



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Trabajo Final de Grado

---

*SISTEMA DE AYUDA PARA EL  
ATERRIJAJE AUTÓNOMO DE  
CUADRICÓPTEROS BASADO EN  
SENSORES LÁSER*

---

*Grado en Ingeniería Aeroespacial*

Autor: *Claudia Lozano Navarro*

Tutor: Rafael Masot Peris

Cotutor: Miguel Alcañiz Fillol

Septiembre de 2017



*Para tí,  
abuela*



## Abstract

The emergence of unmanned aerial vehicles or UAVs has challenged the design of new electronic sensor systems capable of making reliable, accurate and computationally effective measurements. Accurate knowledge of altitude and real-time obstacle avoidance is one of the crucial aspects when talking about autonomous UAVs navigation. Its success depends on the quality and robustness of the sensors used to acquire environmental data and their implementation on the vehicle control system. However, today, many of the technologies commonly used for height measurement and obstacle avoidance have some limitations, especially in unfamiliar or indoor environments.

Consequently, this Bachelor's Final Thesis presents a conceptual test consisting of height estimation and obstacle detection using a low-cost device capable of accurately measuring distances: the VL53L0X laser sensor designed by ST Microelectronics.

The test platform consists of a quadcopter frame (FY450) equipped with four VL53L0X laser-ranging modules located at the edge of each of its arms and an ultrasound module located in the central part. The application operates in a horizontal plane, with or without obstacles inside, in both indoor and outdoor environments. The focus is set on the correct and accurate estimation of height by reading the five sensors in order to detect the existence of safe landing zones (without obstacles inside). By turning on two LEDs, the application indicates whether, in a real environment, the landing procedure would be interrupted.

Taking into account the characteristics of both sensors, the experimental characterization and validation tests demonstrate the viability of the conceptual test conducted in this Thesis, as well as its useful application as a system to support the autonomous landing of a quadcopter, built into its control system.

## Resumen

La aparición de vehículos aéreos no tripulados o UAVs, ha desafiado al diseño de nuevos sistemas de sensores electrónicos capaces de realizar mediciones fiables, precisas y computacionalmente efectivas. El conocimiento exacto de la altura y la evitación de obstáculos en tiempo real es uno de los aspectos cruciales cuando de navegación autónoma de UAVs se habla. Su éxito depende, en gran medida, de la calidad y robustez de los sensores utilizados para adquirir datos del entorno y de su implementación sobre el sistema de control del vehículo. Sin embargo, actualmente, muchas de las tecnologías utilizadas comúnmente para la medición de alturas y evitación de obstáculos tienen algunas deficiencias, sobre todo en entornos desconocidos o *indoor*.

En consecuencia, este Trabajo Final de Grado presenta una prueba de concepto consistente en la estimación de alturas y reconocimiento de obstáculos mediante el uso de un dispositivo de bajo coste capaz de medir distancias de forma precisa: el sensor láser VL53L0X diseñado por ST Microelectronics.

La plataforma de pruebas consiste en la estructura de un cuadricóptero (FY450) equipado con cuatro sensores láser VL53L0X situados en el extremo de cada uno de sus brazos y un módulo de ultrasonidos localizado en la parte central. La aplicación trabaja en un plano horizontal, con o sin obstáculos en su interior, y tanto en entornos de exterior, como de interior. El enfoque se fija en la correcta y precisa estimación de la altura mediante la lectura de los cinco sensores para detectar la existencia de zonas seguras de aterrizaje (sin obstáculos en su interior). Mediante el encendido de dos LEDs, la aplicación indica si, en un entorno real, el procedimiento de aterrizaje se interrumpiría.

Teniendo en cuenta las características de ambos sensores, los ensayos experimentales de caracterización y validación demuestran la viabilidad de la prueba de concepto desarrollada en el presente Trabajo, así como su eficaz aplicación como sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de un cuadricóptero, integrado como parte de su sistema de control.

## Resum

L'aparició de vehicles aeris no tripulats o UAVs, ha desafiat el disseny de nous sistemes de sensors electrònics capaços de realitzar mesuraments de manera fiable, precisa i computacionalment efectiva. El coneixement exacte de l'altura i l'evitació d'obstacles en temps real és un dels aspectes crucials quan de navegació autònoma de UAVs es parla. El seu èxit depèn, en gran mesura, de la qualitat i robustesa dels sensors utilitzats per adquirir dades de l'entorn i de la seva implementació sobre el sistema de control del vehicle. No obstant això, actualment, moltes de les tecnologies utilitzades comunament per al mesurament d'altures i evitació d'obstacles tenen algunes deficiències, sobretot en entorns desconeguts o *indoor*.

En conseqüència, aquest Treball Final de Grau presenta una prova de concepte que consisteix en l'estimació d'altures i reconeixement d'obstacles mitjançant l'ús d'un dispositiu de baix cost capaç de mesurar distàncies de forma precisa: el sensor làser VL53L0X dissenyat per ST Microelectronics.

La plataforma de proves consisteix en l'estructura d'un quadrotor (FY450) equipat amb quatre sensors làser VL53L0X situats a l'extrem de cada un dels seus braços i un mòdul d'ultrasons localitzat a la part central. L'aplicació treballa en un pla horitzontal, amb o sense obstacles en el seu interior, i tant en entorns d'exterior, com d'interior. L'enfocament es fixa en la correcta i precisa estimació de l'altura mitjançant la lectura dels cinc sensors per detectar l'existència de zones segures d'aterratge (sense obstacles en el seu interior). Mitjançant l'encesa de dos LEDs, l'aplicació indica si, en un entorn real, el procediment d'aterratge s'interrompia.

Tenint en compte les característiques de tots dos sensors, els assajos experimentals de caracterització i validació demostren la viabilitat de la prova de concepte desenvolupada en el present Treball, així com la seva eficaç aplicació com a sistema d'ajuda a l'aterratge autònom quadrotor, integrat com a part de el seu sistema de control.





# Índice general

Índice de figuras . . . . .	VII
Índice de tablas . . . . .	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Marco teórico . . . . .	6
<b>2. Diseño del sistema</b>	<b>18</b>
2.1. Diagrama de bloques . . . . .	19
2.2. Hardware . . . . .	22
2.2.1. Arduino UNO . . . . .	22
2.2.2. VL53L0X . . . . .	35
2.2.3. HC-SR04 . . . . .	51
2.3. Software . . . . .	55
2.3.1. IDE . . . . .	55
2.3.2. Firmware . . . . .	58
<b>3. Caracterización y validación</b>	<b>63</b>
3.1. Caracterización: VL53L0X . . . . .	64

3.1.1. Banco de pruebas . . . . .	65
3.1.2. Sobre el Prototipo . . . . .	78
3.2. Caracterización: HCSR-04 . . . . .	92
3.2.1. Banco de pruebas . . . . .	92
3.2.2. Sobre el Prototipo . . . . .	96
3.3. Validación . . . . .	99
<b>4. Conclusiones</b>	<b>108</b>
<b>5. Presupuesto</b>	<b>110</b>
<b>A. Anexo I</b>	<b>116</b>
A.1. Firmware . . . . .	116
<b>B. Anexo II</b>	<b>123</b>
B.1. Caracterización: VL53L0X . . . . .	123
B.1.1. Banco de pruebas . . . . .	123
B.1.2. Sobre el Prototipo . . . . .	131
B.2. Caracterización: HC-SR04 . . . . .	139
B.2.1. Banco de pruebas . . . . .	139
B.2.2. Sobre el Prototipo . . . . .	141

# Índice de figuras

1.	Error de detección del sensor ultrasónico . . . . .	9
2.	Principio de funcionamiento de un sensor IR . . . . .	11
3.	Método de localización GPS de trilateración inversa . . . . .	12
4.	Estructura interna del sistema LIDAR . . . . .	16
5.	Diagrama de bloques lógico del Prototipo . . . . .	20
6.	Diagrama de bloques físico del Prototipo . . . . .	21
7.	Logo de Arduino . . . . .	22
8.	Placa Arduino UNO Rev3 . . . . .	23
9.	Microcontrolador ATmega328P . . . . .	25
10.	Mapa de pines del ATmega328P . . . . .	25
11.	Pines de alimentación placa Arduino UNO . . . . .	26
12.	Esquema de la memoria placa Arduino UNO . . . . .	27
13.	Memoria Flash de la placa Arduino UNO . . . . .	28
14.	Memoria SRAM placa Arduino UNO . . . . .	29
15.	Arquitectura Maestro - Esclavo . . . . .	31
16.	Arquitectura Maestro - Esclavo . . . . .	33
17.	Sensor VL53L0X de STMicroelectronics . . . . .	35
18.	Sensor VL53L0X integrado por Pololu . . . . .	37

19.	Offset de la medida . . . . .	39
20.	Fenómeno cross-talk (diafonía) en el sensor VL53L0X . . . . .	41
21.	Efecto de la cubierta en la medida . . . . .	41
22.	Distancia válida para la calibración cross-talk . . . . .	42
23.	Flujo de inicialización / calibración . . . . .	47
24.	Módulo de ultrasonidos HC-SR04 . . . . .	51
25.	Ángulo efectivo del módulo HC-SR04 . . . . .	52
26.	Optional caption . . . . .	53
27.	Optional caption . . . . .	56
28.	Diagrama de flujo: inicio del programa . . . . .	60
29.	Diagrama de flujo: condición por encima de 1m . . . . .	61
30.	Optional caption . . . . .	61
31.	Diagrama de flujo: condición por debajo de 600mm . . . . .	62
32.	Diagrama de flujo: condición por debajo de 1000mm . . . . .	62
33.	Esquema de caracterización en el banco de pruebas . . . . .	65
34.	Ensayo experimental. Calibración de los sensores VL53L0X . . . . .	65
35.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 . . . . .	66
36.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 . . . . .	67
37.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 . . . . .	67
38.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 . . . . .	68
39.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en corto alcance . . . . .	71
40.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en medio alcance . . . . .	74
41.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en largo alcance . . . . .	77
42.	Esquema de caracterización sobre el Prototipo . . . . .	78
43.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 . . . . .	79

44.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 . . . . .	80
45.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 . . . . .	80
46.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 . . . . .	81
47.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 . . . . .	81
48.	Distancia del brazo del Prototipo al suelo . . . . .	83
49.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en corto alcance . .	85
50.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en medio alcance .	88
51.	Comportamiento de los sensores VL53L0X en largo alcance . .	91
52.	Medida estándar del HCSR-04 . . . . .	92
53.	Medida estándar del HCSR-04 en corto alcance . . . . .	93
54.	Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance . . . . .	94
55.	Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance . . . . .	95
56.	Medida estándar del HCSR-04 . . . . .	96
57.	Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance . . . . .	97
58.	Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance . . . . .	98
59.	Comportamiento por encima de 1000 mm . . . . .	100
60.	Proceso de validación real por encima de los 1000mm . . . . .	101
61.	Zona segura para el aterrizaje . . . . .	102
62.	Detección de obstáculos en la zona de transición . . . . .	103
63.	Zona segura para el aterrizaje a menos de 100 mm . . . . .	104
64.	Proceso de validación real por debajo de los 100 mm . . . . .	104
65.	Detección de obstáculos por debajo de 100 mm . . . . .	105
66.	Zona segura para el aterrizaje a menos de 600 mm . . . . .	105
67.	Detección de obstáculos por debajo de 600 mm . . . . .	106
68.	Proceso de validación real por debajo de los 600 mm . . . . .	106

69.	Zona segura para el aterrizaje a menos de 1000 mm . . . . .	107
70.	Detección de obstáculos por debajo de 1000 mm . . . . .	107
71.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 . . . . .	123
72.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 . . . . .	124
73.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 . . . . .	124
74.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 . . . . .	125
75.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en corto alcance . . .	125
76.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en corto alcance . . .	126
77.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en corto alcance . . .	126
78.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en corto alcance . . .	127
79.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en medio alcance . .	127
80.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en medio alcance . .	128
81.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en medio alcance . .	128
82.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en medio alcance . .	129
83.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en largo alcance . . .	129
84.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en largo alcance . . .	130
85.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en largo alcance . . .	130
86.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en largo alcance . . .	131
87.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 . . . . .	131
88.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 . . . . .	132
89.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 . . . . .	132
90.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 . . . . .	133
91.	Medida estándar del VL53L0X - 1 en corto alcance . . . . .	133
92.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en corto alcance . . .	134
93.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en corto alcance . . .	134

94.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en corto alcance . . .	135
95.	Medida estándar del VL53L0X - 1 en medio alcance . . . . .	135
96.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en medio alcance . .	136
97.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en medio alcance . .	136
98.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en medio alcance . .	137
99.	Medida estándar del VL53L0X - 1 en largo alcance . . . . .	137
100.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en largo alcance . . .	138
101.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en largo alcance . . .	138
102.	Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en largo alcance . . .	139
103.	Medida estándar del HCSR-04 . . . . .	139
104.	Medida estándar del HCSR-04 en corto alcance . . . . .	140
105.	Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance . . . . .	140
106.	Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance . . . . .	141
107.	Medida estándar del HCSR-04 . . . . .	141
108.	Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance . . . . .	142
109.	Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance . . . . .	142

# Índice de tablas

1.	Características técnicas del Arduino UNO Rev3 . . . . .	24
2.	Características técnicas del sensor VL53L0X . . . . .	36
3.	Módulo de ultrasonidos HC-SR04 . . . . .	46
4.	Características técnicas del módulo HC-SR04 . . . . .	52
5.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Corto alcance. .	69
6.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Corto alcance. .	69
7.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Corto alcance. .	70
8.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Corto alcance. .	70
9.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Medio alcance.	72
10.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Medio alcance.	72
11.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Medio alcance.	73
12.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Medio alcance.	73
13.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Largo alcance. .	75
14.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Largo alcance. .	75
15.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Largo alcance. .	76
16.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Largo alcance. .	76
17.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Corto alcance. .	83
18.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Corto alcance. .	84



19.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Corto alcance. .	84
20.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Corto alcance. .	84
21.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Medio alcance. .	86
22.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Medio alcance. .	86
23.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Medio alcance. .	87
24.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Medio alcance. .	87
25.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Largo alcance. .	89
26.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Largo alcance. .	89
27.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Largo alcance. .	90
28.	Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Largo alcance. .	90
29.	Calibración de largo alcance . . . . .	93
30.	Calibración de medio alcance . . . . .	94
31.	Calibración de largo alcance . . . . .	95
32.	Calibración de corto alcance . . . . .	96
33.	Calibración de corto alcance . . . . .	97
34.	Calibración de corto alcance . . . . .	98
35.	Desviación máxima y mínima de los sensores VL53L0X . . . . .	99
36.	Coste de los materiales empleados . . . . .	111
37.	Coste de la mano de obra empleados . . . . .	112
38.	Presupuesto total del Trabajo Final de Grado . . . . .	113

# Capítulo 1

## Introducción

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser capaz de medir distancias a un objeto o superficie de forma precisa. De ahora en adelante, dicho sistema es denominado como el *Prototipo*.

El Trabajo se estructura de la siguiente forma. El *Capítulo 1*, la introducción, expone la justificación del Trabajo y el porqué del tema seleccionado. Consiste en una descripción del proyecto a desarrollar y del marco teórico detrás de los dispositivos más utilizados para la medición de distancias.

En el *Capítulo 2* se explica de forma detallada el diseño del sistema. Se encuentra en él una exhaustiva descripción del hardware y software utilizado. Expone los beneficios, limitaciones, y cómo se utilizan cada uno de los componentes que conforman el Prototipo.

El *Capítulo 3* muestra la implementación del sistema y los resultados de las diferentes pruebas de calibración realizadas. Presenta las consideraciones prácticas del Trabajo y la formulación del código basado en C a través del IDE de Arduino para el control de la electrónica del sistema.

Finalmente, en el *Capítulo 4*, se discuten los resultados obtenidos sobre la aplicación en un entorno real del Prototipo. Se extraen conclusiones sobre la eficacia del método en relación con las capacidades de procesamiento y se exponen posibles mejoras del sistema. Se incluye, como *Capítulo 5* el presupuesto aproximado del desarrollo del sistema en aplicaciones comerciales.

## 1.1. Justificación

La aparición de los Vehículos Aéreos no Tripulados o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ha causado un éxito inigualable en muchos campos de interés, desde aplicaciones militares y civiles hasta aplicaciones de ocio y entretenimiento.

Como consecuencia, se ha iniciado un desafío en el diseño de nuevos sensores electrónicos capaces de realizar mediciones oportunas, precisas y computacionalmente efectivas. Un problema de diseño convencional en los UAV consiste en equilibrar la complejidad del subsistema de detección con algoritmos avanzados de procesamiento de datos para obtener información de calidad sobre la posición y orientación del vehículo.

Dentro de este análisis, el aterrizaje autónomo constituye una cuestión muy recurrente en líneas de investigación. Toda automatización de procesos supone una mejora en el rendimiento de su funcionalidad y una gran inversión en investigación y posterior comercialización. Uno de los principales problemas de este proceso de automatización reside en el hecho de medir, de forma efectiva y precisa, la distancia existente entre el UAV y la superficie donde se realizaría el aterrizaje. Este hecho tiene un impacto considerable, sobre todo, en ciertas etapas de vuelo tales como despegue, aterrizaje y áreas de vuelo turbulentas.

El aterrizaje autónomo de un UAV en la actualidad, sin tener en cuenta aplicaciones militares, tiene resultados muy diferente dependiendo de las condiciones en las que se produce; resultados que van desde lo aceptable a lo desastroso e impreciso. Esto se debe, principalmente, a la falta de dispositivos asequibles y precisos capaces de proporcionar lecturas al controlador de vuelo a una velocidad que daría lugar a correcciones en tiempo real. Como se verá más adelante con mayor detenimiento, varios dispositivos son utilizados en la actualidad para la medición de la altitud o altura. Todos ellos presentan ventajas e inconvenientes:

- El sistema GPS (Global Positioning System) no es lo suficiente preciso y su aplicación en entornos indoor está limitada.
- Los sensores ultrasónicos se ven muy afectados por la dispersión que sufren dependiendo de las características de la superficie a detectar.
- Los infrarrojos tienen problemas de calibración, color y reflectividad.

- El barométrico es menos preciso y está sujeto a cambios en la velocidad del aire, la presión y la climatología.
- Los sensores de tipo láser tienen un elevado precio en el mercado. Además, son dispositivos pesados y de gran tamaño.

Como consecuencia, surge la necesidad de encontrar una solución íntegra, precisa y asequible a esta situación. Un instrumento ligero y confiable que sería útil en aplicaciones civiles y de ocio personal. Son varios los enfoques que se han planteado como medida a esta problemática.

Uno de ellos, de los más investigados, consiste en la estimación de la altura o altitud mediante un algoritmo de fusión de diferentes sensores. Combina los datos disponibles para producir información de confianza, dando como resultado una minimización del nivel de tolerancia para la altura estimada. Entre los modelos más comunes se encuentra la fusión de sensores barométricos y GPS, o sensores láser y ultrasonidos.

Otro trabajo significativo llevado a cabo consiste en la aplicación de dos o más sensores del mismo tipo. Éste combina los datos disponibles mediante diferente tipo de filtrados y calibraciones previas para mejora así la fiabilidad de las medidas. Este Trabajo de Fin de Grado lo que pretende es exponer, también, una solución rigurosa y asequible a esta problemática: el desarrollo de un sistema de ayuda al aterrizaje autónomo basado en la medición de la altura mediante los sensores láser VL53L0X.

Existen varios modelos cuando de UAVs se habla. Los más destacados son los denominados de ala fija y multirrotor. En el área de lo civil y ocio personal los más utilizados, sin ninguna duda, son los multirrotor, especialmente los cuadricópteros. Es por ello, que el modelo estructural seleccionado, el *Prototipo*, es el El Tarot FY450. Se trata de una estructura de buena calidad con un precio asequible alrededor de los 15 €. Está constituido por cuatro brazos y dos soportes, inferior y superior, y su construcción es muy sencilla.

Así pues, el enfoque principal del problema se fija en diseñar un sistema de estimación de la altura para poder determinar zonas donde el aterrizaje del cuadricóptero Prototipo es viable y seguro, y donde no. Esto se consigue a través de un modelo basado en los sensores láser VL53L0X de bajo coste y el análisis de las ondas reflejadas producidas por el sensor. Se genera un plano formado por cuatro puntos (cada punto de medición se sitúa en el extremo

de cada uno de sus brazos) donde el aterrizaje del UAV es posible y seguro.

Como se ha mencionado, el sensor principal utilizado es el VL53L0X, un sensor láser cuyo funcionamiento se basa en el principio del tiempo de vuelo (ToF). Se trata de un sensor de bajo coste que proporciona lecturas de rango relativamente precisas, si no se tiene en cuenta la incertidumbre angular y las reflexiones difusas. Se utilizan un total de cuatro sensores de este tipo, montados en cada uno de los brazos del Prototipo. Es muy importante situar dichos sensores en un espacio donde no reciban interferencias de los otros sensores, donde se encuentren completamente paralelos a la superficie y separados entre sí por la misma distancia. La aplicación trabaja para un plano horizontal con y sin obstáculos en su interior. En el caso de haber obstáculos, el sensor estima si dichos obstáculos son más altos que las patas de aterrizaje del Prototipo, momento en el cual se interrumpe el procedimiento de aterrizaje.

Además, para complementar la medida de la altura, se utiliza otro dispositivo: el sensor de ultrasonidos HC-SR04, donde transmisor y receptor están construidos en conjunto para mejorar su precisión. Se sitúa en el centro para evitar perturbaciones con los otros cuatro sensores y para evitar la no detección de obstáculos localizados justamente en el centro del Prototipo. Además, presenta una utilidad específica en alturas de rango mayor donde dichos sensores láser no presentan precisión.

El desarrollo de todo el sistema electrónico es posible gracias a la conocida placa de desarrollo Arduino UNO. Ésta se encarga de coordinar y procesar los datos obtenidos a través de los sensores para determinar si el aterrizaje es viable o no. El usuario obtiene esta información gracias a la iluminación de dos LED que indican si el aterrizaje es seguro, LED verde, o inviable, LED de color rojo. En esta ocasión, el Prototipo no presenta un sistema complementario de aviónica que ayude y guíe durante la navegación y maniobras de despegue y aterrizaje. Esto es debido a que el objetivo principal es general un sistema de medición de la altura fiable y preciso y no el diseño del sistema de control de un UAV.

El sistema ha sido ensamblado y diseñado con motivo de la realización del Trabajo de Fin de Grado en el Laboratorio de Electrónica del Departamento de Ingeniería Electrónica en la Universidad Politécnica de Valencia.

## 1.2. Objetivos

El presente Trabajo Final de Grado tiene como objetivo principal la producción del sistema electrónico necesario para desarrollar un método de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser.

Es, por tanto, tarea de este Trabajo proporcionar mediciones de la distancia a un objeto o superficie de manera eficiente y precisa a través de los sensores láser VL53L0X. De esta forma, se pueden determinar zonas, con o sin obstáculos, donde el aterrizaje del cuadricóptero es viable. Durante el desarrollo del Trabajo varios son los objetivos propuestos:

- Analizar los diferentes dispositivos electrónicos utilizados en la actualidad para medir distancias y realizar la comparación entre ellos, mostrando sus ventajas e inconvenientes.
- Investigar acerca de la nueva tecnología basada en sensores láser de bajo coste y analizar su implementación en diferentes aplicaciones aeronáuticas.
- Describir de forma detallada el hardware y software que conforman el sistema diseñado para conseguir el máximo rendimiento de todos los componentes.
- Caracterizar correctamente todos los sensores, láser y ultrasonidos, mediante diferentes pruebas de calibración para conseguir la máxima fiabilidad en la medida.
- Proponer diferentes líneas de desarrollo futuras para conseguir un sistema de ayuda al aterrizaje basado en mediciones de la altura preciso y asequible.

### 1.3. Marco teórico

Como se ha mencionado con anterioridad, el objetivo principal de este Trabajo es desarrollar un sistema de ayuda capaz de detectar zonas viables para el aterrizaje autónomo de un cuadricóptero a través de sensores láser y la medición de distancias. Se trata de un nuevo planteamiento a la problemática actual de diseñar sensores fiables, precisos y asequibles capaces de proporcionar lecturas rápidas de la altura o altitud en tiempo real.

Para entender el porqué del enfoque del Trabajo es necesario identificar primero que teorías y modelos fundamentales existen en relación a la medida de la altitud o altura en vehículos aéreos. A través de una descripción de los diferentes dispositivos y sensores utilizados para tal proceso, se puede comprender uno de los problemas principales del aterrizaje autónomo: la correcta y precisa medida de la distancia a la superficie donde se efectuaría el aterrizaje y la detección de los obstáculos existente en dicha zona.

Entre los dispositivos más utilizados para tal propósito se encuentran: el sensor barométrico, ultrasónico, sensor de infrarrojos, GPS y los dispositivos de medición láser.

#### **SENSOR BAROMÉTRICO**

El sensor barométrico es uno de los más comunes y conocidos de todos los sensores destinados a medir la altitud. En realidad, se trata de un instrumento que mide la presión externa relativa a un valor de referencia interno. Por tanto, la altitud es determinada de forma indirecta gracias a la medición de estas variaciones de presión.

Los sensores de presión se fabrican generalmente con materiales piezoeléctricos, materiales que tienen la peculiar característica de deformarse bajo un campo eléctrico o de generar un campo eléctrico cuando se deforman.

El principio de funcionamiento del barómetro consiste en utilizar la relación entre presión atmosférica, temperatura y altitud. Para calcular los cambios de altitud, se utiliza la conocida fórmula que implica un cambio en la cantidad de presión atmosférica, temperatura y el modelo estándar de la troposfera:

$$P_h = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$$

Donde,

$P_h$  : presión atmosférica de la altitud correspondiente [Pa],  
 $P_0$  : presión atmosférica al nivel del mar ( $1.01325 \times 10^5$  [Pa]),  
 $\mu$  : densidad del aire (0.0289644 [kg/mol]),  
 $g$  : aceleración gravitacional (9.81 [m/s<sup>2</sup>]),  
 $h$  : altitud [m],  
 $R$  : constante del gas (para aire: 8.3144621 [J/(mol K)]),  
 $T$  : temperatura [K].

Después de tener en cuenta el modelo estándar de la troposfera, la ecuación para estimar la altitud es la siguiente:

$$h = (T_C + 273,15) \left( 1 - \left( \frac{P_h}{P_0} \right)^{0,190263} \right)$$

Donde  $T_C$  es la temperatura en °C.

La presión atmosférica disminuye a medida que incrementa la altura desde el suelo terrestre, debido a la menor masa de aire existente. Sin embargo, esta relación no es lineal, y se ve afectada por varios parámetros, como la temperatura y la climatología local. Es por ello, que los sensores barométricos suelen referirse al llamado Modelo de Atmósfera Estándar Internacional (ISA). Este modelo aproxima la atmósfera a una latitud de 45°, presión a nivel del mar de 1 atm, temperatura de 15 °C, densidad 1.225 Kg/m<sup>3</sup>, y una disminución de la temperatura de 6.5 °C por kilómetro aproximadamente.

Por tanto, la altitud absoluta estimada fuera del modelo ISA puede variar significativamente debido a las condiciones climáticas locales. Por lo general, la altitud barométrica se reajusta en el momento del despegue (presión de referencia), con el fin de hacer frente a las altitudes relativas con respecto a la presión local del suelo, o se compara con un barómetro de suelo local para tener una mejor estimación de la altura real sobre el nivel del suelo.

En este sentido, su funcionamiento está condicionado a los cambios meteorológicos, y dependiendo de las características del sensor, se podrán com-



pensar o no las variaciones de presión provocadas por el clima. Así pues, la presión atmosférica en un lugar no es constante y varía según las latitudes en que se encuentre. La velocidad de avance del UAV afecta también a la lectura de altitud, ya que el movimiento perturba la distribución de la presión alrededor del vehículo. Además, presentan un funcionamiento irregular si el cambio de altitud es muy brusco, ya que tardan en responder y captar la presión atmosférica.

Desde la perspectiva de ser una medida de la altitud derivada de un modelo de atmósfera estándar a partir de la presión barométrica, se puede determinar que la medición no presenta una elevada precisión.

Para mejorar esta situación, en la mayoría de las ocasiones, estas mediciones deben ser filtradas para reducir el ruido y aumentar la fiabilidad. Otra opción consiste en la fusión de la información de dos sensores, una de ellos el barométrico, en forma de filtro ponderado para aumentar la precisión y fiabilidad de la medición de altitud para UAV.

En definitiva, los sensores barométricos suelen ser muy baratos, miniaturizados y ampliamente utilizados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la medición de la altitud con sensores barométricos tiene un error significativo debido, principalmente, a las variaciones de la presión atmosférica con respecto a la climatología y localización. Además, su uso en aplicaciones indoor está muy limitado, ya que en estos espacios las variaciones de presión son casi imperceptibles y los sensores requieren una calibración adecuada y exhaustiva.

## **SENSOR ULTRASÓNICO**

El sensor de ultrasonidos es un dispositivo capaz de medir la distancia a un objeto mediante el uso de ondas sonoras y la evaluación del eco recibido. Básicamente, consta de un emisor que genera una onda de sonido a una frecuencia específica, y de un receptor que escucha esa misma onda después de rebotar contra el objeto cuya distancia se quiere medir. Al registrar el tiempo transcurrido entre la generación de la onda y la recepción de la misma, y conociendo la velocidad del sonido, es posible calcular la distancia entre el sensor y el objeto.

La principal ventaja de un sensor ultrasónico es su funcionamiento en condiciones adversas, ya que no se ve afectado ni por el color del blanco, ni por la luz solar, ni por el polvo atmosférico. Son sensores de alta frecuencia y potencia de penetración que les permite detectar con precisión los obstáculos que se encuentren paralelos a su superficie. Además, son sencillos de utilizar y no suponen ningún peligro para personas, equipos u objetos cercanos. Asimismo, se trata de un sensor con una gama amplia de precios en el mercado, que va desde los 5 € hasta los 300 €. No obstante, por un precio muy reducido se puede obtener un sensor ultrasónico preciso y fiable.

En términos generales, aunque estos sensores proporcionan una medición de la distancia con adecuada resolución, todavía existen varias desventajas comunes en todos ellos que se han de tener en cuenta a la hora de diseñar y programar un sistema basado en sensores ultrasónicos.

En este sentido, existen dos desventajas principales en los sensores ultrasónicos. La primera es el cambio en la sensibilidad en función del ángulo del haz, es decir, en función del tamaño del cono de ondas ultrasónicas. Éste es mucho más ancho al final, por lo que para una mayor altitud existe la amenaza de detectar más objetos bajo la plataforma de vuelo.

La segunda está relacionada con los errores en la lectura a causa de la inclinación del haz (véase Figura 1). Este hecho se produce cuando la onda de sonido rebota en el objetivo, pero, debido a la inclinación del sensor con respecto a éste, se desvía sin llegar a ser percibida por el receptor. Para minimizar este error y obtener un rendimiento preciso, el sensor debe montarse de forma perpendicular al suelo.

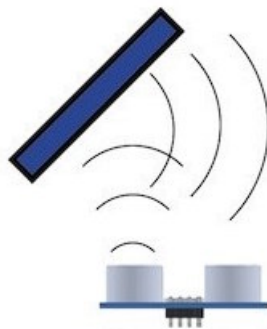


Figura 1: Error de detección del sensor ultrasónico

Al igual que ocurre en otro tipo de sensores, la distancia máxima y el tamaño del objetivo son también una limitación para los sensores ultrasónicos. Si el objeto fuese demasiado pequeño, es posible que no refleje la suficiente onda sonora como para ser percibido. Además, ciertos objetos de materiales suaves como telas, alfombras, paños, césped... pueden absorber la onda sonora en su totalidad y no ser detectados con precisión.

En ocasiones, la precisión del sensor ultrasónico puede verse afectada también por el cambio en la temperatura y humedad del aire en el que se utiliza. Sin embargo, para la mayoría de los casos de uso, este cambio suele ser despreciable.

En conclusión, los sensores de ultrasonido son fáciles de configurar y pueden ser encontrados en el mercado a un buen precio en relación con su calidad (precisión). Este hecho promueve que sean muy comúnmente utilizados para medir distancias. Sin embargo, cuando se exige obtener la máxima cantidad de datos de un entorno con una alta precisión, como sería el caso de un aterrizaje autónomo, los sensores ultrasónicos, por sí solos, son incapaces de cumplir este requerimiento.

## **SENSOR INFRARROJO**

El sensor de infrarrojos es un dispositivo basado en un sistema de emisión/recepción de radiación lumínica en el espectro de los infrarrojos. Se trata de uno de los sensores más ampliamente utilizado para la medición de la distancia en el corto rango (50 - 80 cm) y la detección de obstáculos debido, entre otros, a su reducido precio en el mercado.

Son sensores sencillos constituidos, de forma habitual, por un emisor LED de luz infrarroja y de un receptor fotodiodo que percibe la luz reflejada por el posible obstáculo. Suelen venir acompañados de un condensador para reducir los ruidos en la señal de alimentación como consecuencia de la emisión del infrarroja. Además, dado que proporcionan un valor analógico en su salida en función de la posición en la que el rayo de luz impacta, se proporciona una placa de medición estándar que permite obtener la lectura como un valor digital.

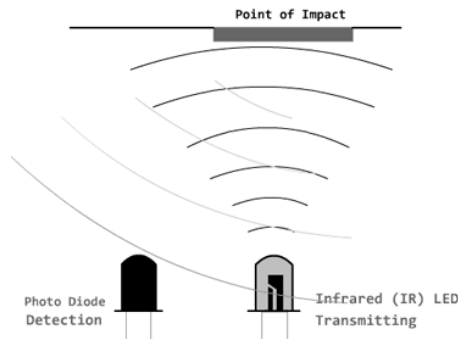


Figura 2: Principio de funcionamiento de un sensor IR

Su principio de funcionamiento, como se muestra en la Figura 2 consiste en detectar la presencia de un objeto y estimar la distancia a él a partir de la cantidad de energía recibida tras rebotar la luz sobre dicho objetivo. Funciona mediante el principio de triangulación, el haz de luz incide con un ángulo diferente en función de la distancia al objetivo. El tipo de detección que realiza es, por tanto, de tipo direccional; es decir, sólo son capaces de detectar objetos que se encuentran enfrente del propio sensor.

Así, uno de los principales inconvenientes de esta técnica de medición es que el ángulo de incidencia apenas varía para grandes distancias, con lo que el sensor es poco sensible en largo alcance. Además, la cantidad de luz infrarroja recibida depende también del color, material y forma del obstáculo. No son capaces de detectar correctamente superficies oscuras, ya que únicamente reflejan una mínima cantidad de luz, por lo que no disponen de una precisión suficiente para proporcionar una estimación de la distancia al obstáculo.

El sensor de infrarrojos presenta, también, el inconveniente de ser sensible a la luz ambiente como consecuencia de que los rayos de sol emiten en el espectro de la luz infrarroja. Por este motivo, es habitual utilizar estos sensores en escenarios con iluminación artificial (interiores), pero no tanto en aplicaciones de tipo outdoor.

En definitiva, los sensores infrarrojos son sensores baratos y sencillos de utilizar. Sin embargo, se ven muy afectados por el color, material, forma y posición del objetivo cuya distancia se quiere conocer; por lo que no pueden ser utilizados para obtener la altura de manera precisa ni en aplicaciones indoor ni en aplicaciones outdoor.

## GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

El GPS (Global Positioning System) es sin duda uno de los sistemas de navegación más famosos y utilizado hoy en día para calcular la ubicación 3D del receptor en longitud, latitud y, también, en altitud. Fue desarrollado e instalado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y permite determinar en todo el globo terráqueo la posición de un vehículo, persona u objeto con una precisión de unos pocos metros.

El sistema GPS se sirve de una red de 24 satélites en órbita sobre la Tierra, a 20 000 km de altitud aproximadamente, con trayectorias sincronizadas para poder cubrir toda la superficie terrestre. Para determinar la posición utiliza el método de la trilateración inversa, basado en medir la distancia de cada satélite al punto de referencia. Para ello, el receptor localiza un mínimo de 3 satélites y calcula el tiempo que tarda en llegar la señal GPS. Una vez conocidas las distancias y la posición de cada uno de los satélites, se obtiene la posición o coordenadas absolutas del punto de referencia.

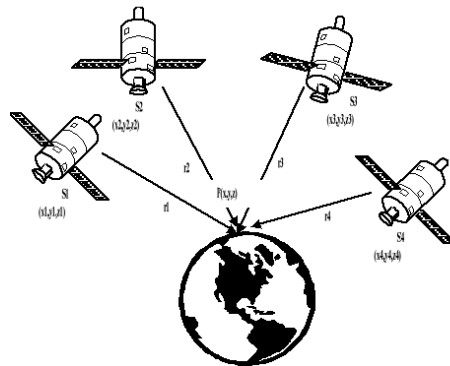


Figura 3: Método de localización GPS de trilateración inversa

De esta forma, aunque geoméricamente la posición pueda ser estimada únicamente a partir de tres satélites, se necesitan un mínimo de cuatro (véase Figura 3 para estimar la variable tiempo. El error de tiempo es, por tanto, un parámetro que perjudica la estimación de la posición de manera fiable, ya que los satélites son conducidos por relojes atómicos muy precisos mientras que los receptores GPS disponibles en el mercado no.

Otro aspecto a tener en cuenta, descuidando los efectos ionosféricos y troposféricos, es que la señal de los satélites GPS tiene una precisión fija. Por lo tanto, la geometría relativa del receptor desempeña un papel muy importante en la determinación de la posición y tiempo de manera precisa. Para medir dicha precisión de posicionamiento se utiliza un índice conocido como DOP (Dilution Of Precision), índice que puede ser posteriormente utilizado para ponderar los datos a través de, por ejemplo, un filtro de Kalman.

