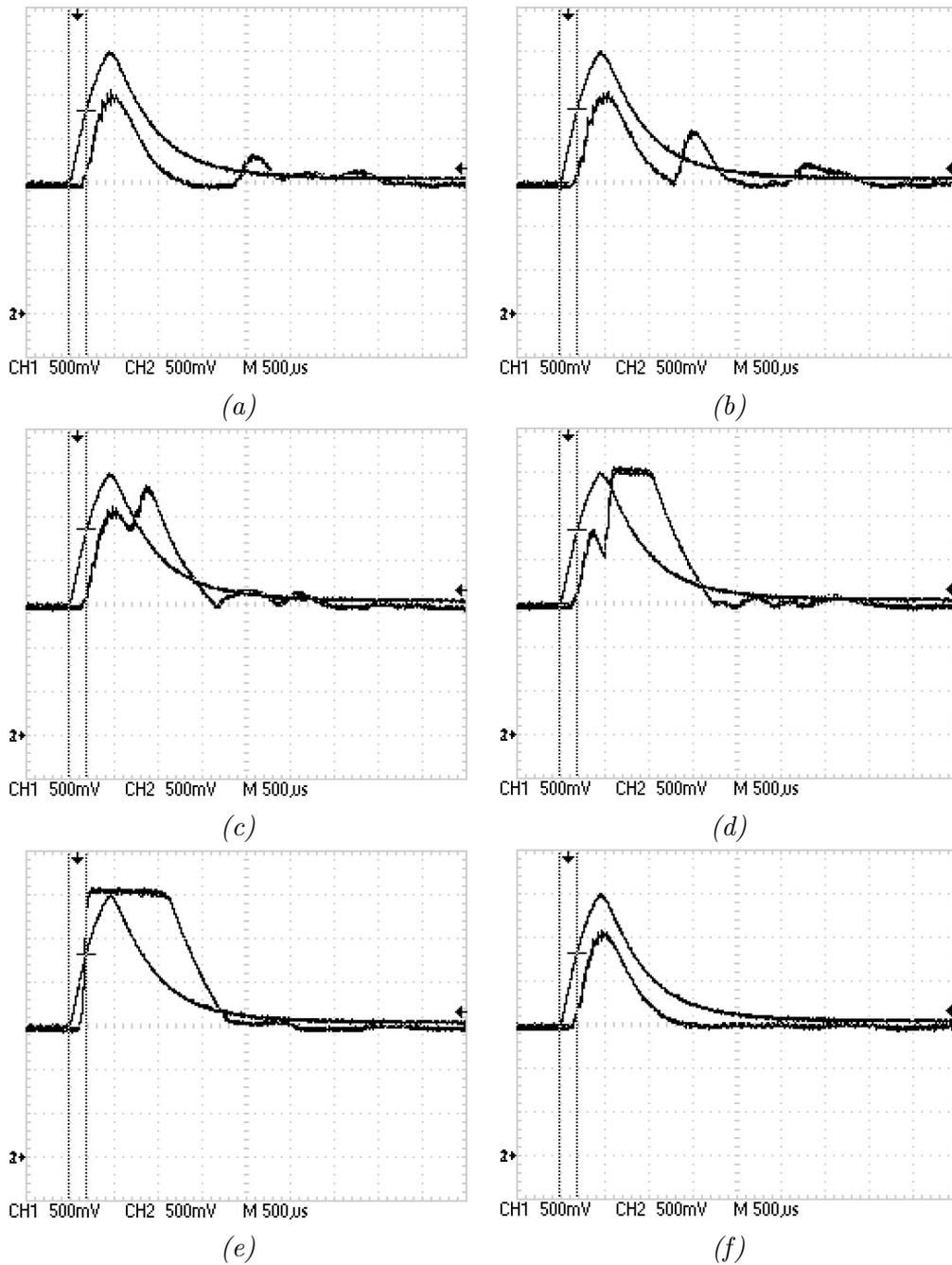


Figura 4.9: Señal recibida con un obstáculo situado a (a) 30 cm, (b) 20 cm, (c) 10 cm, (d) 5 cm, (e) 1 cm y (f) fuera de rango del par de cápsulas. La señal superior es el umbral analógico y los dos cursores verticales delimitan la ventana de emisión del pulso de ultrasonidos (8 ciclos).

El circuito superior de la Figura 4.8 muestra un DAC (convertor analógico-digital), cuya salida puede sustituir mediante una resistencia de $0\ \Omega$ a modo de jumper a la del circuito analógico. Su razón de ser es el poder hacer pruebas con este sistema en caso del que el umbral generado de forma analógica no sea eficaz para ciertas aplicaciones, debido a que con la red anteriormente descrita, el umbral es idéntico para todos los pares de cápsulas. Con esto se espera pretende dotar de flexibilidad a la tarjeta Echo 5 a la hora de generar el umbral de comparación de una manera digital.

Por último, hay que señalar que la tarjeta no podrá estar situada inmediatamente encima del robot, puesto que el anillo paragolpes refleja los lóbulos secundarios del diagrama de radiación de las cápsulas aumentando considerablemente el efecto de la resonancia.

Circuito de Emisión: El circuito de emisión se basa en cinco circuitos idénticos (ver Figura 4.10). Estos constan de una puerta AND a la que llegan la señal de 40 kHz (denominada 40kHz) y las ventanas de emisión (Window[1..5]), de modo que su salida será un tren de pulsos de 40Khz con una duración limitada al ser modulado por el pulso de emisión (ver Figura 4.11). Esta salida es amplificada por un amplificador operacional operando en modo comparador, que compara esta señal con una tensión de referencia con valor igual a la mitad de la tensión de alimentación ($V_{cc}/2$). Su salida será el tren de pulsos de 40 Khz con una amplitud igual a la tensión con la que se está alimentando (V_{emit}), con el que los emisores funcionarán cerca de su punto óptimo de trabajo.

Las entradas de la puerta AND sobrante se han conectado a masa para reducir su consumo. Este es un buen momento para comentar que debido a que el circuito está equipado con cinco pares de emisores y receptores, se ha decidido obtener los amplificadores operacionales y puertas AND en encapsulados que contienen dos de estos elementos. Esto hace que en este caso una puerta AND no sea utilizada dado el número impar de subcircuitos. Las otras situaciones a tener en cuenta son la reutilización de la segunda puerta del operacional N9 para el circuito de generación

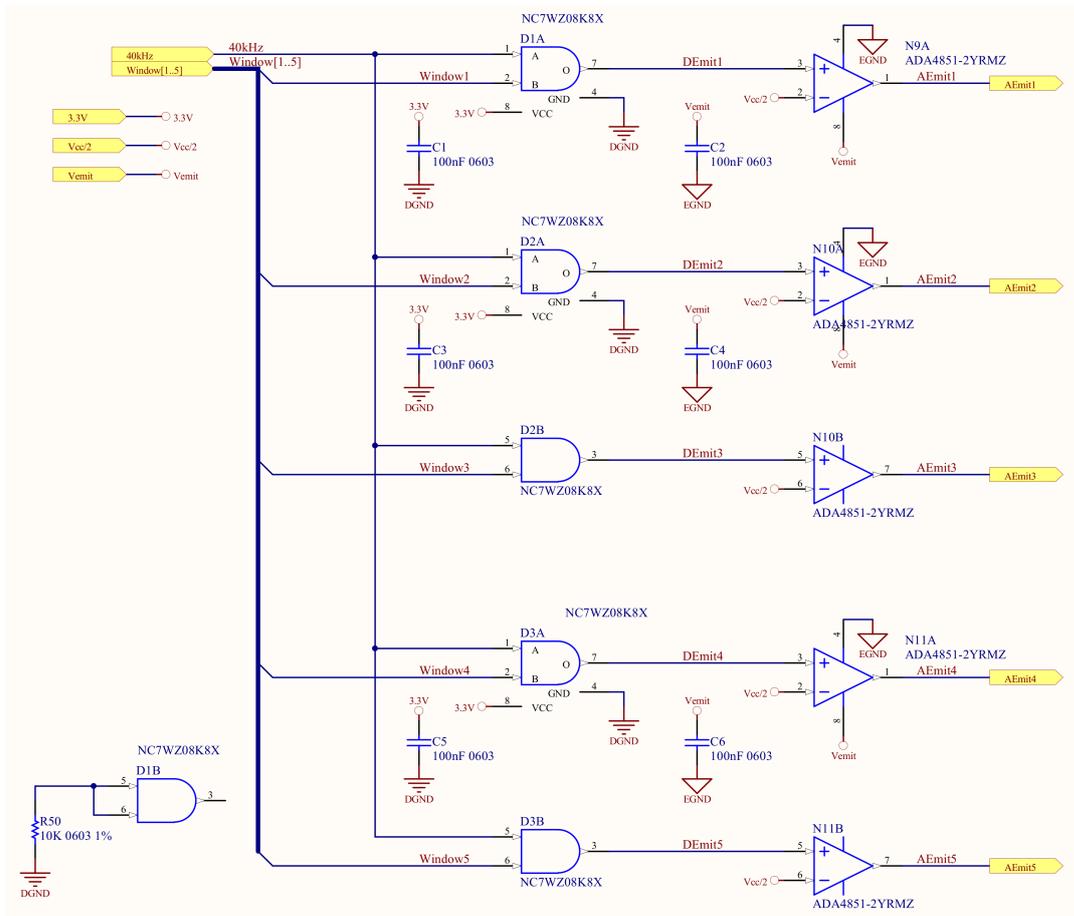


Figura 4.10: Esquemático del circuito de emisión. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

de umbral, y de la segunda puerta del operacional N6 del circuito de recepción para fijar el valor de tensión mitad de la alimentación ($V_{cc}/2$).

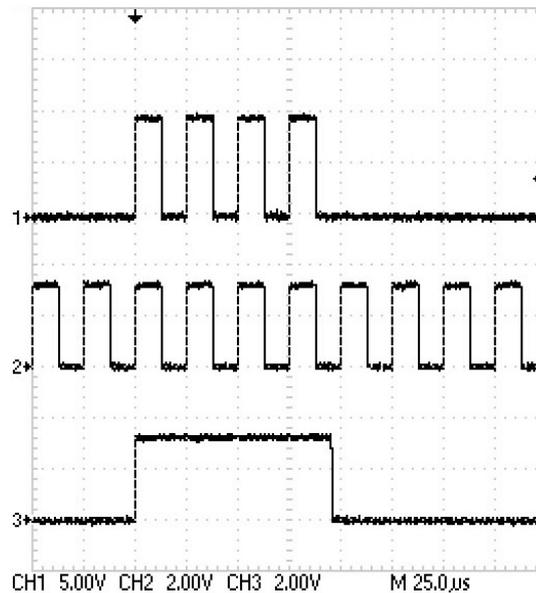


Figura 4.11: Enventanado de la señal de 40kHz. La señal 1, formada por el modulación amplificada de la señal 2 de 40kHz por la señal 3 generada por el microcontrolador, es enviada a la cápsula emisora.

Circuito de Recepción: Al igual que el circuito de emisión, consta de cinco circuitos idénticos (ver Figura 4.12). En cada uno de ellos la señal del receptor es conectada mediante un condensador de desacoplo con un par de amplificadores en serie que nos permitirán seleccionar mejor el valor de amplificación (ver Figura 4.13). Esto es importante, pues después de pasar por el filtro de envolvente situado a continuación de estos (ver Figura 4.13), el máximo de la señal en el punto de resonancia mecánica ha de situarse por debajo del umbral, pero a la vez se debe amplificar la señal todo lo posible para permitir medidas lo mas alejadas posible. El detector de envolvente es un circuito muy simple basado en un diodo y un circuito RC. Su utilidad es acondicionar la señal que va a ser comparada con la señal de umbral (Threshold) (ver Figura 4.14), a su vez estas señales serán enviadas al microcontrolador (Envelope[1..5]). La última etapa es un amplificador operacional operando en modo comparador para emitir un flanco cuando la señal recibida supera la señal de umbral, indicando un eco detectado.

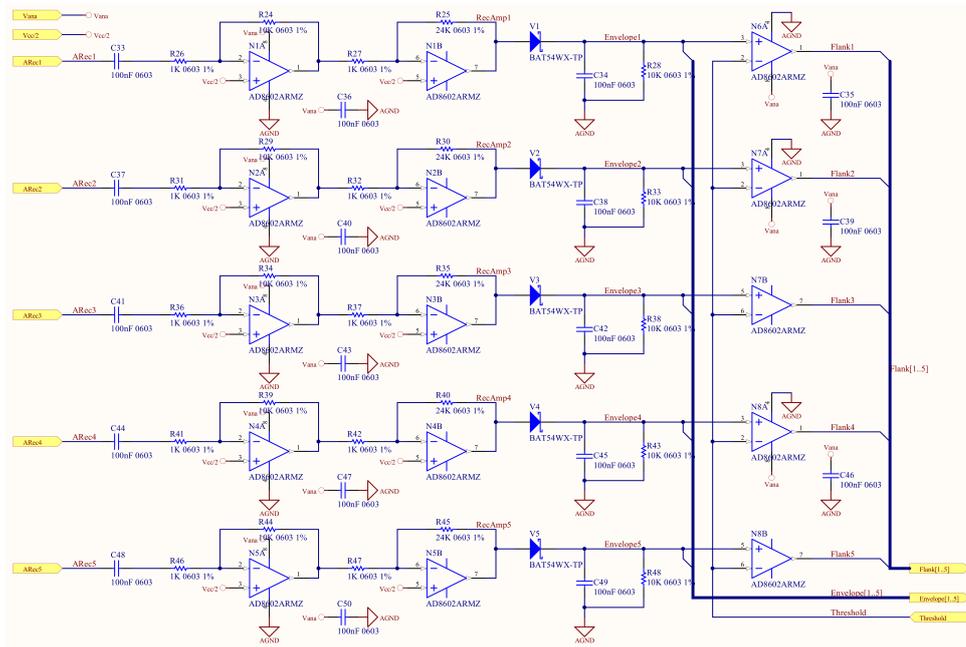


Figura 4.12: Esquemático del circuito de recepción. En el Apéndice C se muestra el esquemático completo y ampliado.

Las señales de flanco (Flank[1..5]) serán enviadas al microcontrolador.

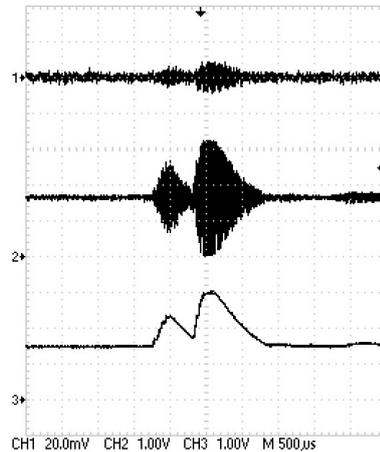


Figura 4.13: Amplificación de la señal ofrecida por la cápsula receptora y proceso por el detector de envolvente. La señal 1 es la recibida por la cápsula receptora, la 2 es la señal amplificada con offset añadido y la señal 3 es la envolvente de la señal 2.

