

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO MEDIDOR DE DISTANCIAS BASADO EN DIODO LASER.

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presentan los bachilleres:

Juan Carlos Berrocal Rodriguez

David Eduardo Sagástegui Plate

ASESOR: Willy Eduardo Carrera Soria

CO-ASESOR: Rafael Raúl Coello Paria

Lima, Agosto del 2012

Resumen

La presente tesis tiene como finalidad desarrollar una tecnología de medición de distancias de forma no contactante, rápida y precisa, la cual puede ser utilizada en distintos campos profesionales como: medicina, ingeniería, arquitectura, geología, entre otros.

El método elegido para realizar este proyecto es el de la triangulación, basándose en un arreglo entre el emisor, blanco y receptor. Este consiste en tener en una línea recta al emisor y receptor, y en cuadratura con ella al emisor con el blanco, teniendo así un ángulo recto en donde se coloca el emisor de tal manera que entre el blanco y el receptor se forma un ángulo, el cual es proporcional a la distancia que se desea medir. Es por ello que se plantea como objetivo principal el diseño y la implementación de un dispositivo capaz de medir distancias basado en el uso de un diodo láser.

El presente documento se estructura en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se tratará la problemática y motivo de la investigación, mencionando la utilidad y características del dispositivo. Por su parte, el desarrollo del marco teórico que permitirá el cumplimiento de los objetivos de esta tesis, será tratado en el segundo capítulo. El tercer capítulo girará en torno al desarrollo del diseño del dispositivo, tanto en hardware como en software. Y finalmente, en el cuarto capítulo, se mostrarán las pruebas a las cuales se sometió el dispositivo y sus posteriores resultados, correspondientes a cada una de las etapas del desarrollo del presente proyecto.

Para concluir, y como resultado de la investigación, desarrollo y pruebas realizadas, se logró comprobar que el método elegido fue el correcto, ya que se logró realizar la medición de distancias con un porcentaje de error del $\pm 5\%$ en promedio.

Índice general

Introducción.....	1
Capítulo 1: Problemática y motivo de la medición de distancias	2
1.1. Problemática a resolver	2
1.2. Justificación	3
1.3. Estado del arte	5
1.4. Objetivos	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2: Marco teórico relacionado con la medición de distancias	13
2.1. El diodo láser	13
2.1.1. Definición	13
2.1.2. Características:.....	14
2.1.3. Aplicaciones	14
2.1.4. Clases de un diodo láser.....	16
2.2. Técnicas para la medición de distancias mediante el uso del láser.....	16
2.2.1. Interferometría	17
2.2.2. La técnica del tiempo de vuelo o tiempo de propagación.....	17
2.2.2.1. Haz láser pulsado	18
2.2.2.2. El método del cambio de fase.....	19
2.2.3. Triangulación.....	21
2.2.4. Comparación de técnicas	23
2.3. Desarrollo del método de triangulación	24
2.3.1. Emisión del Haz de Luz.....	24
2.3.2. Recepción	24
2.3.2.1. Lente receptor.....	24
2.3.2.1.1. Clasificación.....	25
2.3.2.1.2. Definiciones básicas	25
2.3.2.2. Arreglo de receptores o CCD.....	27
2.3.2.2.1. Aplicaciones	28
2.3.3. Control y muestreo de la Distancia.....	31
2.4. Ventajas del sistema	31

Capítulo 3: Diseño del dispositivo	33
3.1. Elección del método.....	33
3.2. Etapa de emisión del haz de luz.....	34
3.2.1. Elección del diodo láser	34
3.3. Etapa de recepción	35
3.3.1. Elección del lente receptor	35
3.3.2. Elección del CCD.....	36
3.3.2.1. Configuración del CCD.....	37
3.3.2.2. Circuito de recepción	38
3.3.3. Distribución física de los componentes	39
3.4. Etapa de control y muestra de la distancia.....	44
3.4.1. Muestra.....	44
3.4.1.1. Elección de componentes	44
3.4.1.2. Diseño de la etapa de muestra	46
3.4.2. Procesamiento y control.....	47
3.4.2.1. Elección de componentes	48
3.4.2.2. Configuración de los pines del ATmega 16.....	49
3.4.2.3. Circuito de procesamiento y control.....	49
3.4.2.4. Descripción general del software: Programa principal y subrutinas importantes50	
3.5. Fuente de alimentación	56
3.5.1. Consumo de potencia total.....	56
3.5.2. Elección de los componentes.....	57
3.5.3. Circuito de alimentación	58
3.5.4. Independencia de energía	58
Capítulo 4: Pruebas y resultados	59
4.1 Pruebas del dispositivo	59
4.1.1 Diodo láser	59
4.1.2 Lente receptor convergente	60
4.1.3 CCD.....	62
4.1.3.1 Generación de señales de configuración	62
4.1.3.2 Activación de la salida.....	65
4.1.4 Display LCD 2x16.....	67
4.1.5 Procesamiento de datos	68