La navegación por satélite es poderosa y ampliamente utilizada, aunque representa en la medida de la altitud uno de los puntos más débiles de toda la navegación del UAV. Son varios los factores que afectan a la calidad de los datos obtenidos, tales como: errores propios del satélite, errores en la recepción de los datos, o, incluso, errores provenientes del medio de propagación. Además, en lo referente a las aplicaciones indoor y la medición de la altura absoluta, el GPS pierde por completo su utilidad dada la poca precisión de la que dispone en este tipo de escenarios.

En resumen, se trata de un sistema que no siempre es fiable y la altitud estimada por los sensores GPS suele ser muy imprecisa en comparación con la posición horizontal (latitud / longitud), llegando a alcanzar valores de 10 y 15 metros. Por ello, para la medida de la altitud en un UAV, es habitual el uso de otros dispositivos con diferentes principios de funcionamiento (barométrico, ultrasónico, infrarrojos. . .) para conseguir una medida robusta y precisa mediante diferentes métodos de fusión de sensores.

## **SENSOR LÁSER**

Un láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es un dispositivo óptico que genera un haz luminoso gracias al efecto de la mecánica cuántica denominado emisión estimulada. Este efecto supone una estimulación eléctrica o térmica de los átomos, moléculas o iones que conforman un material. Una de las características principales de un láser es su direccionalidad, es decir, es un rayo recto y concentrado. Se diferencia por su longitud de onda y por su intensidad; es un haz de una sola frecuencia y monocromático. Además, otra característica remarcable, es su coherencia, tanto espacial (mantiene un tamaño pequeño al transmitirse) como temporal (concentra la emisión en un rango espectral muy estrecho).

Cuando se habla de dispositivos capaces de medir distancias gracias a la emisión de un rayo láser, se pueden encontrar varios términos: telémetro láser, distanciómetro láser y los sensores láser. La diferencia entre ellos viene dada por la capacidad de medir diferentes rangos, por los principios de funcionamiento que emplean y por su aplicación más común. Habitualmente, los telémetros se utilizan para largas distancias (hasta 1000 metros) donde la precisión no es un factor importante, los distanciómetros para distancias de hasta 200 m con una elevada precisión, y los sensores para distancias cortas donde la precisión milimétrica adquiere importancia.

El método utilizado depende de la precisión y la distancia máxima requerida por el sistema. Entre los principales métodos se encuentran la triangulación y el método basado en el principio del Time-Of-Flight (ToF). Dado que el Prototipo ha sido diseñado para una aplicación donde interesa medir distancias de forma precisa en un rango corto (aterrizaje), se hace especial reseña a los sensores láser.

Los sensores láser, basados en el principio del ToF, emiten un estrecho haz que viaja hacia el objeto cuya distancia se quiere conocer. Básicamente, su principio de funcionamiento consiste en medir el tiempo que tarda la luz láser en viajar desde el sensor hasta el objetivo y volver de nuevo al receptor después de ser reflejado por dicho objeto o superficie.

Una de las principales ventajas es que, debido a la alta velocidad de la luz, el rayo es devuelto en muy poco tiempo, lo que permite hacer un barrido 2D o 3D para obtener más datos del entorno. Se tratan, por tanto, de sensores con altos niveles de procesamiento en tiempo real. Además, al tratarse de una medida directa de la distancia, la precisión es un requisito que se cumple; al contrario que en las medidas indirectas. En definitiva, son sensores muy precisos y direccionales, que se muestran invariantes ante la mayoría de perturbaciones.

Sin embargo, son sensores que también presentan varias desventajas. Una de las principales es que el pulso láser debe ser de suficiente intensidad para que sea capaz de ir y volver después de ser reflejado y el receptor deber ser también un fotodiodo con una lente de buena calidad. Ambos factores ocasionan que los sensores láser tengan un precio muy elevado en el mercado,

Otra problemática tiene que ver con las condiciones medioambientales: cuando hay lluvia, nieve o niebla, la luz láser puede rebotar de manera inco-

recta en el objetivo y ofrecer mediciones de la distancia poco fiables. Además, tampoco pueden detectar objetos o superficies que reflejen la luz láser, tales como ventanas, objetos cromados? En definitiva, existen un gran número de dispositivos láser utilizados para medir distancias de diferentes rangos y utilizando diferentes principios de funcionamiento. Son capaces de proporcionar mediciones muy precisas de la altura sobre el suelo, independiente del tipo de superficie. El problema primordial es que su precio es muy elevado en el mercado, así como su tamaño y peso. Dentro del análisis de los sensores láser, es necesario hacer especial hincapié en una tecnología basada en ellos: el sistema LIDAR. El Prototipo basa la medición de su altura como sistema de ayuda para el aterrizaje autónomo en el sensor láser VL53L0X. La exhaustiva investigación del mismo surge como una idea de encontrar un sistema basado en la tecnología LIDAR, pero de bajo coste.

## ***LIDAR***

El sistema LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) es un dispositivo que permite determinar la distancia a un objeto o superficie utilizando un haz de láser pulsado. La distancia se determina midiendo el intervalo de tiempo entre la salida del impulso y su retorno de nuevo al sensor LIDAR.

Su principio de funcionamiento, en comparación con la avanzada tecnología de la que está compuesto, resulta bastante sencillo. El LIDAR envía un pequeño haz láser sobre una superficie u objeto y mide el tiempo que tarda la señal reflejada en incidir sobre el receptor. El equipo requerido para medir este tiempo necesita funcionar con una gran rapidez que sólo ha sido posible gracias a los avances en la tecnología informática. El cálculo básico consiste en medir la distancia que ha viajado un fotón de luz, hecho que resulta muy sencillo siendo conocida y constante la velocidad de la luz.

$$Distancia = \frac{Velocidad(luz) \cdot Tiempo}{2}$$

La diferencia entre un sensor láser convencional y un sistema LIDAR es que éste último envía un rayo láser hacia un espejo que oscila a una frecuencia muy elevada en un solo eje (véase Figura 4. A continuación, el espejo redirige este haz hacia una lente difusora que duplica el ángulo de orientación del propio haz en el otro eje (x, y).



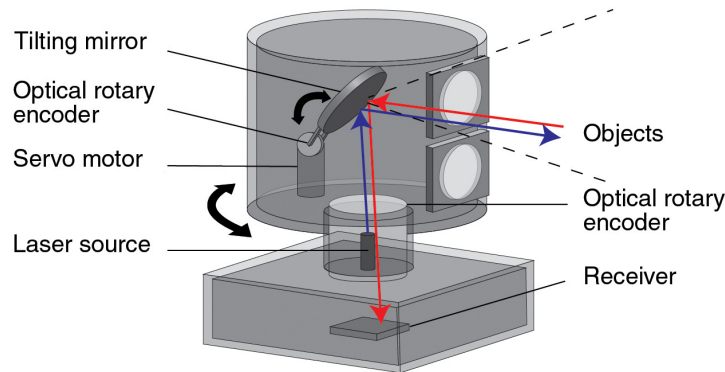


Figura 4: Estructura interna del sistema LIDAR

Cuando dicho haz alcanza a un objeto, su señal es reflejada y capturada por la lente receptora, que la redirige a su vez a la matriz de fotodetectores. El diodo láser sincroniza su pulsación con la del reloj para conseguir un escaneo formado por múltiples líneas de visión.

Por último, se digitaliza y procesa la señal reflejada. El array de fotodetectores segmenta cada señal en múltiples mediciones individuales para construir una matriz 3D formada, en la mayoría de las ocasiones, por más de 20000 puntos por segundo. Esto es posible, en aplicaciones aéreas, gracias al uso de otros sistemas como el GPS y la IMU. Se trata, por tanto, de una recreación en tres dimensiones de todo el entorno, como si de una recreación del mundo real por ordenador se tratase.

Pese a su gran potencial, el LIDAR no es una herramienta que funcione en soledad, sino que necesita otros dispositivos de sensorización para obtener medidas precisas y fiables. Principalmente, esos dispositivos son los que siguen:

- *Láser*: son categorizados por su longitud de onda. Los sistemas LIDAR empleados en aplicaciones aéreas utilizan, comúnmente, un láser pulsado YAG cuya emisión característica posee una longitud de onda de 1064 nanómetros. Emiten, por tanto, en el espectro de los infrarrojos. La mejora en la resolución es inversamente proporcional a la duración de los pulsos; a pulsos más cortos, mejor resolución. Esto es posible siempre que el receptor y la electrónica tengan suficiente ancho de banda para hacer frente al aumento de flujo de datos.

- *Escáner y óptica*: el tipo de óptica determina la resolución y el rango que puede ser detectado por el sistema. Existen varios métodos de escaneo, cuya velocidad afecta a la velocidad de procesado de las imágenes.
- *Fotodetector y electrónica del receptor*: es el dispositivo que lee y registra la señal que se devuelve al sistema. Existen dos tipos principales de tecnologías de fotodetectores: los detectores de estado sólido, como los fotodiodos de avalancha de silicio (SPAD), y los fotomultiplicadores.
- *Sistemas de navegación y posicionamiento*. Cuando un sistema LIDAR se sitúa en una plataforma móvil, como un UAV, es necesario determinar la posición absoluta y la orientación del sensor. Dos dispositivos resultan imprescindibles en esta tarea: el GPS, que proporcionan información geográfica precisa con respecto a la posición del sistema, y una Unidad de Medición Inercial (IMU), que registra la orientación precisa del sensor en dicha ubicación.

Actualmente existen en el mercado una amplia variedad de sistemas LIDAR, basados en diferentes métodos de detección, diversos modelos de pulsos, distinto tipo de lentes, de procesador? Sin embargo, algo común en todos ellos es su elevado precio. En comparación con las primeras versiones de LIDAR, que llegaban a tener un precio alrededor de los 100000 euros por unidad, es evidente que el precio ha caído de forma exponencial. Aun así, se trata de un sistema caro cuyo precio mínimo en el mercado está en torno a los 200 €.

En conclusión, el LIDAR es actualmente una tecnología en desarrollo que va ganando fuerza en una múltiple cantidad de aplicaciones. Basada en la tecnología láser, se trata de un dispositivo altamente preciso capaz de medir distancias a los objetos cercanos y generar un mapa virtual de su entorno. Como dispositivo de medida de la altura y localización de obstáculos es capaz de procesar toda la información en apenas milisegundos y no se ve afectada por el color, tamaño o forma del objetivo.

La principal desventaja es su elevado precio, y es ahí donde el sensor en el cual esté basado el Prototipo tiene un papel importante. Gran parte de la investigación de este Trabajo de Fin de Grado está destinada a encontrar un instrumento ligero y preciso en distancias milimétricas que poder implementar en un UAV.

# Capítulo 2

## Diseño del sistema

En este segundo capítulo del presente Trabajo Final de Grado se explica de forma detallada el sistema diseñado. Se haya subdividido, a su vez, en tres secciones fundamentales: diagrama de bloques, hardware y software.

En términos generales, se comienza exponiendo el diagrama de bloques del sistema desarrollado, denominado como el Prototipo. En él, se encuentran todos los elementos que conforman el sistema, la interfaz de comunicación empleada entre la placa Arduino y los dispositivos conectados a ella, y sus conexiones mediante las correspondientes entradas y salidas.

A continuación, en la sección *2.2. Hardware*, se encuentra una exhaustiva descripción del hardware utilizado, concretamente de la placa Arduino UNO, del sensor láser VL530X y del módulo de ultrasonidos HC-SR04. Se describen sus principales características así como el principio de funcionamiento en que se basan, extraído todo ello de su correspondiente ficha técnica o *datasheet*. Dentro del análisis, se exponen también los beneficios y limitaciones, así como todo lo necesario para que su rendimiento sea el máximo posible.

Finalmente, en la sección *2.3. Software*, se expone el entorno de desarrollo integrado de Arduino (IDE), entorno que constituye el elemento principal del programa que gobernará el sistema diseñado. Así, mediante diagramas de flujo, se sintetiza el código del programa desarrollado (véase Anexo A) y todas las funciones que realiza.

## 2.1. Diagrama de bloques

Un diagrama de bloques constituye una representación gráfica del funcionamiento de un sistema. Viene expresado mediante bloques y las relaciones internas que se establecen entre ellos, así como por sus entradas y salidas correspondientes.

De esta forma, en la Figura 5 aparece representado el diagrama de bloques correspondiente al sistema desarrollado, denominado sistema Prototipo. En él aparecen representados todos los componentes que conforman el sistema (azul), sus protocolos de comunicación y los correspondientes pines de entrada / salida (rojo). Así, los componentes y sus conexiones con la placa Arduino UNO son los que siguen:

- Placa Arduino UNO Rev3: constituye el componente principal del sistema. Contiene el microcontrolador y la memoria flash donde se guarda y ejecuta el programa, así como todos los pines de entrada / salida donde se conecta el resto de elementos que conforman el sistema. Ejerce de maestro de la comunicación: da las órdenes y los dispositivos conectados a él realizan las acciones demandadas.
- Batería de 3000mAh: fuente de energía externa conectada a la placa mediante el puerto serie USB-B a 5V.
- Módulo láser VL53L0X: comunicación con la placa mediante el protocolo I2C. Los pines VIN, GND, SDA y SCL se conectan a los respectivos pines de la placa Arduino denominados de la misma forma. Al existir un total de cuatro dispositivos de este tipo, el pin XHUT de cada uno de ellos se conecta, respectivamente, a los pines 5, 6, 7 y 8.
- Módulo de ultrasonidos HC-SR04: comunicación con la placa Arduino UNO sin necesidad de establecer ninguna interfaz. Su conexión es a los pines GND y VIN (alimentación y masa respectivamente); y TRIG y ECHO a los pines digitales 3 y 4.
- LEDs: un total de dos LEDs, uno verde y otro rojo, se hayan conectado a la placa como salidas digitales a través de los pines 12 y 13 respectivamente.

## DIAGRAMA DE BLOQUES LÓGICO

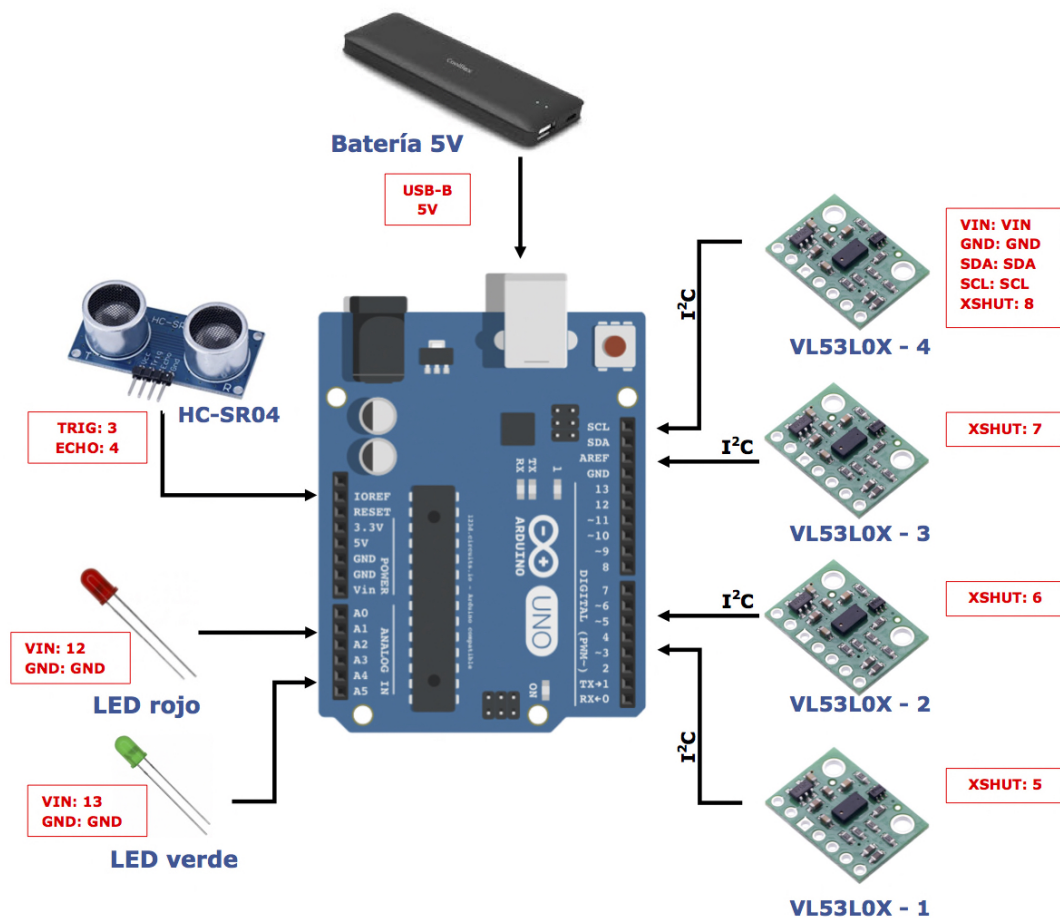


Figura 5: Diagrama de bloques lógico del Prototipo

## DIAGRAMA DE BLOQUES FÍSICO

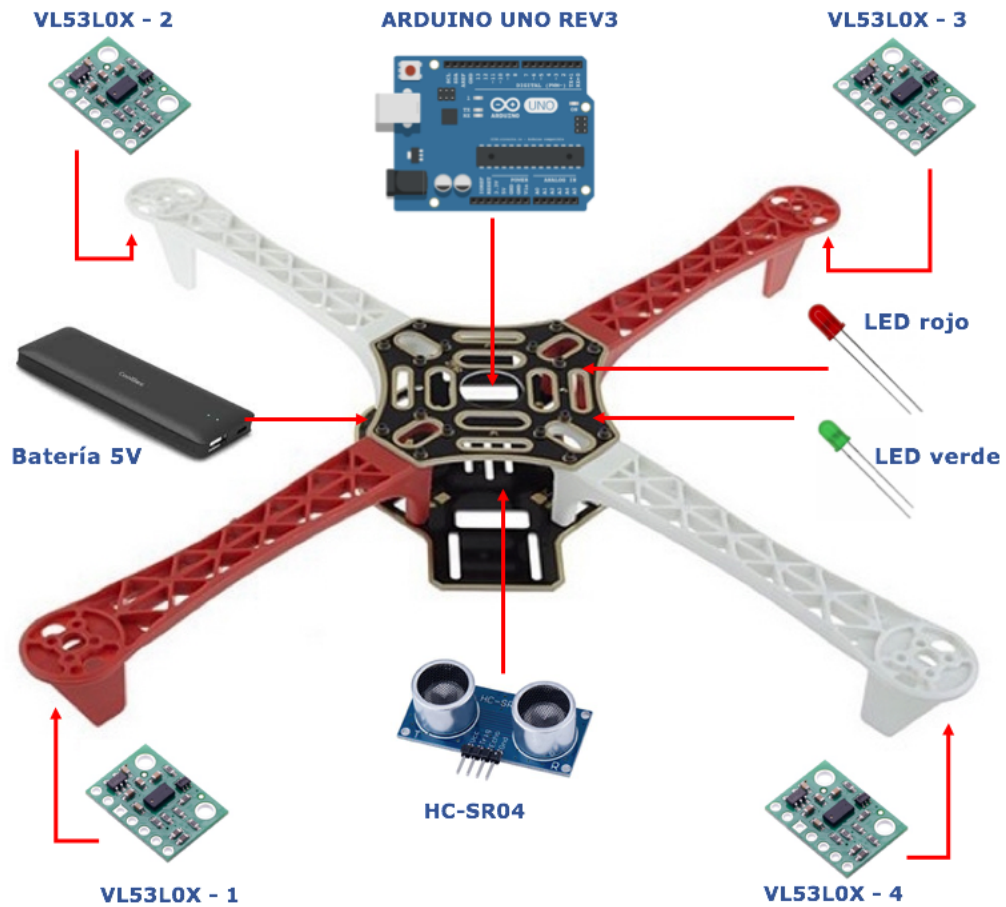


Figura 6: Diagrama de bloques físico del Prototipo

## 2.2. Hardware

Como se ha explicado con anterioridad, en esta segunda sección del *Capítulo 2*, se explica el hardware del cual está compuesto el sistema. Tres son los componentes fundamentales: la placa Arduino, el sensor láser VL53L0X y el módulo HC-SR04.

Se comienza con una detallada descripción del elemento principal del sistema, la placa Arduino UNO Rev3. Por dicho motivo, se explican en profundidad los elementos básicos que la componen: el microcontrolador, la memoria, y sus entradas / salidas. Además, para conocer sus limitaciones y obtener el máximo rendimiento, se describe también su alimentación y los protocolos de comunicación que emplea para la conexión con otros dispositivos.

A continuación, se expone con detalle también, el módulo en el cual está basado el presente Trabajo de Fin de Grado, el sensor láser VL53L0X. No se trata de un simple emisor láser, sino de un módulo que mediante el principio del Time of Flight es capaz de calcular la distancia a la que se encuentra un determinado objetivo. Actualmente, es el único módulo existente que presenta estas características en lo que a precisión, tamaño y precio se refiere.

Por último, se describe el dispositivo de ultrasonidos utilizado como un elemento añadido al sistema. Se trata de un módulo comúnmente utilizado para la medida de distancias que, en conjunción con otros dispositivos de medida, proporciona una buena precisión y estabilidad.

### 2.2.1. Arduino UNO

Arduino es una plataforma de electrónica de código abierto (open-source) cuyos principios son contar con software y hardware flexibles y fáciles de utilizar.



Figura 7: Logo de Arduino

La introducción de Arduino, en 2005, supuso un cambio en el mundo de la electrónica y los microcontroladores. Anteriormente, trabajar con microcontroladores, implicaba pagar cantidades considerables de dinero y complicados entornos de desarrollo. Arduino trajo consigo un nuevo escenario, ofreciendo un bajo coste en componentes y un entorno de desarrollo sencillo de utilizar.

En definitiva, Arduino es tanto software como hardware. La sencillez y compatibilidad están aseguradas en una plataforma hardware que no se limita únicamente a un microcontrolador integrado, sino también a todos los elementos necesarios para alimentarlo, hacerlo funcionar y conectarlo a un ordenador. En lo referente al software, el entorno de desarrollo de Arduino (IDE) está basado en el conocido lenguaje C. Además, no se debe olvidar la comunidad online que ha generado Arduino, donde miles de usuarios comparten sus ideas y proyectos con toda la comunidad.

Presentando atención al hardware de Arduino, el más sencillo consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador y una serie de puertos digitales y analógicos de entrada/salida. Hay disponible una gran variedad de placas de Arduino, utilizadas tanto para desarrollar elementos autónomos, como para conectarse a otros dispositivos o interactuar con otros programas.

El modelo más utilizado es el Arduino UNO (véase Figura 8), modelo que será empleado para el desarrollo del Prototipo.



Figura 8: Placa Arduino UNO Rev3



Se trata de una placa básica y barata basada en el microcontrolador AVR de 8 bits Atmega328P. Trabaja a una frecuencia de 16 MHz gracias al uso de un oscilador de cristal de cuarzo y ofrece una memoria de 32 KB. Además, incorpora cada uno de los componentes electrónicos necesarios para dar soporte al microcontrolador: 20 pines digitales y analógicos de entradas/salidas, conexión USB, power jack, entrada ICSP, etc. Otros periféricos ofrecidos por la placa incluyen puertos de comunicación serie, SPI e I<sup>2</sup>C, 2 interrupciones externas, un LED integrado (conectado al pin 13) y un botón de reset.

En la Tabla 1, adjuntada a continuación, aparecen resumidas las principales especificaciones técnicas de la placa Arduino UNO Rev3, cuyo conocimiento es necesario para el correcto funcionamiento de la misma.

<b>Feature</b>	<b>Detail</b>
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limit)	6-20 V
Digital I/O Pins	14
PWM Digital I/o Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz
LED BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tabla 1: Características técnicas del Arduino UNO Rev3

Dentro del análisis, es necesario desarrollar en profundidad las características del microcontrolador utilizado, la alimentación, memoria, entradas/salidas y los diferentes protocolos de comunicación que pueden ser utilizados.

## MICROCONTROLADOR

La placa Arduino UNO está basada en el microcontrolador ATmega328P (véase Figura 9), microcontrolador diseñado por la compañía estadounidense Atmel y perteneciente a la denominada familia AVR.

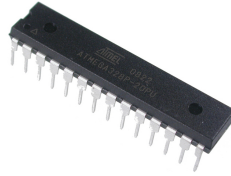


Figura 9: Microcontrolador ATmega328P

Un microcontrolador se define como un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de tres bloques funcionales principales: CPU, memoria y los periféricos de entrada/salida. Dichos bloques se conectan entre sí mediante grupos grupos de líneas eléctricas denominados buses.

En cuanto al ATmega328p, es un microcontrolador de 8 bits basado en una arquitectura tipo RISC. Tiene una frecuencia de 16 MHz, 32 KB de memoria flash y otras muchas características que se explican de forma más detalla a continuación. En la Figura 10 aparece representado el mapa de los pines del ATmega328p y su conexión con la placa Arduino UNO.

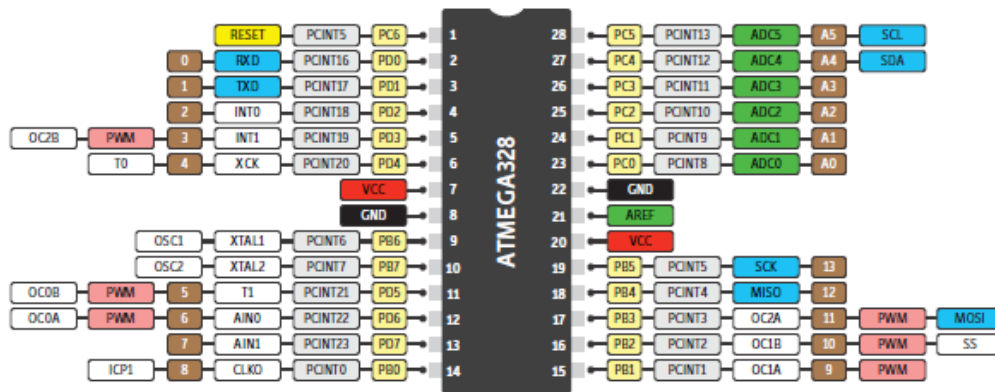


Figura 10: Mapa de pines del ATmega328P

## ALIMENTACIÓN

La placa Arduino UNO puede ser alimentada a través de la conexión USB tipo B que dispone o a través de una fuente de alimentación externa. A su vez, de tratarse de una fuente externa, la energía puede venir desde un adaptador AC - DC o desde una batería, gracias al conector jack presente también en la placa.

Arduino es capaz de trabajar con una alimentación externa de 6V a 20V, pero es recomendable utilizar un rango de voltaje de entrada de 7-12 V. Si es alimentada con menos de 7V, el pin de 5V suministrará menos de este valor y la placa pasará a tener un estado inestable. Por el contrario, si se usan más de 12V, el regulador de voltaje interno podría sobrecalentarse y dañar la placa.

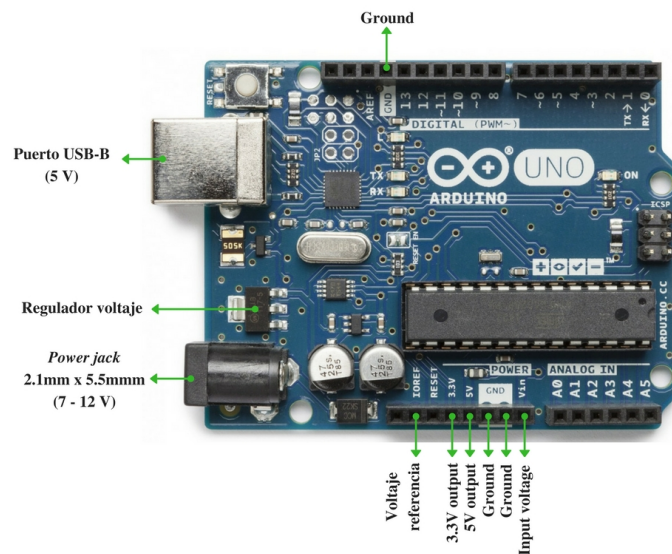


Figura 11: Pines de alimentación placa Arduino UNO

Los pines de alimentación son los que siguen:

- **Vin.** El voltaje es suministrado a través de este pin cuando se está utilizando una fuente de alimentación externa (en lugar de los 5V proporcionados por el conector USB o de otra fuente de energía regulada).

Este pin también puede ser utilizado para acceder al voltaje suministrado a través del power jack.

- **5V.** Este pin proporciona un voltaje regulado de 5V, como su nombre indica. Suministrar voltaje a través del pin de 5V o de 3.3V no es recomendable ya que puentea el regulador y podría dañar la placa. Por ello, y siempre que sea posible, se recomienda utilizar el pin  $V_{in}$  o el conector USB.
- **3.3V.** Suministra un voltaje de 3.3V generado por el regulador interno con una corriente máxima de diseño de 50 mA.
- **GND.** La placa cuenta con un total de 3 pines de toma a tierra o ground (0V)
- **IOREF.** Este pin proporciona el voltaje de referencia con el cual el microcontrolador opera cuando se está utilizando una placa de extensión (denominada shield). Si está correctamente configurada, puede leer el voltaje del pin IOREF y seleccionar la fuente de alimentación apropiada o habilitar el traductor de voltaje en las salidas.

En resumen, y como nos indica su documentación técnica, la placa Arduino UNO puede ser alimentada de forma estable a través del power jack (7-12 V), del conector USB (5V) o del pin  $V_{in}$  (7-12 V). Para el diseño del Prototipo se opta por utilizar una batería conectada a través del puerto USB.

## MEMORIA

Existen tres tipos de memoria en el microcontrolador ATmega328P utilizado por la placa Arduino UNO: memoria flash de 32 KB, memoria SRAM de 2 KB y memoria EEPROM de 1 KB (véase Figura 12).



Figura 12: Esquema de la memoria placa Arduino UNO

En términos generales, los programas se almacenan en la memoria Flash y los datos se almacenan en la SRAM y EEPROM. A continuación, se procede a desarrollar de manera más detallada cada uno de estos tipos de memoria.

### ***Memoria Flash***

La memoria flash se utiliza para almacenar el sketch ya compilado, es decir, para almacenar la imagen del programa que se sube y ejecuta en la placa, así como cualquier información inicializada. Esta memoria, además, es no volátil, por lo que los datos que hay en la misma permanecen invariables pese a dejar de ser alimentada eléctricamente.

El tamaño de la memoria flash de la placa Arduino UNO es de 32 KB, de los cuales 0.5 KB están ocupados por el bootloader (véase Figura 13). En este sentido, no se trata de una memoria de tamaño excesivamente grande, por lo que se deben desarrollar los programas de forma optimizada y evitar repetir líneas de código innecesarias para ganar en rapidez de ejecución.

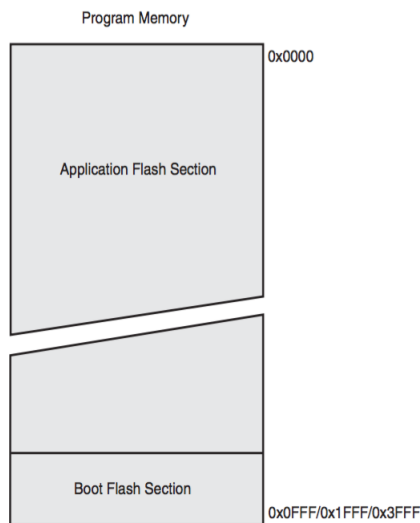


Figura 13: Memoria Flash de la placa Arduino UNO

En definitiva, es posible ejecutar código de programa desde la memoria flash, pero los datos de su código de ejecución no se pueden modificar desde la misma; para ello primero se deben copiar en la SRAM.

## Memoria SRAM

La memoria SRAM (Static Random Access Memory) es el espacio donde el sketch (programa) crea, almacena y manipula las variables al ejecutarse. Es de tipo volátil, por lo que la información guardada será eliminada al perder la alimentación.

El tamaño de la memoria SRAM en la placa Arduino UNO es de 2KB, es decir, 2048 bytes. Se trata de un tamaño muy pequeño, por ello se vuelve a incidir en la idea de optimizar al máximo los programas y no abusar de las variables tipo char (cada carácter utiliza un byte). Así, la SRAM del ATmega328p se distribuye de la siguiente forma:

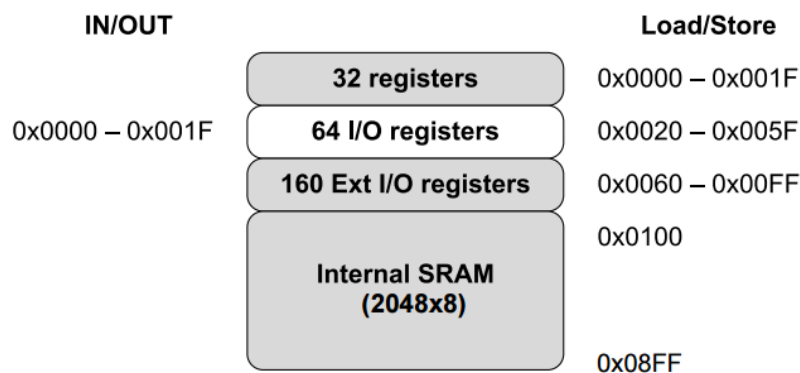


Figura 14: Memoria SRAM placa Arduino UNO

Las primeras 32 localizaciones de la memoria son el fichero de registros (*Register File*). Estos registros, de propósito general, se utilizan para almacenar los datos temporales y los resultados creados durante el funcionamiento de la ALU (Unidad Aritmético-Lógica).

Las siguientes 64 localizaciones es la *standard I/O memory* y las siguientes 160 la *Extended I/O memory*. Estos registros I/O, localizados en las direcciones 0x20 a 0xFF, tienen un propósito predeterminado durante el proceso de fabricación y no se pueden cambiar, ya que afectaría directamente al funcionamiento del microcontrolador. Por último, las siguientes 2K localizaciones son la memoria interna de la SRAM. Es posible acceder a todos estos registros mediante cinco modos de direccionamiento diferentes.

Esta memoria es de uso exclusivo para el programa en ejecución, de modo que si se quedase sin espacio el programa de Arduino comenzaría a fallar de forma imprevista.

### ***Memoria EEPROM***

La memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory), es un tipo de memoria de sólo lectura, programable y borrable eléctricamente; como bien indica su nombre. Puede ser utilizada para almacenar valores e información a largo plazo, ya que se trata de una memoria no volátil que mantiene los datos incluso después de un reset.

El tamaño de la EEPROM para el microcontrolador ATmega328P del Arduino UNO es de 1KB (1024 bytes). En esta ocasión, la placa Arduino permite añadir módulos de memoria EEPROM externa de mayor tamaño, de manera que el reducido espacio de memoria deja de ser un problema.

Puede ser leída y escrita desde el programa del microcontrolador o incluyendo en el sketch la librería correspondiente. Se debe trabajar por direcciones y byte a byte en ambos casos, hecho que provoca que únicamente se pueden utilizar valores de 0 a 255 para esta memoria de 1 KB.

## **COMUNICACIÓN**

Existen diferentes protocolos de comunicación entre la placa Arduino y otros dispositivos o, incluso, entre dos placas Arduino. Los puertos serie son la principal forma de comunicar una placa Arduino con un ordenador. Los pines destinados a tal tarea en el Arduino UNO son los pines 0 (RX) y 1 (TX) de recepción y transmisión respectivamente.

Sin embargo, únicamente van a ser descritos en profundidad los protocolos de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) e I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), protocolos asíncronos que se encuentran dentro de la comunicación serie. Esto es así debido a que, actualmente, son las dos interfaces más utilizadas para la comunicación entre dispositivos, en especial, el protocolo I<sup>2</sup>C.

Además, este último protocolo es el utilizado para conectar los cuatro sensores láser VL53L0X en los cuales se basa el presente Trabajo con la placa Arduino UNO Rev3.

### ***SPI (Serial Peripheral Interface)***

El bus SPI (serial Peripheral Interface) es la segunda de las principales formas de comunicación disponibles en Arduino que se va a proceder a explicar, como en el caso anterior, sin excesivo detalle. Fue desarrollado por Motorola en el año 1980 y sus ventajas con respecto a otros sistemas hicieron que se convirtiera rápidamente en un standard de comunicación en el mundo de la electrónica. Su principal interés reside en el hecho de que una gran variedad de dispositivos y sensores disponen de esta interfaz como sistema de comunicación principal.

Este protocolo de comunicación presenta una arquitectura de tipo maestro-esclavo. El dispositivo maestro (un único dispositivo) puede iniciar la comunicación con uno o varios dispositivos denominados esclavos, y enviar o recibir datos de ellos de forma simultánea. A su vez, ningún dispositivo esclavo puede iniciar la comunicación ni intercambiar datos entre ellos directamente. La comunicación entre ambos se realiza en dos líneas independientes, una del maestro a los esclavos y la otra de los esclavos al maestro. La comunicación entre ambos se realiza en dos líneas independientes, una del maestro a los esclavos y la otra de los esclavos al maestro.

Otra característica de este sistema de transmisión es que se trata de un bus de tipo síncrono. El dispositivo maestro proporciona una señal de reloj para mantener a todos los dispositivos esclavos sincronizados, lo que reduce la complejidad del sistema. Se requiere también una línea adicional denominada SS para seleccionar el dispositivo esclavo con el que se va a realizar la comunicación de entre todos los que están conectados (véase Figura 15).