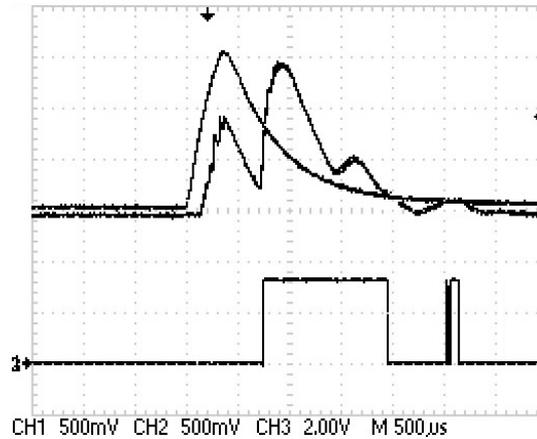


Figura 4.14: Detección del eco mediante la comparación con el umbral. Las señales 1 y 2 son el umbral y la envolvente de la señal recibida, la señal 3, en la parte inferior, se envía al detector de flanco del microcontrolador.

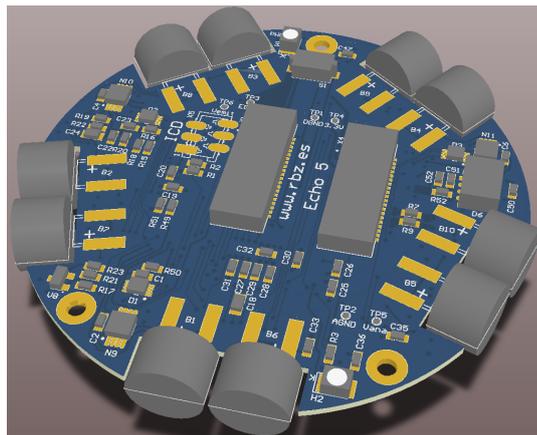


Figura 4.15: Diseño hardware renderizado de la tarjeta *Echo 5*.

Distribución: Como se puede ver en la Figura 4.15, la distribución de las cápsulas está realizada en pares de emisor y receptor situados en cinco direcciones con una diferencia de ángulo igual entre ellas. Dada la situación de los tornillos para las tarjetas de expansión del robot *e-puck*, es la única distribución posible si sólo se quiere hacer uso de una tarjeta para implementar el sistema de reconocimiento de obstáculos. El posterior análisis de esta distribución y la evaluación de otras posibilidades se realiza

en el Capítulo 6.

4.2. Firmware

El firmware es el programa que ejecuta el microcontrolador de la tarjeta *Echo 5*, haciendo que esta opere de forma adecuada y sea capaz de comunicarse con el robot.

4.2.1. Requisitos

La tarjeta requiere que el microcontrolador se encargue de:

- Realizar la emisión, controlar el umbral y capturar el flanco que indica la llegada del eco. Estas tres acciones deberán de ser perfectamente coordinadas puesto que el tiempo que tarda la señal de ultrasonidos en llegar al obstáculo y volver será la diferencia entre el comienzo del pulso de emisión y la llegada del flanco generado por el circuito de recepción. Igual de importante es generar el umbral en el momento adecuado y con un pulso de la duración precisa, para que éste supere en amplitud a la interferencia de la resonancia mecánica pero no comprometa el resto de la captura.
- Realizar el protocolo de comunicación mediante el bus I2C con el que la tarjeta intercambiará información con el robot.
- Controlar la gestión de energía, activando o desactivando el elevador de tensión cuando sea necesario.

4.2.2. Diseño

Programa principal: El diseño está basado en un programa principal (*Echo5.c*) que se encargará de inicializar todos los periféricos desde las librerías y luego se quedará recorriendo un bucle infinito. También contiene la inicialización del Timer 6, y su interrupción, que realizará ciclos de uno de los varios modos de funcionamiento de la tarjeta programados en él. Estos son:

- **Modo 0:** La tarjeta no realiza ninguna acción, el elevador de tensión está desactivado.
- **Modo 1:** La tarjeta realiza una detección por cada pareja de emisor y receptor, lanzando una emisión, generación de umbral y recepción para cada par de cápsulas en cada ciclo.
- **Modo 2:** La tarjeta realiza detecciones emitiendo y recibiendo por todos los emisores y receptores. Esto se hace lanzando una emisión general, generación de umbral y recepción general cada ciclo.
- **Modo 3:** La tarjeta opera en el modo de variación de distancia limitada, cuyo fin es limitar incrementos o reducciones del valor de distancia accesible por el robot a una variación máxima definida por una variable modificable por el robot. El incremento está indicado por la variable *MaxInc* controlada por la librería *registers*.
- **Modo 4:** Sólo se realizan detecciones consecutivas por el par de cápsulas indicado por la variable *ChannelM4* controlada por la librería *registers*.

El LED del que dispone la tarjeta se encenderá cuando cualquiera de los modos de detección (todos menos el Modo 0) esté activado.

Todos los algoritmos usados por el programa principal se encuentran programados en diversas librerías.

Gestión de los puertos: Hay una librería (Ports.h) encargada de inicializar los pines del microcontrolador como entrada o salida, y asignarles valor. También se define un nombre para ellos de modo que la programación del firmware sea mas clara y sencilla mediante el uso de nombres acordes con la utilidad de cada pin.

Registros: El modo de funcionamiento, así como el tiempo de ciclo, la duración de la ventana de emisión, la duración de la ventana generadora del umbral, la distancia

máxima medible y el par de cápsulas con el que opera en modo 4, son datos que ya disponen de un valor pero pueden ser obtenidos y modificados por el robot, y definen el estado de la tarjeta. Están gestionados, junto con los valores de las distancias medidas y temporales mediante la librería *registers* (*Registers.h*), de modo que al ser los únicos valores compartidos por varias partes del sistema puedan ser modificados con seguridad. Los valores de las medidas solo pueden ser leídos por el robot por razones obvias.

La librería gestiona los siguientes valores:

- **Echo0 a Echo4:** Valor de la distancia detectada por cada par de cápsulas.
- **EchoT0 a EchoT4:** Valor temporal de la distancia detectada por cada par de cápsulas para ser operado por el modo 3 de funcionamiento.
- **TotalTime:** Tiempo total de ciclo de emisión para cada par de cápsulas.
- **EmissionWindowTime:** Tiempo de duración de la ventana de emisión.
- **AnalogThresholdWindowTime:** Tiempo de duración de la ventana de activación del umbral analógico.
- **Mode:** Modo de funcionamiento.
- **ChannelM4:** Par de cápsulas por el que se realizan detecciones consecutivas en modo 4 de funcionamiento.
- **MaxDis:** Máxima distancia medible.
- **MaxInc:** Máximo incremento de distancia para el modo 3 de funcionamiento

Comunicación mediante I2C: La librería encargada de realizar la comunicación por I2C con el robot (*I2C_slave_drv.h*) gestiona el protocolo de comunicación y pone a disposición del robot los valores gestionados por la librería de registros. De igual modo se actualizan estos valores cuando el robot solicita el comando adecuado.

Hay que mencionar que al tratarse de datos de 16 bits cada uno de los valores será modificado mediante dos envíos de 8 bits, de modo que tanto esta librería como la desarrollada para el robot *e-puck* han de estar programadas para mantener este tipo de comunicación (ver Sección 4.3). Las señales de comunicación por I2C (I2C_SDA e I2C_SCL) están conectadas directamente con el robot a través del bus de comunicación.

Generación del PWM: La señal PWM de 40kHz que gobierna el funcionamiento de las cápsulas de ultrasonidos será controlada por la librería (PWM.h) que inicializará un comparador de salida del microcontrolador y el Timer 2, así mismo gestionará la interrupción de este timer. Los comparadores de salida del microcontrolador realizan cambios en un pin de salida en función de ciertos eventos, como es en este caso el valor del Timer 2. La señal generada (40kHz) irá conectada al circuito de emisión donde será modulada por una de las ventanas de emisión de las que se habla a continuación.

Emisión: La librería que controla el pulso generador de la emisión (US_emission.h) realiza esta tarea inicializando y controlando la interrupción del Timer 4 de modo que su puesta en funcionamiento active el pin correspondiente (Window[1..5]) y su interrupción lo desactive.

Generación del umbral analógico: Del mismo modo, la librería que gestiona el pulso generador del umbral analógico (Threshold_A.h) realiza idénticas tareas con ayuda del Timer 5. Esta señal (WindowT) irá a parar al circuito generador de umbral analógico, donde se controla el tiempo de carga de la red RC.

Recepción: Por último, la librería gestora de la recepción (US_reception.h) se encarga de inicializar los detectores de flanco y el Timer 3, del que obtendrán el valor. Los detectores de flanco son unos periféricos que causan una interrupción cuando se detecta el patrón de flanco indicado en su configuración, permitiendo en ésta gestionar

los valores del timer capturados en el momento del evento. También está aquí la interrupción del Timer 3, gestionada de modo que evite medidas erróneas al imponer como límite un máximo de tiempo (equivalente a una distancia) de medición. Esto se realiza indicando en las interrupciones de los capturadores que guarden el valor de distancia máxima en el caso de que el Timer 3 no este corriendo por haber llegado a su valor máximo. En este caso la interrupción del Timer 3 lanza las interrupciones de los detectores de flanco que sigan esperando una señal en ese momento. De este modo el usuario de la tarjeta podrá identificar la existencia de ecos perdidos. Las señales con las que trabaja esta librería (Flank[1..5]) llegan al microcontrolador desde el circuito de recepción y son el resultado de comparar la señal de eco con el umbral generado.

4.3. Librerías

Para poder hacer uso de la tarjeta *Echo 5* desde el robot *e-puck*, se han de poner a disposición del programador unas librerías que habiliten la comunicación y gestión de la información entre el robot *e-puck* y la tarjeta.

4.3.1. Requisitos

Los requisitos de las librerías serán dos:

- El primero es que tienen que habilitar la comunicación con la tarjeta *Echo 5*, y permitir al robot obtener y enviar datos.
- El segundo es la adecuación de los datos. Estos llegan desde la tarjeta como números que representan valores de contadores, las librerías tendrán que permitir obtenerlos transformados en distancias y tiempos.

4.3.2. Diseño

La librería pone en manos del programador una serie de funciones que permiten tanto obtener los datos obtenidos por la tarjeta *Echo 5*, como obtener y modificar sus

variables, especialmente los modos de funcionamiento.

Hay que señalar que la mayoría de las instrucciones trabajan enviando y recibiendo directamente el valor en ticks generado por los timers y usado para controlarlos, mientras que otras transmiten valores de magnitudes físicas de tiempo y espacio. Excepto en el caso del valor de distancia del eco que se comenta más adelante, el resto de las conversiones se realizan mediante multiplicadores obtenidos de forma teórica operando con la frecuencia del microcontrolador, el preescaler de los timers y la velocidad del sonido.

Para obtener los datos de configuración se ha definido el struct siguiente:

```
typedef struct {
    unsigned int totalTime;
    unsigned int emissionTime;
    unsigned int analogThresholdTime;
    unsigned int mode;
    unsigned int channelM4;
    unsigned int maxDis;
    unsigned int maxInc;
} echo5status;
```

Donde se incluyen los tiempos de funcionamiento en ticks, el modo de funcionamiento y el par de cápsulas seleccionado para el modo 4.

- ***void e_init_echo5 (void)***
 - **Descripción:** Inicializa la comunicación con la tarjeta *Echo 5* y las variables de status que permanecen almacenadas y actualizadas por la librería. Estas variables serán actualizadas cada vez que se pida su valor a la tarjeta o se le envíe uno nuevo.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno:** void

- ***unsigned int e_echo5_get_timer_range (int us)***
 - **Descripción:** Obtiene el dato de la distancia medida en ticks del timer por el par emisor-receptor indicado. La distancia se da en referencia al frontal

del robot *e-puck*, que coincide con la cubierta delantera de las cápsulas de ultrasonidos.

- **Argumentos: int us:** Indica de que par de cápsulas (0 a 4 en el sentido de las agujas del reloj partiendo del en el frontal del robot) se quiere obtener el valor.
 - **Retorno: unsigned int:** Distancia en ticks del timer hasta el obstáculo que provocó la detección.
- *unsigned int e_echo5_get_range (int us)*
 - **Descripción:** Obtiene el dato de la distancia medida en milímetros por el par emisor-receptor indicado. La conversión a milímetros se realiza con un ajuste mediante un multiplicador obtenido de forma teórica y un offset obtenido de forma experimental, debido al desconocimiento de la posición exacta donde tiene lugar la emisión y la recepción a causa del formato de las cápsulas de ultrasonidos. La distancia se da en referencia al punto donde un obstáculo estaría tocando el anillo de plástico que hace la función de parachoques en los robots *e-puck*.
 - **Argumentos: int us:** Indica de que par de cápsulas (0 a 4 en el sentido de las agujas del reloj partiendo del frontal del robot) se quiere obtener el valor.
 - **Retorno: unsigned int:** Distancia en milímetros hasta el obstáculo que provocó la detección.
- *echo5status e_echo5_get_status (void)*
 - **Descripción:** Obtiene un struct previamente definido en la cabecera de la librería con los valores de estado de la tarjeta, los valores del struct son los de los timers y por tanto carecen de significado físico, para obtener estos valores con significado físico se pueden usar las instrucciones específicas para cada uno, presentadas a continuación.

- **Argumentos:** void
- **Retorno: echo5status:** El struct mencionado en la definición.
- *unsigned int e_echo5_get_totalTime (void)*
 - **Descripción:** Obtiene el tiempo de ciclo en microsegundos, escalado mediante la equivalencia en tiempo de cada tick del timer.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Tiempo en microsegundos.
- *unsigned int e_echo5_get_emissionTime (void)*
 - **Descripción:** Obtiene el tiempo de emisión en microsegundos, escalado mediante la equivalencia en tiempo de cada tick del timer.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Tiempo en microsegundos.
- *unsigned int e_echo5_get_analogThresholdTime (void)*
 - **Descripción:** Obtiene la duración de la ventana generadora de umbral en microsegundos, escalado mediante la equivalencia en tiempo de cada tick del timer.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Tiempo en microsegundos.
- *unsigned int e_echo5_get_mode (void)*
 - **Descripción:** Obtiene el modo de funcionamiento (ver Sección 4.2).
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Modo actual de funcionamiento como se menciona en la Sección 4.2.
- *unsigned int e_echo5_get_channelM4 (void)*

- **Descripción:** Obtiene el par de cápsulas por el que captura el modo 4 (ver Sección 4.2).
- **Argumentos:** void
- **Retorno: unsigned M4:** Par de cápsulas por las que captura el modo 4 como se menciona en la Sección 4.2.

- *unsigned int e_echo5_get_maxDis (void)*
 - **Descripción:** Obtiene la máxima distancia medible en milímetros, escalado mediante la equivalencia en espacio de cada tick del timer.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Distancia en milímetros.