4.2	Pruebas del Dispositivo	68
4.3	Costos del sistema	72
	Conclusiones	74
	Recomendaciones.....	75



Indice de Figuras

Figura 1: Telémetro láser modelo PCE LRF 600	6
Figura 2: Telémetro láser modelo LRF 210	8
Figura 3: Telémetro láser modelo PCE LDM 50	9
Figura 4: Medición de distancia mediante interferometría.....	17
Figura 5: Medición de distancia mediante el haz pulsado.....	18
Figura 6: Medición de distancia mediante el cambio de fase.....	20
Figura 7: Medición de distancia mediante el método de triangulación	21
Figura 8: Diagrama de bloques del método de triangulación.....	24
Figura 9: Lente convergente	25
Figura 10: Lente divergente	25
Figura 11: Lente convergente, distancia focal y foco	26
Figura 12: Ángulo de visión.....	26
Figura 13: Imagen real	26
Figura 14: Lente como lupa.....	26
Figura 15: Medición de distancia mediante el método de triangulación	29
Figura 16: Método de triangulación incluyendo el triángulo reflejado por el lente	30
Figura 17: Etapas para el diseño del medidor de distancias.....	33
Figura 18: Diodo láser VLM-650002-LPA2	35
Figura 19: Lente convexo	36
Figura 20: CCD ILX526A.....	37
Figura 21: Diagrama de tiempos para configurar el CCD [10]	38
Figura 22: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante y distribución de pines [12].....	39
Figura 23: Triángulo reflejado.....	39
Figura 24: Distancias reales para el método de triangulación.....	40
Figura 25: Distancia L en función de d	43
Figura 26: % de error en función de d	44
Figura 27: Display LCD 2x16.....	45
Figura 28: Matriz de 5x8 puntos para formar diversos caracteres [8]	46
Figura 29: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante.....	47
Figura 30: Microcontrolador ATmega16.....	49

Figura 31: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante y distribución de pines.	50
Figura 32: Diagrama de tiempos para configurar el CCD [12]	52
Figura 33: Diagrama de flujo del programa principal	53
Figura 34: Señal de CLK vs Salida del CCD.....	54
Figura 35: Diagrama de flujo para la interrupción por captura de eventos	54
Figura 36: Diagrama de flujo para la interrupción externa.....	56
Figura 37: Regulador de Voltaje LM2940.....	58
Figura 38: Circuito de la fuente de alimentación.....	58
Figura 39: Caída de voltaje vs tiempo de uso [15].....	58
Figura 40: Fuente del diodo láser	59
Figura 41: Funcionamiento del diodo láser	59
Figura 42: Amplificación del rebote del haz de luz con el lente	61
Figura 43: Amplificación del rebote del haz de luz con el lente a una distancia focal de 5cm	61
Figura 44: Señal CLK de 516 KHz.....	62
Figura 45: Señal de ROG.....	63
Figura 46: Sincronía de la señal de ROG y el CLK	63
Figura 47: Tiempo en baja entre las señales de ROG y SHUT	64
Figura 48: Señal de SHUT	64
Figura 49: Sincronía de la señal de SHUT y el CLK.....	65
Figura 50: Señal CLK de 518 KHz.....	65
Figura 51: Salida del CCD	66
Figura 52: Salida del CCD	66
Figura 53: Salida del CCD	67
Figura 54: Salida del CCD	67
Figura 55: Prueba de funcionamiento del display LCD de 2x16	68
Figura 56: Valores con distancia focal de 11cm.....	69
Figura 57: Distancia mostrada de 34.5 vs Distancia real de 34.2	71
Figura 58: Distancia mostrada de 48.0 vs Distancia real de 48.4	72
Figura 59: Distancia mostrada de 54.0 vs Distancia real de 53.6	72

