



Universidad
Carlos III de Madrid

*Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática.*

TRABAJO FIN DE GRADO

Integración de sensores a bordo del Robot Mini-Humanoide Bioloid

Autor: Antonio Valbuena Sánchez

Director: Félix Rodríguez Cañadillas

Tutor: Alberto Jardón Huete

Lo que verdaderamente importa en la vida no es el objetivo que nos marcamos, sino el camino que seguimos para lograrlo.

Título: Integración de sensores a bordo del Robot Mini-Humanoide Bioloid

Autor: Antonio Valbuena Sánchez

Director: Félix Rodríguez Cañadillas

Tutor: Alberto Jardón Huete

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día de de en, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Comenzar dando las gracias a mi tutor, Alberto Jardón, y a mi director, Félix Rodríguez, por ofrecerme la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado que verdaderamente me ha encantado y con el que he aprendido enormemente.

Agradecer también a los miembros de la Asociación de Robótica, Javier Isabel, Roberto Herrera, miembros del Robotics Lab, Pedro Portalatín, Juan G. Victores y Técnicos ISA, Angela Nombela, Fernando Sandeogracias, por siempre prestar su ayuda con una sonrisa compartiendo conocimientos y experiencias de manera desinteresada.

Dar las gracias con todo mi corazón a mi familia y en especial a mi madre Susana que me lo ha dado todo y soy quien soy gracias a ella y a mi hermana Susana con quien me entiendo con tan solo un gesto o una mirada. Destacar el amor que siento por mis abuelas María Dolores y Milagros que son las que más me añoran al no tenerme cerca. Todas ellas siempre han estado ahí cuidándome y aunque no haya sido consciente, confiando en mí.

Por último agradecer a mis amigos y compañeros con quienes comencé una vida aquí en Madrid, Juanjo, Fernando, Arturo, Luca, Habituales 217 y Los Pichicos. Esta etapa ha resultado ser una de las más importantes de mi vida y siempre la recordaré estando a vuestro lado.

Resumen

En este proyecto se ha desarrollado el pie robótico ROBfoot para ser integrado en plataformas robóticas mini-humanoides.

El proyecto nace en la línea de investigación de robótica mini-humanoide de la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid persiguiendo aumentar las capacidades de las plataformas robóticas mini-humanoides que disponen.

El pie robótico tiene la capacidad reconocer el entorno, procesar información y establecer comunicación con el controlador principal de la plataforma robótica mini-humanoide. Para ello se incorpora un completo sistema de sensorización y se integra un microcontrolador que desempeña la función de controlador del pie robótico, analizando la información de los sensores y comunicándose con el controlador de la plataforma mini-humanoide.

El robot mini-humanoide con el pie robótico instalado aumenta su versatilidad al ser posible la programación de nuevas habilidades antes impracticables. Se persigue dotar de la habilidad de ascender y descender por una escalera de manera autónoma y el pie robótico debe tener la capacidad detectar y posicionar los escalones de dicha escalera.

Se persigue no obstante el diseño de un pie robótico completo y funcional que sea apto para desempeñar otras funciones y de servir en investigaciones de robótica humanoide.

El pie robótico desarrollado ha sido empleado en el concurso nacional de robots mini-humanoides CEABOT donde su funcionamiento ha sido verificado y su utilidad confirmada.

Palabras clave: robótica, pie robótico, mini-humanoide

Abstract

ROBfoot, the robotic foot designed for mini-humanoid robots has been developed in this project

The project arises inside the mini-humanoids investigation group of Carlos III University of Madrid Robotics Association in order to increase the mini-humanoid robots' capabilities they possess.

The robotic foot recognises the environment, processes the information and establishes communication with the mini-humanoid robot's main controller. To accomplish this, a complete sensor system is embodied and a microcontroller which acts as the robotic foot's controller, analyzing information and communicating with the mini-humanoid's main controller, is integrated.

The mini-humanoid robot increases its versatility with the robotic foot installed as new abilities, which their establishment where impossible before, can be programmed. It is pursued to grant the ability to autonomously climb a stair, so the robotic foot must have the capability to detect the steps of a stair.

However, it is intended to design a complete and functional robotic foot able to perform other functions and be useful in humanoid robotics investigations.

The robotic foot was used in the national mini-humanoid robotics championship CEABOT where its functioning was verified and its serviceability confirmed.

Keywords: robotics, robotic foot, mini-humanoid

Índice general

Agradecimientos	VI
Resumen	VIII
Abstract	X
1. Introducción	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Estudio de las tecnologías utilizadas en el desarrollo de pies robóticos	2
1.1.2 Estudiar los componentes requeridos en el pie robótico.....	3
1.1.3 Desarrollo y montaje.....	4
2. Marco de Trabajo	7
2.1 Campeonato de robótica mini-humanoide CEABOT	7
2.2 Robot mini-humanoide RAIDER	11
2.3 Robot mini-humanoide MYOD	15
3. Estado del Arte	20
3.1 Tarea de subir y bajar escaleras	20
3.2 Pies robóticos	22
4. Diseño de ROBfoot	25
4.1 Sensores a bordo de ROBfoot	25
4.1.1 Sensores de Proximidad.....	26
4.1.2 Sensores de Fuerza	32
4.2 Controlador	36
4.3 Comunicación del pie robótico	39
4.3.1 Comunicación con el controlador de RAIDER	39
4.3.2 Comunicación con controlador de MYOD	41
4.3.3 Comunicación con un PC	41
4.4 Alimentación	42

4.4.1	Alimentación de ROBfoot diseñado para RAIDER	42
4.4.2	Alimentación de ROBfoot diseñado para MYOD	42
5.	Arquitectura hardware propuesta.....	45
5.1	ROBfoot integrado en RAIDER	46
5.2	ROBfoot integrado en MYOD	47
6.	Desarrollo de ROBfoot.....	49
6.1	Herramientas a utilizar	49
6.1.1	KiCad	49
6.1.2	FreeCAD	52
6.1.3	Arduino IDE	53
6.2	Acondicionamiento de los sensores a bordo	53
6.2.1	Sensores Infrarrojos	54
6.2.2	Sensores de Fuerza Resistivos	59
6.2.3	Interruptor Final de Carrera	62
6.3	Diseño partes mecánicas.....	63
6.4	Ejecución y Montaje	65
6.4.1	Esquemas electrónicos	65
6.4.1.1	Sensores a bordo de ROBfoot.....	66
6.4.1.1.1	Sensores Infrarrojos.....	66
6.4.1.1.2	Sensores de Fuerza Resistivos.....	67
6.4.1.1.3	Interruptores Final de Carrera.....	69
6.4.1.2	Comunicación del pie robótico	71
6.4.1.2.1	Comunicación con controlador de RAIDER.....	72
6.4.1.2.2	Comunicación con controlador de MYOD.....	75
6.4.1.2.3	Comunicación con PC	75
6.4.1.3	Miscellaneous	77
6.4.1.3.1	Oscilador.....	77
6.4.1.3.2	Reset	79
6.4.1.3.3	Filtrado de ruido	80
6.4.2	Desarrollo placa de circuito impreso	81
6.4.3	Montaje	84

7.	Puesta en marcha.....	88
7.1	Bootloader Arduino	88
7.2	Indicaciones de uso	90
8.	Ensayos y resultados.....	93
8.1	Test realizados sobre los sensores infrarrojos.....	93
8.2	Test realizados sobre los sensores de fuerza resistivos.....	103
9.	Examen práctico	116
10.	Presupuesto	121
11.	Conclusión	126
11.1	Evaluación de resultados.....	126
11.2	Conclusión personal.....	127
11.3	Desarrollos futuros.....	127
	Bibliografía.....	129
	Anexo 1: Esquema electrónico ROBfoot diseñado para RAIDER	131
	Anexo 2: Esquema electrónico ROBfoot diseñado para MYOD	133
	Anexo 3: Listado de componentes ROBfoot diseñado para RAIDER	135
	Anexo 4: Listado de componentes ROBfoot diseñado para MYOD	136
	Anexo 5: Fotelito de la PCB diseñada para RAIDER	137
	Anexo 6: Fotelito PCB diseñada para MYOD.....	140

Listado de figuras

- 2.1 Ejemplo de Humanoide antropomórfico y máxima longitud de pie robótico
 - 2.2 Esquema del campo y vista frontal de un obstáculo con marcador
 - 2.3 Esquema de la escalera
 - 2.4 Esquema Ring de combate
 - 2.5 Posible distribución de los marcadores
 - 2.6 Marcador sobre un obstáculo
 - 2.7 Plataforma robótica mini-humanoide RAIDER
 - 2.8 Cabeza de RAIDER con cámara
 - 2.9 Brazos de RAIDER con sensores infrarrojos
 - 2.10 Plataforma robótica mini-humanoide MYOD
 - 2.11 Sensores de ultrasonidos instalados en el pecho de MYOD
-
- 4.1 Funcionamiento sensor de proximidad infrarrojo de reflexión directa
 - 4.2 Funcionamiento sensor de proximidad ultrasónico
 - 4.3 Posicionamiento de superficie inclinada por sensor de proximidad ultrasónico
 - 4.4 Sensor infrarrojo Avago HSDL9100
 - 4.5 Funcionamiento de sensor óptico de reflexión directa HSDL9100
 - 4.6 Características Técnicas del HSDL9100
 - 4.7 Esquemático del HSLD9100 y distribución de los pines
 - 4.8 Rango de detección del HDSL9100
 - 4.9 Micro Interruptor Final de Carrera Honeywell BZ-2RQ-A2
 - 4.10 Sensor de fuerza resistivo Interlink FSR 400
 - 4.11 Resistencia vs Fuerza
 - 4.12 Características Técnicas del FSR400
 - 4.13 Esquemático FSR400
 - 4.14 Inmunidad a las vibraciones
 - 4.15 Microcontrolador Atmel ATmega328P
 - 4.16 Diagrama de bloques ATmega serie AVR 8-bit
 - 4.17 Pinout 28 PDIP ATmega328P
 - 4.18 Pinout y Diagrama Lógico del 74HCT
 - 4.19 Tabla de verdad del 74HCT
 - 4.20 Cable USB-serie FTDI
-
- 5.1 Arquitectura hardware ROBfoot integrado en RAIDER
 - 5.2 Arquitectura hardware ROBfoot integrado en MYOD
-
- 6.1 Editor de esquemáticos Eeschema
 - 6.2 Selector de huellas Cypcb
 - 6.3 Editor de PCB Pcbnew
 - 6.4 Visualizador de archivos Gerber GerbView
 - 6.5 Visualización 3D
 - 6.6 FreeCAD
 - 6.7 Entorno de programación Arduino IDE
 - 6.8 Diagrama de bloques del ADPS 9700
 - 6.9 Circuito de acondicionamiento del sensor infrarrojo HSDL 9100
 - 6.10 Temporizador NE555
 - 6.11 Pinout y Diagrama de Bloques del NE555
 - 6.12 NE555 configurado como multivibrador monoestable
 - 6.13 Puente de Wheatstone con FSR 400
 - 6.14 Acondicionamiento transimpedancia del FSR 400

- 6.15 Salida del circuito de acondicionamiento transimpedancia con voltaje de referencia positivo
 - 6.16 Divisor de tensión con FSR 400
 - 6.17 Circuito de acondicionamiento Interruptor final de carrera normalmente abierto
 - 6.18 Estructura del soporte para sensores
 - 6.19 Impresora 3D RepRap Prusa i3 P3Steel
 - 6.20 Entradas analógicas del Atmega328P destinadas a los Sensores Infrarrojos
 - 6.21 Esquema electrónico Sensores Infrarrojos
 - 6.22 Entradas analógicas del Atmega328P destinadas a los Sensores de Fuerza Resistivos
 - 6.23 Esquema electrónico Sensores de Fuerza Resistivos
 - 6.24 Entrada digital del Atmega328P destinada al Interruptor Final de Carrera en ROBfoot RAIDER
 - 6.25 Entrada digital del Atmega328P destinada al Interruptor Final de Carrera en ROBfoot MYOD
 - 6.26 Esquema electrónico Interruptor Final de Carrera
 - 6.27 Puerto Serie Atmega328P
 - 6.28 Pines destinados a la comunicación I2C
 - 6.29 Conexión con bus Dynamixel
 - 6.30 Interruptor de Funcionamiento del pie robótico
 - 6.31 Conexión con bus I²C
 - 6.32 Conexión con cable USB – serie TTL-232
 - 6.33 Comunicación con oscilador On-chip
 - 6.34 Conexión con cristal de cuarzo
 - 6.35 Pin Reset Externo
 - 6.36 Pulsador Reset
 - 6.37 Filtrado de sonido
 - 6.38 Creación de huella potenciómetro y cristal en editor de huellas de KiCAD
 - 6.39 Diseño de PCB
 - 6.40 PCB RAIDER beta
 - 6.41 PCB MYOD v1.0
 - 6.42 Soportes para los sensores
 - 6.43 Pie robótico con PCB y soporte para los sensores instalados
 - 6.44 ROBfoot diseñado para MYOD
 - 6.45 ROBfoot instalado en MYOD (parte trasera)
 - 6.46 ROBfoot instalado en MYOD (parte delantera)
-
- 7.1 ArduinoISP
 - 7.2 Conexión de los Arduino UNO para grabar Bootloader Arduino
 - 7.3 Comando Burn Bootloader en Arduino IDE
 - 7.4 Cable USB – serie TTL-232 FTDI modificado
 - 7.5 Elección de placa Arduino UNO para programar ROBfoot
 - 7.6 Proyecto ROBfoot en Arduino
-
- 8.1 Frecuencia de oscilación del multivibrador monoestable
 - 8.2 Señal PWM de 104µs de periodo y 20% de ciclo de trabajo
 - 8.3 Foto de comprobación de la correcta polarización del emisor LED infrarrojo
 - 8.4 Voltaje de salida analógico a 300mm
 - 8.5 Voltaje de salida analógico a 100mm
 - 8.6 Voltaje de salida analógico a 70mm
 - 8.7 Voltaje de salida analógico a 60mm
 - 8.8 Voltaje de salida analógico a 50mm
 - 8.9 Voltaje de salida analógico a 40mm
 - 8.10 Voltaje de salida analógico a 35mm
 - 8.11 Voltaje de salida analógico a 30mm
 - 8.12 Voltaje de salida analógico de 15mm

- 8.13 Voltaje de salida analógico a 2mm
 - 8.14 Tabla ensayo sensor infrarrojo
 - 8.15 Gráfica ensayo sensor infrarrojo
 - 8.16 Ecuación ganancia del amplificador de instrumentación INA333
 - 8.17 Voltaje de salida analógico con 500g
 - 8.18 Voltaje de salida analógico con 2500g
 - 8.19 Voltaje de salida analógico con 3000g
 - 8.20 Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con Puente de Wheatstone
 - 8.21 Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con Puente de Wheatstone
 - 8.22 Voltaje de salida analógico con 2000g
 - 8.23 Voltaje de salida analógico con 3000g
 - 8.24 Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con LM324
 - 8.25 Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con LM324
 - 8.26 Voltaje de salida analógico con 500g
 - 8.27 Voltaje de salida analógico con 1000g
 - 8.28 Voltaje de salida analógico con 2500g
 - 8.29 Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con Divisor de Tensión
 - 8.30 Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con Divisor de Tensión
-
- 9.1 Robots mini-humanoides participantes en CEABOT 2015
 - 9.2 MYOD con ROBfoot instalado
 - 9.3 Detector de líneas infrarrojo YL-73
 - 9.4 ROBfoot instalado en MYOD detectando línea blanca

1. Introducción

La Asociación de Robótica (ASROB) de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) [1] fue fundada en el 2009 por el departamento de Sistemas y Automática de la UC3M. ASROB fue instituida con la intención de impulsar en la comunidad universitaria, el interés por la robótica, la automática y la electrónica así como en el mundo de la ingeniería, de la ciencia y la investigación en general. Desde su creación, la asociación ha crecido mucho cosechando por el camino, muy buenos resultados tanto en sus distintas líneas de investigación como en los distintos campeonatos de robots en los que ha participado representando a la universidad.

Actualmente ASROB está constituido por cinco líneas de investigación abiertas. Las cinco líneas de investigación se encuentran dentro del ámbito de la robótica civil, la cual es una rama de la robótica de servicios. La robótica de servicios se dedica exclusivamente a desarrollar robots cuya función es la de asistir a la población civil en sus diversas actividades. Algunos ejemplos de robótica de servicios son aquellos robots que realizan tareas monótonas donde una presencia humana constante no es necesaria, como en trabajos de vigilancia o tareas peligrosas donde la presencia humana es cuanto menos deseada. Otro buen ejemplo de robótica de servicios son los robots orientados a la realización de tareas domésticas.

Las cinco líneas de investigación de ASROB son las siguientes: línea de UAVs, línea impresoras 3D Open-Source, robots personales de competición (RPR) y robótica mini-humanoide.

Señalar que todas líneas están fuertemente ligadas al estudio y fabricación de piezas mediante técnicas de impresión 3D y fomentan de forma activa, el trabajo en equipo tanto con los miembros de una misma línea como con otras líneas de investigación.

La línea de UAVs diseña, desarrolla y fabrica robots voladores cuadrucopteros. Inicialmente el grupo te propone un paquete UAV del que poder comenzar y posteriormente añadir las funcionalidades que uno desee. Entre las actividades realizadas por esta línea, podemos destacar su línea de investigación centrada en el desarrollo de algoritmos de reconocimiento e inspección para así poder dotar a los UAVs de diversas aplicaciones civiles.

La línea de impresoras 3D Open-Source se encarga tanto del mantenimiento de las impresoras 3D Reprap que dispone ASROB, como del desarrollo y fabricación de nuevas impresoras para la asociación por medio de las impresoras existentes. Hemos señalado con anterioridad que todas las líneas se benefician de estas impresoras, por ello deben estar disponibles y listas para que los distintos miembros puedan imprimir sus piezas 3D para sus respectivos proyectos.

La línea de robots personales de competición (RPR) diseña, desarrolla y fabrica robots de pequeña y mediana envergadura; centrándose en robots rastreadores, robots velocistas y robots mini-sumo. El objetivo principal de la línea RPR es construir una flota de robots para poder participar en los campeonatos de RPR que se realicen en España.

Finalmente llegamos a la línea de robótica mini-humanoide, línea a la que el presente proyecto pertenece. La línea de robótica mini-humanoide también se originó, al igual que la línea RPR, debido al deseo, de los miembros de ASROB, de participar en campeonatos de robótica mini-humanoide. El grupo dispone de plataformas robóticas mini-humanoides comerciales Robonova y Bioloid y su objetivo es introducir modificaciones en ellas para convertirlas en robots mini-humanoides más completos y robustos. Entre las modificaciones más habituales están la integración de sensores, integración de cámaras, sustitución de placa controladora original por placas controladoras más potentes y remodelación de piezas estructurales. Una vez desarrollado el robot mini-humanoide completo y robusto, este grupo también se encarga de programar los

algoritmos de control de movimiento y estrategias de acción para las diferentes actividades que el robot mini-humanoide desempeñe.

En definitiva ASROB se trata de una asociación en la que existe un ambiente de trabajo y un compañerismo excepcional. Es la manera perfecta para introducirse en el mundo de la robótica y desarrollarse con aquellos conocimientos instruidos en las diferentes asignaturas de una forma diferente y muy divertida: carreras, luchas a muerte...etc.

Destacar también la buena acogida y trato recibido por los distintos miembros del departamento de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III. Consultando mi trabajo, alentando mi ánimo y ofreciendo cualquier tipo de apoyo de manera desinteresada.

Personalmente, el mundo de la robótica me fascina desde siempre y especialmente desde que he tenido la oportunidad de conocerlo más a través de las distintas asignaturas y adentrarme a trabajar en él en profundidad a través del presente proyecto.

He comenzado a adquirir las piezas propuestas por el grupo UAV y mi siguiente paso es, tan pronto finalice el presente proyecto, comenzar a fondo a construir mi propio UAV.

1.1 Objetivos

El objeto del presente proyecto es el desarrollo de un pie robótico para su implantación en una plataforma robótica mini-humanoide.

La misión del pie robótico es la de aumentar la versatilidad del robot mini-humanoide dotando a éste de la habilidad de ascenso y descenso por una escalera de forma autónoma.

De manera que el propósito es el diseño de un pie robótico robusto y completo, que permita al robot mini-humanoide subir y bajar unas escaleras, pero que además sea funcional y sencillo de utilizar, como para ser utilizado para otros propósitos o servir en futuras investigaciones orientadas a la robótica humanoide.

Para la consecución de este objetivo se desarrollarán una serie de sub-objetivos que se describen a continuación.

1.1.1 Estudio de las tecnologías utilizadas en el desarrollo de pies robóticos

Antes de diseñar el pie robótico, realizaremos primero un análisis de algunos de los pies robóticos desarrollados hasta la fecha. Analizaremos las distintas tecnologías, dispositivos o configuraciones que utilizan y nos fijaremos en las capacidades que estos confieren.

De igual modo, haremos un extenso estudio sobre varios trabajos de investigación, realizados por distintos centros a lo largo del mundo, cuyo objetivo es el de dotar a un robot humanoide la capacidad de subir y bajar por unas escaleras de manera autónoma. Examinaremos una vez más los procedimientos utilizados y las tecnologías u dispositivos utilizados para cumplir la misión.

1.1.2 Estudiar los componentes requeridos en el pie robótico

Se procederá entonces con un análisis de los distintos componentes a incorporar en el pie robótico. Estudiaremos su funcionamiento en base a los requerimientos de nuestro proyecto y determinaremos que componentes son apropiados para integrarse en el pie robótico.

Las capacidades de los componentes deben ser al menos suficientes como para propiciar que el robot mini-humanoide realice de manera autónoma y robusta la misión de ascenso y descenso por unas escaleras.

Integrar sensores al pie robótico.

Para realizar el ascenso y descenso por unas escaleras con autonomía y en un entorno no predefinido, es necesario realizar la detección de los escalones de subida o de bajada.

Será preciso, por lo antes dicho, integrar en el pie robótico los sensores necesarios para detectar de forma precisa y fiable los obstáculos de subida y de bajada. Dicha detección puede llegar a ser realizada de forma eficaz empleando un número reducido de sensores, no obstante, como se persigue diseñar un pie robótico funcional y lo más completo posible, se integrarán una cantidad elevada de sensores.

Se pretende alcanzar una fusión sensorial, es decir, distintos sensores con diferente principio de funcionamiento trabajando conjuntamente. De este modo, reduciremos la incertidumbre y conseguiremos una sensorización robusta y completa que permitirá trabajar incluso cuando algún sensor funcione de forma inadecuada por características del entorno.

Por último, señalar que los sensores a incluir deben ser de tamaño reducido, bajo consumo y precio razonable.

Procesado de la información.

La información reunida por los sensores debe ser interpretada por medio de un software de control con el fin de determinar la existencia o inexistencia de un obstáculo de subida o de bajada; para ello es preciso incorporar un controlador en el pie robótico.

El controlador a escoger, debe detectar un número elevado de entradas analógicas para así poder comunicarse con el mayor número de sensores posible. La capacidad de procesamiento a su vez, debe ser suficiente como para interpretar adecuadamente toda la información recibida. La decisión de la existencia o inexistencia de un obstáculo es crítica ya que una mala resolución implicará en una caída del robot mini-humanoide, particularmente si no se detecta un obstáculo de bajada. Es por ello que el procesado de la información recibida por los sensores debe ser preciso y eficaz.

Se tratará de escoger, en la medida de lo posible, un controlador que no requiera programarse en un entorno de desarrollo fijo y que admita ser programado en C/C++.

1.1.3 Desarrollo y montaje

Una vez seleccionados nuestros componentes, el pie robótico debe ser diseñado, testado y fabricado.

Como dijimos anteriormente, se ambiciona diseñar un pie robot robusto y funcional. Por ello su diseño debe ser eficaz, fácil de entender y cómodo de utilizar.

Acondicionamiento y caracterización de los sensores.

Para una correcta interpretación de los datos recogidos por los sensores, es preciso realizar un acondicionamiento electrónico.

Al tratarse de una instrumentación, resulta conveniente transformar la señal recibida del sensor y obtener una señal con rangos de voltaje más amplios. De este modo se tendrá una mayor sensibilidad además de presentar una mayor inmunidad al ruido en el ambiente de la medición. No obstante se deberá tener en cuenta que dicho rango de voltaje sea adecuado para el diseño a realizar.

Un correcto acondicionamiento de los sensores posibilitará la posterior extracción de información útil de las mediciones.

Procesado de información y comunicación

El controlador del pie robótico, será el elemento de decisión principal del robot mini-humanoide; en lo relacionado al dictamen de la existencia o inexistencia de un obstáculo de subida o de bajada.

Con el fin de efectuar dicho cometido, se realizará una programación sencilla y eficaz sobre el controlador y de este modo, extraer la información útil de los datos recibidos. El controlador decretará una decisión, en función de dicha información, y ejecutará consiguientemente las acciones establecidas.

La principal función del controlador robótico será por tanto, interpretar la información y tomar una decisión; pero no menos importante es informar al controlador principal, encargado de la locomoción del robot mini-humanoide, de la decisión y así éste actuar en consecuencia. Será necesario por tanto, adecuar el controlador del pie robótico para comunicarse con el controlador principal del robot mini-humanoide.

Por último, es beneficioso y muy provechoso poder descargar firmware en el pie robótico con facilidad. Será necesario, por tal motivo, adecuar el controlador para poder comunicarse con un PC. El controlador del pie robótico, en esencia, no debería requerir comunicación con un PC; tan solo sería necesario la primera vez. Como ya ha sido mencionado, se aspira diseñar un pie robótico funcional y completo que pueda servir en trabajos de investigación, por ello permitiremos una fácil comunicación con un PC para que posteriores lazos de control puedan ser descargados en el controlador del pie robótico con facilidad.

Diseño de la estructura mecánica

Finalmente los nuevos dispositivos deberán ser instalados al pie robótico y éste a su vez a la plataforma robótica mini-humanoide. Para ello realizaremos una remodelación de la estructura mecánica del pie, tobillos y piernas por medio de una impresora 3D.

La nueva estructura debe posibilitar una fijación adecuada de los componentes, en particular los elementos de sensorización, ya que su correcta localización y posicionamiento es esencial para que su funcionamiento sea apropiado

Un aspecto a considerar es que la remodelación no debe limitar las funciones motoras del robot mini-humanoide.

2. Marco de Trabajo

En este capítulo se describe el marco de trabajo sobre el que se ha desarrollado el presente proyecto.

Presentaremos las plataformas robóticas mini-humanoides más utilizadas por el grupo de mini-humanoides de ASROB; plataformas sobre las que trabajaremos y que definirán las características de diseño del pie robótico.

También analizaremos el Campeonato de robótica mini-humanoide CEABOT sobre el que se fundamenta la línea de robótica mini-humanoide de ASROB y al que se aspira participar en la prueba de escaleras.

2.1 Campeonato de robótica mini-humanoide CEABOT

En el capítulo de Introducción del presente proyecto, presentamos la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III (ASROB) y aludimos, que la línea de investigación de robótica mini-humanoide nació debido a que sus miembros anhelaban participar en campeonatos de robots mini-humanoides. Concretamente se deseaba participar, entre otros, en el campeonato de robótica mini-humanoide más importante de España, el Campeonato CEABOT [2].

El Campeonato CEABOT es el concurso de robótica mini-humanoide más importante de España debido a su historia, con su décima edición en el año 2015 es el más antiguo de España; y al importante apoyo que recibe de numerosas empresas y universidades. Equipos de universidades españolas y equipos independientes presentan sus robots mini-humanoides al campeonato para así demostrar sus capacidades a través de las diferentes pruebas.

Al tratarse de un campeonato de robótica mini-humanoide, la normativa estipula que los robots participantes han de tener una constitución antropomórfica, es decir, dos piernas, un tronco y dos brazos articulados. En la Figura 2.1 mostramos un ejemplo de un robot humanoide antropomórfico.

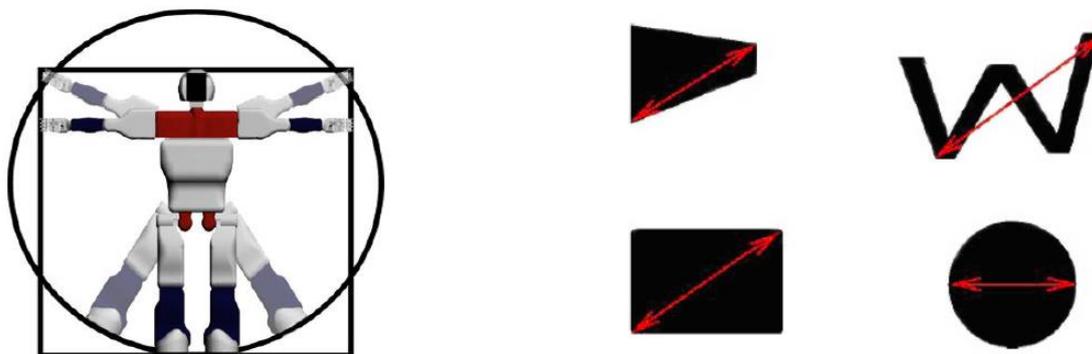


Figura 2.1: Ejemplo de Humanoide antropomórfico y máxima longitud de pie robótico

La altura máxima del robot mini-humanoide completamente erguido no debe rebasar los 50 cm. y el peso máximo permitido es de 3 Kg. De igual modo se limita la máxima longitud del pie a 11 cm, entendiéndose por máxima longitud del pie a la distancia entre sus dos puntos más alejados como también se puede ver en la Figura 2.1

El concurso consta de cuatro pruebas de distinta naturaleza que verifican las capacidades de locomoción, de percepción y de adaptarse a un entorno de los robots mini-humanoides participantes. A continuación detallaremos las distintas pruebas estipuladas del Campeonato CEABOT 2015.

Prueba 1. Carrera de obstáculos.

Se trata esencialmente de una prueba de movilidad. Los robots mini-humanoides deben ir desde un extremo del campo al otro, y posteriormente volver al punto de partida. El campo tiene obstáculos que deben ser esquivados, sin ser derribados ni desplazarlos de su posición. Los jueces deciden la posición de los obstáculos de manera aleatoria al inicio de cada intento, habiendo un máximo de seis obstáculos. A la hora de puntuar se considera el tiempo transcurrido, la distancia recorrida y número de penalizaciones si éstas se hubieran producido. En la Figura 2.2 mostramos el esquema del campo y la vista frontal de un obstáculo con un marcador.

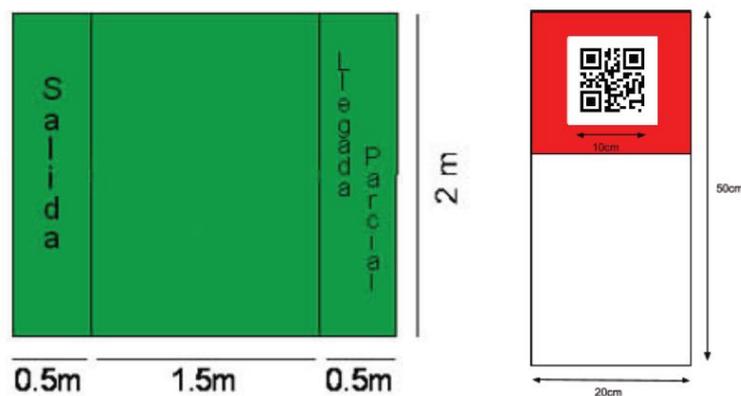


Figura 2.2: Esquema del campo y vista frontal de un obstáculo con marcador

El campo es una superficie nivelada, plana y rígida, de 2.5 metros de largo por 2 de ancho. El color de la superficie es verde y líneas blancas dividen el campo en tres zonas como muestra la Figura 2.2. El robot parte de la zona de Salida y una vez alcance la zona de Llegada Parcial, habiendo rebasado por completo la línea blanca, debe darse la vuelta de forma autónoma para iniciar el proceso de vuelta y retornar a la zona de Salida.

Como novedad en el reglamento del 2015, existen marcadores pegados en las paredes del campo, para facilitar la orientación y sobre los obstáculos para facilitar su detección haciendo uso de una cámara de video.

Prueba 2. Escalera

Es una prueba de habilidad en la que el robot mini-humanoide pone a prueba sus capacidades de locomoción adaptándose al entorno. La prueba se desarrolla en el mismo campo que la Prueba 1 retirando los obstáculos y añadiendo una escalera como la que mostramos en la Figura 2.3

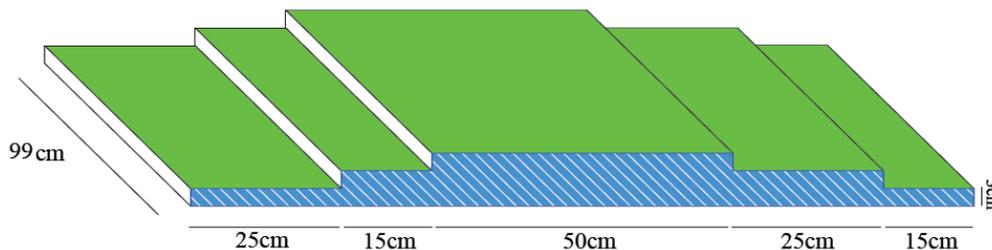


Figura 2.3: Esquema de la escalera

Los robots mini-humanoides deben ir de un extremo del campo al otro, al igual que en la Prueba 1, pero esta vez salvando una serie de escalones de subida y de bajada de 3cm de altura y longitud variable, y sin necesidad de realizar el camino de vuelta a la zona de partida. Los escalones se deben subir y bajar caminando, no siendo válido ningún tipo de salto ni acrobacia.

Se evalúa la habilidad de superar la escalera de forma autónoma, siendo penalizada cualquier intervención de los jueces por consecuencia de una caída irrecuperable o un bloqueo. En el caso de que tras una caída el robot mini-humanoide sea capaz de recuperarse y continuar desde el escalón del que se cayó, no existirá penalización alguna.

La puntuación de la Prueba 2 se computa de forma similar a la Prueba 1, teniendo en cuenta el tiempo transcurrido en realizar el recorrido completo, escalones superados y número de penalizaciones.

Prueba 3. Lucha (Sumo)

En esta prueba dos robots mini-humanoides de dos equipos diferentes luchan dentro de un Ring para derribar o sacar del Ring al robot contrario. En la Figura 2.4 mostramos el esquema del Ring de combate

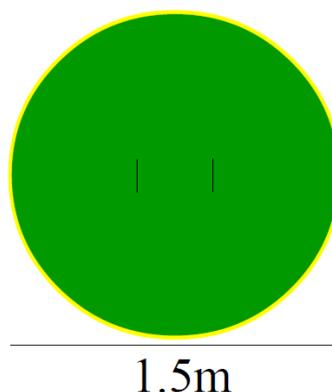


Figura 2.4: Esquema Ring de combate

Los combates consisten en tres asaltos de dos minutos cada uno. Ganará el asalto el robot que más puntos consiga en ese asalto y el combate lo ganará el robot que gane más asaltos. Se otorgan puntos por derribar al robot adversario y sacar el robot del ring; igualmente se otorgan puntos si el robot adversario cae o sale del Ring por sí mismo. En caso de empate de asaltos se desempata con la suma total de puntos conseguidos y si estos también sumaran lo mismo, se realiza un asalto adicional para nombrar un robot campeón del combate.

Se valora el comportamiento competitivo del robot. Actitudes pasivas, inmóviles o programaciones aleatorias de ataques pueden suponer la descalificación del robot. Esta regla pretende motivar la movilidad del robot, el uso de sensores y la creación de algoritmos inteligentes de lucha de sumo. Igualmente, para fomentar la competitividad, los robots no pueden permanecer con las rodillas dobladas durante un periodo de tiempo superior a 10 segundos. Estando el robot mini-humanoide erguido, es más fácil derribarlo y los combates son más dinámicos y entretenidos.

Prueba 4. Visión

En esta prueba el robot mini-humanoide demuestra su habilidad de procesar imágenes empleando una cámara. La prueba se desarrolla en el mismo campo que la Prueba 1, donde se colocan ocho obstáculos con marcadores localizados a intervalos de 45° y a distancias variables del centro. En la Figura 2.5 mostramos una posible distribución de los marcadores.

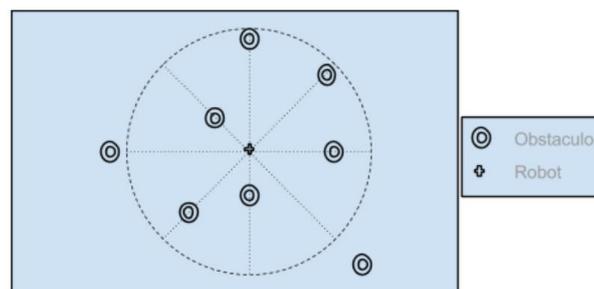


Figura 2.5: Posible distribución de los marcadores.

Los obstáculos y marcadores empleados tienen las mismas características que los empleados en la Prueba 1. En la Figura 2.6 mostramos una vez más un marcador sobre un obstáculo.

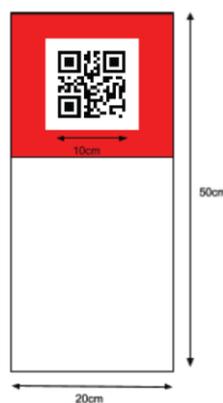


Figura 2.6: Marcador sobre un obstáculo

El robot inicia la prueba en el centro del campo y encarando al primer marcador. Los marcadores se deben decodificar e interpretar puesto que cada uno indica la siguiente acción que debe realizar el robot; los marcadores indican grados de rotación y sentido de ésta, para encontrar el siguiente marcador. Por tanto el robot debe realizar una secuencia de rotaciones correcta para superar la prueba

La puntuación de esta prueba se computa de forma similar a las Pruebas 1 y 2, valorando el número de marcadores interpretados, tiempo transcurrido y penalizaciones.

Como conclusión, podemos decir que el Campeonato CEABOT es una competición muy completa al reunir, de manera muy concisa, algunas de las habilidades entendidas como indispensables en un robot humanoide. Se trata de una competición multidisciplinar, en la que los robots mini-humanoides participantes actúan de manera completamente autónoma en todas las pruebas. Su diseño debe ser por consiguiente versátil y funcional, es decir, sin buscar la especialización en una prueba concreta ya que este enfoque implicará, con gran probabilidad, en un detrimento en la consecución de las otras pruebas.

2.2 Robot mini-humanoide RAIDER

Uno de los robots más utilizados por ASROB es la plataforma mini-humanoide comercial Bioloid. Trabajaremos sobre una plataforma robótica mini-humanoide comercial Bioloid modificada con arquitectura propuesta RAIDER [3]. La Figura 2.7 muestra una imagen de RAIDER.

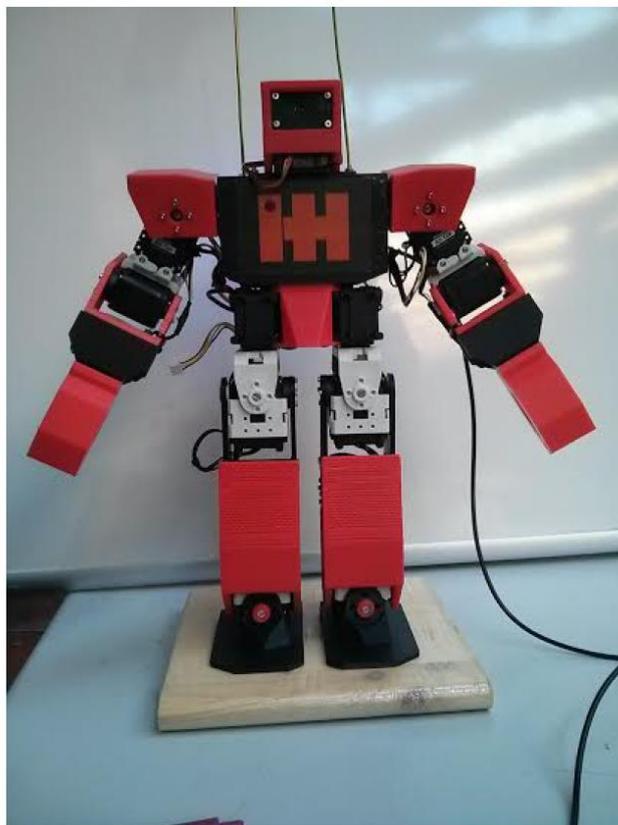


Figura 2.7: Plataforma robótica mini-humanoide RAIDER

RAIDER (Robot Antropomórfico para la Investigación y Desarrollo en Entornos Reales) es un robot mini-humanoide autónomo cuyo funcionamiento está fundamentado en el procesado de imágenes mediante algoritmos de visión por computador.

RAIDER presenta una arquitectura que dista considerablemente del robot mini-humanoide Bioloid original incluyendo nuevos componentes, substituyendo otros y remodelando la mayoría de piezas estructurales de la plataforma mini-humanoide original, tanto para aumentar sus capacidades como para permitir la inclusión de los nuevos componentes.

A continuación se detallan las principales modificaciones realizadas, presentando los nuevos componentes y explicando las remodelaciones estructurales.

Cámara

El primer elemento a mencionar, es la inclusión de una cámara en la cabeza del robot mini-humanoide. RAIDER emplea una webcam modelo Microsoft LifeCam Cinema para captar imágenes de su entorno. Se trata de una cámara de fácil integración, debido a sus pequeñas dimensiones, capaz de grabar en calidad 720p HD con enfoque automático y regulación de brillos a tiempo real. En la Figura 2.8 mostramos la cabeza de RAIDER con la cámara instalada.

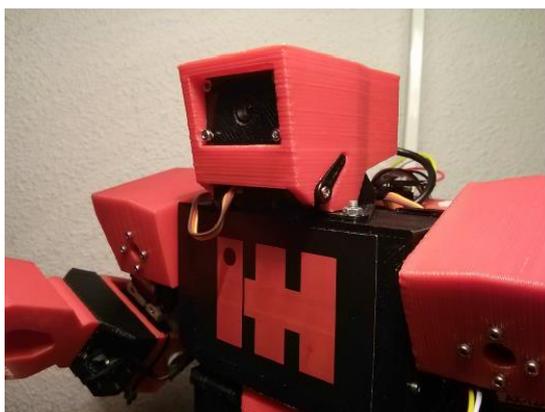


Figura 2.8: Cabeza de RAIDER con cámara.

Para sacar el máximo rendimiento a la cámara, RAIDER incluye dos importantes modificaciones estructurales.

Una es el desarrollo de una cabeza móvil para así permitir que la cámara pueda moverse con libertad y pueda enfocar a diferentes zonas de su entorno. La cabeza móvil se consigue mediante la incorporación de una plataforma articulada para la cabeza y un micro servo PWM. La cabeza móvil de RAIDER permite enfocar la cámara hacia el frente y hacia el suelo.

La otra modificación estructural introducida en RAIDER es la instalación de un servo adicional Dynamixel AX-12A en la cintura del robot mini-humanoide. La colocación del servo en la cintura mejora los movimientos del robot pero su introducción sirve principalmente para enfocar la cámara radialmente.

La combinación de las modificaciones estructurales de la cabeza y la cintura permiten enfocar la cámara en todas las direcciones sin mover la base del robot, creando de este modo un sistema distribuido pan-tilt para la cámara.

Sensores inerciales

RAIDER emplea una combinación de sensores inerciales para realizar dos tareas esenciales. Una es controlar el equilibrio del robot mini-humanoide, la otra es conocer la dirección de su desplazamiento.

Con el objetivo de conocer la posición del robot respecto al suelo y así controlar el equilibrio, RAIDER incorpora un acelerómetro y un giróscopo utilizando el sensor MPU650. Concretamente utiliza el sensor MPU650 integrado en un sensor MPU9150. El MPU650 es un sensor inercial compuesto por un acelerómetro de tres ejes y un giróscopo de tres ejes que evalúan en todo momento la posición del robot mini-humanoide respecto al suelo.

En cuanto al control de la dirección del desplazamiento, RAIDER integra una brújula magnética digital CMPS03. La brújula detecta y mide campos magnéticos de modo que apoyando su posición respecto al campo magnético terrestre, determina la orientación del robot mini-humanoide. La brújula analiza por tanto si el desplazamiento del robot mini-humanoide se realiza en línea recta y determina los redireccionamientos pertinentes a realizar.

Sensores infrarrojos

El funcionamiento de RAIDER está fundamentado en el procesado de imágenes mediante algoritmos de visión, como mencionamos anteriormente, no obstante RAIDER integra dos sensores infrarrojos Sharp GP2Y0A21YK.

La función de estos sensores es la de realizar mediciones de distancia y así detectar la existencia de un objeto. La cámara consume muchos recursos, por lo que con el propósito de aligerar carga al controlador, RAIDER delega en los sensores infrarrojos la tarea de detección de objetos tales como un obstáculo u otro robot mini-humanoide. Los sensores infrarrojos de RAIDER se encuentran localizados en sus brazos para así beneficiarse de la libertad movimiento de éstos y poder apuntar hacia el obstáculo. En la Figura 2.9 podemos ver los sensores infrarrojos instalados en los brazos de RAIDER.



Figura 2.9: Brazos de RAIDER con sensores infrarrojos

Controlador

El controlador CM-5, presente en la plataforma mini-humanoide Bioloid original, no es apto para manejar el conjunto de nuevos dispositivos descritos; entre otros, no tiene la capacidad de procesamiento suficiente como para desarrollar los algoritmos de visión.

La arquitectura RAIDER integra un nuevo controlador compuesto de dos elementos, un SBC (Single Board Computer) BeagleBone Black y una placa CM9.04.

El alto requerimiento de procesamiento RAIDER se solventa con la integración del SBC BeagleBone Black. Debido a sus capacidades de procesamiento, propias de un SBC y su variedad de pines, la BeagleBone Black es el controlador principal del robot mini-humanoide RAIDER y evidentemente se encarga del procesado de imágenes. La BeagleBone Black también procesa la información de los sensores y se encuentra en comunicación con el otro elemento del controlador, la placa CM9.04.

La placa CM9.04 es una placa de desarrollo basada en Arduino, que copia sus funcionalidades añadiendo la posibilidad de comunicar con servos Dynamixel. Su entorno de programación está basado en Arduino y posee librerías similares a Arduino. En definitiva, es un controlador más sencillo, que la BeagleBone Black, basado en un microcontrolador. La placa CM9.04 se encarga de controlar los 20 servos Dynamixel AX-12 presentes en el robot mini-humanoide RAIDER, ocupándose por tanto de la locomoción del robot mini-humanoide RAIDER. La placa CM9.04 también controla el micro servo presente en la cabeza móvil y se comunica con el controlador principal para recibir instrucciones.