- *unsigned int e_echo5_get_maxInc (void)*
 - **Descripción:** Obtiene el máximo incremento de distancia cuando se opera en el modo 3 (ver Sección 4.2), escalado mediante la equivalencia en espacio de cada tick del timer.
 - **Argumentos:** void
 - **Retorno: unsigned int:** Distancia en milímetros.

- *void e_echo5_set_totalTime (unsigned int totalTime)*
 - **Descripción:** Establece el tiempo de ciclo, ha de ser enviado en ticks del timer.
 - **Argumentos: unsigned int totalTime:** Tiempo en ticks del timer (Preescaler 1:8, 80ms/tick)
 - **Retorno:** void

- *void e_echo5_set_emissionTime (unsigned int emissionTime)*
 - **Descripción:** Establece el tiempo de emisión, ha de ser enviado en ticks del timer.

- **Argumentos: unsigned int emissionTime:** Tiempo en ticks del timer (Preescaler 1:1, 25ns/tick, o un ciclo de 40kHz cada 1000 ticks).
 - **Retorno:** void
- *void e_echo5_set_analogThresholdTime (unsigned int analogThresholdTime)*
 - **Descripción:** Establece el tiempo de ciclo, ha de ser enviado en ticks del timer.
 - **Argumentos: unsigned int analogThresholdTime:** Tiempo en ticks del timer (Preescaler 1:1, 25ns/tick).
 - **Retorno:** void
- *void e_echo5_set_mode (unsigned int mode)*
 - **Descripción:** Establece el modo de funcionamiento (ver Sección 4.2).
 - **Argumentos: unsigned int mode:** Modo actual de funcionamiento como se menciona en la Sección 4.2.
 - **Retorno:** void
- *void e_echo5_set_channelM4 (unsigned int M4)*
 - **Descripción:** Establece el par de cápsulas por el que captura el modo 4 (ver Sección 4.2).
 - **Argumentos: unsigned int M4:** Par de cápsulas por las que captura el modo 4 como se menciona en la Sección 4.2.
 - **Retorno:** void
- *void e_echo5_set_maxDis (unsigned int maxDis)*
 - **Descripción:** Establece la máxima distancia medible, ha de ser enviada en ticks del timer.

- **Argumentos:** **unsigned int maxDis:** Distancia en ticks del timer (Preescaler 1:8, 29.1545ticks/mm).
 - **Retorno:** void
-
- *void e_echo5_set_maxInc (unsigned int maxInc)*
 - **Descripción:** Establece el máximo incremento de distancia cuando se opera en el modo 3 (ver Sección 4.2), ha de ser enviado en ticks del timer.
 - **Argumentos:** **unsigned int maxInc:** Distancia en ticks del timer (Preescaler 1:8, 29.1545ticks/mm).
 - **Retorno:** void

Capítulo 5

Experimentos

Se han realizado tres experimentos para comprobar el funcionamiento de la tarjeta *Echo 5*. El primero comprueba la comunicación entre la tarjeta y el robot (ver Sección 5.1), el segundo realiza una caracterización exhaustiva de la captura de datos (ver Sección 5.2), y el último analiza el funcionamiento del robot usando los datos ofrecidos por la tarjeta para realizar esquiva de obstáculos (ver Sección 5.3).

5.1. Transmisión de datos

El primer experimento realizado tiene como finalidad comprobar la comunicación entre el robot y la tarjeta *Echo 5*. Significando esto que tanto las librerías para la programación del robot *e-puck* como la parte de código de firmware que gestiona la comunicación por I2C están bien programadas y tienen las direcciones asignadas correctamente.

Además, una vez comprobada la comunicación se aprovechará el programa para tomar medidas suficientes como para caracterizar cada uno de los pares emisor-receptor de ultrasonidos situados en la tarjeta *Echo 5*, con el fin de observar la linealidad de las medidas con respecto al incremento real de distancia y la diferencia en la toma de datos entre cada par de cápsulas. Esta caracterización sólo está enfocada a asegurar que las cápsulas reaccionan igual en las 5 posiciones.

5.1.1. Modelado

Para realizar este experimento se ha programado un código para el robot *e-puck* que comprueba el funcionamiento de cada uno de los comandos de comunicación con la tarjeta. Este programa realiza bucles en los que recorre los distintos modos de funcionamiento, mostrando por pantalla los datos recibidos de la tarjeta. Se muestran tanto las mediciones de cada una de las cinco cápsulas como los datos de configuración, en los dos formatos ofrecidos por la librería. Los dos formatos ofrecidos son en ticks del contador del microcontrolador y con la conversión a magnitud física realizada por la librería. De este modo se comprueban todas las instrucciones ofrecidas por la librería, asegurando una comunicación fiable entre el robot y la tarjeta.

Una vez comprobada la comunicación entre tarjeta y robot, se han caracterizado las cinco cápsulas de la tarjeta para asegurar que su comportamiento sigue unos patrones similares. Para hacerlo se ha montado una superficie (ver Figura 5.1) con una escala de 300 mm con intervalos de un 10 mm marcados, y a su vez se dispone de un obstáculo plano de 100 x 100 mm desplazable a lo largo de esta escala, de modo perpendicular tanto a la superficies como a la orientación de las cápsula. El procedimiento consistirá anotar el valor medio de 10 mediciones para cada incremento de un centímetro, repitiendo el proceso para cada uno de los cinco pares emisor-receptor.

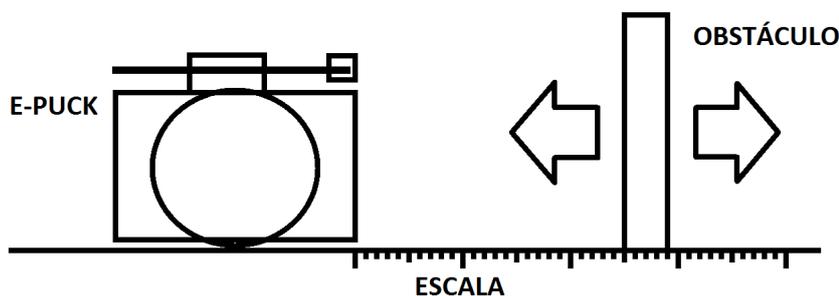


Figura 5.1: Montaje para realizar el experimento 1. Un obstáculo se desliza por una superficie en la que se ha situado una escala.

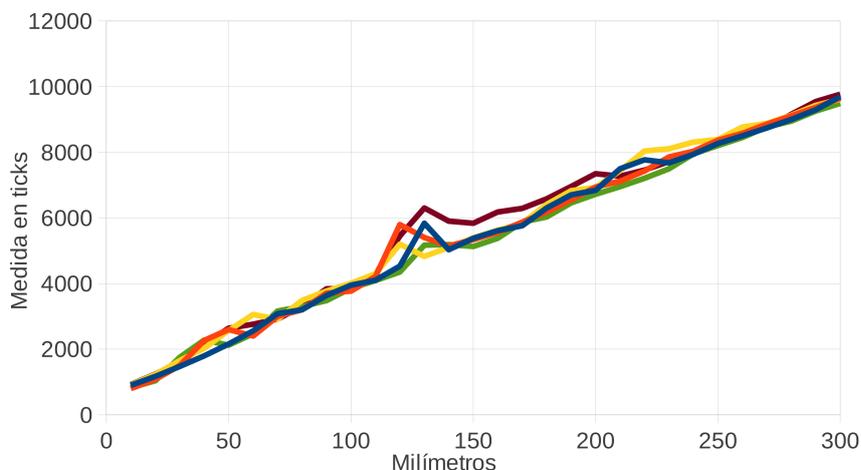


Figura 5.2: Comparativa de medidas a corta distancia realizadas por cada uno de los cinco pares de cápsulas de la tarjeta *Echo 5* (cada tick equivale a 200 ns).

Hay que señalar que el punto cero de distancia es la cubierta frontal de las cápsulas de ultrasonidos, que coincide con la carcasa frontal del robot, de la que el anillo paragolpes sobresale 3 mm.

5.1.2. Análisis de Datos

Se ha ejecutado el programa en el robot y se ha verificado la calidad de la comunicación. Con los datos obtenidos de cada cápsula (media de 5 medidas para cada valor de distancia) se ha realizado una comparativa (ver Figura 5.2), en la que se aprecia como el comportamiento de cada par de cápsulas es similar. En esta gráfica se puede apreciar el efecto del suelo en las proximidades del robot. Cuando la distancia es suficiente como para que el haz de ultrasonidos de la cápsula emisora se vea reflejado en el suelo, el valor del lóbulo principal de la señal de eco disminuye o aumenta al acoplarse varias señales de ultrasonidos desfasadas a causa de diversos rebotes (ver Figura 5.3). De este modo el umbral detecta una parte superior, y por lo tanto más retrasada de lo habitual, del lateral del lóbulo de la señal de eco o una parte inferior, y por lo tanto adelantada en el tiempo del lateral del lóbulo de la señal de eco. A mayores distancias esto deja de suceder al ser muy similares los recorridos

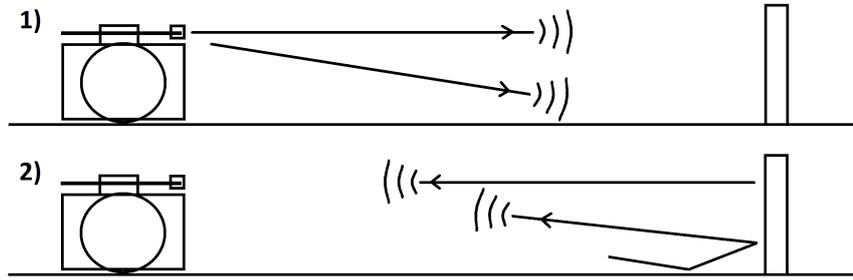


Figura 5.3: Efecto del suelo en la medición: 1) Cuando se emite el pulso de ultrasonidos, 2) la porción del pulso que rebota en el suelo se acopla con retraso con la reflejada por el obstáculo.

de la señal reflejada directamente en el obstáculo y la reflejada también en el suelo.

Ha de notarse que a partir de una distancia menor de 10 mm el par de cápsulas no es capaz de detectar el obstáculo debido a la limitación física de tener que colocar una junto a otra en horizontal. Un obstáculo muy próximo acaba devolviendo el eco al propio emisor al no tener éste ni el receptor la apertura de ángulo necesaria.

5.2. Caracterización de las mediciones

En este experimento se va a caracterizar la capacidad de la tarjeta *Echo 5* de medir distancias en distintas situaciones: i) frente a una pared perpendicular a la dirección del robot, ii) frente a una pared a distintos ángulos y a diferentes distancias y por último iii) frente a un obstáculo irregular, en este caso y dado el uso que se va a hacer de la tarjeta *Echo 5*, otro robot *e-puck*.

Con los datos obtenidos se va a calcular la función que relaciona el valor en ticks del contador del microcontrolador de la tarjeta para cada medida con el valor de la distancia medida en milímetros. Esto servirá para dotar a la función de captura de datos, de un valor experimental de offset que permita realizar este cálculo junto con la constante de pendiente calculado de forma teórica (ver Sección 4.3), además de asegurar el correcto valor de esta.

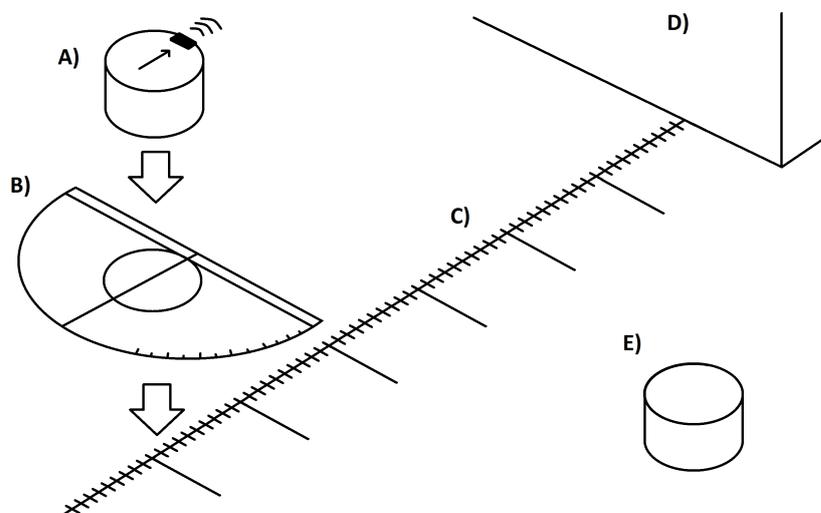


Figura 5.4: Montaje para realizar el experimento 2. A) El robot *e-puck* que realiza la medición se sitúa sobre una B) superficie de referencia dotada de ejes para mantener la dirección y una escala angular para medir la rotación del robot con respecto a la pared. Esta superficie opera junto con una C) escala situada en la superficie de movimiento del robot. Los obstáculos para realizar el experimento son una D) pared perpendicular a la escala y otro E) robot *e-puck*.

5.2.1. Modelado

La toma de datos se ha realizado mediante un programa cargado en el robot que realiza una captura de 50 datos cada vez que recibe un comando desde un mando a distancia. La Figura 5.4 muestra el patrón que se ha seguido para realizar los montajes.

La captura de medidas frente a una pared perpendicular al robot se ha realizado usando una superficie perpendicular al plano de movimiento del robot, situándose en este plano una escala. Sobre esta escala se deslizará una superficie de referencia de papel sobre la que se sitúa el robot, y que mediante unas referencias permite mantenerlo perpendicular a la pared y asegura la invariabilidad de condiciones entre cada distancia medida. Se han realizado medidas de 1 cm a 130 cm con intervalos de 1 cm.

La captura de medidas frente a una pared a distintos ángulos y a diferentes distancias se ha realizado usando de nuevo una pared perpendicular al plano de

movimiento del robot, y en este caso se a dotado a la superficie de referencia del robot de una escala angular para permitir realizar medidas de 0 a 60 grados de desviación frente a la orientación perpendicular a la pared. Estas medidas se han repetido a 10, 20, 30, 40 y 50 centímetros de la pared.

La captura de medidas frente a otro *e-puck* se ha realizado utilizando una escala situada en la superficie de movimiento de los robots, situando uno de ellos fijos y desplazando el otro con la ayuda de la superficie de referencia utilizada en la primera toma de datos.

Para tomar todas estas medidas se ha evitado el movimiento basculante que realiza el *e-puck* a causa del su diseño de dos ruedas mediante el uso de una pequeña cuña en su parte trasera y delantera que mantiene la tarjeta *Echo 5* paralela al plano de movimiento del robot.

Por último, hay que señalar que como en el apartado anterior, el punto cero de distancia es la cubierta frontal de las cápsulas de ultrasonidos, que coincide con la carcasa frontal del robot, de la que el anillo paragolpes sobresale 3 mm.