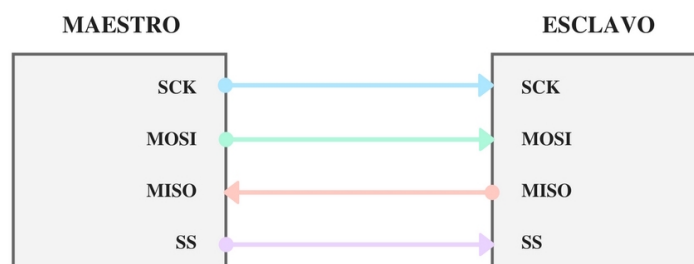


Figura 15: Arquitectura Maestro - Esclavo

En este sentido, se trata de un sistema de comunicación que requiere, como mínimo, cuatro líneas de transmisión:



- **MOSI** (Master-Out, Slave-In): comunicación del maestro al esclavo.
- **MISO** (Master-In, Slave-Out): comunicación del esclavo al maestro.
- **SCK** (Clock): señal de reloj generada por el maestro para sincronizar la línea de datos.
- **SS** (Slave Select): línea de selección del dispositivo esclavo.

Sin embargo, este sistema presenta la desventaja de requerir una línea (SS) por cada dispositivo esclavo. Aunque, en caso de disponer de múltiples dispositivos, también es posible adoptar una conexión en cascada. Así, su principio de funcionamiento es el que sigue:

1. La comunicación es iniciada siempre por el maestro, ya que éste es el encargado de generar y configurar la señal de reloj. Por ello, necesita saber de antemano si un esclavo va a devolver una respuesta y de que longitud. Además, la señal de reloj puede ser modificada haciendo uso de las propiedades de polaridad y fase; de manera que existen hasta cuatro modos de funcionamiento del reloj configurados gracias a los diferentes registros.
2. A continuación, el maestro selecciona al esclavo con el que se quiere comunicar poniendo la línea SS en nivel LOW.
3. Comienza la comunicación entre maestro ? esclavo bit a bit (en cada ciclo de reloj se transmite un bit) a través de la línea MOSI. El esclavo obtiene la información a través de este mismo pin, siendo común recibir el bit más significativo (MSB) en primer lugar.
4. Seguidamente, y si el maestro lo requiere, el esclavo envía información de vuelta a través de la línea MISO (comunicación Full-Dúplex). El maestro obtiene la información a través de este mismo pin, siendo, en esta ocasión, común recibir el bit más significativo en último lugar.

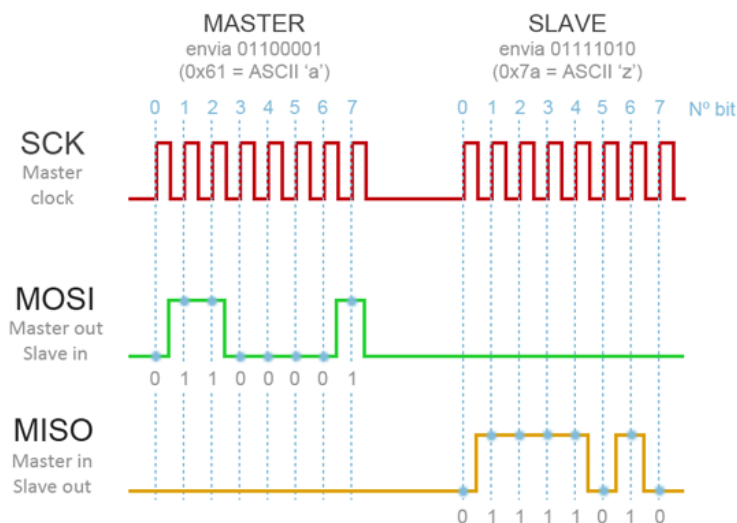


Figura 16: Arquitectura Maestro - Esclavo

De esta manera, se produce un envío y recepción de datos entre sistemas de forma continua y simultánea. Pese a tener una velocidad de transmisión de datos elevada y una interfaz de comunicación sencilla de utilizar, este protocolo no será utilizado para establecer la comunicación entre los sensores VL53L0X y la placa Arduino UNO. El sistema de comunicación empleado será, de hecho, el último de los principales protocolos de comunicación utilizado por Arduino, el bus I2C.

### *I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit)*

El estándar I2C, también denominado TWI, fue desarrollado por Philips en el año 1982 como método de comunicación interna entre sus dispositivos electrónicos. De forma progresiva, fue adoptado por otros fabricantes, hasta convertirse en uno de los protocolos de comunicación más utilizado en el mercado hoy en día.

Este protocolo I2C únicamente requiere de dos líneas de control para realizar una transmisión de datos bidireccional eficaz, es decir, únicamente requiere de dos cables para su funcionamiento; lo cual es una ventaja frente al bus SPI. Uno de estos cables es para la señal de reloj (CLK) y el otro para el envío de datos (SDA). A pesar de la simplicidad que presenta el sistema,

su funcionamiento es más complejo, así como la electrónica necesaria para implementarla.

Cada dispositivo conectado al bus dispone de una dirección interna única, que se emplea para acceder a los dispositivos de forma individual. Estas direcciones son de tipo hexadecimal e identifican que tipo de módulo es y para que se utiliza. El problema principal es que esta dirección de acceso, en la mayoría de las ocasiones, viene preestablecida por el fabricante. Este hecho ocasiona que, cuando se quieren conectar varios dispositivos del mismo tipo, todos presentan la misma dirección de acceso; por lo que será necesario cambiar dicha dirección.

### 2.2.2. VL53L0X

Como se ha explicado con anterioridad, en la problemática planteada sobre los diferentes dispositivos de medida existentes en el mercado, la mayoría de los escáneres láser en tiempo real tienen dos desventajas principales. La primera de ellas, es que son dispositivos de escáner (tanto en 2D, como en 3D) que funcionan en tiempo real, hecho que eleva enormemente su precio en el mercado. Además, la segunda de las desventajas es que suelen tener un tamaño excesivo y pesado como para poder integrarlos en un UAV.

Por ello, el presente Trabajo propone un dispositivo basado en la tecnología láser a un reducido precio y tamaño, a expensas de la pérdida de precisión y el procesamiento rápido y eficaz en tiempo real, el módulo láser medidor de distancias: VL53L0X.



Figura 17: Sensor VL53L0X de STMicroelectronics

El módulo láser VL53L0X (véase Figura 17) es un dispositivo de nueva generación capaz de proporcionar una medición precisa de la distancia a un objetivo sin importar cuál sea la reflectancia de dicho objeto, a diferencia de otras tecnologías tradicionales. Su principio de funcionamiento se basa, esencialmente, en la tecnología Time of Flight (ToF), es decir, en el cálculo de la distancia a partir del tiempo que tarda la luz en viajar hasta el objetivo y volver de nuevo al sensor. Concretamente, la tecnología utilizada se denomina FlightSense™, tecnología de segunda generación patentada por el propio fabricante (ST Microelectronics).

Las características principales de este sensor, según su ficha técnica o *datasheet*, aparecen resumidas, como se puede observar, en la Tabla ??.

<b>Feature</b>	<b>Detail</b>
Operating voltage	2.6 to 3.5 V
Operating temperature	-20 to 70 °C
Infrared emitter	940 nm
I <sup>2</sup> C	Address: 0x52
Size	4.40 x 2.40 x 1.00 mm

Tabla 2: Características técnicas del sensor VL53L0X

Entre dichas características, destaca el hecho de que el emisor láser es del tipo VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers), un láser semiconductor en los que la luz se propaga perpendicularmente al plano de la región activa con una longitud de onda de 940nm no perceptible por el ojo humano. Estos láseres consumen muy poca potencia y su fabricación resulta barato debido, entre otros aspectos, a su pequeño tamaño y a la estructura vertical que presentan. Sin embargo, para el correcto funcionamiento de los mismos, es necesaria la existencia de espejos de alta reflectividad que generan el haz circular de luz. Según indica el fabricante ST Microelectronics, este emisor se haya combinado con filtros internos de infrarrojos que permiten distancias más largas, mayor inmunidad a la luz ambiental y una mejor robustez antes cambios externos.

Puede medir distancias absolutas con precisión de hasta 2m si se utiliza en modo *Long Range*, y de hasta 1.2m en modo estándar. Además, cuenta con un avanzado microcontrolador integrado en el propio sensor para una medida de la distancia rápida y precisa, sin excesivos tiempos de cómputo.

El VL53L0X integra, también, una matriz de SPADs (Single-Photon Avalanche Diodos), un fotodetector de estado sólido de vanguardia utilizado en aplicaciones en las que los detectores tradicionales ya no pueden distinguir la diferencia entre señal y ruido (LIDAR, análisis de ADN, detección de moléculas individuales, etc.). Así, dicha matriz, constituye el receptor integrado de este dispositivo.

Por otra parte, es importante destacar que este sensor proporciona medidas de la distancia precisas independientemente de las características del objeto. Funciona con altos niveles de luz ambiente infrarroja, la distancia medida es independiente de la reflectancia del objetivo, y no se ve afecta-

do por el color o tamaño de los objetos a detectar; es, por tanto, capaz de detectar objetivos oscuros.

En definitiva, el sensor VL53L0X es mucho más preciso que otros dispositivos tales como los módulos de ultrasonidos, cuya FoV es muy elevado, o los sensores de distancia IR que intentan medir la cantidad de luz reflejada. Además, no presentan casi problemas de linealidad o falsas lecturas, pues su FoV es muy estrecho, lo que le permite determinar la distancia de las superficies en frente de él.

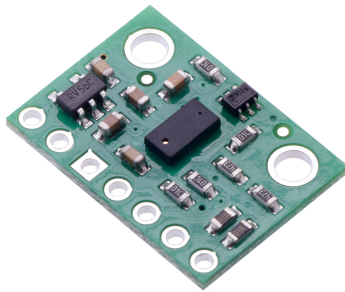


Figura 18: Sensor VL53L0X integrado por Pololu

Como se puede observar en la Figura 18, el sensor se utiliza montado sobre una placa de reducidas dimensiones fácil de integrar. Puesto que el voltaje de operación recomendado por el fabricante es de 2,8V, la placa incluye un regulador y convertidor de niveles que permite utilizarlo con el voltaje de 5V proporcionado por la placa Arduino UNO. En cuanto a la comunicación, se realiza mediante una interfaz I<sup>2</sup>C programable que permite el control del dispositivo y la transferencia de datos.

En conclusión, todas estas características establecen un nuevo punto de referencia en el uso de sensor láser que abre la puerta a nuevas aplicaciones de diversa índole, como la desarrollada en este Trabajo Final de Grado.

## PROCESOS DE CALIBRACIÓN

La calibración del dispositivo VL53L0X, constituida de varios procesos, se realiza por el fabricante durante la etapa de producción, una única vez. El proceso completo de calibración tiene en cuenta todos los posibles parámetros que pudiesen afectar el correcto funcionamiento del sensor láser: cubierta de protección, temperatura, voltaje, etc.

### *Calibración SPAD*

Para optimizar la dinámica del sistema, es necesario calibrar el SPAD de referencia (Single-Photon Avalanche Diode), un fotodetector semiconductor de estado sólido presente en el VL53L0X. Este paso se realiza durante el proceso de producción una sola vez, y los datos derivados de esta calibración (número y tipo de SPADs) son almacenados en la memoria NVM del sensor.

Únicamente, en el caso de utilizar una carcasa de protección encima del VL53L0X, se han de calibrar de nuevo los SPADs de referencia a nivel usuario. El procedimiento de calibración no requiere condiciones específicas, ni de iluminación, ni de objetivo. Para ello, se ha de llamar a la función:

`VL53L0X_PerformRefSpadManagement()`

Ésta produce el número y tipo de los SPADs de referencia a utilizar. Al finalizar, almacena ambos valores en la memoria NVM del dispositivo. Durante el proceso de inicialización, el host tiene que guardar estos dos valores para aplicarlos posteriormente a la corrección de la medida. Para cargar estos datos de calibración, desde el host, se ha de utilizar la función:

`VL53L0X_GetReferenceSpads()`

Otra opción que se encuentra disponible, sin necesidad de realizar de nuevo la calibración, es programar desde el Host el número y tipo de SPADs a utilizar. Para ello, se ha de emplear la función:

`VL53L0X_SetReferenceSpads()`

Por último, es esencial remarcar que todas estas funciones deben ser llamadas antes de realizar la Ref Calibration.

### ***Calibración Ref (temperatura)***

La calibración de la temperatura (Ref calibration) supone, en realidad, la calibración de dos parámetros utilizados para ajustar la sensibilidad del dispositivo cuando la temperatura varía. Dicha calibración es realizada durante el proceso de producción y sus parámetros pueden ser guardados en la memoria del Host, sin necesidad de realizar de nuevo la operación de calibrado, utilizando la función:

`VL53LOXSetRefCalibration()`

Únicamente es necesario repetir la calibración cuando la temperatura varíe más de 8 grados en comparación con la temperatura de calibración inicial (23 °C). No se requiere ninguna configuración específica para realizarla, solamente es requisito llevarla a cabo justo después de la calibración SPAD y antes de realizar la primera medida y las calibraciones de offset y cross-talk. La función destinada para ello es:

`VL53LOXPerformRefCalibration()`

### ***Calibración Offset***

La desviación en la medida (offset) aparece caracterizada por el desplazamiento medio, es decir, por el valor central de la diferencia entre la lectura de la distancia y la distancia real (véase Figura 19).

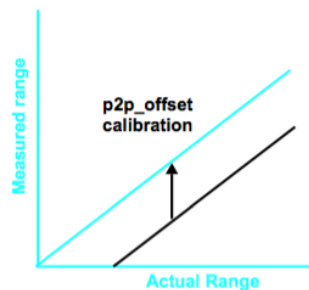


Figura 19: Offset de la medida



Para obtener un rendimiento óptimo del dispositivo, la calibración offset se realiza durante el proceso de producción. El valor del desplazamiento en la medida derivado de dicha calibración se almacena en la memoria NVM del sensor.

En ocasiones, puede parecer que el valor programado en la memoria NVM es erróneo; sobre todo cuando se utiliza una carcasa de protección cubriendo el sensor VL53L0X. En este caso, la lectura de la distancia puede verse afectada por un offset diferente al programado, por lo que se debe realizar una nueva calibración de offset a nivel usuario.

Para realizar esta operación de calibrado se ha de llamar a la función:

```
VL53L0X_PerformOffsetCalibration()
```

La salida de dicha función será el valor en micrómetros del offset a aplicar a la lectura de la medida. A diferencia de las dos calibraciones anteriores (SPAD y Ref), la calibración de offset requiere una configuración específica:

- Se ha de utilizar un objetivo blanco (88 % de reflectancia) situado a 10 cm, en un entorno oscuro. La distancia al objetivo puede modificarse en función de las limitaciones del sistema diseñado, pero debe elegirse siempre un valor en la parte lineal de la curva de alcance.
- Ambas calibraciones, SPAD y Ref, tienen que ser realizadas antes de proceder con la calibración offset.

Finalmente, el valor del desplazamiento en la medida (offset) debe ser almacenado en la memoria del Host en cada reinicio del dispositivo. Para ello, se utiliza la función:

```
VL53L0X_SetOffsetCalibraciónDataMicroMeter()
```

### ***Calibración Cross-talk***

El fenómeno cross-talk (diafonía) se define como la atenuación que sufre la señal emitida debido a la carcasa de protección que cubre el VL53L0X. Es decir, es la cantidad adicional de señal entrante que percibe el receptor debido a dicha cubierta (véase Figura 20).

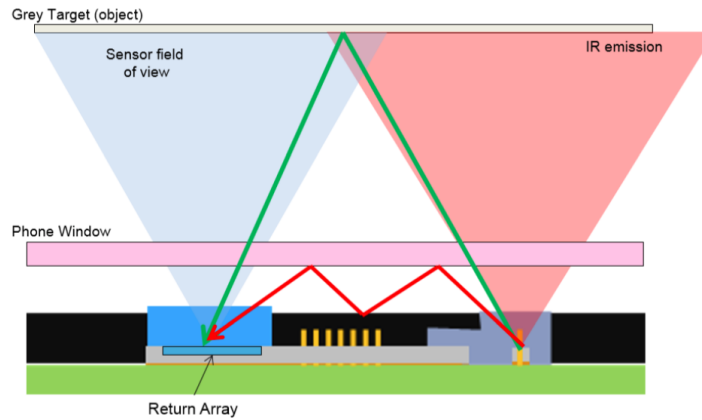


Figura 20: Fenómeno cross-talk (diafonía) en el sensor VL53L0X

Gracias a esta calibración, se puede tolerar y compensar una cierta cantidad de cross-talk. La magnitud de este fenómeno depende del tipo de material utilizado y del espacio existente entre el sensor y la cubierta de protección; cuanto mayor es la cantidad de señal retornada, mayor es el valor de corrección de cross-talk.

Como consecuencia, únicamente se debe realizar esta calibración, a nivel de usuario, en el caso de utilizar una carcasa de protección. Para realizar de nuevo la operación de calibrado es muy importante seleccionar primero la distancia de calibración adecuada. Dicha distancia depende, principalmente, de la calidad de la cubierta; ya que no es lo mismo corregir un efecto de cross-talk alto que uno bajo, como se muestra en la Figura 21.

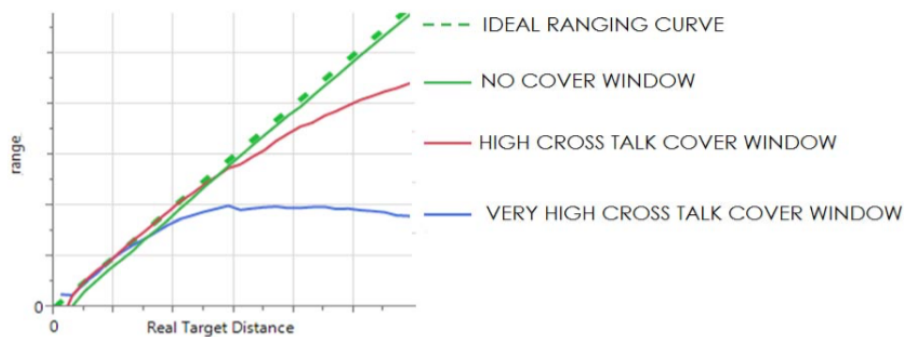


Figura 21: Efecto de la cubierta en la medida

El punto de partida de la distancia de calibración se sitúa en el momento en el que la señal real comienza a desviarse de la curva ideal (señalada con una línea punteada de color verde). El punto final se localiza en el momento en el que la señal real empieza a ser demasiado baja (la distancia de referencia disminuye).

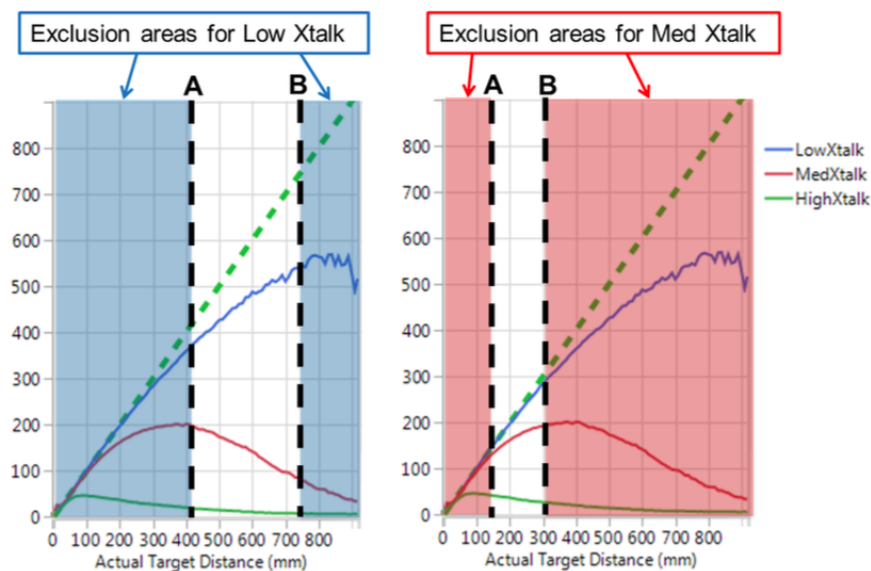


Figura 22: Distancia válida para la calibración cross-talk

La Figura 22 da un ejemplo de las áreas de exclusión donde no se debe realizar la corrección para distintos valores de cross-talk. Si la calibración se realizara en el área lineal de la curva de rango, el factor de corrección sería tan bajo que no tendría casi efecto sobre la medida.

Una vez seleccionada la distancia de calibración, y habiendo realizado previamente la calibración offset, se ha de llamar a la función:

```
VL53LOX_PerformXTalkCalibration()
```

Además, se recomienda utilizar un objetivo gris con un porcentaje de reflectancia del 17%. El valor de entrada de dicha función no es otro que la distancia de calibración (en milímetros) previamente establecida y su valor de salida será el factor de corrección del cross-talk.

Posteriormente, este valor, resultado de la calibración, debe ser almacenado en la memoria del Host a través de la función VL53L0XSetXTalkValue. Para ello, primero, se ha de programar y activar dicho valor mediante el uso de las funciones:

```
VL53L0X_SetXTalkCompensaciónRateMegaCps()
```

```
VL53L0X_SetXTalkCompensationEnable()
```

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del sensor láser VL53L0X se basa, como se ha explicado con anterioridad, en la tecnología Time of Flight (ToF) y utiliza el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C. Dispone de varios modos de funcionamiento (single, continuous y timed), así como de cuatro perfiles de medición: default, high speed, high accuracy y long range. Para comprender su funcionamiento y obtener su máximo rendimiento, resulta necesario conocer también las diferentes fases de la medición de dicho sensor y cómo se produce la obtención de los datos.

### *Modos de funcionamiento*

Un total de 3 modos de funcionamiento se encuentran disponibles en la API para realizar la medición de la distancia con el dispositivo VL53L0X:

1. *Single ranging* (Medición única)

Como indica su nombre, la medida de la distancia se realiza sólo una vez después de que se llama a la correspondiente función API. El sistema, de forma automática, vuelve a la posición de standby de software.

2. *Continuous ranging* (Medición continua)

La medición se realiza de forma continuada después de llamar a la correspondiente función API. Una vez finalizada la medición, se inicia otra sin demora alguna. Por el contrario, en este modo, el usuario tiene que detener la medición para regresar a la posición de standby, completándose siempre la última medición antes de detenerse.

### 3. *Timed ranging* (Medición temporizada)

En este último modo de funcionamiento la medida de la distancia se realiza también de forma continuada después de llamar a la correspondiente función API. Cuando finaliza una medición, se inicia la siguiente después de un retardo (periodo de inter-medición) definido a través de la API por el usuario. Al igual que el modo continuo, el usuario tiene que detener la medición para regresar a la posición de standby de software.

En los modos de medición continua y temporizada, si la solicitud de parada se produce durante una medición de la distancia, ésta se completa antes de detenerse. Si, por el contrario, ocurre durante un período de inter-medición, la medición se detiene de forma inmediata.

### ***Perfiles de medición***

Existen un total de 4 perfiles de medición diferentes disponibles para el usuario a través del correspondiente código API. Además de éstos, se pueden crear perfiles adicionales en función de los requisitos de rendimiento concretos del sistema diseñado. Por defecto, los perfiles de medición son los que siguen:

- *Default mode* (Modo estándar)
- *High speed* (Alta velocidad)

La siguiente configuración, como código API, debe ser aplicada antes de comenzar con la medida de la distancia:

```
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
    Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,
    VL53L0_CHECKENABLE_SIGNAL_RATE_FINAL_RANGE,
    (FixPoint1616_t)(0.25*65536));
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
    Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,
    VL53L0_CHECKENABLE_SIGMA_FINAL_RANGE,
    (FixPoint1616_t)(32*65536));
}
```

```

if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status =
VL53L0_SetMeasurementTimingBudgetMicroSeconds(pMyDevice,
20000);
}

```

- *High accuracy* (Alta precisión)

La siguiente configuración, como código API, debe ser aplicada antes de comenzar con la medida de la distancia:

```

if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,
VL53L0_CHECKENABLE_SIGNAL_RATE_FINAL_RANGE,
(FixPoint1616_t)(0.25*65536));
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,
VL53L0_CHECKENABLE_SIGMA_FINAL_RANGE,
(FixPoint1616_t)(18*65536));
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status =
VL53L0_SetMeasurementTimingBudgetMicroSeconds(pMyDevice,
200000);
}

```

- *Long range* (Largo alcance)

La siguiente configuración, como código API, debe ser aplicada antes de comenzar con la medida de la distancia:

```

if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,
VL53L0_CHECKENABLE_SIGNAL_RATE_FINAL_RANGE,
(FixPoint1616_t)(0.1*65536));
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetLimitCheckValue(pMyDevice,

```

```

VL53L0_CHECKENABLE_SIGMA_FINAL_RANGE,
(FixPoint1616_t)(60*65536));
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status =
VL53L0_SetMeasurementTimingBudgetMicroSeconds(pMyDevice,
33000);
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetVcSELPeriod(pMyDevice,
VL53L0_VCSEL_PERIOD_PRE_RANGE, 18);
}
if (Status == VL53L0_ERROR_NONE) {
Status = VL53L0_SetVcSELPeriod(pMyDevice,
VL53L0_VCSEL_PERIOD_FINAL_RANGE, 14);
}

```

Aquí ponemos la foto de la tablita que indica aplicación típica, tiempo, y máximo rango o intervalo.

	<b>Timing budget</b>	<b>Typical max range</b>	<b>Typical application</b>
Default mode	30ms	1.2m (white target)	standard
High accuracy	200ms	1.2m (white target)	precise measurement
Long range	33ms	2m (white target)	long ranging, only for dark conditions
High Speed	20ms	1.2m (white target)	high speed where accuracy is not priority

Tabla 3: Módulo de ultrasonidos HC-SR04

## Fases de la medición

Cada perfil de medición consta, a su vez, de 3 fases consecutivas:

### 1. INICIALIZACIÓN Y CALIBRACIÓN

La fase de inicialización y carga de los datos de calibración se puede realizar antes de la primera medición o justo después de reiniciar el dispositivo. Como se ha explicado con anterioridad, en ocasiones, será necesario repetir la fase de calibración de la temperatura de forma periódica dependiendo del caso de uso concreto del sistema diseñado.

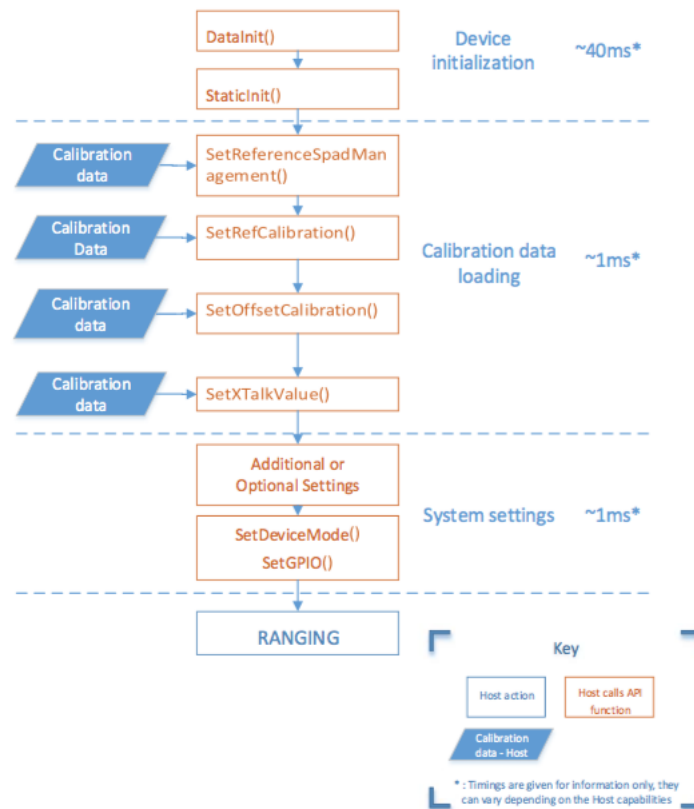


Figura 23: Flujo de inicialización / calibración

El flujo de inicialización / calibración queda descrito en la Figura 23. Las funciones que en dicha figura aparecen se definen a continuación.



- Data Init: la función VL53L0XDataInit() realiza la inicialización del dispositivo. Es llamada una sola vez justo después de que el dispositivo haya salido del estado reset.
- Static Init: la función VL53L0XStaticInit() permite cargar configuraciones específicas del dispositivo, únicamente si fueran necesarias para un determinado caso de uso.
- Carga de los datos de calibración: como se ha comentado con anterioridad, existen un total de 4 calibraciones realizadas a nivel de fábrica, que pueden ser realizadas de nuevo a nivel usuario. Los datos de dichas calibraciones son obtenidos por el Host de la forma que sigue.

La función VL53L0XGetReferenceSpads() devuelve el número y tipo de SPADs de referencia establecidos. En el caso de no volver a realizar una calibración de este tipo, dicho datos serán los programados en la NVM del dispositivo.

La carga de los parámetros de la calibración Ref (temperatura) se realiza utilizando la función VL53L0XSetRefCalibration(). Se considera que, previamente, se ha realizado dicha calibración y almacenado sus dos parámetros en la memoria del Host.

La función VL53L0XSetOffsetCalibración() permite la carga de los datos de la calibración offset; datos que deben ser cargados por el host en cada inicio del dispositivo.

Por último, el factor de corrección derivado de la calibración cross-talk se establecen mediante la función VL53L0XSetXTalkValue.

## 2. MEDICIÓN DE LA DISTANCIA

La fase de medición de la distancia consiste en una configuración previa de una serie de parámetros y en, como indica su nombre, la propia medición de la distancia. Durante dicha operación, se emiten varios pulsos infrarrojos VCSEL (Vertical cavity surface emitting laser) que, posteriormente, son reflejados por el objetivo y percibidos por el correspondiente receptor. El fotodetector utilizado en el interior del VL53L0X utiliza la tecnología SPAD (Single Photon Avalanche Diodos), una tecnología avanzada y rápida que dota a este sensor de una alta fiabilidad. El promedio de tiempo para una secuencia de medición completa es de 33 ms (inicialización/medición/procesado digital), siendo el tiempo real

de la medida de la distancia de 23 ms. El promedio de tiempo mínimo para una secuencia de medición es de 20ms, y el máximo 5 segundos. Cuanto mayor es este promedio de tiempo, mayor es la precisión y la capacidad de tomar medida en un rango mayor.

### 3. PROCESADO DIGITAL (*housekeeping*)

El procesado digital (*housekeeping*) es la última operación dentro de la secuencia de medición que calcula, valida o rechaza una medición de la distancia. Parte de este procesado se realiza internamente, mientras que, la otra parte, es ejecutada en el Host por la API. Al final de este procesado digital, la distancia es calculada por el propio VL53L0X. Si la distancia no se ha podido medir (señal débil, ningún objetivo...), se proporciona el correspondiente código de error.

Las siguientes funciones se realizan en el dispositivo mismo:

- Comprobación del valor de la señal (señal débil)
- Corrección de offset
- Corrección de cross-talk (en el caso de disponer de una cubierta protectora)
- Cálculo del valor final de la distancia

Mientras que, la API, realiza lo siguiente en el Host:

- Comprobación RIT (verificación de la señal en función del cross-talk)
- Comprobación de Sigma (condición de precisión)
- Cálculo del estado final de la medida

Asimismo, si se desea mejorar la precisión de la medida, se pueden realizar procesados adicionales (no incluidos en la API), tales como: un promediado continuo, cualquier tipo de filtrado, etc.

### ***Obtención de los datos***

Los datos finales se pueden obtener utilizando dos mecanismos diferenciados:

- *Modo de polling* (consulta constante)

El usuario tiene que comprobar el estado de la medición en curso haciendo una operación de consulta constante de una función API. Dentro de este modo, la función VL53L0XGetMeasurementDataReady() permite al Host obtener el estado de la medición en curso, y la función VL53L0XGetRangingMeasurementData() devuelve los datos de dicha medición de la distancia. Entre los datos de la medición, se encuentra también, entre otros, un valor que indica el estado de la medida tomada, si es válida o no, y los posibles fallos del dispositivo.

- *Modo de interrupción*

Un pin de interrupción (GPIO1) envía una interrupción al host cuando una nueva medición se encuentra disponible. En este modo, la función VL53L0XSetGPIOConfig() permite configurar las opciones de interrupción del sistema.

De este modo, una vez que una medición está lista, el host recibe una interrupción o una consulta sobre el estado de dicha medición. Por defecto, el pin GPIO1 se encuentra configurado en el modo ?no interruption?, por lo que la obtención de datos se realiza mediante polling.

### 2.2.3. HC-SR04

Finalmente, se describe de forma detalla las características técnicas y el principio de funcionamiento del único sensor de ultrasonidos utilizado, el módulo HC-SR04 (véase Figura 24).

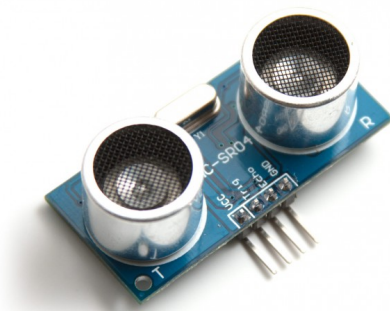


Figura 24: Módulo de ultrasonidos HC-SR04

Como se ha explicado con anterioridad, los sensores de ultrasonidos son sensores de baja precisión poco recomendados para el funcionamiento en el exterior y al aire libre. Aspectos tales como la orientación de la superficie a medir o el número de objetos pueden provocar ecos y falsas mediciones que distorsionen la medida final. Pese a esto, el módulo HC-SR04 es un dispositivo de bajo coste sencillo de utilizar que ofrece una detección remota de los objetos que se presentan delante de él con una aceptable precisión y con lecturas estables. Por ello, y como se verá con más detalle en el capítulo de *Implementación y resultados* (Capítulo 3), se usará uno de estos módulos en conjunción con los otros cuatro sensores láser VL53L0X.

El módulo HC-SR04 incluye un emisor de ultrasonidos, un receptor y un circuito de control. Tiene un total de 4 pines: alimentación a +5V (VCC), masa a 0V (GND), y dos pines que controlan el disparo (TRIG) y el eco recibido por la onda (ECHO). Según su ficha técnica (*datasheet*), el rango de medición teórico del sensor HC-SR04 es de 2 a 400 cm, con una resolución de 3 mm. En la práctica, sin embargo, el rango de medición real es mucho más limitado, en torno a 20 - 200 cm.

En lo referente al ángulo efectivo, para este sensor, es de  $15^\circ$ , es decir, el sensor podrá detectar objetos en un rango de  $30^\circ$ . En la Figura 25 se refleja como se distribuyen los dB en función de un punto de referencia y a lo largo de una radio que permanece invariable. Se puede observar como para un ángulo menor a  $15^\circ$  las lecturas presentan unos buenos resultados.

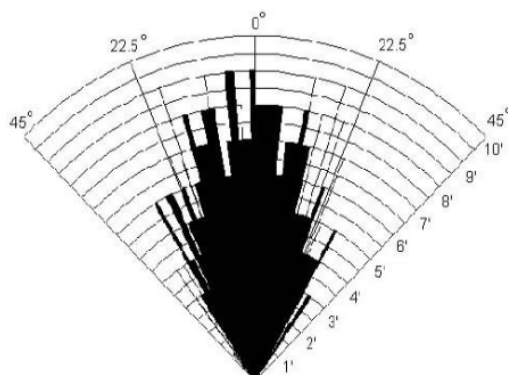


Figura 25: Ángulo efectivo del módulo HC-SR04

En la Tabla 4 se presenta de forma esquematizada las especificaciones técnicas del módulo HC-SR04, especificaciones que será necesario tener en cuenta para obtener un adecuado funcionamiento del dispositivo.

<b>Feature</b>	<b>Detail</b>
Working voltage	5 V (DC)
Working current	15 mA
Quiescent current	< 2 mA
Working frequency	40 Hz
Measuring angle	$30^\circ$
Effectual angle	< $15^\circ$
Max range	400 cm
Min range	2 cm
Resolution	0.3 cm
Dimension	45 x 20 x 15 mm

Tabla 4: Características técnicas del módulo HC-SR04

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Su funcionamiento se basa principalmente en medir el tiempo entre el envío y la recepción de un pulso de alta frecuencia, no audible por el ser humano, para determinar la distancia existente entre el módulo y el obstáculo. Así, su principio de funcionamiento es el que sigue:

1. Se ha de activar la señal TRIG (ponerla a +5V) durante al menos  $10\mu\text{s}$  y volverla a desactivar pasado este tiempo (ponerla a 0V).
2. A continuación, el módulo envía automáticamente ocho pulsos de 40 KHz y coloca su salida ECHO a nivel alto (HIGH), momento en el que se inicia un conteo del tiempo.
3. El pin ECHO se mantiene en nivel alto hasta recibir la onda reflejada por el obstáculo, momento en el que se pone de nuevo a nivel bajo (LOW) y se termina el conteo del tiempo.

Para evitar medidas erróneas se debe tener en cuenta el tiempo de cada ciclo de medida, siendo recomendable dejar al menos 60 ms entre cada toma de datos para evitar fenómenos tales como el cross-talking. En la Figura 26 se muestra el diagrama de temporización del módulo que refleja de forma detallada cómo se comporta la señal de entrada TRIG y la señal de salida ECHO.