Alimentación

Finalmente, mencionar que el robot mini-humanoide RAIDER también realiza una reconfiguración de su alimentación. Substituye la batería NiMH de 8 elementos AA Sanyo Eneloop presente en la plataforma Bioloid original por una batería LiPo Rhino 3S de 1750mAh.

La causa de la sustitución no se debe a la búsqueda de un aumento de la autonomía del robot mini-humanoide, sino de una mejora de la estabilidad realizando una mejor distribución del peso. La batería original de la plataforma Bioloid tiene un peso elevado y su volumen es muy alto, además se encuentra situada en la espalda del robot mini-humanoide subiendo el centro de gravedad del robot mini-humanoide. La batería LiPo Rhino 3S presenta un peso mucho menor además su tamaño permite su instalación en la cintura de RAIDER bajando consigo el centro de gravedad y concediendo una mejor estabilidad a la plataforma mini-humanoide.

La nueva batería de RAIDER, que ofrece 11.1V, alimenta a todos los dispositivos del robot mini-humanoide por lo que RAIDER integra un convertidor DC-DC de tipo reductor UBEC de 3A. Se trata de un circuito convertidor, con una elevada eficiencia de hasta el 90%, que convierte la tensión proveniente de la batería de 11.1V a 5V y así alimentar al conjunto de componentes.

En definitiva, RAIDER es una plataforma robótica mini-humanoide de propósito general robusta y flexible, ideal para ser utilizada como base de proyectos de robótica mini-humanoide, como es el caso que nos ocupa.

2.3 Robot mini-humanoide MYOD

Dentro de la línea de investigación de robótica mini-humanoide de ASROB nace el grupo de trabajo MYOD (Make Your Own Droid) [4]. El grupo de trabajo persigue diseñar un robot mini-humanoide de bajo coste con la idea de ofrecer a cualquier persona interesada en la robótica mini-humanoide, una alternativa frente a las costosas plataformas comerciales existentes en el mercado.

Con este planteamiento, MYOD ha sido diseñado para que sea totalmente imprimible, es decir, que todas sus piezas estructurales se puedan imprimir por medio de una impresora 3D doméstica. Por lo que respecta al resto de componentes del robot, como sensores, controlador o tornillería, han sido seleccionados para que puedan adquirirse con facilidad en cualquier ferretería o tienda especializada. En la Figura 2.10 mostramos una imagen de MYOD.

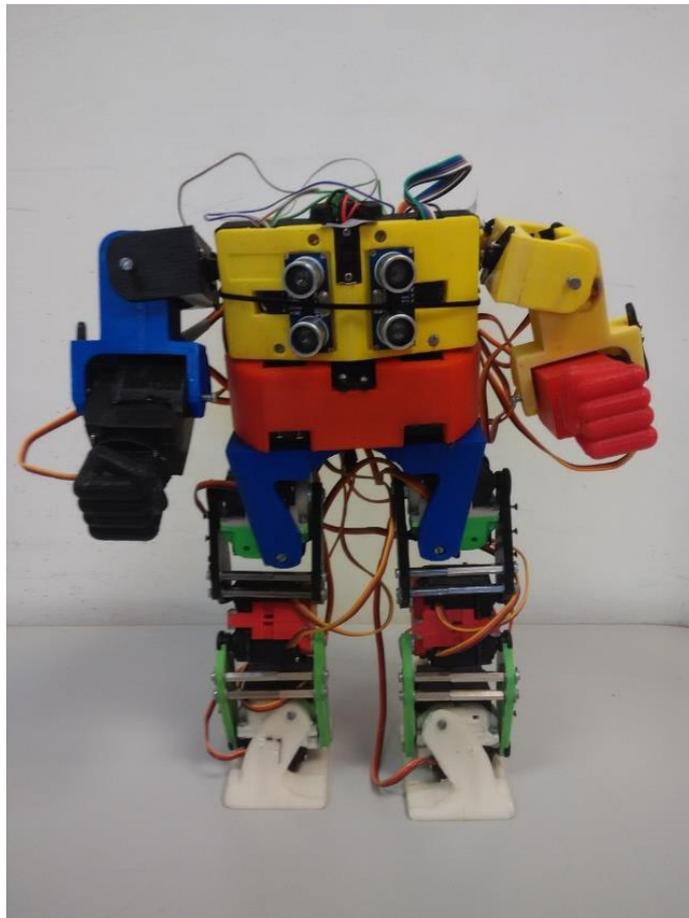


Figura 2.10: Plataforma robótica mini-humanoide MYOD

MYOD presenta unas características similares al resto de robots mini-humanoides comerciales puesto que su diseño ha sido orientado hacia el campeonato CEABOT ajustándose a su normativa. Se trata de un robot mini-humanoide con una constitución antropomórfica, una altura de 33 cm. en posición erguida y un peso total de 2,35 kg. A continuación resumiremos los principales elementos de la plataforma mini-humanoide.

Estructura

La plataforma mini-humanoide MYOD posee un total de 24 grados de libertad. Cada una de las piernas dispone de 7 grados de libertad mientras que cada brazo tiene 4 grados de libertad. Los últimos dos grados de libertad que conforman al robot se localizan en la parte inferior y superior del tronco. El grado de libertad situado en la parte inferior del pecho emula a la cintura y sobre dicho eje se produce el giro relativo entra la cadera y el pecho. De forma análoga, el grado de libertad ubicado en la parte superior funciona a modo de cuello y permite el movimiento relativo entre el tronco y la cabeza.

Sensores inerciales

El robot mini-humanoide MYOD emplea la misma combinación de sensores inerciales que la plataforma mini-humanoide RAIDER.

Se utiliza, por consiguiente, el acelerómetro y el giróscopo presentes en sensor el MPU650 para conocer la posición del robot respecto al suelo y así controlar el equilibrio; mientras que se integra una brújula magnética digital CMPS03 para determinar la orientación del robot mini-humanoide respecto el campo magnético terrestre y de esta manera controlar la dirección de desplazamiento.

Indicar que tanto la brújula CMPS03 como el sensor MPU9150 se conectan a través de un bus I²C al controlador de MYOD para enviar sus mediciones. Destacamos la existencia de dicho bus I²C en la plataforma mini-humanoide MYOD, no fue mencionado para el caso de RAIDER, por la trascendencia que ha provocado en el presente proyecto como se verá en profundidad en la sección 4.3.2 Comunicación con controlador de MYOD.

Sensores ultrasónicos

MYOD integra dos sensores de ultrasonidos HC-SR04. El HC-SR04 es un sensor de proximidad ultrasónico cuya misión es medir distancias utilizando ondas de sonido.

Los dos sensores HC-SR04 se ubican en el pecho de MYDO para así detectar obstáculos u otro robot que se encontrase de frente. Los sensores de ultrasonidos HC-SR04 pueden verse en la figura 2.11.

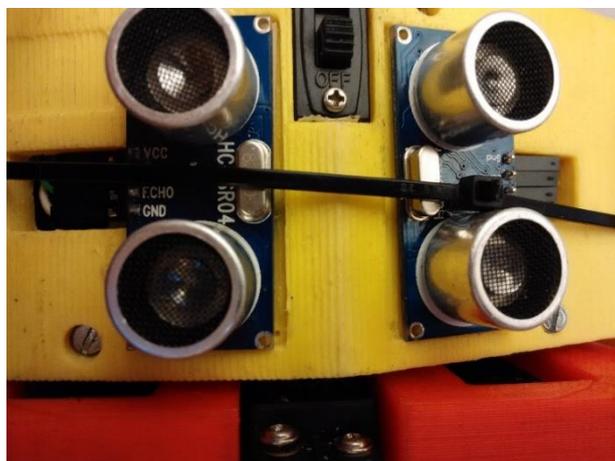


Figura 2.11. Sensores de ultrasonidos instalados en el pecho de MYOD

Servomotores

Los servomotores son los encargados de mover cada articulación y de esta manera desplazar al robot o generar cualquier tipo de movimiento. Son un elemento constitutivo fundamental del robot y la elección del modelo de servomotor estuvo regida al citado deseo del grupo de trabajo MYOD de diseñar una plataforma mini-humanoide de bajo coste.

Las articulaciones de las piernas y de la cadera son las que más tensiones sufren al sustentar la mayor parte del peso del robot a la vez de soportar los mayores esfuerzos dinámicos en el movimiento de caminata bípeda. Las piernas y la cadera de MYOD integran el servomotor TowerPro MG996R cuyos engranajes metálicos permiten soportar mayores esfuerzos sin deteriorar la parte mecánica.

Las articulaciones de los brazos tienen un menor requerimiento de fuerza, por ello MYOD emplea el servomotor Futaba S3003 en sus extremidades superiores. Este servomotor ejerce menos par que los TowerPro MG996R y tiene un consumo energético menor. El Futaba S3003 tiene engranajes de plástico en vez de metálicos por lo que su peso también es menor y reduciendo de forma notable el peso total del robot. No obstante, los TowerPro MG699R y los Futaba S3003 presentan unas dimensiones similares por lo que se pueden sustituir fácilmente unos por otros en función de las necesidades de potencia y par en distintas situaciones.

Por último se integra un servomotor TowerPro MG90S para mover la articulación del cuello. Se trata de un servomotor ideal para esta función al presentar unas reducidas dimensiones con bajo consumo, bajo peso y bajo par.

Controlador

MYOD emplea una placa Arduino MEGA 2560 como controlador de la plataforma mini-humanoide. Se trata de una placa reprogramable basada en el microcontrolador ATMEL ATmega2560 que realiza tareas repetitivas mediante el uso de salidas y entradas digitales. Es una placa orientada a proyectos con bajas exigencias computacionales y que permite conectar con sensores y actuadores con comunicaciones de bajo nivel

El principal cometido del controlador es la de gobernar de forma simultánea y a tiempo real los 24 servomotores presentes en la plataforma mini-humanoide. MYOD se beneficia de los Timer Array Unit (TAU) presentes en el microcontrolador, los cuales generan señales PWM sin detener o pausar el programa principal, para manejar los servomotores.

Uno de los factores más notables de la placa Arduino MEGA 2560 es su bajo precio. Al pretender construir un robot de bajo coste, no pueden existir componentes con costes relativos superiores a otros elementos. Al tratarse de una placa dentro de la filosofía de Open Source, sus diseños están liberados y se pueden encontrar réplicas exactas a un precio muy bajo.

Por último, al tratarse de una placa Arduino es compatible con el software Arduino IDE. Se trata de un software donde compilar y cargar los programas a la placa de una forma sencilla y cómoda. La programación se realiza mediante un lenguaje derivado de C++ que permite la programación orientada a objetos y donde existen gran número de funciones que simplifican enormemente la tarea. Arduino cuenta además con una amplia comunidad de usuarios que aportan sus conocimientos y avances a modo de librerías que pueden ser fácilmente utilizadas en otros proyectos.

Alimentación

El robot mini-humanoide MYOD integra el mismo modelo de batería que la plataforma mini-humanoide RAIDER, una batería LiPo Rhino 3S pero en esta ocasión el modelo de 2200mAh. La batería se ubica en la parte trasera de la cintura donde no entorpece la movilidad de ningún eslabón y eleva al mínimo el centro de gravedad del robot mini-humanoide.

La nueva batería de MYOD, que ofrece 11.1V, alimenta, al igual que en RAIDER, a todos los dispositivos del robot mini-humanoide por lo que es preciso integrar un convertidor DC-DC. En concreto, MYOD integra un convertidor DC-DC de tipo reductor UBEC Turnigy de 8A. Con elevada eficiencia, convierte la tensión proveniente de la batería de 11.1V a 6V y así alimentar al conjunto de componentes.

MYOD es, en resumidas cuentas, una plataforma robótica mini-humanoide excelente para aquellas personas interesadas en disponer de una plataforma mini-humanoide a bajo coste.

Nuestro marco de trabajo son por tanto los robots mini-humanoides RAIDER y MYOD y nuestra misión es la de dotar la capacidad de subir y bajar escaleras mediante el desarrollo de un pie robótico.

Con el nuevo pie robótico integrado, RAIDER y MYOD incrementan su capacidad de reconocer el entorno a causa del sistema sensorial del pie robótico. Gracias a dicho conocimiento, es posible implantar nuevas habilidades en el robot mini-humanoide antes impracticables, como la citada capacidad de locomoción de ascenso y descenso por unas escaleras. Pero el potencial de la integración del pie robótico no acaba aquí.

La nueva capacidad sensorial que aporta el pie robótico, se traduce en una mejora notable en la flexibilidad del robot mini-humanoide para enfrentarse a nuevos entornos. El nuevo pie robótico abre por tanto, una ventana para la investigación de nuevas soluciones para desenvolverse por entornos nuevos y complejos.

3. Estado del Arte

En este capítulo se desarrolla un análisis de algunos de los diferentes pies robóticos existentes en la actualidad. Comenzaremos no obstante, analizando algunas de las aproximaciones realizadas, por diferentes grupos de investigación, para realizar la tarea de subir y bajar escaleras por parte de un robot humanoide.

3.1 Tarea de subir y bajar escaleras

Los robots humanoides formarán parte de nuestras vidas cotidianas en un futuro que algunos vaticinan como no muy lejano. Al igual que con los electrodomésticos, concebidos como algo ordinario actualmente, todo hogar dispondrá de un robot humanoide personal para ayudar a las personas y realizar diversas tareas domésticas. Uno de los grandes retos a vencer es la capacidad del robot humanoide de desenvolverse en entornos complejos, como lo son los hogares, incluyendo el conocido elemento de construcción presente en las casas diseñado para comunicar espacios situados a diferentes alturas, las escaleras.

La tarea de subir y bajar escaleras es indispensable para un robot humanoide. De hecho, su potencial de poder superarlas, frente a los robots con ruedas, es uno de los factores que influyen a que se investigue continuamente nuevas soluciones para afrontar el problema. No obstante, no se trata de un movimiento trivial para un bípedo, el que ya de por sí tiene una inestabilidad inherente en su locomoción. El reto es mantener una posición estable en las dos fases de la locomoción bipeda, Single Support Plane y Double Support Plane, ascendiendo o descendiendo por una escalera. Es decir, combinar dos desplazamientos, uno vertical y otro horizontal, sin perder la estabilidad y así ascender o descender sin una caída del robot humanoide.

Existen aproximaciones realizadas con robots humanoides que emplean una secuencia programada sin respuesta sensorial para subir y bajar escaleras. El trabajo que se muestra en [5], con un robot BR-1 de 7-DOF (grados de libertad) emplea piernas con longitud variable y pies grandes junto a una precisa translación del centro de gravedad para realizar la tarea satisfactoriamente. No obstante, realizar la tarea sin respuesta sensorial suele tener malos resultados; cualquier evento imprevisto o incertidumbre propia del mundo real suele crear una divergencia entre el caso ideal y el caso real, propiciando la inevitable caída del robot humanoide.

Trabajos sobre una secuencia planeada apoyada por una respuesta sensorial obtienen mejores resultados y han desbancado las antiguas aproximaciones sin respuesta sensorial.

Es el caso del trabajo mostrado en [6]. Emplean un robot humanoide THBIP-I con una secuencia programada la cual satisface la inestabilidad del ascenso y descenso de una escalera. No obstante, la secuencia está apoyada por acelerómetros y giróscopos, situados en el torso del robot humanoide, y sensores de fuerza situados en la planta de los pies que miden la fuerza de contacto entre pie y suelo. Los sensores aportan información fiable y ésta sirve para corregir la secuencia original en el caso de detectar una falta de estabilidad.

El trabajo presentado en [7] también emplea sensores y una secuencia programada, pero difiere al caso anterior en el modo de abordar la tarea de subir y bajar escaleras. En este caso, el robot humanoide emplea acelerómetros y sensores de fuerza (también situados en la planta del pie) que determinan en todo momento el estado de la secuencia programada. Es decir, las lecturas de los sensores determinan la acción a realizar, no como en el caso anterior que sus lecturas eran utilizadas tan solo para corregir errores de la secuencia programada que pudieran aparecer.

Otro ejemplo de sensorización lo mostramos en [8], en contra de los dos trabajos anteriores, muestra de forma experimental como la tarea puede ser realizada sin emplear sensores inerciales. El robot humanoide supera de forma satisfactoria la tarea de ascenso y descenso mediante la sensorización de la fuerza y el torque aplicada en una articulación, concretamente en el tobillo del robot humanoide.

Las propuestas hasta ahora descritas son una buena manera de controlar el robot en el ascenso y descenso de una escalera, pero el éxito de su resolución depende directamente de que la escalera sea conocida. Esto se debe a que no se realiza una detección de los escalones para la realización de la tarea. Si se aspira que la tarea sea realizada con robustez y flexibilidad, la aptitud de detectar los escalones es una competencia imprescindible.

El trabajo señalado en [9] es un gran ejemplo que muestra como por medio de una sencilla sensorización del pie robot mini-humanoide, se realiza la detección de los escalones para la realización de la tarea. Integrando múltiples sensores infrarrojos de tamaño reducido en el pie, se realiza una detección tanto de los escalones de subida como de los escalones de bajada, además de propiciar un correcto posicionamiento del robot humanoide para la consecución de la tarea.

Otro procedimiento para detectar escalones sería como lo realizamos los seres humanos y la mayoría de los seres vivos, es decir por medio de la vista. Actualmente el procesado de imágenes es uno de los campos en el que mayor investigación se está realizando y esto ha repercutido de forma directa en la robótica, donde cada vez vemos a más robots empleando cámaras para reconocer el entorno en el que se encuentran. Como era de esperar, existen múltiples trabajos que emplean cámaras para la detección de escaleras y así dotar la capacidad al robot humanoide de ascender o descender por ella.

El robot humanoide Nao es uno de los robots humanoides más punteros actualmente. El trabajo realizado en [10] utiliza las dos cámaras monoculares del robot Nao junto a un láser 2D para realizar la tarea, con la particularidad a destacar de ser una escalera de caracol. El láser 2D localiza globalmente al robot en el entorno y la cámara es empleada para detectar los escalones. La detección se realiza mediante un procesado de la imagen que reconoce los contornos de los escalones.

Un trabajo a destacar es el realizado por Sony con su robot QRIO [11]. El robot humanoide es capaz de subir y bajar escaleras al igual que superar pequeños obstáculos, como los existentes en algunas casas entre habitaciones. Utilizando una visión estereoscópica, por medio de sus dos cámaras, se capturan imágenes y éstas se segmentan en superficies horizontales planas, las cuales son consideradas como seguras para la marcha del robot humanoide. Se trata de un gran trabajo puesto que QRIO es capaz de realizar la tarea sin importar el número de escalones ni su tamaño o altura. El único factor limitante es que la superficie sea rectangular y tenga una textura suficiente como para poder ser detectada por las cámaras.

Otro estudio empleando un robot Nao con un láser 2D integrado lo vemos en [12]. En este caso el robot utiliza sus cámaras monoculares junto al láser 2D para realizar una localización Monte Carlo en un interior. El resultado es que robot Nao es capaz de desenvolverse por el entorno, el cual incluye unas escaleras, determinando con gran precisión su posición en todo momento.

Por último señalar otros trabajos innovadores como [13] y [14]. Éstos dan un paso más a la hora de imitar al ser humano, el cual es capaz de utilizar cualquier parte de su cuerpo como apoyo adicional; un apoyo adicional puede ser empleado tanto para ayudar la locomoción bípeda, como para realizar movimientos imposibles manteniendo la postura bípeda. En el trabajo realizado en [13] consiguen que el robot humanoide realice la tarea de ascenso y descenso por unas escaleras ayudándose de una barandilla. En cuanto al trabajo [14] desarrollan un robot humanoide HRP-2 capaz de apoyarse con cualquier parte de su cuerpo y que reconoce los objetos de su entorno como

obstáculos pero también como posibles apoyos potenciales. Señalar la diferencia respecto al trabajo [13], ya que en el trabajo [13] el uso del apoyo adicional está impuesto al comienzo de la tarea, a diferencia del trabajo [14] que el que un apoyo adicional está determinado por un planificador que funciona constantemente decidiendo la posibilidad de un apoyo adicional.

3.2 Pies robóticos

Se vaticina, como ya ha sido citado, que los robots humanoides aumentarán de forma notable su espectro de actividades en los próximos años. Por primera vez en la historia, empezamos a ver robots fuera de su ámbito de trabajo tradicional, el industrial, trabajando y conviviendo con los seres humanos. La citada predicción de aumento del abanico de actividades, se debe a la gran capacidad de los robots humanoides de adaptarse a los entornos en los que se encuentra el ser humano, los cuales están altamente adaptados a él. Para la realización de múltiples tareas en entornos adaptados al ser humano, una arquitectura robot humanoide presenta una mayor eficacia y eficiencia frente a otras arquitecturas robot, como los robots móviles. Por tanto a la hora de diseñar un robot humanoide siempre se trata de alcanzar la mayor similitud posible con el ser humano.

Gracias la intensiva investigación y al progreso de la tecnología se ha logrado desarrollar robots humanoides muy sofisticados de altas prestaciones y múltiples grados de libertad. Algunos ejemplos de los robots humanoides más punteros actualmente son el HRP-2 de Kawada Industries o el conocido robot ASIMO de Honda. Ambos presentan una gran similitud con el cuerpo biológico de un ser humano pero cuando nos fijamos en sus pies encontramos unos pies planos de un segmento, siendo además mucho más grande que el de un ser humano; los cuales hacen que la marcha bípeda sea poco natural. Teniendo en mente que el pie es una de las partes más complicadas del cuerpo humano, con infinidad de huesos, músculos y tendones podríamos decir que el pie robótico es una parte fundamental a mejorar en la robótica humanoide.

A día de hoy se han realizado diversas investigaciones, en las que se dota a robots humanoides con nuevos pies robóticos. Los objetivos de estas investigaciones son numerosos entre los que podemos destacar el de mejorar la estabilidad o conseguir una marcha bípeda más eficiente y similar a la de un ser humano.

En los trabajos realizados en [15] y [16], un pie robótico dotado de sensores de fuerza localizados en la planta, recoge la información del suelo en el que se encuentra el robot humanoide. De esta forma se puede detectar si el robot humanoide se encontrase en un terreno inclinado o si éste presentase algún tipo de irregularidad. En el caso de [16] se emplea una malla de sensores que abarca toda la planta del pie, mientras que en [15] solo se emplean un número reducido de sensores localizados en puntos críticos. Otro trabajo interesante orientado a la movilidad de robots humanoides por terrenos inclinados lo mostramos en [17], donde se utiliza una serie de mallas de almohadillas de goma superpuestas en capas para reducir los impactos contra el suelo y también adaptar el pie disminuyendo, en la medida de lo posible, la inclinación del pie robótico cuando el robot humanoide se encuentre en un terreno inclinado.

Un trabajo prometedor es el presentado en [18]. En este caso, el pie robótico también integra sensores para detectar el contacto con el suelo, pero esta vez se tratan de simples interruptores, no sensores de fuerza como en los trabajos [15] y [16]. Lo más característico del pie en cuestión es su diseño, no se trata de un pie de grandes dimensiones, sino un peculiar pie acabado en una punta de pequeñas dimensiones cuya función es la de garantizar la estabilidad en terrenos irregulares.

Otro gran trabajo lo mostramos en [19]. Biolofeet son unos pies robóticos diseñados para ser instalados en un robot mini-humanoide Bioloid. El pie robótico está dotado de sensores en su planta de pie para detectar el contacto con el suelo y se comunica a través del bus Dynamixel presente en la plataforma robótica. Se trata de un pie robot funcional, modular y de gran potencial.

Existe una importante corriente de investigaciones orientadas a mejorar el pie robótico acorde a las necesidades de la zancada en la marcha bípeda. Para ello, y tratando de asemejar el pie robot con el pie humano, emplean pies robóticos formados de dos segmentos, en contra de los pies planos de un solo segmento. Sirviendo el pie humano como modelo, los nuevos pies robóticos están dotados de articulaciones en los dedos del pie y en el talón y así tratar de emular la zancada de un ser humano.

En los trabajos mostrados en [20] y [21] se demuestra como empleando una articulación en los dedos del pie, se aumenta de forma notable, frente a los pies planos, tanto la velocidad de la marcha bípeda como la distancia de cada paso, en [20]; o se reduce el consumo de energía en la marcha bípeda, en [21]. El trabajo presentado en [22] también emplea articulación en los dedos de los pies, pero esta vez la articulación está provista de muelles. La finalidad de dichos muelles es la de acumular y liberar energía y así justificar el uso de dicha articulación para realizar, por parte de un robot humanoide, el acto de correr o saltar de manera más eficaz.

El pie robótico del trabajo [23] también dispone de una articulación en los dedos del pie, pero ésta presenta una diferencia fundamental frente a las articulaciones de los trabajos previamente expuestos, [20], [21] y [22], ya que no se trata de una articulación pasiva, sino de una articulación controlada por un motor de corriente continua. Los estudios experimentales presentados en [23], reportan que empleando su pie robótico se logra un aumento de la velocidad de la caminata en un 80% además de permitir el ascenso del robot humanoide por escaleras con mayor altura de escalones.

En definitiva, el uso de pies robóticos con más de un segmento parece ser la mejor apuesta a la hora de mejorar los pies robóticos humanoides. La articulación de los dedos del pie permite desarrollar caminatas en las que el ZMP (Zero Movement Point) se mueve entre los dedos del pie y el talón permitiendo desarrollar una caminata más eficiente e indiscutiblemente más parecida a la de un ser humano.

Concluir remarcando que, a día de hoy, ya existen pies robóticos presentes en la vida de muchas personas. Se trata de las prótesis de última generación. Auténticos pies robóticos instalados en personas que han sufrido algún tipo de accidente en el que han perdido un pie (o ambos), y de este modo, ayudarles a llevar una vida más cómoda y natural. Podemos destacar los trabajos realizados en [24] y [25]. Son pies biónicos con un talón con capacidad de aportar potencia y así emular la función que desempeñarían los músculos y tendones. El resultado es una forma de andar más natural y menos costosa además de reducir problemas derivados en otras articulaciones como la rodilla o la cadera.

Como se verá en los siguientes capítulos, tanto los pies robóticos analizados, como las diferentes maneras de abordar la tarea de ascenso y descenso por unas escaleras para un robot humanoide servirán de inspiración a la hora de diseñar el pie robótico.

4. Diseño de ROBfoot

Hemos realizado un estudio sobre varios pies robóticos desarrollados a día de hoy y analizado una serie de trabajos de investigación cuya misión era la de dotar a un robot humanoide la capacidad de ascenso y descenso por unas escaleras. Además conocemos las plataformas robóticas mini-humanoides RAIDER y MYOD sobre las que vamos a trabajar y el desafío que nos presenta el Campeonato CEABOT sobre el que testaremos el funcionamiento del pie robótico en un ámbito de competición real. A estas alturas estamos en posición de comenzar a desarrollar el diseño del pie robótico.

La primera tarea a realizar, en el diseño del pie robótico, es la de selección de los dispositivos que compondrán el pie robótico.

Mencionar que el diseño mecánico del pie se explicará en profundidad en el capítulo de Desarrollo y montaje, no obstante adelantamos que al tratarse de un robot mini-humanoide en donde la caminata no está basada en el principio de ZMP, se descarta el diseño de un pie robótico de más de un segmento.

El capítulo que nos ocupa servirá en definitiva para presentar la arquitectura hardware del pie robótico. Mostraremos los sensores a integrar en el pie robótico, encargados de reconocer el entorno en el que se encuentra el robot mini-humanoide y el controlador responsable de recibir y procesar la información recogida por los elementos de sensorización.

Finalmente definiremos la alimentación y los métodos por los que el pie robótico se comunicará con un PC y con el controlador del robot mini-humanoide RAIDER o MYOD, atributos fundamentales del pie robótico.

4.1 Sensores a bordo de ROBfoot

En esta sección se presentan los diferentes sensores que integraremos en el pie robótico. Los sensores analizan el entorno dotando así de nuevas capacidades de sensorización al robot mini-humanoide con el pie robótico instalado.

Las nuevas capacidades de sensorización del robot mini-humanoide estarán orientadas a capacitarle la aptitud de ejecutar, de manera autónoma, la tarea de ascenso y descenso por una escalera.

Uno de los principales cometidos de los elementos de sensorización es en consecuencia, la detección de los escalones de la escalera. Con una detección precisa y fiable de los escalones, el robot mini-humanoide realizará la tarea con robustez y flexibilidad, sin estar limitado a una escalera predefinida y conocida.

Pero igualmente interesante es utilizar una sensorización en el pie robótico para tener un mayor control en la marcha del robot mini-humanoide. La marcha bípeda es inherentemente inestable y consecuentemente el ascenso o descenso por una escalera entraña un desafío de estabilidad superior. Plantearemos una sensorización que controle la pisada y así mejorar el control en la marcha bípeda.

La elección de los sensores es una de las partes más importantes del presente proyecto. Las nuevas capacidades de reconocimiento del entorno del robot mini-humanoide estarán definidas

por los sensores integrados y determinarán las nuevas habilidades y capacidades que el robot mini-humanoide podrá desarrollar con el pie robótico instalado.

4.1.1 Sensores de Proximidad

El pie robótico, como ya ha sido indicado, requiere de una sensorización que halle la existencia de un escalón de subida o de bajada. No obstante una simple detección de existencia no es suficiente, los elementos de sensorización deben asimismo situar la posición del escalón respecto al pie robótico. Una correcta localización del escalón es fundamental puesto que el robot mini-humanoide debe posicionarse correctamente frente al escalón para la ascender o descender por él.

Para la detección y localización de los escalones se ha planteado utilizar sensores de proximidad. Existen múltiples tipos de sensores de proximidad que difieren según su principio físico de funcionamiento y sus aplicaciones. Ajustándonos a los requerimientos del proyecto se ha analizado utilizar sensores de proximidad ópticos infrarrojos de reflexión directa o sensores de proximidad ultrasónicos.

Ambos tipos sensores son aptos para ser integrados en el pie robótico al ajustarse al tipo de aplicación deseada y al poder encontrar en el mercado modelos en los que emisor y receptor se encuentran en un mismo cuerpo, con tamaño reducido y precio razonable. No obstante solo integraremos un tipo de sensores de proximidad puesto que el espacio disponible en el pie robótico es muy limitado.

Los dos tipos sensores tienen un funcionamiento muy similar emitiendo una señal de luz, en el caso de los infrarrojos o de sonido, en el caso de los ultrasónicos y detectando la presencia de un objeto si la señal emitida retorna al receptor por reflexión.

Sin embargo existe una diferencia entre ambos que determina nuestra elección de integrar un sensor de proximidad óptico infrarrojo de reflexión directa frente a un sensor de proximidad ultrasónico. Los sensores infrarrojos emiten la luz de sus mediciones dirigida hacia un único punto fijo, como mostramos en la Figura 4.1, detectando objetos tan solo en ese rango de acción y consecuentemente también localizando su posición.

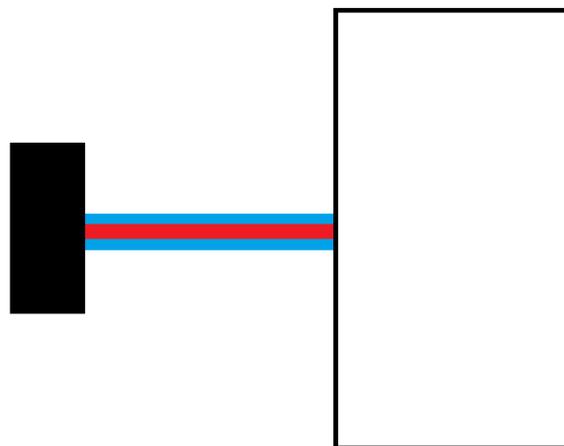


Figura 4.1: Funcionamiento sensor de proximidad infrarrojo de reflexión directa

En cambio, el sonido emitido por los sensores ultrasónicos se abre en forma de cono a medida que se aleja del emisor, como puede verse en la Figura 4.2.

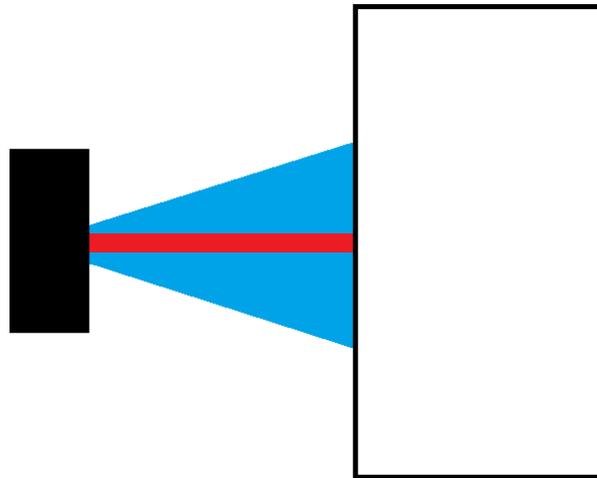


Figura 4.2: Funcionamiento sensor de proximidad ultrasónico

Los sensores ultrasónicos tienen mayor probabilidad de detectar un objeto, pero no ofrecen precisión respecto a la posición del objeto detectado al existir una incertidumbre de posicionamiento dentro de su rango de acción. Además esta falta de precisión no mejora con una menor distancia puesto que en distancias cortas, los lóbulos secundarios del cono ultrasónico pueden producir pulsos de error. Un ejemplo de esta falta de precisión de posicionamiento es la mala respuesta que presentan los sensores ultrasónicos posicionando superficies inclinadas, como mostramos en la Figura 4.3.

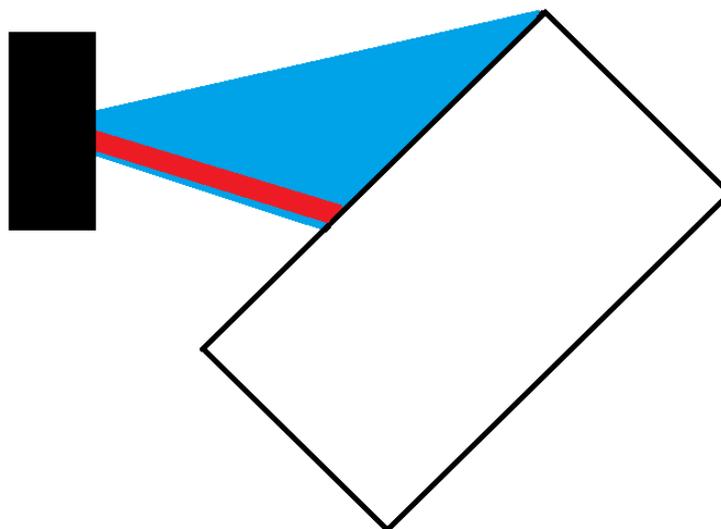


Figura 4.3: Posicionamiento de superficie inclinada por sensor de proximidad ultrasónico

El sensor ultrasónico posiciona el escalón en el punto que, encontrándose dentro de su rango de acción, constituye la menor distancia. Un mal posicionamiento del escalón puede propiciar que el robot mini-humanoide inicie el ascenso o descenso por él sin estar correctamente posicionado de frente lo cual provocará, con gran probabilidad, una caída del robot mini-humanoide.

En conclusión optamos por integrar sensores de proximidad infrarrojos de reflexión directa puesto que no solo detectan un objeto sino que además aportan con precisión su posición. La principal limitación de los sensores infrarrojos es su limitado rango de acción al detectar tan solo en el punto al que dirigen la luz emitida. No obstante existen modelos que presentan un tamaño muy reducido permitiéndonos integrar varios sensores infrarrojos en el pie robótico para de este modo tener mediciones en varios puntos.

El primer sensor de proximidad infrarrojo de reflexión directa analizado para ser integrado en el pie robótico fue el SHARP GP2Y0A12YK. El motivo de analizar este sensor se debe a que ya está presente en los brazos de la plataforma mini-humanoide RAIDER, Figura 2.9, presentando buenos resultados. No obstante su integración fue desestimada puesto que su volumen no se ajusta a nuestro objetivo de integrar sensores infrarrojos de reducido tamaño en el pie robótico.

Continuamos examinando los sensores del fabricante SHARP y encontramos dos que se ajustaban a nuestro requerimiento de presentar un tamaño reducido, el SHARP GP2Y0D85Z0F y el SHARP IS471F. A pesar de presentar un tamaño reducido, su uso también fue desestimado debido a que son sensores digitales. Es decir, ofrecen señales digitales de estado alto, si detectan un objeto, o estado bajo, si no se detecta un objeto. Este tipo de sensor de proximidad infrarrojo digital no nos es adecuado para posicionar los escalones puesto que no informan de la distancia a la que se encuentra el objeto detectado.

Finalmente encontramos dos sensores de proximidad infrarrojos apropiados para ser integrados en el pie robótico. El Avago HSDL9100 y el Vishay CNY70.

Ambos presentan un tamaño reducido, su rango de detección se encuentra dentro de los requerimientos del proyecto y ofrecen un buen posicionamiento al tratarse de sensores infrarrojos analógicos.

El sensor definitivamente seleccionado para ser integrado en el pie robótico es el Avago HSDL9100. A continuación mostramos su funcionamiento detallado, presentamos sus principales características y justificamos su uso frente al sensor Vishay CNY90.

Sensores Infrarrojo – Avago HSDL9100

El HSDL9100 del fabricante Avago Technologies es un sensor de proximidad óptico de reflexión directa que utiliza luz infrarroja para realizar sus mediciones de distancia. El pie robótico estará dotado con dos sensores HSDL9100 para detectar y localizar un escalón cercano al pie robótico.



Figura 4.4: Sensor infrarrojo Avago HSDL9100

En la Figura 4.4 podemos ver como el HSDL9100 está compuesto por un LED emisor infrarrojo y un fotodiodo receptor, ambos situados en el mismo cuerpo; característica propia de los sensores ópticos de reflexión directa y factor que nos hizo interesarnos en ellos frente a otros sensores ópticos de proximidad. La Figura 4.5 muestra el funcionamiento del sensor óptico de reflexión directa HSDL9100.

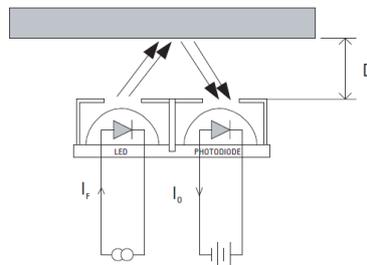


Figura 4.5: Funcionamiento de sensor óptico de reflexión directa HSDL9100

El funcionamiento del HSDL9100 es el propio de los sensores ópticos de reflexión directa. El LED emisor emite pulsos de luz infrarroja en una dirección y sin en ésta se interpone un objeto, un porcentaje de la luz emitida refleja directamente sobre el objeto. La luz reflejada retorna y activa al fotodiodo receptor induciendo en él una corriente eléctrica. Si el receptor no recibe ningún reflejo de la luz emitida por parte del emisor, significa que no se ha hallado ningún objeto; en cambio si el receptor recibe un reflejo de la luz emitida significa que existe un objeto en la trayectoria de la luz emitida

El HDSL9100 es un sensor analógico al convertir la luz reflejada, una magnitud física, en una corriente en el fotodiodo proporcional a la distancia al objeto detectado. El sensor HSDL9100, como todos los sensores de proximidad ópticos de reflexión directa, determina la distancia del objeto detectado en función al tiempo que transcurre entre la emisión de la luz y la percepción de la luz reflejada.

La Figura 4.6 puede verse en la siguiente página, en ella aparecen las principales características técnicas del HSDL9100 entre las que destacamos su bajo consumo, su baja corriente de polarización del LED infrarrojo y su baja corriente de oscuridad en el fotodiodo; características que se tomaron en consideración a la hora de su elección final frente al Vishay CNY90.

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Ratings		
		Min.	Max	Units
Emitter				
Continuous Forward Current	I_{DC}	-	50	mA
Coupled				
Total Power Dissipation (refer to Figure 1)	P_{TOT}	-	165	mW
Operating Temperature	T_{OP}	-40	+85	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-40	+100	°C
Reflow Soldering Temperature	T_{SOL}	-	260	°C

Electrical-Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Test Condition	Ratings			Units
			Min	Typ	Max	
Emitter						
Forward Voltage	V_F	$I_F = 100mA$	-	1.50	1.65	V
Reverse Voltage	V_R	$I_R = 10\mu A$	5	-	-	V
Peak Wavelength	λ_p	$I_F = 20mA$	-	940	-	nm
Spectrum Width of Half Value	Δ_p	$I_F = 20mA$	-	50	-	nm
Detector						
Dark Current	I_{Dark}	$V_R = 10V, L^{**} = 0$	-	2	10	nA
Forward Voltage	V_F	$I_F = 10mA, L = 0$	0.5	-	1.3	V
Reverse Breakdown Voltage	V_{BR}	$I_R = 100\mu A, L = 0$	-	-	35	V
Coupled						
Output Current	I_O	Refer to Fig 2	-	0.1	-	mA
Peak Output Distance	D_O	Refer Note 1	-	5	-	mm
Operating Cross Talk Current	I_{FD}	Refer to Fig 3	-	-	200	nA
Rise Time (LED)	T_{RL}	$R_L = 50\Omega$	-	50	-	ns
Fall Time (LED)	T_{FL}	$R_L = 50\Omega$	-	50	-	ns
Rise Time (Photodiode)	T_{RD}	$R_L = 5.1K\Omega$	-	6	-	μs
Fall Time (Photodiode)	T_{FD}	$R_L = 5.1K\Omega$	-	6	-	μs

** L = 0 (zero light condition)

Figura 4.6: Características Técnicas del HSDL9100

La Figura 4.7 presenta el esquemático del HSDL9100 junto con la distribución de sus pines

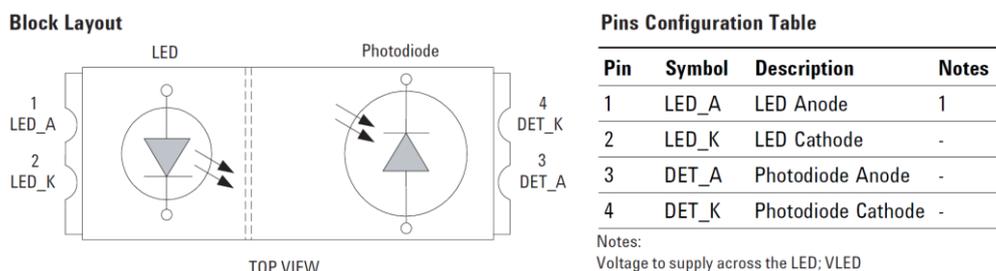


Figura 4.7: Esquemático del HSLD9100 y distribución de los pines

Como vemos el pinout del sensor es trivial, constituido por dos ánodos y dos cátodos, señalando que el conexionado del LED emisor y el fotodiodo receptor es opuesto.

El LED emisor infrarrojo está polarizado en directa, la señal utilizada para excitar el LED será introducida por el ánodo [Pin 1] mientras que el cátodo [Pin 2] está conectado a tierra. En cambio el receptor, al ser un fotodiodo, está polarizado en inversa, teniendo el ánodo [Pin 3] conectado a tierra y el cátodo [Pin 4] proporcionando la salida analógica del sensor.

Entre las principales desventajas de los sensores ópticos de reflexión directa podemos señalar que la distancia de detección depende en gran medida de la reflectividad del objeto a localizar; dicha reflectividad está determinada con factores como el color, la densidad, la forma, la superficie e incluso el ángulo de incidencia del rayo. Esto hace que solo sean empleados para detecciones a distancias cortas. Puesto que los sensores infrarrojos HDSL9100 integrados en el pie robótico han de detectar tan solo escalones cercanos, el inconveniente citado es despreciable.

La Figura 4.8 muestra el rango de detección del HDSL9100. El sensor HDSL9100 produce una señal analógica en forma de voltaje en función a la distancia a la que se encuentra el objeto.

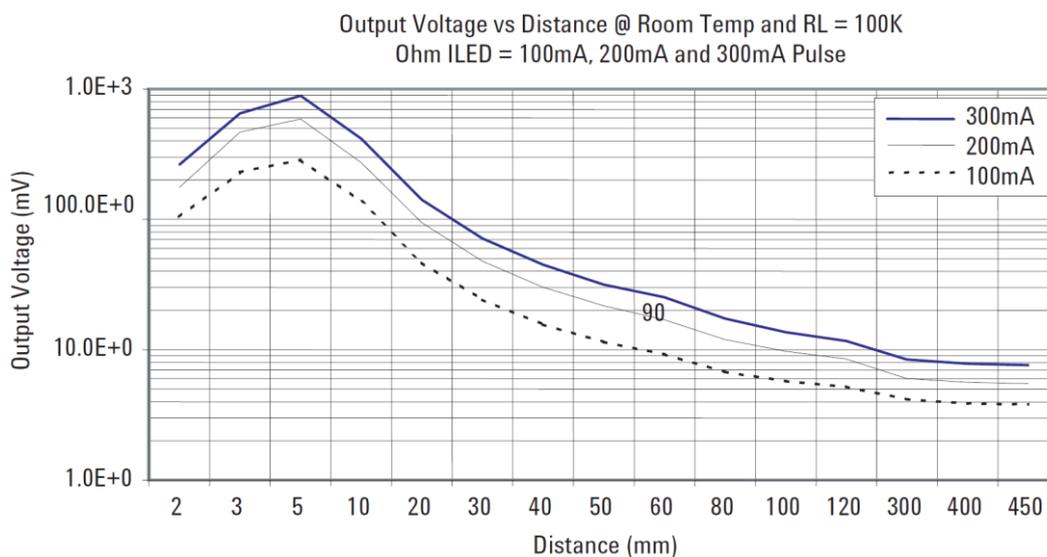


Figura 4.8: Rango de detección del HDSL9100

Es perceptible que su respuesta no es lineal, también una característica propia de los sensores ópticos de reflexión directa. No linealidad implica que no se obtiene una gran precisión en nuestras mediciones, no obstante la programación del sensor estará basada en umbrales fijos de detección. Algo a tener en cuenta es su funcionamiento deficiente a bajas distancias. Podemos ver como sus medidas por debajo de los 5mm aportan una lectura confusa de la distancia, además también distinguimos la existencia de un umbral en distancias por debajo de los 2mm.