5.2.2. Análisis de Datos

Los datos obtenidos con respecto a la pared vertical se muestran en la Figura 5.5. Se puede observar que la tarjeta comienza a dejar de detectar ecos (los ecos perdidos están indicados por el firmware de la tarjeta como el valor máximo medible, como se indica en la sección 4.2) a partir de los 90 cm, dejando de detectar datos a los 110cm (en la Sección 6.1 se comentan aspectos de esta limitación). Junto a esto se puede apreciar, como ya se vio en la Sección 5.2, que en las cercanías del robot se produce un rizado debido al acoplo de la señal de eco con los rebotes del pulso de ultrasonidos en el suelo.

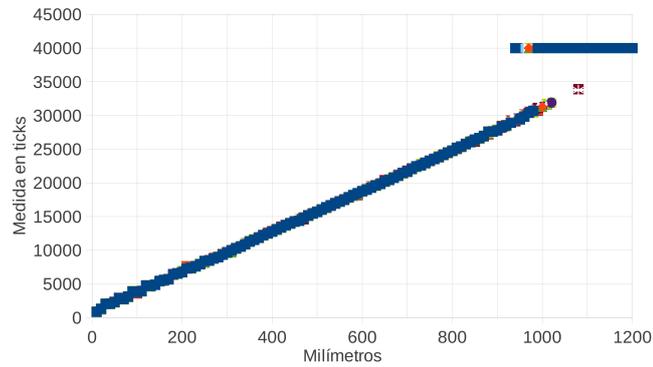


Figura 5.5: Diagrama de dispersión de la captura de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).

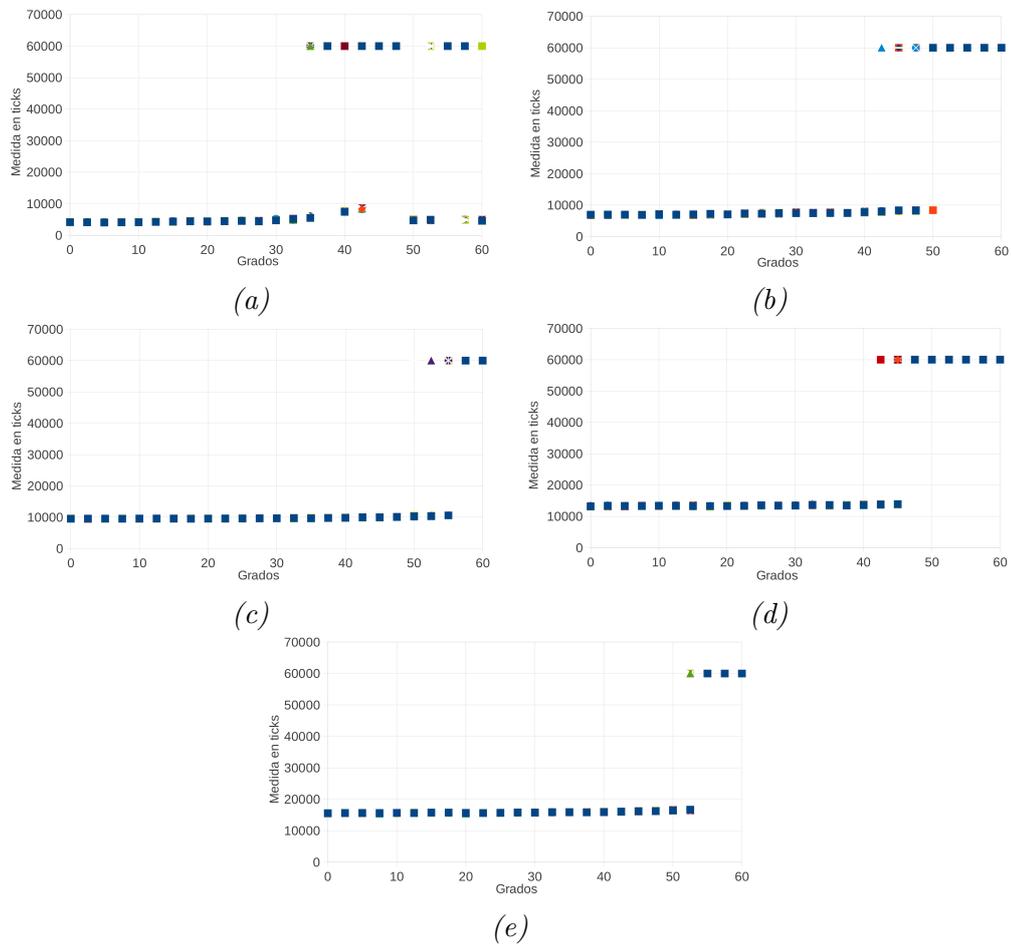


Figura 5.6: Diagrama de dispersión de la captura de distancias a diferentes ángulos de una pared a (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 30 cm, (d) 40 cm y (e) 50 cm del robot (cada tick equivale a 200 ns).

Las capturas de medidas frente a una pared a distintos ángulos y a diferentes distancias se muestran en la Figura 5.6. Se puede apreciar cómo se puede asegurar una medida correcta hasta los 30 grados, aumentando o disminuyendo este límite a distintas distancias, debido a la conformación física del haz de ultrasonidos y a los dobles rebotes que puedan existir con el suelo.

Las capturas de medidas frente a otro robot *e-puck* se muestran en la Figura 5.7. Se han realizado dos capturas debido a la naturaleza de los datos obtenidos, en ellas podemos observar una pérdida de medidas a una distancia más próxima debido al pequeño tamaño del robot *e-puck*.

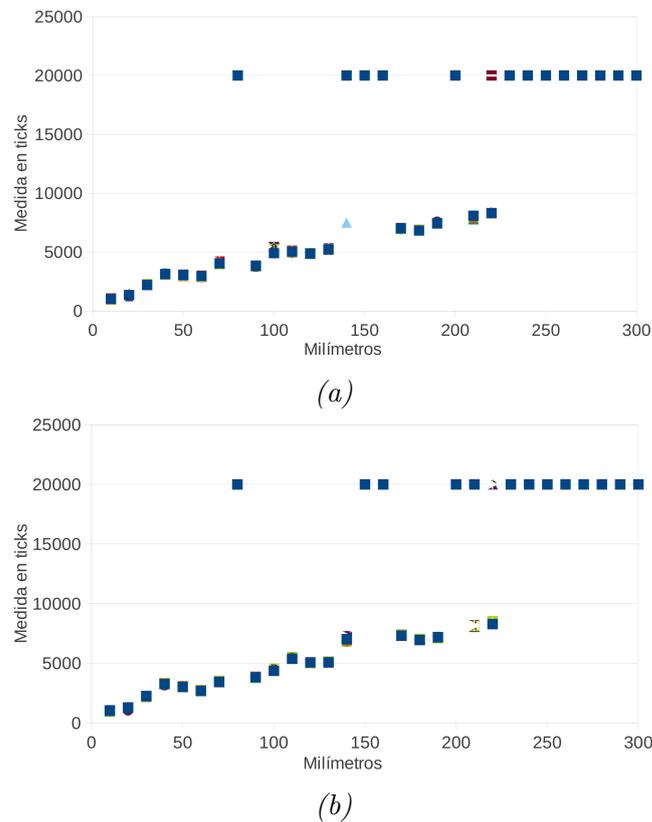


Figura 5.7: (a) Primera y (b) segunda captura de distancias con un *e-puck* enfrentado a otro *e-puck*: (cada tick equivale a 200 ns).

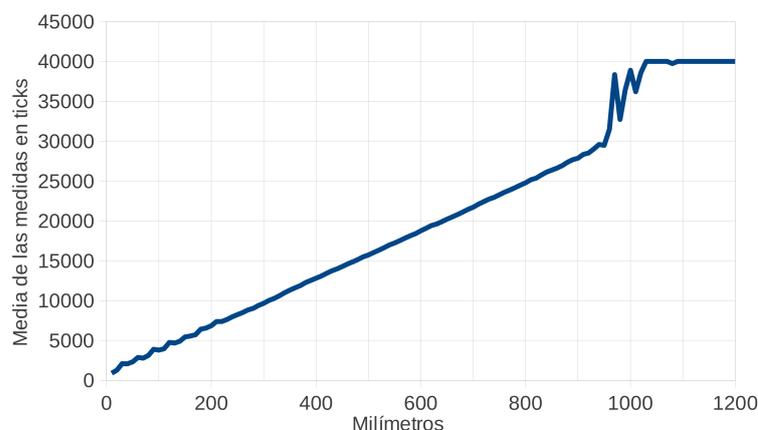


Figura 5.8: Media de las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).

También existe una mayor desviación típica en los datos, e incluso zonas más cercanas al robot que la distancia de pérdida de datos en las que no llega eco alguno. Esto es debido a la forma poco homogénea y cilíndrica del robot *e-puck*, que presenta distintos planos donde puede rebotar el pulso de ultrasonidos, causando acoplos entre varios pulsos que provocan que el lóbulo de eco recibido tenga una amplitud variable o incluso demasiado baja.

Por último, utilizando los datos de la primera captura se ha obtenido la función que relaciona el valor de la medida en ticks del contador del microcontrolador con el valor medido en milímetros. Para simplificar se ha realizado la media de las mediciones realizadas para cada distancia (ver Figura 5.8), y a la vista de ésta se han escogido dos posibles rangos a partir de los que obtener la función. El primero de ellos (ver Figura 5.9) descarta la zona donde comienzan a aparecer datos perdidos. En este rango de datos se incluyen las medidas próximas al robot que, a pesar de no presentar tan poca desviación típica como las lejanas, tienen importancia cuando se trata de la esquiwa de obstáculos, puesto que con ellas trabajará el programa que gestione esta (ver Sección 5.3). El segundo (ver Figura 5.10), descarta además los datos de medidas cercanas al robot de modo que la función de la recta solo se obtenga a partir de la zona lineal del rango de distancias medibles.

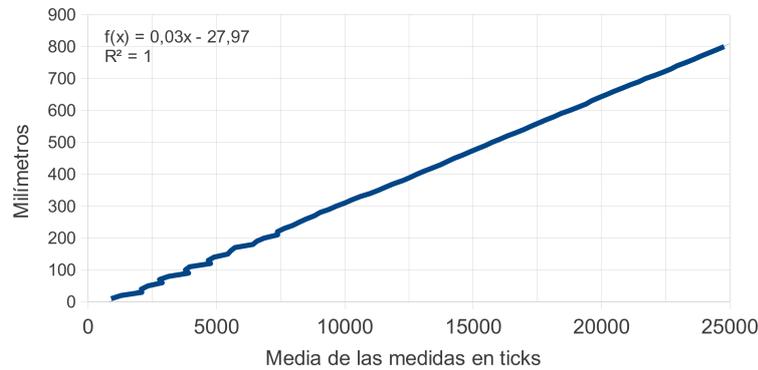


Figura 5.9: Zona de medidas válidas de la media las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).

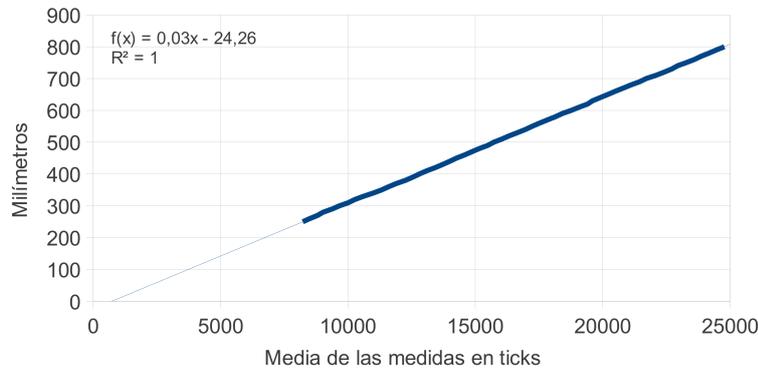


Figura 5.10: Zona de medidas lineales de la media las capturas de distancias frente a una pared perpendicular a la dirección del robot (cada tick equivale a 200 ns).

A la vista de las gráficas, la segunda opción es mas acertada por ofrecer un menor offset. Una vez ajustado el offset por los motivos anteriormente mencionados, la Tabla 5.1 muestra la distancia real al obstáculo, así como la media y desviación típica de las medidas realizadas con la tarjeta *Echo 5*.

5.3. Movimiento y esquiva

Con este experimento se tratará de observar la capacidad de la tarjeta de dotar al robot *e-puck* de los datos para que éste sea capaz de esquivar tanto obstáculos como

Real (mm)	Medida (mm)		Real (mm)	Medida (mm)	
	Medida	Desviación típica		Medida	Desviación típica
50	53,46	1,64	100	101,96	1,42
150	156,99	0,99	200	203,97	1,83
250	249,65	2,19	300	297,59	0,99
350	352,42	1,17	400	402,36	1,59
450	450,85	1,19	500	499,42	1,10
550	549,60	1,14	600	600,45	1,14
650	648,31	1,69	700	698,76	1,49
750	751,15	1,57	800	800,82	1,15
850	853,86	1,64	900	903,38	1,15

Tabla 5.1: Comparación entre la distancia real y la medida por la tarjeta *Echo 5*. Se muestra la media y desviación típica de los valores obtenidos para un total de 50 muestras por posición.

otros robots.

Se tratará de observar principalmente que efecto tienen las distintas geometrías tanto de obstáculos como de otros robots *e-puck* en la medida de distancias y su posterior uso para esquivarlos.

5.3.1. Modelado

Para realizar este experimento se ha programado un código para el robot que realiza los siguientes comportamientos:

- En cualquier caso el robot avanza.
- Cada cierto tiempo aleatorio el robot cambia de rumbo, esto hace que los robots no permanezcan pegados a los límites de la zona de movimiento.
- En caso de obstáculo se calculará el vector de aproximación de este a partir de los datos ofrecidos por la tarjeta *Echo 5*, y con este dato se ajustará el movimiento de las ruedas para orientar el *e-puck* en sentido contrario al obstáculo. La activación de este comportamiento tiene dos umbrales, el primero hace que evite el obstáculo pero siga avanzando de todos modos, y el segundo, más pequeño,

que el robot pare y gire sobre si mismo para orientarse en sentido contrario al obstáculo.

Junto con este programa se ha montado una superficie de movimiento para los robots de 120 cm x 170 cm limitada por paredes de 11 cm de altura. También se dispone de diversas cajas de 11 cm de altura con las que se compondrán diversos obstáculos para observar la respuesta del robot frente a situaciones como esquinas exteriores, estrechamientos del camino o callejones sin salida.

El procedimiento experimental será observar primero la reacción de un solo robot a todo tipo de obstáculo, para más tarde añadir más robots y controlar la capacidad que tienen de no chocar unos con otros monitorizando los datos que envían al PC por bluetooth.

5.3.2. Análisis de Datos

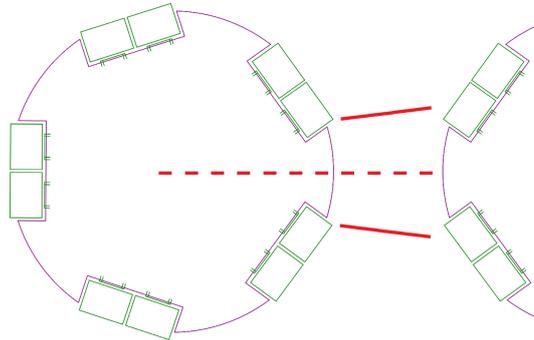


Figura 5.11: Zona de aproximación donde la detección de objetos difíciles está comprometida, marcada por la línea roja discontinua que parte del eje del robot. Esta limitación está impuesta por el ángulo de apertura del haz de emisión de las cápsulas, con el límite más próximo a la zona marcada indicado por líneas rojas continuas.