Indice de Tablas

Tabla 1: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo PCE LRF 600.....	7
Tabla 2: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo LRF 210.....	9
Tabla 3: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo PCE LDM 50.....	10
Tabla 4: Clases de un diodo láser.....	16
Tabla 5: Comparación de métodos de medición de distancia usando diodo láser.....	23
Tabla 6: Cuadro comparativo para la elección del diodo láser.....	34
Tabla 7: Comparación del CCD.....	36
Tabla 8: Relación de L y el % de error en función de d.....	42
Tabla 9: Comparación de visualizadores.....	45
Tabla 10: Comparación de microcontroladores.....	48
Tabla 11: Distancias en función de los pixeles del CCD con una resolución de 5mm.....	55
Tabla 12: Comparación de reguladores de voltaje.....	57
Tabla 13: Relación de corriente en función del voltaje de alimentación del diodo láser.....	60
Tabla 14: Relación entre valor teórico vs real sin etapa de muestra.....	70
Tabla 15: Relación final entre valor teórico vs real con etapa de muestra.....	71
Tabla 16: Costos del dispositivo.....	73

Introducción

La gran expansión tecnológica que se ha producido en las últimas décadas ha favorecido a los distintos sectores científicos, y ha producido grandes avances en el desarrollo de nuevas tecnologías, específicamente, en las relacionadas con el uso del diodo láser. Esta clase de tecnología posee múltiples aplicaciones en diversos sectores de la sociedad actual, entre los cuales encontramos el sector de la medicina, electrónica de consumo, de comunicaciones, soldadura y sistemas de corte, industrial, militar, etc. En el sector médico, en particular, encontramos numerosas aplicaciones del diodo láser, tales como la cirugía correctiva, intervenciones oftalmológicas y odontológicas, cirugía estética, cauterización, entre otros.

En nuestro país existen varias razones que limitan la investigación y desarrollo, incluyendo temas relacionados con el estudio del láser. Entre los principales motivos tenemos la falta de conocimientos especializados, la escasa inversión en programas de investigación, poco interés del sector público y privado en programas de desarrollo de programas de desarrollo e investigación, etc. [17]. Por ello, la mayoría de la tecnología láser en nuestro país es de procedencia extranjera y de costo elevado. Esta falta de interés y desarrollo también se aprecia en el campo de la metrología láser, ya que se observa que es muy limitada. Sin ir muy lejos, en nuestra propia universidad se han desarrollado muy pocos trabajos de investigación o tesis respecto a este tema.

En este contexto, el presente trabajo de tesis plantea el diseño e implementación de un dispositivo capaz de medir distancias utilizando un diodo láser, con lo que se espera que este dispositivo sirva como base para el desarrollo de aplicaciones más complejas.

Capítulo 1: Problemática y motivo de la medición de distancias

1.1. Problemática a resolver

La principal problemática que se presenta es la escasa, hasta casi nula, tecnología referente a este tema que se desarrolla y se encuentra en el mercado nacional. Actualmente existen dispositivos capaces de medir distancias haciendo uso del diodo láser, pero éstos son de costos elevados y mayormente se encuentran en el mercado extranjero. Por ello, con la presente tesis se busca introducir esta tecnología en el mercado nacional, con precios accesibles y que sirva como precedente e incentivo para el desarrollo de aplicaciones mucho más complejas, especialmente en tecnologías orientadas al campo médico, tales como:

- *Aplicaciones clínicas*, en el contexto clínico la medición de distancias de forma no contactante agrega una característica apropiada al reducir el riesgo de contaminación e inocuidad, por ejemplo para la medición de órganos antes de la realización de un trasplante, para la elaboración de prótesis, puede aportar mucho en temas de ayuda de personas invidentes a través de la implementación de un bastón electrónico para ciegos, sistemas de alerta de obstáculos, etc.
- *En la industria*, se tiene muchas aplicaciones en el área de producción como la monitorización del nivel del fluido en contenedores, la posición de los objetos en la cinta transportadora o el grosor de rodillos y cilindros.
- *En construcción*, sirve para verificar la distancia de pared a pared o del piso al techo de un ambiente o habitación sin la necesidad de moverse, de calcular el área o volumen del lugar de forma rápida y sencilla, a través de la medición de las longitudes se puede determinar las cantidades de materiales (vigas

metálicas, ladrillos, láminas de madera, etc.) necesarios en la construcción de cada área de la edificación.

- *En el diseño de interiores y exteriores*, en la medición del área y volumen de la habitación para el planeamiento de la cantidad de pintura necesaria para su pintado, en la colocación de cortinas, para la distribución de luminarias en la habitación en función de la altura del techo y área del cuarto así como el material necesario para su instalación.

Entre otras aplicaciones más, que involucren la medición de distancia, en las cuales se puede utilizar como base el prototipo desarrollado en la presente tesis. Ello porque este modelo permite, con la modificación de ciertos elementos y según la necesidad de la aplicación (aumentando el rango de distancia, la precisión o ambos), ser adaptable a cualquier campo que precise la medición de distancias, áreas o volúmenes.