La luz infrarroja emitida por el emisor del HSDL9100 es conveniente frente a la luz roja, empleada por otros sensores, puesto que es menos susceptible a influencias externas. No obstante, las interferencias son también reducidas mediante la modulación de la señal óptica emitida. El receptor se sintoniza con los pulsos del emisor y la señal es recibida separada de las interferencias en el ambiente.

En conclusión el HSDL9100 es un sensor de proximidad óptico infrarrojo apto para realizar la tarea de detectar y posicionar un escalón cercano al pie robótico. Su reducido tamaño nos permite la integración de dos unidades en el pie robótico detectando de este modo en dos direcciones concretas y su salida analógica nos aporta la distancia del objeto detectado para así posicionar el escalón respecto al pie robótico

Su selección final frente al sensor Vishay CNY90 se debe a características como las anteriormente mencionadas bajo consumo, baja corriente de polarización del LED infrarrojo y su baja corriente de oscuridad en el fotodiodo. Pero existe una causa que definitivamente decretó nuestra selección, el sensor HSDL9100 dispone de un circuito integrado específicamente diseñado para acondicionar el sensor. El acondicionamiento del sensor infrarrojo HSDL9100 se puede encontrar en la sección 6.2.1 del presente documento.

Mini Interruptor final de carrera – Honeywell

Existe una deficiencia de detección y posicionamiento a muy bajas distancias utilizando tan solo los sensores infrarrojos. Esta deficiencia a distancias muy cercanas se debe al citado funcionamiento imperfecto del sensor infrarrojo HSDL9100 por debajo de los 5mm.

Para solventar el inconveniente, el pie robótico integra un interruptor de carrera. En el presente proyecto recomendamos la utilización del Micro Interruptor Final de Carrera BZ-2RQ-A2 del fabricante Honeywell debido a su reducido tamaño, mostrado en la Figura 4.9, si bien la tarea la podría realizar adecuadamente otros interruptores finales de carrera más corrientes.



Figura 4.9: Micro Interruptor Final de Carrera Honeywell BZ-2RQ-A2

El interruptor de carrera será instalado en la parte frontal del pie robot y así suplir la deficiencia de funcionamiento en muy bajas distancias de los sensores infrarrojos que podemos ver en la Figura 4.7. La función del interruptor de carrera es la aportar una medición exacta a muy bajas distancias para asegurar un correcto posicionamiento del robot mini-humanoide para realizar la tarea de ascenso por una escalera.

4.1.2 Sensores de Fuerza

Los sensores integrados en el pie robótico tienen como objetivo, como se viene discutiendo en la sección que nos aborda, dotar de una sensorización al robot mini-humanoide para capacitarle la destreza de ascender y descender por una escalera de forma autónoma. Esta tarea no se trata de algo sencillo ya que implica un control meticuloso de la estabilidad del robot mini-humanoide desplazando su centro de gravedad en dirección horizontal y dirección vertical. Si bien apuntamos anteriormente que para realizar la tarea con robustez es preciso la detección de los escalones, es igualmente necesario ejecutar una marcha bípeda controlada para realizar la tarea con fiabilidad.

La planta del pie robótico es el contacto entre el robot mini-humanoide y el suelo en el que se encuentra. De la planta se puede obtener información muy útil a la hora de controlar la marcha del robot mini-humanoide pudiendo determinar cuándo se realiza el contacto con el suelo, con qué parte y qué fuerza se ejerce.

Con la intención de poder recoger la información aludida y así mejorar el control de la marcha bípeda del robot mini-humanoide, el pie robótico integrará sensores de fuerza en su planta.

Mencionar que en nuestra primera aproximación planteamos utilizar interruptores final de carrera en lugar de sensores de fuerza. Nuestra idea inicial era conocer el momento en el que el pie entra en contacto con el suelo, pero el uso de interruptores final de carrera fue desestimado

puesto que consideramos muy ventajoso percibir también que fuerza se ejercía en los puntos de contacto de la planta del pie robótico.

Existen dos tipos de sensores de fuerza que se ajustan a los requerimientos del proyecto, los sensores piezoeléctricos y los sensores piezorresistivos.

Los sensores piezoeléctricos producen una carga eléctrica proporcional a la fuerza ejercida. Son ampliamente utilizados para medir fuerzas presentando buena respuesta en frecuencia y sin requerir alimentación. Sin embargo su uso fue desestimado por su volumen. La gama de anillos piezoeléctricos PACEline CLP fueron los más reducidos que encontramos y aun así presentan un grosor de entre 3-4mm. Los sensores de fuerza estarán integrados en la planta del pie robótico y pretendemos que ésta mantenga su superficie lo más plana posible para no producir inestabilidades.

Los sensores piezorresistivos presentan un grosor considerablemente menor, inferior a 1mm, presentan mejor precisión y tienen mayor rango dinámico. Los sensores piezorresistivos experimentan un cambio en su resistencia proporcional a la fuerza ejercida y encontramos dos tipos de sensores que utilizan este principio en el mercado, las galgas extensiométricas y los sensores de fuerza resistivos o FSR (Force Resistive Sensor).

La diferencia principal entre las galgas extensiométricas y los FSR es que el soporte de la galga extensiométrica se deforma con el elemento resistivo mientras que en el FSR el soporte no se deforma. Este factor se debe tener en cuenta si el FSR se desea montar sobre una superficie que se deforme. Otra diferencia habitual es que las galgas extensiométricas ofrecen una mayor sensibilidad en sus mediciones que los FSR; sin embargo los FSR presentan un mayor rango de salida.

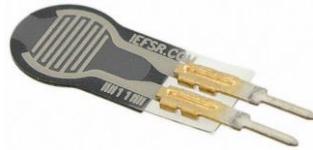
En definitiva, no existe un sensor mejor que otro, cada uno destaca en una funcionalidad. Una galga extensiométrica es apropiada para medir con gran precisión esfuerzos que deforman la superficie en la que está instalada. Un FSR, en cambio, mide una fuerza aplicada sobre una superficie que no se deforma, como la planta del pie robótico, y por este motivo, instalaremos FSRs para medir las fuerzas en la planta del pie robótico.

Interlink Electronics [26] es una compañía que se fundó con el lanzamiento del primer sensor de fuerza resistivo (FSR) del mundo. Son líderes en diseño y fabricación de FSRs y podemos encontrar con facilidad modelos de distintos tamaños y formas.

Antes de lanzarnos a escoger los sensores de Interlink Electronics, realizamos primero un estudio de los sensores de fuerza resistivos de otros fabricantes. Hallamos entonces los FSR de los fabricantes Teksan [27] y Sensitronics [28]. Ambos ofrecen, al igual que Interlink Electronics, un repertorio de FSRs con distintos tamaños y formas. La integración de sensores Teksan fue directamente desestimada debido a que los precios de sus sensores son excesivamente elevados. En cuanto a los sensores Sensitronics, sus precios eran razonables y las especificaciones declaradas por el fabricante nos interesaron.

Nuestra pretensión era realizar una comparación con pruebas experimentales de los FSR de Interlink Electronics y Sensitronics y así finalmente determinar los sensores de fuerza resistivos a integrar. Pero nuestra intención fue frustrada ya que no existe un distribuidor que venda los FSR de Sensitronics en Europa.

Serán en conclusión los sensores de fuerza resistivos de Interlink Electronics los que definitivamente integraremos en la planta del pie robótico.

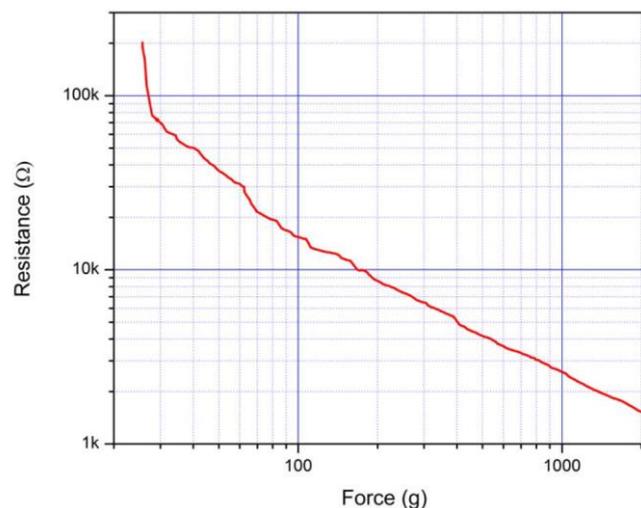
Sensor de fuerza resistivo – Interlink FSR 400**Figura 4.10 Sensor de fuerza resistivo Interlink FSR 400**

El pie robótico contará con cuatro sensores de fuerza resistivos FSR 400 del fabricante Interlink Electronics. Los FSR 400 estarán situados en la planta del pie robótico y su función principal es la de detectar el contacto entre el pie robot y el suelo. No obstante, las mediciones de los FSR 400 también aportan información fiable del suelo en el que se encuentra el robot mini-humanoide, comunicando una posible inclinación o existencia de irregularidades. El funcionamiento del FSR 400 es similar al de una galga extensiométrica y está basado en el efecto piezorresistivo.

La piezorrestividad es una propiedad presente en algunos materiales conductores y semiconductores. Los materiales piezorresistivos cambian su resistencia eléctrica cuando son sometidos a un esfuerzo. Un esfuerzo sobre el FSR 400 provoca por tanto un cambio en su resistencia eléctrica nominal. El cambio de resistencia nominal de los materiales piezorresistivos se debe a la variación de la distancia interatómica, en los metales piezorresistivos; y a la variación de la concentración de portadores, en los semiconductores piezorresistivos.

El FSR 400 está fabricado de polímero conductor. La capa de sensado se compone de partículas conductoras y no conductoras suspendidas en una matriz. El citado cambio de resistencia eléctrica nominal en el FSR 400 si es sometido a un esfuerzo se produce al causar que las partículas entren en contacto con los electrodos conductores. Todas las partículas tienen un tamaño inferior a micrómetros y están diseñadas para reducir el efecto de la temperatura, mejorar las propiedades mecánicas del sensor y aumentar la durabilidad de la superficie de sensado.

En la Figura 4.11 podemos ver el funcionamiento del sensor resistivo as ser sometido a una fuerza

**Figura 4.11: Resistencia vs Fuerza**

Observamos que la resistencia eléctrica del FSR 400 disminuye a medida que la fuerza aumenta y que una fuerza mínima debe ser ejercida para alterar la resistencia eléctrica nominal del FSR 400. Dicha fuerza mínima es denominada como “Fuerza de Actuación” y definida como la fuerza necesaria para disminuir la resistencia por debajo de 100KΩ.

La Figura 4.12 muestra las principales características técnicas del FSR 400 de las cuales nos gustaría destacar su amplio margen de funcionamiento sensando fuerzas de 0.2 a 20N y su Rise Time por debajo de los 3 microsegundos.

General		
PARAMETER	VALUE	NOTES
Force Sensitivity Range	~0.2 to 20N	Dependent on mechanics
Break Force (Activation Force)	~0.2N min	Dependent on mechanics and FSR build
Part-to-Part Force Repeatability	± 6% of established nominal	With a repeatable actuation system, single lot.
Single Part Force Repeatability	± 2% of initial reading	With a repeatable actuation system
Hysteresis	+ 10% Average	(R _{F+} - R _{F-})/R _{F-}
Long Term Drift	< 5% per log ₁₀ (time)	Tested to 35 days, 1kg load
Force Resolution	Continuous	Depends on measurement electronics
Stand-Off Resistance	> 10MΩ	Unloaded, unbent
Switch Travel	0.05mm	Typical; depends on design
Device Rise Time	<3 microseconds	Measured with drop of steel ball
Maximum Current	1 mA/cm ² of applied force	
EMI / ESD	Generates no EMI; not ESD sensitive	

Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as (one standard deviation / mean), unless otherwise noted.

Figura 4.12: Características Técnicas del FSR400

La Figura 4.13 muestra el esquemático del FSR 400.

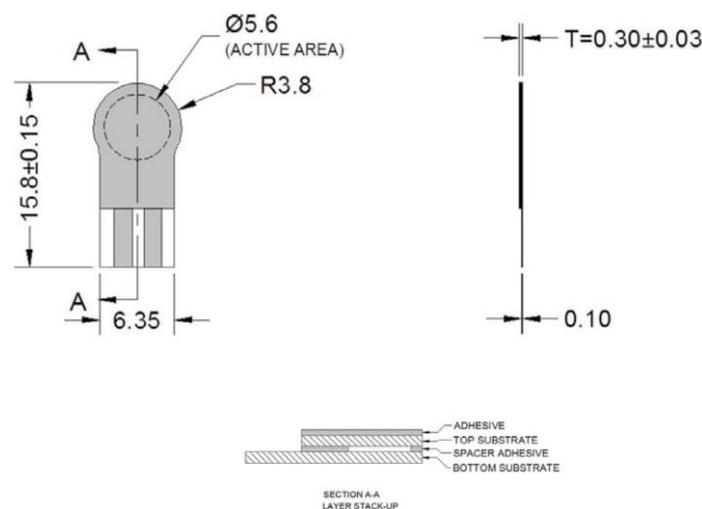


Figura 4.13: Esquemático FSR400

Se trata de un sensor de fuerza resistivo Single Zone, es decir, tan solo aporta mediciones de fuerzas aplicadas en una dirección cardinal sobre la Zona Activa. Es flexible y realiza mediciones de fuerzas tanto dinámicas como estáticas. Destacar también su extrema delgadez.

Los sensores FSR 400 serán instalados en la planta del pie robot.

Su objetivo es realizar mediciones de la fuerza ejercida por parte del robot hacia el suelo o reportar la inexistencia de dicha fuerza cuanto el pie está levantado. Los sensores en cuestión, son el ejemplo de lo que hemos venido contando a lo largo del presente proyecto; su integración no es obligatoria para realizar la tarea de subir o bajar escaleras ya que se puede realizar una sensorización más eficiente. No obstante, decidimos integrar sensores de fuerza en la planta del pie robótico ya que nos pareció muy interesante la idea y aportan una información útil que puede llegar a ser empleada en cualquier investigación relacionada a la robótica mini-humanoide.

La decisión final de la elección del FSR 400 estuvo determinada por varios factores como el ya citado amplio rango de detección, bajo Rise Time y extrema delgadez. Se trata de un dispositivo de bajo coste, acorde con nuestras especificaciones, y de fácil integración. Además, presenta una gran inmunidad frente a las vibraciones, la cual es una característica propia de los sensores de fuerza resistivos y una ventaja frente las conocidas y extendidas galgas extensiométricas. La Figura 4.14 muestra la citada inmunidad a las vibraciones.

Durability Performance Specifications		
PARAMETER	TYPICAL R CHANGE	NOTES
Tap Testing	-10%	10 million actuations, 1kg, 4Hz
Constant Load	-5%	2.5 kg standing load, 24 hrs
Chemical Resistance	The following chemicals do not affect the operation when applied to the outside of the sensor: cola, coffee, isopropyl alcohol, soap solution, household cleaners. No others tested. Application is a single drop on the exterior of the sensor that is allowed to soak until evaporation and does not enter the sensor.	
Sensitivity to Noise/Vibration	No effect	

Note: Specification derived from measurements taken at 1000 grams.

Figura 4.14: Inmunidad a las vibraciones

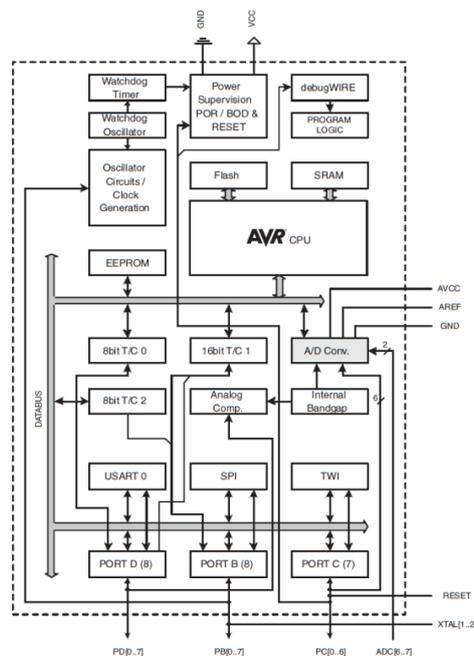
4.2 Controlador

Llegados a este punto y teniendo seleccionados todos los sensores que deseamos integrar en el pie robótico, nuestro siguiente cometido es la elección de un controlador. Como ha sido explicado con anterioridad, el controlador es el elemento de decisión principal del pie robótico y su correcto funcionamiento es determinante. Una mala resolución por parte del controlador de los datos recibidos de los sensores integrados puede propiciar, con gran probabilidad, una caída del robot mini-humanoide.

Se han estudiado diferentes microcontroladores para ser integrados como un PIC10F322, pero finalmente se ha decidido integrar un ATmega328P del fabricante Atmel. Mostramos ahora las principales características del microcontrolador y justificamos su uso frente a otros microcontroladores.

Microcontrolador – Atmel ATmega328P**Figura 4.15: Microcontrolador Atmel ATmega328P**

El pie robótico empleará un microcontrolador ATmega328P del fabricante Atmel. El ATmega328P es un microcontrolador CMOS de bajo consumo de la serie Atmel AVR 8-bit. La Figura 4.16 muestra el diagrama de bloques del microcontrolador en cuestión.

**Figura 4.16: Diagrama de bloques ATmega serie AVR 8-bit**

El núcleo AVR combina 32 registros de propósito general de 8 bit. Todos ellos están directamente conectados con la unidad aritmética lógica (ALU) permitiendo que dos registros independientes sean accedidos simultáneamente por cada instrucción ejecutada en un ciclo del reloj. La CPU AVR está basada en una arquitectura Harvard modificada RISC. La arquitectura RISC es un modelo de diseño de CPUs que aboga por conjuntos de instrucciones simplificadas que toman menor tiempo en ejecutarse usando menos ciclos del microprocesador por instrucción y limitar el acceso a la memoria de datos solo a las instrucciones de carga y de almacenamiento.

El ATmega328P referido se encuentra dentro de la familia de los ATmega del fabricante Atmel. Se trata un microprocesador de alto rendimiento con una frecuencia de operación máxima de 20Mhz, 2KBytes de memoria RAM y 32Kbytes de memoria Flash. En la Figura 4.17 mostramos el pinout del encapsulado empleado.

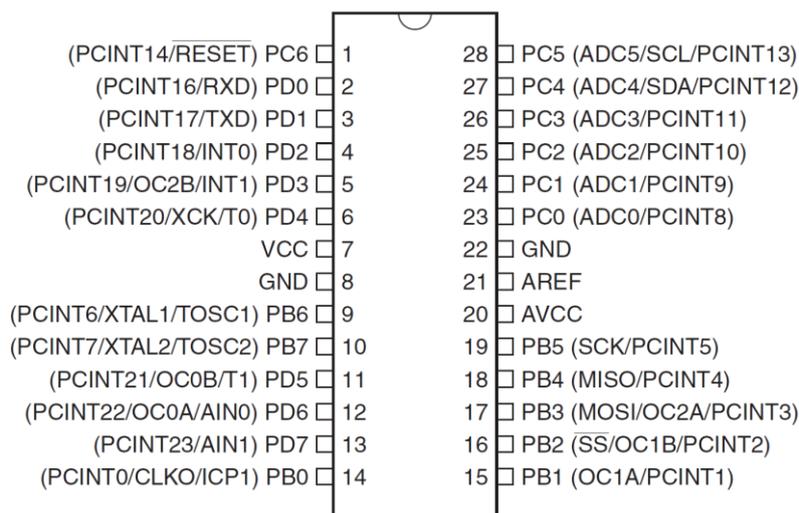


Figura 4.17: Pinout 28 DIP ATmega328P

Los pines del 23 al 28, con los puertos ADC0:ADC5, pueden designarse como entradas analógicas; esto se debe a que sirven como entradas al convertidor analógico-digital que posee el microprocesador. Estos pines son los destinados a conectar el microprocesador con aquellos sensores que transmiten la salida de sus mediciones en señal analógica en forma de voltaje, como es el caso de los sensores infrarrojos y los sensores de fuerza resistivos. Observamos que tenemos 6 entradas analógicas en nuestro microcontrolador, la facultad de poder aceptar hasta 6 salidas analógicas junto con su más que suficiente capacidad computacional son dos de las razones que determinan la elección del ATmega328P, no obstante existe un tercer factor determinante que comentaremos a continuación.

La familia de microcontroladores ATmega de la serie Atmel AVR ha ganado mucha popularidad en los últimos años debido a su fácil programación y puesta en marcha. Su popularidad se debe en gran medida al ser empleados en las famosas placas Arduino, las cuales presentan una de las comunidades más importantes a nivel mundial. El ATmega328P utilizado en la placa Arduino UNO es por consiguiente, un microcontrolador programable en C/C++ y compatible con el entorno de programación Arduino IDE; para el que además se puede encontrar una gran cantidad de documentación generada. Esta ventaja de ser un microcontrolador tan utilizado con gran cantidad de documentación generada junto con la compatibilidad en el entorno de programación Arduino IDE hace que se convierta en la elección final de nuestro controlador para el pie robótico frente a otros microcontroladores como el citado PIC10F322.

Mencionar que también se barajó la integración de otros microcontroladores de la familia ATmega como el ATmega168 utilizado en la placa Arduino Duemilanove o el ATmega1280 utilizado en la placa Arduino MEGA. Ambos microcontroladores son una opción válida para el pie robótico, siendo el ATmega1280 el microcontrolador más potente y completo de los tres. Finalmente se decidió integrar un ATmega328P debido a que disponemos de dos placas Arduino UNO con las que trabajaremos y probaremos las primeras aplicaciones del pie robótico. No obstante no se desestima la posibilidad de integrar otro microcontrolador de la familia ATmega en desarrollos futuros.

4.3 Comunicación del pie robótico

Ya tenemos nuestros elementos de sensorización y controlador seleccionados. A estas alturas, debemos adaptar el pie robótico para comunicarse tanto con las placas controladoras de RAIDER o MYOD encargadas de la locomoción, como con un PC, para así poder descargar firmware al pie robótico.

4.3.1 Comunicación con el controlador de RAIDER

La plataforma Bioloid RAIDER emplea un bus Dynamixel para controlar los servos Dynamixel AX-12A presentes en el robot mini-humanoide. El bus Dynamixel conecta los servos AX-12A en configuración *Daisy Chain* ahorrando el número de cables en la plataforma mini-humanoide. Utilizaremos el bus Dynamixel, conectando el pie robótico en *Daisy Chain* con los servos AX-12A para establecer la comunicación con la placa CM 9.04 de la arquitectura RAIDER, la cual está encargada del control de los servos Dynamixel AX-12A y en definitiva de la locomoción del robot mini-humanoide.

El bus Dynamixel se trata de un protocolo particular de comunicación serie asíncrona de 8 bits, con 1 bit de stop y sin paridad. Se basa en el envío de paquetes de datos binarios de dos tipos: Paquetes de Instrucciones, aquellos que envía el controlador principal a los elementos unidos al bus Dynamixel; y Paquetes de estado, que son aquellos que el controlador principal recibe de los elementos unidos al bus Dynamixel.

El bus consta de tres cables, alimentación, tierra y el cable de datos. La conexión es modo Half Duplex, por consiguiente no es posible la transmisión y recepción de datos de forma simultánea. Dicho modo es el más utilizado cuando es necesario conectar varios dispositivos en un solo bus. Cada dispositivo unido al bus tiene un ID específico que lo diferencia del resto. Debido a que los paquetes de datos binarios empleados en la comunicación incluyen el ID del dispositivo, no puede existir una ID repetida en un mismo bus Dynamixel ya que provocaría choques entre paquetes y el bus Dynamixel de comunicaciones no funcionaría de forma adecuada. Todos los dispositivos unidos al bus permanecen en estado de escucha salvo que el controlador principal les indique lo contrario.

Los pie robóticos tendrán por tanto una ID específica y deberán mantener un estado de escucha hasta que el controlador principal mande la petición de lectura del estado del pie robótico. Para posibilitar el estado de escucha del pie robótico en el bus Dynamixel es preciso utilizar un buffer triestado. Emplearemos un buffer triestado 74HCT del fabricante Philips.

Un buffer triestado, cuyo funcionamiento está basado en la lógica triestado, permite puertos de salida de 0 lógico (o estado BAJO), 1 lógico (o estado ALTO) y salida Alta Impedancia. La salida Alta Impedancia hace que ésta no tenga efecto en el circuito a la que esté conectada, en nuestro caso el bus Dynamixel, y permite que varios dispositivos compartan la misma línea de salida permaneciendo en estado de escucha. En la Figura 4.18 mostramos el pinout y el diagrama lógico del 74HCT.

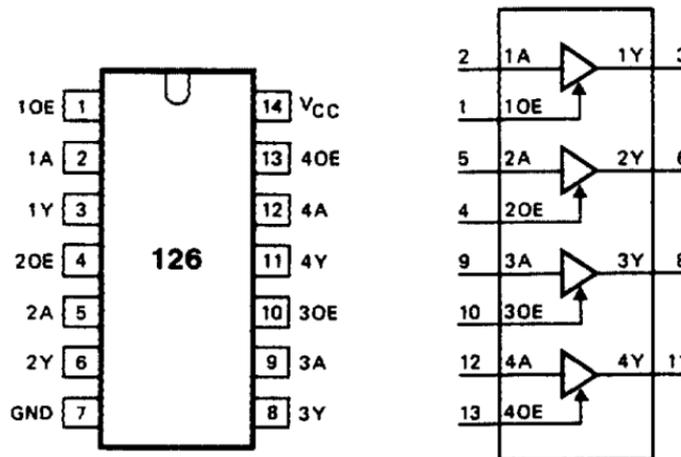


Figura 4.18: Pinout y Diagrama Lógico del 74HCT

Vemos como el encapsulado tiene cuatro buffer no-inversores siendo los pines 2, 5, 9 y 12 sus entradas de datos mientras que los pines 3, 6, 8 y 11 sus respectivas salidas. Por otro lado tenemos los pines 1, 4, 10 y 13 que son enables de estado alto. A continuación mostramos la tabla de verdad del 74HCT en la Figura 4.19.

INPUTS		OUTPUT
nOE	nA	nY
H	L	L
H	H	H
L	X	Z

Nota:

H = voltaje estado ALTO

L = voltaje estado BAJO

X = sin importancia

Z = Alta Impedancia / estado-OFF

Figura 4.19: Tabla de verdad del 74HCT

Podemos ver en la tabla de verdad la columna nOE, esta columna hace referencia a los enables de estado alto mientras que las columnas nA y nY hacen referencia a las entradas y salidas de datos respectivamente. Los enables han sido denominados como enables de estado alto puesto que su estado alto permite que el buffer triestado funcione de forma convencional teniendo salidas estado alto o estado bajo cuando sus entradas son de estado alto o estado bajo respectivamente; por otro lado cuando el enable está en estado bajo, la salida será siempre Alta Impedancia sin importar aquello que entre por la entrada.

Por tanto para posibilitar la inclusión del pie robótico en el bus Dynamixel emplearemos el buffer triestado 74HCT. Aprovecharemos su enable de estado alto, para decidir si el pie robótico transmitirá datos al controlador de locomoción o si por contrario debe mantener una salida Alta Impedancia y así permanecer en estado de escucha en el bus Dynamixel.

4.3.2 Comunicación con controlador de MYOD

En la sección 2.3 Robot mini-humanoide MYOD del presente documento, se destacó la existencia de un bus I²C para transmitir las mediciones de los sensores inerciales. La existencia de dicho bus I²C en la plataforma MYOD tiene gran relevancia puesto que será aprovechado para la comunicación del pie robótico con la placa Arduino MEGA 2560, placa controladora de la plataforma MYOD.

I²C es un bus de comunicaciones serie síncrono Half-Duplex muy extendido, generalmente utilizado para comunicar microcontroladores y sus periféricos. Se compone de dos líneas bidireccionales, una de datos o SDA y un reloj o SCL, a las que se unen dispositivos con una dirección única específica. Éstos pueden ser maestro o esclavos, siendo los maestros los que generan la señal reloj e inician la comunicación y los esclavos los que reciben la señal reloj y responden al maestro.

La placa Arduino MEGA 2560 desempeña la función de maestro “receptor” en el bus I²C de la plataforma MYOD, leyendo los datos enviados por los sensores inerciales que funcionan como esclavos “locutores”. Los pies robóticos se unen a este bus también como esclavos “locutores” enviando datos al maestro, la placa controladora de la plataforma MYOD, tras recibir e identificar con la dirección propia la petición del maestro.

Apuntar que el bus I²C presente en la plataforma MYOD incluye una tercera línea de masa destinada a poner todos los dispositivos unidos al bus a la misma referencia y así posibilitar el establecimiento de una correcta comunicación.

4.3.3 Comunicación con un PC

Para una fácil programación y puesta en marcha, el pie robótico debe conectarse con un PC con comodidad. Para ello emplearemos un cable USB – serie TTL-232 del fabricante FTDI, como el mostrado en la Figura 4.20



Figura 4.20: Cable USB-serie FTDI

Utilizaremos un cable TTL-232R-3V3 concretamente. Este cable convierte señales USB a TTL de voltaje +3.3V. Mediante el cable TTL-232R-3V3 estableceremos una comunicación serie directamente con el USART del microcontrolador para que nuevos paquetes de firmware puedan ser descargados al controlador del pie robot siempre que uno lo desee. El cable es de uso frecuente en numerosos proyectos que requieren comunicación entre un PC y un microcontrolador, como en el trabajo Skymega [29] realizado por compañeros de la Universidad Carlos III. Skymega es una placa de reducidas dimensiones cuya principal aplicación es la programación de robots modulares y robots móviles.

Si bien el microcontrolador podría ser programado una única vez, siguiendo el propósito de construir un pie funcional para la investigación, su fácil programación se convierte en un requisito. Es por ello que habilitamos la posibilidad de conectar un cable TTL-232R-3V3 al pie robótico y así probar nuevos lazos de control de manera rápida y sencilla.

4.4 Alimentación

La alimentación del pie robótico difiere entre el pie robótico diseñado para RAIDER y el pie robótico diseñado para MYOD.

El tipo de alimentación seleccionada para el pie robótico, como se verá a continuación, está estrechamente ligada o influida por la comunicación del pie robótico con las placas controladoras de RAIDER y MYOD.

4.4.1 Alimentación de ROBfoot diseñado para RAIDER

El pie robótico diseñado para RAIDER se conecta a un bus Dynamixel, en *Daisy Chain* con los servos AX-12A, para establecer comunicación con la placa CM 9.04, como se explica en profundidad en la sección 4.3.1 Comunicación con el controlador de RAIDER. Una propiedad característica del bus Dynamixel es la existencia de una línea de alimentación, cuya misión es la de alimentar la electrónica interna de los servos AX-12A. Será dicha línea de alimentación, presente en el bus Dynamixel, la encargada de proporcionar la alimentación al pie robótico diseñado para RAIDER.

Indicar que durante el proceso de descarga de nuevo firmware al pie robótico, estableciendo conexión con un PC, el bus Dynamixel se encontrará desconectado y será por consiguiente la línea de alimentación presente en el cable TTL-232R-3V3 la encargada de alimentar el pie robótico.

4.4.2 Alimentación de ROBfoot diseñado para MYOD

El pie robótico diseñado para MYOD también se une a un bus para establecer comunicación con la placa Arduino MEGA 2560, controladora del robot mini-humanoide MYOD. Como se explica en detalle en la sección 4.3.2 Comunicación con el controlador de MYOD, se aprovecha el bus I²C existente en la plataforma mini-humanoide MYOD para dicha comunicación. En esta ocasión, no existe una línea de alimentación en el bus por lo que se debe optar por otra solución distinta a la del pie robótico diseñado para RAIDER.

Tras considerar varias alternativas tales como incluir una pequeña batería a cada pie robótico o una batería de mayor tamaño para ambos pies robóticos, finalmente nos inclinamos por la solución más sencilla y directa y principalmente menos invasiva, emplear uno de los pines de alimentación presentes en la placa Arduino MEGA 2560.

De forma análoga al pie robótico diseñado para RAIDER, el pie robótico diseñado para MYOD también es alimentado con el cable TTL-232R-3V3 cuando se encuentra conectado a un PC para descargar nuevos lazos de control.

La selección de nuestros componentes, el tipo de comunicación junto con la definición de la alimentación supone el arranque del desarrollo del pie robótico.

Dado que se trata de un pie robótico de carácter general para la investigación, no ha existido limitación alguna a la hora de reflexionar sobre posibles ideas a implementar o diseños a realizar. Si bien hay que insistir en la influencia recibida por los trabajos expuesto en el capítulo 3. Estado del Arte.

Teniendo nuestros elementos definidos, especialmente los sensores a integrar, podemos comenzar a concebir una idea del pie robótico y de las capacidades que éste tendrá.

5. Arquitectura hardware propuesta

Con todos los componentes a integrar seleccionados, podemos hacer una primera aproximación a la arquitectura hardware del pie robótico.

En esencia se trata de una placa de desarrollo para la investigación basada en Arduino, a la que se añaden las capacidades requeridas para cumplir con las especificaciones del pie robótico.

El pie robótico tiene en resumen, la capacidad de recibir las mediciones de los distintos sensores para posteriormente procesar la información obtenida por medio del controlador del pie robótico y comunicar al controlador del robot mini-humanoide.

En el caso del pie robótico diseñado para ser integrado en RAIDER, ROBfoot integrado en RAIDER Sección 5.1, se añade la funcionalidad de comunicarse con el controlador del robot mini-humanoide RAIDER, la placa CM 9.04 encargada de la locomoción. La comunicación se establece empleando la comunicación serie TTL utilizada para controlar los servos Dynamixel AX-12A.

Por otra parte, el pie robótico diseñado para ser integrado en MYOD, ROBfoot integrado en MYOD Sección 5.2, también se añade la funcionalidad de comunicarse con el controlador del robot mini-humanoide MYOD, la placa Arduino MEGA encargada de la locomoción, pero este modelo emplea un Bus I²C.

Finalmente, a ambas configuraciones se le añade la idoneidad de poder comunicar con un PC para una fácil y rápida puesta en marcha y descargar firmware en el pie robótico

5.1 ROBfoot integrado en RAIDER

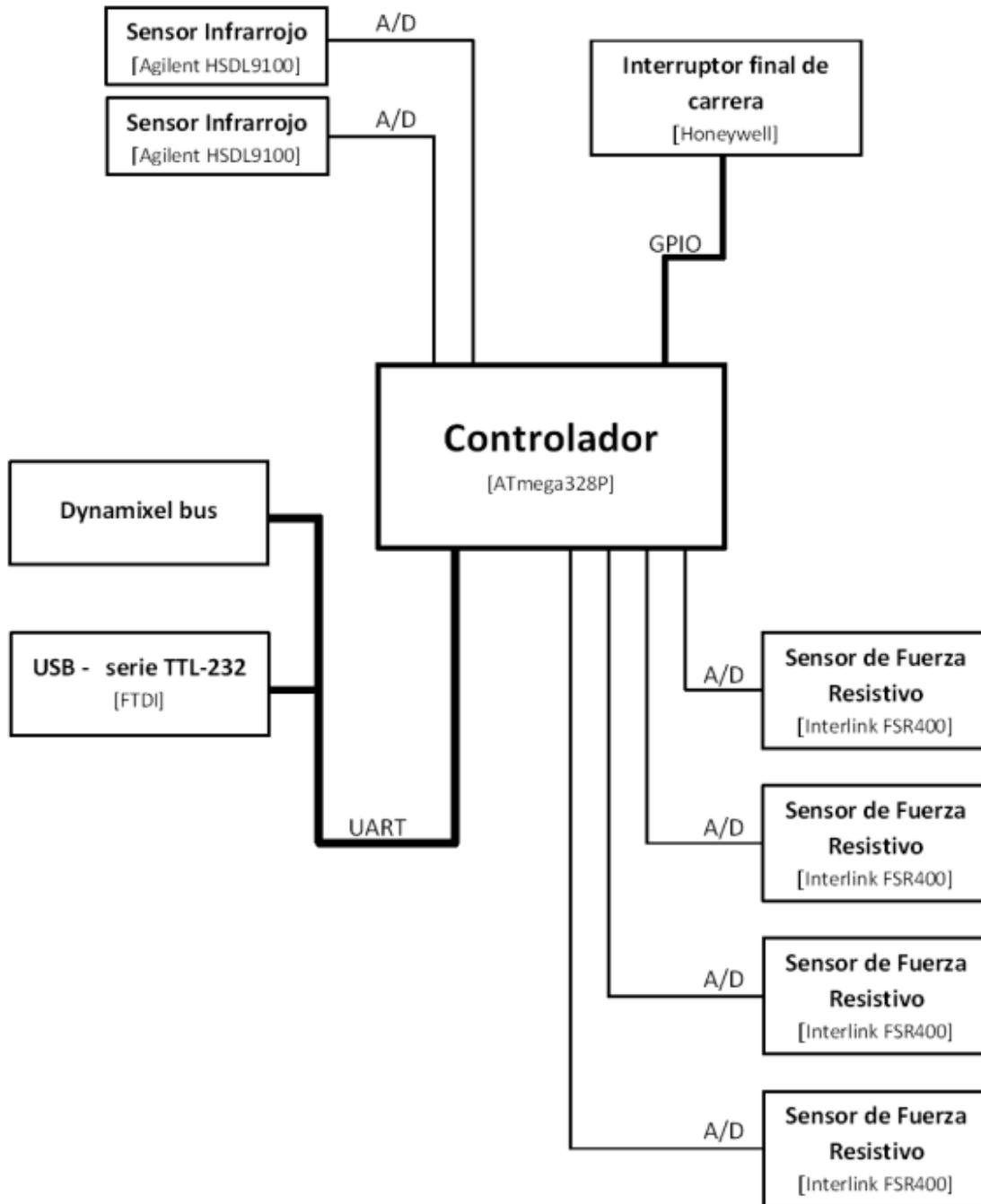


Figura 5.1: Arquitectura hardware ROBfoot integrado en RAIDER

5.2 ROBfoot integrado en MYOD

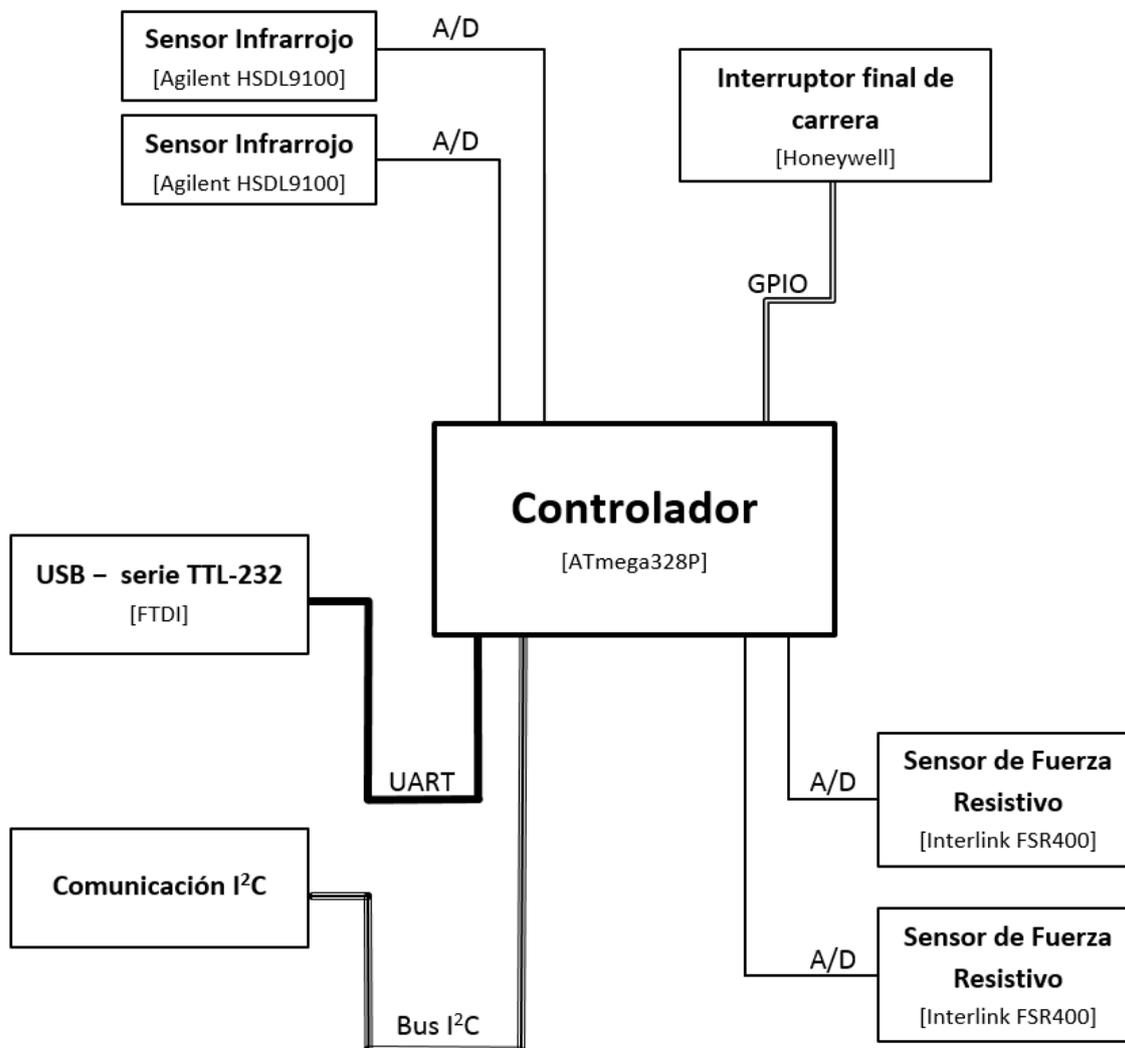


Figura 5.2: Arquitectura hardware ROBfoot integrado en MYOD

6. Desarrollo de ROBfoot

En este capítulo se presentan los distintos pasos seguidos para construir el pie robótico con los elementos seleccionados y descritos en el capítulo de Diseño de ROBfoot.

Comenzaremos puntualizando las dos herramientas de diseño empleadas para desarrollar el pie robótico así como el entorno de programación propuesto para programar el controlador. A continuación detallaremos los distintos procedimientos realizados para acondicionar electrónicamente los elementos de sensorización con el fin de obtener una señal depurada de la que nuestro controlador pueda extraer información útil y mostraremos el nuevo diseño de la estructura del pie que posibilita la fijación de todos los elementos del pie robótico.

Finalmente presentaremos los esquemáticos electrónicos finales del pie robótico, el desarrollo de la consiguiente placa de circuito impreso y su montaje junto con los sensores para la obtención del pie robótico final listo para ser incluido en la plataforma mini-humanoide.

6.1 Herramientas a utilizar

Para la realización del presente proyecto se han empleado distintas herramientas que detallaremos a continuación.

Presentaremos las dos herramientas de diseño utilizadas, una para elaborar el diseño electrónico del pie robótico y la otra para diseñar la estructura mecánica del nuevo pie. También detallaremos el entorno de programación recomendado para programar nuestro controlador puesto que la elección de éste estuvo determinada en su compatibilidad con dicho entorno.

6.1.1 KiCad

KiCad es una herramienta de diseño de circuitos asistido (EDA) libre, siendo además es una de las más avanzadas que se pueden encontrar actualmente. Cuenta con un importante grupo de desarrolladores que mantiene la herramienta bajo un desarrollo constante y una abundante comunidad de usuarios a lo largo de todo el mundo, destacando su uso por la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN)[30].

Las placas de circuito impreso (PCB) son el corazón de cualquier elemento electrónico. KiCad permite la creación de PCBs pasando por todas las fases del desarrollo, desde el diseño del esquema electrónico hasta la creación de los archivos de fabricación que se envían para manufacturar la placa PCB. KiCad se divide en cuatro herramientas software que corresponden a las distintas etapas de desarrollo de una PCB y detallamos a continuación.

Eeschema. Editor de esquemáticos.

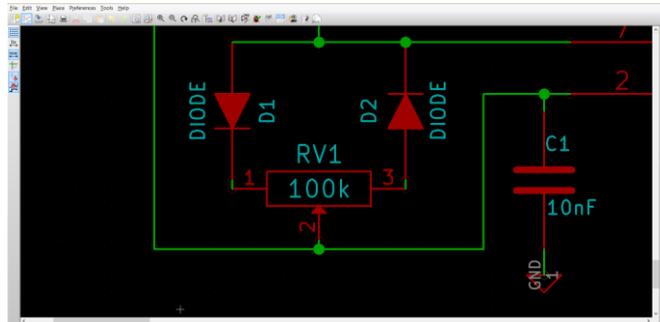


Figura 6.1: Editor de esquemáticos Eeschema

Herramienta para diseñar el esquemático del circuito electrónico. La herramienta dispone de una amplia librería de componentes, no obstante si un dispositivo no existiese en la librería Eeschema dispone de un editor para crear nuevos componentes.

Cvpcb. Selector de huellas.

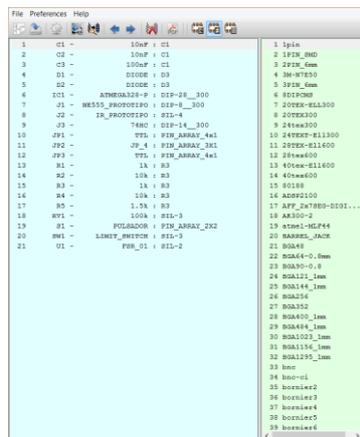
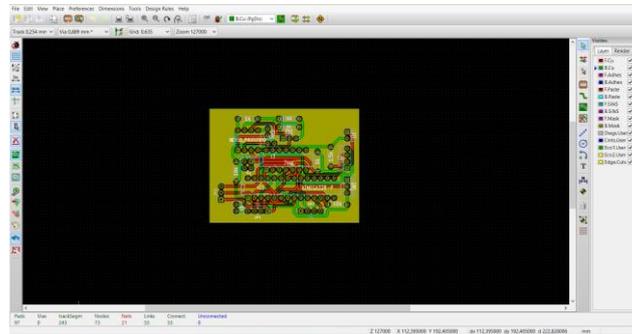


Figura 6.2: Selector de huellas Cvpcb

Una vez finalizado el esquemático, la herramienta Cvpcb se emplea para asociar a cada componente su huella correspondiente. Una vez más, existe una amplia librería de huellas pero si no existiese la huella deseada, existe un editor para crear nuevas huellas. El editor de huellas no es algo común que se pueda encontrar en otras EDA y por tanto es característica distintiva de la herramienta KiCad frente a otras.