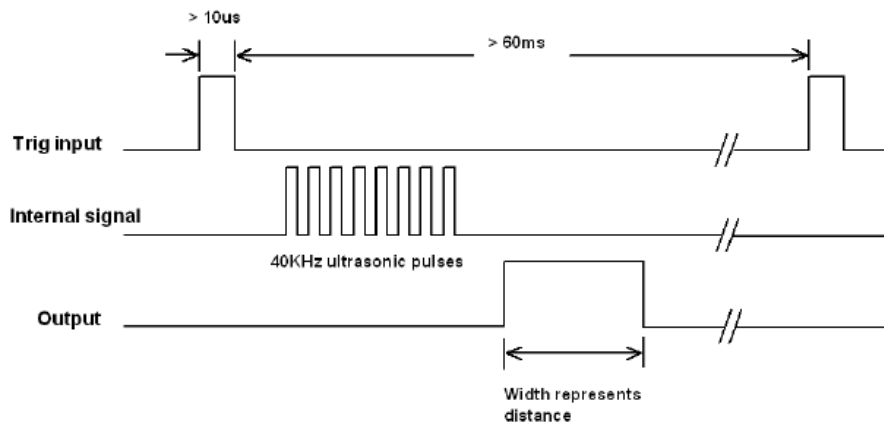


Figura 26: Timing Chart HC-SR04

Sabiendo que la velocidad del sonido es de 343.2 m/s (a 20 °C de temperatura, 50 % de humedad y presión atmosférica a nivel del mar) y que la distancia es proporcional a la duración del pulso, se puede estimar la distancia al objeto contra cuya superficie ha impactado el impulso de ultrasonidos emitido.

$$Velocidad = \frac{Distancia}{Tiempo}$$

$$Distancia = Velocidad * Tiempo$$

Se ha de tener en cuenta que el tiempo medido es el que tarda el pulso en ir y volver, por lo que la distancia recorrida es, en realidad, el doble de la que se quiere medir. También es preciso expresar la velocidad del sonido en las unidades apropiadas, siendo en esta ocasión dichas unidades mm/ $\mu$ s para concordar con la medida propiciada por los otros cuatro sensores.

$$343,2 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{mm}{m} \cdot \frac{1}{10^6} \frac{s}{\mu s}$$

$$Distancia(mm) = \frac{Tiempo(\mu s) * 0,0342}{2}$$

La velocidad del sonido en el aire aumenta al hacerlo la temperatura (aproximadamente 0.6 m/s por cada grado centígrado), por lo que sería recomendable incluir en el sistema diseñado un sensor de temperatura y humedad para que la medida de la distancia a través del módulo HC-SR04 ganase en precisión.

## 2.3. Software

Una vez expuesto con detalle el hardware del sistema diseñado, así como los esquemas de montaje de los sensores VL53L0X Se procede a la explicación del software El IDE de arduino A parte del software aquí descrito, otros programas han sido utilizados para el completo desarrollo de este Trabajo Final de Grado. Entre ellos se encuentra Fritzing para el dibujo de , Siemen NX, Latex para la redacción de la memoria, Excel para el tratamiento de los datos. Dado que el IDE () de Arduino es la herramienta principal utilizada para el desarrollo del Prototipo, es necesario conocer de forma detallada su funcionamiento. Por ello, se realiza una explicación de sus principales menús y comandos. Posteriormente, y dentro del análisis del software, la segunda sección (222 Firmware) relate el entorno gráfico A través de diagramas de flujos se muestra el funcionamiento sintetizado del código Se puede encontrar el código entero en el Anexo A.

### 2.3.1. IDE

El entorno de desarrollo integrado de Arduino, denominado por sus siglas en inglés IDE (Integrated Desktop Development Environment), es un programa de aplicación informática que proporciona un conjunto de herramientas básicas de programación. Se trata de un entorno gratuito y multiplataforma, es decir, es exactamente el mismo independientemente de donde se ejecute (Windows, Linux, OS X); salvo pequeñas diferencias en el proceso de instalación.

Consiste en un editor gráfico, un compilador, un depurador de código y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Asimismo, entre sus herramientas, incorpora también la carga directa del programa compilado sobre la memoria flash del hardware y la gestión de librerías y placas. En definitiva, es el lugar donde se escriben, ejecutan, depuran y cargan sobre la placa Arduino las aplicaciones desarrolladas.

En la Figura 27, se muestra el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino de forma completa, incluyendo todos los menús y comandos principales.



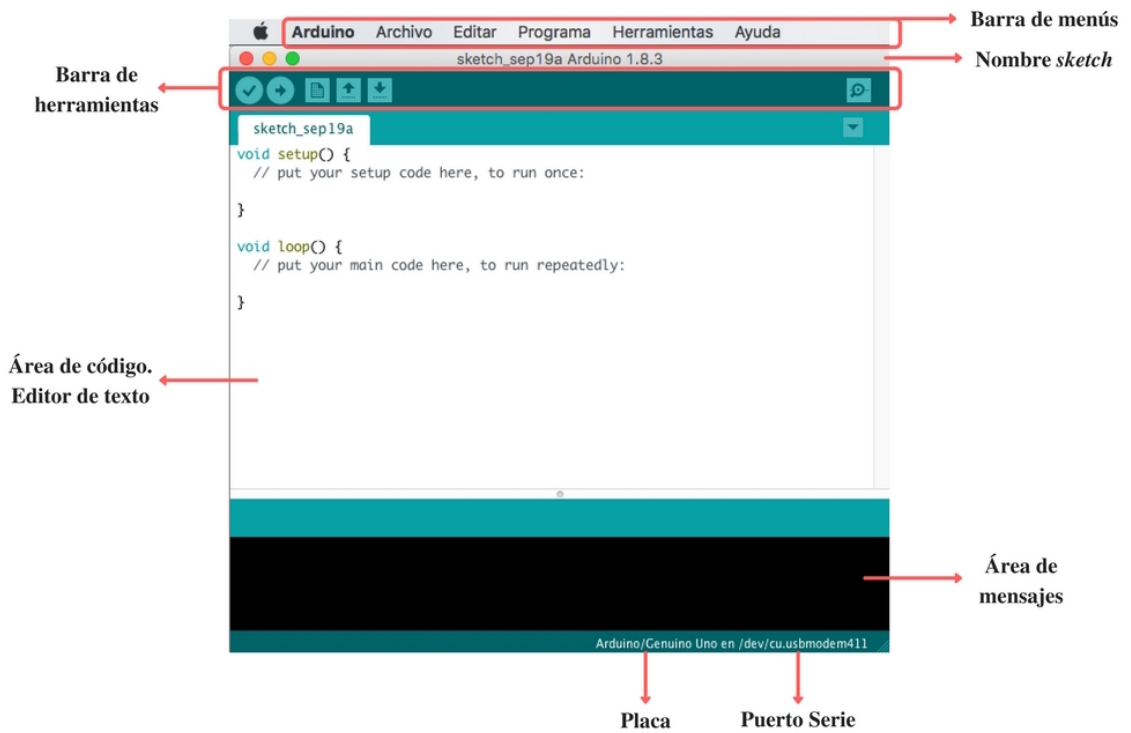


Figura 27: Timing Chart HC-SR04

El primer elemento que se encuentra al abrir el IDE de Arduino son diversos menús; de los cuales son remarcables el menú archivo, editar y herramientas:

- *Archivo*: dentro de este menú se encuentran diferentes opciones tales como: nuevo proyecto, abrir uno ya existente, guardar el actual, etc. Una opción interesante es *Ejemplos*, opción que proporciona, como su nombre indica, ejemplos sobre el uso de la placa Arduino; desde los más básicos hasta algunas más complejas.
- *Editar*: en este menú aparecen las opciones básicas de edición como: copiar, cortar, pegar, comentar / descomentar, etc.
- *Herramientas*: son varias las opciones que proporciona el IDE de Arduino dentro de este menú. Las más destacables son *Placa* y *Puerto*

que permite la selección del modelo de la placa y el puerto en el que se encuentra conectada; y la opción de *Quemar bootloader*, que permitiría volver a cargar el bootloader en caso de que fuese necesario.

A continuación, se localiza el nombre actual del sketch y justo debajo de él, la barra de herramientas. Ésta cuenta con un total de seis botones que dan acceso a los comandos más habituales de este entorno. Así, de izquierda a derecha, se encuentra:

- *Verificar*: verifica la sintaxis del código y, en caso de encontrar errores, los muestra en la parte inferior de la pantalla. En caso contrario, el programa se compilará.
- *Subir*: carga la aplicación desarrollada a la memoria flash del microcontrolador de Arduino. Compilará el código de forma automática en caso de no haber sido compilado previamente.
- *Nuevo*: abre un nuevo sketch en blanco.
- *Abrir*: carga un sketch previamente guardado.
- *Salvar*: guarda el sketch actual.
- *Monitor Serie*: abre la ventana *Serial Monitor* que permite visualizar la comunicación e intercambio de datos entre el ordenador y la placa Arduino.

Seguidamente, debajo de la barra de herramientas, se localiza el editor de texto donde se escribe el *sketch* o programa desarrollado y el área de mensajes que indica si existen errores en el código o no.

Por último, aparece el modelo de la placa Arduino que se empleará para cargar el programa desarrollado y el puerto serie donde está conectada.

### 2.3.2. Firmware

Todo programa o sketch de Arduino presenta la siguiente estructura básica, dividida en tres elementos principales: declaración de variables, configuración y comandos que rigen el comportamiento del programa.

1. *Declaración de variables* Se entiende por variable, la asignación de un valor que Arduino puede guardar en su memoria para ser posteriormente utilizado o alterado. Las variables declaradas al principio del programa solo se ejecutan una vez y pueden ser utilizadas en cualquier momento; en cambio, aquellas variables que se declaren dentro de una función, sólo podrán ser empleadas en dicha función. Los tipos de variables más utilizados, y que también aparecen en el programa desarrollado para este Trabajo, son: int, long y float.
2. *Configuración de Arduino* - void setup() En esta sección del código se ha de especificar toda la configuración del programa, así como su estado inicial. Se concreta que pines funcionan como entradas o salida analógicas o digitales, si se establece o no una conexión con el ordenador y a qué velocidad, etc.
3. *Bloque principal* ? void loop() En este último apartado del programa se definen todas las instrucciones, comandos y funciones necesarias que hacen que, finalmente, Arduino funcione según nuestro diseño. Se trata del cuerpo principal del programa, un bucle infinito que se ejecuta continuamente mientras Arduino reciba alimentación.

Arduino utiliza lo que se denomina como un subconjunto del conocido lenguaje de programación C. Esto facilita su uso, ya que es un lenguaje prácticamente estándar en la mayoría de plataformas y dispositivos. Los programas de Arduino están compuestos por un solo fichero de extensión *.ino*, que ya incluye las librerías necesarias para su correcto funcionamiento.

Para finalizar con lo expuesto sobre el software del sistema diseñado, se explica mediante diagrama de flujos el funcionamiento sintetizado del programa desarrollado para este sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser. Para visualizar el código completo véase el Anexo A.

Se comienza el programa realizando una declaración de las librerías a utilizar: <Wire.h> y <VL53L0X>. Posteriormente, se declaran todas las variables que empleará el programa, entre las que se incluye la variable de distancia entre los cuatro sensores VL53L0X, uno a uno, y la distancia de dichos sensores con el módulo de ultrasonidos HC-SR04.

Una de los parámetros que ha de ser establecido por el usuario son los límites de tolerancia para cada etapa (Tol-Short, Tol-Med y Tol-Long) que desea establecer. La definición de estos parámetros se realiza en este Trabajo, como se explica con mayor detalle en el *Capítulo 3. Implementación y resultados*, mediante una caracterización de los sensores tanto en un banco de pruebas, como en el propio Prototipo. A estos valores obtenido de la calibración, se le añade la parametrización del movimiento más característico del UAV donde ha sido integrado el sistema.

Por último, antes de entrar el bloque de configuración interna, se declaran también los cuatro sensores láser, su nueva dirección I<sup>2</sup>C (pues es necesario que cada sensor presenta una dirección diferente a la establecida en fábrica) y los pines XSHUT para realizar el reset de cada uno de ellos al acabar una medida.

Una vez finalizado el bloque de inicializaciones, se procede a la configuración interna y al estado inicial del programa. Los pines 5, 6, 7 y 8 se establecen como OUTPUTs para los pines XSHUT de los sensores láser VL53L0X; así como los pines 12 y 13 para los LEDs rojo y verde. Se fijan las nuevas direcciones I<sup>2</sup>C de tres de los cuatro sensores láser (dirección 42, 43 y 44) y se inicializa su funcionamiento a través de la función `Sensor.init()`.

Finalmente, se procede al cuerpo principal del programa, donde se localizan todas las instrucciones, comando y funciones a realizar después de la lectura de los 5 sensores. En la Figura 28 aparece el diagrama de flujo que sintetiza el funcionamiento general del programa. Una vez establecidos los límites de tolerancias por el usuario, se procede a la lectura de los sensores mediante las funciones `VL53L0XRead` y `HC-SR04Read`. Es importante destacar que la lectura de los sensores láser se realiza en el modo *default* y *single*, es decir, cada sensor realiza una lectura y vuelve al *standby* de software. Esto es así para evitar la interferencia que se pudiese producir con el resto de dispositivos. Posteriormente, una vez obtenidos los datos de la lectura, se calcula en valor absoluto la distancia entre todos ellos, comprobando de esta forma si hubiese alguno fuera de los límites de tolerancia establecidos.

Posteriormente, comienza el entorno de condicionales, donde se comprueban los siguientes estado: si todos los sensores se hayan dentro del rango de aterrizaje (establecido en 1 metro) o no, y, en el caso de estar en el área de aterrizaje, en que rango se localizan (corto, medio o largo alcance).

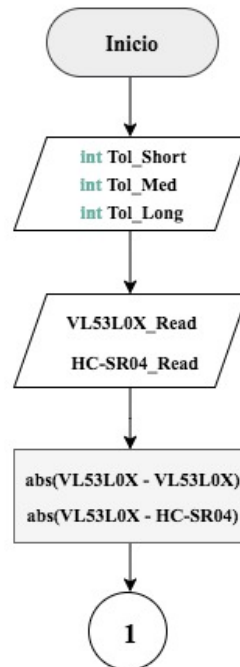


Figura 28: Diagrama de flujo: inicio del programa

La primera condicional que se comprueba es si todos los sensores VL53L0X se hayan por encima de los 1000 mm establecidos como la frontera entre la etapa de *en ruta* y *aterrizaje* o no. De ser así, se comprueba si el módulo de ultrasonidos se encuentra también por encima de los 900 mm y, en caso afirmativo, no se enciende ningún LED pues el Prototipo se encuentra fuera del rango de aterrizaje. En cambio, si la distancia al HC-SR04 diese por debajo de los 90 centímetros, se enciende el LED rojo indicativo de que hay un obstáculo cerca del sistema. Si en un principio la condición de estar todos los sensores láser por encima de un metro no se cumpliera, se procede a comprobar la segunda condición: si todos los VL53L0X se encuentran por debajo de los 10 centímetros (corto alcance). Esta parte del programa se haya sintetizada de forma gráfica en la Figura 29.

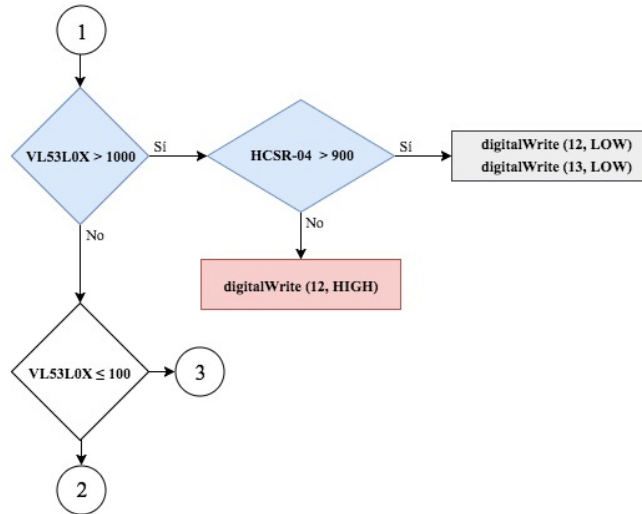


Figura 29: Diagrama de flujo: condición por encima de 1m

A continuación, se realiza un procedimiento parecido si todos los sensores VL53L0X se encuentran dentro del área de aterrizaje. La primera condición que se realiza dentro de este área, es si todos los sensores se encuentran en el corto alcance. A continuación se procede con el medio alcance (por debajo de 600 mm) y, finalmente si se encuentra por debajo de los 1000 mm.

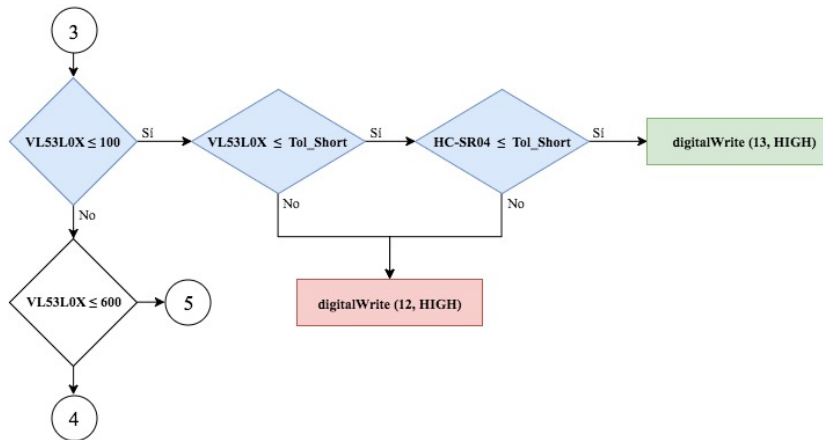


Figura 30: Diagrama de flujo: condición por debajo de 100mm

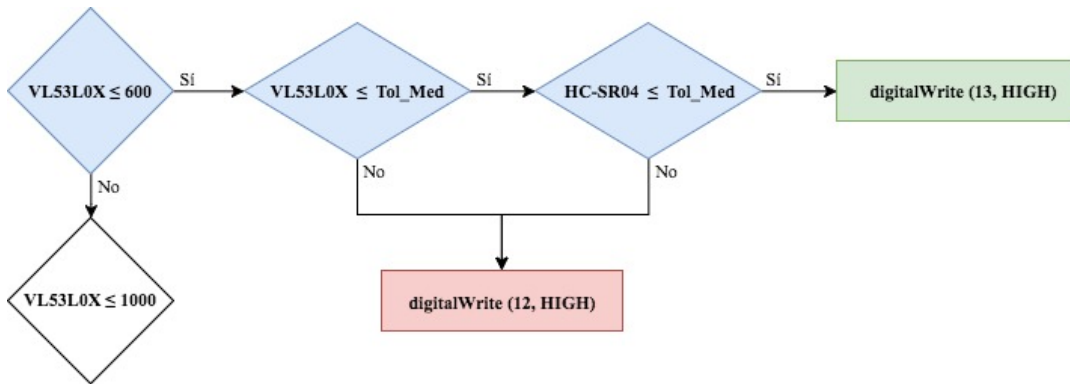


Figura 31: Diagrama de flujo: condición por debajo de 600mm

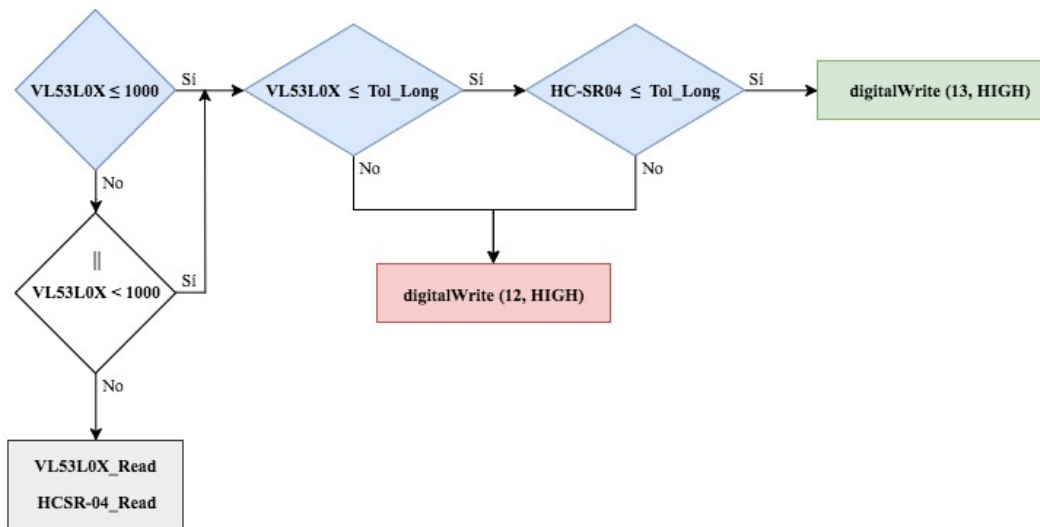


Figura 32: Diagrama de flujo: condición por debajo de 1000mm

## Capítulo 3

# Caracterización y validación

En este tercer capítulo del presente Trabajo Final de Grado se explica de forma detallada la caracterización de todos los sensores que conforman el cuadricóptero, así como la validación de todo el sistema diseñado sobre el Prototipo.

En términos generales, se comienza exponiendo el proceso de calibración que será llevado a cabo con ambos sensores. Se comienza por los cuatro sensores láser VL53L0X, y para cada uno de ellos se realizan dos procesos de calibración diferenciado. El primero, sobre un banco de pruebas, y el segundo montados sobre el propio Prototipo..

A continuación, en la sección 3.2., se realiza de nuevo un proceso de calibración, exactamente igual al llevado a cabo con los sensores láser, pero en esta ocasión con el módulo de ultrasonidos HC-SR04. encuentra una exhaustiva descripción del hardware utilizado, concretamente de la placa Arduino UNO.

Finalmente, en la sección 3.3. *Validación*, se realiza la validación del sistema diseñado, comprobando la eficacia del programa desarrollado y aplicando los límites de tolerancia extraídos del anterior proceso de caracterización de sensores.



### 3.1. Caracterización: VL53L0X

Se comienza por la caracterización del sensor principal de este Trabajo Final de Grado, el sensor láser VL53L0X. Se utilizan un total de 4 sensores de este tipo, cada uno de ellos situado en el extremo final de los cuatro brazos que conforman el cuadricóptero.

La caracterización de un sensor se basa, principalmente, en obtener la ecuación característica del mismo. Dicha ecuación, relaciona la salida del sensor con la variable física a medir; es decir, cómo cambia la variable de salida respecto a la entrada.

Según su ficha técnica, el rango máximo de medida de este dispositivo son 200 cm. Como se ha visto con anterioridad, este rango solo es posible si se utiliza el sensor en modo *Long range*. Sin embargo, para el desarrollo del Prototipo, se concluye que la mejor opción es utilizarlos en el rango que va desde los 4 cm hasta los 100 cm.

Una vez realizada la toma de medidas, el cálculo del promedio, desviación estándar y error absoluto se realiza de la forma que sigue:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

$$E_a = \sqrt{(p)^2 + (\sigma_{\bar{x}})^2}$$

### 3.1.1. Banco de pruebas

Para la caracterización de los sensores VL53L0X se comienza por realizar la calibración de los cuatro al mismo tiempo en un banco de pruebas. El ensayo experimental se desarrolla de la manera que aparece en la Figura 33.

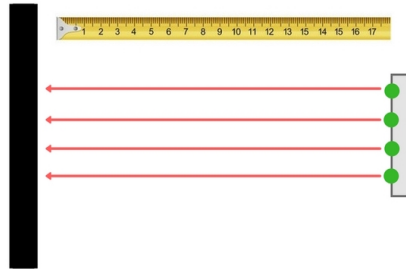
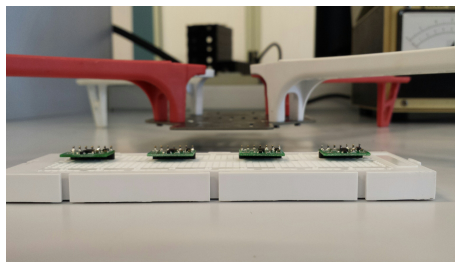
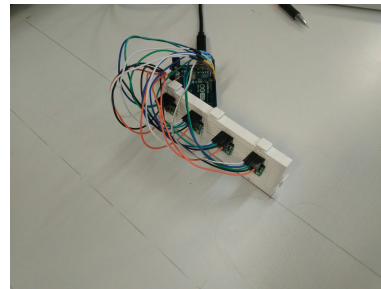


Figura 33: Esquema de caracterización en el banco de pruebas

Se sitúan los cuatro sensores sobre una *protoboard* separados entre sí exactamente por la misma distancia. Los cuatro se hayan, a su vez, apuntando a una pared que se localiza en un plano paralelo a los mismos. A continuación, se procede a realizar las mediciones en el corto, medio y largo alcance respectivamente. Para cada rango se comienza por la mínima medida y se avanza hasta llegar a la máxima. Esta acción, en el banco de pruebas, se repite un total de tres veces para cada rango. En la Figura 34 se pueden observar las imágenes reales de la calibración llevada a cabo.



(a) VL53L0X - Sensor1



(b) VL53L0X - Sensor2

Figura 34: Ensayo experimental. Calibración de los sensores VL53L0X

Una vez completada la toma de medidas, se procede al cálculo de la media aritmética, la desviación estándar y el error absoluto de cada uno de los puntos de calibración de la forma en que se ha explicado con anterioridad. En total, en el banco de pruebas, se toman medidas de 12 puntos de calibración diferentes, desde los 4 cm hasta los 120 cm.

A continuación, se muestran las curvas de calibración de cada uno de los cuatro sensores junto con su correspondiente ajuste lineal. Dichas curvas aparecen representadas junto con la medida real (en azul) que deberían proporcionar los sensores láser.

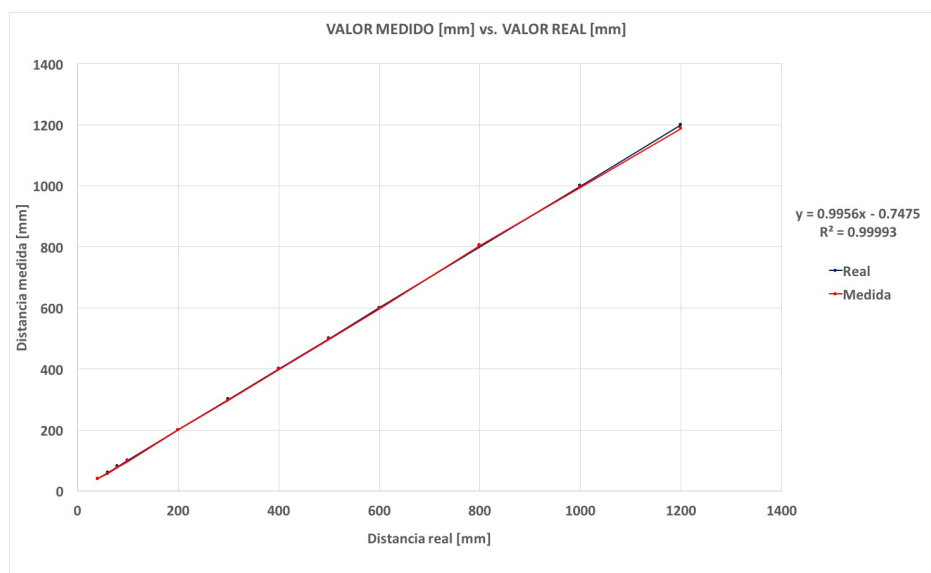


Figura 35: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1

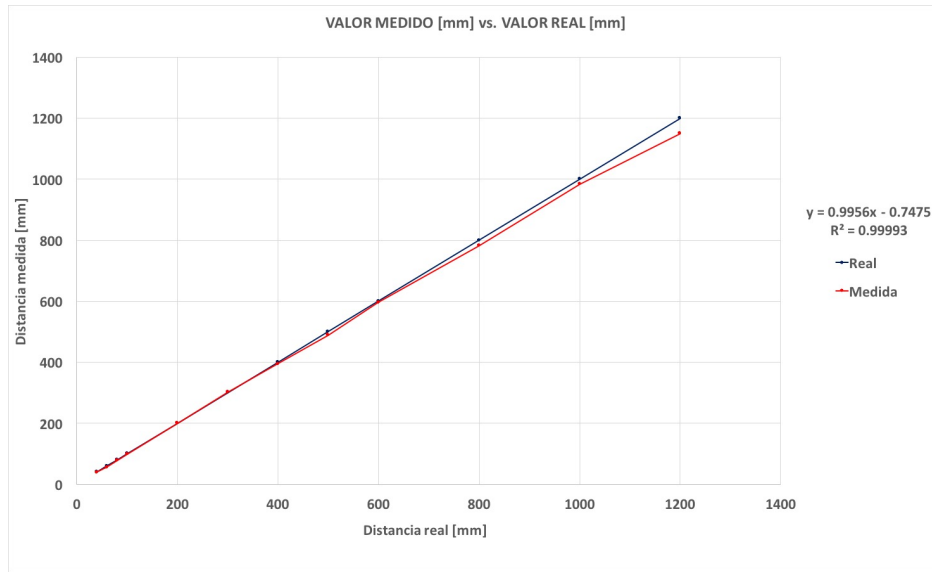


Figura 36: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2

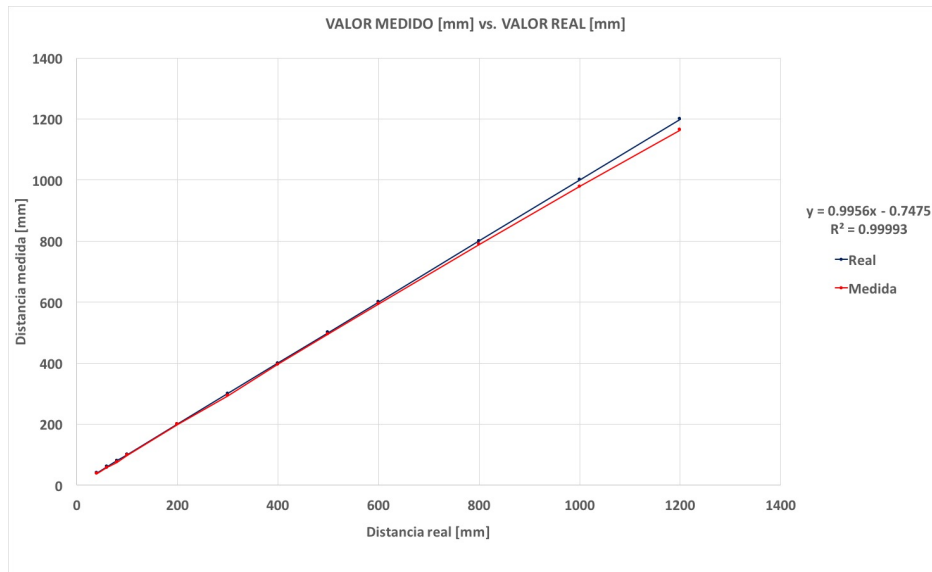


Figura 37: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3

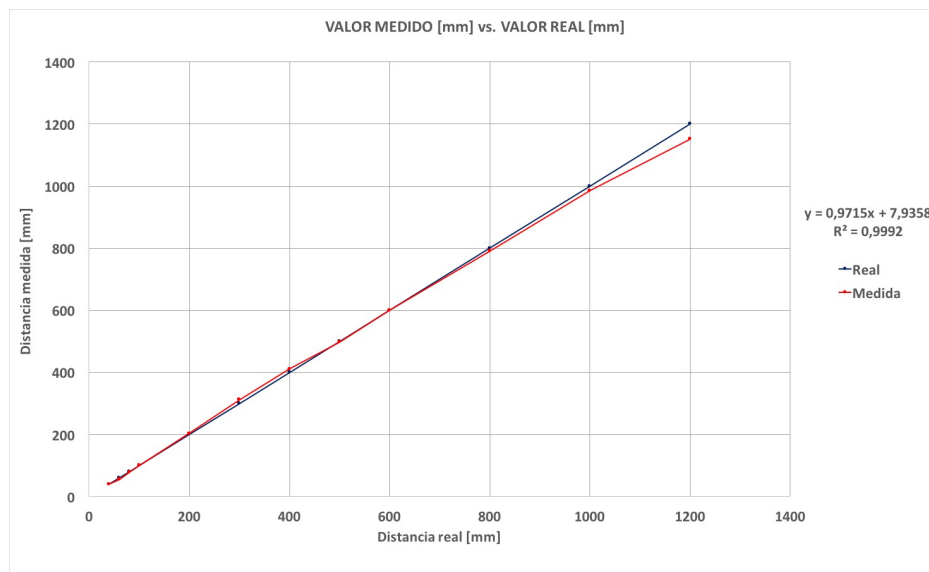


Figura 38: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4

Como se puede observar, el ajuste lineal de todos ellos se aproxima muchísimo a la medida real de la distancia. Aún así, la tendencia general en todos ellos es desviarse a partir de los 1000 mm considerablemente, en comparación con el resto de puntos de calibración. Por este motivo, se decide establecer la distancia de aterrizaje en 1 metro, para evitar lecturas erróneas de los sensores.

Sin embargo, aunque a simple vista parece que el ajuste se aproxima a la medida real, es necesario evaluar el conjunto de las medidas rango a rango, para cada uno de los sensores.

Se comienza por el rango de corto alcance. En él, se incluyen las tablas de cada uno de los sensores con las medidas tomadas y sus correspondientes cálculos en lo que a promedio, desviación estándar y error absoluto se refiere. Una vez presentadas las tablas, se muestra a continuación una figura en la que aparecen las cuatro gráficas, una para cada sensor, de forma conjunta. En el Anexo B se adjunta cada una de las gráficas que aparecen en este *Capítulo 3. Caracterización y validación* de forma separada para una mejor visualización de las mismas.

### CORTO ALCANCE: 4 - 10 [cm]

Como se ha explicado con anterioridad, primero se realiza la toma de medidas en el rango de *corto alcance*; rango que comprende desde los 4 hasta los 10 centímetros.

El fabricante, STMicroelectronics, no indica en la ficha técnica cual es el alcance mínimo del sensor, tan sólo se señala que el alcance máximo en modo *default* es de 1.2 metros. Por ello, y debido a las características del banco de pruebas, se establece un valor mínimo de 4 cm.

De esta forma, se crean cuatro puntos de calibración con una diferencia de 2 cm entre ellos. A su vez, para cada punto de calibración, se efectúa la medida un total de 3 veces ( $x_1, x_2, x_3$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

VL53L0X - Sensor1						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>40</b>	43	38	40	40.3	1.5	1.8
<b>60</b>	60	56	55	57.0	1.5	1.8
<b>80</b>	80	76	76	77.3	1.3	1.7
<b>100</b>	96	99	96	97.0	1.0	1.4

Tabla 5: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Corto alcance.

VL53L0X - Sensor2						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>40</b>	41	39	38	39.3	0.9	1.4
<b>60</b>	56	55	55	55.3	0.3	1.4
<b>80</b>	78	76	77	77.0	0.6	1.4
<b>100</b>	100	96	100	98.7	1.3	1.7

Tabla 6: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Corto alcance.

<b>VL53L0X - Sensor3</b>						
	$\mathbf{x_1}$	$\mathbf{x_2}$	$\mathbf{x_3}$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>40</b>	39	40	35	38.0	1.5	1.8
<b>60</b>	58	56	58	57.3	0.7	1.4
<b>80</b>	75	76	75	75.3	0.3	1.4
<b>100</b>	96	97	99	97.3	0.9	1.4

Tabla 7: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Corto alcance.

<b>VL53L0X - Sensor4</b>						
	$\mathbf{x_1}$	$\mathbf{x_2}$	$\mathbf{x_3}$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>40</b>	41	39	40	40.0	0.6	1.4
<b>60</b>	55	56	55	55.3	0.3	1.4
<b>80</b>	76	79	77	77.3	0.9	1.4
<b>100</b>	102	98	100	100.0	1.2	1.5

Tabla 8: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Corto alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X se aproxima altamente al valor real de la distancia.

Prestando atención a la Tabla 7, se aprecia que el sensor número 3 en comparación con los otros, es el que proporciona los valores mínimos en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 35 mm (40 mm), 75 mm (80 mm) y 96 mm (100 mm). Esta desviación, de valor máximo 5 mm, se tiene en cuenta en el código de programación que realiza la comparación de distancias de todos los sensores presentes en el cuadricóptero.

Sin embargo, es el sensor número 1 (véase Tabla 5) el que proporciona los valores máximos, también, en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 43 mm (40 mm), 60 mm (60 mm) y 80 (80 mm). Esta desviación resulta tan mínima que no se tiene en cuenta en el código de programación del cuadricóptero.

Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas en ningún caso supera el valor de 1.5; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que tampoco se sitúa nunca en ninguno de los cuatro sensores VL53L0X por encima de los 1.8.

En este sentido, se concluye que no resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante. Se determina pues, en el corto alcance, que estos sensores son muy sensibles a cualquier variación mínima de su posición. Por ello resulta muy importante disponerlos en una zona donde puedan sufrir la menor variación posible.