1.2. Justificación

La medición de distancia no es algo ajeno a nuestro actuar diario. Ha sido una actividad muy importante desde que el hombre dejó de lado su estilo de vida nómada y comenzó a establecerse en lugares determinados en busca de mejores condiciones de vida. Como la dependencia de la sociedad hacia la tecnología ha ido incrementándose con el pasar de los años, la medición de distancias de forma rápida y precisa se ha incrementado en diversos campos, desde la micro-electrónica hasta las mediciones interplanetarias.

Las primeras formas de realizar la medición de distancias se realizaron en el Cercano Oriente, a través de la unidad llamada cúbito (que se mide desde el codo hasta la punta del dedo medio de la mano), de esta unidad se desprenden muchas medidas corporales ya conocidas, como son los pies, brazos, manos, etc. Estos métodos de medición permanecieron durante muchos siglos, con pequeñas

modificaciones que cada civilización iba añadiendo para tratar de hacerlos más precisos, pero sin lograr una estandarización definitiva.

Los primeros avances en una estandarización definitiva de la forma en cómo se miden las distancias se dieron durante el reinado del rey Edward I de Inglaterra en el siglo XIII quien ordenó el uso permanente de una vara de hierro en todo su reino, la cual representaba una yarda de la época y que mide casi igual que la yarda actual. También, decretó que un pie mide un tercio de una yarda y que la pulgada es $1/36$ de una yarda.

Ya en 1672 se dieron los primeros avances en la medición óptica de distancias cuando Sir Isaac Newton, sin darse cuenta de la magnitud de su descubrimiento, se dio cuenta que juntando dos piezas planas de vidrio se podía notar la formación de bandas circulares con los colores del arco iris (llamados los anillos de Newton). Años después, el científico Thomas Young, haciendo uso de los escritos de Newton, estableció una nueva rama de la ciencia: la interferometría [4], la cual usa un rayo de luz como vara de medición permitiendo calcular las distancias con excelente precisión (en el orden de los micrómetros).

El avance tecnológico y la necesidad de nuevas formas de realizar esta tarea, han derivado en el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías capaces de realizar mediciones cada vez más rápidas y precisas. No obstante, detrás de cada avance tecnológico hay un gran esfuerzo, tiempo y recursos derivados hacia la investigación de los mismos, lo cual no es apreciado.

En la actualidad, la medición de distancias se aplica en diversos campos de nuestra vida cotidiana y en nuestro quehacer profesional. La necesidad de medir distancias de forma exacta y precisa se puede apreciar en sectores como el de la construcción, carpintería, diseño de interiores y exteriores, medicina, entre otros.

Los países desarrollados crean y comercializan esta clase de dispositivos, puesto que invierten recursos económicos y humanos en lo que a investigación de nuevas tecnologías se refiere. Sin embargo, el desarrollo de esta clase de dispositivos es bastante limitado en nuestro país [17]. Esto se debe a la falta de motivación para investigar, falta de inversión, preferencia a comprar las soluciones en vez de realizarlas, entre otros. Localmente, esta clase de equipos tienen un costo elevado, superior a los \$250 en promedio (catálogo de Sodimac 06/2012), esto es debido a que se tratan de dispositivos de origen extranjero. No obstante, el costo de la fabricación de los mismos está muy por debajo del precio al cual se comercializan en nuestro país.

Es en este contexto en el que se propone el diseño e implementación de un dispositivo capaz de medir distancias de forma rápida y precisa, a través de un diodo láser. Este trabajo debe servir como precedente y base para el desarrollo de sistemas cada vez más complejos y de bajo costo.

1.3. Estado del arte

La medición de distancias es una actividad que se ha venido desarrollando desde hace miles de años, en los cuales se han producido una gran cantidad de métodos para realizar esta tarea, de forma más o menos precisa. De acuerdo a la problemática relacionada al desarrollo de este trabajo de tesis, en las siguientes líneas se mencionarán algunos de los actuales equipos electrónicos utilizados para medir distancia de forma no contactante.

En la actualidad, se dispone de métodos muy precisos para realizar la medición de distancias, los cuales han evolucionado y mejorado desde sus orígenes en la Segunda Guerra Mundial, de forma paralela con el avance de la electrónica en general. Este tipo de tecnología fue desarrollada por primera vez por el físico suizo Erick Bergstrand en 1948, quien utilizó la luz visible durante la noche para hacer

mediciones precisas de distancias de hasta 40km, y en 1957 el Dr. T.L. Wadley diseñó el primer telémetro que usó frecuencias de microondas para medir distancias de hasta 80 Km. de día o de noche.

Si bien los primeros modelos fueron grandes y pesados, además de consumir gran cantidad de potencia, revolucionaron la industria que hasta su llegada se basaba en el uso de cinta para obtener mediciones precisas.