Pcbnew. Editor de PCB**Figura 6.3: Editor de PCB Pcbnew**

Teniendo todos nuestros componentes asociados a una huella, cargamos éstas a la herramienta Pcbnew para diseñar nuestra placa de circuito impreso final. Pcbnew admite hasta 32 capas de cobre donde situar nuestras pistas y realizar las interconexiones adecuadas.

Una vez finalizada la PCB, generamos los archivos Gerber de fabricación.

GerbView. Visualizador de archivos Gerber**Figura 6.4: Visualizador de archivos Gerber GerbView**

La herramienta GerbView es utilizada para comprobar si los archivos Gerber han sido generados correctamente y comprobar que no existe ningún error antes de enviar los archivos Gerber para manufacturar la PCB.

Considero que KiCad es una gran herramienta para el diseño de circuitos electrónicos y placas de circuito impreso. La herramienta me fue recomendada por distintos miembros de ASROB quienes aplaudieron su gran potencial e interfaz intuitiva y agradable. Personalmente no había trabajado antes con esta herramienta y trabajando con ella he sido consciente de su gran potencial. Detalles como la posibilidad de visualizar modelos en 3D, como en la Figura 6.5, o crear tus

propias huellas de dispositivos, la convierten en una herramienta muy flexible que influirá positivamente a la hora de seleccionarla en futuros proyectos.

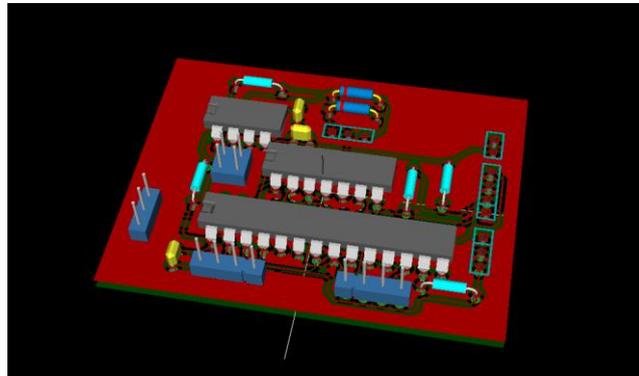


Figura 6.5: Visualización 3D

6.1.2 FreeCAD

FreeCAD [31] es un programa CAD de creación de objetos tridimensionales. Se trata de un software libre dentro de la filosofía Open-Source.

Su interfaz es muy intuitiva y es fácil de manejar por lo que no es preciso una extensa experiencia en modelado CAD de piezas para utilizarlo. Actualmente se encuentra en versión beta, no obstante cuenta a día de hoy con una extensa comunidad de usuarios. En la Figura 6.6 mostramos una imagen capturada del entorno FreeCAD.

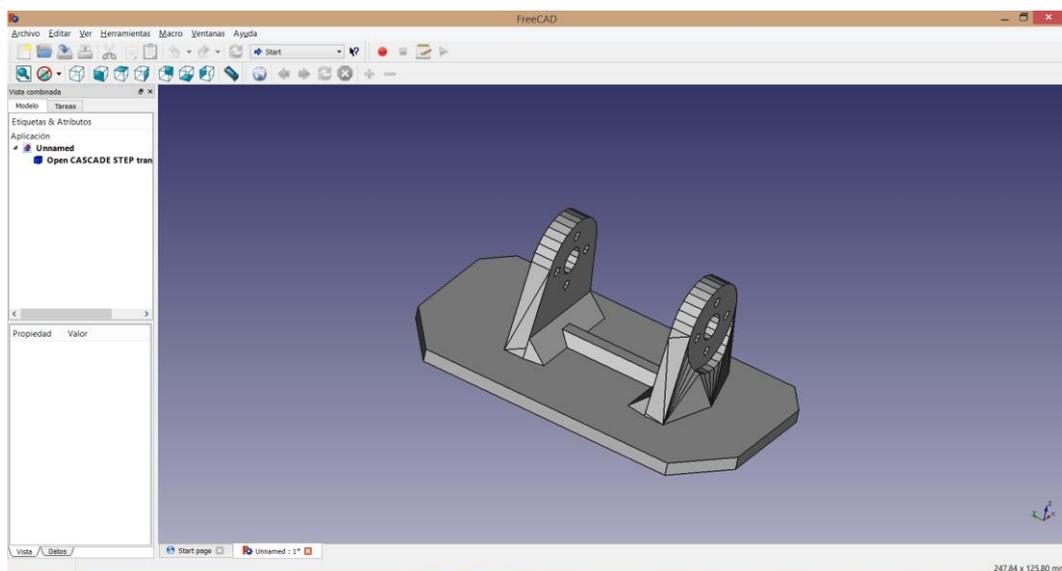
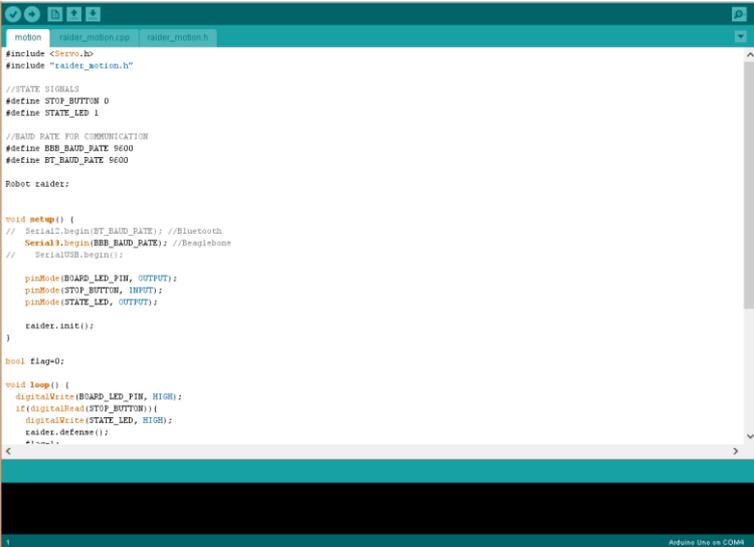


Figura 6.6. FreeCAD

6.1.3 Arduino IDE

Arduino IDE [32] es un entorno de programación para placas Arduino. Admite programación en C/C+ y es compatible con la serie de microcontroladores Atmel ATmega; serie a la que pertenece el controlador del pie robot, el microcontrolador ATmega328P.

Arduino IDE dispone un editor de texto para escribir código, un área destinada a los mensajes y una barra de herramientas con las principales funciones como son “Compile”, para compilar el código en busca de errores, o “Upload” para descargar el programa a la placa. En la Figura 6.7 mostramos el entorno Arduino IDE.



```
motion raider_motion.h raider_motion.h
#include <Servo.h>
#include "raider_motion.h"

//STATE SIGNALS
#define STOP_BUTTON 0
#define STATE_LED 1

//BAUD RATE FOR COMMUNICATION
#define BB_BAUD_RATE 9600
#define BT_BAUD_RATE 9600

Robot raider;

void setup() {
  // Serial2.begin(BT_BAUD_RATE); //Bluetooth
  Serial3.begin(BB_BAUD_RATE); //Beaglebone
  // SerialUSB.begin();

  pinMode(BOARD_LED_PIN, OUTPUT);
  pinMode(STOP_BUTTON, INPUT);
  pinMode(STATE_LED, OUTPUT);

  raider.init();
}

bool flag=0;

void loop() {
  digitalWrite(BOARD_LED_PIN, HIGH);
  if(digitalRead(STOP_BUTTON)){
    digitalWrite(STATE_LED, HIGH);
    raider.defense();
    flag=1;
  }
}
```

Figura 6.7: Entorno de programación Arduino IDE

El software Arduino IDE dispone de una amplia colección de librerías para la comunicación con sensores y actuadores. Además debido a su naturaleza de plataforma Open Software y la numerosa comunidad de Arduino, documentación compatible con Arduino IDE es generada de forma constante a modo de librerías que pueden ser fácilmente utilizadas en otros proyectos.

En definitiva, Arduino IDE se trata de un entorno centralizado donde escribir código, compilarlo y cargarlo en la placa, o en el caso que nos aborda, el controlador del pie robótico. Tiene una interfaz intuitiva y cómoda y no requiere ningún tipo de aplicación adicional para su funcionamiento.

6.2 Acondicionamiento de los sensores a bordo

Los sensores a bordo del pie robótico, explicados en el capítulo de Diseño de ROBfoot, deben ser acondicionados electrónicamente para así obtener una señal depurada de la que nuestro controlador pueda extraer información útil.

6.2.1 Sensores Infrarrojos

Los sensores infrarrojos deben ser acondicionados tanto para mejorar su capacidad de detección como para aumentar su robustez frente a agentes externos.

También es necesario generar una señal modulada, en concreto una señal PWM, para el correcto funcionamiento del sensor y así polarizar el LED emisor para emitir pulsos de luz infrarroja.

Acondicionar la señal APDS 9700

El fabricante Avago Technologies dispone de un acondicionador de señal específicamente diseñado para el sensor infrarrojo HSDL 9100. Se trata del circuito integrado APDS 9700.

Tenemos además el sensor HSDL 9100 acondicionado por medio del APDS 9700 gracias al trabajo realizado por compañeros de la Universidad Carlos III cuyo trabajo se muestra en [33]. El acondicionamiento se realiza mediante componentes en encapsulado SMD lo que reduce considerablemente las dimensiones del conjunto.

Emplearemos, por lo antes dicho, el APDS 9700 para acondicionar el sensor HSDL9100 y así mejorar el rendimiento y la robustez del sensor. En la Figura 6.8 mostramos el diagrama de bloques del APDS 9700

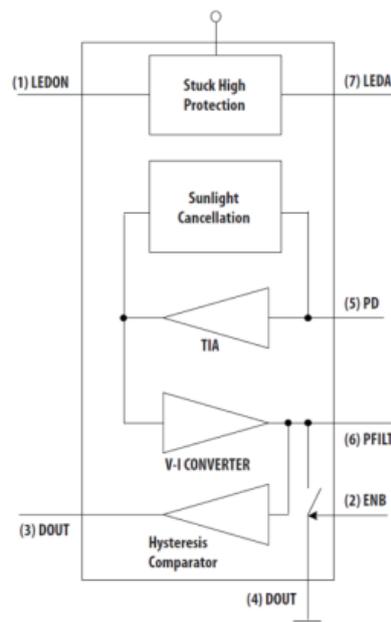


Figura 6.8: Diagrama de bloques del ADPS 9700

Vemos como el acondicionador de señal ADPS9700 está compuesto fundamentalmente por un amplificador transimpedancia (TIA) y un circuito de cancelación de luz solar; además incluye un conversor voltaje-corriente, un comparador de histéresis y un bloque de protección.

La función del amplificador transimpedancia es transformar la corriente introducida en una tensión proporcional a ésta y a continuación amplificar dicho voltaje mediante una ganancia predeterminada.

Por otro lado tenemos el bloque de cancelación de luz solar. Este bloque se encarga de eliminar tanto el efecto de la luz solar, como de la luz artificial en las mediciones del sensor HSDL 9100. Cuando el sensor efectúa mediciones con luz solar ambiente, ésta se manifiesta en forma de corriente continua; por lo tanto el bloque de cancelación de luz solar suprime la corriente continua aludida y así elimina el efecto de la luz solar. La luz artificial en cambio, oscila a 50/60Hz; el bloque de cancelación de luz solar debe suprimir dicha oscilación y así eliminar los efectos de la luz artificial. En la Figura 6.9 mostramos el circuito de acondicionamiento completo del sensor infrarrojo HSDL 9100 por medio de un ADPS 9700.

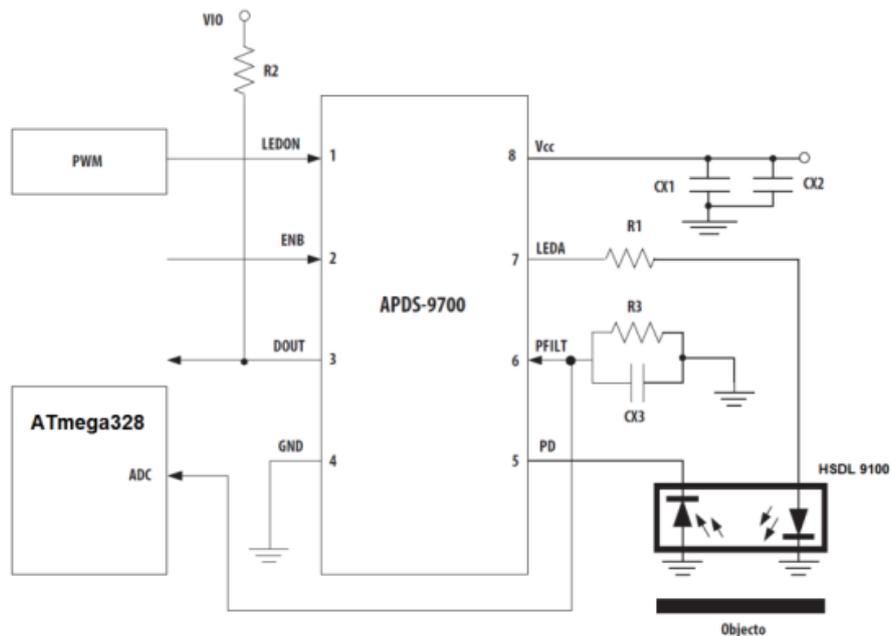


Figura 6.9: Circuito de acondicionamiento del sensor infrarrojo HSDL 9100

En la parte superior izquierda de la Figura 6.9, podemos ver como la señal PWM necesaria para polarizar al emisor LED infrarrojo del HSDL9100 es introducida por el pin 1 (LEDON) del APDS 9700. La señal PWM primero circula por el bloque de protección del APDS 9700, visible en la Figura 6.8, y posteriormente es enviada al ánodo del LED infrarrojo a través del pin 7 (LEDA). La resistencia R1 es utilizada para limitar la corriente que fluye por el emisor LED infrarrojo.

La corriente que genera el fotodiodo receptor en cambio, no necesita ser limitada; es más, debe ser amplificada. Vemos como el cátodo se conecta directamente con el pin 5 (PD) y volviendo a la Figura 6.8 advertimos que el pin 5 (PD) es la entrada al TIA del ADPS 9700. Por tanto la corriente generada por el fotodiodo receptor será transformada a voltaje y dicho voltaje amplificado.

Vemos en la Figura 6.9 como la resistencia R3 y el condensador C3 se encuentran conectados en paralelo, respecto a tierra, con el pin 6 (PLIFT). Su función es actuar como integrador y así producir un voltaje de salida. En la Figura 6.8 podemos ver como la salida del conversor voltaje – corriente del ADPS 9700 coincide con el pin 6(PLIFT). La corriente que circula por conversor voltaje – corriente carga el condensador C3 y se descarga por la resistencia R3. Los valores de la resistencia R3 y el condensador C3 son por lo tanto determinantes debido a que determinan la constante de tiempo de carga y descarga del condensador C3; además de garantizar un bajo consumo y una buena sensibilidad en las mediciones del sensor infrarrojo HSDL 9100.

Los condensadores CX1 y CX2 son condensadores de desacoplo para proteger al ADPS 9700 frente a picos de tensión. Los pines 2 (ENB) y 3 (DOUT) son un enable y una salida digital respectivamente. Las vemos conectadas a tierra puesto que estas funcionalidades del ADPS9700 no serán empleadas en el pie robótico.

Los resultados de los test realizados con el sensor infrarrojo HSDL9100 con el circuito de acondicionamiento propuesto pueden verse en el capítulo de 8. Ensayos y resultados. Como era de esperar, empleando el circuito APDS 9700, el cual está específicamente diseñado para acondicionar los sensores HSDL9100, obtenemos muy buenos resultados y gran inmunidad a interferencias en nuestras mediciones.

Señal PWM.

Utilizaremos una señal PWM para polarizar los emisores LED infrarrojo del pie robótico y así éstos emitir pulsos de luz infrarroja para realizar las mediciones. Con ello reduciremos la influencia de parte de las interferencias ambientales sintonizando el fotodiodo receptor con los pulsos de luz infrarroja emitidos por el LED infrarrojo.

Para un correcto funcionamiento del sensor infrarrojo HSDL 9100, se recomienda que el emisor sea polarizado con una señal PWM de 100µs y 20% de ciclo de trabajo.

El microcontrolador ATmega 328P integrado en del pie robot puede generar una señal PWM de varios modos.

Por un lado podemos emplear las librerías propias de Arduino con las funciones `analogWrite()` o `digitalWrite()`. Empleando la función `analogWrite(pin,dutyCycle)`, podemos generar de forma fácil y rápida una señal PWM donde el ciclo de trabajo puede ser seleccionado introduciendo un número entre 0 y 255. La principal desventaja de este método es que no tenemos control sobre la frecuencia de nuestra señal PWM, por ello no es válido para nuestro diseño.

Una señal PWM también puede generarse con un simple algoritmo de encendido y apagado de cualquier salida digital mediante las funciones `digitalWrite()` y `delay()`. Si bien es posible seleccionar un ciclo de trabajo y frecuencia, no es algo trivial. No existe un método para seleccionar las constantes apropiadas para un ciclo de trabajo y una frecuencia particular, solo es posible contando ciclos o cambiar los valores a base de prueba y error observando la salida en un osciloscopio. Además no es posible mantener la salida PWM activa mientras el ATmega realiza cualquier otra tarea, algo que no es admisible para el pie robótico; este segundo método sirviéndonos de las librerías Arduino por tanto queda también descartado.

Por otro lado podemos modificar los registros de los temporizadores del ATmega328P y valernos directamente de ellos. Cada temporizador tiene dos registros de salida controlados por un comparador, cuando el temporizador alcanza el valor de registro del comparador, la salida correspondiente es creada. Utilizar los temporizadores del ATmega328P directamente concede un mayor control sobre la señal PWM generada que las funciones `analogWrite()` o `digitalWrite()` pero implica una desventaja importante, que los temporizadores son modificados. Ambicionamos que el pie robótico sea empleado para la investigación, como ya ha sido mencionado, implicando por tanto que los temporizadores serán empleados en los sucesivos diferentes lazos de control que se implementen en el pie robótico. Modificar los temporizadores es por tanto una limitación.

Decidimos por todo lo mencionado anteriormente, generar la señal PWM de forma independiente, sin utilizar el controlador del pie robótico. La señal será generada por un temporizador NE555. En la Figura 6.10 mostramos una imagen del temporizador NE555 empleado.

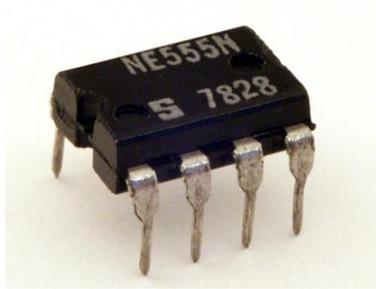


Figura 6.10: Temporizador NE555.

El NE555 es un circuito integrado introducido en 1971 que sorprendentemente todavía a día de hoy es utilizado. Esto se debe principalmente a su bajo precio, facilidad de uso y estabilidad. Es empleado en numerosas aplicaciones ya sea para generar pulsos, producir retardos, ofrecer un flip-flop de pequeñas dimensiones o generar oscilaciones, como es el caso que nos ocupa. En la Figura 6.11 mostramos el pinout y el diagrama de bloques del NE555.

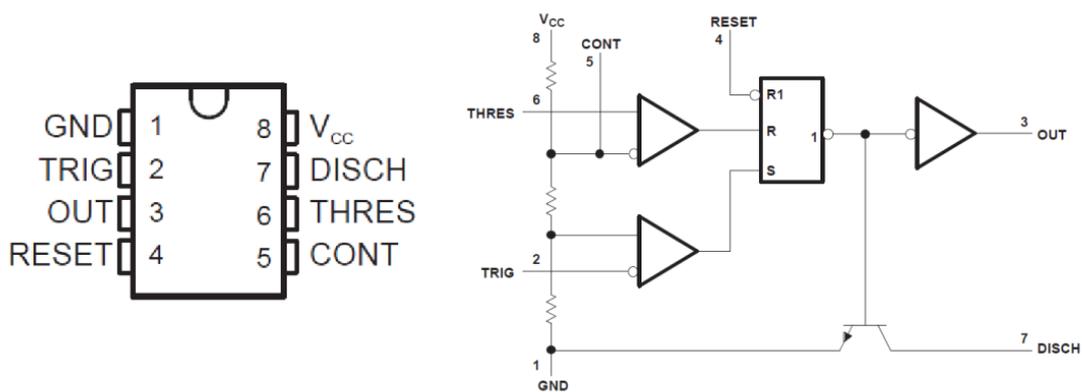


Figura 6.11: Pinout y Diagrama de Bloques del NE555

Vemos como el NE555 está compuesto principalmente por un Flip-Flop, dos comparadores y un transistor. Para generar una señal PWM debemos acondicionar el temporizador NE555 para que funcione como un multivibrador monoestable. En la Figura 6.12 mostramos el diseño para emplear el NE555 como multivibrador monoestable.

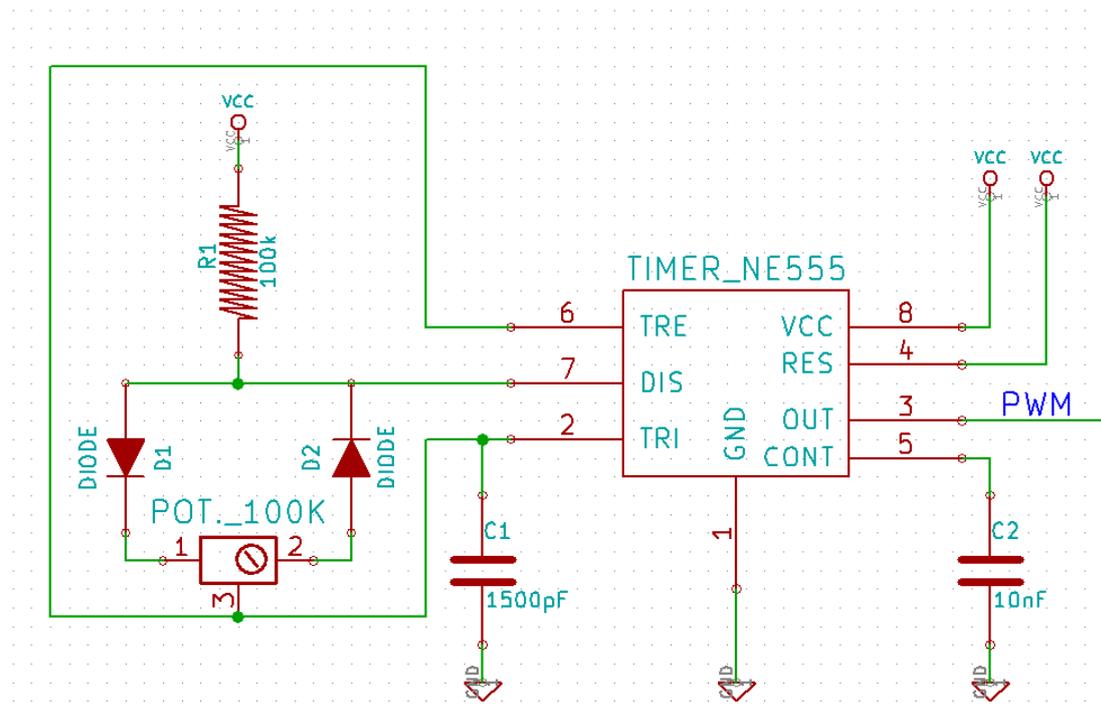


Figura 6.12: NE555 configurado como multivibrador monoestable

Un multivibrador monoestable realiza una función secuencial fundamentada en recibir una excitación, cambiar de estado y mantener dicho estado un periodo determinado de tiempo. Transcurrido el periodo de tiempo mencionado, el monoestable retorna a su estado inicial. Utilizando nuestro circuito de la Figura 6.12 y también observando la Figura 6.11 explicaremos con más en detalle el proceso.

Si el estado de la salida es BAJO, un pulso negativo introducido por el pin TRIG cambia el estado del Flip-Flop (Q' negada pasa a estado BAJO) y esto hace que la salida pase a estado ALTO y el transistor Q1 se apague. El condensador C1 es entonces cargado a través de la resistencia R1 y D1 hasta alcanzar el valor de tensión del pin THRE. Si el estado del pin TRI ha vuelto a estado ALTO, el comparador del pin THRES cambia nuevamente el estado del Flip-Flop (Q' negada pasa a estado ALTO) y esto hace que la salida pase a estado BAJO y a conectar el transistor Q1. Es entonces cuando el condensador C1 se descarga a través de D2 y el transistor Q1.

El ciclo de trabajo de nuestra señal PWM está determinado por el valor del potenciómetro Rvar; por consiguiente para seleccionar un ciclo de trabajo deseado, en nuestro caso 20%, tan solo se debe modificar el valor del potenciómetro Rvar.

En cuanto al periodo de oscilación, éste se determina por medio de los valores del condensador C1 y la resistencia R1, ya que influyen, como ha sido explicado, en el proceso de carga y descarga. En el Capítulo 8. Ensayos y resultados mostramos el proceso realizado para determinar los valores de la resistencia R1 y el condensador C1 y de este modo conseguir la señal PWM deseada.

6.2.2 Sensores de Fuerza Resistivos

Los sensores de fuerza resistivos seleccionados para el pie robótico, explicados en el capítulo de Diseño de ROBfoot, deben ser acondicionados para transmitir sus mediciones en forma de señal analógica así como para aumentar, en la medida de lo posible, su sensibilidad electrónica. Se realizaron varias aproximaciones descritas a continuación

Puente Wheatstone

Como primera aproximación diseñamos un puente de Wheatstone para realizar las mediciones del FSR 400. El puente de Wheatstone es muy utilizado en mediciones con galgas extensiométricas, las cuales tienen el mismo principio de funcionamiento que nuestros sensores de fuerza resistivos. La Figura 6.13 muestra el puente de Wheatstone diseñado con nuestro sensor de fuerza resistivo.

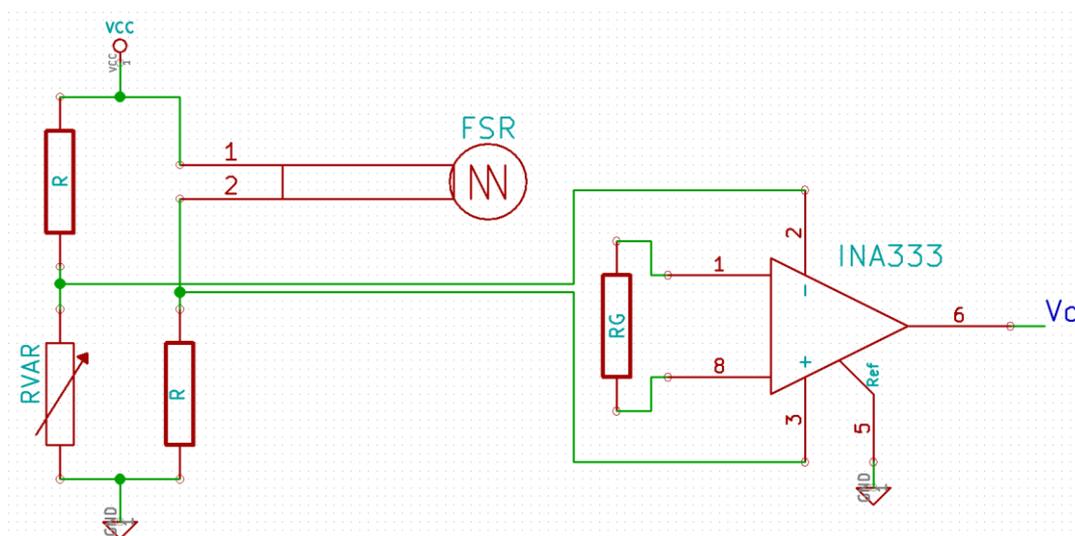


Figura 6.13: Puente de Wheatstone con FSR 400

Como se puede ver en la Figura 6.13, un amplificador de instrumentación INA333 se coloca a la salida del puente de Wheatstone. Su uso es aconsejado y su propósito es amplificar el voltaje que aparece a la salida del puente cuando se ejerce una fuerza sobre el sensor de fuerza resistivo. La ganancia se determina mediante la resistencia R_g . La elección de un amplificador de instrumentación INA333 se debe a que éste presenta un Rechazo de Modo Común muy elevado, mínimo 100dB, lo cual es una característica propia de los amplificadores operacionales.

La instrumentación de galgas extensiométricas por medio de diseños con puentes de Wheatstone genera muy buenos resultados y son siempre recomendados, no obstante con nuestro sensor de fuerza resistivo no observamos buenos resultados con este circuito de acondicionamiento.

Tenemos el puente de Wheatstone balanceado y una ganancia considerable seleccionada en el amplificador; no obstante el rango de voltaje obtenido aplicando diferentes fuerzas no es tan amplio como ambicionamos, los resultados de los distintos test realizados pueden verse en el capítulo de 8. Ensayos y resultados. Debido al bajo rango de voltaje de salida observado, este circuito de acondicionamiento fue descartado.

LM324

El siguiente circuito de acondicionamiento testado, a diferencia del circuito de acondicionamiento del puente de Wheatstone, lo encontramos sugerido en la hoja de características del sensor de fuerza resistivo. En este caso el circuito se basa en un amplificador transimpedancia. Su principio de funcionamiento es la conversión de corriente a voltaje por medio de un amplificador operacional LM324. En la Figura 6.14 mostramos el convertor de corriente a voltaje con el FSR 400 y el LM324.

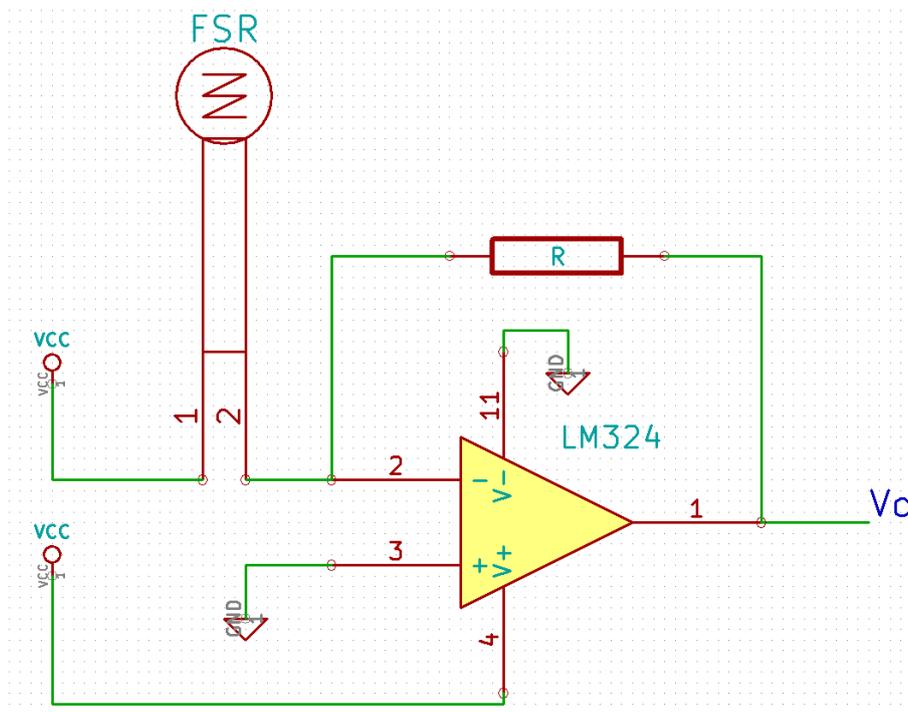


Figura 6.14: Acondicionamiento transimpedancia del FSR 400

Una vez más, no obtenemos unos resultados apropiados en nuestras mediciones. Obtenemos una sensibilidad y un rango de voltaje salida excesivamente bajo. Los resultados de los tests realizados pueden verse en el capítulo de 8. Ensayos y resultados.

Un circuito de acondicionamiento que en un primer momento parecía que sería el definitivo, puesto que estaba sugerido por parte del fabricante, observando los malos resultados cosechados también fue descartado.

Analizamos la razón por la que no obtenemos los resultados esperados. En la Figura 6.15 mostramos la salida del circuito de acondicionamiento transimpedancia con un voltaje de referencia positivo.

$$V_{OUT} = V_{REF} \cdot \left(-\frac{R_G}{R_{FSR}} \right)$$

Figura 6.15: Salida del circuito de acondicionamiento transimpedancia con voltaje de referencia positivo

Vemos como empleando un voltaje de referencia positivo la salida del amplificador operacional debe tener la capacidad de poder oscilar por debajo de tierra, es de decir de 0V a $-V_{ref}$. Por lo que una fuente de alimentación dual es necesaria.

Esto es un problema puesto que la alimentación del pie robótico de RAIDER procede del bus Dynamixel mientras que la del pie robótico de MYOD procede de la placa Arduino MEGA 2560 y éstas no son duales.

Existen diferentes métodos empleando amplificadores operacionales para transformar una fuente de alimentación simple a dual por medio de una tierra virtual. No obstante, debido al requerimiento de construir un pie de bajo consumo junto al limitado espacio disponible, dichos procedimientos son refutados

El acondicionamiento del sensor de fuerza resisitivo FSR 400 con el LM324 ofrece un amplio rango de voltajes de salida con una buena sensibilidad, según la hoja de características del FSR 400, si se emplea una fuente de alimentación dual; sin embargo debido a la problemática de la necesidad de una fuente de alimentación dual, el diseño de acondicionamiento transimpedancia fue definitivamente descartado.

Divisor de Tensión

Finalmente realizamos un último test con un circuito de acondicionamiento basado en un simple divisor de tensión con nuestro FSR 400 y ver los resultados. En la Figura 6.16 mostramos el divisor de tensión con el FSR 400.

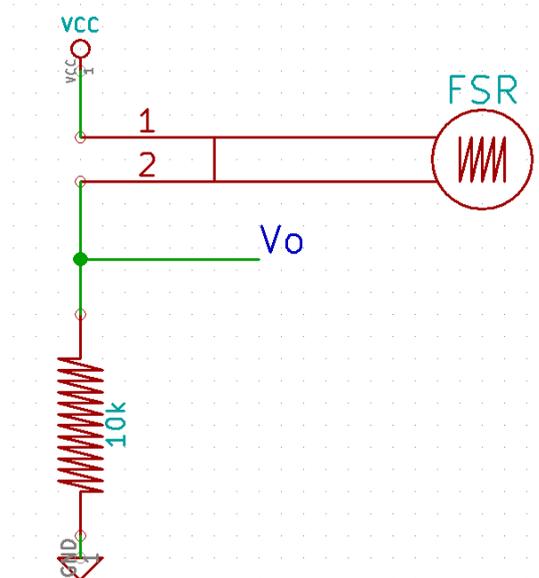


Figura 6.16: Divisor de tensión con FSR 400

Como pueden verse en el capítulo de 8. Ensayos y resultados, los test realizados con el FSR 400 acondicionado con un divisor de tensión ofrecen unos resultados más que aceptables. Obtenemos un buen rango de voltaje de salida con una buena sensibilidad, además dicho rango puede ser seleccionado en función a la resistencia empleada en el diseño.

En la configuración actual, el voltaje analógico de salida aumenta al aplicar fuerza sobre el sensor de fuerza resistivo. Mencionar que es posible tener el funcionamiento opuesto, es decir, que el voltaje analógico disminuya al aplicar fuerza, si se intercambian el FSR 400 y la resistencia.

Si bien hay que señalar que hemos perdido sensibilidad respecto a un posible acondicionamiento transimpedancia, el divisor de tensión ofrece un buen acondicionamiento de los sensores resistivos FSR 400 con una buena sensibilidad y un rango de voltaje de salida suficiente. La solución de acondicionar los FSR 400 mediante un divisor de tensión es la finalmente seleccionada en consecuencia de sus buenos resultados y su reducido tamaño, ya que recordamos que el espacio ocupado importa, puesto que tenemos hasta cuatro sensores de fuerza resistivos FSR400 a integrar y que acondicionar en el pie robótico.

6.2.3 Interruptor Final de Carrera

El interruptor final de carrera se adecua, al igual que los otros sensores, para obtener una señal de la que poder extraer información útil. La diferencia de éste, respecto al resto de sensores a bordo, es que su salida no se trata de una señal analógica con un rango de voltajes de salida, sino una señal digital de estado alto o estado bajo.

El acondicionamiento del interruptor final de carrera se realiza mediante un simple circuito que presenta dos configuraciones. Las dos configuraciones se fundamentan en la naturaleza de los interruptores de final de carrera que presentan dos funcionamientos, Normalmente Abierto y Normalmente Cerrado. La configuración escogida a la hora de acondicionar el interruptor final de carrera determinará por tanto el funcionamiento de éste. En la Figura 6.17 mostramos el circuito de acondicionamiento seleccionado, interruptor final de carrera Normalmente Abierto.

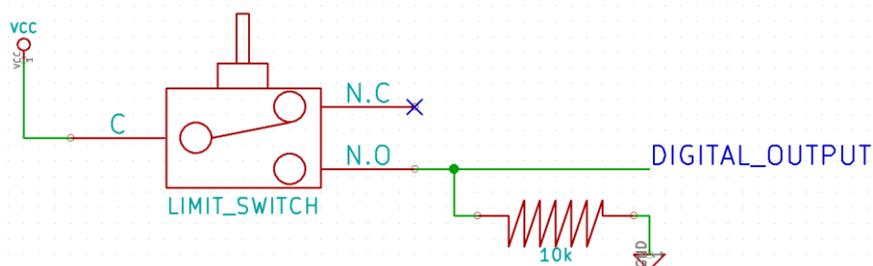


Figura 6.17 Circuito de acondicionamiento Interruptor final de carrera normalmente abierto

Vemos como el único acondicionamiento realizado es el empleo de una resistencia pull-down de 10K Ω colocada en paralelo con la salida digital. La colocación de esta resistencia es recomendada por el fabricante del microcontrolador. Su propósito es conocer en todo momento el estado de la entrada digital de nuestro controlador evitando que la salida del interruptor final de carrera pueda entrar en estado flotante e inducir a posibles errores en la lectura.

Como vemos en la Figura 6.17, el interruptor final de carrera presenta dos salidas. Seleccionando la salida 3 como la entrada digital del controlador del pie, determinamos el funcionamiento del interruptor final de carrera como Normalmente Abierto puesto que dicha entrada digital está conectada a tierra a través de la resistencia pull-down recibiendo un estado bajo.

Cuando el pie robótico se encuentre delante de un obstáculo y se accione el interruptor final de carrera, la entrada digital del controlador del pie recibirá un estado alto, ya que al cerrarse el contacto, estará conectada directamente con Vcc.

No obstante, si en un futuro fuese deseado cambiar el funcionamiento el interruptor final de carrera a Normalmente Cerrado, no sería necesario tener que cambiar sus conexiones físicas. Los microcontroladores Atmega disponen de resistencias pull-up en sus entradas digitales para solventar este cometido. Definiendo la entrada digital `pinMode()` del interruptor final de carrera como `INPUT_PULLUP` permite invertir el comportamiento teniendo estado alto cuando el sensor se encuentre apagado o estado bajo cuando el sensor se encuentre accionado.

Es decir, mediante un simple ajuste de software se puede cambiar el comportamiento del interruptor final de carrera al gusto del usuario.

Tenemos nuestros sensores acondicionados y listos para enviar la información de sus distintas mediciones al controlador. Recordamos que los diferentes test realizados sobre los sensores pueden verse en el capítulo de 8. Ensayos y resultados. Dichos ensayos son determinantes para seleccionar el acondicionamiento final y conocer el funcionamiento real de nuestros sensores.

6.3 Diseño partes mecánicas

La estructura del pie robótico de RAIDER y MYOD debe ser remodelada para que pueda satisfacer las nuevas capacidades que esperamos del nuevo pie robótico.

Necesitamos un pie robótico cuyo cuerpo permita albergar todos los componentes seleccionados; siendo éstos el nuevo controlador, los distintos sensores y sus respectivos circuitos de acondicionamiento. La nueva estructura debe posibilitar una fijación apropiada y segura de todos los componentes, en particular la de los sensores, puesto que su correcta localización y posicionamiento es esencial para que su funcionamiento sea adecuado.

Antes de diseñar el nuevo pie robótico, analizamos primero un gran número de investigaciones orientadas a diseñar nuevos pies para robots humanoides; éstas pueden verse en el capítulo del Estado del Arte. Vimos como la nueva corriente estaba orientada a diseñar pies robóticos con más de un segmento, abandonando los pies planos de un solo segmento. Los pies robóticos en cuestión incorporan una articulación en la parte delantera del pie que reproduce los dedos del pie de un ser humano. Los trabajos exponen resultados muy prometedores y además manifiestan obtener una marcha bípeda más natural y semejante a la de un ser humano, todo ello como resultado de la posibilidad de variar ZMP durante la caminata.

En el caso que nos ocupa, trabajamos con un robot mini-humanoide. Su locomoción bípeda no está basada en el principio de ZMP por lo que el diseño estructural de un pie robótico con más de un segmento es descartado. En la Figura 6.18 vemos una de las piezas estructurales que componen el nuevo pie robótico.

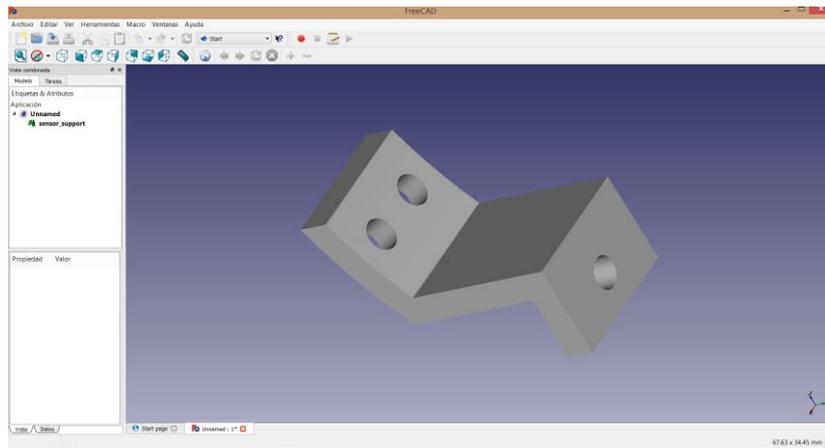


Figura 6.18: Estructura del soporte para sensores

En definitiva, la estructura del nuevo pie robótico se trata del pie robótico RAIDER y MYOD ligeramente remodelado para instalar los nuevos elementos, sin que dicha remodelación limite las funciones motoras del robot mini-humanoide. La remodelación se basa principalmente en orificios para los tornillos que fijaran los nuevos elementos. Además se ha diseñado un soporte, Figura 6.18, para la sujeción y orientación de los sensores infrarrojos y el interruptor final de carrera en la parte frontal del pie robótico.

Las piezas, una vez sean diseñadas, serán fabricadas por medio de una impresora 3D RepRap modelo Prusa i3 P3Steel mostrada en la Figura 6.19.

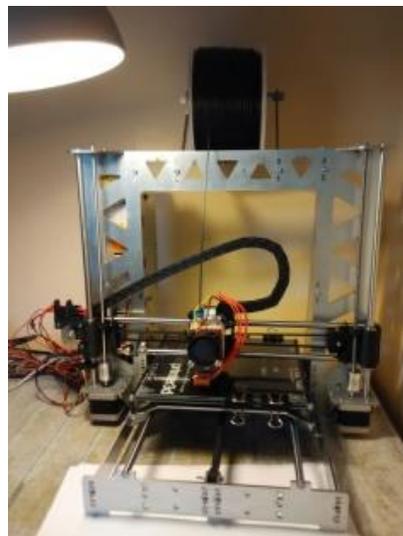


Figura 6.19: Impresora 3D RepRap Prusa i3 P3Steel

La impresora funciona siguiendo el proceso de modelado de deposición fundida. Este tipo de impresoras 3D fabrican las piezas mediante la superposición de capas horizontales de plástico, dotando así de altura al modelo. La materia prima utilizada es un rollo de filamento de plástico termofusible ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) de 1.75mm, pero pueden emplearse otros polímeros como PLA (poliácido láctico) o HDPE (polietileno de alta densidad) y filamentos de hasta 3mm.

Un extrusor hace pasar el filamento a través de un conducto caliente, llamado Hotend, que funde el material y posteriormente se expulsa por un agujero de inferiores dimensiones de salida que de entrada, produciendo de este modo hilos de material fundido. El extrusor, en definitiva, traza trayectorias depositando los hilos de plástico fundido formando las aludidas capas horizontales superpuestas y de este modo crear la pieza deseada.

Para el control de la impresora 3D a través un PC, el programa Repetier-Host ha sido utilizado. El programa acepta archivos STL generados a partir de nuestro programa de diseño y de este modo desarrollar la pieza deseada.

6.4 Ejecución y Montaje

En esta sección desarrollaremos todos los pasos que se han seguido para construir físicamente el pie robótico.

En este momento tenemos un controlador, un conjunto de diferentes sensores junto a sus respectivos circuitos de acondicionamiento y una estructura impresa por medio de una impresora 3D. El siguiente paso es por tanto, unir todos los componentes para formar un único elemento. Mencionar que también debemos adaptar el pie robótico para comunicarse tanto con un PC como con las placas controladoras de RAIDER y MYOD encargadas de la locomoción del robot mini-humanoide.

En primer lugar mostraremos, de manera esquemática, los distintos circuitos electrónicos finales del pie robótico. Presentaremos el conexionado de los distintos elementos de sensorización con el controlador así como las conexiones utilizadas para comunicar el pie robótico. También señalaremos determinados elementos integrados en el pie robótico empleados para garantizar un correcto funcionamiento.

En segundo lugar explicaremos el desarrollo de nuestra placa de circuito impreso donde los esquemáticos previamente explicados serán llevados a un caso real para ser físicamente fabricados.

Finalmente, teniendo nuestra placa de circuito impreso fabricada, mostraremos su montaje en el pie robótico junto al posicionamiento de los sensores.

6.4.1 Esquemas electrónicos

El esquema electrónico completo del pie robótico diseñado para RAIDER puede encontrarse en el Anexo 1 mientras que el esquema electrónico completo del pie robótico diseñado para MYOD puede encontrarse en el Anexo 2

En esta sección se presenta el desarrollo de los distintos bloques del esquema electrónico mediante la herramienta Eeschema de KiCAD. En esencia se trata de conectar todos los elementos incluidos en el pie robótico con el controlador.