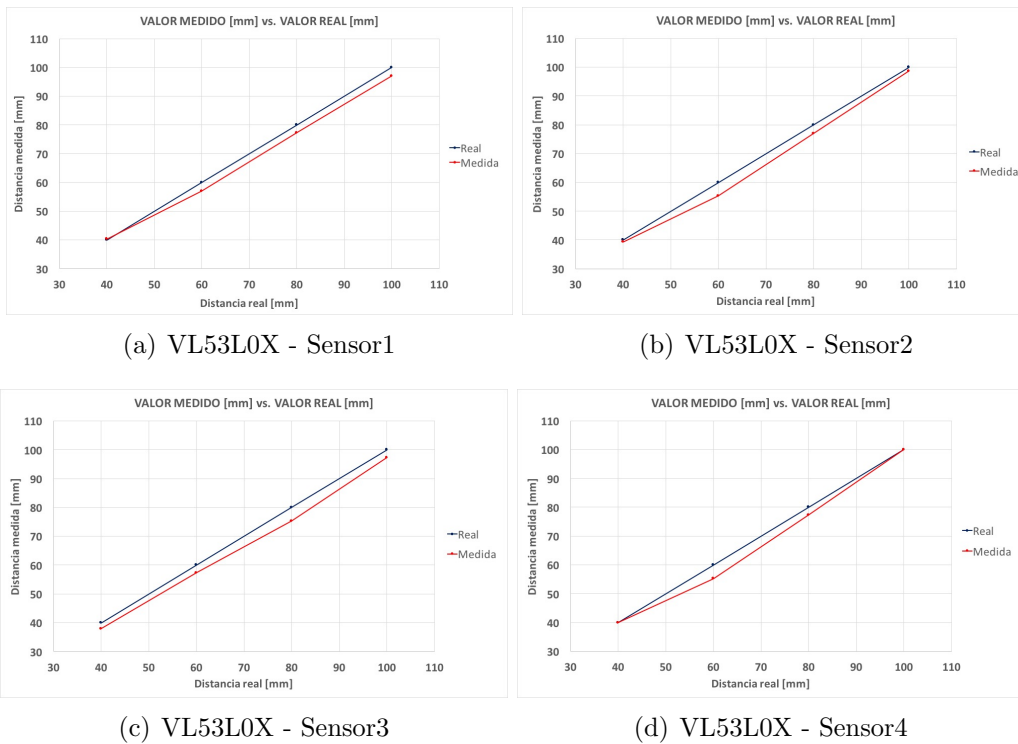


Figura 39: Comportamiento de los sensores VL53L0X en corto alcance

En la Figura 39 se ilustra, de forma gráfica, el comportamiento de cada uno de los cuatro sensores VL53L0X en el corto alcance. Una de las peores medidas sucede en el punto de calibración correspondiente a los 60 mm. Como se ha comentado, estos sensores son muy sensibles a la variación, ya que disponen de una precisión muy alta. Por ello, no se considera esta desviación en la medida como un parámetro importante a tener en cuenta, sino que se atribuye a posibles errores aleatorios o humanos.



**MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]**

Una vez realizada la toma de medidas en el corto alcance, se procede a realizar la misma operación pero en el rango de *medio alcance*. Dicho rango comprende, en esta ocasión, desde los 10 hasta los 60 centímetros.

De esta forma, se crean seis puntos de calibración con una diferencia de 10 cm entre ellos. A su vez, para cada punto de calibración, se efectúa la medida un total de 3 veces ( $x_1, x_2, x_3$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

<b>VL53L0X - Sensor1</b>						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>10</b>	96	99	96	97.0	1.0	1.4
<b>20</b>	203	198	198	199.7	1.7	1.9
<b>30</b>	294	298	300	297.3	1.8	2.0
<b>40</b>	406	395	392	397.7	4.3	4.4
<b>50</b>	502	495	494	497.0	2.5	2.7
<b>60</b>	599	590	602	597.0	3.6	3.7

Tabla 9: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Medio alcance.

<b>VL53L0X - Sensor2</b>						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>10</b>	100	96	100	98.7	1.3	1.7
<b>20</b>	201	202	198	200.3	1.2	1.6
<b>30</b>	307	299	300	302.0	2.5	2.7
<b>40</b>	392	397	395	394.7	1.5	1.8
<b>50</b>	487	489	491	489.0	1.2	1.5
<b>60</b>	602	589	598	596.3	3.8	4.0

Tabla 10: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Medio alcance.

<b>VL53L0X - Sensor3</b>						
	$\mathbf{x}_1$	$\mathbf{x}_2$	$\mathbf{x}_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>10</b>	96	97	99	97.3	0.9	1.4
<b>20</b>	201	202	196	199.7	1.9	2.1
<b>30</b>	295	291	293	293.0	1.2	1.5
<b>40</b>	385	408	396	396.3	6.6	6.7
<b>50</b>	483	505	498	495.3	6.5	6.6
<b>60</b>	589	593	602	594.7	3.8	4.0

Tabla 11: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Medio alcance.

<b>VL53L0X - Sensor4</b>						
	$\mathbf{x}_1$	$\mathbf{x}_2$	$\mathbf{x}_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>10</b>	102	98	100	100.0	1.2	1.5
<b>20</b>	202	205	203	203.3	0.9	1.4
<b>30</b>	304	316	315	311.7	3.8	4.0
<b>40</b>	410	411	411	410.7	0.3	1.4
<b>50</b>	492	498	502	497.3	2.9	3.1
<b>60</b>	602	593	604	599.7	3.4	3.5

Tabla 12: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Medio alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X se aproxima altamente al valor real de la distancia, al igual que ocurría en el corto alcance.

Prestando atención a la Tabla 9 y 11, se aprecia que ambos sensores proporciona los valores mínimos en dos puntos de calibración respectivamente. En el corto alcance, el sensor 3 también proporciona valores por debajo de la distancia real, por lo que se deduce que, probablemente, su posición esté ligeramente inclinada con respecto a los otros sensores. Aún así, esta desviación constituye tan sólo un valor máximo 13 mm.

Sin embargo, es el sensor número 4 (véase Tabla 12) el que proporciona los valores máximos en la mayoría de puntos de calibración, llegando a contar con valores de hasta 12 mm por encima de la medida real. Esta desviación es realmente de tan sólo un centímetro en una medida que alcanza los 40 cm, por lo que resulta tan mínima que tampoco se tiene en cuenta en el código de programación del cuadricóptero.

Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas llega a alcanzar un valor de 6.6; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que se sitúa en un valor de 6.7. En esta ocasión, la dispersión es mayor que en el corto alcance, debido principalmente a la colocación del sensor 3. Por tanto, se concluye que las medidas del sensor láser VL53L0X son más precisas en el corto alcance que en el medio y largo.

En este sentido, no resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante. Se determina pues, que la colocación de los sensores continúa siendo de vital importancia. Además, el ajuste lineal realizado en este rango presenta peores valores en comparación con el ajuste en el corto alcance, pero al final es una desviación completamente aceptable dentro de los parámetros establecidos.

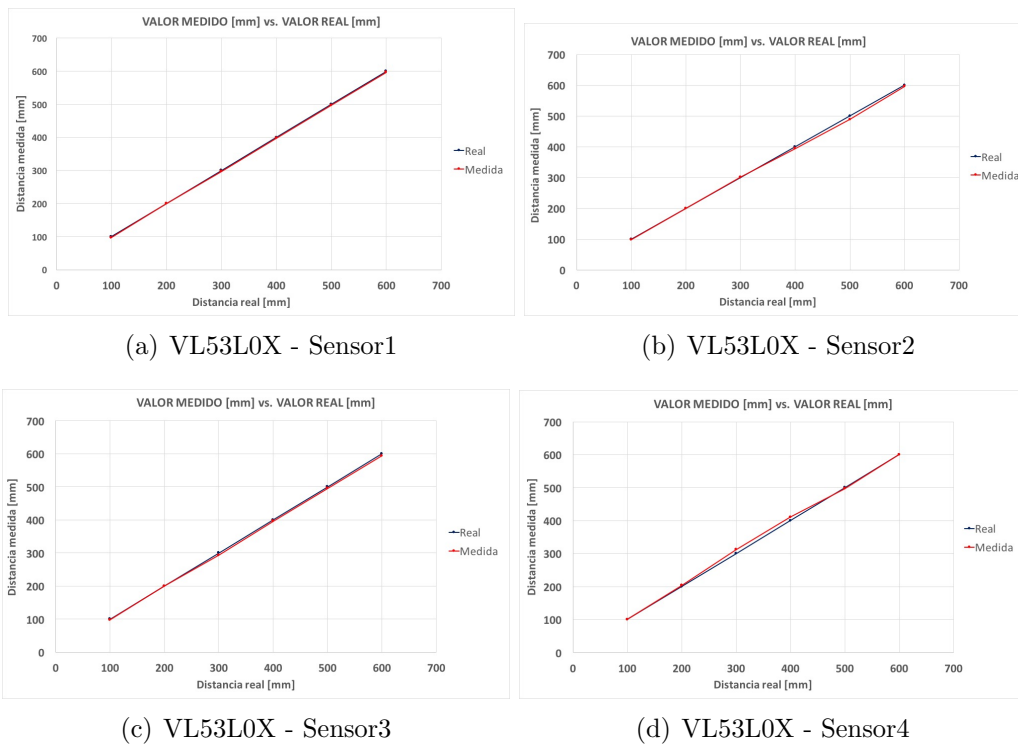


Figura 40: Comportamiento de los sensores VL53L0X en medio alcance

**LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]**

Finalmente, se efectúa la toma de medidas en el último de los rango establecidos, el rango de *largo alcance*; rango que comprende desde los 60 hasta los 120 centímetros.

El fabricante, STMicroelectronics, indica en la ficha técnica que el alcance máximo en modo *default* es de 1.2 metros. Por ello, se decide realizar la toma de medidas hasta este punto de calibración, a forma de comprobación del rango real del dispositivo.

De esta forma, al igual que en las dos ocasiones anteriores, se crean cuatro puntos de calibración con una diferencia de 20 cm entre ellos. A su vez, para cada punto de calibración, se efectúa la medida un total de 3 veces ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

<b>VL53L0X - Sensor1</b>						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	599	590	602	597.0	3.6	3.7
<b>800</b>	802	808	803	804.3	1.9	2.1
<b>1000</b>	995	993	997	995.0	1.2	1.5
<b>1200</b>	1196	1186	1183	1188.3	3.9	4.1

Tabla 13: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Largo alcance.

<b>VL53L0X - Sensor2</b>						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	602	589	598	596.3	3.8	4.0
<b>800</b>	782	784	781	782.3	0.9	1.4
<b>1000</b>	1001	974	974	983.0	9.0	9.1
<b>1200</b>	1145	1152	1151	1149.3	2.2	2.4

Tabla 14: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Largo alcance.

VL53L0X - Sensor3						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	589	593	602	594.7	3.8	4.0
<b>800</b>	787	789	790	788.7	0.9	1.4
<b>1000</b>	978	986	974	979.3	3.5	3.7
<b>1200</b>	1161	1168	1164	1164.3	2.0	2.3

Tabla 15: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Largo alcance.

VL53L0X - Sensor4						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	602	593	604	599.7	3.4	3.5
<b>800</b>	793	794	785	790.7	2.8	3.0
<b>1000</b>	992	986	980	986.0	3.5	3.6
<b>1200</b>	1142	1159	1155	1152.0	5.1	5.2

Tabla 16: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Largo alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X gana en dispersión conforme nos acercamos al valor máximo.

Prestando atención a la Tabla 15, se aprecia, una vez más, que el sensor número 3 en comparación con los otros proporciona los peores valores en cuanto a aproximación al valor real. Esta desviación que ha sufrido el sensor 3 durante toda la calibración en el banco de pruebas no presenta mayor importancia, ya que la dispersión de los valores, así como el error absoluto, entran dentro de las especificaciones técnicas establecidas por el fabricante.

Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas llega a un valor máximo de 5.1; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que alcanza el valor 5.2. En este sentido, se concluye que tampoco resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante, a excepción del rango máximo igual a 1200 mm.

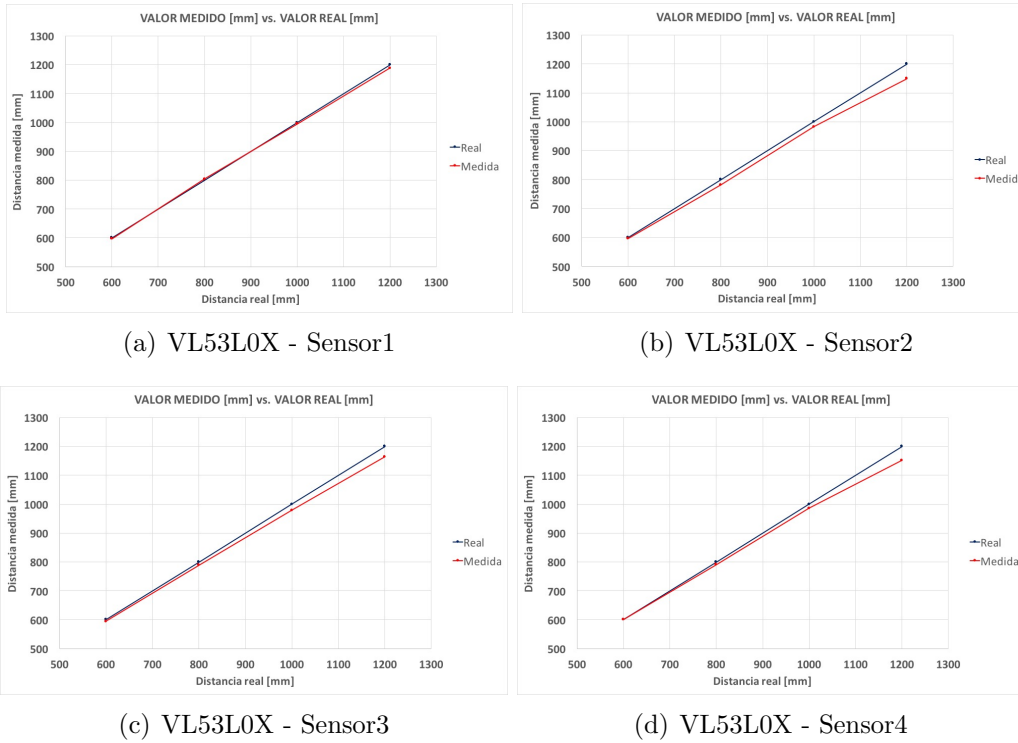


Figura 41: Comportamiento de los sensores VL53L0X en largo alcance

En la Figura 41 se ilustra, de forma gráfica, el comportamiento de cada uno de los cuatro sensores VL53L0X en el largo alcance. Las peores medidas suceden en el punto de calibración correspondiente a los 1200 mm. Como se ha comentado, estos sensores miden mejor distancias milimétricas, por lo que esta medida se descarta en el programa que rige el funcionamiento del sistema.

### 3.1.2. Sobre el Prototipo

Una vez finalizada la calibración de los cuatro sensores láser VL53L0X en el banco de pruebas, y de haber obtenido unos valores dentro de las especificación establecidas por el fabricante, se procede a realizar el mismo proceso de calibración pero en esta ocasión montado sobre el propio Prototipo. El ensayo experimental se desarrolla de la manera que aparece en la Figura 42.



Figura 42: Esquema de caracterización sobre el Prototipo

Se sitúan los cuatro sensores sobre el Prototipo, cada uno de ellos en uno de los brazos del cuadricóptero, intentando que la separación entre ellos sea la misma y estén lo máximo posible paralelos al suelo.

Los cuatro se hayan, a su vez, apuntando a una pared que se localiza en un plano paralelo a los mismos. A continuación, se procede a realizar las mediciones en el corto, medio y largo alcance respectivamente. Para cada rango se comienza por la mínima medida y se avanza hasta llegar a la máxima. Esta acción, en el banco de pruebas, se repite un total de tres veces para cada rango. En la Figura 34 se pueden observar las imágenes reales de la calibración llevada a cabo

De manera experimental se ha obtenido que, pese a ser el rango máximo en el modo estándar 1.2 metros, a partir de 1 metro la medida de la distancia comienza a tener diversos errores de dispersión y

De un sistema de ayuda al aterrizaje, considerar 1 metro es más que suficiente para tal proposito. Así, cuando los 4 sensores localicen que nos encontramos a un metro sobre una superficie, el Prototipo entra en modo *Landing*.

Desde a perspectiva de la situación en la que se toman las medidas en el Prototipo, se decide realizar, para esta ocasión, la medida de cada punto de calibración un total de seis veces ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ). De esta forma, la dispersión en los errores será menor dado que la situación experimental no se puede llevar a cabo con alta precisión.

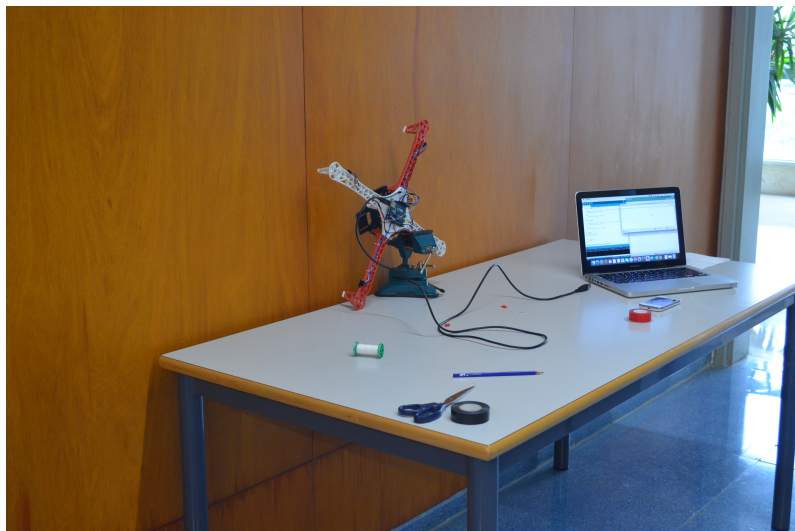


Figura 43: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1

Se adjuntan a continuación, al igual que se ha hecho en el banco de pruebas, las gráficas correspondientes a la calibración de los cuatro sensores sobre el prototipo. A continuación se procede a realizar la calibración rango a rango, comenzando por el corto y acabando en el largo alcance.



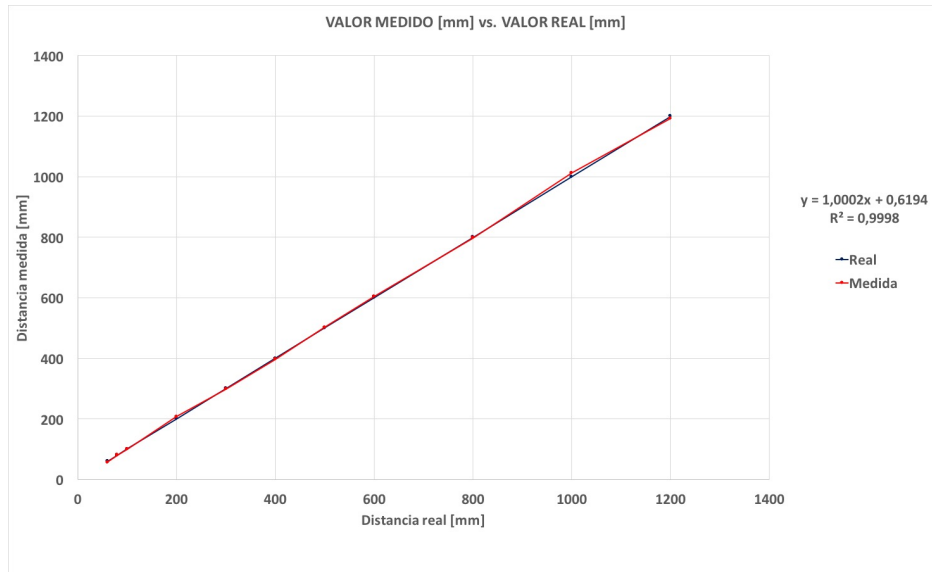


Figura 44: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1

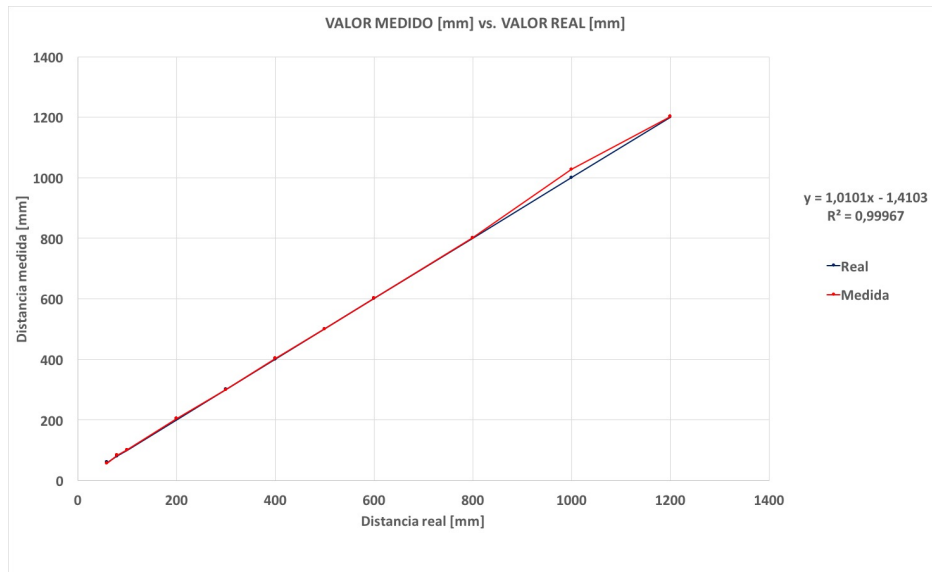


Figura 45: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2

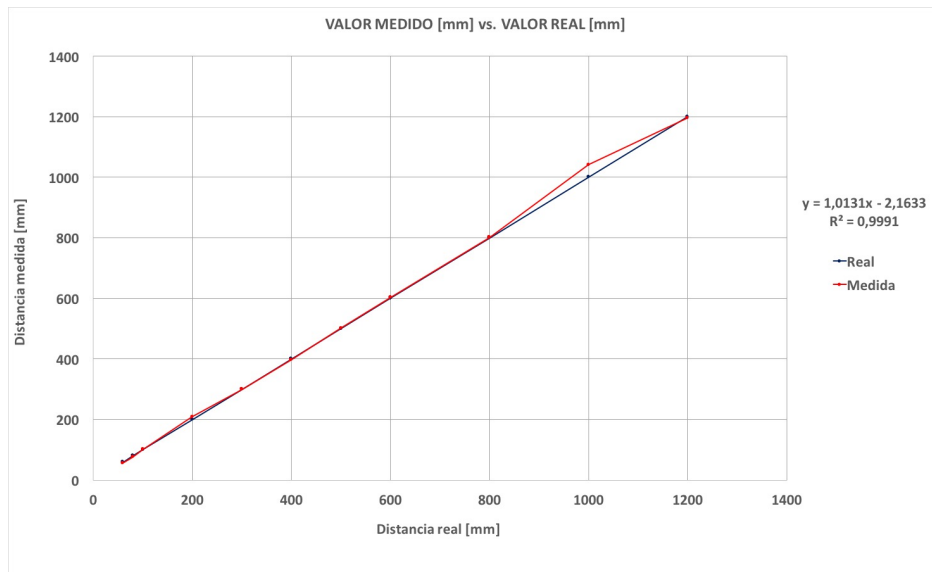


Figura 46: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3

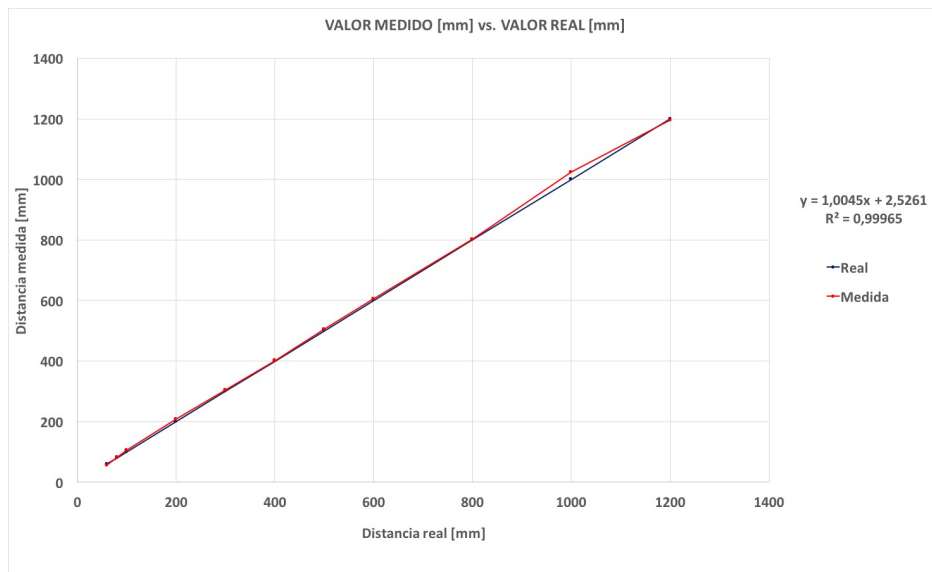


Figura 47: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4

Como se puede observar, el ajuste lineal de todos ellos se aproxima muchísimo a la medida real de la distancia. Aún así, la tendencia general en todos ellos

es desviarse a partir de los 1000 mm considerablemente, en comparación con el resto de puntos de calibración. Por este motivo, se decide establecer la distancia de aterrizaje en 1 metro, para evitar lecturas erróneas de los sensores.

Sin embargo, aunque a simple vista parece que el ajuste se aproxima a la medida real, es necesario evaluar el conjunto de las medidas rango a rango, para cada uno de los sensores.

Se comienza por el rango de corto alcance. En él, se incluyen las tablas de cada uno de los sensores con las medidas tomadas y sus correspondientes cálculos en lo que a promedio, desviación estándar y error absoluto se refiere. Una vez presentadas las tablas, se muestra a continuación una figura en la que aparecen las cuatro gráficas, una para cada sensor, de forma conjunta. En el Anexo B se adjunta cada una de las gráficas que aparecen en este *Capítulo 3. Caracterización y validación* de forma separada para una mejor visualización de las mismas.

### CORTO ALCANCE: 6 - 10 [cm]

Al igual que se ha realizado con anterioridad en el banco de pruebas, primero se efectúa la toma de medidas en el rango de *corto alcance*. En esta ocasión, y debido a la disposición de los sensores en el propio cuadricóptero (véase 48), la medida en el corto alcance comienza en 60 mm ya que lo mínimo que podrían medir los sensores sería 50 mm; mientras que el valor máximo en este rango se mantiene en los 10 centímetros.

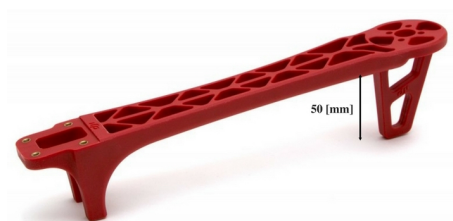


Figura 48: Distancia del brazo del Prototipo al suelo

De esta forma, se crean únicamente tres puntos de calibración con una diferencia de 2 cm entre ellos. A su vez, y tal como se ha explicado, se efectúa la medida un total de 6 veces para cada punto de calibración ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

		VL53L0X - Sensor1								
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$	
60	55	56	55	58	58	58	56.7	0.6	1.4	
80	78	82	85	84	77	79	80.8	1.4	1.7	
100	101	98	100	101	101	96	99.5	0.8	1.4	

Tabla 17: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Corto alcance.

VL53L0X - Sensor2									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>60</b>	60	56	56	56	58	55	56.8	0.7	1.4
<b>80</b>	81	84	81	81	83	84	82.3	0.6	1.4
<b>100</b>	103	96	98	104	101	101	100.5	1.2	1.6

Tabla 18: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Corto alcance.

VL53L0X - Sensor3									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>60</b>	56	60	55	58	53	58	56.7	1.0	1.4
<b>80</b>	73	74	79	80	73	81	76.7	1.5	1.8
<b>100</b>	98	97	103	104	101	103	101.0	1.2	1.5

Tabla 19: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Corto alcance.

VL53L0X - Sensor4									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>60</b>	55	54	57	58	55	56	55.8	0.6	1.4
<b>80</b>	81	79	82	85	84	80	81.8	0.9	1.4
<b>100</b>	106	102	105	106	107	108	105.7	0.8	1.4

Tabla 20: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Corto alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X se aproxima altamente al valor real de la distancia.

Prestando atención a la Tabla 7, se aprecia que el sensor número 3 en comparación con los otros, es el que proporciona los valores mínimos en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 35 mm (40 mm), 75 mm (80 mm) y 96 mm (100 mm). Esta desviación, de valor máximo 5 mm, se tiene en cuenta en el código de programación que realiza la comparación de distancias de todos los sensores presentes en el cuadricóptero.

Sin embargo, es el sensor número 1 (véase Tabla 5) el que proporciona los valores máximos, también, en tres de los cuatro puntos de calibración

del corto alcance: 43 mm (40 mm), 60 mm (60 mm) y 80 (80 mm). Esta desviación resulta tan mínima que no se tiene en cuenta en el código de programación del cuadricóptero.

Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas en ningún caso supera el valor de 1.5; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que tampoco se sitúa nunca en ninguno de los cuatro sensores VL53L0X por encima de los 1.8.

En este sentido, se concluye que no resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante. Se determina pues, en el corto alcance, que estos sensores son muy sensibles a cualquier variación mínima de su posición. Por ello resulta muy importante disponerlos en una zona donde puedan sufrir la menor variación posible.

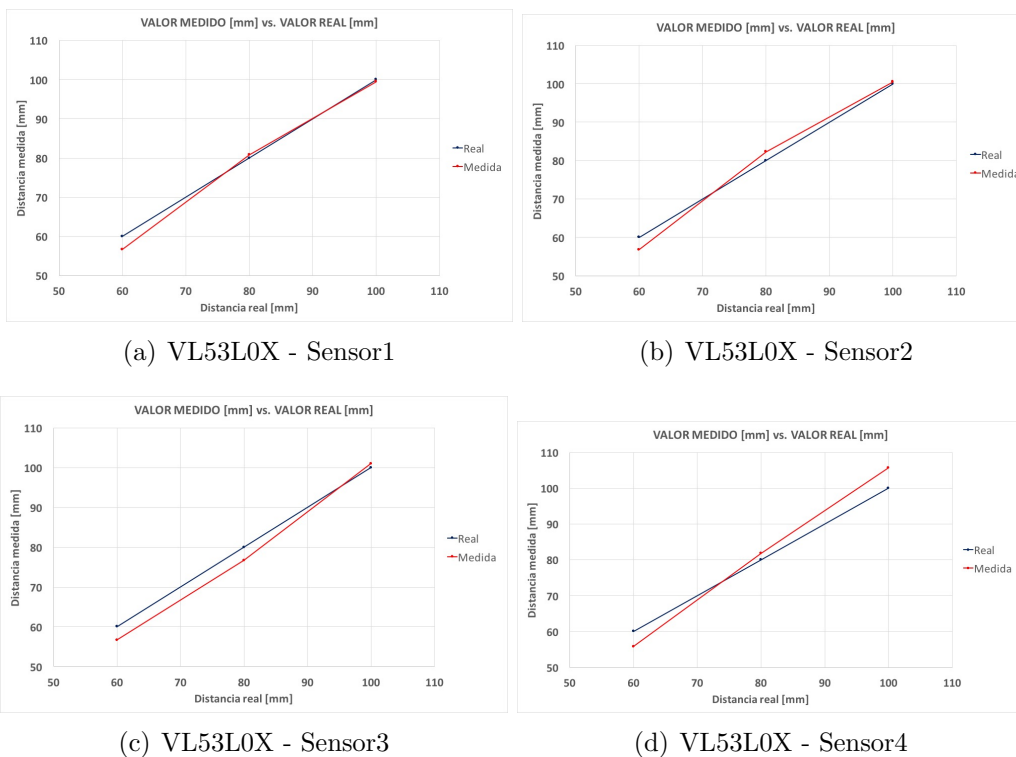


Figura 49: Comportamiento de los sensores VL53L0X en corto alcance

**MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]**

Una vez realizada la toma de medidas en el corto alcance, se procede a realizar la misma operación pero en el rango de *medio alcance*. Dicho rango comprende, en esta ocasión, desde los 10 hasta los 60 centímetros.

De esta forma, se crean seis puntos de calibración con una diferencia de 10 cm entre ellos. A su vez, para cada punto de calibración, se efectúa la medida un total de seis veces ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

<b>VL53L0X - Sensor1</b>									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>100</b>	101	98	100	101	101	96	99.5	0.8	1.4
<b>200</b>	207	206	207	204	209	210	207.2	0.9	1.4
<b>300</b>	297	295	298	301	303	296	298.3	1.3	1.6
<b>400</b>	392	395	400	400	395	399	396.8	1.4	1.7
<b>500</b>	508	498	513	490	508	497	502.3	3.5	3.7
<b>600</b>	602	604	605	608	606	601	604.3	1.1	1.5

Tabla 21: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Medio alcance.

<b>VL53L0X - Sensor2</b>									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>100</b>	103	96	98	104	101	101	100.5	1.2	1.6
<b>200</b>	201	206	208	202	204	205	204.3	1.1	1.5
<b>300</b>	299	300	298	296	297	304	299.0	1.2	1.5
<b>400</b>	402	400	402	405	401	405	402.5	0.8	1.4
<b>500</b>	492	498	499	509	500	504	500.3	2.3	2.6
<b>600</b>	593	600	614	611	601	591	601.7	3.8	3.9

Tabla 22: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Medio alcance.

VL53L0X - Sensor3									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>100</b>	98	97	103	104	101	103	101.0	1.2	1.5
<b>200</b>	207	207	213	208	207	212	209.0	1.1	1.5
<b>300</b>	293	298	298	299	306	304	299.7	1.9	2.2
<b>400</b>	401	395	399	402	393	394	397.3	1.6	1.9
<b>500</b>	509	502	489	501	505	505	501.8	2.8	3.0
<b>600</b>	603	597	601	613	608	595	602.8	2.8	2.9

Tabla 23: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Medio alcance.

VL53L0X - Sensor4									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>100</b>	106	102	105	106	107	108	105.7	0.8	1.4
<b>200</b>	209	210	209	212	204	206	208.3	1.2	1.5
<b>300</b>	306	305	311	301	305	301	304.8	1.5	1.8
<b>400</b>	403	397	407	412	399	393	401.8	2.8	3.0
<b>500</b>	511	493	511	505	511	501	505.3	3.0	3.1
<b>600</b>	602	610	609	613	608	595	606.2	2.7	2.9

Tabla 24: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Medio alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X se aproxima altamente al valor real de la distancia.

Prestando atención a la Tabla 24, se aprecia que el sensor número 3 en comparación con los otros, es el que proporciona los valores mínimos en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 35 mm (40 mm), 75 mm (80 mm) y 96 mm (100 mm). Esta desviación, de valor máximo 5 mm, se tiene en cuenta en el código de programación que realiza la comparación de distancias de todos los sensores presentes en el cuadricóptero.

Sin embargo, es el sensor número 1 (véase Tabla 5) el que proporciona los valores máximos, también, en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 43 mm (40 mm), 60 mm (60 mm) y 80 (80 mm). Esta desviación resulta tan mínima que no se tiene en cuenta en el código de programación del cuadricóptero.



Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas en ningún caso supera el valor de 1.5; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que tampoco se sitúa nunca en ninguno de los cuatro sensores VL53L0X por encima de los 1.8.

En este sentido, se concluye que no resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante. Se determina pues, en el corto alcance, que estos sensores son muy sensibles a cualquier variación mínima de su posición. Por ello resulta muy importante disponerlos en una zona donde puedan sufrir la menor variación posible.

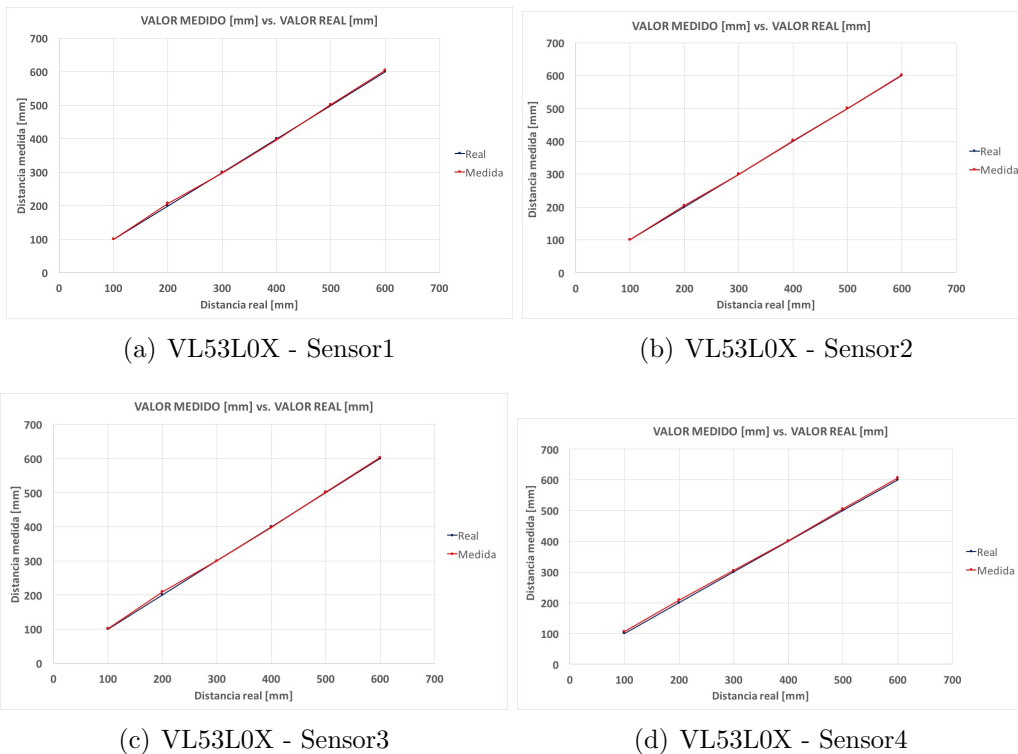


Figura 50: Comportamiento de los sensores VL53L0X en medio alcance

**LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]**

Finalmente, se efectúa la toma de medidas en el último de los rango establecidos, el rango de *largo alcance*; rango que comprende desde los 60 hasta los 120 centímetros.

El fabricante, STMicroelectronics, no indica en la ficha técnica cual es el alcance mínimo del sensor, tan sólo se señala que el alcance máximo en modo *default* es de 1.2 metros. Por ello, y debido a las características del banco de pruebas, se establece un valor mínimo de 4 cm.