Los robots realizan correctamente la esquivas de obstáculos, excepto en el caso de que un robot se aproxime a otro justo entre dos pares de cápsulas. En ese caso puede pasar que la detección no sea correcta y un robot *e-puck* llegue a tocar a

otro, separándose tan pronto como un par de cápsulas de uno de ellos ofrece un dato correcto. Esto ocurre debido tanto a la limitada apertura de haz de las cápsulas como a la geometría no uniforme, la forma cilíndrica y el pequeño tamaño de los robots *e-puck* (ver Figura 5.11). Estos contactos tienen una duración muy limitada, no obstante en el Capítulo 6 se estudia una posibilidad de evitar estos sucesos. Finalmente se ha utilizado como obstáculo una lata normal de refresco, con un diámetro de 65 mm (menor que el de un robot *e-puck*), observándose que la esquivas resulta perfecta, debiéndose la mejora tanto a la uniformidad del obstáculo como a la mayor altura de este.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

Una vez finalizado el diseño y fabricación de la tarjeta *Echo 5* y realizados los experimentos, se ha llegado a unas conclusiones de las que se decucen ciertas líneas futuras.

6.1. Conclusiones

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha diseñado, construido y programado un sistema de detección de obstáculos por ultrasonidos en una tarjeta de expansión para el robot *e-puck*, denominada *Echo 5*. Se ha buscado una buena resolución de distancia en la zona cercana al robot, para lo que se ha implementado un sistema de captura basado en la comparación del eco recibido con un umbral dinámico que sea capaz de superar la resonancia entre las cápsulas de ultrasonidos. Junto al diseño se proporcionan unas librerías que ofrezcan tanto los datos de distancia en un formato cómodo, como la capacidad de cambiar los parámetros y el modo de funcionamiento de la placa.

A la vista de lo desarrollado a lo largo de esta memoria se puede concluir que:

- Se ha logrado caracterizar el origen de la resonancia entre cápsulas que limita la detección de obstáculos. Esta varía con el entorno inmediato de las cápsulas, limitando la posición de la placa de modo que no puede estar situada inmediatamente encima del robot *e-puck*, puesto que el anillo paragolpes refleja

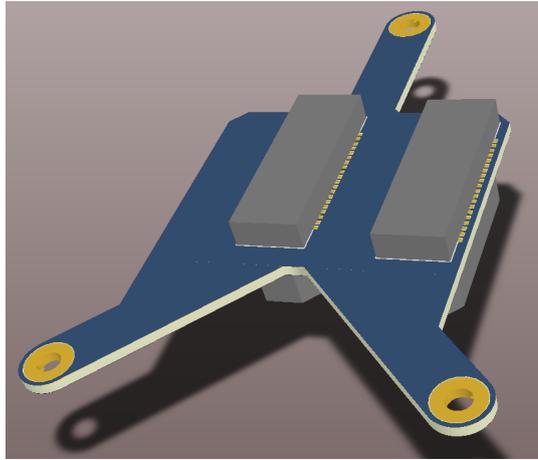


Figura 6.1: Tarjeta *Spacer* diseñada para acompañar a la tarjeta *Echo 5*.

los lóbulos secundarios de su diagrama de radiación aumentando mucho el efecto de la resonancia.

- Puesto que la tarjeta *Echo 5* es un complemento a la tarjeta *e-RandB*, deberá ir colocada sobre esta. Para el caso de disponer sólo de la tarjeta *Echo 5* se ha diseñado la tarjeta *Spacer* (ver Figura 6.1) que permite situar la tarjeta *Echo 5* por encima del anillo paragolpes. Su esquemático se encuentra en el Apéndice C.
- Se ha conseguido cubrir todo el campo circundante al robot con cinco pares de cápsulas de ultrasonidos, al haber escogido un modelo adecuado. No obstante se ha observado que en la zona comprendida entre los haces principales de detección de dos pares de cápsulas contiguos la capacidad detectora empeora, especialmente a distancias cortas y con objetos cilíndricos, como puede ser un robot *e-puck*. En la Sección 6.2 se comenta una posible solución.
- A distancias cortas, para que el robot realice la esquiua, sigue siendo más efectiva la detección de obstáculos por sensores de infrarrojo que por ultrasonidos. Esto es en parte por lo comentado en el punto anterior, y en parte por la posición de las cápsulas de ultrasonidos. Al haber un par orientado directamente al frente

del robot (posición limitada por la situación de los tornillos que sostienen la tarjeta) hay menos información lateral que la que podría haber de situarse dos pares de cápsulas a ambos lados del frontal del robot. A esto se suma que hay mayor cantidad de sensores de infrarrojo debido a su pequeño tamaño.

- El diseño del sistema de captura permite distinguir entre medidas correctas y medidas perdidas dada la lejanía del obstáculo mediante la asignación del valor de distancia máxima permitida a estas.
- Se ha observado que con tiempos de ciclo de medida mayores se pueden distinguir medidas correctas a distancias mayores. Esto es debido a que la curva de relajación del circuito de umbral puede bajar mas su valor con un intervalo mayor entre las ventanas de excitación del circuito, lo que causa que el valor del umbral baje levemente y sea capaz de detectar pulsos de eco de menor amplitud. A causa de este efecto se ha modificado el diseño del circuito generador de umbral para permitir un ajuste fino del divisor de tensión que define el offset del umbral, mediante la adición a éste de una resistencia de pequeño valor. Mediante el ajuste de esta resistencia y el uso de un ciclo de medida mayor se puede independizar este del offset de la señal de umbral generada analógicamente.
- A la vista de los resultados obtenidos en los experimentos, queda claro el uso de la tarjeta para detectar obstáculos en distancias comprendidas entre un centímetro y unos 90 centímetros. A pesar de que según se va consumiendo la batería aumentan los datos perdidos a grandes distancias.
- Los datos presentados al usuario de la tarjeta han demostrado tener gran utilidad al poderse obtener tanto como medida física (presentados en milímetros) como en tics del contador del microcontrolador. Junto a esto el resto de las instrucciones de la librería dotan al usuario de una gran cantidad de opciones de uso y herramientas de control de funcionamiento de la placa, que en el caso de los experimentos han sido muy útiles.

En resumen, se ha validado la viabilidad de la detección de obstáculos por ultrasonidos en robots de pequeño tamaño, a pesar de las limitaciones que impone el hecho de poder cubrir pocas direcciones debido al mayor espacio que ocupan las cápsulas de ultrasonidos frente a otros sistemas. A pesar de ello, se ha demostrado la capacidad de estos sistemas para detectar no solo obstáculos próximos sino también lejanos, pudiéndose mapear el entorno del robot. Por último, estos sistemas permiten que otros basados en infrarrojo, como es el caso de la tarjeta *e-RandB* puedan funcionar sin perturbaciones.

6.2. Líneas futuras

A la vista de los resultados de los experimentos y las diversas observaciones realizadas a lo largo de todo el Proyecto Fin de Carrera, se ha detectado un punto crítico que tiene una solución, si bien exige un aumento notable del coste de fabricación de la tarjeta.

Este punto es la existencia de la limitación en espacio de la tarjeta, que obliga a colocar las cápsulas en parejas de modo que solo se puede apuntar a 5 direcciones, dejando ángulos muertos en los que si bien se detecta una pared, la detección de otro robot *e-puck* es bastante difícil.

La forma de dotar a la tarjeta de sensores apuntando a más direcciones es el uso de dos placas de circuito impreso, con los emisores en una y los receptores en otra, de modo que se podría cubrir el doble de direcciones, si la geometría y la posición de los elementos fijos de las tarjetas (tornillos y conectores) lo permiten. Igualmente se pueden usar cápsulas emisoras y receptoras un poco más grandes, para las que se han observado lóbulos laterales mucho menores en el diagrama de radiación, mejorando notablemente el problema de la resonancia.

Esta nueva configuración, como antes se ha mencionado, multiplicará por dos el coste de la tarjeta, al hacer falta dos placas de circuito impreso y prácticamente doblar el número de cápsulas de ultrasonidos necesarias. Por eso habría que probar si la mejora que aporta hace que merezca la pena este incremento, o por otra parte si

al disponer de esas nuevas posibilidades de hardware se podría diseñar alguna nueva funcionalidad que añada valor a la tarjeta y justifique el aumento de coste.

Hay que mencionar que debido al buen funcionamiento del umbral generado analógicamente no se ha llegado a utilizar la opción de generar el umbral mediante el DAC con el que se ha equipado a la tarjeta *Echo 5*. En caso de trabajar con el habría que programar tres librerías de firmware, una para hacer funcionar el bus SPI que permite la comunicación entre el microcontrolador y otros periféricos, otra para controlar la generación de señal mediante el DAC, y una última para realizar la captura de datos por parte de los conversores ADC disponibles en el microcontrolador. Los valores digitales para general el umbral se almacenarían en la librería de registros. El uso del umbral así generado permite disponer de una señal específica para cada par de cápsulas en los modos de funcionamiento uno, tres y cuatro, pero obliga a programar una autocalibración para obtenerlos.

6.3. Contribuciones

Este Proyecto Fin de Carrera ha servido para diseñar una tarjeta de expansión para el robot *e-puck*. El diseño hardware, firmware y las librerías se pondrán a disposición de la comunidad de usuarios del robot *e-puck* como hardware y código abierto, así como un manual de usuario de la tarjeta.

Finalmente, se planea escribir un artículo para una revista con índice de impacto dedicado al diseño y funcionamiento de la tarjeta *Echo 5*.

Apéndice A

Señales de los buses de expansión del *e-puck*

A continuación se listan las señales que transmiten los buses de expansión del *e-puck*, divididas en el conector que permite realizar o no la conexión de ciertas señales del robot, denominado *Jumper* y el conector que transmite señales de alimentación y comunicación a las tarjetas superiores denominado *Mechanical support*.

Conector *Jumper*:

- **XRS_TX y RS_TX:** Puenteada por la *e-jumper* pero no por la *Echo 5* para habilitar el uso de la UART por otras tarjetas de expansión, especialmente la *e-RandB*.
- **XRS_RX y RS_RX:** Puenteada por la *e-jumper* pero no por la *Echo 5* para habilitar el uso de la UART por otras tarjetas de expansión, especialmente la *e-RandB*.
- **SEL0, SEL1, SEL2 y SEL3:** Señales de selección para el conmutador de la *e-jumper*.
- **XBodyLed y BodyLed:** Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XAudioOn y AudioOn:** Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XFrontLed y FrontLed:** Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.

- **XBT_RX** y **BT_RX**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XBT_TX** y **BT_TX**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XBattLow** y **BattLow**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XLED3** y **LED3**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XSDI** y **EX_SDI**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XSDO** y **EX_SDO**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XFSYNC** y **FSYNC**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XMCLK** y **MCLK**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XLED5** y **LED5**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XAxeX** y **AxeX**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XAxeY** y **AxeY**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **XAxeZ** y **AxeZ**: Puenteada por la *e-jumper* y por la *Echo 5*.
- **V3.3C** y **GND_3.3C**: Alimentación y masa de 3.3V generada en el *e-puck*.

Conector *Mechanical support*:

- **BATT1** y **BATT2**: Puenteadas en el *e-puck*.
- **EX_PGC** y **EX_PGD**: Señales para programar el procesador del *e-puck*.
- **VBAT**: Dos pines puenteados en el *e-puck*. Tensión ofrecida por la batería, alimentará la fuente de alimentación y el elevador de tensión de la *Echo 5*.
- **EX_MCLR**: Señal de reseteo del procesador, compartida por el de la *Echo 5* y el del *e-puck* para realizar su programación.

-
- **REMOTE:** Transmite la señal del detector de infrarrojo para el mando a distancia, conectada con la salida del que se ha habilitado en la *Echo 5* por si no se dispone de otra tarjeta de expansión que tenga esta funcionalidad.
 - **GNDBAT:** Puenteadas en el *e-puck*. Masa de la la batería, que alimentará la fuente de alimentación y el elevador de tensión de la *Echo 5*.
 - **I2C_SDA y I2C_SCL:** Líneas de señal del bus de comunicación por I2C, por el que la tarjeta *Echo 5* se comunicará con el *e-puck*.
 - **SPK+ y SPK-:** Señales que controlan el altavoz de la *e-jumper*.
 - **GND_3.3A y GND_3.3B:** Puenteadas en el *e-puck*. Alimentación de 3.3V generada en el *e-puck*.
 - **V3.3A y V3.3B:** Puenteadas en el *e-puck*. Masa de la alimentación de 3.3V generada en el *e-puck*.
 - **CamClk, CamReset, VSYNC, Href:** Señales de control de la cámara del *e-puck*.
 - **PWDN:** Señal conectada al procesador del *e-puck* y a la salida del tercer micrófono incluido en este.
 - **PCLK:** Señal conectada al procesador del *e-puck*.
 - **EX_PIC_RESET:** Señal de reset, con un interruptor habilitado en la *Echo 5*.
 - **ENABLE_LDO:** Señal que indica la existencia de una alimentación, en la tarjeta *Echo 5* habilitará el funcionamiento de su fuente de alimentación.
 - **Y0 a Y7:** Señales conectadas al procesador del *e-puck*.
 - **VanalogA y VanalogB:** Puenteadas en el *e-puck*. Alimentación analógica generada en el *e-puck*.
 - **RS_RX_10V:** Señales de comunicación por UART a nivel de 10V

- **GNDanalogA** y **GNDanalogB**: Puenteadas en el *e-puck*. Masa de la alimentación analógica generada en el *e-puck*.

Apéndice B

Datasheet de las cápsulas
SQ-40-T-10B y *SQ-40-R-10B*.

AIR ULTRASONIC CERAMIC TRANSDUCERS

Ultrasonic Ceramic Transducers transfer acoustical energy to mechanical energy or vice versa.

The Standard Open Type Transducer is constructed in a manner which incorporates the fundamental structure of a piezoelectric ceramic element of the monomorph type with a conical metal resonator. This special combination provides high sensitivity (over -65dB/V/ μ Bar), wider bandwidth, excellent temperature and humidity durability, stable electrical and mechanical characteristics, and small size.