Comenzaremos presentado los esquemas electrónicos de los distintos sensores y el conexionado que establecen con el controlador del pie robótico. A continuación mostraremos los esquemas utilizados para comunicar el pie robótico y finalmente una serie de esquemas electrónicos de elementos incluidos en el pie robótico, no especificados en el capítulo 4 Diseño de ROBfoot, cuya misión es la de garantizar el correcto funcionamiento del pie robótico o facilitar su utilización.

6.4.1.1 Sensores a bordo de ROBfoot

Los sensores ya acondicionados deben comunicar sus mediciones al controlador para así éste analizar la información.

A continuación mostramos en detalle los esquemas electrónicos de los distintos sensores junto a sus respectivos circuitos de acondicionamiento y definiremos la conexión que establecen con el controlador del pie robótico.

6.4.1.1.1 Sensores Infrarrojos

Los sensores infrarrojos aportan sus mediciones, en forma de voltaje analógico, como ya ha sido detallado en el capítulo de Diseño de ROBfoot.

Por otro lado, nuestro controlador, el Atmega328P presenta 6 pines que pueden designarse como entradas analógicas. La razón por la que estos pines pueden trabajar como entradas analógicas también aparece justificada en el capítulo de Diseño de ROBfoot. En la Figura 6.20 mostramos las 6 entradas analógicas del controlador.

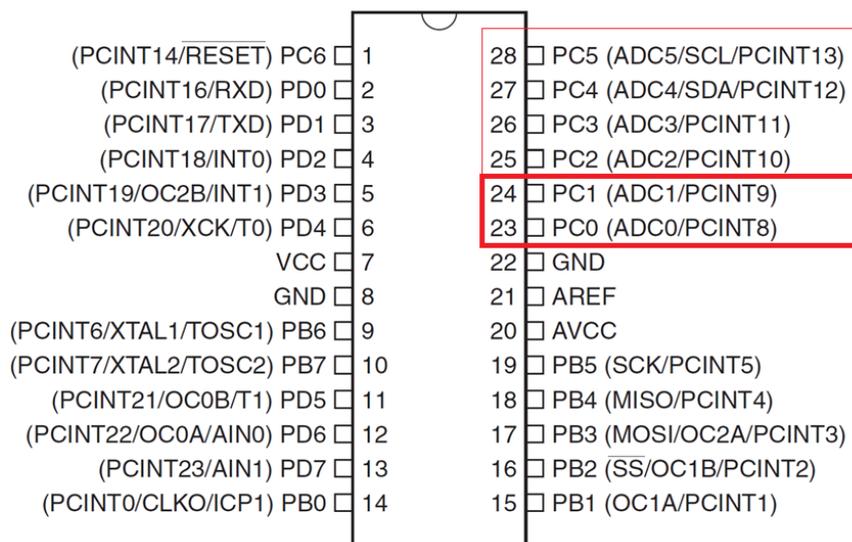


Figura 6.20: Entradas analógicas del Atmega328P destinadas a los Sensores Infrarrojos

Podemos apreciar como los pines 23 y 24, puertos PC0 y PC1 respectivamente, aparecen destacados frente al resto de pines que pueden trabajar como entradas analógicas. Recalcamos éstos debido a que serán los destinados para conectar las salidas de nuestros dos sensores infrarrojos. En la Figura 6.21 mostramos el esquema electrónico final de nuestros sensores infrarrojos cuyas salidas estarán conectadas a las dos primeras entradas analógicas de nuestro controlador.

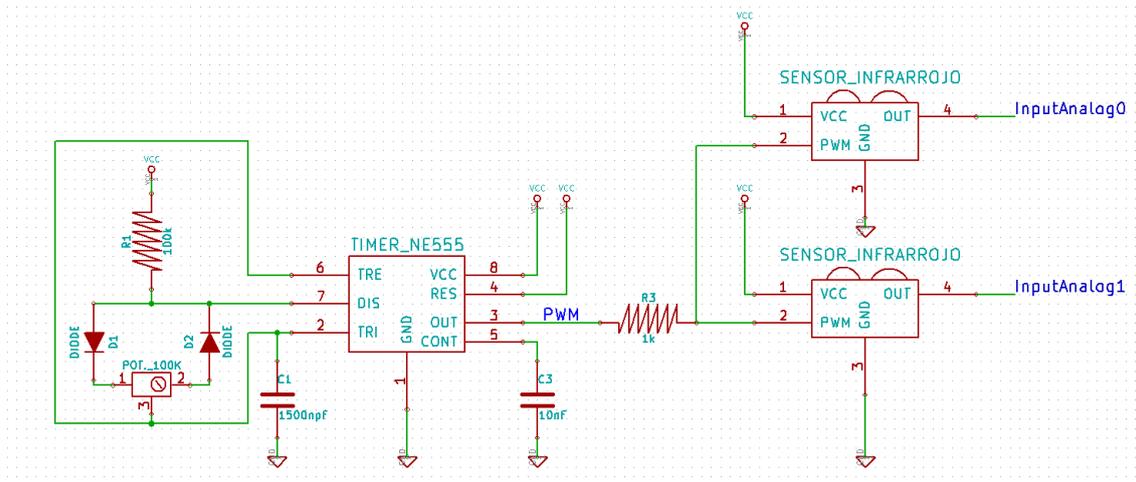


Figura 6.21: Esquema electrónico Sensores Infrarrojos

Lo primero que podemos apreciar es que el sensor infrarrojo HSDL9100 aparece junto a su circuito de acondicionamiento como un único bloque. Como ya mencionamos, emplearemos los sensores desarrollados por nuestros compañeros de la Universidad Carlos III, cuyo trabajo puede encontrarse en [33]. Evidentemente en la librería de componentes de Eeschema no existe el trabajo de nuestros compañeros, por lo que nos beneficiamos del editor de componentes de Eeschema para crear nuestro bloque Sensor Infrarrojo. Por otro lado, el temporizador NE555 tampoco existe en la librería de componentes de Eeschema por lo que también fue necesaria su creación. Ambos componentes aparecen incluidos en la librería de componentes de KiCAD del proyecto ROBfoot.

Como puede verse en el capítulo 8. Ensayos y resultados la máxima salida del sensor infrarrojo es 3V, lo cual no supone un peligro para las entradas analógicas del Atmega que aceptan hasta 5V por lo que no es necesario ningún acondicionamiento adicional y la conexión se realiza de manera directa entre la salida del sensor y la entrada analógica del controlador. Tanto el bloque Sensor Infrarrojo, como el multivibrador monoestable son alimentados a partir de la alimentación del pie robótico y puestos a tierra común con el controlador.

6.4.1.1.2 Sensores de Fuerza Resistivos

Los sensores de fuerza resistivos han sido acondicionados para que cuando experimenten una variación de su resistencia eléctrica se traduzca en un voltaje analógico. Su acondicionamiento aparece explicado en la sección de Acondicionamiento de los sensores del presente capítulo mientras que su propiedad de cambiar su resistencia eléctrica la exponemos en el capítulo de Diseño de ROBfoot.

De las 6 entradas analógicas que dispone nuestro controlador, dos son destinadas para los sensores por lo que las cuatro restantes estarán dedicadas a los sensores de fuerza resistivos. Mostramos una vez más las 6 entradas analógicas de nuestro controlador en la Figura 6.22, pero esta vez podemos advertir que son los pines 25, 26, 27 y 28, puertos PC2, PC3, PC4 y PC5 respectivamente, los que aparecen destacados.

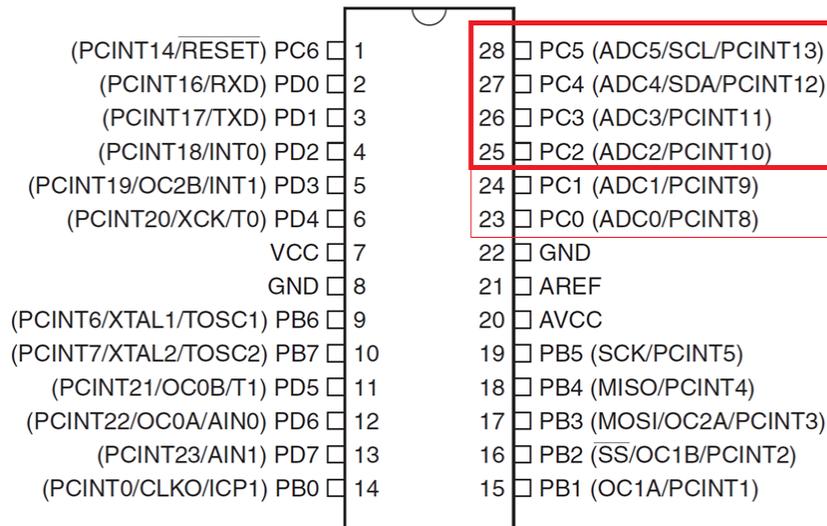


Figura 6.22: Entradas analógicas del Atmega328P destinadas a los Sensores de Fuerza Resistivos

Serán, por consiguiente, los pines destacados en la Figura 6.22 los destinados para conectar las salidas de nuestros cuatro sensores de fuerza resistivos.

En la Figura 6.23 mostramos el esquema electrónico final de nuestros sensores de fuerza resistivos cuyas salidas estarán conectadas a las cuatro entradas analógicas no empleadas por los sensores infrarrojos de nuestro controlador.

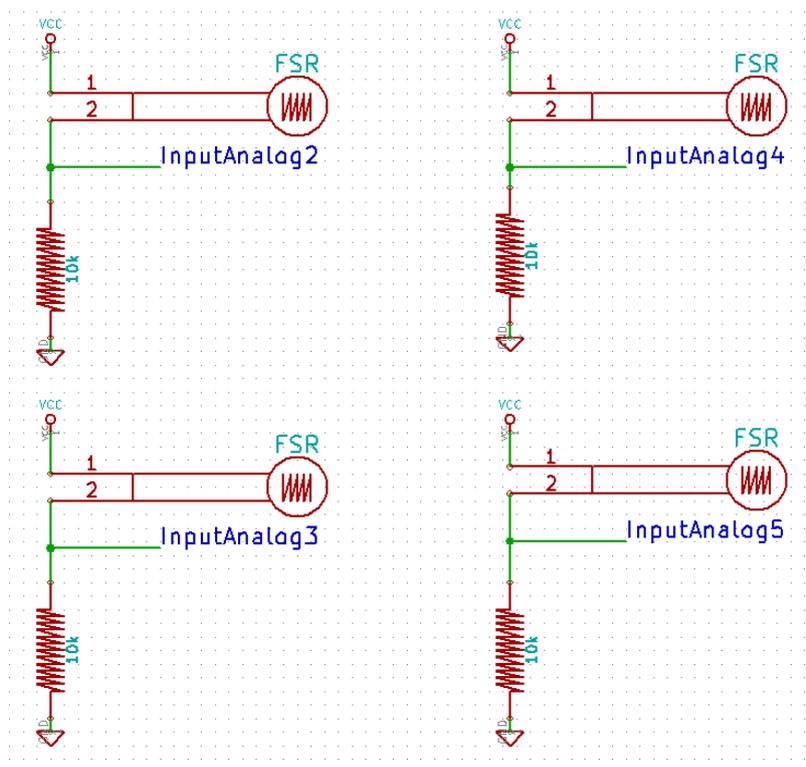


Figura 6.23: Esquema electrónico Sensores de Fuerza Resistivos

A la hora de realizar el esquema electrónico de los sensores de fuerza resistivos a través de la herramienta Eeschema de KiCAD, nos encontramos con el mismo problema que con los sensores infrarrojos y el circuito integrado NE555. Los sensores de fuerza resistivos FSR400 no existen en la librería de componentes de Eeschema. Fue por tanto necesario utilizar el editor de componentes de Eeschema para crear nuestro sensor de fuerza resistivo. El nuevo componente sensor de fuerza resistivo FSR400 puede encontrarse en la librería de componentes de KiCAD del proyecto ROBfoot.

Como puede verse en el capítulo 8. Ensayos y resultados la máxima salida del sensor de fuerza resistivo es también 3V, lo cual no supone un peligro para las entradas analógicas del Atmega que aceptan hasta 5V por lo que tampoco es necesario ningún acondicionamiento adicional y la conexión se realiza de manera directa entre la salida del sensor y la entrada analógica del controlador. El circuito electrónico del sensor de fuerza resistivo es alimentado a partir de la alimentación del pie robótico y puesto a tierra común con el controlador.

6.4.1.1.3 Interruptores Final de Carrera

Los interruptores final de carrera entregan sus mediciones en forma de señal digital de estado alto o estado bajo, como explicamos en la sección de Acondicionamiento de sensores del presente capítulo.

Nuestro controlador Atmega328P dispone de 28 pines en total de los que exceptuando los pines 7, 8 20, 21 y 22 encomendados para la alimentación y la puesta a tierra del microcontrolador, todos pueden ser utilizados como entradas digitales. Por lo que descartando los citados pines de alimentación y puesta a tierra y los pines destinados a trabajar como entradas analógicas podemos seleccionar la entrada digital que más nos convenga con vistas a la fabricación de nuestra placa de circuito impreso. Existen otros pines que detallaremos más tarde que serán empleados para otras funciones específicas como por ejemplo, la comunicación del pie robot, por lo que también deben ser descartados para funcionar como entrada digital del interruptor final de carrera. En la Figura 6.24 y Figura 6.25 mostramos la entrada digital que finalmente es seleccionada para recibir la medida del interruptor final de carrera en la plataforma RAIDER y MYOD

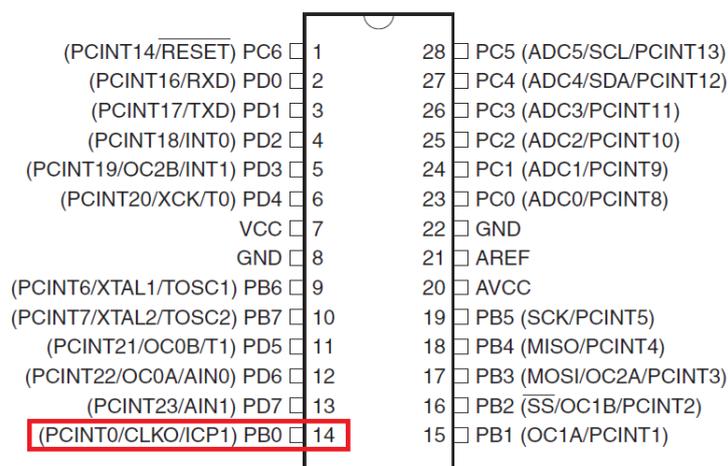


Figura 6.24: Entrada digital del Atmega328P destinada al Interruptor Final de Carrera en ROBfoot RAIDER

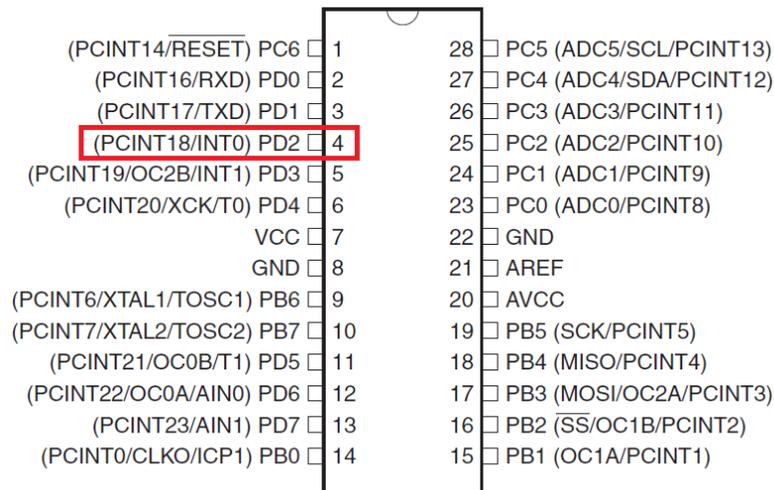


Figura 6.25: Entrada digital del Atmega328P destinada al Interruptor Final de Carrera en ROBoot MYOD

En la Figura 6.25 mostramos el esquema electrónico final de nuestro interruptor final de carrera.

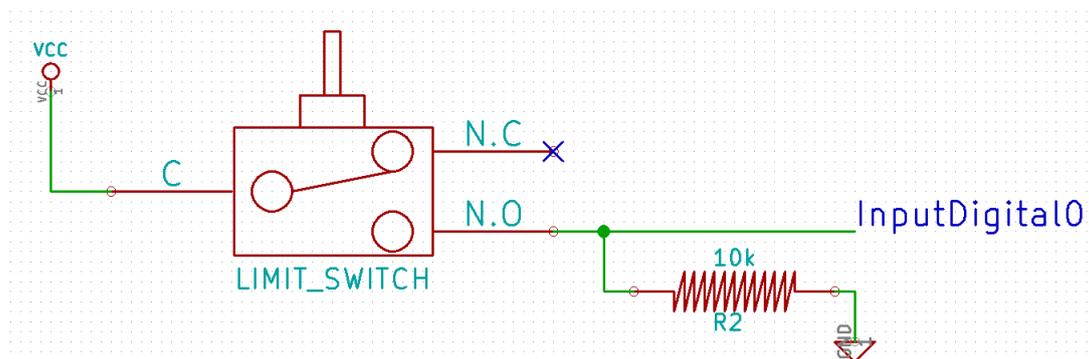


Figura 6.26: Esquema electrónico Interruptor Final de Carrera

Una vez más para realizar el esquema electrónico del interruptor final de carrera empleamos el editor de componentes de Eeschema. El nuevo componente interruptor final puede encontrarse en la librería de componentes de KiCAD del proyecto ROBoot

Como aparece detallado en la sección 6.2.3 Acondicionamiento de los sensores en el presente capítulo, una resistencia pull-down es conectada en paralelo, como es aconsejado por parte del fabricante de microcontrolador, para conocer en todo momento el estado de la entrada digital evitando una posible salida en estado flotante. El circuito electrónico del interruptor final de carrera es alimentado a partir de la alimentación del pie robótico y puesto a tierra común con el controlador.

6.4.1.2 Comunicación del pie robótico

Como se ha venido argumentado a lo largo del presente proyecto y se ha explicado en profundidad en el capítulo de Diseño de ROBfoot, el pie robótico debe tener la capacidad de comunicarse. El pie robótico debe establecer comunicación tanto con las placas controladoras CM9.04 o Arduino MEGA 2560 a través del bus Dynamixel o bus I²C respectivamente; como con un PC, por medio de un cable USB – serie TTL-232, para descargar lazos de control en el controlador del pie robótico.

Nuestro controlador, el Atmega328P, dispone de un puerto serie que comunica directamente con el USART del microcontrolador que emplearemos para la comunicación con la placa controladora de RAIDER y con un PC. En la Figura 6.26 mostramos los pines que comunican con el puerto serie.

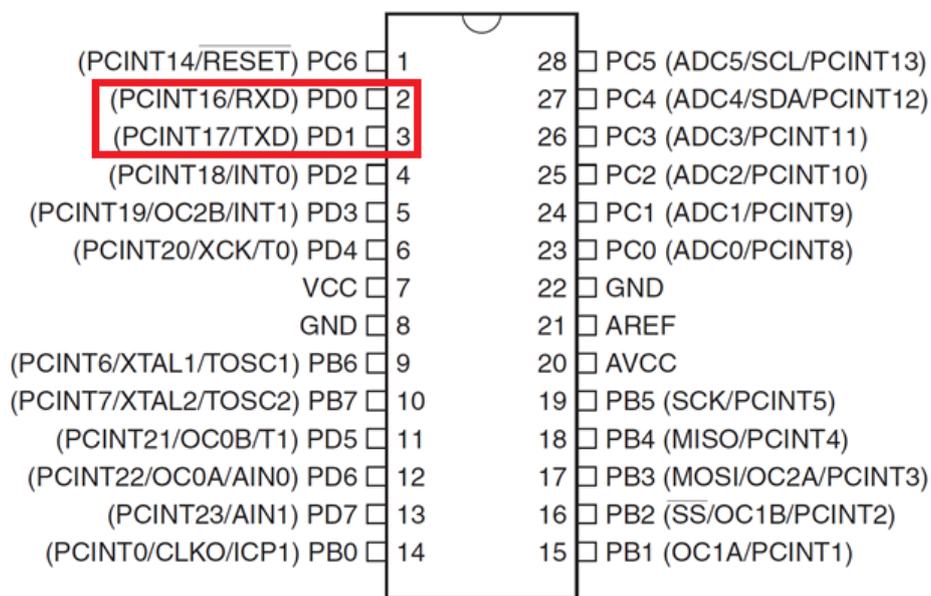


Figura 6.27: Puerto Serie Atmega328P

El pin 2 o puerto PD0, conecta con la entrada del USART RXD y se utiliza para recibir datos. Por el contrario, el pin 3 o puerto PD1, conecta con la salida del USART TXD y se usa para transmitir datos. En la plataforma RAIDER se persigue establecer dos comunicaciones serie, pero solo existe un único puerto serie en el microcontrolador. En un primer momento, tener un único puerto serie se consideró como un obstáculo, pero debido a que cuando el robot mini-humanoide se encuentre en funcionamiento, comunicándose con la placa CM9.04, no existirá conexión con un PC y de igual modo, cuando el pie robótico se encuentre conectado a un PC, el robot mini-humanoide no estará en funcionamiento, el inconveniente aludido es despreciable.

El microcontrolador Atmega328P dispone de dos pines dedicados que conectan con el módulo TWI (Two Wire Interface) que gobierna la comunicación I²C del microcontrolador. La Figura 6.27 muestra los pines que conectan con el módulo TWI.

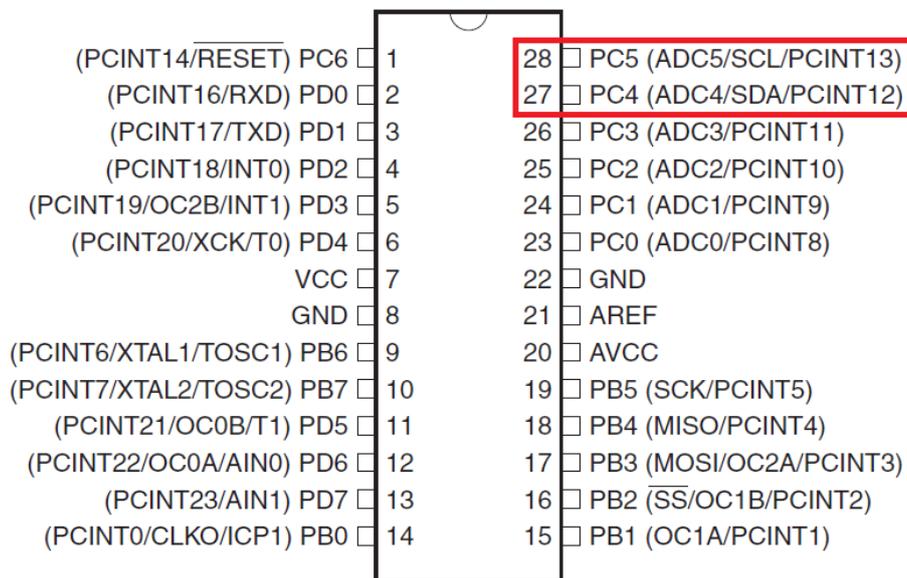


Figura 6.28: Pines destinados a la comunicación I²C

El pin 27 o PC4 está destinado para conectar con la línea SDA o línea de datos del bus I²C mientras que el pin 28 o PC5 se conecta con la línea SCL o reloj del bus I²C.

Podemos apreciar como el microcontrolador Atmega328P utiliza los mismo pines para la comunicación I²C que los que anteriormente definimos como entradas analógicas 4 y 5 para los sensores de fuerza resistivos. Este hecho supone un problema que presenta dos soluciones: una sería cambiar el microcontrolador, la otra disponer de solo dos sensores de fuerza resistivos en el pie robótico diseñado para MYOD. Optamos por la segunda opción y utilizar dos sensores de fuerza resistivos en el pie robótico diseñado para MYOD y así tener el pie robótico diseñado para RAIDER y el pie robótico diseñado para MYOD gobernado por el mismo controlador.

6.4.1.2.1 Comunicación con controlador de RAIDER

A continuación mostramos en la Figura 6.29, el esquema electrónico de conexión del controlador del pie robótico con el bus Dynamixel utilizado para comunicarse con el controlador de RAIDER. Recordamos que para conectar el pie robótico al bus Dynamixel utilizando el protocolo TTL de los servos Dynamixel, es necesario que el pie robótico pueda funcionar en modo escucha. Incluimos por ello un buffer triestado y así beneficiarnos de su estado Alta Impedancia, dotando de este modo al pie robótico la posibilidad de funcionar en modo escucha. La explicación detallada del bus Dynamixel y del funcionamiento del buffer triestado puede encontrarse en el capítulo de Diseño de ROBfoot.

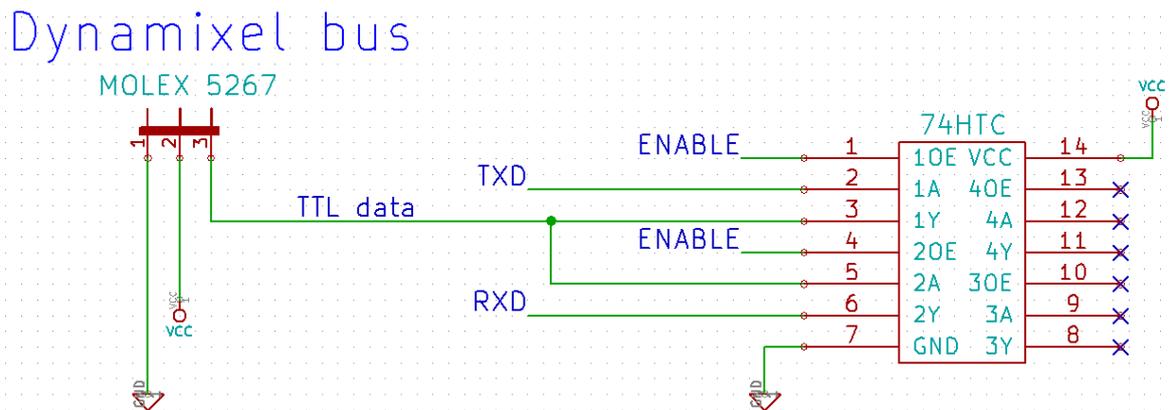


Figura 6.29: Conexión con bus Dynamixel

Incluimos una vez más, para facilitar la lectura y en definitiva la comprensión de la Figura 6.29, la Figura 4.18 que muestra el diagrama lógico del buffer triestado 74HCT.

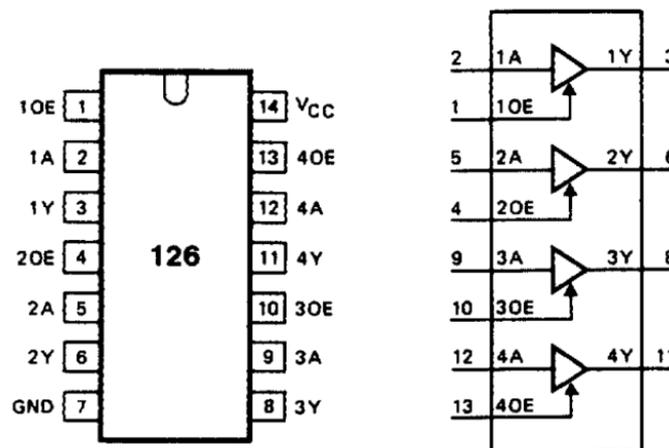


Figura 4.18: Pinout y Diagrama Lógico del 74HCT

Vemos en la Figura 6.29 como el pin 3 TXD de envío de datos del Atmega328P, se conecta a la entrada del primer buffer no-inversor, el pin 2 del 74HCT, cuya salida, el pin 3, se conecta al pin de datos, TTL data, del bus Dynamixel enviando en definitiva, datos del Atmega328P hacia el bus Dynamixel. De forma antagónica, vemos como el pin 2 RXD de obtención de datos del Atmega328P, se conecta a la salida del segundo buffer no-inversor, el pin 6 del 74HCT, cuya entrada, el pin 5, se conecta al pin de datos, TTL data, del bus Dynamixel recibiendo en definitiva, datos del bus Dynamixel al Atmega328P.

ENABLE es una salida digital de nuestro controlador que gobierna el funcionamiento del buffer triestado. Observamos que ENABLE se conecta con los enables de estado alto 10E y 2OE, pines 1 y 4 respectivamente del 74HCT, y de este modo determina si la salida de los dos buffer no-inversores entran en estado de Alta Impedancia. Recordamos una vez más, que la explicación detallada del buffer triestado 74HCT aparece en el capítulo Diseño de ROBfoot donde incluimos su tabla de verdad en la Figura 4.19.

Para gobernar el estado del ENABLE y generalizando más, para controlar funcionamiento en modo escucha del pie robótico, incluimos un Interruptor de Funcionamiento. En la Figura 6.30 mostramos el esquemático del Interruptor de Funcionamiento.

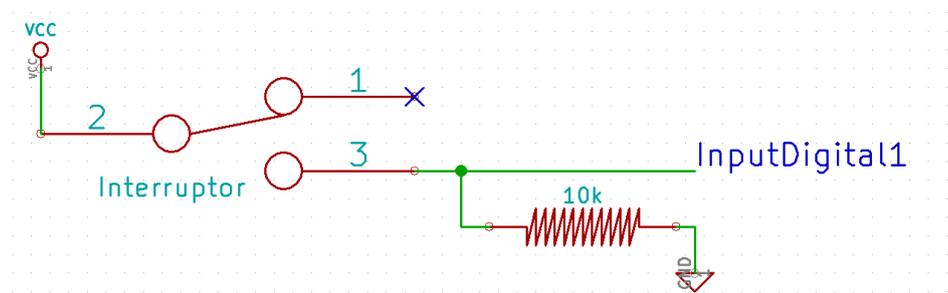


Figura 6.30: Interruptor de Funcionamiento del pie robótico

Podemos advertir que el esquemático del Interruptor de Funcionamiento es equivalente al del Interruptor Final de Carrera del pie robótico puesto que su funcionamiento es correspondiente. La salida del Interruptor de Funcionamiento entrega una señal digital de estado alto o estado bajo que conectamos con una entrada del controlador asignada como entrada digital. Adicionalmente se integra una resistencia pull-down para evitar una posible señal en estado flotante y conocer con precisión el estado del Interruptor de Funcionamiento en todo momento.

El Interruptor de Funcionamiento se incorpora para gobernar de manera física el funcionamiento del pie robótico determinando si éste comunica con el controlador de RAIDER o si debe permanecer en estado de escucha en el bus Dynamixel.

Mencionar que el conector del bus Dynamixel de la Figura 6.29 se muestra como una simple tira de pines de 3x1, pero será necesario emplear un conector MOLEX 562 como aparece debidamente etiquetado. En cuanto al buffer triestado 74HCT, el componente fue creado mediante el editor de componentes de Eeschema y puede encontrarse en la librería de componentes de KiCAD del proyecto ROBfoot. Finalmente señalar que el símbolo utilizado para el Interruptor de Funcionamiento es el interruptor inversor presente en la librería de componentes de Eeschema. Tanto el Interruptor de Funcionamiento como el buffer triestado 74HCT se alimentan, al igual que todos los dispositivos del pie robótico diseñado para RAIDER, de la alimentación proveniente del bus Dynamixel, pin 2 del MOLEX562, y puestos a tierra con el controlador.

6.4.1.2.2 Comunicación con controlador de MYOD

El esquema electrónico de conexión del controlador del pie robótico diseñado para MYOD con el bus I²C presente en la plataforma mini-humanoide MYOD se muestra en la Figura 6.31.

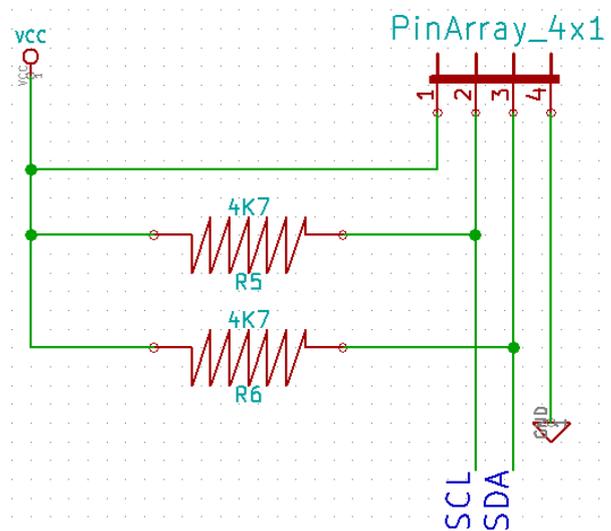


Figura 6.31: Conexión con bus I²C

El pin 2 establece conexión con la línea Reloj o SCL del bus I²C mientras que el pin 3 conecta con la línea Datos o SDA del bus I²C. Estos pines conectan con el módulo TWI del microcontrolador Atmega328p, a través de los pines 27 y 28 de éste, y de este manera incluir el pie robótico en el bus I²C presente en MYOD y establecer comunicación con la placa controladora Arduino MEGA 2560.

Las líneas SCL y SDA de un bus I²C son colector abierto. Por ello, como se puede reparar en la Figura 6.31, conectamos dos resistencias Pull-up de 4,7 KΩ en éstas. La inclusión de las resistencias Pull-up mantienen las líneas SCL y SDA en estado alto y es esencial para el correcto funcionamiento del bus I²C.

Finalmente señalar la existencia de una línea de masa, en el pin 4, la cual establece una referencia común entre el pie robótico y todos los demás elementos unidos al bus I²C. También se puede advertir como utilizamos el mismo conector, con el pin 1, para traer la línea de alimentación del pie robótico.

6.4.1.2.3 Comunicación con PC

Mostraremos ahora el diagrama de conexión entre el pie robótico y el cable USB – serie TTL-232 empleado para la comunicación con un PC. En la Figura 6.32 presentamos el esquema electrónico.

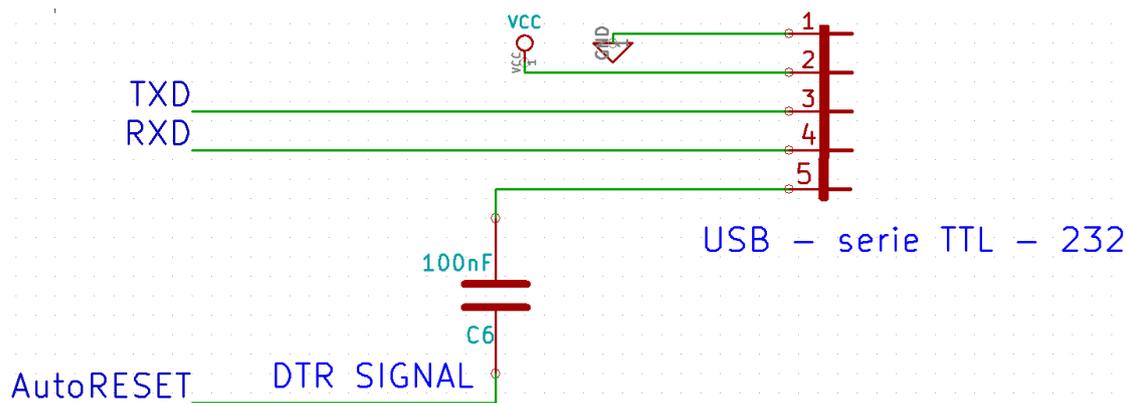


Figura 6.32: Conexión con cable USB – serie TTL-232

En esta ocasión la comunicación es más sencilla teniendo un pin para el envío de datos al PC, el pin 2 y un pin para obtención de datos, el pin 3. Estos pines conectan con los pines TXD y RXD respectivamente de nuestro controlador para así establecer comunicación serie con un PC.

Vemos como existe un pin señalado como DTR SIGNAL. La DTR (Data Terminal Ready) es una señal de control empleada en comunicación serie RS-232, enviada por un DTE (Data Terminal Equipment), como es un PC, hacia un DCE (Data Communication Equipment), en nuestro caso el pie robótico. Utilizaremos la señal DTR para activar el RESET del controlador de forma automática. El RESET del microcontrolador Atmega328P es detalladamente explicado en la sección 6.4.1.3.2 no obstante la utilidad de emplear un AutoRESET enviado por un PC es explicado a continuación.

Como ya ha sido indicado, conectaremos con un PC principalmente para descargar firmware al pie robótico por medio del entorno de programación Arduino IDE. Para programar el pie robótico utilizando Arduino IDE, nuestro microcontrolador Atmega328P debe tener un pequeño programa grabado que permite descargar código sin la necesidad de hardware adicional, un Bootloader Arduino. Es decir, siempre que descarguemos un nuevo lazo de control en el pie robótico emplearemos el Bootloader Arduino presente en el controlador.

El Bootloader solamente se encuentra activo durante unos segundos tras un Reset del microcontrolador, de ahí el provecho del AutoRESET.

El PC envía el AutoRESET a través de la señal DTR para resetear el microcontrolador activando el Bootloader y coordinadamente comenzar la descarga del nuevo firmware en el pie robótico.

El AutoRESET en definitiva, nos permite descargar código simplemente presionando el botón “Upload” en el entorno Arduino IDE concediendo una programación y puesta en marcha del pie robótico rápida y sencilla.

6.4.1.3 Miscellaneus

El pie robótico está constituido esencialmente por una serie de sensores junto a sus circuitos de acondicionamiento y un controlador encargado de procesar la información y comunicar el pie robótico con el controlador de la plataforma mini-humanoide.

Adicionalmente a los elementos hasta ahora descritos, el pie robótico integra una serie de componentes cuya inclusión es fundamental para su funcionamiento, característicos de todo circuito electrónico, o cuya incorporación está orientada a facilitar el uso del pie robótico para así obtener un pie funcional y fácil de manejar.

6.4.1.3.1 Oscilador

Todo microcontrolador requiere una señal reloj para presentar un funcionamiento adecuado. La señal reloj determina la velocidad a la que el microcontrolador trabaja, realizando sus funciones en cada ciclo de reloj; además sirve para sincronizar todos los bloques y en definitiva tener un funcionamiento correcto y controlado.

El microcontrolador Atmega328P dispone de un oscilador interno RC de 8Mhz del que podríamos beneficiarnos, no obstante éste presenta dos inconvenientes que provocan que desestimemos su uso. El primero es su frecuencia de funcionamiento, máxima 8.1Mhz, cuando nuestro microcontrolador puede trabajar hasta a 20Mhz. Si deseamos que nuestro microcontrolador trabaje al máximo de sus posibilidades, los 8Mhz se quedan muy cortos. Si bien para la mayoría de aplicaciones de nuestro pie robótico los 8Mhz son suficientes, podría existir alguna que requiera una velocidad mayor por lo que el uso del oscilador interno se convertiría en un inconveniente. El segundo y más determinante es que el oscilador interno RC presenta una tolerancia de +/-5% lo cual lo convierte en un oscilador con una precisión muy baja. Recordamos que estableceremos comunicación serie con nuestro controlador por lo que una mínima precisión de la señal reloj es requerida.

Utilizaremos un cristal de cuarzo de 16Mhz para generar la señal reloj de nuestro microcontrolador. Los cristales de cuarzo son muy utilizados como osciladores externos, existen en múltiples frecuencias y su precisión es considerablemente superior al oscilador interno RC del Atmega328P. Si bien hay que mencionar que el cristal de cuarzo no es un oscilador propiamente dicho sino un resonador. Un oscilador electrónico consume potencia y genera pulsos, en cambio, un cristal de cuarzo resonador es un dispositivo pasivo que vibra a una frecuencia determinada si es correctamente acondicionado. Afortunadamente, el Atmega328P dispone de un amplificador operacional inversor configurado como oscilador On-chip para así poder conectar un simple cristal de cuarzo resonador y utilizarlo como un oscilador que genere la señal reloj de nuestro microcontrolador. En la Figura 6.33 mostramos los pines que comunican con dicho oscilador On-chip.

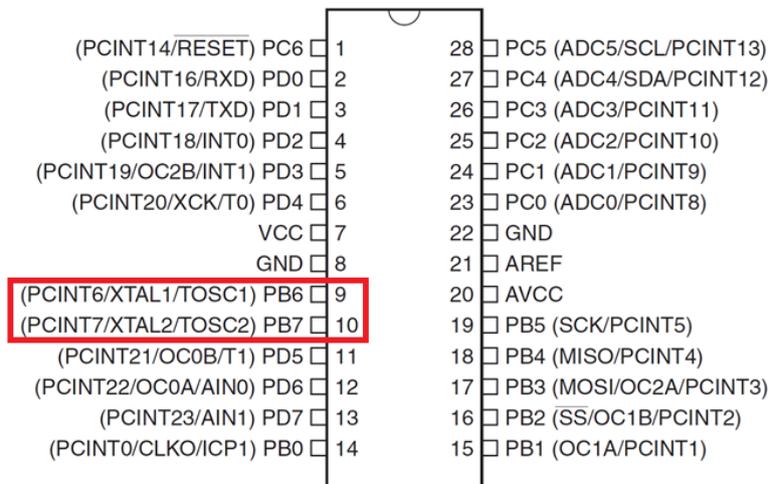


Figura 6.33: Comunicación con oscilador On-chip

De modo que para conectar el cristal de cuarzo utilizaremos los pines 9 y 10, puertos PB6 y PB7 respectivamente, los cuales son la entrada y salida del aludido amplificador inversor. El esquemático lo presentamos en la Figura 6.34.

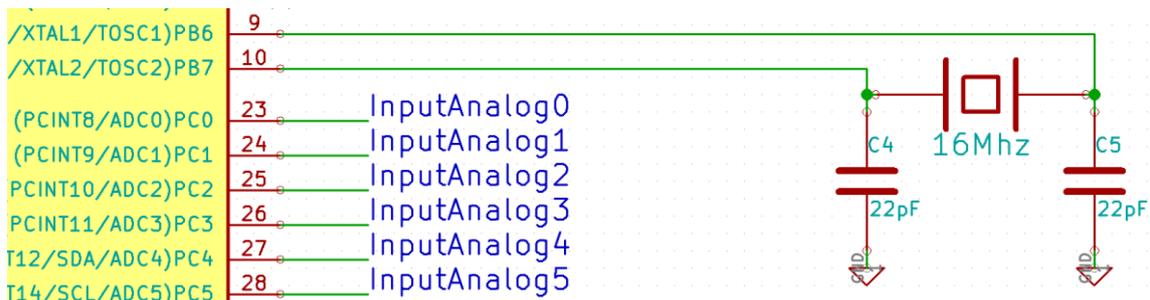


Figura 6.34: Conexión cristal de cuarzo.

Los condensadores conectados son también parte del citado acondicionamiento requerido en los cristales de cuarzo resonadores. Son conocidos como condensadores de carga y su función es el de propiciar el inicio de la oscilación del cristal. Su valor depende de factores como la frecuencia de oscilamiento, el cristal utilizado o el ruido presente en el ambiente. Consultando la hoja de características del fabricante del microcontrolador, determinamos el valor de los condensadores mostrados en la Figura 6.34.

Finalmente mencionar que debido al espacio limitado del pie robótico, se barajó el uso de un resonador cerámico en lugar de uno de cristal cuarzo. Los resonadores cerámicos son conocidos por su reducido tamaño y además no requieren condensadores de carga por lo que el espacio total utilizado en una PCB es considerablemente menor al de un cristal de cuarzo. Valoramos la ventaja de esta reducción de tamaño pero finalmente optamos por un cristal de cuarzo puesto que éstos ofrecen una mejor precisión en las señales reloj.

6.4.1.3.2 Reset

El microcontrolador Atmega328P, como todos los microcontroladores, dispone de un Reset. Reset es un tipo de interrupción especial que además de presentar una mayor prioridad que cualquier otra, actúa incluso sin señal de reloj. Reset reinicia el microcontrolador fijando todos sus registros E/S (Entrada/Salida) a su valor inicial y arranca el programa cargado desde el principio.

Un Reset es utilizado en dispositivos electrónicos generalmente en respuesta a la aparición de un error que el sistema no es capaz de solventar y que provoca que el funcionamiento no sea el deseado. Consideramos conveniente poder realizar dicha operación de reinicio por lo que habilitaremos una fácil activación del Reset de nuestro controlador.

El Atmega328P dispone de diferentes métodos para activar su Reset. Debido al tipo de Reset deseado para el pie robótico, utilizaremos el estipulado por el fabricante como Reset Externo. En la Figura 6.35 mostramos el pin utilizado para realizar un Reset Externo.

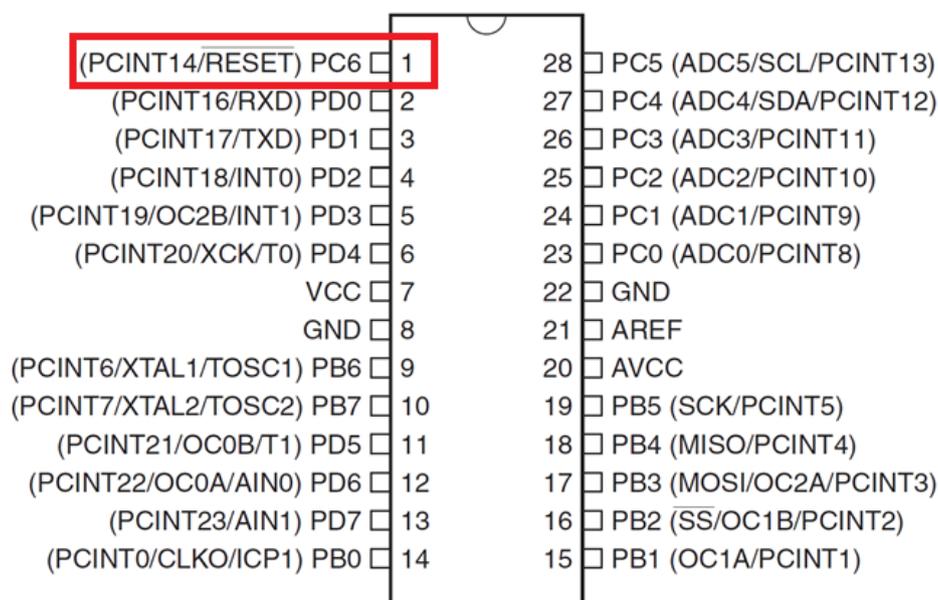


Figura 6.35: Pin Reset Externo

El microcontrolador es reseteado por Reset Externo cuando una señal de estado bajo es introducida por el pin 1, o puerto PC6, durante un tiempo mínimo de 2.5 μ s.