De esta forma, se crean cuatro puntos de calibración con una diferencia de 20 cm entre ellos. A su vez, para cada punto de calibración, se efectúa la medida un total de seis veces ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ ).

Una vez obtenido el conjunto de medidas, se calcula el promedio, desviación estándar y error absoluto en cada punto de calibración; tal y como aparece a continuación:

<b>VL53L0X - Sensor1</b>									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	602	604	605	608	606	601	604.3	1.1	1.5
<b>800</b>	800	780	807	789	802	810	798.0	4.7	4.8
<b>1000</b>	1034	998	1001	996	1018	1026	1012.2	6.6	6.6
<b>1200</b>	1217	1195	1187	1207	1161	1183	1191.7	8.0	8.1

Tabla 25: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor1. Largo alcance.

<b>VL53L0X - Sensor2</b>									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	593	600	614	611	601	591	601.7	3.8	3.9
<b>800</b>	796	804	806	806	791	804	801.2	2.5	2.7
<b>1000</b>	1022	1036	1029	1017	1023	1032	1026.5	2.9	3.1
<b>1200</b>	1174	1197	1213	1215	1223	1189	1201.8	7.5	7.6

Tabla 26: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor2. Largo alcance.

VL53L0X - Sensor3									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	603	597	601	613	608	595	602.8	2.8	2.9
<b>800</b>	803	794	820	801	802	794	802.3	3.9	4.0
<b>1000</b>	1011	1041	1062	1040	1051	1041	1041.0	6.9	7.0
<b>1200</b>	1158	1206	1182	1192	1191	1249	1196.3	12.4	12.4

Tabla 27: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor3. Largo alcance.

VL53L0X - Sensor4									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	602	610	609	613	608	595	606.2	2.7	2.9
<b>800</b>	787	823	799	793	807	801	801.7	5.1	5.2
<b>1000</b>	1042	1008	1031	1032	1036	997	1024.3	7.2	7.3
<b>1200</b>	1231	1212	1192	1192	1198	1150	1195.8	11.0	11.0

Tabla 28: Puntos de calibración del VL53L0X - Sensor4. Largo alcance.

Como se puede observar, el promedio de cada punto de calibración para cada uno de los cuatro sensores VL53L0X se aproxima altamente al valor real de la distancia.

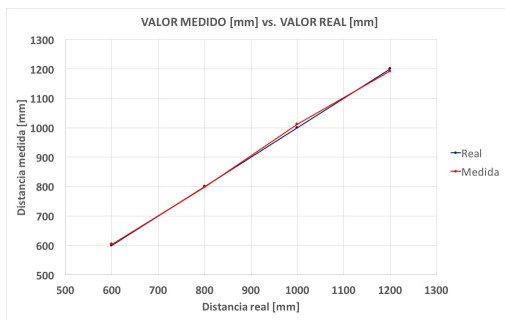
Prestando atención a la Tabla 25, se aprecia que el sensor número 1 en comparación con los otros, es el que proporciona los valores mínimos en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 35 mm (40 mm), 75 mm (80 mm) y 96 mm (100 mm). Esta desviación, de valor máximo 5 mm, se tiene en cuenta en el código de programación que realiza la comparación de distancias de todos los sensores presentes en el cuadricóptero.

Sin embargo, es el sensor número 4 (véase Tabla 28) el que proporciona los valores máximos, también, en tres de los cuatro puntos de calibración del corto alcance: 43 mm (40 mm), 60 mm (60 mm) y 80 (80 mm). Esta desviación resulta tan mínima que no se tiene en cuenta en el código de programación del cuadricóptero.

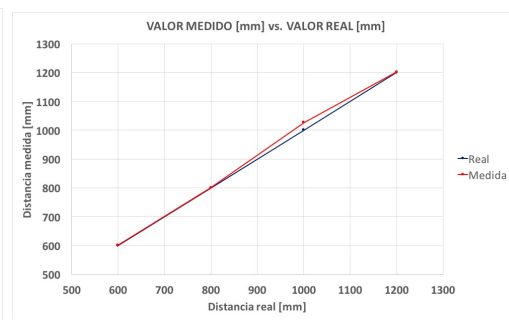
Asimismo, la dispersión del conjunto de medidas en ningún caso supera el valor de 1.5; al igual que el error absoluto (sensibilidad del dispositivo) que tampoco se sitúa nunca en ninguno de los cuatro sensores VL53L0X por

encima de los 1.8.

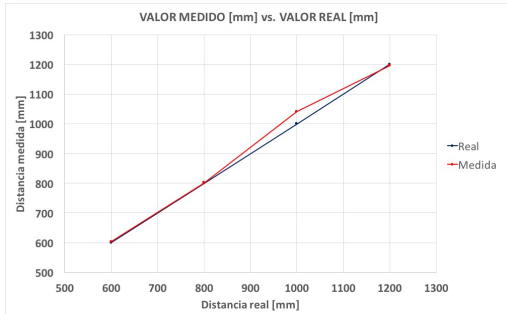
En este sentido, se concluye que no resulta necesario realizar un mayor número de medidas, ya que todos los valores cumplen las especificaciones establecidas por el fabricante. Se determina pues, en el corto alcance, que estos sensores son muy sensibles a cualquier variación mínima de su posición. Por ello resulta muy importante disponerlos en una zona donde puedan sufrir la menor variación posible.



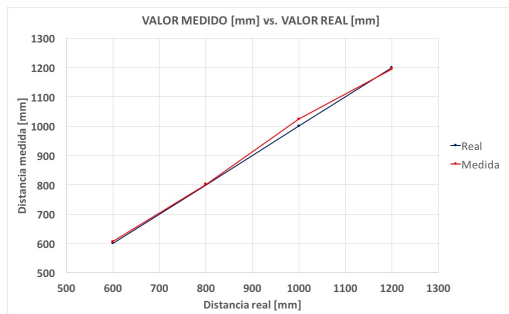
(a) VL53L0X - Sensor1



(b) VL53L0X - Sensor2



(c) VL53L0X - Sensor3



(d) VL53L0X - Sensor4

Figura 51: Comportamiento de los sensores VL53L0X en largo alcance

## 3.2. Caracterización: HCSR-04

Una vez finalizada la calibración de los cuatro sensores láser VL53L0X se continúa con la calibración del módulo de ultrasonidos HC-SR04. El procedimiento es exactamente al realizado con anterioridad, motivo por el cual se evita realizar la explicación de nuevo y únicamente se adjuntas las tablas de las medidas tomadas junto con sus correspondientes errores; así como las gráficas en cada uno de los rangos de medida.

Es necesario remarcar, que en la caracterización sobre el Prototipo, los puntos de calibración están reducidos 50 mm. Esto es así debido a la colocación del propio sensor sobre la estructura, localizándose en la parte central, en el límite inferior a 5 cm de los 4 sensores láser.

Al igual que ha ocurrido con los sensores VL53L0X, la caracterización cumple las especificaciones establecidos por el fabricante en el rango en el cual va a ser empleado. Por lo que únicamente se establecerán como parte del programa la dispersión en las medidas para el cálculo de los límites de tolerancia.

### 3.2.1. Banco de pruebas

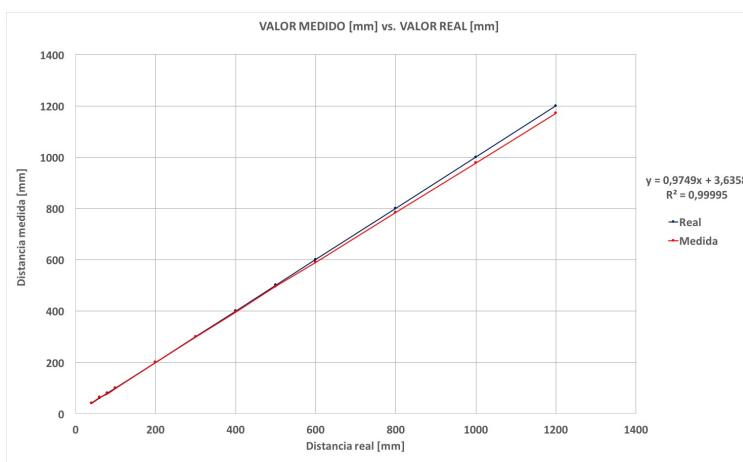


Figura 52: Medida estándar del HCSR-04

CORTO ALCANCE: 4 - 10 [cm]

HCSR-04						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>40</b>	41	41	40	40	0.3	4.2
<b>60</b>	64	63	63	63	0.5	4.2
<b>80</b>	76	78	76	77	0.3	4.2
<b>100</b>	98	99	98	98	0.3	4.2

Tabla 29: Calibración de largo alcance

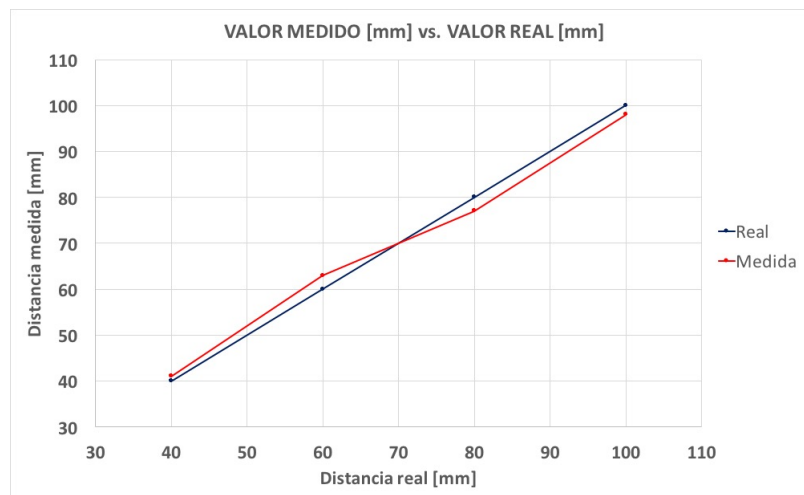


Figura 53: Medida estándar del HCSR-04 en corto alcance

MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]

HCSR-04						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>100</b>	97	98	97	98	0.3	4.2
<b>200</b>	200	200	200	200	0.1	4.2
<b>300</b>	298	299	298	299	0.3	4.2
<b>400</b>	395	396	396	396	0.2	4.2
<b>500</b>	496	495	495	495	0.3	4.2
<b>600</b>	588	588	587	588	0.3	4.2

Tabla 30: Calibración de medio alcance

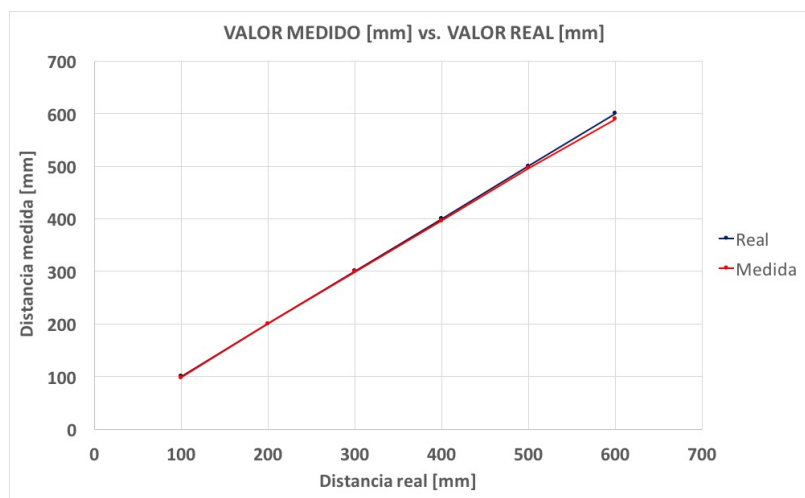


Figura 54: Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance

LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]

HCSR-04						
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>600</b>	588	588	587	588	0.3	4.2
<b>800</b>	784	784	783	783	0.3	4.2
<b>1000</b>	972	978	978	976	1.8	4.2
<b>1200</b>	1172	1167	1172	1170	1.6	4.2

Tabla 31: Calibración de largo alcance

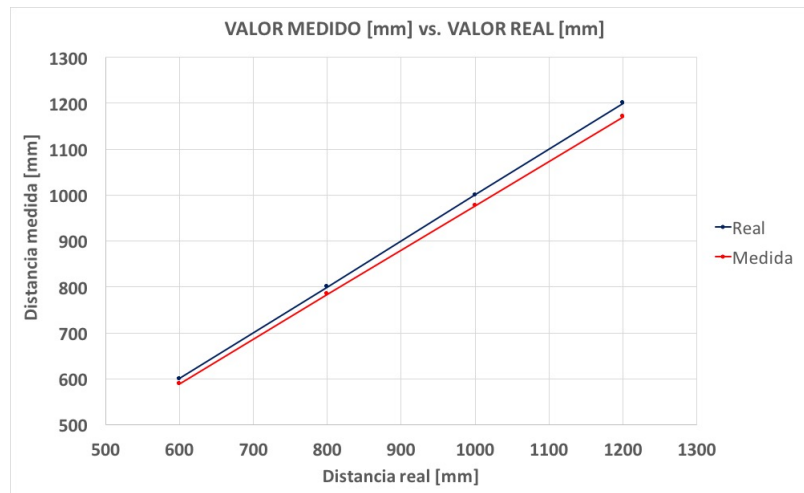


Figura 55: Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance



### 3.2.2. Sobre el Prototipo

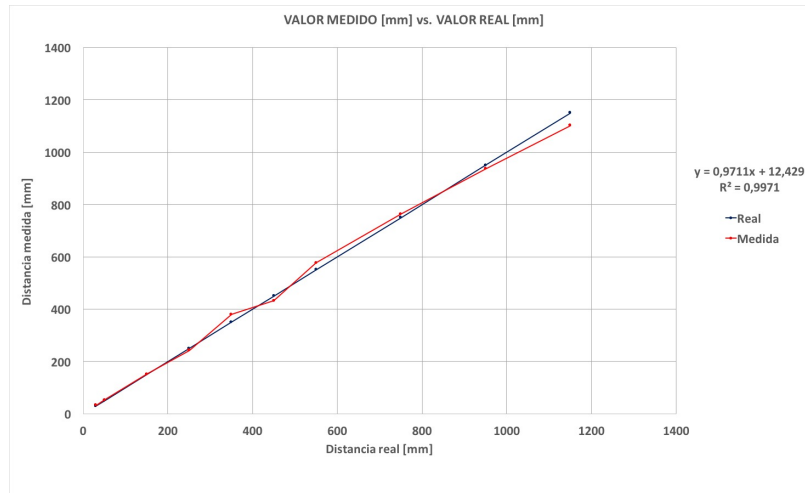


Figura 56: Medida estándar del HCSR-04

**CORTO ALCANCE: 3 - 5 [cm]**

		HCSR-04						$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$			
<b>30</b>		33	33	33	33	33	33	33.0	0.0	4.2
<b>50</b>		53	53	53	52	53	52	52.7	0.2	4.2

Tabla 32: Calibración de corto alcance

Debido a los errores en la medida del corto alcance una vez situado sobre el Prototipo, se concluye en no emplear este sensor en el corto rango, por debajo de los 10 cm; motivo por el cual no se añade la gráfica correspondiente.

MEDIO ALCANCE: 5 - 55 [cm]

HCSR-04									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>50</b>	53	53	53	52	53	52	52.7	0.2	4.2
<b>150</b>	151	151	151	151	151	151	151.0	0.0	4.2
<b>250</b>	238	243	242	243	242	243	241.8	0.8	4.2
<b>350</b>	380	380	380	380	380	380	380.0	0.0	4.2
<b>450</b>	433	432	432	433	432	432	432.3	0.2	4.2
<b>550</b>	575	574	579	579	579	574	576.7	1.1	4.2

Tabla 33: Calibración de corto alcance

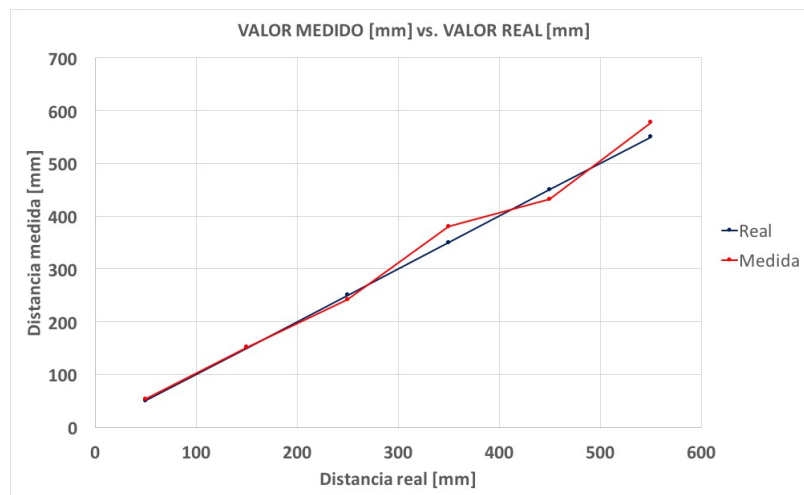


Figura 57: Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance

LARGO ALCANCE: 55 - 115 [cm]

HCSR-04									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$\bar{x}$	$\sigma_{\bar{x}}$	$E_a$
<b>550</b>	575	574	579	579	579	574	576.7	1.1	4.2
<b>750</b>	763	763	763	763	763	763	763.0	0.0	4.2
<b>950</b>	939	934	943	939	930	931	936.0	2.1	4.2
<b>1150</b>	1100	1106	1102	1100	1106	1100	1102.3	1.2	4.2

Tabla 34: Calibración de corto alcance

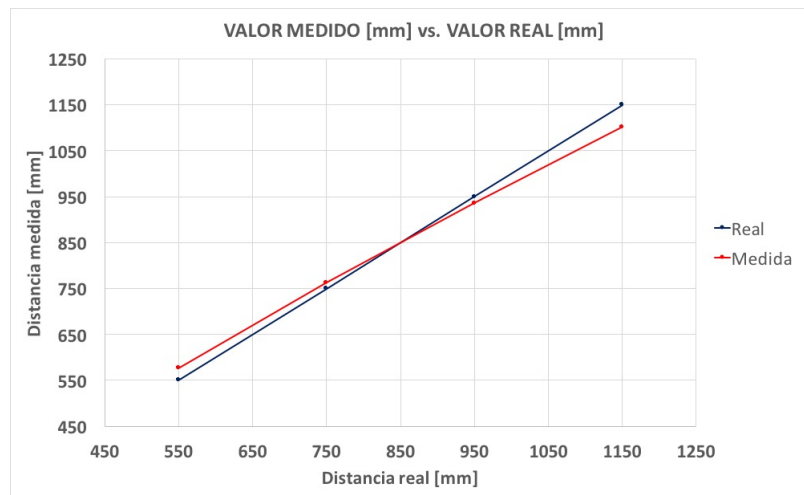


Figura 58: Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance

### 3.3. Validación

Una vez caracterizados todos los sensores presentes en el Prototipo, tanto los sensores láser VL53L0X, como el módulo de ultrasonidos HC-SR04, se procede a realizar la validación completa del sistema desarrollado.

Los límites de tolerancia aplicados proceden de dos fuentes principalmente: la primera de ellas es la dispersión en la medida para cada punto de calibración obtenida después de la caracterización de ambos sensores. Mientras que, el segundo factor determinante en el establecimiento de los límites de tolerancia consiste en un parámetro obtenido después de la realización de diferentes pruebas empíricas.

	SENSORES VL54L0X					
	BANCO PRUEBAS		PROTOTIPO		DESVIACIÓN	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>40</b>	35	43	—	—	35	43
<b>60</b>	55	60	53	60	53	60
<b>80</b>	75	80	73	85	73	85
<b>100</b>	96	102	96	108	96	108
<b>200</b>	196	205	201	213	196	213
<b>300</b>	291	316	293	311	291	316
<b>400</b>	385	411	392	412	385	412
<b>500</b>	483	505	489	513	483	513
<b>600</b>	589	604	591	614	589	614
<b>800</b>	781	808	780	823	780	823
<b>1000</b>	974	1001	996	1062	974	1062
<b>1200</b>	1142	1196	1150	1249	1142	1249

Tabla 35: Desviación máxima y mínima de los sensores VL53L0X

## ÁREA EN RUTA

Se comienza la validación por el área denominada como *en ruta*. Este área corresponde a toda la zona que se localiza por encima de los 1000 mm, valor establecido como el límite de entrada en el área de *aterrizaje*.

La validación en esta zona, se subdivide a su vez, en dos posibles condicionales. La primera de ellas se da cuando todos los sensores láser VL53L0X dan una lectura por encima de los 1000 mm. En cambio, la segunda condición se produce cuando únicamente alguno de ellos da un valor por debajo de dicho límite (1000 mm), pero el resto continúan dando un valor superior.

$$VL53L0X > 1000 \text{ mm}$$

Dentro de esta condición, se pueden producir dos posibles escenarios. El primero de ellos, correspondería a la situación en la que el Prototipo se encuentra por encima de 1 metro, es decir, todos los sensores VL53L0X dan un valor por encima de dichos 1000 mm; y, además, no se detecta ningún objetivo por debajo de él, es decir, el módulo HC-SR04 da un valor por encima de los 900 mm. Cuando esta situación se produce, ningún LED es encendido, ya que el Prototipo no se encuentra en zona de aterrizaje y no es necesario realizar ninguna acción de control sobre él, tal y cómo se muestra en la Figura 59(a).

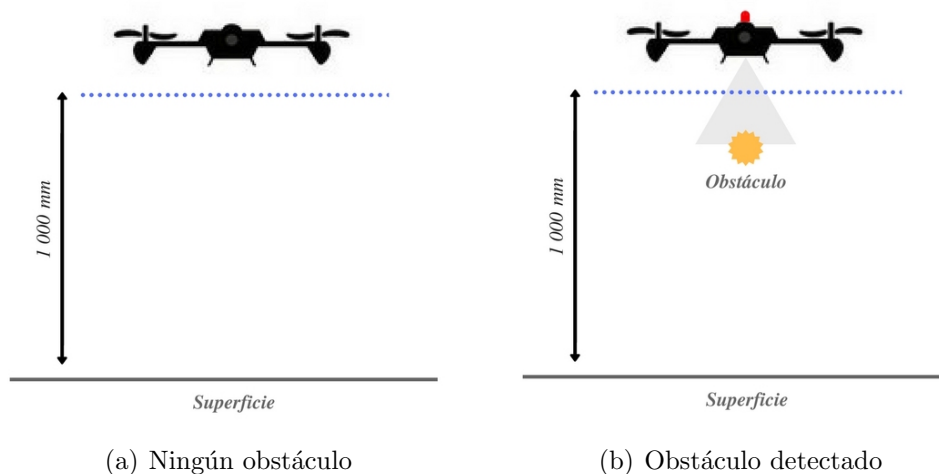


Figura 59: Comportamiento por encima de 1000 mm

Sin embargo, en la misma condición de encontrarse por encima de los 1000 mm se puede producir un segundo escenario. Éste sería el correspondiente a localizar un obstáculo justo debajo del Prototipo, por lo que el HC-SR04 daría un valor por debajo de los 900 mm. En esta ocasión, se produce el encendido del LED rojo, indicando que es necesario realizar una acción de control sobre el cuadricóptero, ya que un obstáculo se localiza cerca de él (véase Figura 59(b)).

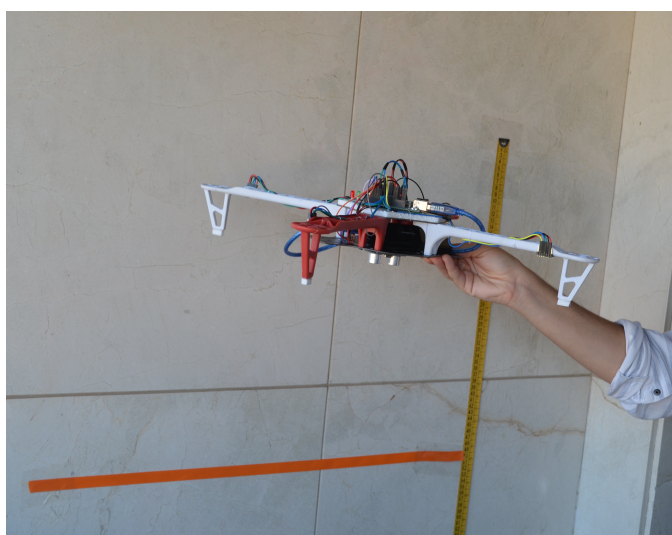


Figura 60: Proceso de validación real por encima de los 1000mm

En la Figura 60 se muestra un ejemplo real de como el Prototipo se sitúa por encima de los 1000 mm y no se produce el encendido de ningún LED. Como se ha mencionado, los valores de tolerancia han sido establecido tras las diversas pruebas de caracterización y ensayos empíricos realizados con todos los sensores presentes en el Prototipo.

### ***Zona de transición***

La zona de transición es aquella que se encuentra justo en los 1000 mm establecidos como el límite de entrada al área de aterrizaje. Esta situación se produce cuando el Prototipo, estando muy cerca de esta zona, da algunas lecturas de los sensores láser por encima de los 1000 mm y, otras, por debajo

de dicho límite. Siempre que esta condición se cumple, se realiza la comparación de las distancias medidas por los VL53L0X y el HC-SR04 y se calcula, en valor absoluto, la diferencia entre ellas.

Al igual que en la condicional anterior, cuando esta situación se produce, pueden existir tres escenarios diferenciados. El primero de ellos, correspondería al escenario en el que el Prototipo no percibe ningún obstáculo debajo de él, ni a través de los sensores VL53L0X, ni del HC-SR04. Este escenario se produce cuando la diferencia, en valor absoluto, entre cada uno de los sensores láser y entre éstos y el módulo de ultrasonidos se encuentra por debajo del límite de tolerancia en largo alcance establecido por el usuario. En esta ocasión, se produce el encendido del LED verde, indicando que nos encontramos en zona próxima al aterrizaje y no hay ningún obstáculo cerca nuestro (véase Figura 61)

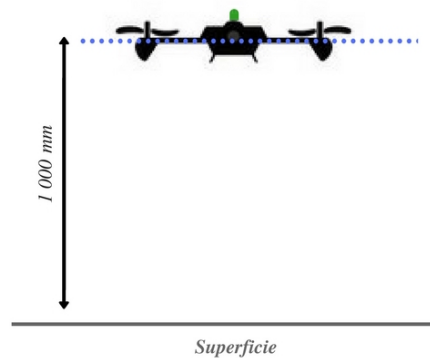
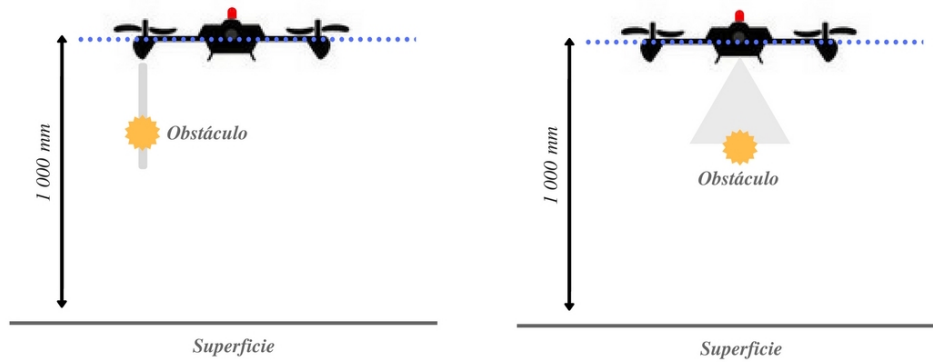


Figura 61: Zona segura para el aterrizaje

Por el contrario, si alguno de estos valores absolutos, calculados previamente, da por debajo del límite de tolerancia establecido para el largo alcance, significa que el Prototipo está detectando algún objetivo cerca de él o que su posición no es la óptima para el aterrizaje. En ambos casos, se produce el encendido del LED rojo, indicando que la situación no es la óptima para el aterrizaje (véase Figura 62).



(a) Obstáculo detectado

(b) Obstáculo detectado

Figura 62: Detección de obstáculos en la zona de transición

### ÁREA DE ATERRIZAJE

Una vez completada la validación en el área de *en ruta*, se procede a realizar de nuevo la validación, pero esta vez en la zona que se localiza por debajo de los 1000 mm, denominada como área de *aterrizaje*.

La validación en esta zona, se subdivide a su vez, en tres posibles condicionales. La primera de ellas se da cuando todos los sensores láser VL53L0X dan una lectura por debajo de los 100 mm. De no ser así, se da paso a la segunda condicional, que comprueba si dichos se encuentran todos por debajo de los 600 mm. Si esta condición tampoco se cumpliera, se procede a la comprobación de la última de las condicionales: si todos los sensores se encuentran, pues, por debajo de el límite de entrada en la zona de aterrizaje establecido en los 1000 mm.

$$VL53L0X \leq 100 [mm]$$

Dentro de esta condición, al igual que en las dos condicionales posteriores, se pueden producir tres posibles escenarios. El primero de ellos, correspondería a la situación en la que el Prototipo se encuentra por debajo de 10 centímetros (todos los sensores VL53L0X dan un valor por debajo de dichos



100 mm) y, además, no se detecta ningún obstáculo por debajo de él. Cuando esta situación ocurre, se produce el encendido del LED verde, indicando que el Prototipo se encuentra en zona de aterrizaje segura y preparado para proceder con el mismo (véase Figura 63).

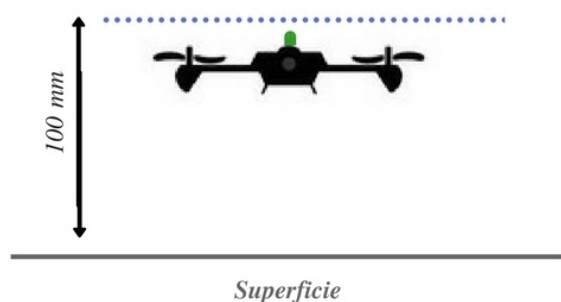


Figura 63: Zona segura para el aterrizaje a menos de 100 mm

Por el contrario, si alguno de los valores absolutos que muestran la diferencia en la distancia obtenida por los sensores láser y la diferencia entre éstos y el módulo de ultrasonidos, diesen por debajo del límite de tolerancia establecido para el corto alcance (30 mm), significa que el Prototipo está detectando algún obstáculo cerca de él o que su posición no es la óptima para el aterrizaje. En ambos casos, se produce el encendido del LED rojo, indicando que la situación no es la óptima para el aterrizaje seguro (véase Figura 65).



Figura 64: Proceso de validación real por debajo de los 100 mm

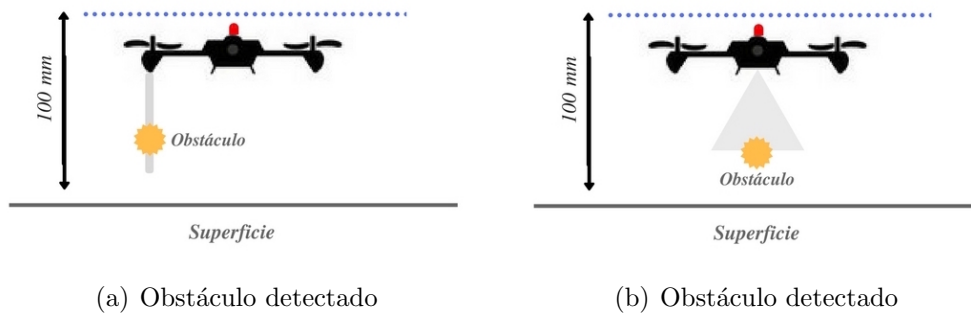


Figura 65: Detección de obstáculos por debajo de 100 mm

$$VL53L0X \leq 600 [mm]$$

Dentro de esta condicional, se produce exactamente lo mismo que ha sido explicado para el la situación en la que el Prototipo se encuentra por debajo de los 100 mm. Al igual que anteriormente, se realiza la comparativa de los valores absolutos con el límite de tolerancia establecido para el medio rango. En este caso, el límite establecido se sitúa en los 50 mm, valor obtenido tras haber realizado la caracterización de todos los sensores oportunos y el ensayo experimental de carácter empírico.

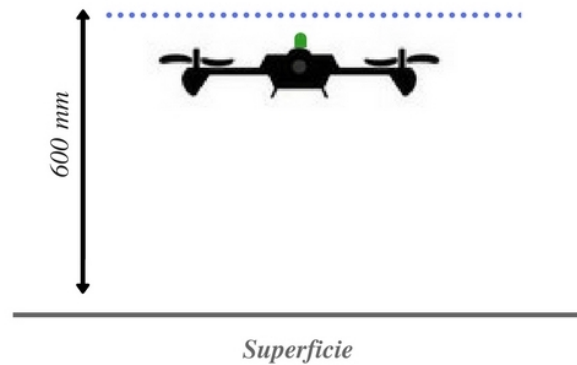


Figura 66: Zona segura para el aterrizaje a menos de 600 mm

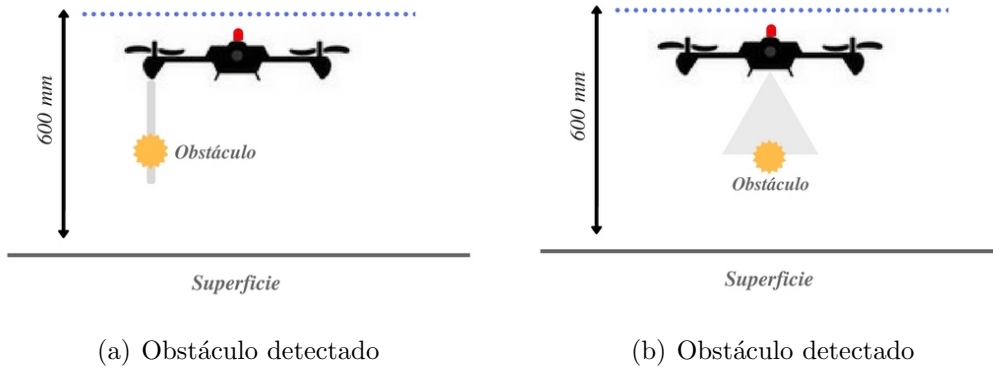


Figura 67: Detección de obstáculos por debajo de 600 mm

El encendido de los LEDs se produce de la misma forma que ocurre para la condición en la que el Prototipo se encuentra por debajo de los 100 mm. Si un obstáculo es detectado, se produce el encendido del LED rojo, indicado que el aterrizaje no es seguro. Por el contrario, si ningún obstáculo es detectado, se enciende el LED verde indicando que la zona de aterrizaje es segura para el mimo.



Figura 68: Proceso de validación real por debajo de los 600 mm

$$VL53L0X \leq 1000 \text{ [mm]}$$

Finalmente, si ninguna de las anteriores condiciones se produce, se comprueba si el Prototipo se encuentra por debajo de los 1000 mm, es decir, los cuatro sensores láser VL53L0X da un valor por debajo de este límite de entrada en la zona de aterrizaje establecido para los 1000 mm.

De ser así, se vuelven a encontrar tres posibles escenarios exactamente iguales que los explicado con anterioridad para la condicional de encontrarse por debajo de los 100 mm o por debajo de los 600 mm.

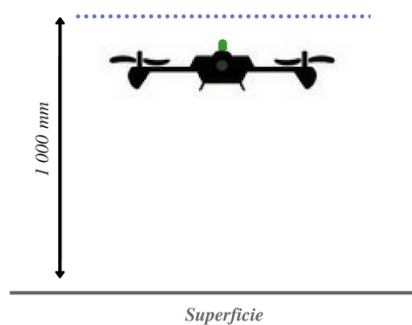
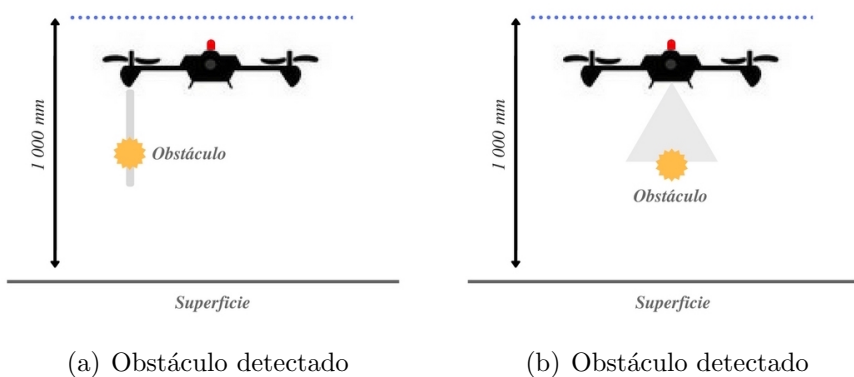


Figura 69: Zona segura para el aterrizaje a menos de 1000 mm



(a) Obstáculo detectado

(b) Obstáculo detectado

Figura 70: Detección de obstáculos por debajo de 1000 mm

# Capítulo 4

## Conclusiones

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado era el desarrollo de un sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser.

Era, por tanto, tarea de este Trabajo la previa investigación y evaluación de las diferentes tecnologías empleadas en la actualidad como sistemas de ayuda a dicho aterrizaje autónomo. Se concluye así, que resulta un tema muy recurrente en las líneas de investigación actuales, ofreciendo soluciones a la problemática planteada que van desde la fusión de sensores y algoritmos, hasta el planteamiento de nuevas tecnologías como el LIDAR.

En lo referente al diseño del sistema, sin embargo, se deduce que es susceptible de mejora. La buena lectura de los sensores láser VL53L0X depende, en gran medida, de su correcta colocación en el UAV en el cual van a operar. Por ello, es aconsejable caracterizar dichos sensores dependiendo del diseño en el cual se van a implementar y ajustar los niveles de tolerancia según su funcionamiento.