213-214

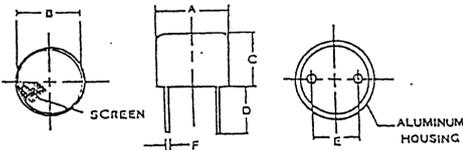
213-226

213-238

Applications:

- o Remote control devices
- o Liquid & bulk sensors
- o Proximity sensors
- o Level controls
- o Intrusion alarms
- o Motion detectors
- o Auto doors
- o Counting devices

Dimensions



- A = 9.8 (.39)
- B = 7.7 (.30)
- C = 6.6 (.26)
- D = 8.5 (.33)
- E = 4.8 (.19)
- F = 0.5 (.020)

Dims in mm
() in inch

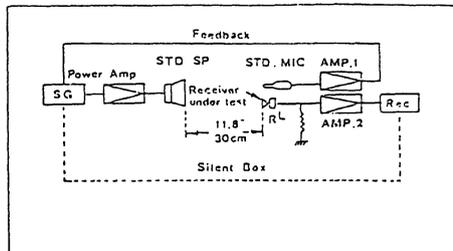
ITEM	UNIT	SQ-40-T-10B	SQ-40-R-10B
Transmitting Sensitivity	SV db	110	-
Receiving Sensitivity	MV db	-	-70
Resonant Freq. Trans.	khz	40 \pm 1.0	-
Resonant Freq. Rec.	khz	-	40 \pm 1.0
Directional Angle	°	Approx 60°	
Max Input Volts	Vrms	10	-
Impedence		Approx 700	Approx 30k
Capacitance	pf	2000 \pm 20%	
Pulse Rise Time	ms	0.7	-
Max Input Volts for Pulse Operation	Vp.p	Not recommended for Pulse Operation	
Temp Range	°C	-20 + 60	
Trans. Selectivity	Qsv	20 Min	-
Rec. Selectivity	Qmv	-	25 Min

Please note that the transmitter is identified by a white dot marked on the device

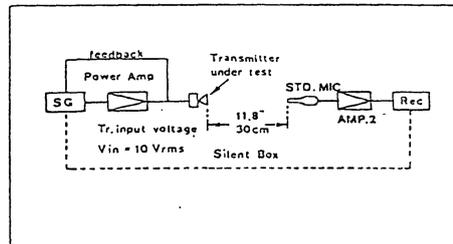
Figura B.1: Página 1 del datasheet de las cápsulas SQ-40-T-10B y SQ-40-R-10B.

General Information – Air Ultrasonic Ceramic Transducers

Receiver Sensitivity Measuring Circuit



Transmitter SPL Measuring Circuit



- Std. Mic. : Standard Condenser Microphone B&K Model 4135
- Amp : Amplifier
- CPU : IBM PC AT
- Std. Sp. : Ribbon Tweeter
- SG : Signal Generator
- Plotter : Roland Plotter
- RL : 3.9K Ω

Ratings

Temperature	Samples tested are placed for 15 min. in temperature chambers of -20°C (-4°F) & 60°C (104°F) respectively. Readings are done immediately on removal from each chamber.
Humidity	Sample is stored in $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($104 \pm 3.6^{\circ}\text{F}$), 90 to 95% RH atmosphere for 100 hrs. prior to subsequent 24 hrs. recuperatory period under room temperature/humidity.
Shock	Sample receives sine 100G: 6m/sec from 3 directions (X,Y,Z).
Temperature Cycle	Sample is first exposed to 120°C (248°F) for 30 min. then to -30°C (-22°F) for another 30 min., for the total time length of 60 min., or a cycle. After ten (10) consecutive cycles, it is returned to and kept at room temperature for 30 min. prior to reading.
Vibration	Sample undergoes following vibration: frequency: 10 to 55 Hz Amplitude: 1.5mm Duration: 2 hrs. Sweeping period 1 min. Direction: 3 (X,Y,Z) each direction
Results	1. Temperature test: Deviation of sensitivity from 23°C (73.4°F) environment is within allowable span of 10 dB in either case. 2. Humidity test and below: Deviation of sensitivity/SPL is within allowable span of 3dB, which meets specified value.

Suggestions for handling

1. Characteristics vary depending on input impedance. The graph entitled "Characteristic Change Due to Load Resistance" should be consulted before designing your products, for sound pressure level and sensitivity shift.
2. Transmitter and receiver should be treated as separate considerations.
3. Terminal polarity should be properly observed when connecting, as transducers are sealed in an aluminum case after connection of ground.
4. Optimum performance is achieved if the device is covered with noise-absorbent material such as soft rubber.

Caution

1. Transducers are designed for use in clean air. They should not be used, for example, in moist air (except enclosed type) or acid gas.
2. Transducers should not be supplied with high D.C. bias.
3. For safe operation:
Electrically – input wattage must not exceed 200mW
Mechanically – shield net should not be touched.

Custom designs

This brochure lists a selection of our more standard products. We can supply ceramic transducers to fit your special needs. Our technical staffs are always at your service and they are ready to assist you with your requirements.

Quantelec

TEL (0993) 776488

Figura B.2: Página 2 del datasheet de las cápsulas *SQ-40-T-10B* y *SQ-40-R-10B*.

Application Note – Ultrasonic Ceramic Transducers

Selection and use of Ultrasonic Ceramic Transducers

The purpose of this application note is to aid the user in the selection and application of the SSQC's Ultrasonic ceramic transducers.

The general transducer design features a piezo ceramic disc bender that is resonant at a nominal frequency of 20 – 60KHz and radiates or receives ultrasonic energy. They are distinguished from the piezo ceramic audio transducers also offered by S. Square in that they produce sound waves above 20KHz that are inaudible to humans and the ultrasonic energy is radiated or received in a relatively narrow beam.

The "open" type ultrasonic transducer design exposes the piezo bender bonded with a metal conical cone behind a protective screen. The "enclosed" type transducer design has the piezo bender mounted directly on the underside of the top of the case which is then machined to resonant at the desired frequency.

Comparative Characteristics

When compared to the enclosed transducer, the open type receiver will develop more electrical output at a given sound pressure level (high sensitivity) and exhibit less reduction in output as the operating frequency deviates from normal resonant frequency (greater bandwidth). The open type transmitter will produce more output for a specific drive level (more efficient).

The enclosed type transducer is designed for very dusty or outdoor applications. The face of the transducer must be kept clean and free of damage to prevent losses.

The transmitter is designed to have a low impedance at the resonant frequency to obtain high mechanical efficiency. The receiver is constructed to maximize the impedance at the specified anti-resonant frequency to provide high electrical efficiency.

Sound Propagation

In order to properly select a transducer for a given application, it is important to be aware of the principles of sound propagation. Since sound is a wave phenomenon, its propagation and directivity are related to its wavelength (λ). A typical radiation power pattern for either a generator or receiver of waves is shown in figure 1. Due to the reciprocity of transmission and reception, the graph portrays both power radiated along a given direction (in the case of wave production), and the sensitivity along a given direction (in case of wave reception).

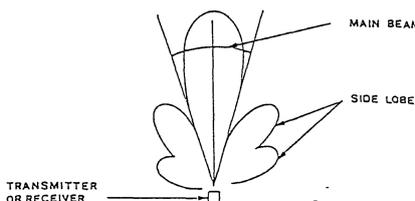


FIGURE 1 ULTRASONIC BEAM PATTERN

The angular, half-width ($\alpha/2$) of the main beam is given by:

$$\sin(\alpha/2) \approx \lambda/D = V/DF$$

Where "D" is the effective diameter of the flexure diaphragm, "V" is the velocity of sound (344 meter/sec. in air at 20°C), and "F" is the operating frequency. The above relationship applies if $\lambda < D$. For $\lambda \geq D$, the power pattern tends to become spherical in form. Thus, narrow beams and high directivity are achieved by selecting "D" large in relation to λ .

As an example of a typical situation, a transducer with an effective diameter of 25 mm will produce a main beam with full width α of 40° at a frequency of 40KHz. For open type transducer, the beam is decided by the angular and diameter of conical cone attached on the bender inside of housing and it can not be simply calculated by the diameter of housing.

The intensity of sound waves decrease with the distance from the sound source, as might be expected for any wave phenomenon. This decrease is principally a combination of two effects. The first is the inverse square law or spherical divergence in which the intensity drop 6dB per distance doubled. This rate is common to all wave phenomena regardless of frequency.

The second effect causing the intensity to decrease is in the absorption of the wave by the air. Absorption effects vary with humidity and dust content of the air and most importantly, they vary with frequency of the wave. Absorption at 20KHz is about 0.02dB/30cm. It is clear that lower frequencies are better suited for long range propagation. Of course, the selection of a lower frequency will result in less directivity (for a given diameter of source or receiver).

Transmitter Drive Considerations

The ultrasonic transmitters can dissipate 200mW rms

Quantelec

TEL (0993) 776488

2

Figura B.3: Página 3 del datasheet de las cápsulas *SQ-40-T-10B* y *SQ-40-R-10B*.

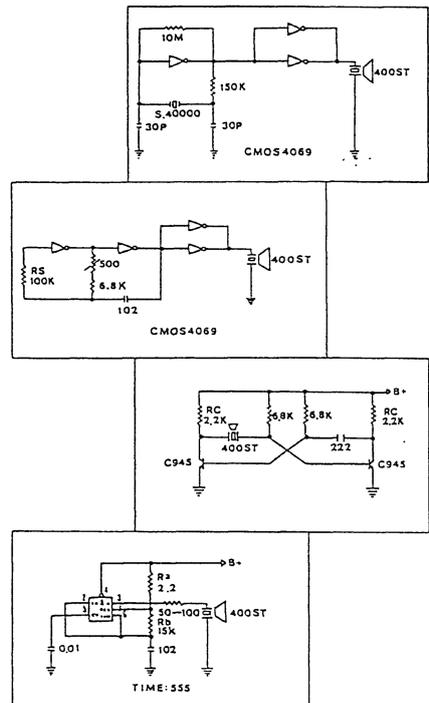
continually. Assuming a typical minimum series impedance of 500 ohms, the driver must source 20mA rms at 10Vrms.

A sinewave drive should be used to minimize harmonics that may excite the transducer in an overtone mode (vibrate at a multiple of the resonant frequency).

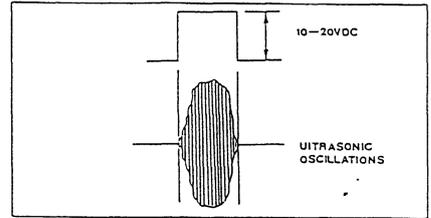
The maximum amplitude of the drive waveform should be limited to 50Vpp. The transmitter dissipation must be limited to an effective or average level of 200mW by reducing the duty cycle when the transmitter is dissipating more than 200mW.

There are several oscillator circuits suitable for driving our ultrasonic transmitter which have been widely used on security systems, remote control and other applications. Please bear in mind that the circuits we suggest sometimes need to be modified according to the different characters of impedance, phase angle and resonant frequency while driving different type of transmitters. Please refer to "Transmitter Impedance Characteristics" carefully.

Suggestion Oscillating Circuits:



The ultrasonic transmitters may also be driven with a pulse waveform. Application of a DC pulse of 10-20 volts will cause the transducer to "ring" at the selected resonant frequency. The ultrasonic output will be a damped ringing waveform as illustrated in the figure as follow.



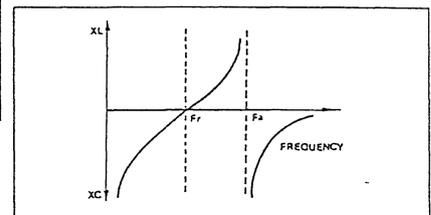
Transmitter Impedance Characteristics

Ultrasonic transmitter impedance characteristics vary with operating frequency and temperature in a complex manner that is different for each construction.

In general, for frequencies approximately 0.1 octave on either side of the resonant frequency, the transmitter looks like a capacitor. The current thru the transmitter will lead the voltage developed across the transmitter by 90 degrees.

As the resonant frequency is approached, the voltage drop across the transmitter will decrease to a minimum at the resonant frequency (minimum series impedance) and the current will increase proportionally. The phase lead to this current relative to the voltage will decrease to zero near the resonant frequency and the transmitter will then appear to be a pure resistance.

As the frequency is increased above the resonant point, the current may now lag the voltage by an increasing amount (maximum of 90 degrees) as the voltage across the transmitter climbs to a peak which is defined as the anti-resonant point. During this transition, the transmitter appears to have an inductive characteristic.



Increasing temperature will lower the resonant frequency and thus the point at which the phase changes will occur. The rate and magnitude of phase change is more stable than the resonant frequency.

Quantelec

TEL (0993) 776488

4

Figura B.4: Página 4 del datasheet de las cápsulas SQ-40-T-10B y SQ-40-R-10B.

Ultrasonic Ranging

Ultrasonic ranging systems are used to determine the distance to an object by measuring the time required for an ultrasonic soundwave to travel to the object and return to the source. This technique is frequently referred to as "echo ranging".

The distance to the object may be related to the time it will take for an ultrasonic pulse to propagate the distance to the object and return to the source by dividing the total distance by the speed of sound which is 344 meters/second or 13.54 inches/millisecond.

Below is a block diagram that illustrates the basic design concept and functional elements in a typical ranging system.

The oscillator output is gated to the ultrasonic transmitter for a brief period that will result in the transmission of a few cycles of ultrasonic energy.

The gate signal also starts a counter which is stopped by the detected returning echo. The count is thus

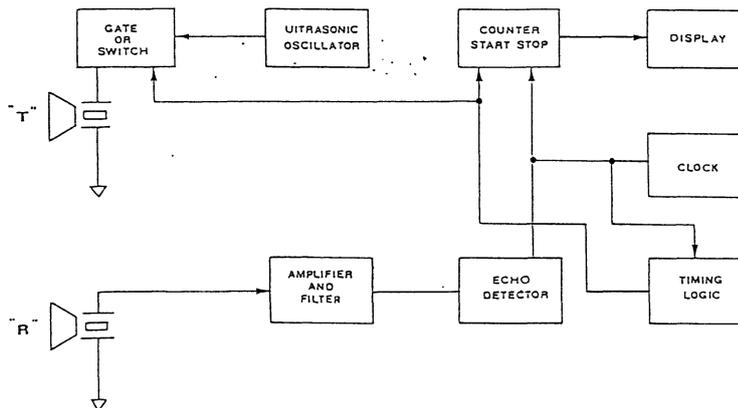
directly proportional to the propagation time of the ultrasonic sound.

The frequency of the clock that is driving the counter is selected to produce a count which represents the distance to the object in the desired engineering units.

The returning ultrasonic echo is usually very weak and the key to designing a good ranging system is to utilize a high "Q" tuned frequency amplifier stage that will significantly amplify any signal at the frequency of the ultrasonic echo while rejecting all other higher or lower frequencies.

Another useful technique is to make the gain of the echo amplifier increase with time such that the amplifier gain compensates for the proportional decrease in the signal strength with distance or time.

The most common approach is to utilize the counter state outputs to drive a digital programmable amplifier such that the gain is automatically related to distance the sound travels.

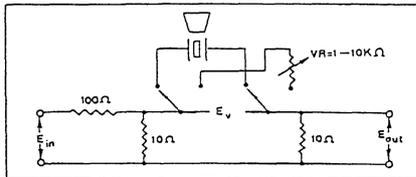


Quantelec

TEL (0993) 776488

Figura B.5: Página 5 del datasheet de las cápsulas *SQ-40-T-10B* y *SQ-40-R-10B*.