Integramos un pulsador para gobernar el estado de la entrada aludida y en definitiva resetear el microcontrolador cuando sea deseado o necesario. En la Figura 6.36 mostramos el esquema electrónico del PULSADOR RESET.

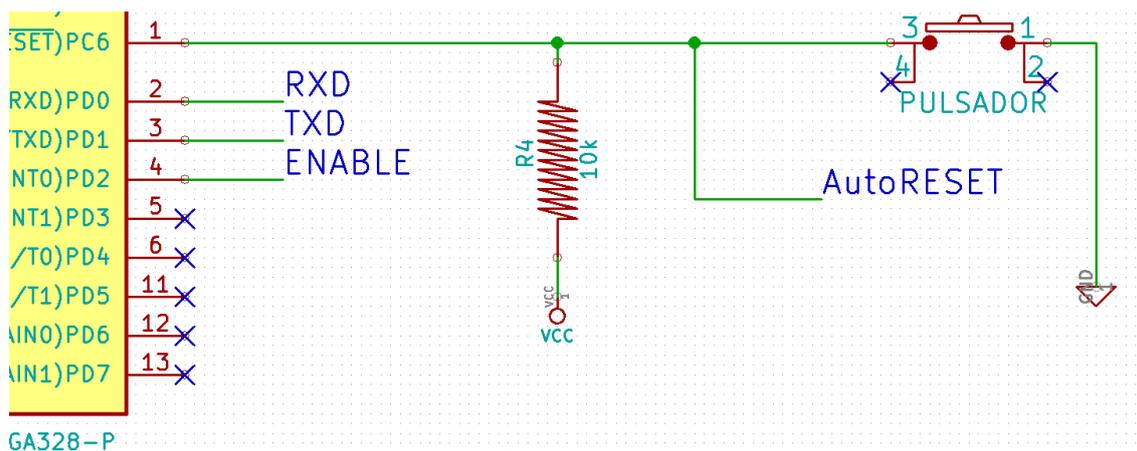


Figura 6.36: Pulsador Reset

Vemos como en condiciones normales el pin 1 recibe un estado alto como consecuencia de la resistencia Pull-up integrada. Será en el momento que el PULSADOR RESET sea accionado cuando una señal de estado bajo estará presente en el pin 1 y el microcontrolador se reseteará reiniciando en definitiva el pie robótico.

En la Figura 6.36 podemos ver como conectado al pin 1 también aparece la señal AutoRESET. Recordamos que ésta proviene de la señal DTR de la comunicación serie con un PC y su utilidad es explicada en la sección 6.4.1.2.2.

El funcionamiento del AutoRESET, a la hora de activar el Reset del microcontrolador, es análogo al del PULSADOR RESET. Se trata de un Reset Externo pero esta vez en lugar de estar gobernado por una persona a través del PULSADOR RESET, es un PC el que efectúa la operación. El PC envía una señal de estado bajo por la línea de la señal DTR durante un tiempo suficiente como para resetear el microcontrolador.

6.4.1.3.3 Filtrado de ruido

Los sensores infrarrojos y sensores de fuerza resistivos utilizados en el pie robótico entregan sus mediciones al controlador en forma de voltaje analógico, que empleando un convertidor analógico-digital, traduce las mediciones para así poder procesarlas.

Los circuitos digitales, como los convertidores analógicos-digitales de los microcontroladores, son diseñados para trabajar en corriente continua o DC. Fluctuaciones en la alimentación de dichos circuitos pueden generar problemas, llegando hasta a interrumpir su correcto funcionamiento.

Para el uso adecuado del convertidor analógico-digital del microcontrolador Atmega328P, el fabricante Atmel recomienda utilizar un filtro paso bajo en la alimentación mediante un circuito LC. En conversiones que demandan alta precisión, como aplicaciones de sonido, es recomendable utilizar un circuito LC pero para los requerimientos del pie robótico la inclusión de un condensador es suficiente. En la Figura 6.37 mostramos el condensador utilizado.

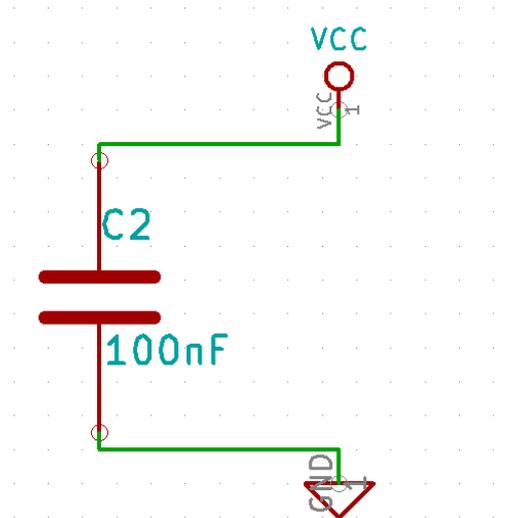


Figura 6.37 Filtrado de sonido

El valor del condensador es el recomendado por el fabricante y es el utilizado en la mayoría de placas Arduino, que al igual del pie robótico, no integran el circuito LC para el filtrado de ruido

Además el resto bloques presentes en el pie robótico generan interferencias electromagnéticas o EMI que afectan a las mediciones analógicas por lo que mantendremos las líneas con las mediciones analógicas lo más cortas posible y separadas de líneas digitales de alta velocidad.

6.4.2 Desarrollo placa de circuito impreso

Tenemos finalizado el esquema electrónico del pie robótico donde todos los componentes se encuentran enlazados constituyendo un único elemento. Nuestra siguiente misión es el diseño y la fabricación de una placa de circuito impreso, o PCB, que posibilite conectar todos los dispositivos físicamente de una manera limpia y ordenada. El Anexo 3 y el Anexo 4 contienen la lista de componentes necesarios para la fabricación de la PCB diseñada para RAIDER y MYOD respectivamente.

Cada componente electrónico tiene una huella particular que representa sus dimensiones exactas. El primer paso para la fabricación de la PCB es asociar cada componente con su huella con la finalidad de, una vez fabricada la PCB, soldar los componentes en la PCB con conformidad. Manejando la librería de huellas de la herramienta Cypcb de KiCAD, asociamos la mayoría de componentes con su huella y empleando el editor de huellas, creamos las huellas que no existen en la librería. En la Figura 6.38 mostramos la creación de la huella del potenciómetro y del cristal de cuarzo inexistentes en la librería de huellas de KiCAD. Ambas huellas pueden encontrarse en la librería de huellas del proyecto ROBfoot.

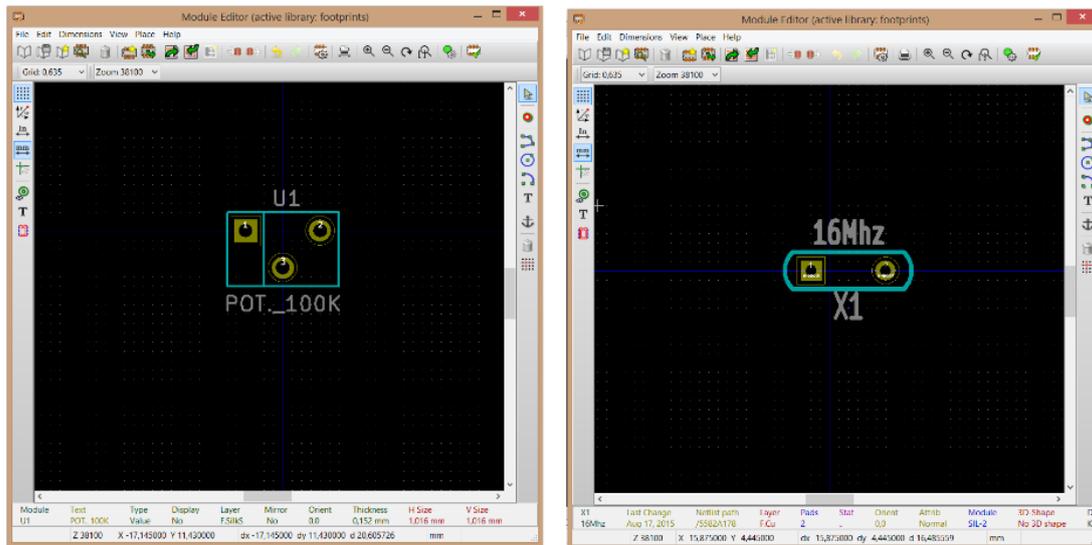


Figura 6.38: Creación de huella potenciómetro y cristal en editor de huellas de KiCAD

El diseño de la PCB se realiza mediante la herramienta Pcbnew de KiCAD y es uno de los puntos críticos del presente proyecto.

Se realizan tres acciones principalmente. Una es delimitar el tamaño y el contorno de la PCB teniendo en cuenta que ésta debe ser instalada en la estructura del pie robótico, ya sea de RAIDER o MYOD, ubicando también los orificios para los tornillos. Se sitúan las huellas de los componentes, lugar donde el componente físico será soldado a la PCB. Finalmente se rutean las conexiones de los componentes con pistas de cobre donde se debe prestar atención a múltiples factores como la posible existencia de interferencias electromagnéticas o el grosor necesario para transmitir señales o alimentar elementos. En la Figura 6.39 se puede ver una imagen capturada durante el diseño de la PCB del pie robótico diseñado para MYOD.

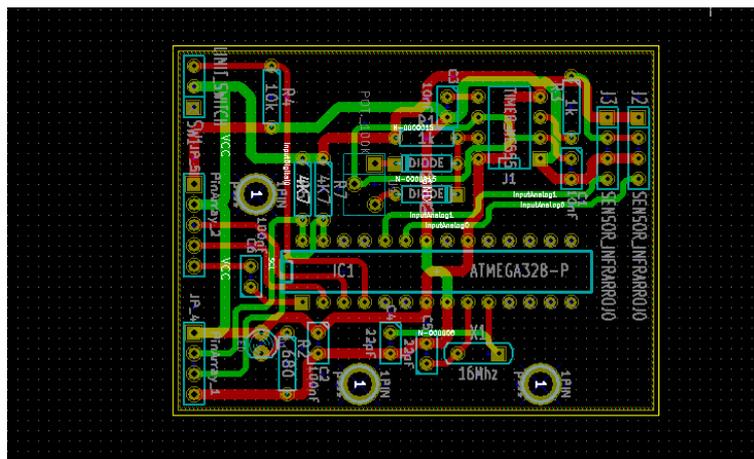


Figura 6.39: Diseño de PCB

Una vez finalizado el diseño de la PCB, generamos los archivos Gerber de fabricación. Éstos son enviados a la Oficina Técnica de la Universidad Carlos III quienes se encargan de fabricar la PCB mediante una fresadora CNC.

El fotolito de la PCB diseñada para RADIER puede verse en el Anexo 5 mientras que el fotolito de la PCB diseñada para MYOD puede verse en el Anexo 6.

Durante el desarrollo del presente proyecto, se han fabricado varias PCB obedeciendo a diferentes versiones. En la Figura 6.40 mostramos la versión beta de la PCB para RAIDER mientras que en la Figura 6.41 mostramos la PCB versión 1.0 que instalaremos en MYOD.

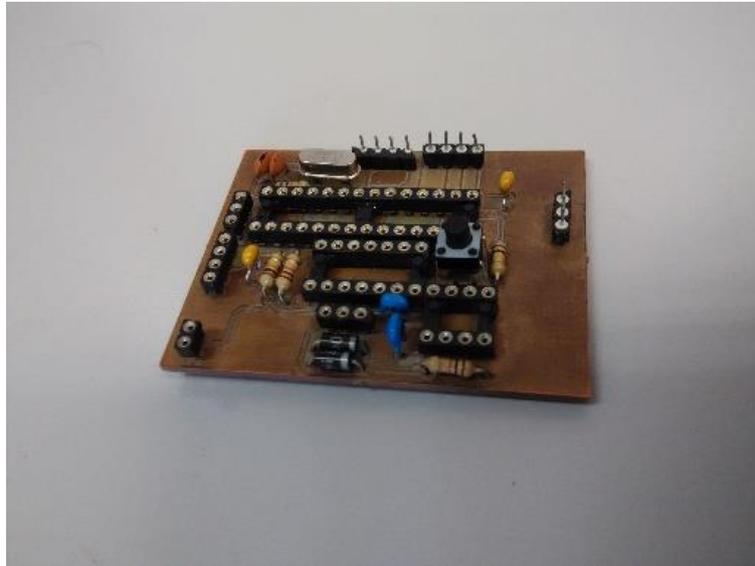


Figura 6.40: PCB RAIDER beta

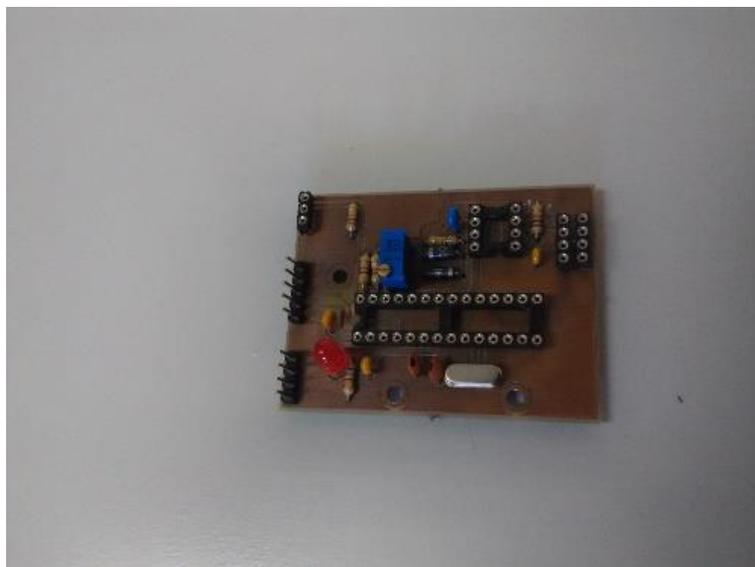


Figura 6.41: PCB MYOD v1.0

6.4.3 Montaje

En este momento disponemos de todos los elementos para formar el pie robótico diseñado para MYOD. A continuación mostramos algunas imágenes capturadas durante su montaje en la plataforma mini-humanoide MYOD.

La figura 6.42 muestra los soportes para los sensores y la Figura 6.43 muestra el pie robótico con la PCB y los soportes para los sensores instalados.



Figura 6.42: Soportes para los sensores



Figura 6.43: Pie robótico con PCB y soporte para los sensores instalados

Finalmente mostramos en la Figura 6.44 el pie robótico completo mientras que la Figura 6.45 y Figura 6.46 muestran a éste instalado en MYOD.

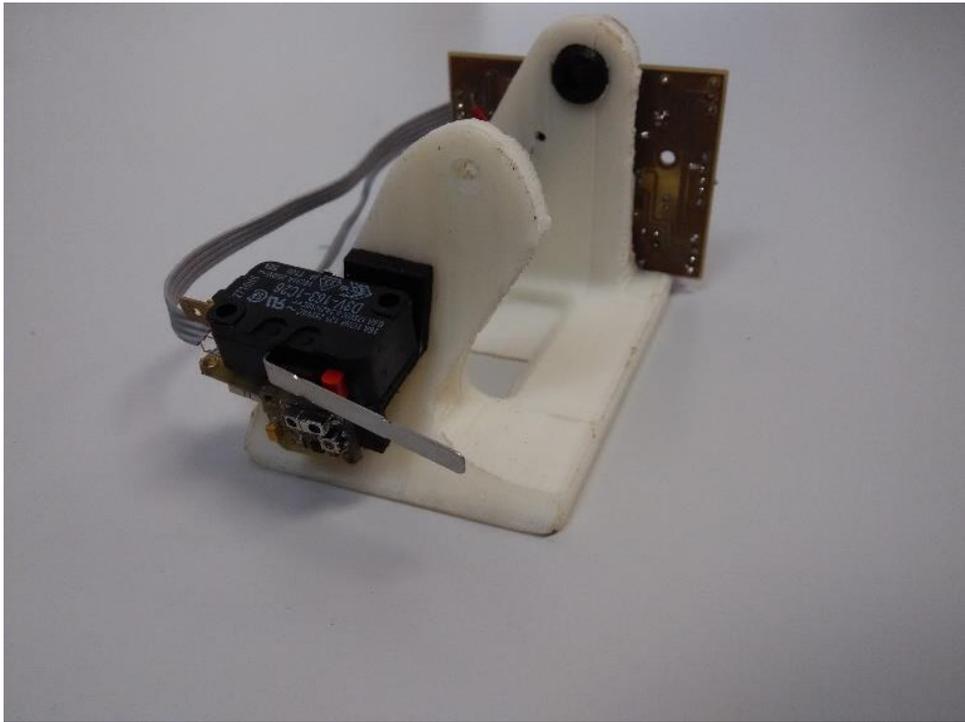


Figura 6.44: ROBfoot diseñado para MYOD

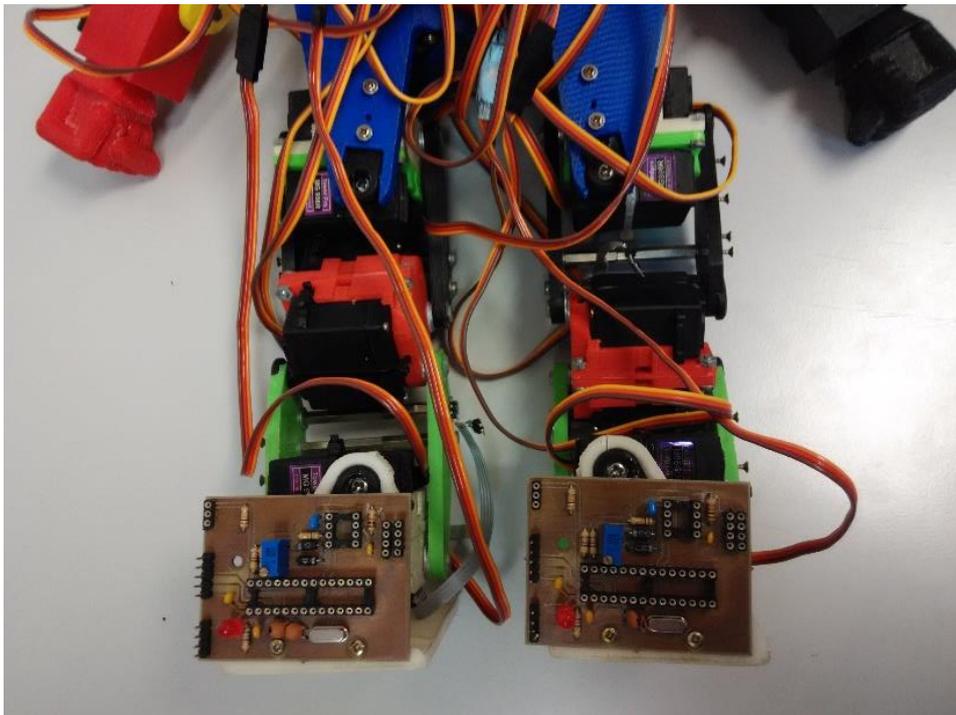


Figura 6.45: ROBfoot instalado en MYOD (parte trasera)

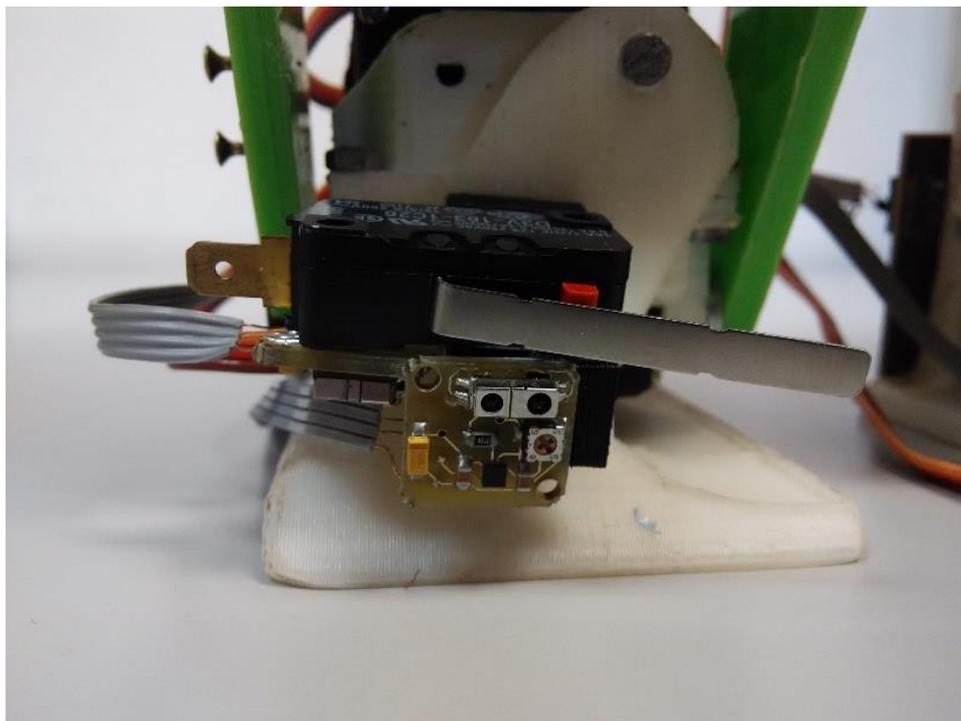


Figura 6.46: ROBfoot instalado en MYOD (parte delantera)

7. Puesta en marcha

Este capítulo presenta los primeros pasos a realizar para comenzar a utilizar el pie robótico ROBfoot.

Primero detallaremos como grabar el Bootloader Arduino en un microcontrolador ATmega328P y más tarde detallamos unas indicaciones de uso para comenzar a utilizar el pie robótico ROBfoot.

7.1 Bootloader Arduino

El controlador del pie robótico, el microcontrolador ATmega328P, se programa por medio del software de programación Arduino IDE. Como explicamos en la sección 6.4.1.2.3 Comunicación con PC, para poder descargar nuevos lazos de control sin necesidad de hardware adicional utilizando Arduino IDE, es preciso que el ATmega328P tenga grabado un Bootloader Arduino.

Esta operación sólo hay que realizarla una vez por cada microcontrolador ATmega328P, es decir, si se adquiere el microcontrolador con el Bootloader Arduino ya grabado, no es necesario realizar esta acción.

Utilizaremos dos placas Arduino UNO para grabar el Bootloader Arduino en el microcontrolador ATmega328P que integraremos en el pie robótico. Mencionar que dicha tarea puede también realizarse empleando un programador de AVR como el AVRISP mkII de Atmel [34] o un USBtinyISP v2.0 [35] que es totalmente libre, pero optamos por la opción de utilizar las placas Arduino UNO dado que ya disponemos de ellas y de este modo no es necesario comprar más equipos. A continuación mostramos el procedimiento llevado a cabo.

Una placa será denominada como *programadora* y estará conectada a un PC por medio de un USB mientras que la otra placa Arduino será denominada como *no-programadora* y será en la que en la que se conecte el microcontrolador sin Bootloader Arduino.

Lo primero es cargar en la placa *programadora* el programa llamado ArduinoISP encontrado en “Ejemplos” de Arduino IDE. Recuerde que se debe seleccionar la tarjeta (Arduino UNO) y puerto serie adecuado.

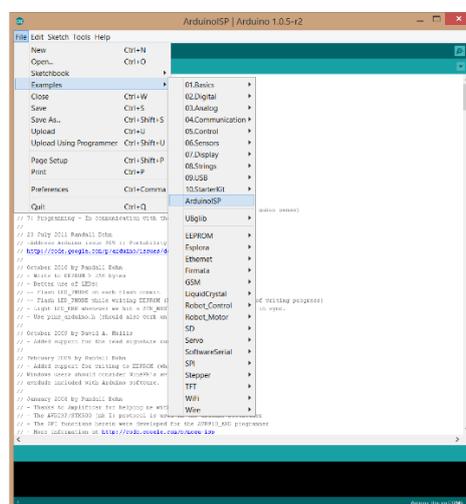


Figura 7.1: ArduinoISP

El siguiente paso es conectar ambas placas Arduino como se muestra en la Figura 7.2. Pinchamos entonces en la placa *no-controladora* el microcontrolador sobre el que deseamos grabar el Bootloader Arduino.

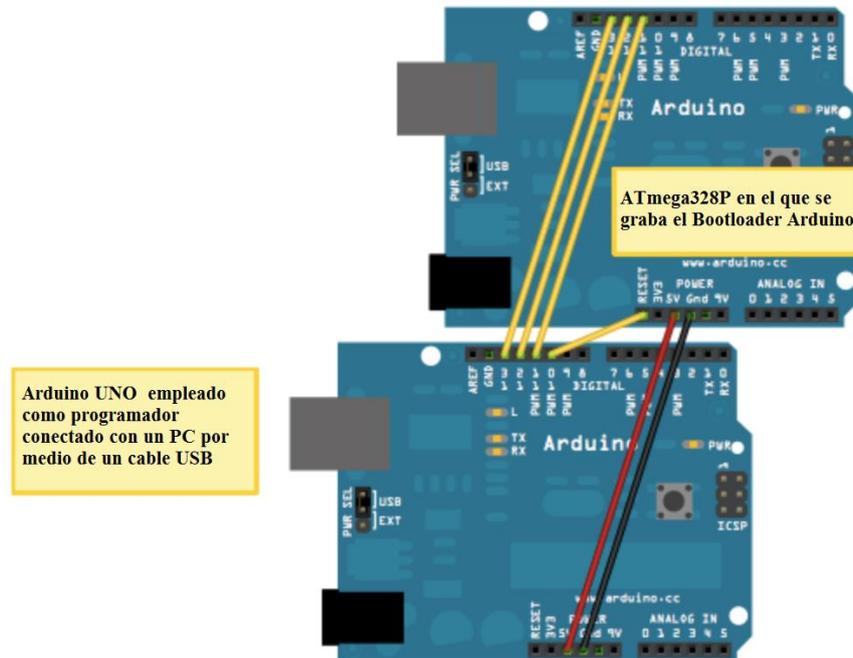


Figura 7.2: Conexión de los Arduino UNO para grabar Bootloader Arduino

Finalmente se utiliza el comando Burn Bootloader encontrado en “Herramientas” de Arduino IDE.

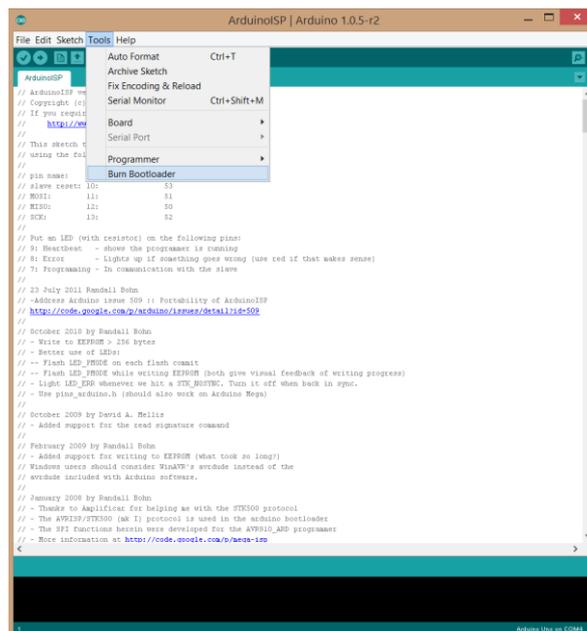


Figura 7.3: Comando Burn Bootloader en Arduino IDE

Con el Bootloader Arduino grabado, desconectar el ATmega328P de la placa *no-programadora* y lo conectamos en el pie robótico pudiendo ya utilizar Arduino IDE para su programación.

7.2 Indicaciones de uso

El cable USB – serie TTL-232 FTDI original está compuesto por 6 cables. Para la programación de ROBfoot es preciso modificar el conector y sustituirlo por uno con 5 cables como se muestra en la Figura 7.4

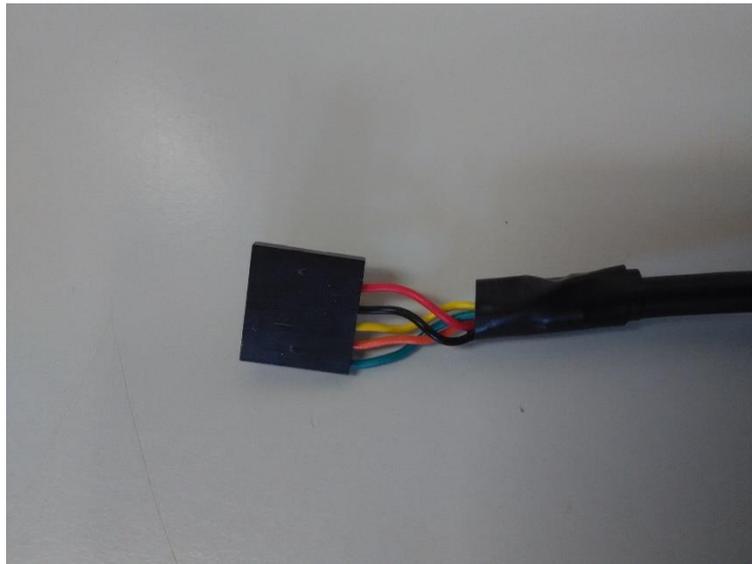


Figura 7.4: Cable USB – serie TTL-232 FTDI modificado

El pie robótico está basado en la placa Arduino UNO puesto que comparten el mismo microcontrolador. Para la programación del pie robótico siempre se debe seleccionar la placa Arduino UNO en Arduino IDE. En la Figura 7.5 mostramos dicha selección.

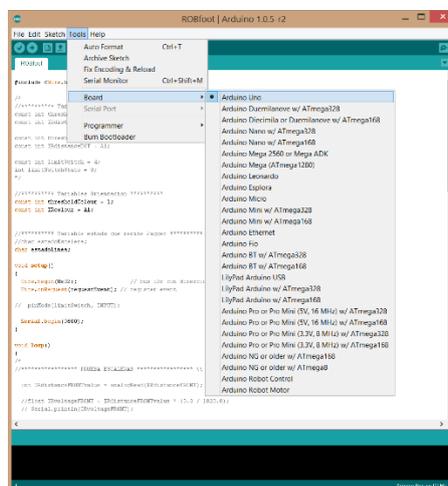


Figura 7.5: Elección de placa Arduino UNO para programar ROBfoot

Por último se debe asegurar crear el proyecto en una ubicación donde Arduino IDE tenga acceso a las librerías Arduino, es decir, la carpeta del proyecto y la carpeta de librerías deben compartir la misma ubicación. La Figura 7.6 muestra la ubicación donde se ha creado el proyecto ROBfoot.

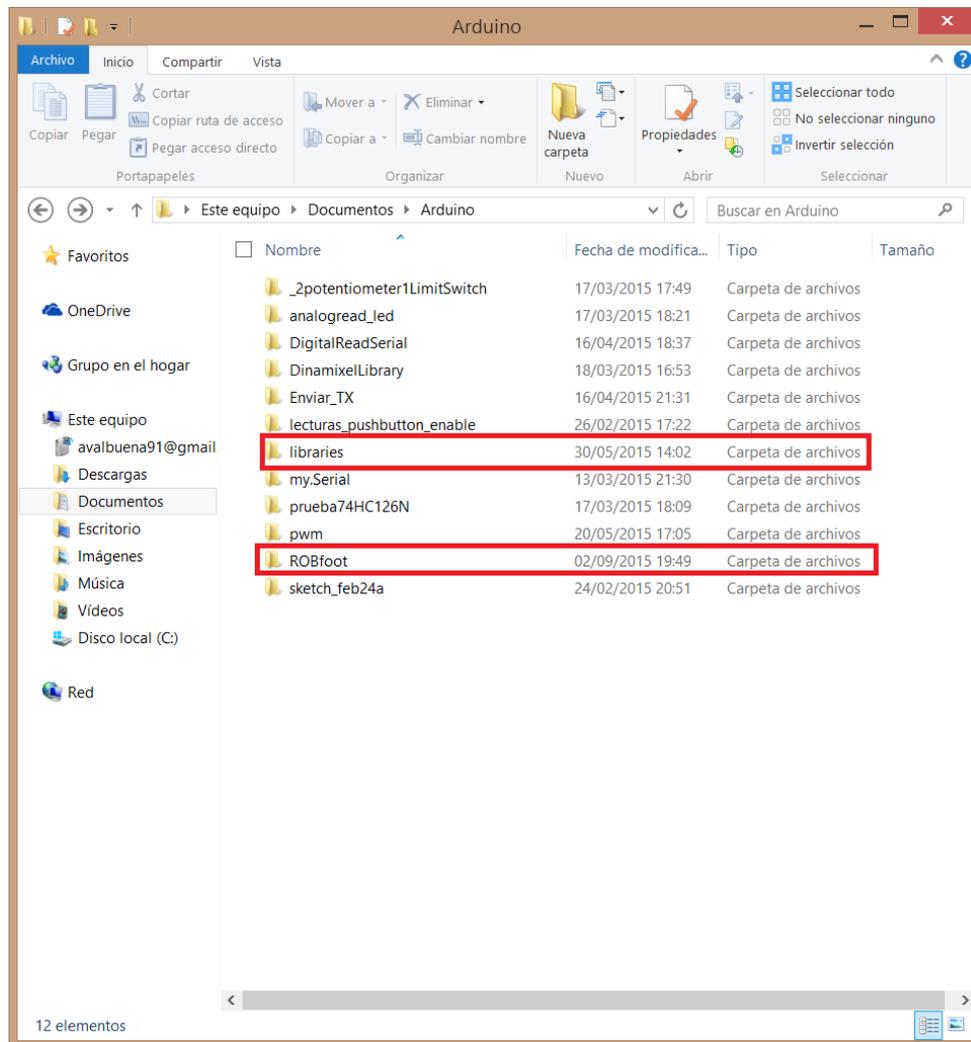


Figura 7.6: Proyecto ROBfoot en Arduino

8. Ensayos y resultados

En esta sección se muestran los distintos test realizados a lo largo del desarrollo del pie robótico.

Presentaremos en detalle los ensayos realizados de los distintos circuitos de acondicionamiento de los sensores. Estos ensayos fueron determinantes tanto para seleccionar el circuito de acondicionamiento final de nuestro sensor como para conocer, de modo experimental, el funcionamiento real nuestros sensores, frente al especificado en sus respectivas hojas de características.

8.1 Test realizados sobre los sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos HSDL9100 del pie robótico están acondicionados mediante el circuito integrado acondicionador APDS 9700. Además generamos una señal PWM mediante un temporizador NE555, en configuración monoestable, para polarizar el LED emisor y así éste emitir pulsos de luz infrarroja para realizar las mediciones.

En primer lugar mostramos los resultados de nuestra señal PWM generada y posteriormente presentaremos los resultados obtenidos del circuito acondicionador de señal utilizando dicha señal PWM. Para facilitar la lectura, colocaremos una vez más ambos circuitos junto a sus resultados.

Señal PWM

La Figura 6.12 muestra nuestro circuito final del circuito integrado NE555 configurado como multivibrador monoestable.

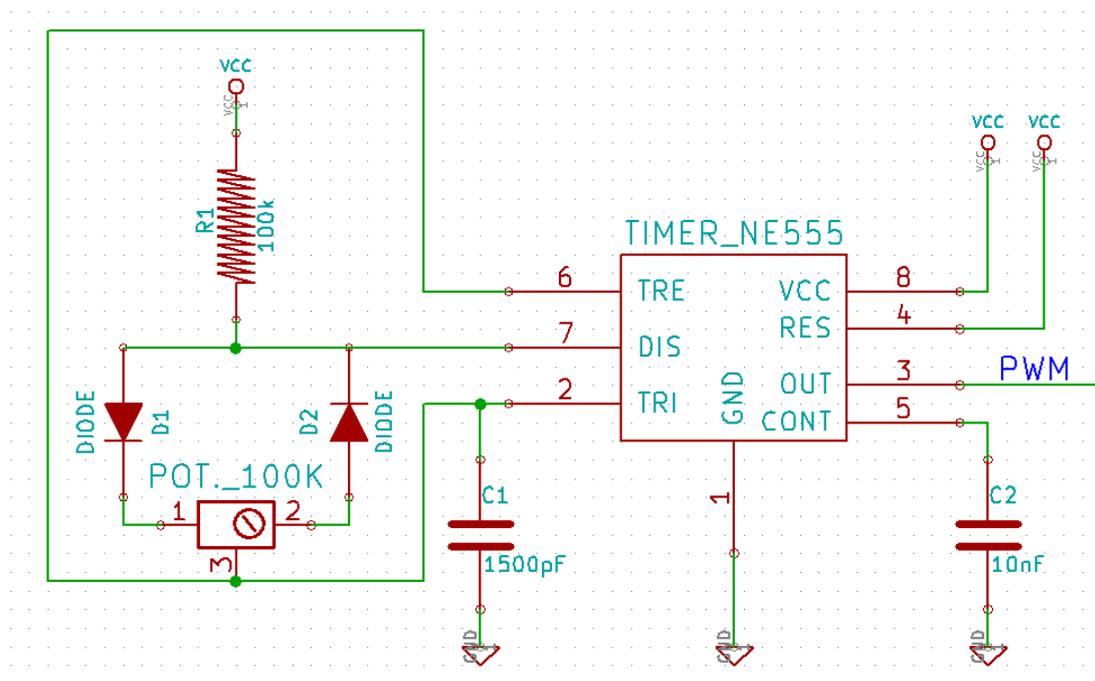


Figura 6.12: NE555 configurado como multivibrador monoestable

En la sección de Acondicionamiento de los sensores en el capítulo Desarrollo y montaje explicamos en profundidad el funcionamiento de un multivibrador monoestable y especificamos que nuestro periodo de oscilación está determinado por los valores de la resistencia R1 y el condensador C1. Para un correcto funcionamiento de nuestro sensor se recomienda que el emisor sea polarizado con una señal PWM de 100µs de periodo y 20% de ciclo de trabajo. La frecuencia de oscilación está definida por la fórmula mostrada en la Figura 8.1, por lo que un cálculo debe ser realizado para definir los valores de la resistencia R1 y el condensador C1.

$$f = \frac{1,44}{R1 \times C1}$$

Figura 8.1: Frecuencia de oscilación del multivibrador monoestable

A continuación mostramos el cálculo realizado para obtener el periodo de oscilación deseado.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{100\mu s} = 10KHz$$

$$10KHz = \frac{1,44}{R1 \times C1}$$

$$R1 \times C1 = 1,44 \times 10^{-4}$$

Buscamos una combinación de valores de resistencia y condensador existentes que nos permitieran obtener el resultado más aproximado al deseado. Finalmente escogimos los valores mostrados a continuación.

$$R1 = 100K\Omega$$

$$C1 = 1500pF$$

$$R1 \times C1 = 1,5 \times 10^{-4}$$

$$f = \frac{1,44}{100K\Omega \times 1500pF} = 9,6KHz$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{9,6KHz} = 104\mu s$$

Con los valores escogidos obtenemos un periodo de 104µs que consideramos que es lo suficientemente aproximado al valor de periodo deseado. En la Figura 8.2 mostramos, en una captura de osciloscopio, nuestra señal PWM de 104µs y 20% de ciclo de trabajo generada por nuestro multivibrador monoestable alimentado a 3,3V.

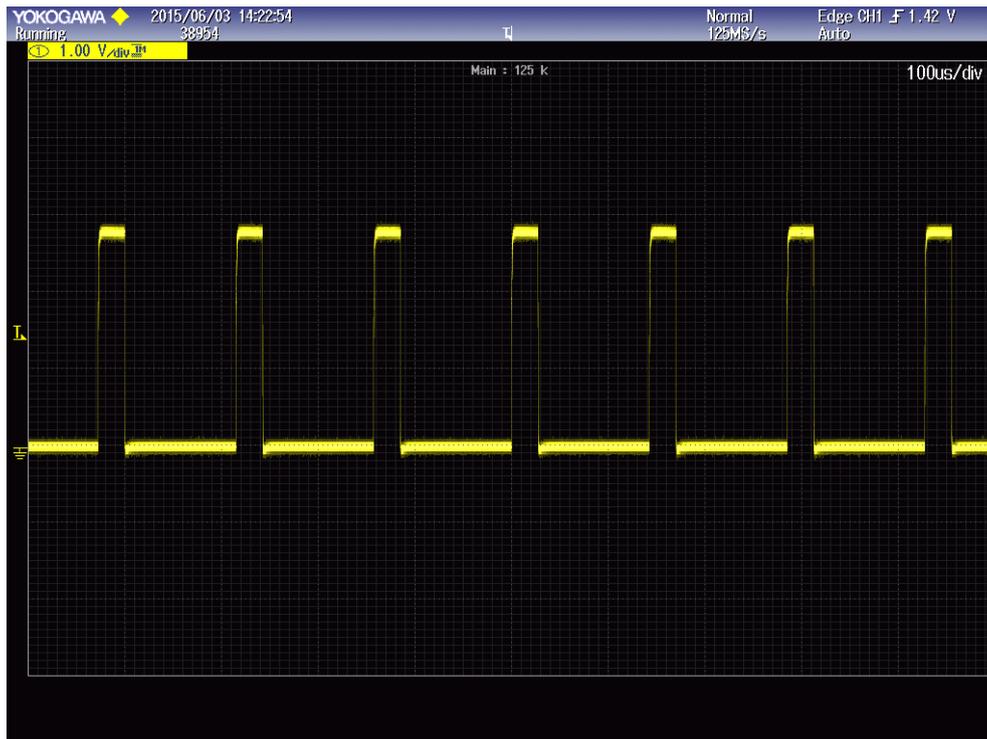


Figura 8.2: Señal PWM de 104 μ s de periodo y 20% de ciclo de trabajo

Para comprobar de forma sencilla si nuestro LED emisor estaba correctamente polarizado y emitía pulsos de luz infrarroja realizamos una foto, puesto que la luz infrarroja es invisible al ojo humano. En la Figura 8.3 mostramos la imagen capturada.

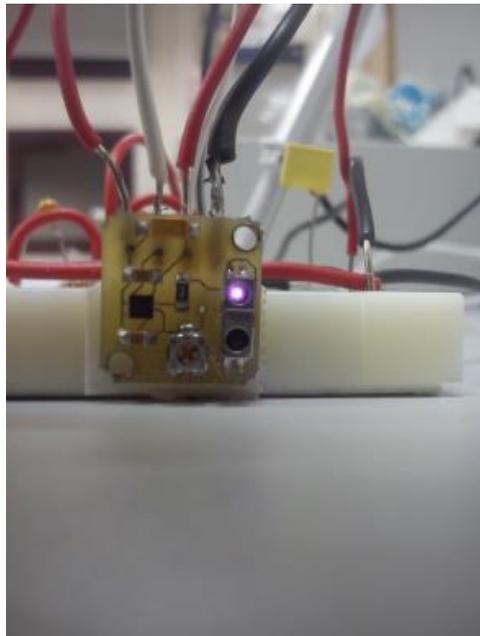


Figura 8.3: Foto de comprobación de la correcta polarización del emisor LED infrarrojo

Circuito de acondicionamiento por medio del APDS 9700.

Realizamos diferentes ensayos de medición sobre el sensor HSDL9100 acondicionado con el circuito integrado APDS 9700. En la Figura 6.9 mostramos, para facilitar la lectura, el circuito de acondicionamiento completo del sensor infrarrojo HSDL 9100 por medio del circuito integrado APDS 9700.

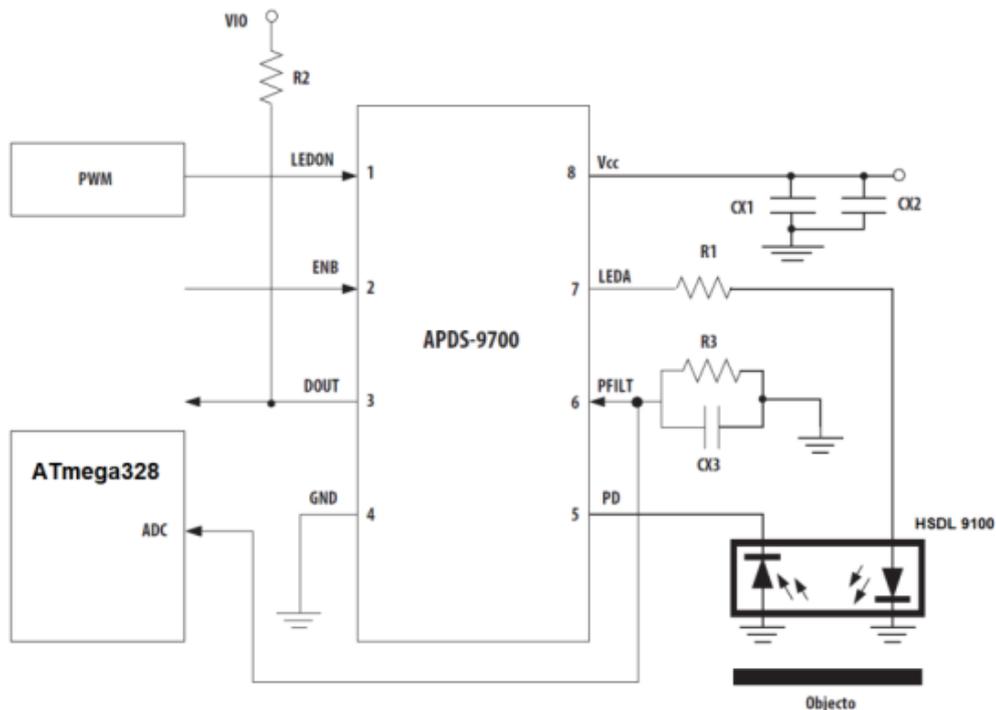


Figura 6.9: Circuito de acondicionamiento del sensor infrarrojo HSDL 9100

El ensayo se ha realizado a diferentes distancias para comprobar, de modo experimental, el funcionamiento del sensor en cada una de ellas. El ensayo nos servirá para conocer el funcionamiento real de nuestro sensor y comprobar si se corresponde con el señalado en su hoja de características.