Teniendo en cuenta las características de ambos sensores, el VL53L0X y el módulo de ultrasonidos HC-SR04, los ensayos experimentales de caracterización y validación demuestran la viabilidad de la prueba de concepto desarrollada en el presente Trabajo. La caracterización se encuentra dentro de los niveles establecidos por el fabricante, por lo que no resulta necesario tenerla en cuenta para funcionamiento del sistema diseñado. Asimismo, la validación del sistema electrónico, pese a que el programa desarrollado a

través de la IDE de Arduino puede ser planteado de diversas maneras, cumple con las especificaciones requeridas por un sistema de ayuda al aterrizaje autónomo.

En definitiva, se concluye que la prueba de concepto planteada en este Trabajo Final de Grado ha alcanzado los objetivos inicialmente planteados. Se trata de un concepto válido como sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser eficaces, precisos y de bajo coste.

En cuanto a las posibles líneas futuras de desarrollo del presente Trabajo Final de Grado, se derivan, esencialmente, tres ramas diferenciadas cuya base está fundamentada en el actual sistema diseñado.

Como primer avance, y dado que el proyecto actual se presenta como una prueba de concepto, se plantea la inmediata necesidad de integrar el sistema diseñado en un UAV operativo. De esta forma, se deberían adaptar los límites de tolerancia aquí expuestos a las características concretas del UAV para conseguir un sistema polivalente y eficaz. Se integraría dentro del sistema principal de control mediante la conexión I<sup>2</sup>C esclavo-maestro, constituyendo uno de los elementos determinante en la toma de decisiones oportunas en cuanto a aterrizaje autónomo se refiere.

Otra de las posibles vías de desarrollo del Trabajo, como medio alternativo o complementario al anteriormente citado, se corresponde a la integración de los sensores láser de medición descritos en la actual memoria junto con otros dispositivos de orientación y posición mediante algoritmos de fusión. Se trata de buscar una alternativa que combinase diversos dispositivos con la integración de, por ejemplo, un filtro de Kalman que realizase un seguimiento predictivo del sistema.

Por último, se plantea también como posible línea futura, el desarrollo completo de un sistema LIDAR de bajo coste basado en los actuales sensores láser VL53L0X. Esta aplicación requeriría de un alto grado de investigación de todos los componentes necesarios para la obtención de un sistema robusto, preciso y de bajo coste. Posteriormente, dicho sistema podría ser integrado como parte del sistema principal en un UAV que fuese capaz de escanear y mapear el entorno que se encuentra a su alrededor y, por tanto, detectar zonas donde el aterrizaje autónomo fuese seguro.

# Capítulo 5

## Presupuesto

Para finalizar con este Trabajo Final de Grado sobre el *desarrollo de un sistema de ayuda al aterrizaje autónomo de cuadricópteros basado en sensores láser* se especifican, a continuación, los costes aproximados de la realización del proyecto completo.

Los costes se desglosan principalmente en dos grandes bloques. El primero de ellos corresponde al importe propio de los componentes necesarios para el correcto desarrollo e implementación del sistema propuesto. En cambio, el segundo bloque se centra en los gastos derivados de la mano de obra, investigación y los ensayos experimentales y de calibración. De esta forma, cada uno de los dos bloques representa un presupuesto parcial que, en su conjunto, constituye el presupuesto total aproximado del proyecto.

Asimismo, se ha de tener en cuenta que el presupuesto versa sobre la estructura FY450 utilizada y no contempla la posible fabricación en serie del mismo o la adecuación del sistema a un UAV ya existente; en cuyo caso disminuirían los costes.

De igual forma, el valor de los costes asociado a los componentes necesarios para la implementación del sistema presentados en este presupuesto podría verse afectado por el desarrollo puntual del proyecto o por la variación de precios en un mercado global.

## MATERIALES

En lo referente al coste del material necesario para la elaboración del estudio, el correcto desarrollo y posterior implementación del sistema propuesto, el importe concuerda con el precio de venta al público suministrado por cada uno de los fabricantes oficiales de los componentes empleados.

Así, se incluye dentro del material empleado, todo lo relacionado con el propio sistema eléctrico: la placa Arduino UNO, los sensores láser VL53L0X, el módulo de ultrasonidos HC-SR04, la batería externa, el cableado, etc. Asimismo, todos los elementos relaciones con la elaboración del citado modelo Prototipo son también incluidos dentro de este presupuesto parcial.

Sin embargo, dado que Arduino es una plataforma de hardware y software de uso libre (*open-source*), no se incluye ningún gasto referido a licencias de software. De esta forma, se muestra en la Tabla 36 el cómputo total del coste del material necesario con el 21 % del IVA ya aplicado sobre cada uno de los componentes.

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Coste ud.</b>	<b>Importe</b>
	<b>[ud.]</b>	<b>[€/ud]</b>	<b>[€]</b>
Estructura FY450	1	15.89	15.89
Arduino UNO Rev3	1	16.00	16.00
Módulo VL53L0X	4	10.83	43.32
Módulo HC-SR04	1	1.54	1.54
Batería CoolBox 3000mAh	1	13.52	13.52
Cable Jumper Macho-Hembra	40	0.11	4.40
Tornillo 2.5x10 [mm]	20	0.20	4.00
Bricocinta TackCeys	1	4.17	4.17
<b>TOTAL</b>			<b>102.84</b>

Tabla 36: Coste de los materiales empleados



## MANO DE OBRA

En lo referente a la mano de obra, se localizan diversos perfiles dependiendo de la naturaleza de la tarea a realizar. En este sentido, para el desarrollo del Trabajo, se ha requerido mano de obra ingenieril para la investigación, desarrollo conceptual, ensayos experimentales y montaje del sistema (un graduado en Ingeniería Aeroespacial) y, también, mano de obra técnica para el desarrollo de ciertas parte del montaje (técnico de laboratorio).

El precio unitario de la mano de obra se ha calculado como media de las bases y tipos de cotización de 2017 para el grupo de cotización 2, correspondiente a la Categoría Profesional de 'Ingenieros Técnicos, Peritos y Ayudantes Titulados?', publicado por el Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas

Así, la Tabla 37 hace referencia a dichos costes asociados a la mano de obra, dependiendo de la categoría del perfil y de unas horas determinadas para el desarrollo completo del proyecto.

<b>Mano de obra</b>	<b>Horas</b> [h]	<b>Coste h.</b> [€/h]	<b>Importe</b> [€]
Graduado Ingeniería Aeroespacial	120	14.35	3587.50
Técnico de laboratorio	5	7.14	35.70
<b>TOTAL</b>			<b>3623.20</b>

Tabla 37: Coste de la mano de obra empleados

## PRESUPUESTO TOTAL

Finalmente, y considerando el desglose del presupuesto elaborado, se obtiene el importe total del proyecto realizado. Dicho presupuesto incluye así todo lo referente a la investigación, desarrollo e implementación de lo expuesto en la memoria.

A dicho coste se le aplica, únicamente sobre la mano de obra, el vigente impuesto sobre el valor añadido (IVA) del 21 %, ya que el resto de componentes lo llevan incluido al ser adquiridos de forma externa.

Además, se incluye también una serie de gastos dentro de un concepto denominado *medios auxiliares* con un valor atribuido del 5 % sobre la cuantía total de la mano de obra y los materiales. Dicho concepto comprende todo lo relacionado con posibles costes indirectos de la realización del proyecto, tales como: el mantenimiento de las instalaciones, consumo eléctrico, material adicional, horas extra del personal, imprevistos varios, etc.

		<b>Base imponible</b>	<b>Importe</b>
		[€]	[€]
Material empleado			102.84
Mano de obra			3623.20
Medios auxiliares	6 %	3726.04	223.56
IVA	21 %	3623.20	760.87
<b>TOTAL</b>			<b>4757.24</b>

Tabla 38: Presupuesto total del Trabajo Final de Grado

En definitiva, englobando ambos presupuestos parciales y teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, este Trabajo Final de Grado cuenta con un presupuesto total de **4 757.24 €**

# Bibliografía

- [1] UMBERTO PAPA y GIUSEPPE DEL CORE, «Design of Sonar Sensor Model for Safe Landing of an UAV», *2014 IEEE International Conference of Sensors*, **978-1-4799-7569-3**, 2015.
- [2] HU YONG, ZHEN ZIYANG y WANG ZHISHENG, «Federated Filter Based Multi-Sensor Fault-tolerant Altitude Determination System for UAV», *Chinese Control and Decision*, **978-1-4244-1734-6**, 2008. Conference
- [3] VADIM ZALIVA y FRANZ FRANCHETTI, «Barometric and GPS Altitude Sensor Fusion», *2014 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, **978-1-4799-2893-4**, 2014.
- [4] JOHN DOUGHERTY, DAEWON LEE y AND TAEYOUNG LEE, «Laser-based Guidance of a Quadrotor UAV for Precise Landing on an Inclined Surface», *American Control Conference (ACC)*, **978-1-4799-3274-0**, 2014.
- [5] M. F. BIN MISNAN, N. M. ARSHAD y N.A. RAZAC, «Construction Sonar Sensor Model of Low Altitude Field Mapping Sensors for Application on a UAV», *Faculty of Electrical Engineering UiTM Malaysia*,
- [6] .D. TARDOS, J. NEIRA, P. M. NEWMAN y J. J. LEONARD, «Robust mapping and localization in indoor environments using sonar data», *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no.6, pp. 560-569, 1990.
- [7] A. DIOSI, G. TAYLOR y L. KLEEMAN, «Interactive SLAM using Laser and Advanced Sonar», *ARC Centre for Perceptive and Intelligent Machines in Complex Environments, Department of Electrical and Computer Systems Engineering*, Monash University, Victoria, Australia.

- [8] J. CHOI, S. AHN y ND W. K. CHUNG, «Robust Sonar Feature Detection for the SLAM of Mobile Robot», *Robotics and Bio-Mechatronics Lab*, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Phang, Korea.
- [9] U. PAPA y G. DEL CORE, «Design and Assembling of a low-cost Mini UAV Quadcopter System», *Department of Science and Technology*, University of Naples "Parthenope", 2014, Naples, Italy.
- [10] GARRY A. EINICKE, «High-Order Filtering of LIDAR Data to Assist Coal Shiploading», *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, **0018-9251**, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Queensland Centre for Advanced Technology, Technology Court, Pullenvale, Australia, 2017.
- [11] MARNI AZIRA MARKOM, ABDUL HAMID ADO , ERDY SULINO MOHD MUSLIM TAN, SHAZMIN ANIZA ABDUL SHUKOR y AND NORASMA-DI ABDUL RAHIM, «A Mapping Mobile Robot using Lidar Scanner», *2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IEEE IRIS2015)*, **978-1-4673-7124-7**, 2015
- [12] GRIGORE STAMATESCU, IULIA STAMATESCU y DAN POPESCU, «Sensor Fusion Method for Altitude Estimation in Mini-UAV Applications», *Electronics, Computers and Artificial Intelligence*, Rumania, 20015
- [13] ELEC FREAKS, ULTRASONIC RANGING MODULE HC-SR04, DATASHEET.
- [14] [10] ULTRASONIC RANGING MODULE: HC-SR04, DATASHEET, ITEAD STUDIO, WWW.ITEADSTUDIO.COM, 2010,
- [15] [10] VL53L0X LASER RANGE-FINDER, DATASHEET, STMICROELECTRONICS, 2016

# Apéndice A

## Anexo I

### A.1. Firmware

Se adjunta en el Anexo A una copia íntegra del código desarrollado mediante la IDE de Arduino para el presente Trabajo Final de Grado.

```

#include <Wire.h>
#include <VL53L0X.h>

long tiempo;
int disparador = 3; // Triger
int entrada = 4;    // Echo
int HCSR;
float distancia;

#define Tol_short 30
#define Tol_med 50
#define Tol_long 90

// Distancias entre VL53L0X / VL53L0X y VL53L0X / HCSR-04
int d_12;
int d_13;
int d_14;
int d_23;
int d_24;
int d_34;

int d_H1;
int d_H2;
int d_H3;
int d_H4;

// Variable estado UAV
int UAV;

// #define XSHUT_pin6 not required for address change
#define XSHUT_pin4 8
#define XSHUT_pin3 7
#define XSHUT_pin2 6
#define XSHUT_pin1 5

// ADDRESS_DEFAULT 0b0101001 or 41
// #define Sensor1_newAddress 41 not required address change
#define Sensor2_newAddress 42
#define Sensor3_newAddress 43
#define Sensor4_newAddress 44

VL53L0X Sensor1;
VL53L0X Sensor2;
VL53L0X Sensor3;
VL53L0X Sensor4;

void setup()
{ /*WARNING*/
  pinMode(disparador, OUTPUT);
  pinMode(entrada, INPUT);

  //LEDs
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
}

```

```

//Shutdown pins of VL53L0X ACTIVE-LOW-ONLY NO TOLERANT TO 5V
pinMode(XSHUT_pin1, OUTPUT);
pinMode(XSHUT_pin2, OUTPUT);
pinMode(XSHUT_pin3, OUTPUT);
pinMode(XSHUT_pin4, OUTPUT);

Serial.begin(9600);

Wire.begin();
Wire.setClock(50000);
//Change address of sensor and power up next one
pinMode(XSHUT_pin4, INPUT);
delay(10);
Sensor4.setAddress(Sensor4_newAddress);
pinMode(XSHUT_pin3, INPUT);
delay(10);
Sensor3.setAddress(Sensor3_newAddress);
pinMode(XSHUT_pin2, INPUT);
delay(10);
Sensor2.setAddress(Sensor2_newAddress);
pinMode(XSHUT_pin1, INPUT);
delay(10);

Sensor1.init();
Sensor2.init();
Sensor3.init();
Sensor4.init();

Sensor1.setTimeout(500);
Sensor2.setTimeout(500);
Sensor3.setTimeout(500);
Sensor4.setTimeout(500);

// Start continuous back-to-back mode (take readings as
// fast as possible). To use continuous timed mode
// instead, provide a desired inter-measurement period in
// ms (e.g. sensor.startContinuous(100)).
Sensor1.setMeasurementTimingBudget(20000);
Sensor2.setMeasurementTimingBudget(20000);
Sensor3.setMeasurementTimingBudget(20000);
Sensor4.setMeasurementTimingBudget(20000);
}

void loop()
{
// Pequeño pulso para activar el sensor HC-SR04
digitalWrite(disparador, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(disparador, LOW);

tiempo = (pulseIn(entrada, HIGH) / 2);
distancia = float(tiempo * 0.3432); // [mm]
HCSR = distancia + 50; // [mm]
}

```

```

// Sensores VL53L0X
int Dist_1;
int Dist_2;
int Dist_3;
int Dist_4;

Dist_1 = Sensor1.readRangeSingleMillimeters();
Dist_2 = Sensor2.readRangeSingleMillimeters();
Dist_3 = Sensor3.readRangeSingleMillimeters();
Dist_4 = Sensor4.readRangeSingleMillimeters();

// Cálculo: distancia entre VL53L0X
d_12 = abs(Dist_1 - Dist_2);
d_13 = abs(Dist_1 - Dist_3);
d_14 = abs(Dist_1 - Dist_4);
d_23 = abs(Dist_2 - Dist_3);
d_24 = abs(Dist_2 - Dist_4);
d_34 = abs(Dist_3 - Dist_4);

// Cálculo: distancia entre HCSR-04 y VL53L0X
d_H1 = abs(Dist_1 - HCSR);
d_H2 = abs(Dist_2 - HCSR);
d_H3 = abs(Dist_3 - HCSR);
d_H4 = abs(Dist_4 - HCSR);

// NO LANDING AREA
if (Dist_1 > 1000 && Dist_2 > 1000 && Dist_3 > 1000 && Dist_4 > 1000)
{
  if (HCSR > 900)
  {
    UAV = 8; // Ningún Led ON
  }
  else
  {
    UAV = 1; // HCSR-04 está por debajo de 900 [mm]
  }
}

// LANDING AREA
// (Short Range)
else if (Dist_1 <= 100 && Dist_2 <= 100 && Dist_3 <= 100 && Dist_4 <= 100)
{
  if (d_12 <= Tol_short && d_13 <= Tol_short && d_14 <= Tol_short
    && d_23 <= Tol_short && d_24 <= Tol_short && d_34 <= Tol_short)
  {
    UAV = 0; //Todo funciona OK
  }
  else
  {
    UAV = 5; // Algún VL53L0X difiere más de 15 [mm] con otro VL53L0X
  }
}
}

```



```

// (Medium Range)
else if (Dist_1 <= 600 && Dist_2 <= 600 && Dist_3 <= 1000 && Dist_4 <= 1000)
{
  if (d_12 <= Tol_med && d_13 <= Tol_med && d_14 <= Tol_med
    && d_23 <= Tol_med && d_24 <= Tol_med && d_34 < Tol_med)
  {
    if (d_H1 <= Tol_med && d_H2 <= Tol_med && d_H3 <= Tol_med && d_H4 <= Tol_med) {
      UAV = 0; //Todo funciona OK
    }
    else {
      UAV = 6; // HCSR-04 difiere en más de 40 [mm] con algún VL53L0X
    }
  }
  else
  {
    UAV = 7; // Algún VL53L0X difiere más de 40 [mm] con otro VL53L0X
  }
}

// (Long Range)
else if (Dist_1 <= 1000 && Dist_2 <= 1000 && Dist_3 <= 1000 && Dist_4 <= 1000)
{
  if (d_12 <= Tol_long && d_13 <= Tol_long && d_14 <= Tol_long
    && d_23 <= Tol_long && d_24 <= Tol_long && d_34 <= Tol_long)
  {
    if (d_H1 <= Tol_long && d_H2 <= Tol_long && d_H3 <= Tol_long && d_H4 <= Tol_long) {
      UAV = 0; //Todo funciona OK
    }
    else {
      UAV = 2; // HCSR-04 difiere en más de 90 [mm] con algún VL53L0X
    }
  }
  else
  {
    UAV = 3; // Algún VL53L0X difiere más de 90 [mm] con otro VL53L0X
  }
}

else if (Dist_1 <= 1000 || Dist_2 <= 1000 || Dist_3 <= 1000 || Dist_4 <= 1000)
{
  if (d_12 <= Tol_long && d_13 <= Tol_long && d_14 <= Tol_long
    && d_23 <= Tol_long && d_24 <= Tol_long && d_34 <= Tol_long)
  {
    if (d_H1 <= Tol_long && d_H2 <= Tol_long && d_H3 <= Tol_long && d_H4 <= Tol_long)
    {
      UAV = 0; //Todo funciona OK
    }
    else
    {
      UAV = 2; // HCSR-04 difiere en más de 90 [mm] con algún VL53L0X
    }
  }
  else
  {
    UAV = 3; // Algún VL53L0X difiere más de 90 [mm] con otro VL53L0X
  }
}
}

```

```
switch (UAV)
{
  case 0:
    digitalWrite(13, HIGH);
    break;

  case 1:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 2:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 3:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 4:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 5:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 6:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 7:
    digitalWrite(12, HIGH);
    break;

  case 8:
    digitalWrite(12, LOW);
    digitalWrite(13, LOW);
    break;
}

delay(500); // 500 MILIsegundos
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
```

```
//Datos por pantalla
Serial.print(Dist_1);
if (Sensor1.timeoutOccurred()) Serial.print(" TIMEOUT");
Serial.print(', ');
Serial.print(Dist_2);
if (Sensor2.timeoutOccurred()) Serial.print(" TIMEOUT");
Serial.print(', ');
Serial.print(Dist_3);
if (Sensor3.timeoutOccurred()) Serial.print(" TIMEOUT");
Serial.print(', ');
Serial.print(Dist_4);
if (Sensor4.timeoutOccurred()) Serial.print(" TIMEOUT");

Serial.print(', ');
Serial.print(', ');
Serial.print(', ');

Serial.print(HCSR);

Serial.print(', ');
Serial.print(', ');
Serial.print(', ');

Serial.print(UAV);
Serial.println();
}
```

# Apéndice B

## Anexo II

### B.1. Caracterización: VL53L0X

#### B.1.1. Banco de pruebas

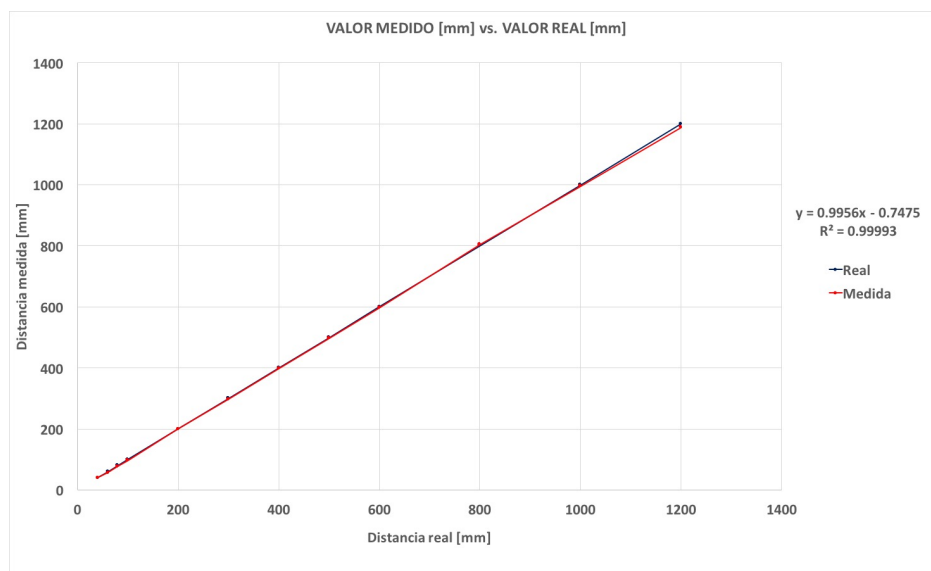


Figura 71: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1

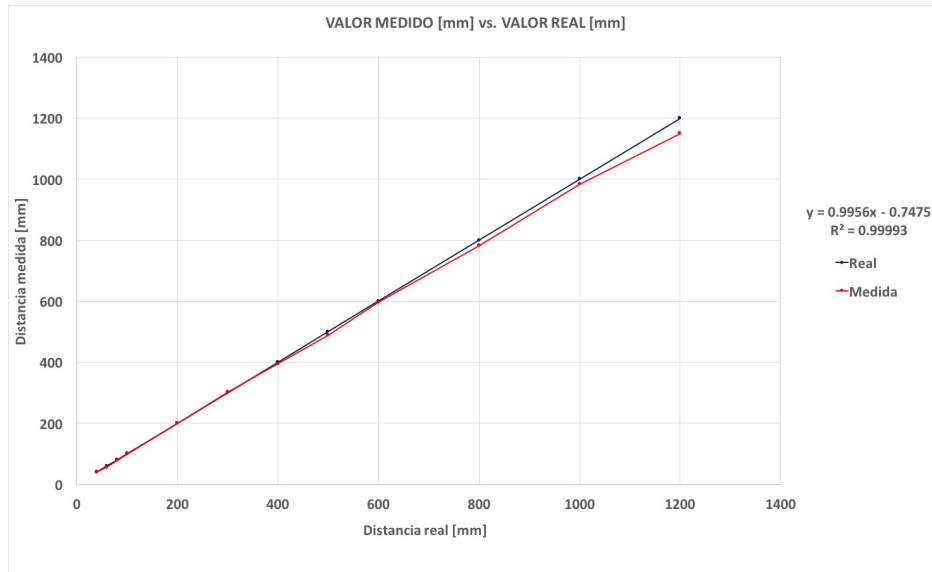


Figura 72: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2

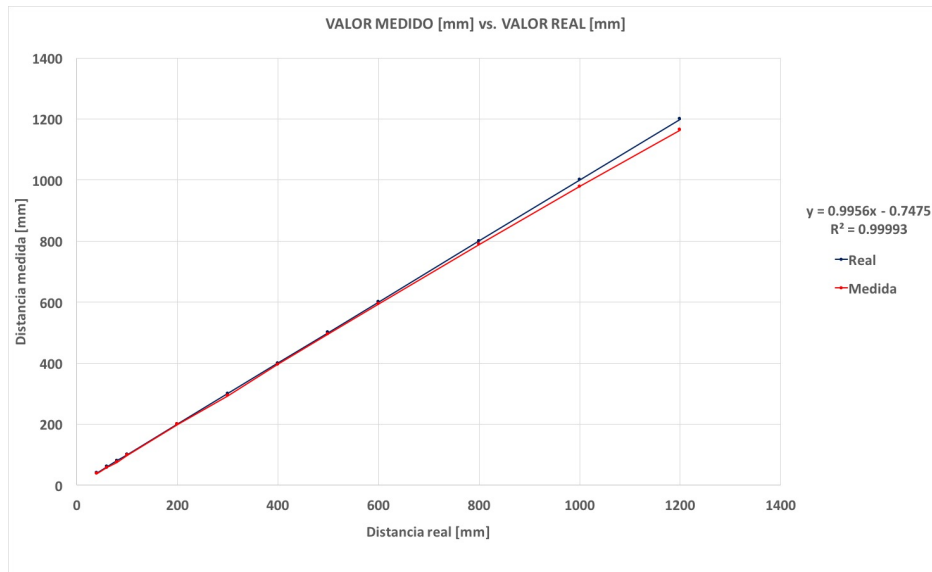


Figura 73: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3

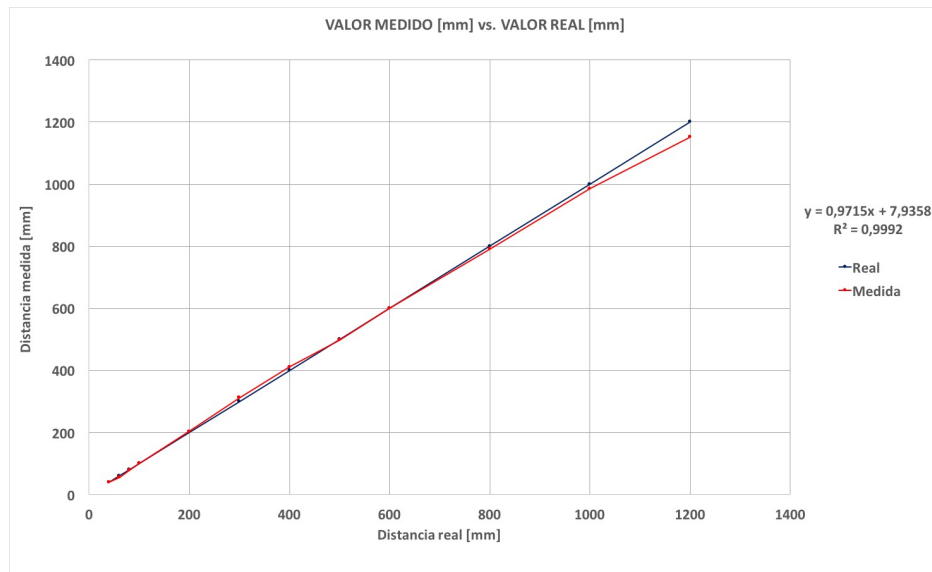


Figura 74: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4

**CORTO ALCANCE: 4 - 10 [cm]**

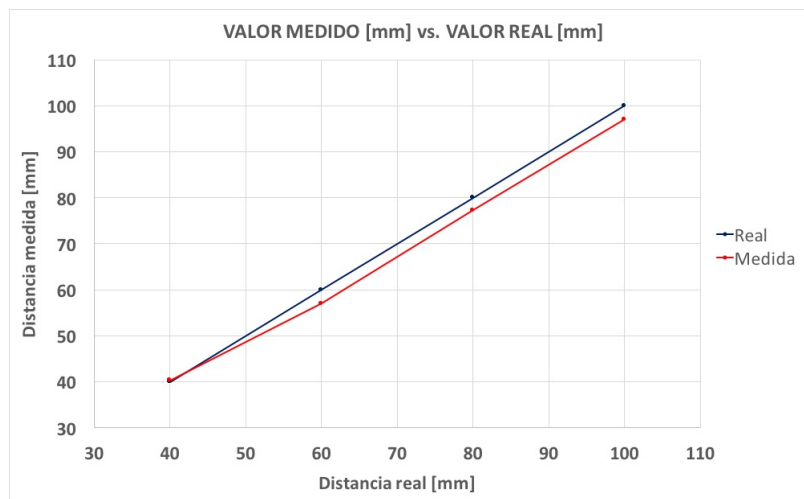


Figura 75: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en corto alcance

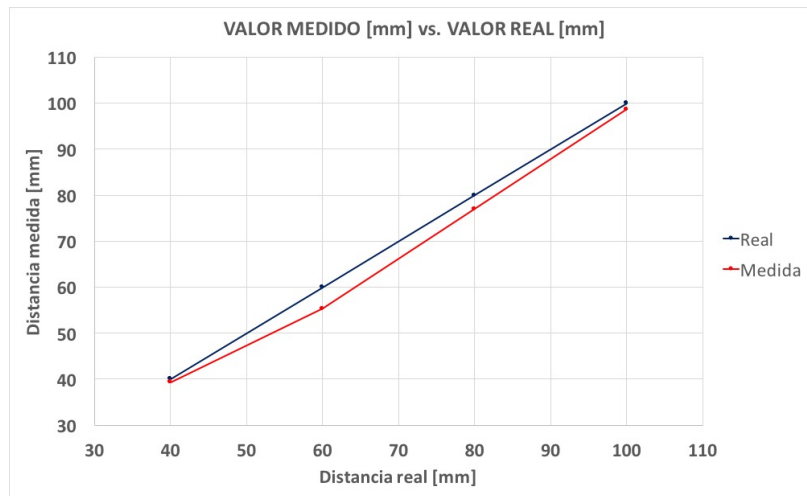


Figura 76: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en corto alcance

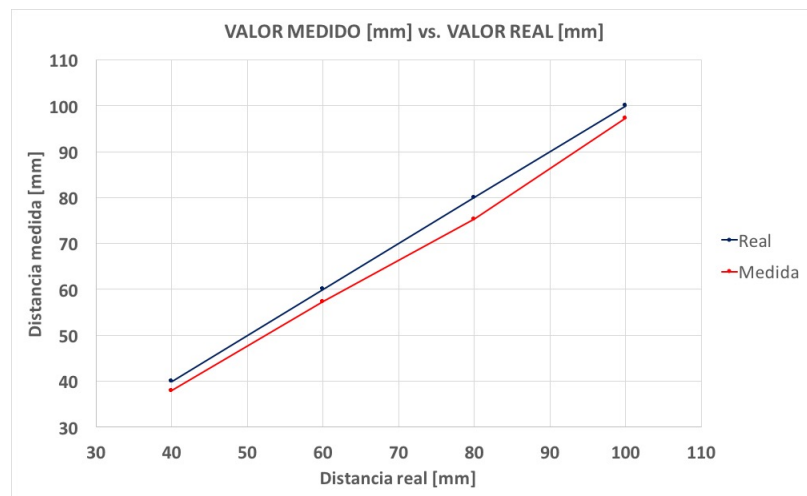


Figura 77: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en corto alcance

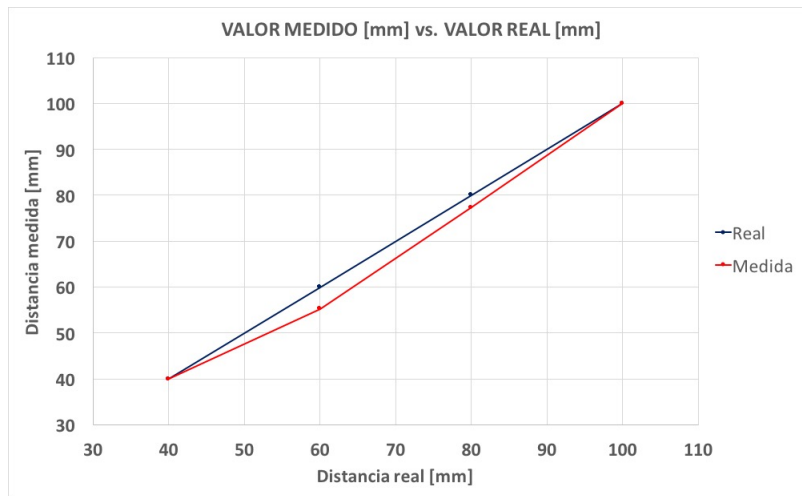


Figura 78: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en corto alcance

**MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]**

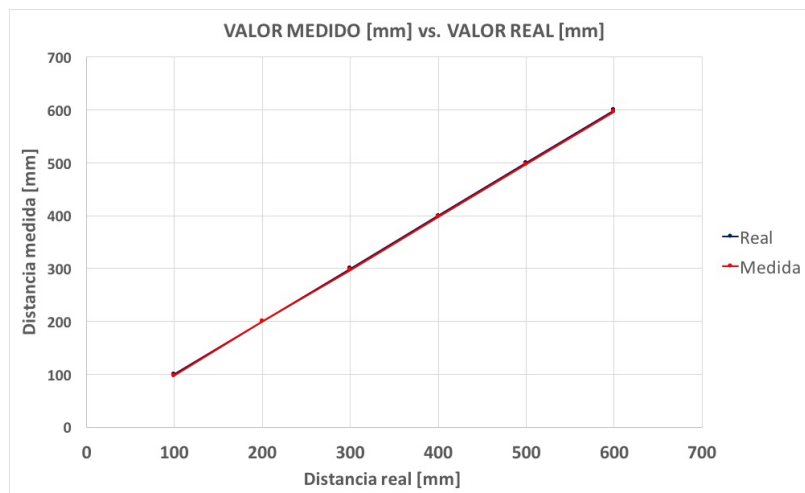


Figura 79: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en medio alcance



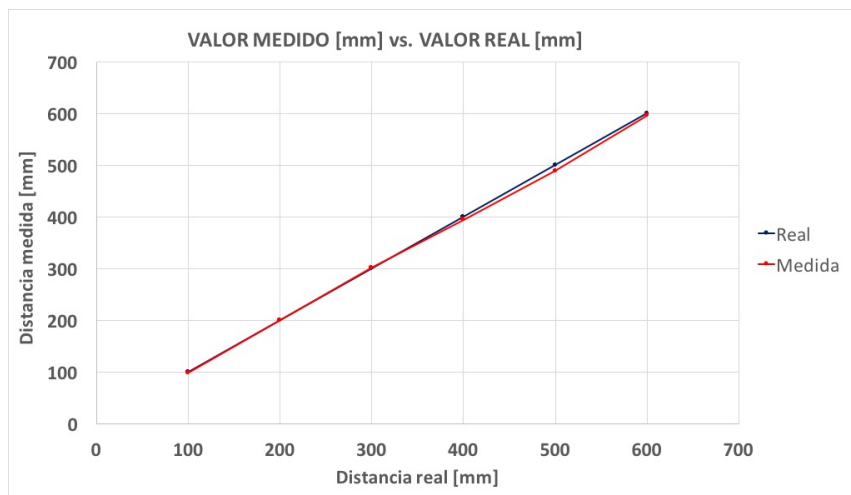


Figura 80: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en medio alcance

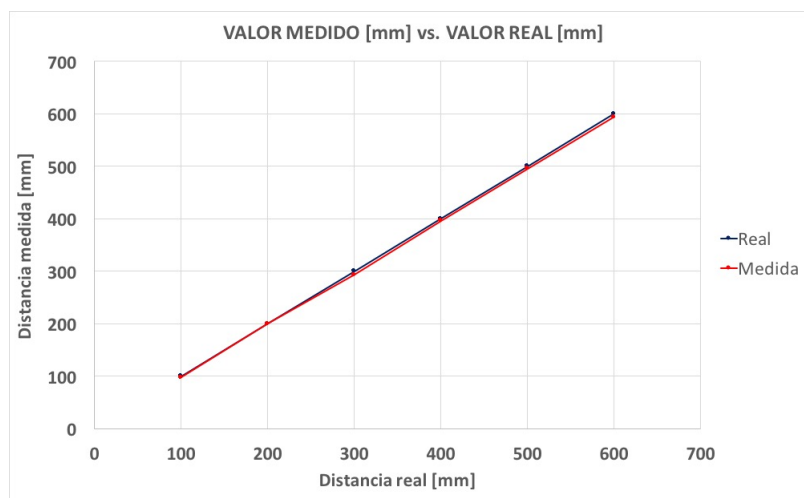


Figura 81: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en medio alcance

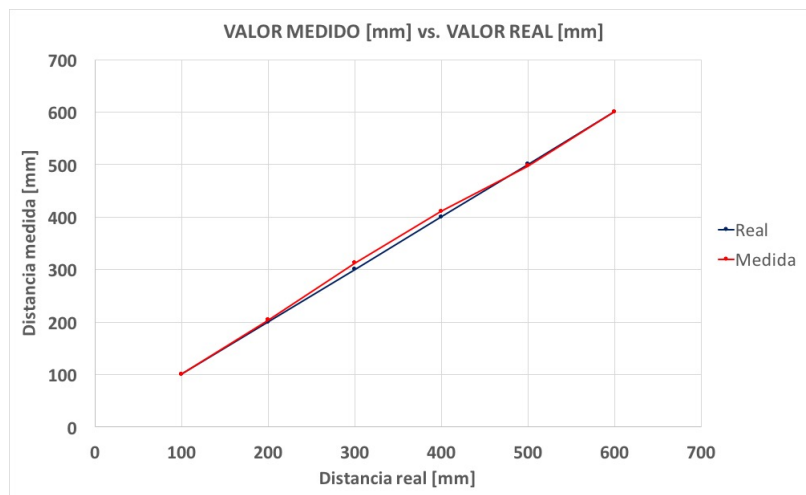


Figura 82: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en medio alcance

**LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]**

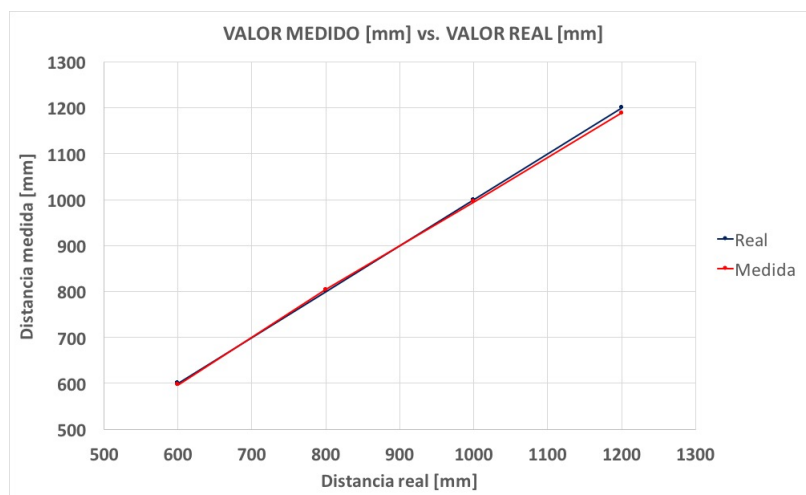


Figura 83: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1 en largo alcance