The test circuit shown as below may be used to measure the resonant, anti-resonant and impedance characteristics of S. Square's ultrasonic transducers.



Adjust frequency to obtain maximum E_{out} . Switch in VR and adjust to obtain same output. VR now equals the minimum series impedance.

Adjust frequency to obtain minimum E_{out} . Switch in VR and adjust to obtain same output. VR now equals the maximum series impedance at the anti-resonant frequency.

Measure phase between voltage E_u and E_{out} to determine impedance characteristics.

Ultrasonic Receiver Characteristics

Ultrasonic receivers develop an electrical output in proportion to the sound pressure level at the receiver. One of the most frequently asked questions is "What output can I expect from a receiver at a specific distance?" This question can be answered by a simple calculation that is based on the published specifications in the Ultrasonic Ceramic Transducer Data Bulletin.

The basic procedure is to first determine the minimum SPL at the receiver for a specific transmitter drive voltage and distance between the transmitter and receiver. This SPL must then be converted to "Pa" (Pascal) or " μ bar" (microbar) units.

The sensitivity of the receiver must then be converted from a dB reference to an absolute millivolts/Pa or μ bar and finally multiplied by the Pa or μ bar level present to obtain the final output.

Assume a 400ST160 transmitter is driven at a level of 14 volts rms and a 400RT160 receiver is located 2 meters from the transmitter and loaded with a 3.9K resistor (resistor placed across the terminals of the receiver).

Determining SPL at the Receiver

Transmitter SPL : 119 dB at 40KHz, refer to 0dB = 0.0002 μ bar at 30cm when driven with 10Vrms.

Receiver Sensitivity : -65dB at 40KHz refer to 1 Volts/ μ bar

SPL Reduction at 2 meters = $20 \log(30\text{cm}/200\text{cm})$

= -16.47 dB

SPL Gain for 14 Vrms Drive = $20 \log(14\text{V}/10\text{V})$

= 2.92 dB

The SPL at 2 meters = $119 + 2.92 - 16.47 = 105.5\text{dB}$

Converting SPL to μ bar

SPL = 105.5 dB

= $20 \log(\text{SPL in } \mu\text{bar} = "X"/0.0002\mu\text{bar @ 0dB})$

Dividing by 20 and taking the anti-log yields:

$188364.9 = "X"/0.0002\mu\text{bar} = 37.67\mu\text{bar}$

Determining Receiver Sensitivity in Volts/ μ bar

Sen. = -65dB

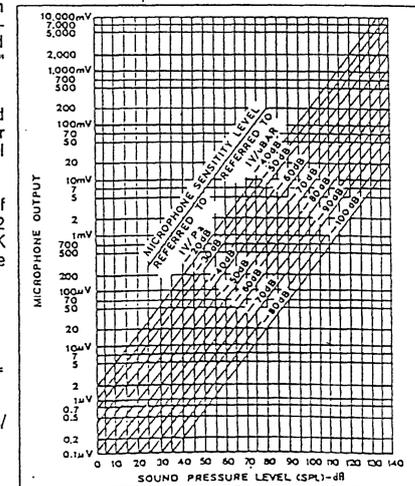
= $20 \log(\text{Output Voltage at a Specific SPL} \div 1 \text{ Volt}/\mu\text{bar})$

= $0.0005623 \text{ Volts}/\mu\text{bar} \times 37.67 \mu\text{bar}$

= 0.0212 Volts = 21.2 mVolts

This is the minimum output that should be developed under the assumed conditions. The actual output may be much greater depending on operating frequency vs matching frequency between T & R, environmental conditions, and reflective or absorption characteristics of materials in or near the emanating beam.

The analysis is necessary to the fundamental understanding of the principals of soundwave propagation and detection but it is tedious. Figure as below is a graphical representation of the previous analysis which may be used once in the SPL at the receiver is determined. Enter the graph from the SPL axis and proceed upward to an intersection with -dB sensitivity level of the receiver using the 1V/ μ bar referenced data. Follow a horizontal line to the "Y" axis to obtain the receiver output in mV.



Quatelec
TEL (0993) 776488

6

Figura B.6: Página 6 del datasheet de las cápsulas SQ-40-T-10B y SQ-40-R-10B.

Apéndice C

Esquemáticos

C.1. Esquemáticos de la tarjeta *Echo 5*

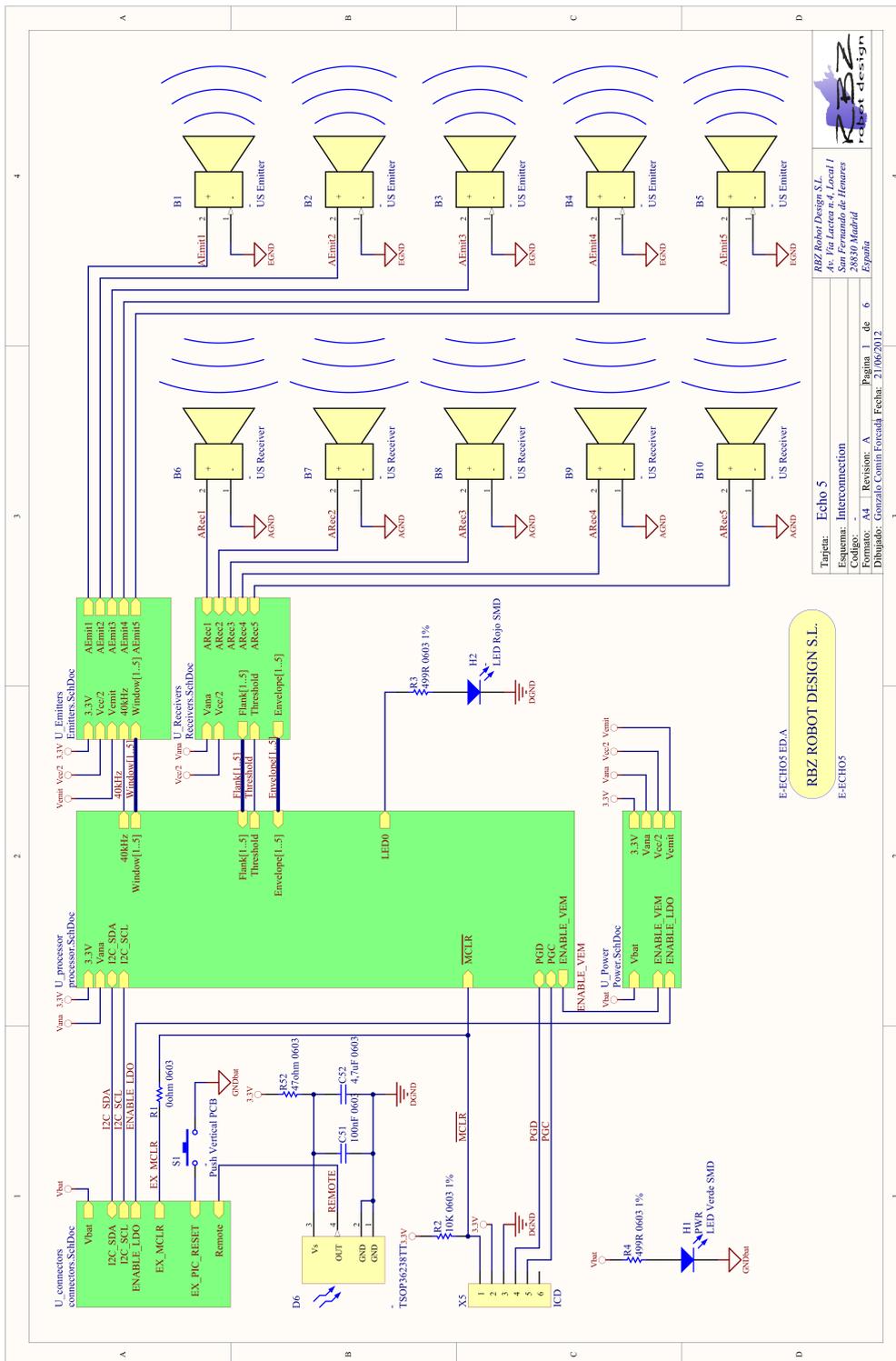


Figura C.1: Esquemático del circuito de interconexión de la tarjeta Echo 5.

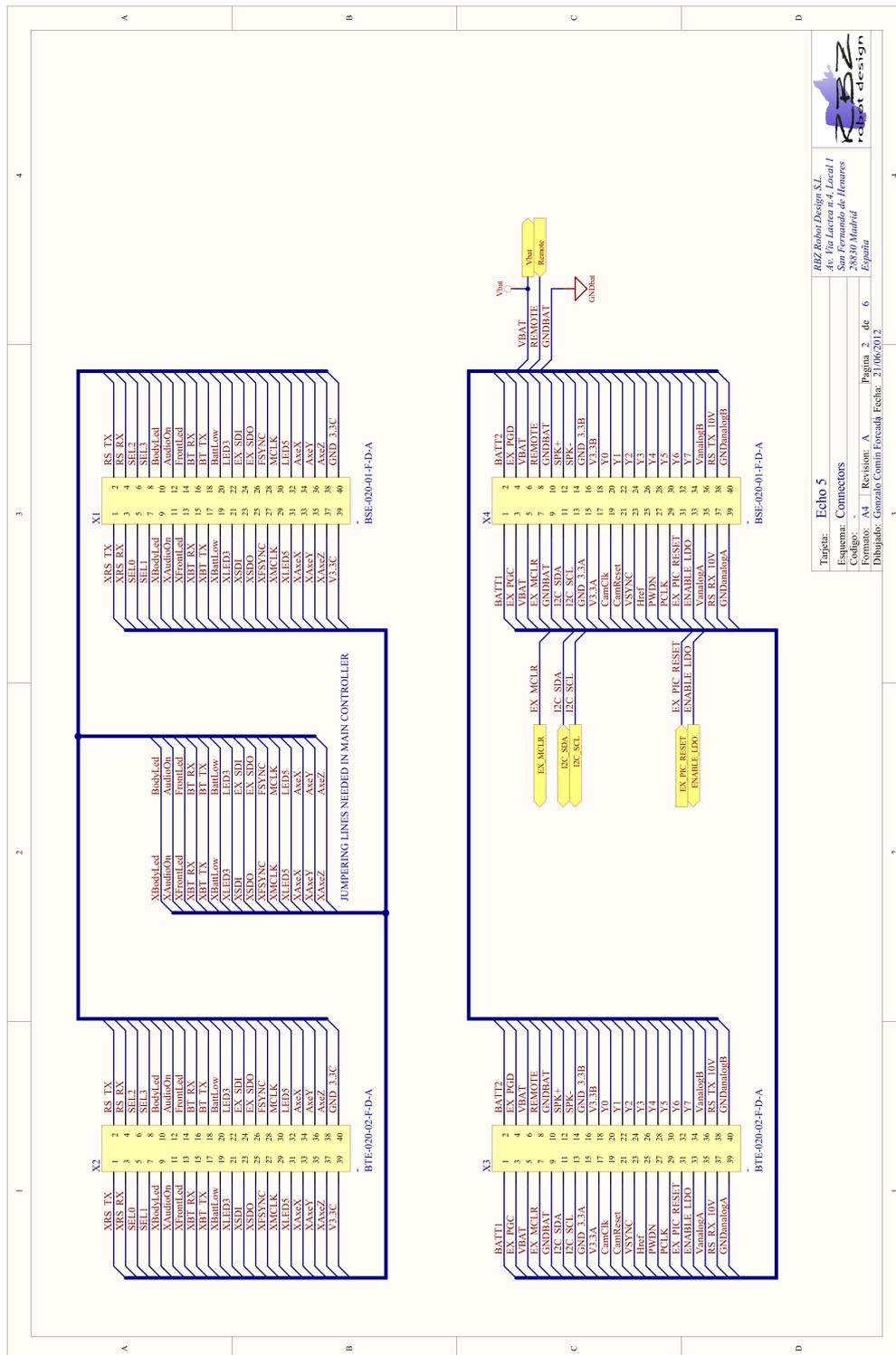


Figura C.2: Esquemático del circuito de conectores de la tarjeta Echo 5.

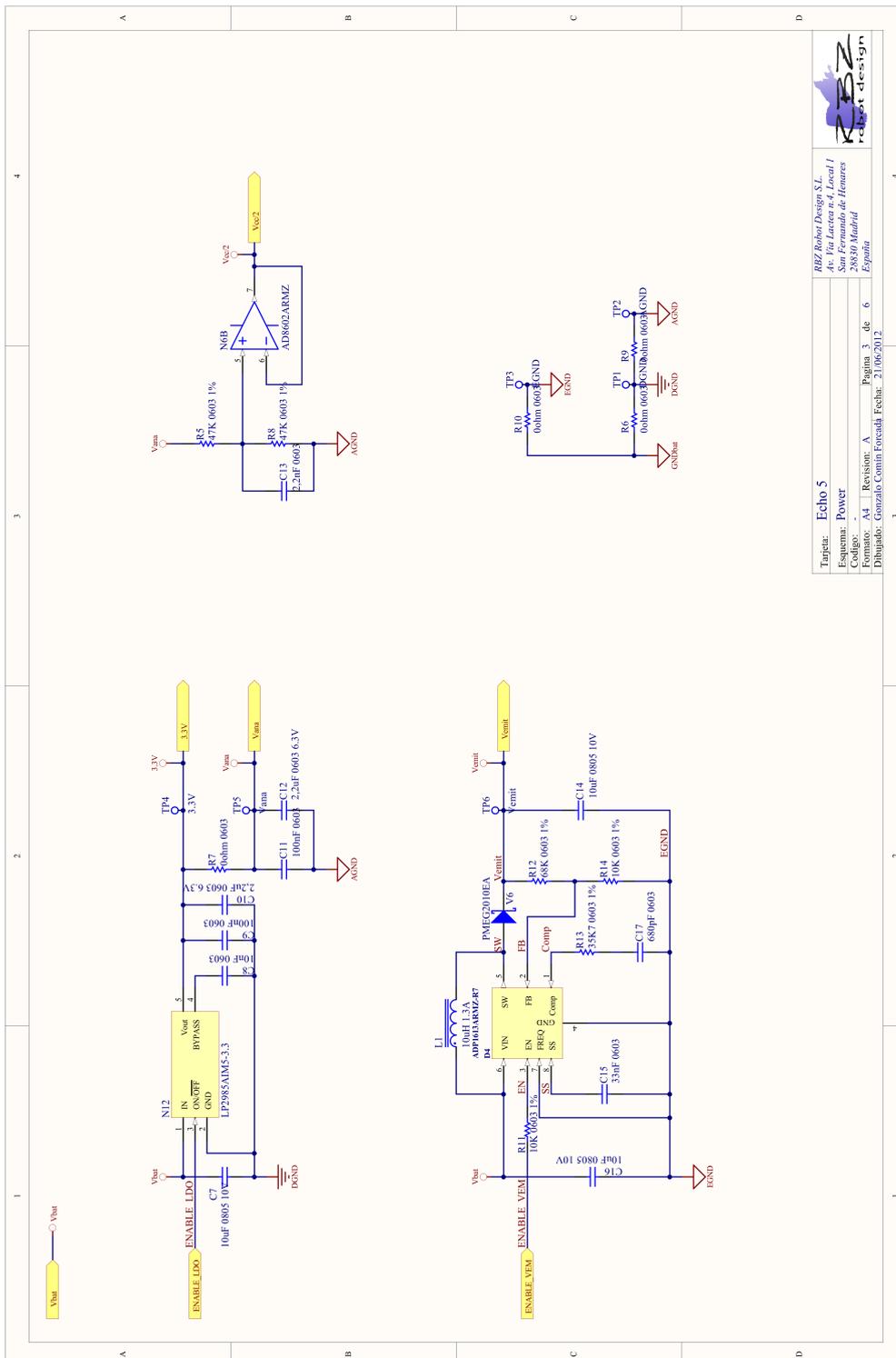


Figura C.3: Esquemático del circuito de alimentación de la tarjeta Echo 5.