Colocaremos una caja de cartón blanco a lo largo de un rango de distancias de 300mm a 0mm y observaremos la señal analógica obtenida en función de la proximidad del objeto. En este test, el circuito de acondicionamiento ha sido alimentado a 3,3V y 100mA mientras que el LED emisor infrarrojo, ha sido polarizado por la señal PWM generada por nuestro multivibrador monoestable. Mencionar que el ensayo ha sido realizado en el laboratorio de robótica con luz artificial de fondo y a las 16:00 horas, cuando todavía entra luz solar por la ventana.

A continuación mostramos una serie de capturas de osciloscopio con algunas de las medidas analógicas más características obtenidas durante nuestro ensayo. Posteriormente mostramos una tabla con todos los valores obtenidos durante el ensayo y su gráfica asociada donde el comportamiento del sensor se puede ver de forma más clara.

La primera lectura perceptible de nuestro sensor se consigue a 300mm, mostrada en la Figura 8.4.

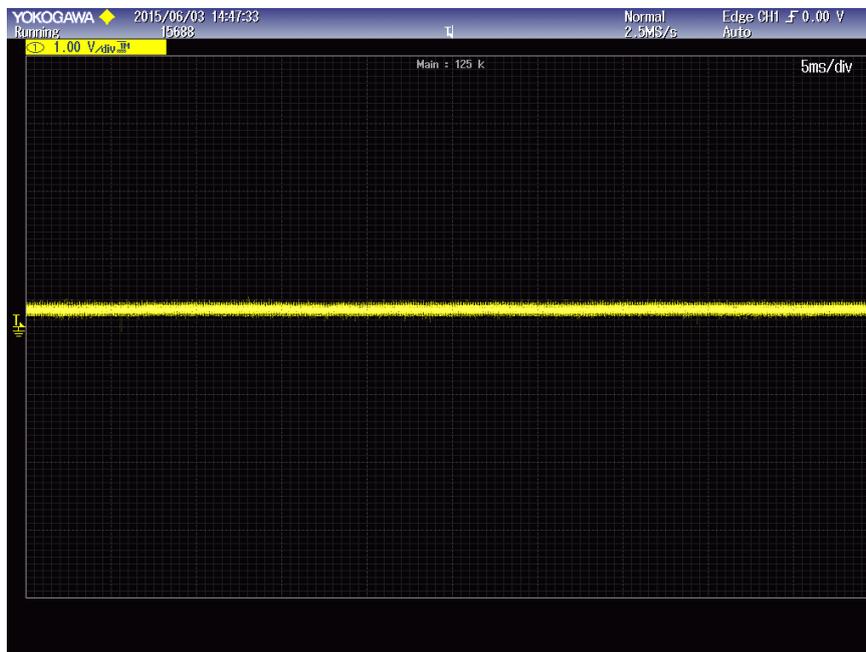


Figura 8.4: Voltaje de salida analógico a 300mm

Vemos como en la siguiente captura a 100mm, Figura 8.5, apenas observamos una variación en la salida, a pesar de acercarse el objeto 200mm. Las mediciones de nuestro sensor por encima de los 100mm apenas presentan variación alguna.

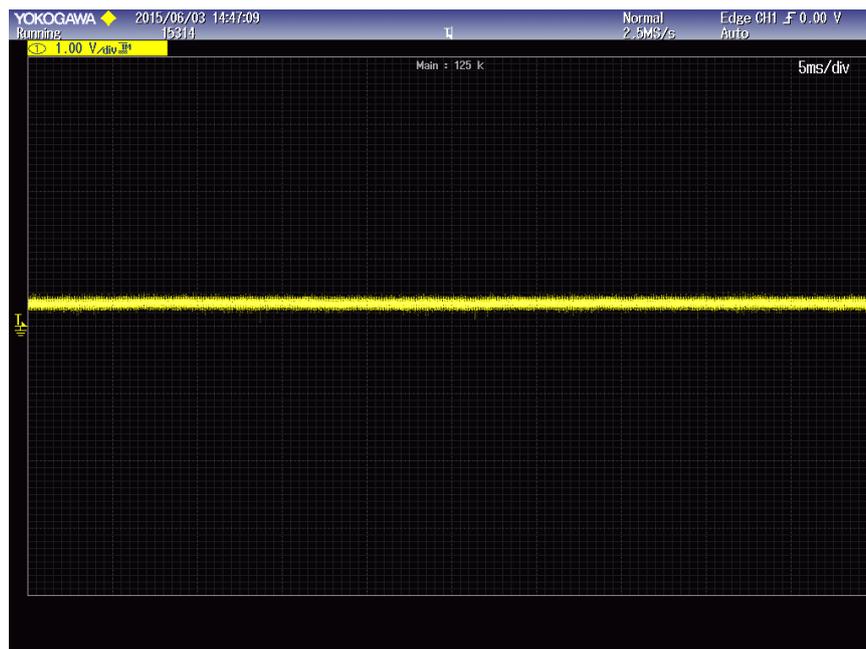


Figura 8.5: Voltaje de salida analógico a 100mm

En las siguientes mediciones, Figura 8.6 a 70mm, Figura 8.7 a 60mm y Figura 8.8 a 50mm, ya comenzamos a ver una variación en nuestra salida. Todavía tenemos un voltaje de salida bajo, estando éste justo por debajo de 1V a los 50mm.

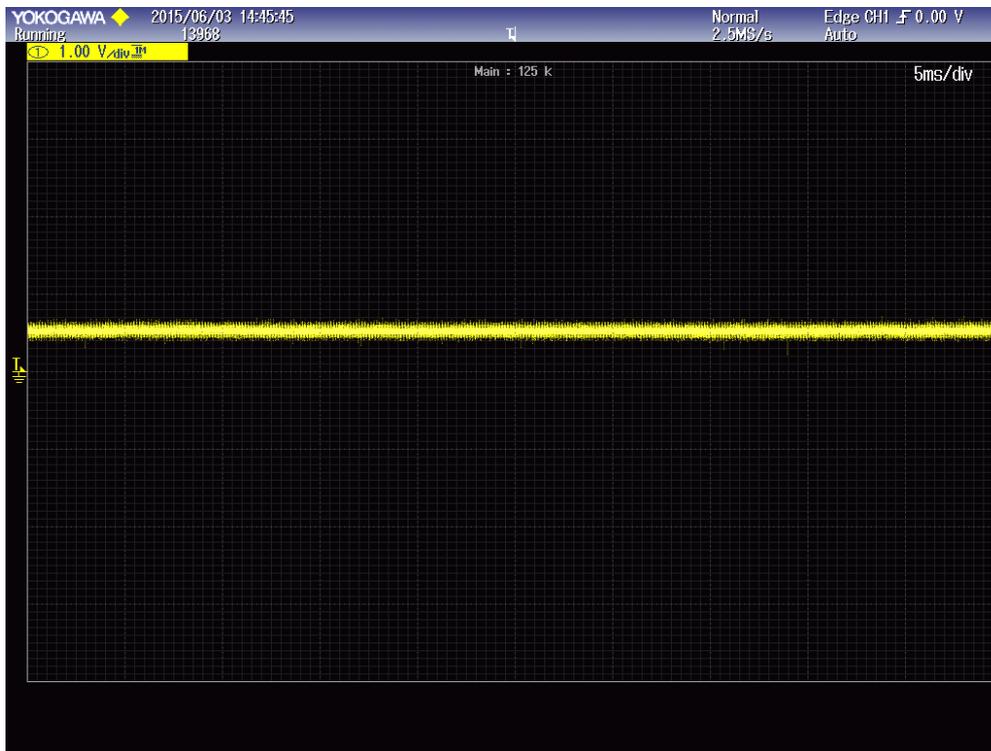


Figura 8.6: Voltaje de salida analógico a 70mm

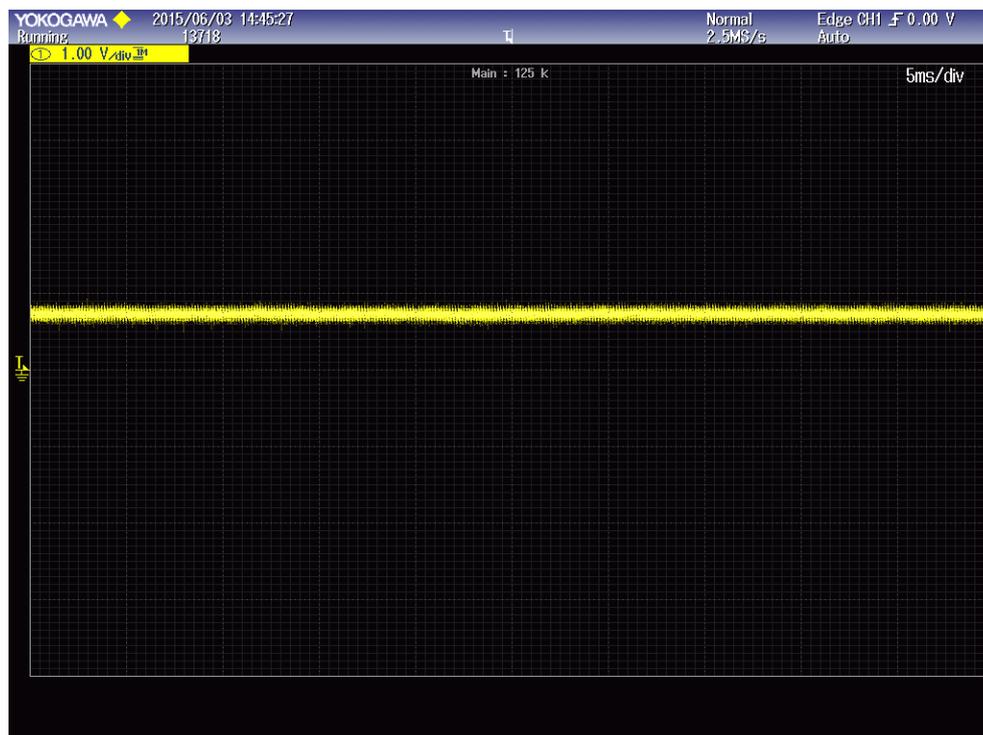


Figura 8.7: Voltaje de salida analógico a 60mm

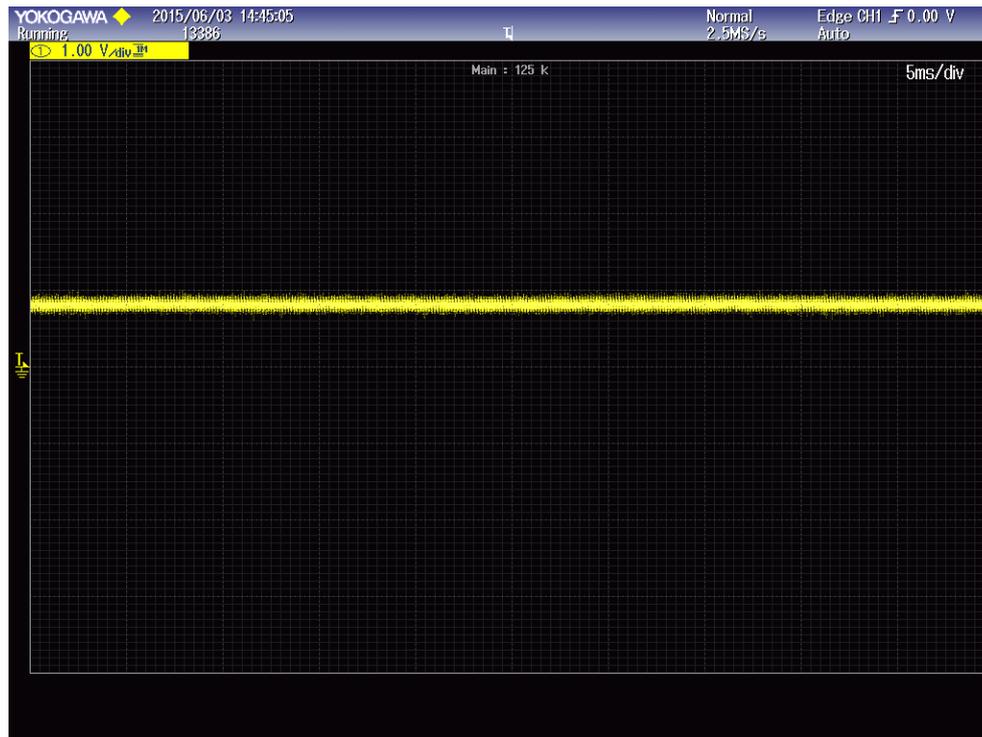


Figura 8.8: Voltaje de salida analógico a 50mm

Son las mediciones por debajo de los 50mm las que presentan una mayor sensibilidad proporcionando además un mayor voltaje de salida. La siguiente medición, Figura 8.9, tan solo es 10mm más cercana que la anterior, pero su salida es notablemente mayor.

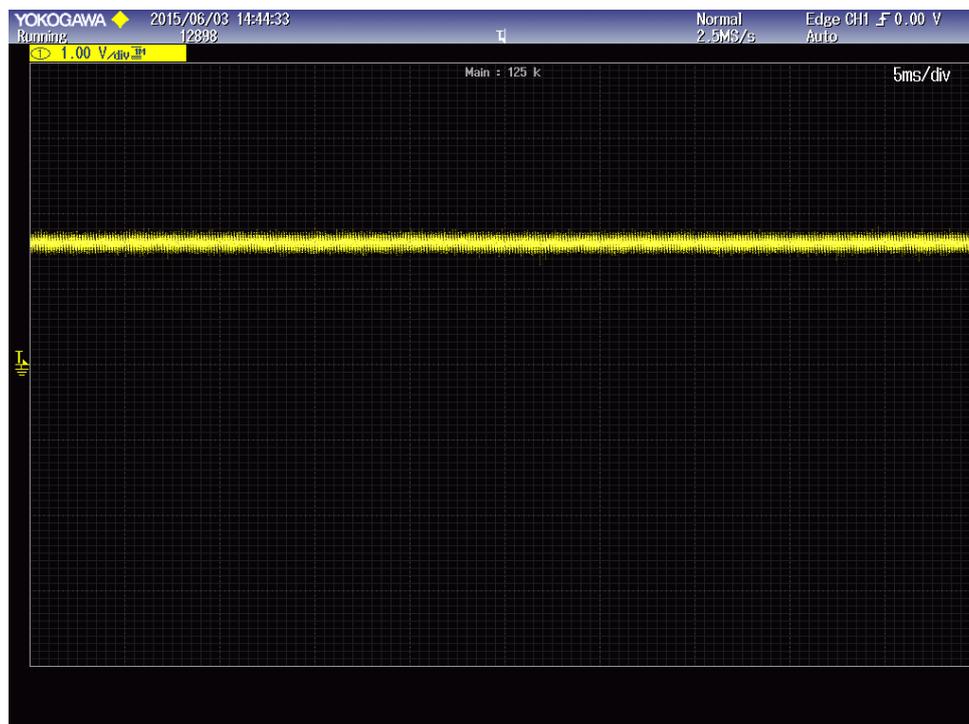


Figura 8.9: Voltaje de salida analógico a 40mm

A los 35mm de distancia, Figura 8.10, obtenemos una salida de 2V, un valor ya a tener en cuenta con vistas a analizar la información por parte de nuestro controlador.

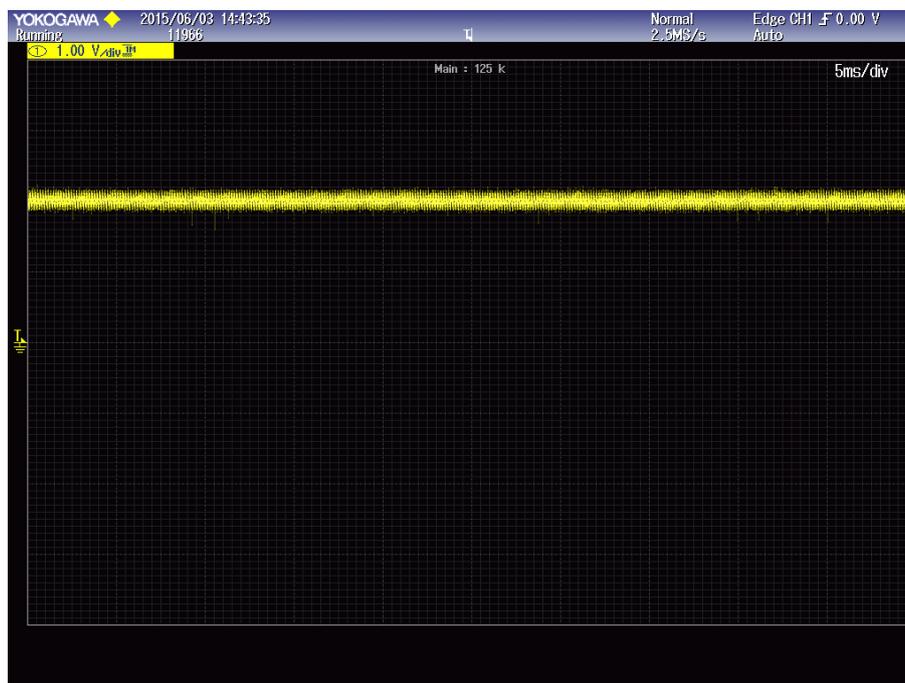


Figura 8.10: Voltaje de salida analógico a 35mm

Son las medidas entre 30mm y 5mm aquellas que otorgan un mayor voltaje de salida. En la Figura 8.11 vemos el voltaje de salida a 30mm, obteniendo un valor muy cercano a los 3V.

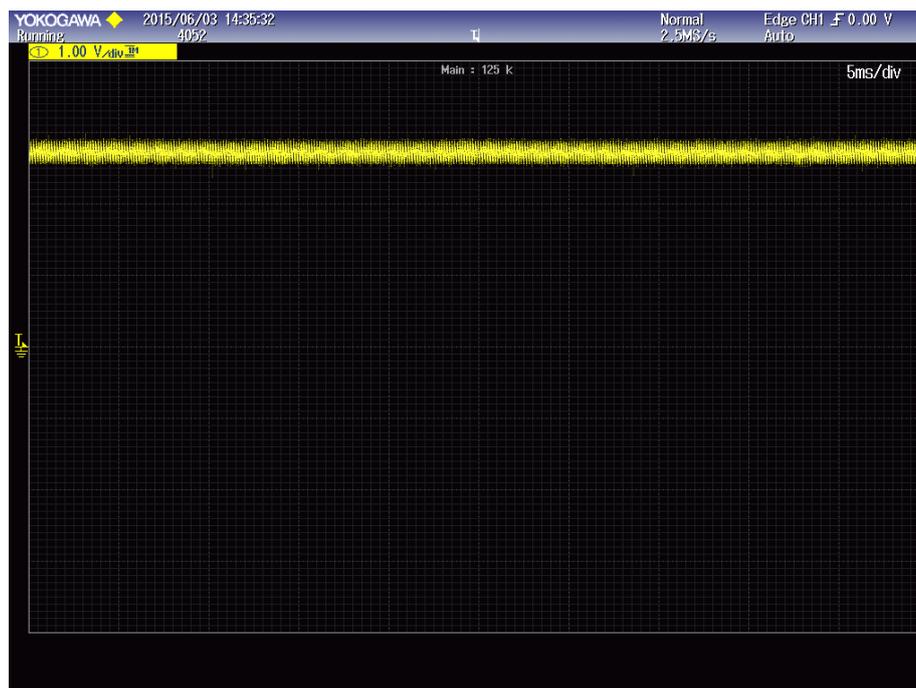


Figura 8.11: Voltaje de salida analógico a 30mm

Las mediciones por debajo de los 30mm llegan a otorgar un voltaje de 3V o incluso ligeramente superior. Como mostramos en la Figura 8.12.

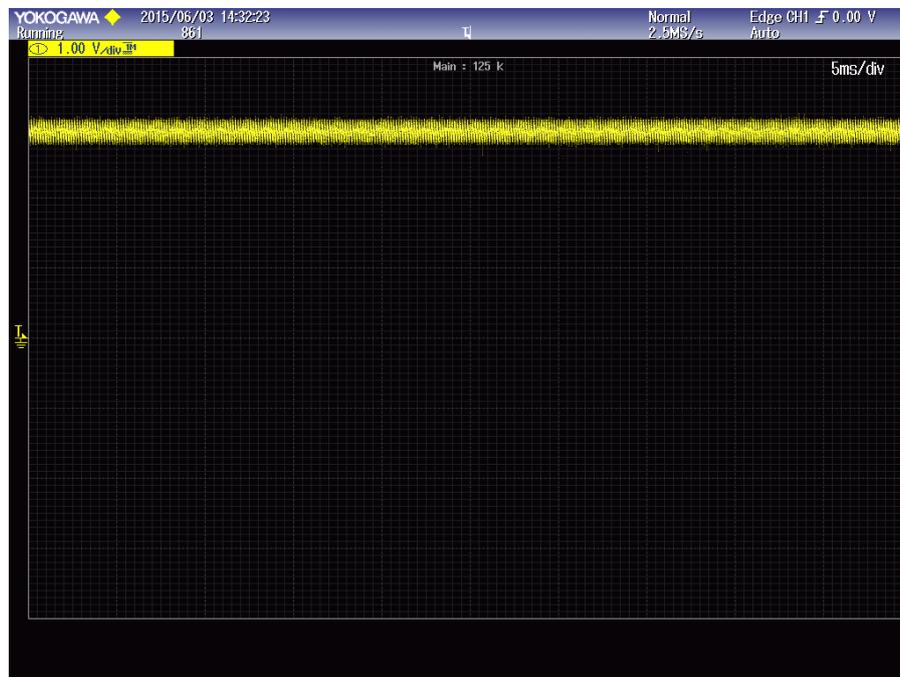


Figura 8.12: Voltaje de salida analógico de 15mm

Es por debajo de los 5mm cuando comenzamos a ver el comportamiento deficiente del sensor a muy bajas distancias. Como vemos en la Figura 8.13, a 2mm obtenemos un voltaje inferior a 3V.

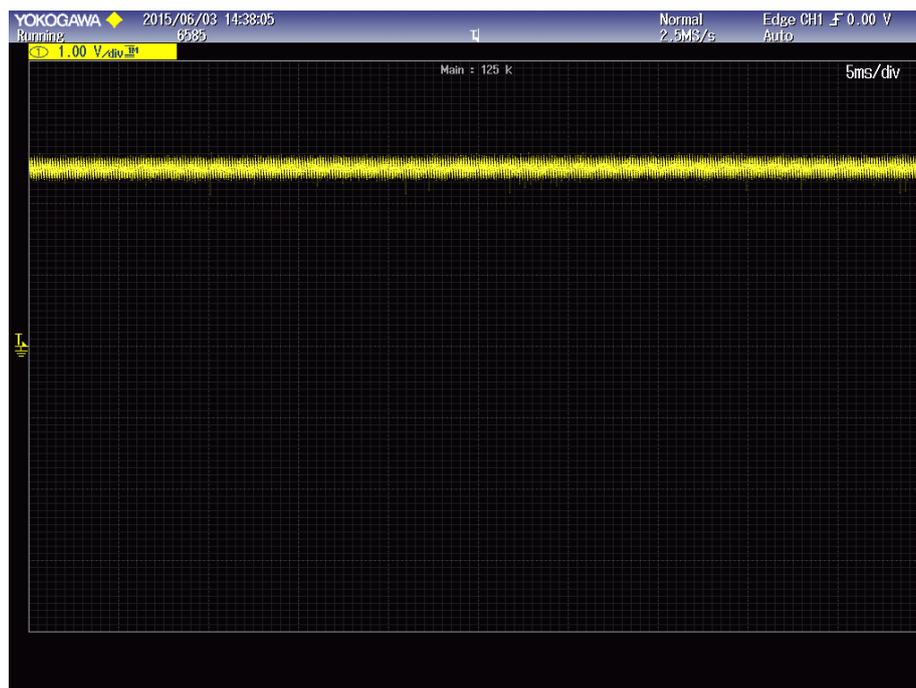


Figura 8.13: Voltaje de salida analógico a 2mm

La tabla con todos los valores obtenidos junto a su respectiva grafica aparecen en la Figura 8.14 y Figura 8.15

Distancia (mm)	Voltaje de salida (mV)
300	200
200	200
150	220
140	240
130	260
120	280
110	300
100	300
90	400
80	440
70	500
60	700
50	950
40	1600
35	2000
30	2800
25	3000
20	3100
15	3100
10	3100
5	3100
2	2500
1	100
0	0

Figura 8.14: Tabla ensayo sensor infrarrojo

Ensayo Sensor Infrarrojo

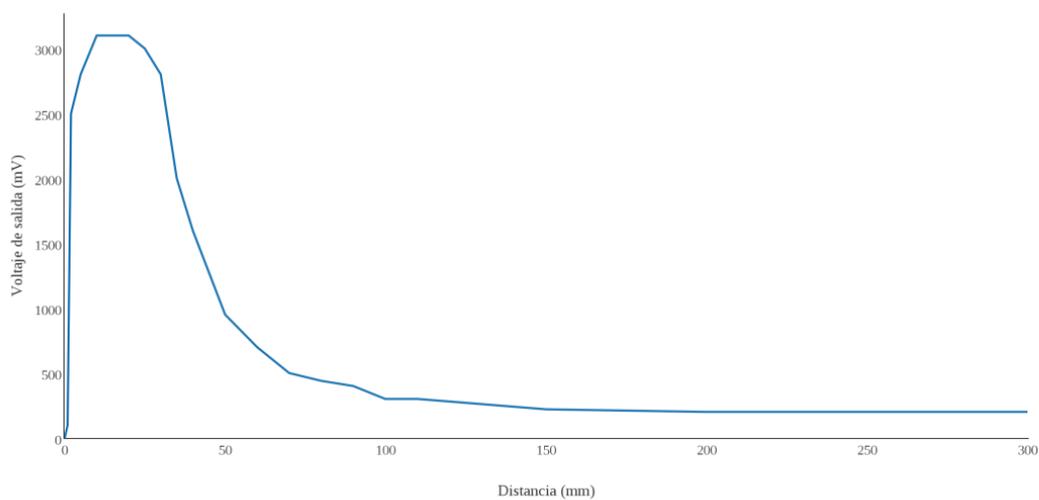


Figura 8.15: Gráfica ensayo sensor infrarrojo

Cabe destacar que el mismo ensayo fue realizado en oscuridad y se obtuvieron los mismos resultados; constatando así, el correcto funcionamiento del bloque de cancelación de luz solar presente en el APDS 9700.

En conclusión podemos decir, observando los resultados, que tenemos un correcto funcionamiento del sensor HSDL9100 acondicionado por medio del APDS 9700. Obtenemos mediciones a largas distancias, que pesar de no ser de gran importancia y presentar valores bajos, pueden servir en alguna aplicación futura para avisar de la presencia de un objeto. En cuanto a las distancias que consideramos importantes, por debajo de los 10cm y especialmente por debajo de los 5cm obtenemos unos muy buenos resultados presentando una alta sensibilidad y voltaje de salida, llegando éste superar valores de 3V. Además, como ya ha sido mencionado, el acondicionador APDS 9700 elimina todas las interferencias existentes en el ambiente provenientes de la luz solar y luz artificial.

Si bien hay que señalar, el comportamiento deficiente del sensor a muy bajas distancias, algo esperábamos ver puesto que aparece especificado en su hoja de características. Este hándicap se debe tener en cuenta para no dar cabida a errores en las mediciones y suplir dicha desventaja, por medio del interruptor final de carrera incluido en el pie robótico.

8.2 Test realizados sobre los sensores de fuerza resistivos

Los ensayos realizados sobre los sensores de fuerza resistivos FSR 400, con los distintos circuitos de acondicionamientos planteados y explicados en la sección 6.2, fueron concluyentes para la selección del circuito de acondicionamiento final.

En los ensayos se han aplicado diferentes pesos sobre el sensor de fuerza resistivo y de este modo examinar de manera experimental el funcionamiento del sensor con cada uno de los circuitos de acondicionamiento.

Utilizando seis pesas de 500 g, abarcaremos un rango peso entre 0 kg de 3 kg y observaremos la señal analógica obtenida en función del peso aplicado. Las pesas serán colocadas sobre un soporte al que adheriremos el sensor de fuerza resistivo en su parte inferior. En los diferentes tests, los circuitos de acondicionamiento han sido alimentados a 3,3 V y 100mA. La superficie sobre la que se coloque el sensor de fuerza resistivo debe ser plana y lisa.

A continuación presentamos los resultados de cada uno de los circuitos de acondicionamiento analizados. Mostraremos alguna de las capturas de osciloscopio más características y una tabla y un gráfico con todos los resultados de los ensayos.

Puente Wheatstone

El primer circuito acondicionamiento estudiado fue el acondicionamiento por medio de un Puente de Wheatstone. En la Figura 6.13 mostramos el circuito de acondicionamiento completo testado en el ensayo.

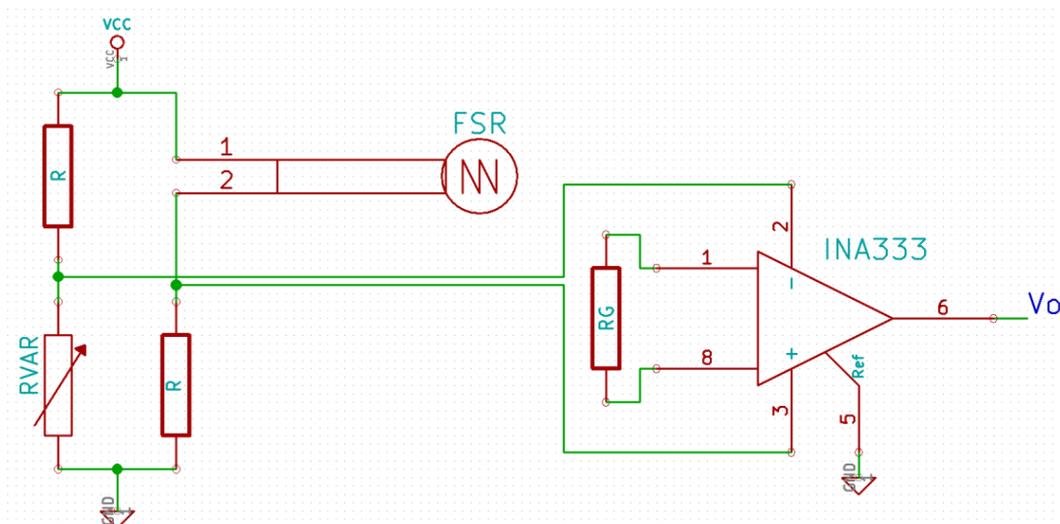


Figura 6.13: Puente de Wheatstone

Utilizando las resistencias R con valores 6,8K Ω y empleando el potenciómetro RVAR balanceamos el puente de Wheatstone, es decir, el voltaje de salida del puente es cero y varía cuando se aplica una fuerza sobre el sensor de fuerza resistivo al modificar el valor de su resistencia nominal. El amplificador de instrumentación INA333 se utiliza para amplificar el voltaje de salida del puente con una ganancia determinada por el valor de la resistencia RG. En la Figura 8.16 mostramos la ecuación que determina la ganancia del amplificador de instrumentación.

$$G = \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{Rg} \right)$$

Figura 8.16: Ecuación ganancia del amplificador de instrumentación INA333

La ganancia del INA333 tiene un rango de 1 a 1000, realizando un simple cálculo seleccionamos una resistencia comercial que nos entregue una ganancia elevada.

$$Rg = 110\Omega$$

$$G = \left(1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{110 \Omega} \right) = 910$$

A pesar de tener asignada una ganancia alta, el rango de voltaje obtenido en el ensayo no es excesivamente elevado. A continuación mostramos unas capturas de osciloscopio de las medidas analógicas más significativas obtenidas durante nuestro ensayo. Finalmente mostramos una tabla con todos los valores obtenidos durante el ensayo y su gráfica asociada donde el comportamiento del sensor de fuerza resistivo acondicionado con el puente de Wheatstone se puede ver de forma patente.

En la Figura 8.17 aparece la medida obtenida situando una única pesa de 500g, obtenemos un voltaje analógico de 500mV.



Figura 8.17: Voltaje de salida analógico con 500g

El voltaje obtenido a medida que colocamos las sucesivas pesas aumenta, pero de forma muy discreta. La siguiente captura, la Figura 8.18, mostramos la medida con 2500g la cual no alcanza ni siquiera 1 V.

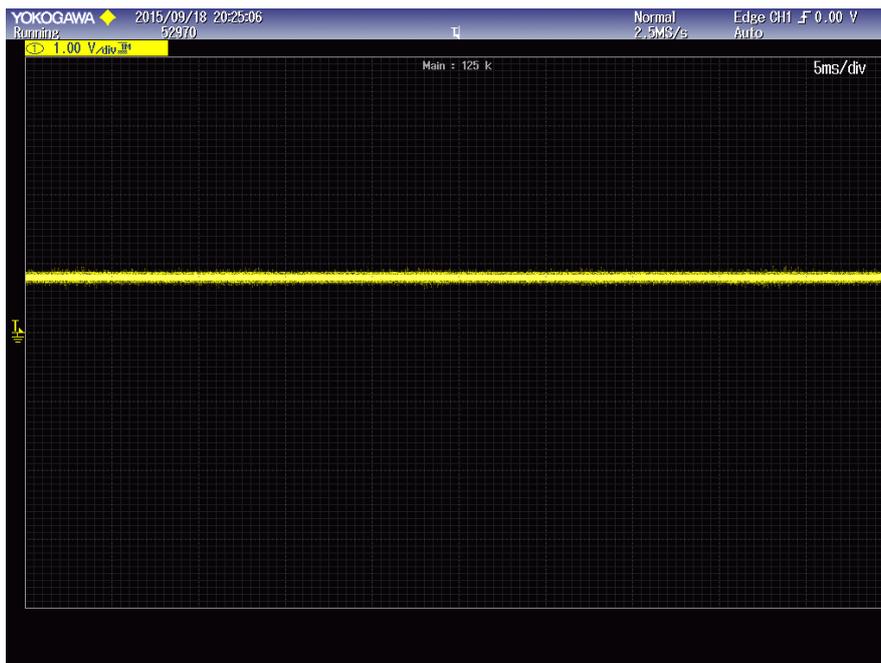


Figura 8.18: Voltaje de salida analógico con 2500g

La última figura, la Figura 8.19, muestra como alcanzamos un voltaje analógico de 1 V cuando colocamos los 3000g.

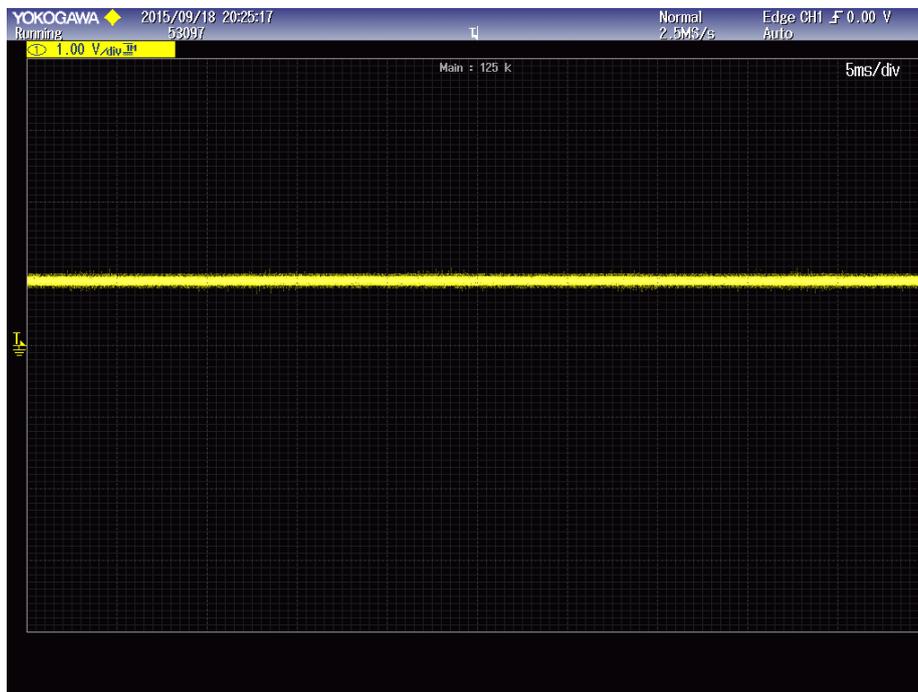


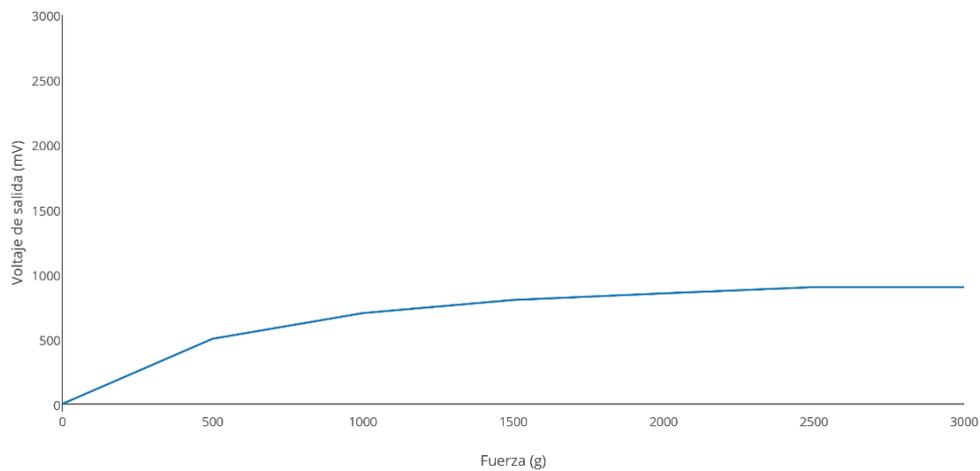
Figura 8.19: Voltaje de salida analógico con 3000g

La tabla con todos los valores obtenidos junto a su grafica equivalente aparecen en la Figura 8.20 y Figura 8.21

Peso (g)	Voltaje de salida (mV)
3000	1000
2500	900
2000	850
1500	800
1000	700
500	500
0	0

Figura 8.20: Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con Puente de Wheatstone

Ensayo Sensor de Fuerza Resistivo con Puente de Wheatstone

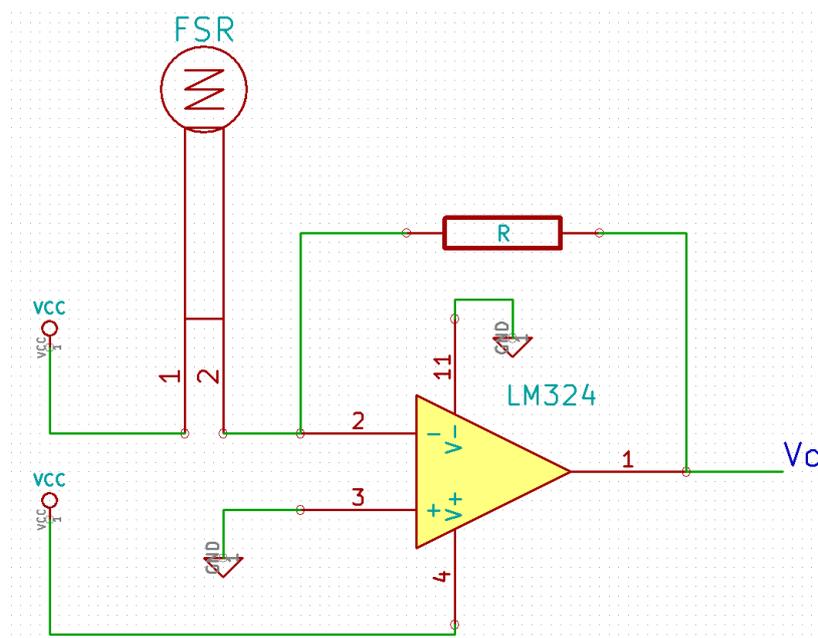
**Figura 8.21: Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con Puente de Wheatstone**

Observando los resultados del ensayo, estimamos que el rango de valores obtenido no es lo suficientemente amplio. Vemos como con un peso de 3 kg, peso máximo para un robot mini-humanoide según la normativa de CEABOT, alcanzamos tan solo 1 V de salida.

Decidimos entonces estudiar otro procedimiento de acondicionamiento del sensor de fuerza resistivo.

LM324

Realizamos entonces el mismo ensayo sobre el sensor de fuerza resistivo acondicionado mediante un acondicionamiento transimpedancia empleando un amplificador operacional LM324. En la Figura 6.14 mostramos el circuito de acondicionamiento completo testado en el ensayo.

**Figura 6.14: LM324**

El principio de funcionamiento del circuito de acondicionamiento transimpedancia es la conversión de corriente a voltaje mediante el LM324. La resistencia actúa como factor de proporcionalidad y su valor aparece recomendado en la hoja de características del FSR 400.

El ensayo exhibe unos malos resultados manifestando una baja sensibilidad y rango de voltaje. Mostramos ahora dos capturas de osciloscopio obtenidas durante el ensayo. Más tarde presentamos la tabla con todos los valores obtenidos durante el ensayo y su gráfica correspondiente.

Las medidas obtenidas en el ensayo ofrecen unos valores muy bajos sin apenas variación. En la Figura 8.22 aparece la medida obtenida con el significativo peso 2000g, obteniendo un voltaje analógico de tan solo 500mV.

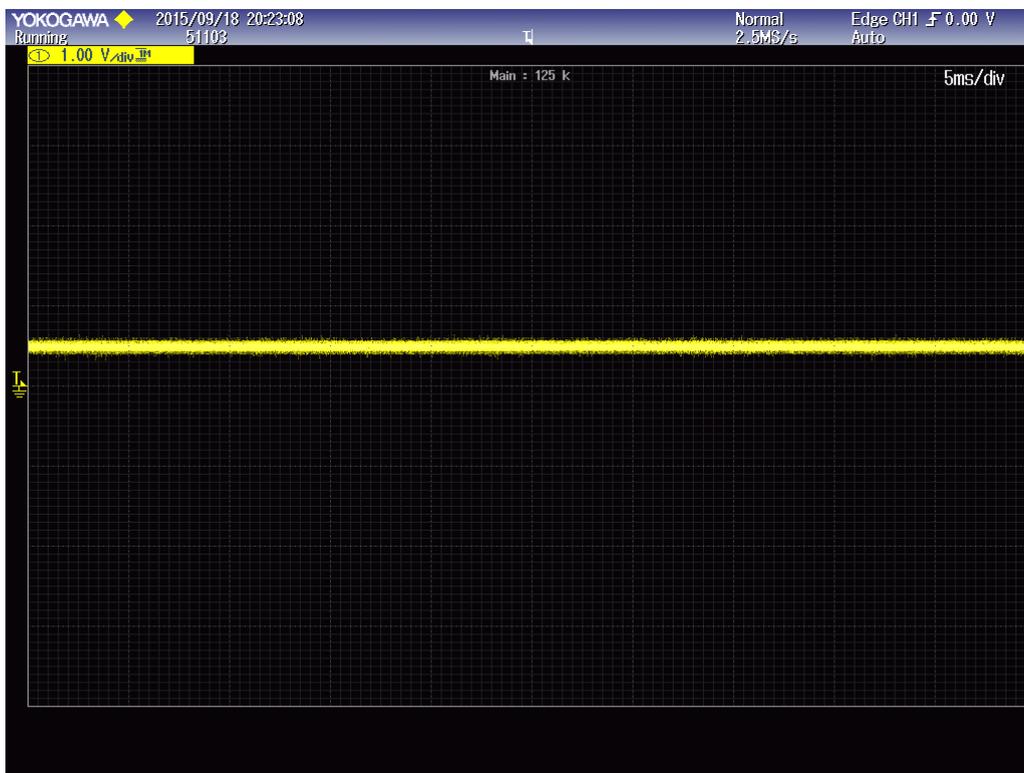


Figura 8.22: Voltaje de salida analógico con 2000g

Los 500mV solo se superan ligeramente con pesos superiores a los 2000g, alcanzando tan solo 700mV aplicando 3000g. En la Figura 8.23 mostramos la medida obtenida con 3000g.



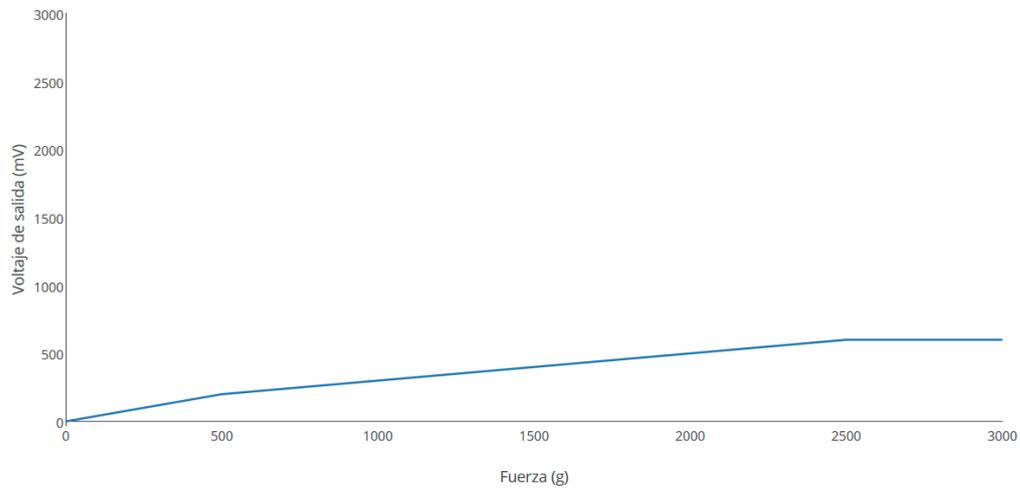
Figura 8.23: Voltaje de salida analógico con 3000g

La tabla con todos los valores obtenidos junto a su respectiva grafica aparecen en la Figura 8.24 y Figura 8.25.

Peso (g)	Voltaje de salida (mV)
3000	700
2500	600
2000	500
1500	400
1000	300
500	200
0	0

Figura 8.24: Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con LM324

Ensayo Sensor de Fuerza Resistivo con LM324

**Figura 8.25: Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con LM324**

Examinando los resultados del ensayo se desprende que el acondicionamiento del sensor de fuerza resistivo mediante el amplificador operacional LM324 no supone una mejora respecto al acondicionamiento con el Puente de Wheatstone. El ensayo muestra un menor rango de valores analógicos de salida y una menor sensibilidad.