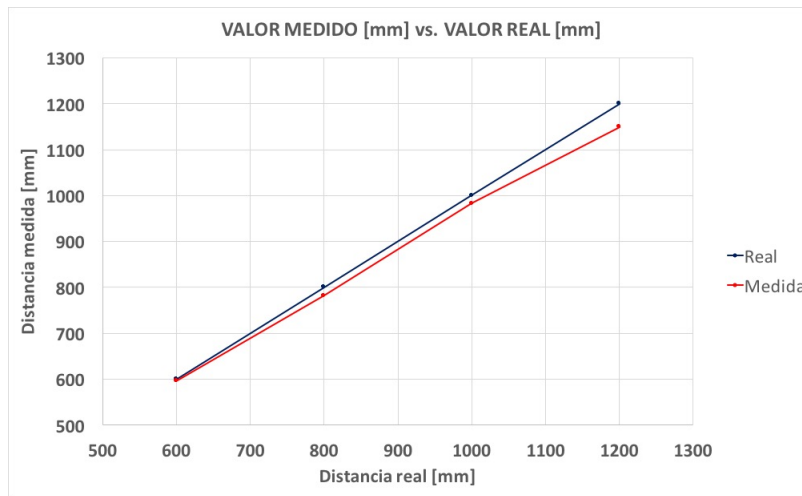


Figura 84: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en largo alcance

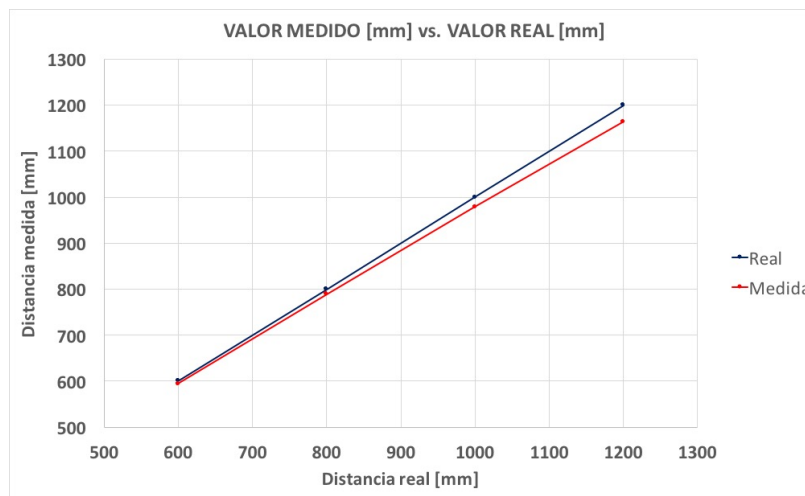


Figura 85: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en largo alcance

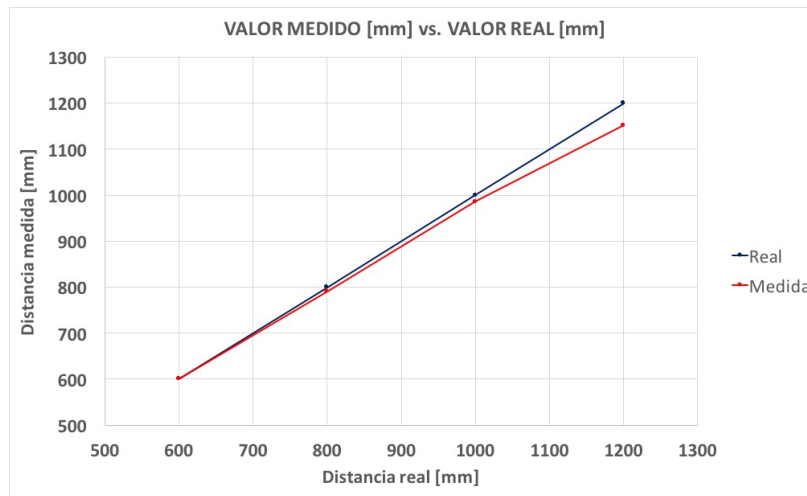


Figura 86: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en largo alcance

### B.1.2. Sobre el Prototipo

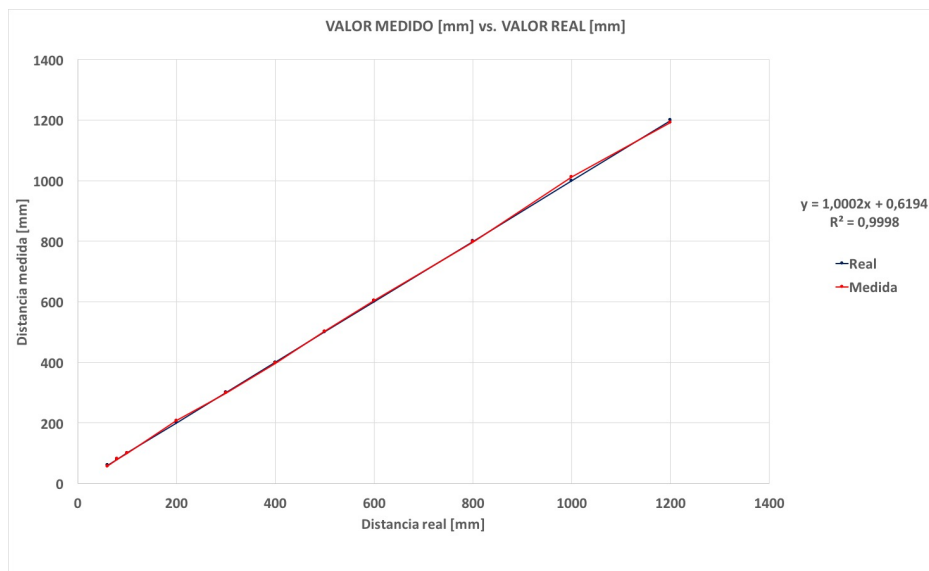


Figura 87: Medida estándar del VL53L0X - Sensor1

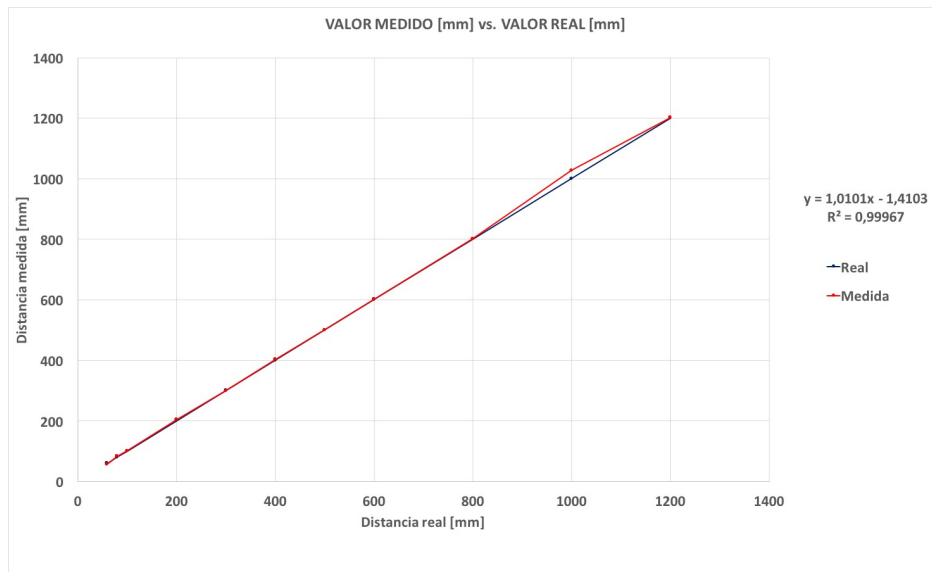


Figura 88: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2

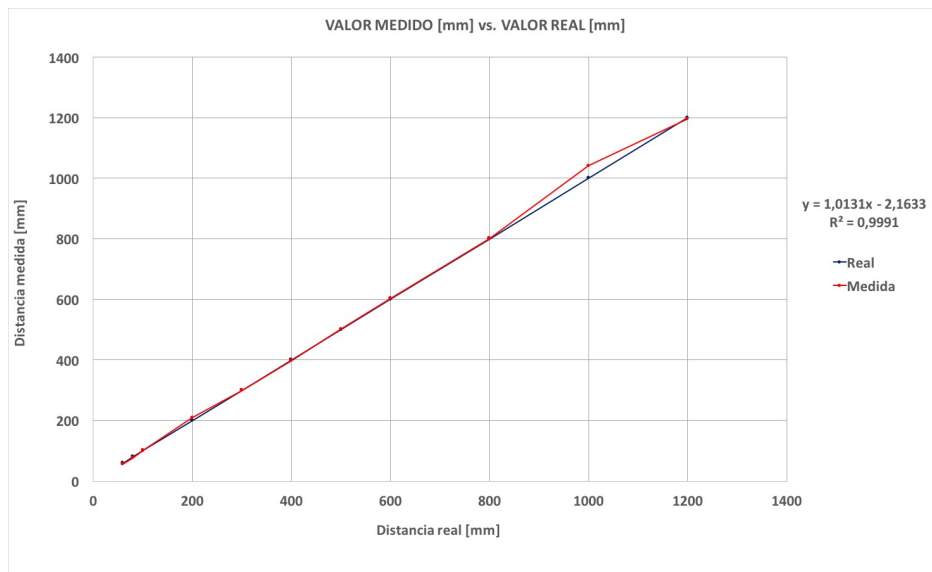


Figura 89: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3

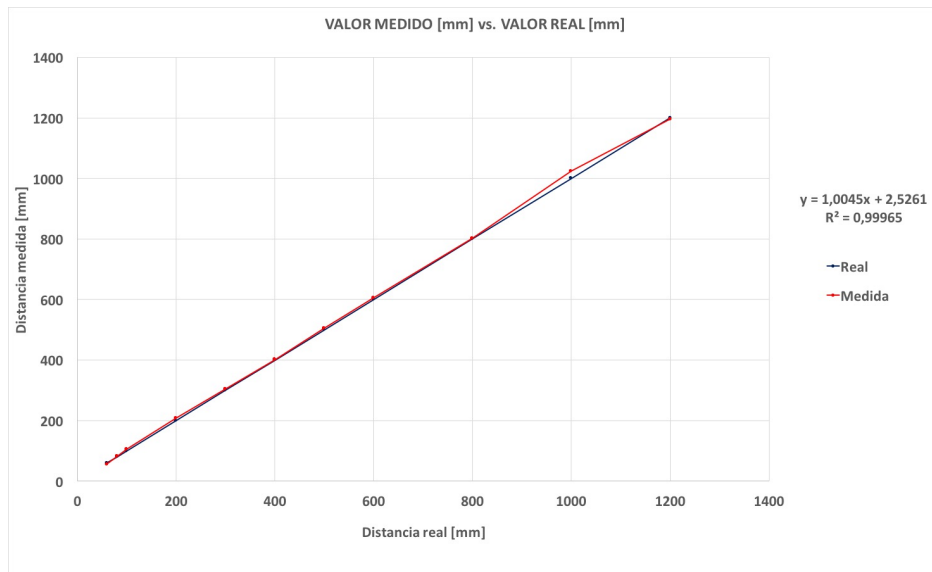


Figura 90: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4

**CORTO ALCANCE: 6 - 10 [cm]**

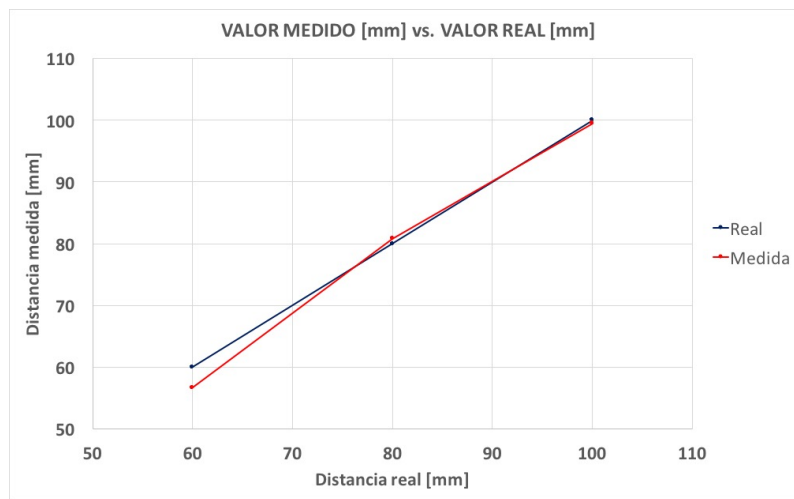


Figura 91: Medida estándar del VL53L0X - 1 en corto alcance

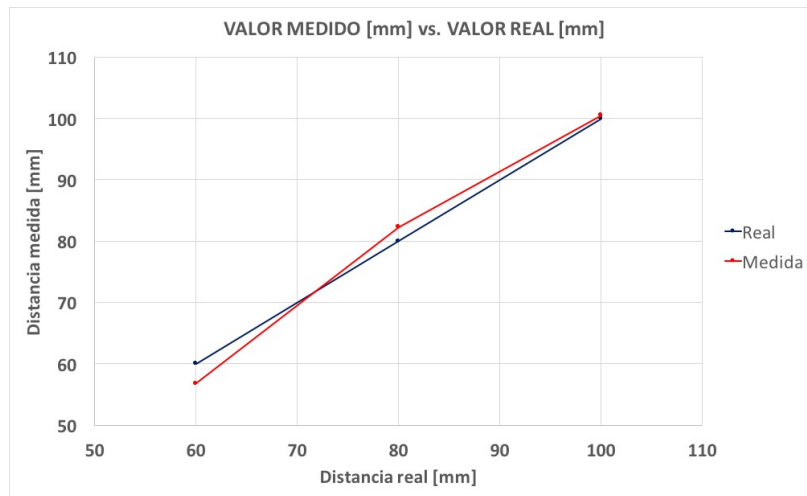


Figura 92: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en corto alcance

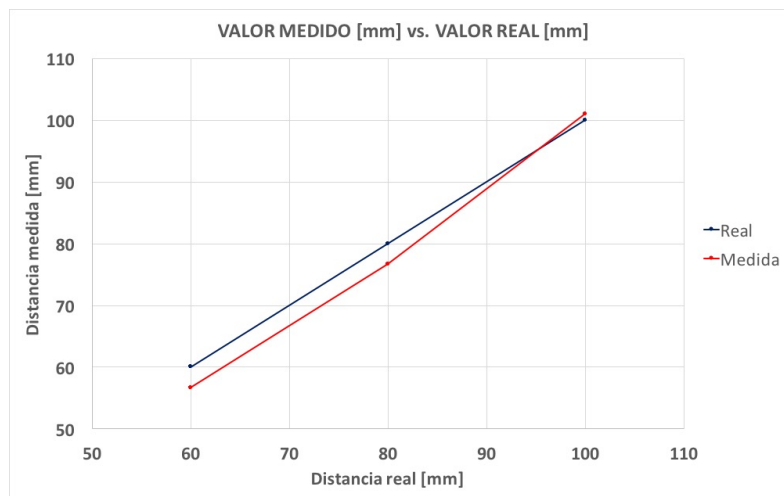


Figura 93: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en corto alcance

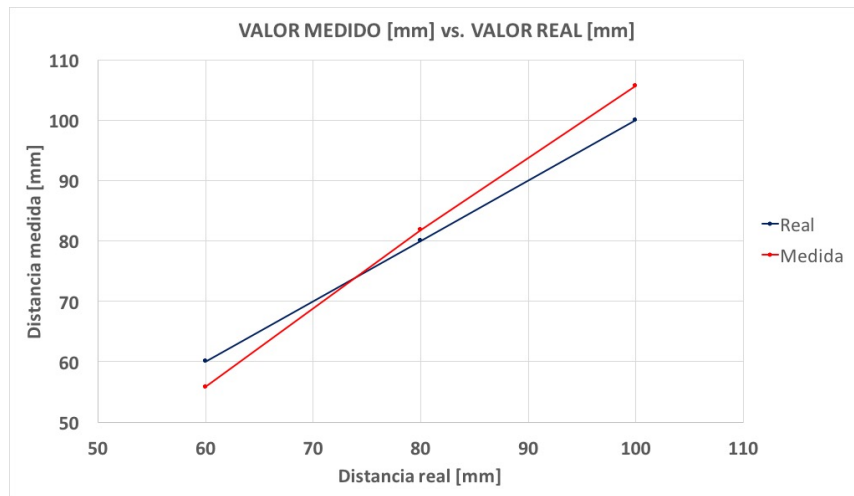


Figura 94: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en corto alcance

**MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]**

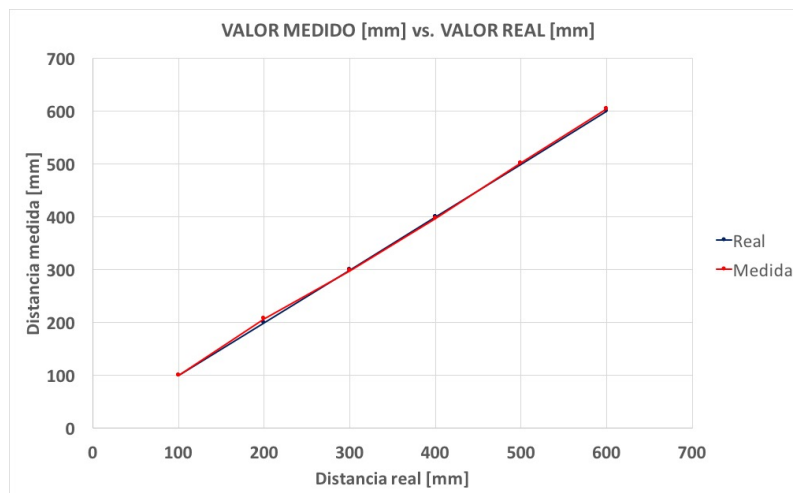


Figura 95: Medida estándar del VL53L0X - 1 en medio alcance



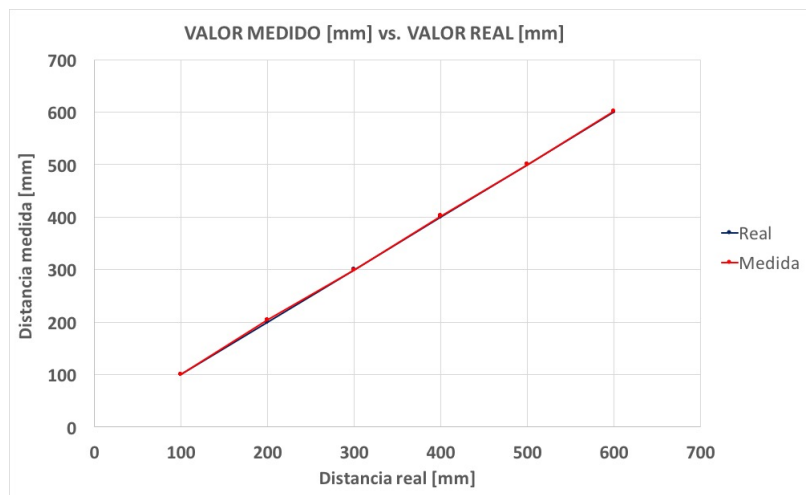


Figura 96: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en medio alcance

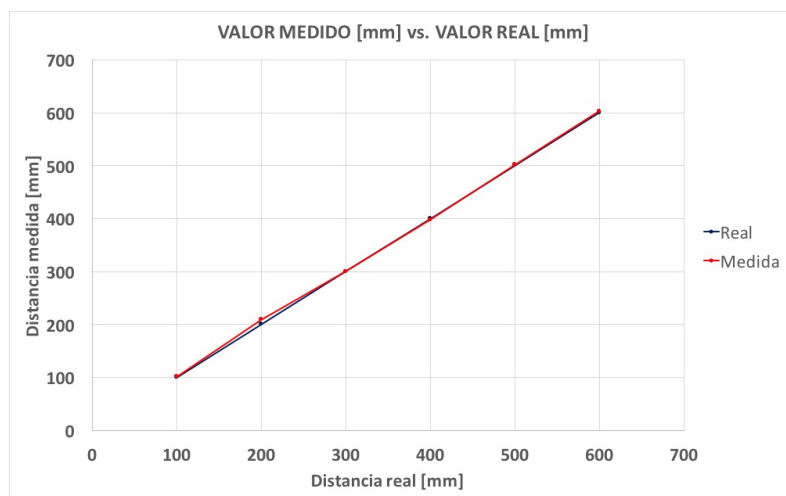


Figura 97: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en medio alcance

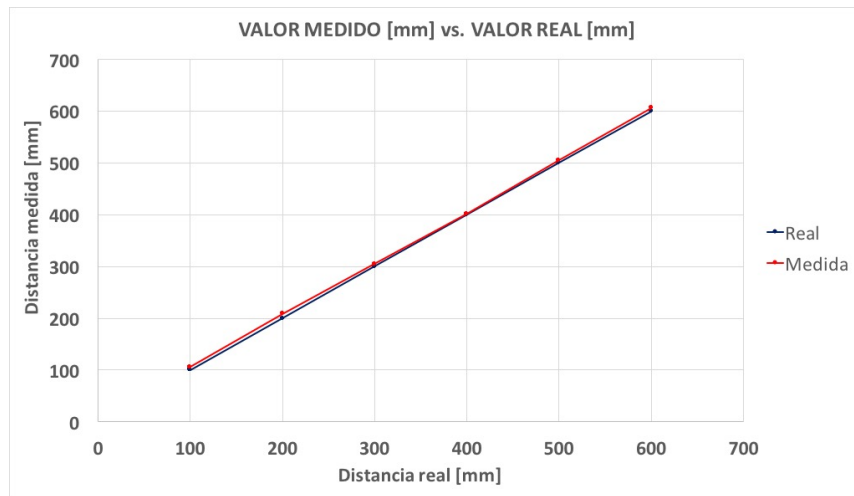


Figura 98: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en medio alcance

**LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]**

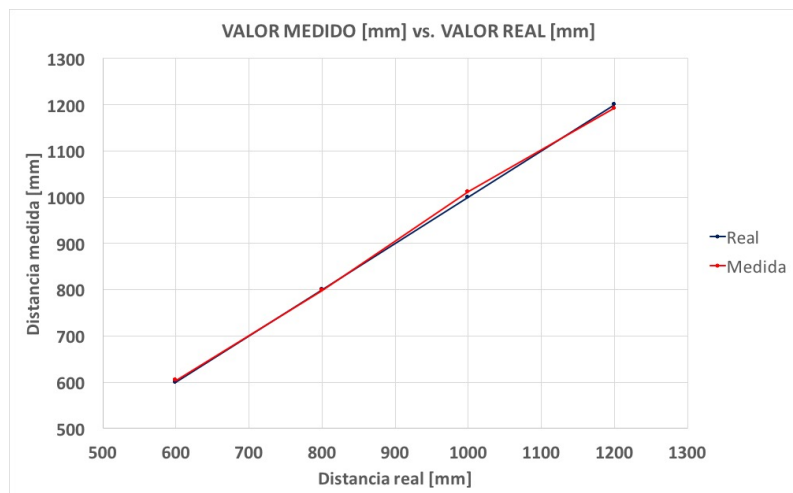


Figura 99: Medida estándar del VL53L0X - 1 en largo alcance

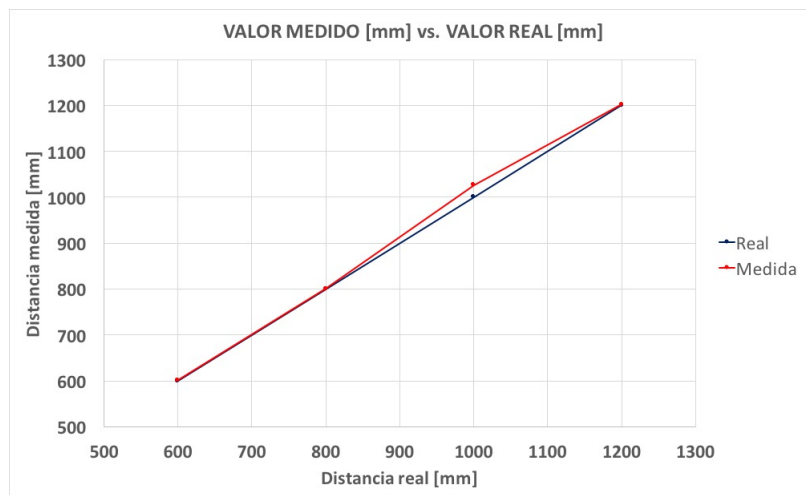


Figura 100: Medida estándar del VL53L0X - Sensor2 en largo alcance

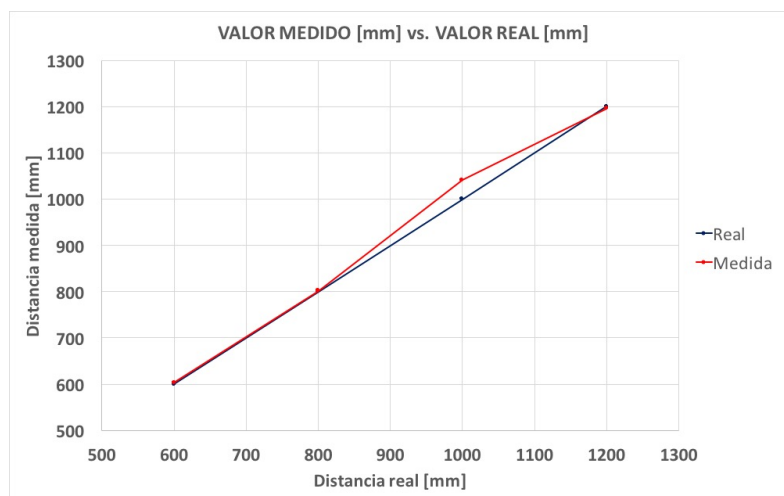


Figura 101: Medida estándar del VL53L0X - Sensor3 en largo alcance

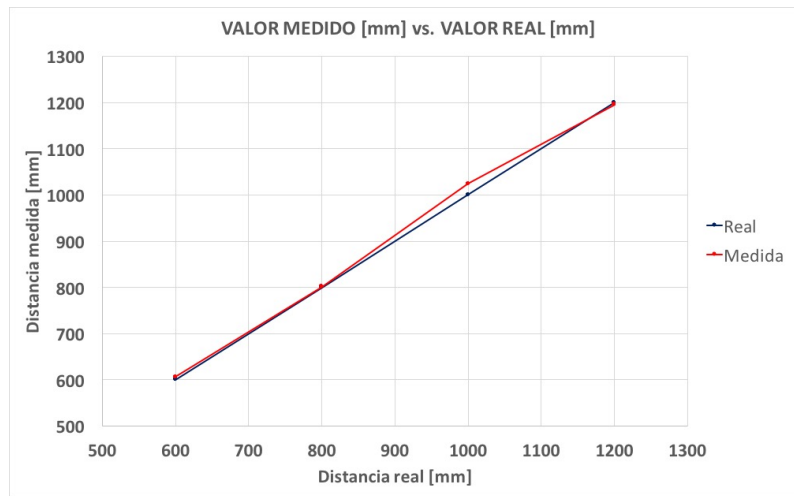


Figura 102: Medida estándar del VL53L0X - Sensor4 en largo alcance

## B.2. Caracterización: HC-SR04

### B.2.1. Banco de pruebas

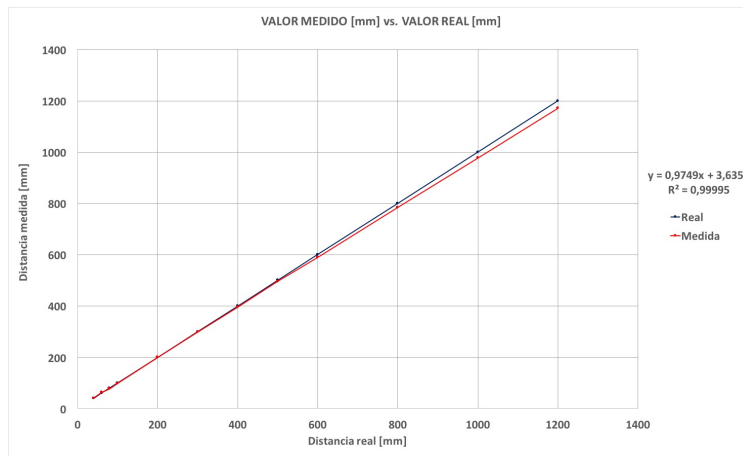


Figura 103: Medida estándar del HCSR-04

**CORTO ALCANCE: 4 - 10 [cm]**

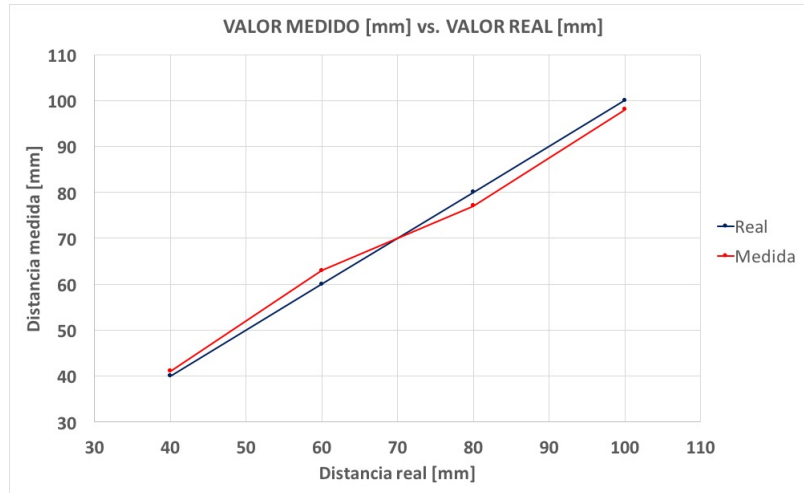


Figura 104: Medida estándar del HCSR-04 en corto alcance

**MEDIO ALCANCE: 10 - 60 [cm]**

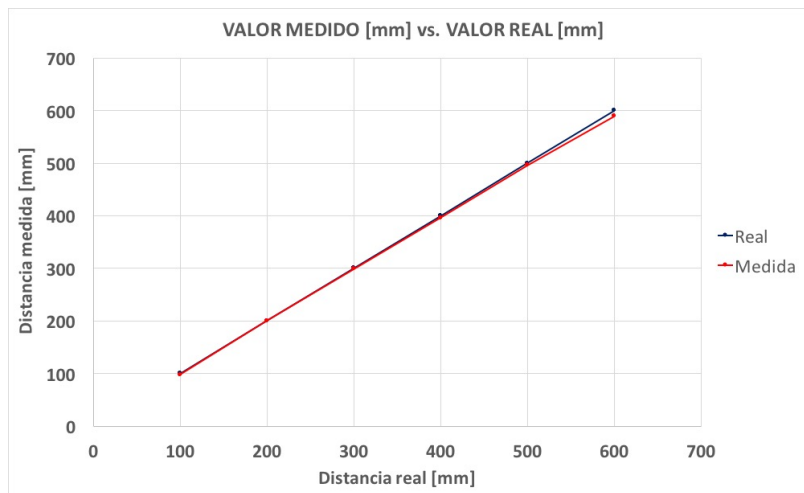


Figura 105: Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance

LARGO ALCANCE: 60 - 120 [cm]

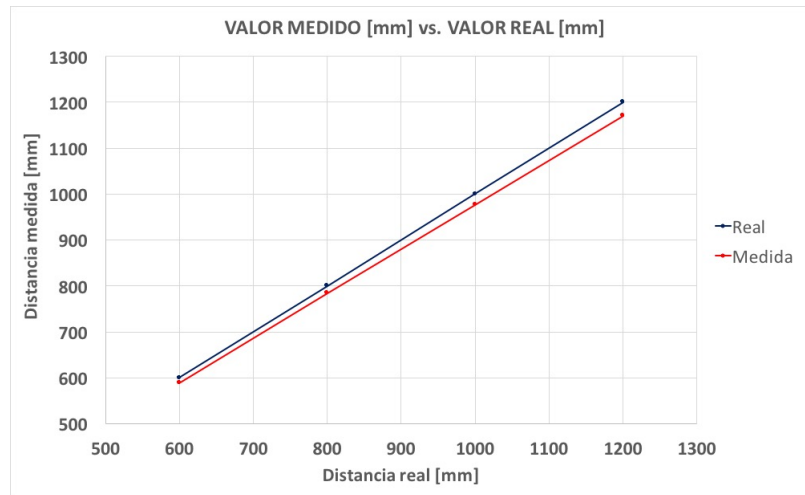


Figura 106: Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance

## B.2.2. Sobre el Prototipo

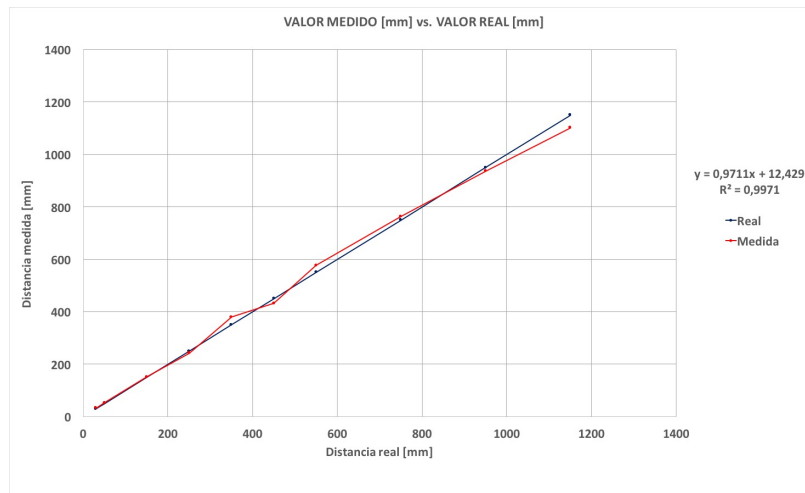


Figura 107: Medida estándar del HCSR-04

**MEDIO ALCANCE: 5 - 55 [cm]**

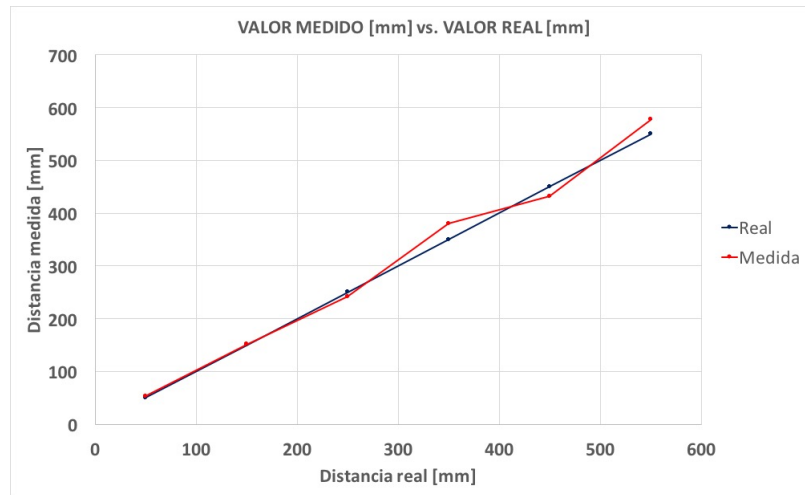


Figura 108: Medida estándar del HCSR-04 en medio alcance

**LARGO ALCANCE: 55 - 115 [cm]**

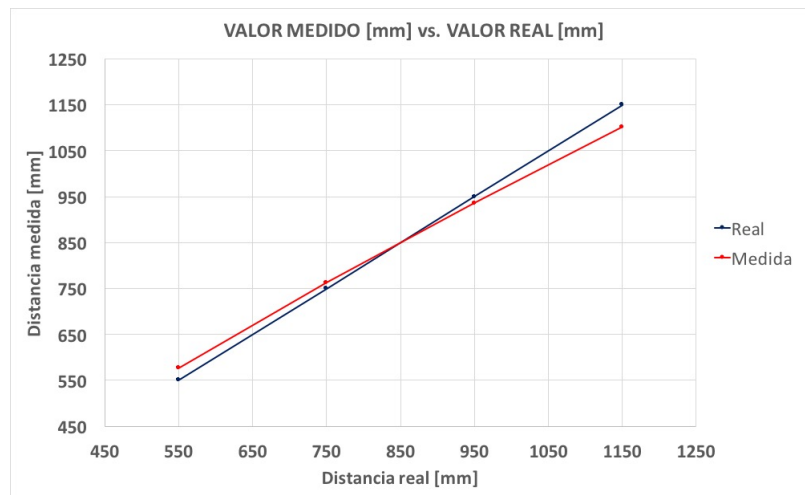


Figura 109: Medida estándar del HCSR-04 en largo alcance