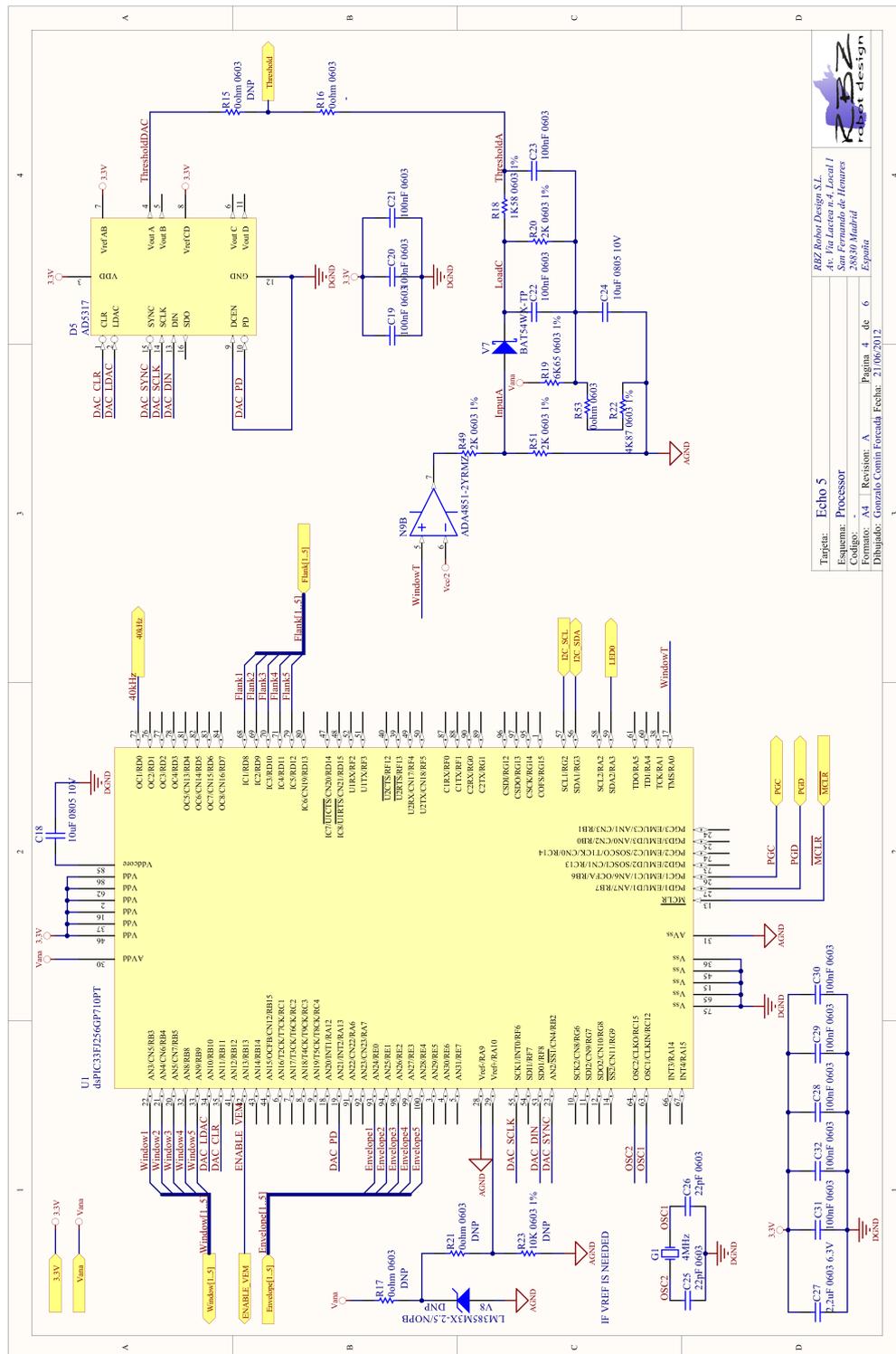


Figura C.4: Esquemático del circuito de procesador y generador de umbral de la tarjeta Echo 5.

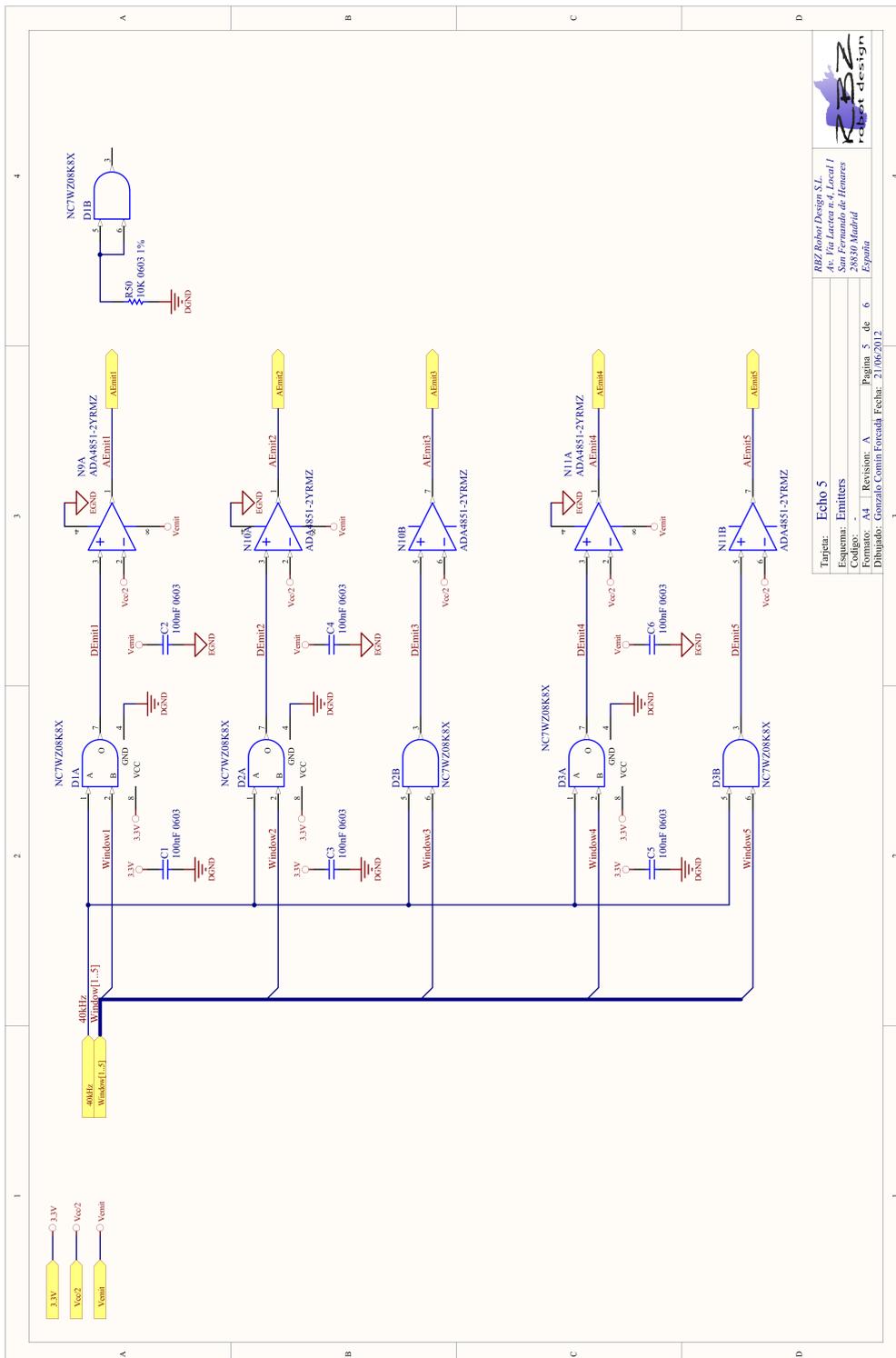


Figura C.5: Esquemático del circuito de emisión de la tarjeta Echo 5.

C.2. Esquemático de la tarjeta *Spacer*

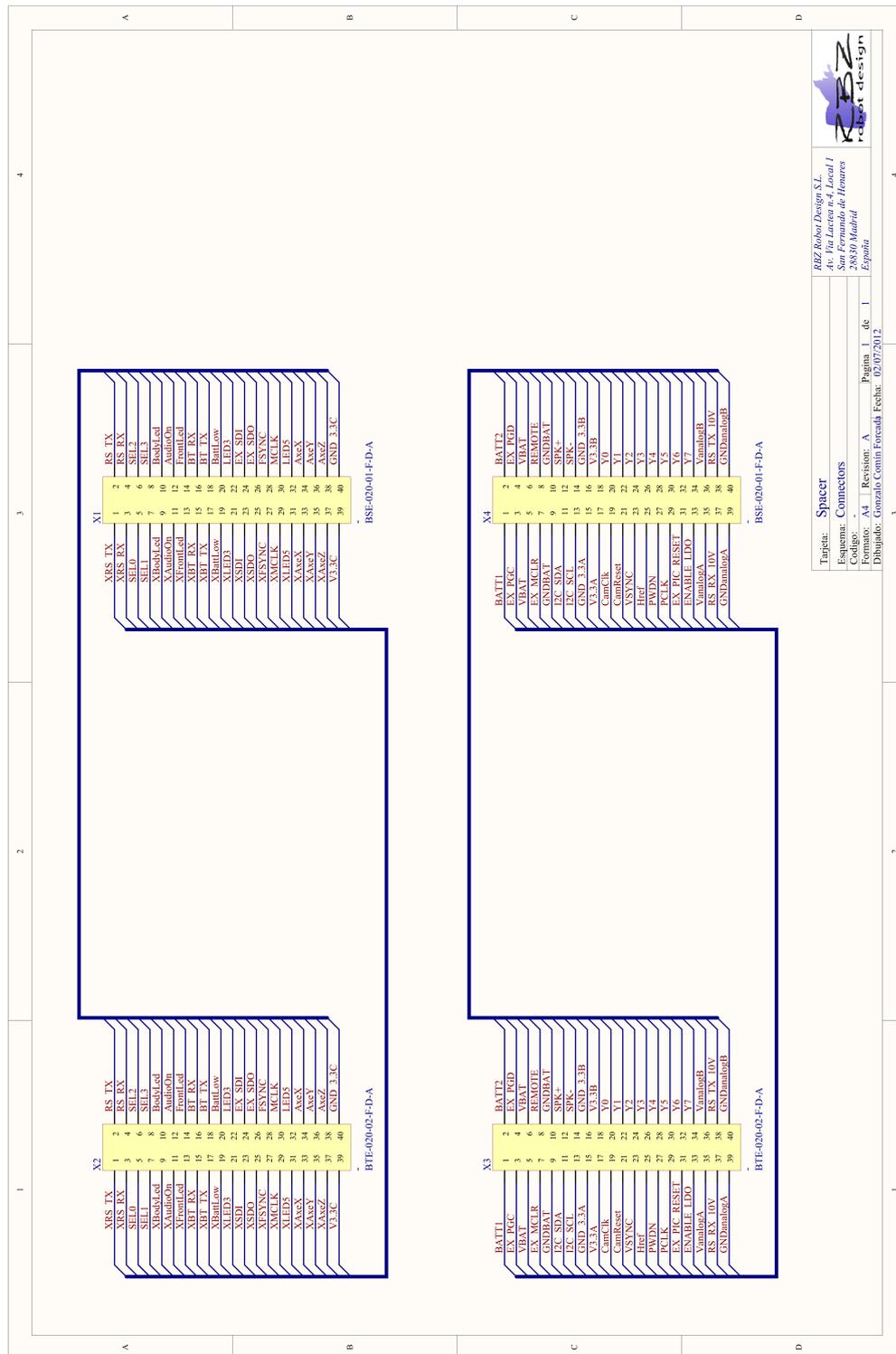


Figura C.7: Esquemático del circuito de la tarjeta *Spacer*.

Bibliografía

- Chen, J., Gauci, M., Price, M. J., and Groß, R. (2012). Segregation in swarms of e-puck robots based on the brazil nut effect. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012)*, Valencia, Spain. CD-ROM.
- Gutiérrez, A., Campo, A., Dorigo, M., Amor, D., Magdalena, L., and Monasterio-Huelin, F. (2008). An open localisation and local communication embodied sensor. *Sensors*, 8(11):7545–7563.
- Gutiérrez, A., Campo, A., Dorigo, M., Donate, J., Monasterio-Huelin, F., and Magdalena, L. (2009). Open e-puck range and bearing miniaturized board for local communication in swarm robotics. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3111–3116, Piscataway, NJ. IEEE Press.
- Jiménez, J. A. and González, J. J. (Junio de 2008). Sistema de doble umbral para el incremento de la directividad en un sensor ultrasónico. *Avances en Sistemas e Informática*, 5(2):179–183.
- Mondada, F., Bonani, M., Raemy, X., Pugh, J., Cianci, C., C, Klapotocz, A., Magnenat, S., J.C.Zufferey, Floreano, D., and Martinoli, A. (2009). The e-puck, a robot designed for education in engineering. In *Proceedings of the 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, pages 59–65, Castelo Branco, Portugal. IPCB-Instituto Politécnico de Castelo Branco.

- Mondada, F. and Gribovskiy, A. (2008). Audio-visual detection of multiple chirping robots. In *Intelligent Autonomous Systems 10: IAS-10*, pages 324–331, Amsterdam, Netherlands. IOS Press.
- Navarro, I., Gutiérrez, A., Matía, F., and Monasterio-Huelin, F. (2008). An approach to flocking of robots using minimal local sensing and common orientation. In Corchado, E., Abraham, A., and Pedrycz, W., editors, *Hybrid Artificial Intelligent Systems: 3th International Workshop, HAIS 2008*, volume 5271 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, pages 616–624. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pini, G., Tuci, E., and Dorigo, M. (2007). Evolution of social and individual learning in autonomous robots. In *Ecal Workshop: Social Learning in Embodied Agents*, Lisbon, Portugal. CD-ROM.