El mal resultado del ensayo se debe a la necesidad de emplear una fuente de alimentación dual para el circuito de acondicionamiento en cuestión, como aparece explicado en la sección 6.2.2. Puesto que el pie robótico no será alimentado por una fuente de alimentación dual, se decide desaprobar el acondicionamiento transimpedancia para el sensor de fuerza resistivo.

La Figura 8.26 muestra la medida analógica obtenida con una única pesa de 500g. Con tan solo 500g, obtenemos un voltaje de 1700mV, mejorando notablemente la sensibilidad frente al acondicionamiento por medio de un Puente de Wheatstone.



Figura 8.26: Voltaje de salida analógico con 500g

La siguiente figura, la Figura 8.27, muestra la medida obtenida aplicando 1000g. Vemos como la salida analógica alcanza los 2700mV.

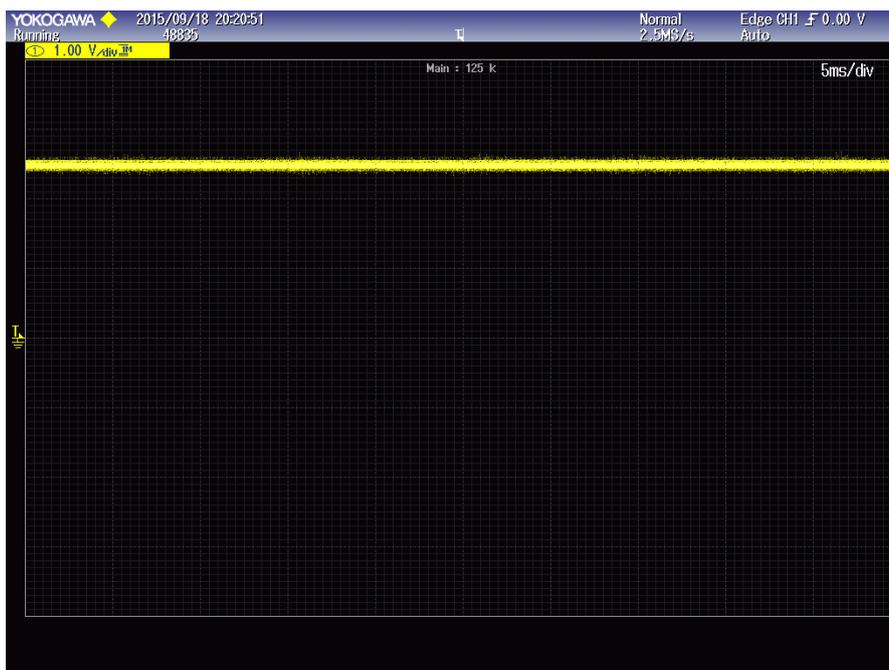


Figura 8.27: Voltaje de salida analógico con 1000g

Finalmente mostramos en la Figura 8.28, como la salida analógica alcanza los 3 V aplicando un peso de 2500g, valor que se obtiene también aplicando 3000g.



Figura 8.28: Voltaje de salida analógico con 2500g

La tabla con todos los valores obtenidos y a su gráfica asociada aparecen en la Figura 8.29 y Figura 8.30

Peso (g)	Voltaje de salida (mV)
3000	3000
2500	3000
2000	2900
1500	2800
1000	2500
500	1700
0	0

Figura 8.29: Tabla ensayo sensor de fuerza resistivo con Divisor de Tensión

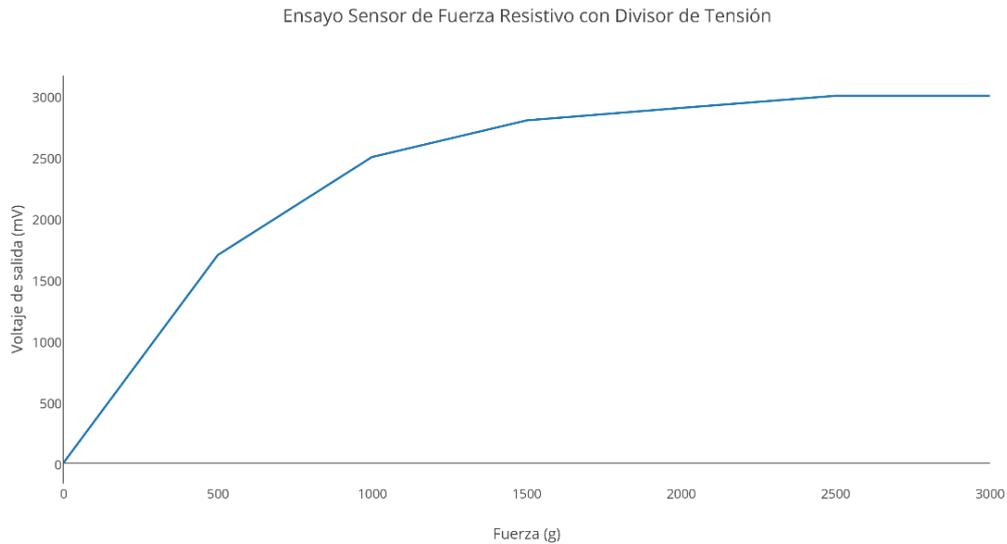


Figura 8.30: Gráfica ensayo sensor de fuerza resistivo con Divisor de Tensión

Los resultados del ensayo del acondicionamiento del sensor de fuerza resistivo mediante un divisor de tensión son muy buenos. Se observa una buena sensibilidad con un amplio rango de voltaje.

El divisor de tensión ofrece un buen acondicionamiento del sensor de fuerza resistivo y es finalmente el seleccionado.

9. Examen práctico

Al llegar a este punto, el pie robótico ha sido diseñado, fabricado y testado. Preparamos entonces, tal y como se ha ido mencionando a lo largo del proyecto, el pie robótico para participar en la edición 2015 del Campeonato de robótica mini-humanoide CEABOT, desarrollado en la Universidad del País Vasco, Bilbao, durante las Jornadas de Automática del Comité Español de Automática.

La participación en este concurso se traduce en un importante progreso en el desarrollo y la comprensión del potencial del pie robótico. Competir en CEABOT es una manera excelente de someter a presión sus componentes y de comprobar el funcionamiento del pie robótico en un entorno real, externo al laboratorio, además de en un ámbito de competición auténtica.

Nuestro deseo era poner a prueba tanto el pie robótico diseñado para RAIDER como el diseñado para MYOD en el campeonato CEABOT. Desafortunadamente, una normativa impuesta en la edición 2015, imponía que la única cámara que podía utilizarse fuese una cámara IDS uEye2 XS USB2.0 del fabricante Infaimon. Recordemos que el funcionamiento de RAIDER está fundamentado en el procesado de imágenes mediante algoritmos de visión y al no integrar la cámara homologada, no llegó en condiciones de participar en la edición CEABOT 2015.

Tuvimos no obstante la gran oportunidad de participar en el concurso con una plataforma robótica mini-humanoide MYOD con sus correspondientes pies robóticos ROBfoot instalados. En la Figura 9.1 vemos el robot mini-humanoide MYOD sobre la mesa del jurado de CEABOT junto a otros robots mini-humanoides participantes de la edición 2015 CEABOT.



Figura 9.1: Robots mini-humanoides participantes en CEABOT 2015

En la Figura 9.2 vemos a MYOD en el campo de pruebas con el pie robótico instalado.

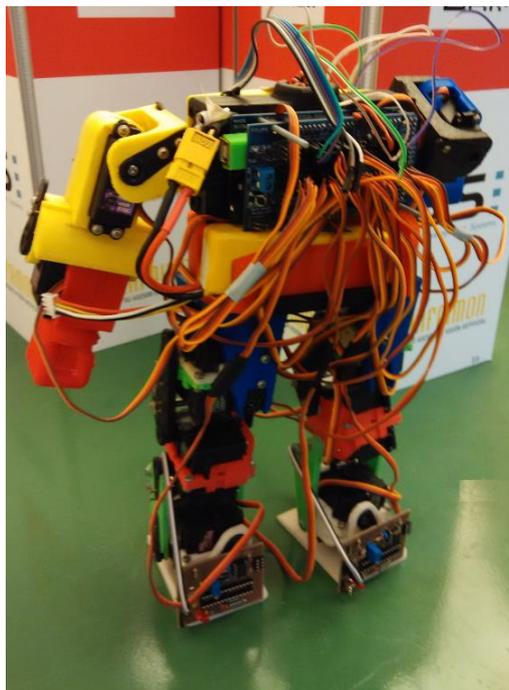


Figura 9.2: MYOD con ROBfoot instalado

Escalera

La preparación de ROBfoot para la prueba de la escalera, es en la que más esfuerzo y tiempo se invirtió, en vista de que la misión del pie robótico es detectar escalones de subida y de bajada. La detección de los escalones de una escalera es fundamental para ser factible la programación en el robot mini-humanoide la habilidad del ascenso y descenso por la misma.

Realizamos numerosas pruebas en la escalera con el pie robótico instalado en MYOD. Analizando las medidas recibidas por los sensores y procesando la información por medio del controlador del pie robótico, logramos que ROBfoot efectuó la correcta detección y posicionamiento de los escalones; informando de la existencia o inexistencia de los mismos al controlador de la plataforma MYOD. Si bien hay que apuntar que el posicionamiento del escalón de bajada no es tan preciso como en el caso del escalón de subida, realizado con exactitud gracias a los interruptores finales de carrera.

El problema para la consecución de la tarea lo encontramos en la plataforma robótica mini-humanoide MYOD, concretamente en los servomotores TowerPro MG996R instalados en sus piernas. Estos servomotores de bajo coste no poseen la fuerza suficiente como para que el robot se sustente con una sola pierna, posición necesaria en el movimiento de ascenso o descenso por un escalón, lo que implica que la tarea sea irrealizable por MYOD.

Tras la sustitución de los servomotores TowerPro MG996R por otros TowerPro MG996R a estrenar y una cantidad considerable de ajustes e intentos, no logramos sustentar la plataforma mini-humanoide MYOD con una sola pierna.

Finalmente decidimos no presentar a MYOD en la prueba de Escaleras de CEABOT debido al peligro que entrañaba una mala caída desde un escalón durante la ejecución de la prueba.

Carrera de Obstáculos

A lo largo del proyecto se viene argumentando nuestra ambición de construir un pie robótico funcional y sencillo de manejar, para así poder ser utilizado para diversos propósitos o en investigaciones orientadas a robótica humanoide.

El potencial o utilidad de instalar el pie robótico en la plataforma MYOD se manifestó cuando nos encontrábamos preparando a MYOD para la prueba de Carrera de Obstáculos. La Carrera de Obstáculos, explicada en detalle en la sección 2.1, requiere la detección de las dos líneas blancas que delimitan el campo, pero la plataforma MYOD original no dispone de medios para efectuar dicha detección.

Nos beneficiamos entonces de la ventaja de disponer del pie robótico ROBfoot incorporado en MYOD. Aprovechando una de sus entradas analógicas, pudimos fácilmente integrar un detector de líneas infrarrojo YL-73 a fin de realizar la detección de las líneas blancas por medio del pie robótico. La Figura 9.3 muestra el detector de líneas infrarrojo YL-73.



Figura 9.3: Detector de líneas infrarrojo YL-73

En la Figura 9.4 podemos ver a MYOD tras detectar la línea blanca en la Carrera de Obstáculos.

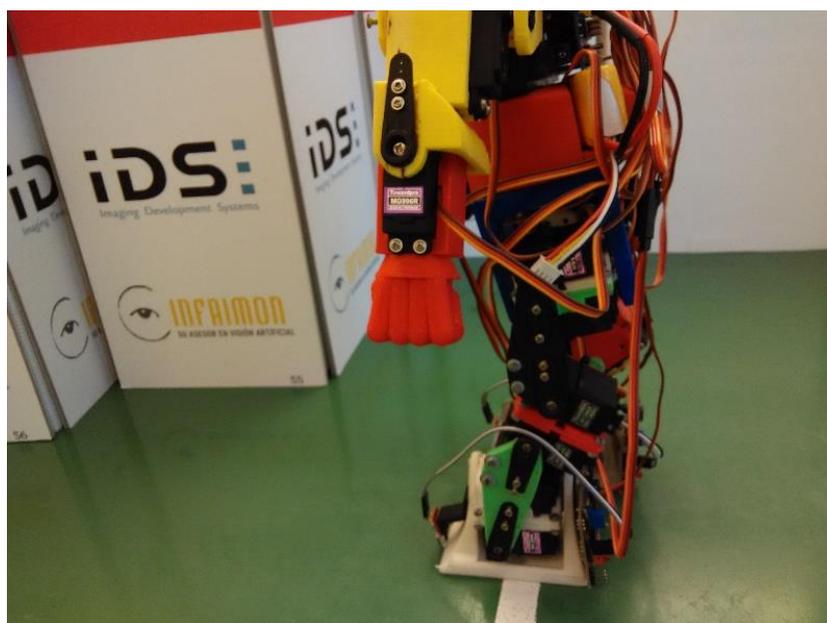


Figura 9.4: ROBfoot instalado en MYOD detectando línea blanca

La facultad de ROBfoot de poder integrar el detector de líneas posibilitó la detección de las líneas blancas del escenario y en definitiva la participación de MYOD en la prueba de Carrera de Obstáculos.

10. Presupuesto

En este capítulo se detallan todos los costes derivados al diseño, la construcción y la puesta en marcha del pie robótico ROBfoot para los robots mini-humanoides RAIDER y MYOD.

Con el objetivo de facilitar el entendimiento del presupuesto, se ha desglosado en cinco secciones.

La primera sección incluye el presupuesto en personal. Se trata del sueldo mensual atribuido a un ingeniero graduado durante el tiempo de desarrollo del proyecto.

La segunda presenta el coste en material. Lo primero a señalar es que se realiza una diferencia entre el pie robótico desarrollado para RAIDER y el pie robótico desarrollado para MYOD. Se debe tener en cuenta que el pie robótico al estar orientado para un robot mini-humanoide, el precio mostrado hace referencia a los componentes necesarios para la construcción de dos pies robóticos.

En la tercera sección aparece el coste en equipos utilizados. Se utilizan cuatro elementos para la consecución del proyecto, su adquisición estuvo inducida por la realización del proyecto si bien su uso no es exclusivo para éste.

Finalmente aparece el apartado de subcontratación de tareas. Se incluyen los gastos derivados del rutado de una placa de circuito impreso por medio de una maquina CNC.

Todos los importes que aparecen a continuación están expresadas en euros. Los precios unitarios del material y los quipos que aparecen en los siguientes apartados son orientativos y se pueden ver modificados en función del modo de compra, lugar de compra y número de unidades compradas.

Coste en personal

Apellidos y nombre	Categoría	Suelo Mensual	Meses	Total
Valbuena Sánchez, Antonio	Ingeniero	1500.00	9	13500.00
Total:				13500.00

Materiales ROBfoot RAIDER

Concepto	Unidades	Precio unitario	Precio TOTAL
ATmega328P	2	3.31	6.62
Conector DIP 28	2	0.61	1.22
Cristal de cuarzo	2	1.78	3.56
Buffer triestado 74HCT	2	0.48	0.96
Conector DIP 14	2	0.61	1.22
Sensor infrarrojo Avago HSDL9100 con Acondicionador de señal Avago APDS 9700	4	5.54	22.16
NE555	2	0.50	1.00
Conector DIP 8	2	0.61	1.22
Interruptor Final de Carrera	2	2.63	5.26
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 short Interlink Electronics	4	7.84	31.36
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 Interlink Electronics	4	10.97	43.88
Pulsador RESET	2	0.35	0.70
Interruptor de Funcionamiento	2	1.03	2.06
Conector MOLEX 562 (hembra)	2	1.20	2.40
Tira de pines 5x1	2	0.71	1.42
Resistencia 1k Ω	2	0.30	0.60
Resistencia 10k Ω	14	0.30	4.20
Resistencia 100k Ω	2	0.30	0.60
Potenci3metro multivuelta 100k Ω	2	0.60	1.20
Diodo IN4007	4	0.20	0.80
Condensador 100nF	4	0.40	1.60
Condensador 10nF	2	0.35	0.70
Condensador 1500pF	2	0.35	0.70
Condensador 22pF	4	0.40	0.80
Total:			136.22

Materiales ROBfoot MYOD

Concepto	Unidades	Precio unitario	Precio TOTAL
ATmega328P	2	3.31	6.62
Conector DIP 28	2	0.61	1.22
Cristal de cuarzo	2	1.78	3.56
Sensor infrarrojo Avago HSDL9100 con Acondicionador de señal Avago APDS 9700	4	5.54	22.16
NE555	2	0.5	1
Conector DIP 8	2	0.61	1.22
Interruptor Final de Carrera	2	2.63	5.26
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 Interlink Electronics	4	7.84	31.36
Tira de pines 4x1	2	0.71	1.42
Tira de pines 5x1	2	0.71	1.42
LED	2	0.1	0.2
Resistencia 680Ω	2	0.2	0.4
Resistencia 1kΩ	2	0.3	0.6
Resistencia 4.7kΩ	4	0.3	1.2
Resistencia 10kΩ	6	0.3	1.8
Resistencia 100kΩ	2	0.3	0.6
Potenciómetro multivuelta 100kΩ	2	0.6	1.2
Diodo IN4007	4	0.2	0.8
Condensador 100nF	4	0.4	1.6
Condensador 10nF	2	0.35	0.7
Condensador 1500pF	2	0.35	0.7
Condensador 22pF	4	0.4	1.6
Total:			86.64

Equipos

Concepto	Unidades	Precio Unitario	Precio TOTAL
Arduino UNO	2	22.00	44.00
Cable USB-serie TTL-232R-5V	1	21.69	21.69
Ordenador portátil Sony VAIO	1	1300.00	1300.00
Impresora Prusa i3 P3Steel	1	495.00	495.00
Total:			1860.69

Subcontratación de tareas

Concepto	Empresa	Unidades	Precio unitario	Precio TOTAL
Placa de Circuito Impreso ROBfoot RAIDER	Oficina Técnica Universidad Carlos III de Madrid	2	18.00	36.00
Placa de Circuito Impreso ROBfoot MYOD	Oficina Técnica Universidad Carlos III de Madrid	2	18.00	36.00
Total:			72.00	

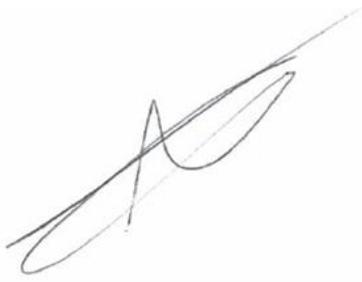
Presupuesto global

Presupuesto de partes	Total
Personal	13500.00
Materiales ROBfoot RAIDER	136.22
Materiales ROBfoot MYOD	86.84
Equipos	1860.69
Subcontratación de tareas	72.00
Total:	15655.75

El presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de QUINCE MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y CINCO EUROS Y SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS

Leganés 24 de Septiembre 2015,

El ingeniero proyectista



Fdo. Antonio Valbuena Sánchez

11. Conclusión

En este capítulo se exponen las conclusiones que se pueden sacar una vez finalizado el proyecto y después de un uso práctico y real del pie robótico.

Evaluaremos los resultados obtenidos en la realización del proyecto, presentaremos una conclusión personal y finalmente añadimos una serie de desarrollos futuros y reflexiones de mejora del pie robótico.

11.1 Evaluación de resultados

A continuación presentamos la evaluación de los resultados obtenidos durante la realización del proyecto que, en líneas generales, podemos decir que han sido favorables.

Comenzamos conociendo la Asociación de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid profundizando en la línea de investigación de robótica mini-humanoide. Nos familiarizamos con las plataformas mini-humanoides utilizadas por sus miembros y analizamos la normativa del Campeonato de robótica mini-humanoide CEABOT. Conocer la normativa de CEABOT y comprender las características de los robots mini-humanoides sobre los que trabajaríamos fue determinante a la hora de definir las propiedades que se buscarían en el pie robótico desarrollado.

Acto seguido realizamos un muy provechoso estudio del estado del arte en pies robóticos y de la tarea de ascenso y descenso por una escalera por un robot humanoide. Este estudio influyó de forma patente en el desarrollo del pie robótico, al ponernos en contacto con las tecnologías o componentes utilizados en pies robóticos e instruirnos en los distintos procedimientos seguidos, por los grupos de investigación de robótica humanoide, para abordar la tarea de ascenso y descenso por una escalera.

El diseño del pie robótico supuso una selección de los componentes y en la definición del modo de comunicación y alimentación del pie robótico. La selección de componentes se tradujo en una exhaustiva comparativa de hojas de características mientras que la comunicación y la alimentación se definieron en función a la plataforma mini-humanoide en la que se integraría el pie robótico. El diseño planteado ofrece un pie robótico muy completo e interesante que ofrece una amplia variedad de aplicaciones.

El desarrollo del pie robótico fue una laboriosa e importante tarea. Comenzamos diseñando la nueva estructura y realizando un acondicionamiento de los sensores, que través de los ensayos realizados, conocimos el circuito de acondicionamiento preferente y en definitiva su comportamiento real frente al especificado en sus hojas de características. Con los sensores acondicionados y la estructura diseñada, nos dispusimos entonces a conectar todos los componentes y configurar un único elemento. Mediante el desarrollo del esquema electrónico del pie robótico y el desarrollo su placa de circuito impreso asociada, obtuvimos físicamente la electrónica el pie robótico. Finalmente fijamos la PCB y los sensores en la estructura del pie robótico. La tarea del desarrollo de la PCB fue una de las acciones más costosas del proyecto debido al alto número de componentes a introducir y las reducidas dimensiones que ésta debía presentar.

Finalmente relatamos la participación del pie robótico ROBfoot integrado en la plataforma mini-humanoide MYOD en el Campeonato CEABOT. Si bien no se pudo participar en la prueba de Escaleras, el pie robótico demostró ser capaz de localizar y posicionar los escalones de la escalera,

confirmando su aptitud de dotar al robot mini-humanoide la habilidad de ascenso y descenso por la misma. Además se ratificó su fundamento de pie robótico funcional y completo al estar capacitado para integrar un detector de líneas y posibilitar la participación de MYOD en la prueba de Carrera de Obstáculos.

11.2 Conclusión personal

Personalmente me siento muy satisfecho con el trabajo realizado. Considero que los objetivos fijados se han alcanzado con alto nivel de cumplimiento.

Se trata de mi primer proyecto de desarrollo completo de una placa electrónica abarcando todas las etapas del desarrollo desde la concepción y diseño, hasta su posterior fabricación y testado.

Considero que he aprendido muchísimo en todas y cada una de las fases del proyecto. Tropezando con múltiples problemas y siempre aprendiendo de ellos. Además me he familiarizado con un gran número de herramientas de distinta naturaleza que sin ninguna duda utilizaré en futuros proyectos.

El desarrollo de varios prototipos fue todo un acierto ya que gracias a esto se pudo comprobar cuáles eran los fallos y los errores de diseño que debían corregirse, así como las posibles mejoras. Disponer además de una impresora 3D donde imprimir las piezas diseñadas es una gran ventaja al disponer de la pieza diseñada de forma rápida.

Finalmente, me encuentro muy satisfecho con el planteamiento de realizar un pie robótico simple, fiable y robusto. Ha manifestado ser todo un éxito y ha permitido utilizar el pie robótico para una aplicación distinta de la que estaba principalmente concebida

11.3 Desarrollos futuros

La finalización del proyecto pone en manifiesto los desarrollos futuros a implementar en el pie robótico, ya sea para mejorar sus capacidades o solventar problemas encontrados.

En primer lugar, la utilización de componentes en formato SMD, en especial los circuitos integrados de mayor tamaño, reduciría de forma notable el espacio ocupado por éstos en la PCB. Con componentes en formato SMD se facilitaría el rutado de la placa, se podrían incluir más componentes o se podría fabricar una PCB de menor tamaño para lograr una instalación más homogénea en la estructura del pie robótico.

Sería también muy interesante profundizar en aplicaciones empleando los sensores de fuerza resistivos localizados en la planta del pie. Se trata de una sensorización muy provechosa que puede traducirse en múltiples aplicaciones como en la mejora en el control de la marcha bípeda o en un minucioso conocimiento del suelo donde se encuentra el robot, pudiendo reconocer irregularidades o pendientes.

El posicionamiento del escalón de bajada es crucial para su descenso. La inclusión de un elemento mecánico, del estilo del interruptor final de carrera, para su posicionamiento mejoraría de forma notable el posicionamiento del escalón y por consiguiente la destreza para bajarlo.

Como comentamos durante la elección del controlador, el uso de un microcontrolador como el ATmega1280 puede resultar en una elección conveniente. Un microcontrolador con mayor capacidad computacional pero principalmente con mayor número de entradas analógicas para la conexión de sensores.

Es interesante también realizar un rediseño completo y adaptar las entradas analógicas y digitales para poder incluir diferentes sensores indistintamente. Esto sería un paso hacia la consecución de un pie robótico de carácter general que aceptase una amplia gama de sensores, no solo los especificados en el momento del diseño.

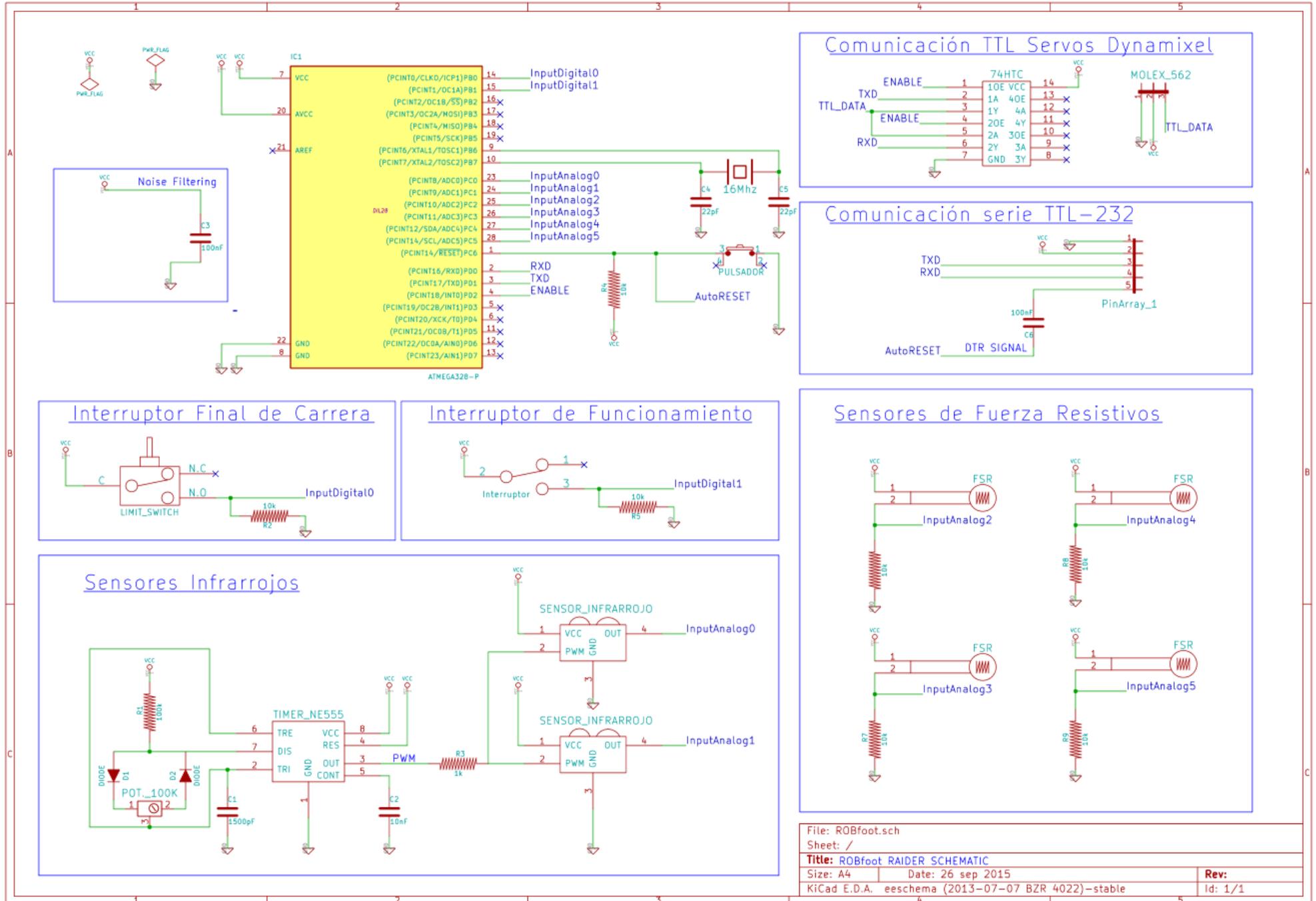
Por último, crear un repositorio en Github y publicar el presente proyecto para que cualquier persona tenga acceso a él siguiendo la filosofía Open-Source.

Bibliografía

- [1] Asociación de Robótica (UC3M), septiembre 2014 [online] <http://asrob.uc3m.es>
- [2] Campeonato de Robótica Mini-Humanoide CEABOT, Septiembre, 2015 [online] <http://www.ceautomatica.es/og/robotica/concurso-ceabot>
- [3] Javier Isabel Hernández, “Desarrollo de una plataforma robótica mini-humanoide con visión artificial”, Trabajo Fin de Grado, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Septiembre 2013
- [4] Proyecto MYOD: Make your own droid, ASROB 2014, [online] <http://asrob.uc3m.es/index.php/MYOD>
- [5] C. Shih, “Ascending and descending stairs for a biped robot,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans, vol.29, no.3, pp. 255–268, May 1999.
- [6] Chenglong Fu, Ken Chen, “Gait Synthesis and Sensory Control of Stair Climbing for a Humanoid Robot”
- [7] Tzue-Hseng S. Li, Yu-Te Su, Cheng-Hsiang Kuo, Chi-Yang Chen, Chia-Ling Hsu, and Ming-Feng Lu, “Stair-Climbing Control of Humanoid Robot using Force and Accelerometer Sensors”
- [8] Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park, Jun-Ho Oh, “Realization of Dynamic Stair Climbing for Biped Humanoid Robot Using Force/Torque Sensors”
- [9] Wilmer Cardenas Pilatuña, Félix Rodríguez Cañadillas, Alberto Jardón Huete, “Mejora de las Capacidades de un Robot Mini-Humanoide en la Tarea de Subir y Bajar Escaleras”
- [10] Stefan Oßwald, Attila Görög, Armin Hornung, Maren Bennewitz, “Autonomous Climbing of Spiral Staircases with Humanoids”
- [11] Jens-Steffen Gutmann, Masaki Fukuchi, Masahiro Fujita, “Stair Climbing for Humanoid Robots Using Stereo Vision”
- [12] Armin Hornung, Kai M. Wurm, Maren Bennewitz, “Humanoid Robot Localization in Complex Indoor Environments”
- [13] K. Harada, H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, S. Kajita, M. Nakamura, “Dynamical balance of a humanoid robot grasping and environment,” in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004.
- [14] Adrien Escande, Abderrahmane Kheddar, Sylvain Miossec, “Planning support contact-points for humanoid robots and experiments on HRP-2”
- [15] Suwanratchatamane, K., Matsumoto, M., Hashimoto, S. “A Simple Tactile Sensing Foot for Humanoid Robot and Active Ground Slope Recognition” In: IEEE International Conference on Mechatronics, April 14-17, pp. 1–6. IEEE Press, New York (2009)
- [16] Takashi Y, Nishiwaki K, Kagami S, Mizoguchi H, Inoue H, “High Speed Pressure Sensor Grid for Humanoid Robot Foot.” In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3909–3914 (2005)
- [17] Li J, Huang Q, Zhang W, Yu Z, Li K, “Flexible foot design for a humanoid robot.”, Proc. of 2008 IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics: 1414 - 1419.

- [18] Matt Byrne, Shane Larkin, Allison Ryan, Philip Vanderwall, "MABEL Robotic Foot Design Final Report" ME 450 Fall 2010
- [19] Biolofeet, [online] <http://www.roboshop.pl/pliki/biolofeet-instrukcja.pdf>
- [20] Sellaouti R, Stasse O, Kajita S, Yokoi K, Kheddar A, "Faster and smoother walking of humanoid HRP-2 with passive toe joints." Proc. of 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems: 4909 - 4914.
- [21] Ouezdou F.B, Alfayad S, Almastri B "Comparison of several kinds of feet for Humanoid Robot." Proc. of 2005 IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots: 123 - 128.
- [22] Kajita S, Kaneno K, Morosawa M, Nakaoka S, Hirukawa H, Nakaoka S, Hirukawa H "ZMP-Based Biped Running Enhanced by Toe Springs." Proc. of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation: 3963 - 3969.
- [23] Nishiwaki K, Kagami S, Kuniyoshi Y, Inaba M, Inoue H, "Toe Joints that Enhance Bipedal and Fullbody Motion of Humanoid Robots." In: Proceedings of the IEEE ICRA, pp. 3105 – 3110 (2002)
- [24] Powered Ankle-Foot Prosthesis, [online] <http://www.media.mit.edu/press/ankle/>
- [25] BIOM, [online] <http://www.biom.com/>
- [26] Interlink Electronics Sensores de Fuerza resistivos, [online] <http://www.interlinkelectronics.com/standard-products.php>
- [27] Teksan Sensores de Fuerza Resistivos, [online] <https://www.tekscan.com/product-group/test-measurement/force-measurement?tab=products-solutions>
- [28] Sensitronics Senores de Fuerza Resistivos, [online] <http://www.sensitronics.com/products-fsr.php>
- [29] Juan González Gómez, Andrés Prieto-Moreno, Itziar Lima, Ricardo Gómez, Skymega, [online] http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=SkyMega#Probando_la_placa:_22Ho_la_mundo.22
- [30] CERN, KiCad [online] <http://home.web.cern.ch/about/updates/2015/02/kicad-software-gets-cern-treatment>
- [31] FreeCAD, [online] http://www.freecadweb.org/wiki/index.php?title=Main_Page
- [32] Arduino IDE, [online] <http://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>
- [33] Tena G., Miguel Ángel. "Diseño y desarrollo de un sistema anticolidión con sensores de proximidad sin contacto". Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Junio 2011
- [34] Programador de AVR, Atmel AVRISP mkII, [online] <http://www.atmel.com/tools/AVRISPMKII.aspx>
- [35] Programador de AVR, USBtinyISP v2.0, [online] http://www.iearobotics.com/wiki/index.php?title=Grabador_de_AVRs:USBtinyISP_v2.0

Anexo 1: Esquema electrónico ROBfoot diseñado para RAIDER



Anexo 2: Esquema electrónico ROBfoot diseñado para MYOD

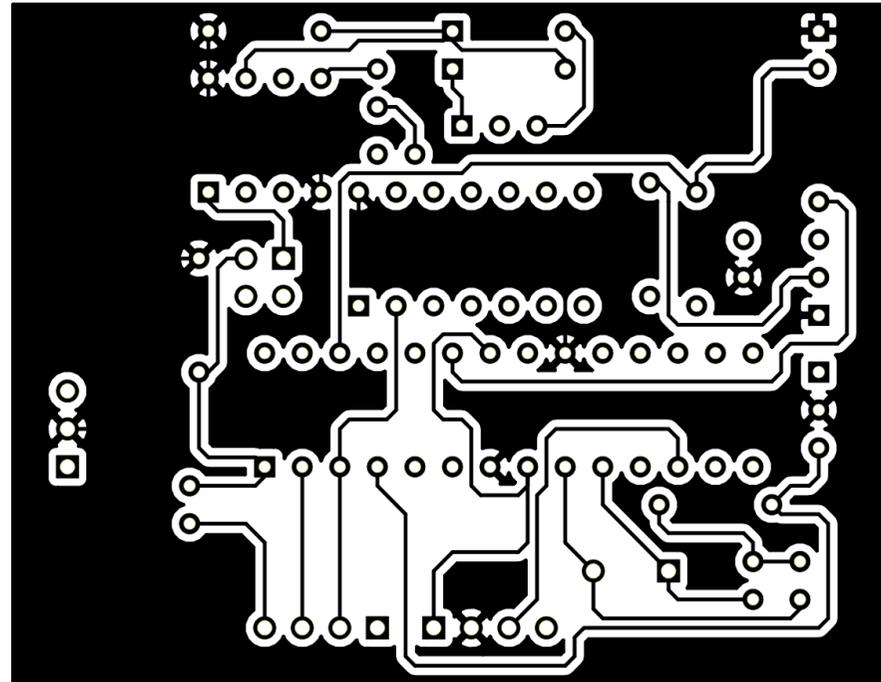
Anexo 3: Listado de componentes ROBfoot diseñado para RAIDER

Componente	Cantidad
ATmega328P	2
Conector DIP 28	2
Cristal de cuarzo	2
Buffer triestado 74HCT	2
Conector DIP 14	2
Sensor infrarrojo Avago HSDL9100 con Acondicionador de señal Avago APDS 9700	4
NE555	2
Conector DIP 8	2
Interruptor Final de Carrera	2
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 short Interlink Electronics	4
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 Interlink Electronics	4
Pulsador RESET	2
Interruptor de Funcionamiento	2
Conector MOLEX 562 (hembra)	2
Tira de pines 5x1	2
Resistencia 1k Ω	2
Resistencia 10k Ω	14
Resistencia 100k Ω	2
Potenciómetro multivuelta 100k Ω	2
Diodo IN4007	4
Condensador 100nF	4
Condensador 10nF	2
Condensador 1500pF	2
Condensador 22pF	4

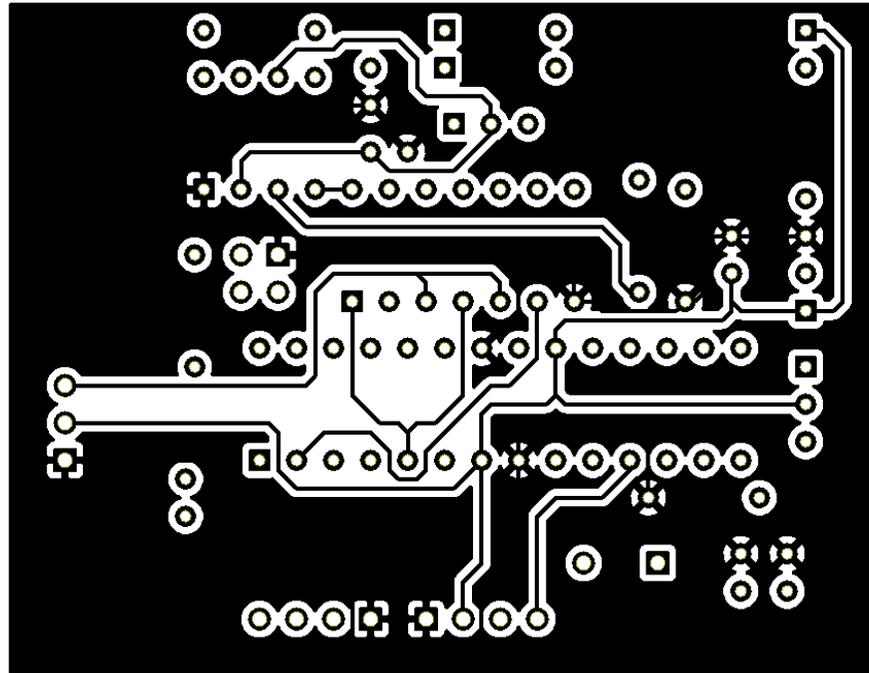
Anexo 4: Listado de componentes ROBfoot diseñado para MYOD

Concepto	Unidades
ATmega328P	2
Conector DIP 28	2
Cristal de cuarzo	2
Sensor infrarrojo Avago HSDL9100 con Acondicionador de señal Avago APDS 9700	4
NE555	2
Conector DIP 8	2
Interruptor Final de Carrera	2
Sensor de fuerza resistivo FSR 400 Interlink Electronics	4
Tira de pines 4x1	2
Tira de pines 5x1	2
LED	2
Resistencia 680 Ω	2
Resistencia 1k Ω	2
Resistencia 4.7k Ω	4
Resistencia 10k Ω	6
Resistencia 100k Ω	2
Potenciómetro multivuelta 100k Ω	2
Diodo IN4007	4
Condensador 100nF	4
Condensador 10nF	2
Condensador 1500pF	2
Condensador 22pF	4

Anexo 5: Fotolito de la PCB diseñada para RAIDER

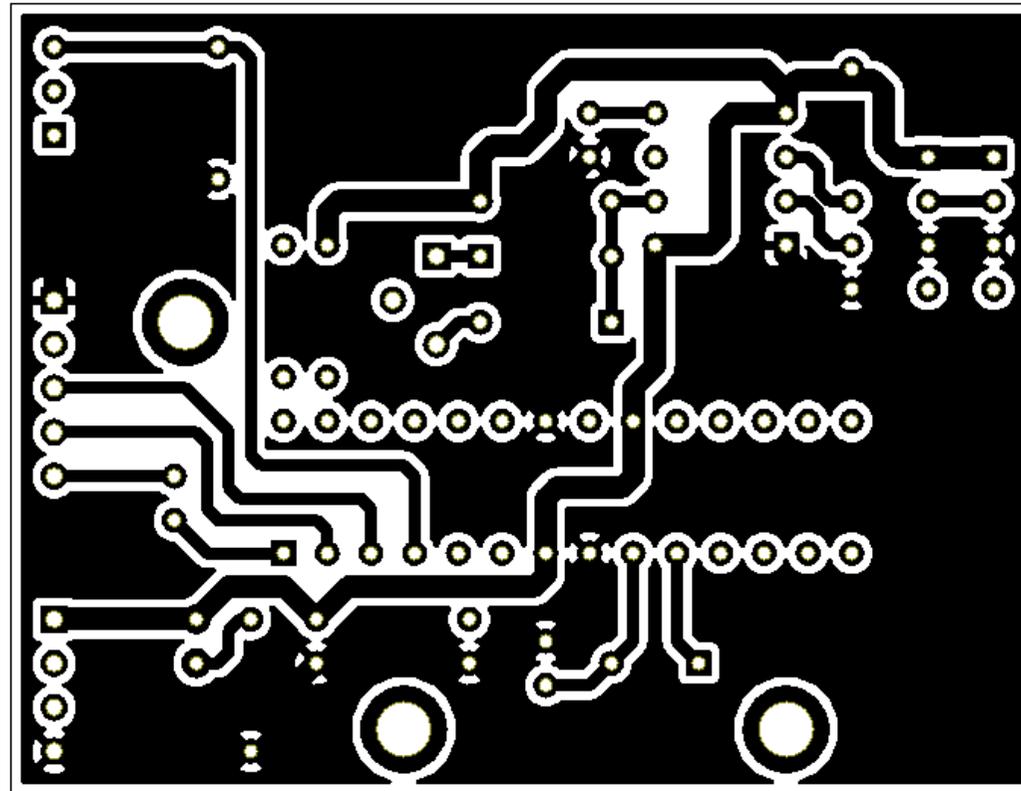


File: blankpro.sch		
Sheet: /		
Title: Fitolito PCB RAIDER (front)		
Size: A4	Date: 27 sep 2015	Rev:
KiCad E.D.A.	eeschema (2013-07-07 BZR 4022)-stable	Id: 1/1

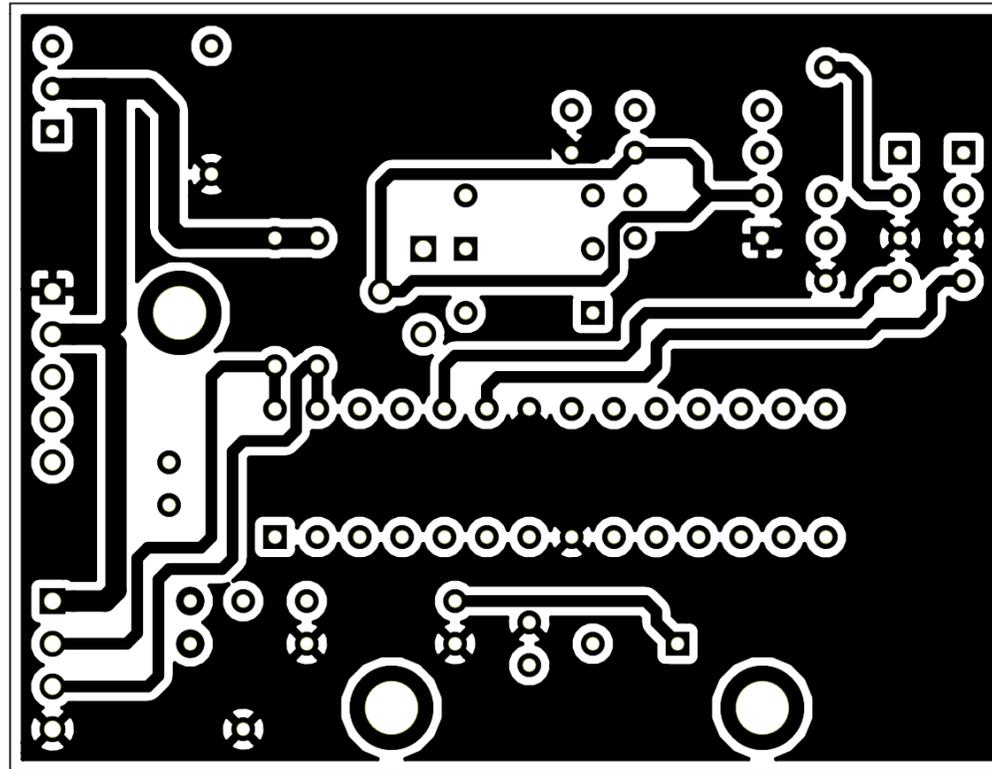


File: blankpro.sch		
Sheet: /		
Title: Fotolito PCB RAIDER (back)		
Size: A4	Date: 27 sep 2015	Rev:
KiCad E.D.A.	eeschema (2013-07-07 BZR 4022)-stable	Id: 1/1

Anexo 6: Fotolito PCB diseñada para MYOD



File: blankpro.sch		
Sheet: /		
Title: Fotolito PCB MYOD (front)		
Size: A4	Date: 27 sep 2015	Rev:
KiCad E.D.A. eeschema (2013-07-07 BZR 4022)-stable		Id: 1/1



File: blankpro.sch		
Sheet: /		
Title: Fotolito PCB MYOD (back)		
Size: A4	Date: 27 sep 2015	Rev:
KiCad E.D.A. eschema (2013-07-07 BZR 4022)-stable		Id: 1/1