Estos instrumentos funcionan en base a ondas electromagnéticas de radio frecuencia o de rayos luminosos (láser, infrarrojo, etc.). Es muy común el uso de la tecnología basada en el uso de rayos infrarrojos no visibles, que cuentan con una unidad emisora montada sobre el teodolito en un extremo y en el otro un simple reflector, que por lo general es un prisma pentagonal.

Al pasar los años aparecieron nuevos métodos y con ello nuevas tecnologías que desempeñan aún mejor esta labor. En este contexto, se presentan algunas tecnologías existentes en el mercado, que realizan esta tarea de forma más o menos precisa y que cuentan con algunas características que los diferencian del resto:

Telémetro láser PCE LRF 600 – Precio \$220



Figura 1: Telémetro láser modelo PCE LRF 600

Este telémetro muestra con gran precisión la distancia a la que se encuentra el blanco, dispone de un láser seguro para la vista, con un aumento de 6x. Así podrá determinar la distancia a un edificio con una precisión de un máximo de un metro. Para evitar la vibración propia del sujetar con las manos al dispositivo, el PCE LRF

600 se ajusta a la manipulación de una sola mano, reduciendo de esta manera la vibración.

Este telémetro trabaja a una alta velocidad dando distancias de hasta 600 m. El manejo de este dispositivo es sencillo, debido a su bajo peso (165 gramos). A continuación, se presentan algunas de sus características:

- Apto para la agricultura, silvicultura, arquitectura, construcción, arqueología, caza, navegación, viaje en globo, etc.
- De fácil manejo y muy ligero.
- Robusto y con protección contra las salpicaduras de agua.
- Mide distancias en casi cualquier situación meteorológica.
- Al tener un lente por donde observar no es necesario utilizar un diodo láser visible, por lo que se hace uso de un diodo láser de clase I.

En la tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas del dispositivo:

Tabla 1: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo PCE LRF 600

Tipo de telémetro láser	PCE LRF 600
Rango de medición	15 m – 600 m
Precisión	$\pm 1 \text{ mm} / \pm 0.1 \%$
Aumento	6x
Apto para portadores de gafas	Sí
Tipo de diodo láser	Clase I
Carcasa	Plástico ABS
Alimentación	1 pila de botón CR-2 de 3 V
Dimensiones	39x110x69 mm
Peso	165 g (batería incluida)
Método de medición	Comparación de fase

Fuente: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instumento-de-distancia/telemetro-laser-rangemaster.htm>

- *Telémetro láser LRF 210 – Precio \$360*



Figura 2: Telémetro láser modelo LRF 210

El telémetro láser de mano TLM-210 es un instrumento de medida de precisión de última generación. Sus principales ventajas son: gran precisión, manejo sencillo y pequeño tamaño. El punto láser es perfectamente visible y permite con ello visualizar con exactitud el punto de medición, incluso a grandes distancias. Otra característica significativa del telémetro láser es la posibilidad de calcular de manera automática superficies y volúmenes.

A continuación, se presentan las características más resaltantes del dispositivo:

- El punto láser indica el destino que se desea medir.
- La emisión del rayo láser se encuentra en su parte superior.
- Memoria para los últimos 19 valores.
- Pantalla de 4 líneas.
- Realiza las funciones de: adición, sustracción, cálculo de volúmenes y superficies.
- Ligero y compacto
- Seguro para el uso en exteriores.

En la tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas del dispositivo:

Tabla 2: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo LRF 210

Rango de medición	0.05 m. – 200 m.
Precisión	± 2 mm.
Resolución	1 mm.
Memoria de valores	19 últimos valores
Tipo diodo láser	Clase II
Diámetro del punto láser	6mm a 100m
Alimentación	2 micro baterías de 1.5 V
Dimensiones	135x55x34 mm.
Peso	160 g.
Normas	IEC825, EN60825 – 1 (635 nm)
Método de medición	Comparación de fase

Fuente: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instumento-de-distancia/telemetro-laser-tlm-210.htm>

- PCE LDM 50 – Precio: \$120



Figura 3: Telémetro láser modelo PCE LDM 50

Este telémetro mide de forma rápida y eficiente cualquier distancia dentro de su rango, con tan solo presionar de botón.

Algunas de sus principales características son:

- Robusto contra golpes.

- El punto láser muestra el punto de medición.
- Memoria de los últimos 20 valores.
- Desconexión automática para proteger la batería.
- Ligero y de fácil manejo.
- Además de realizar funciones como adición, sustracción, cálculo de volúmenes y superficies.

En la tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas del dispositivo:

Tabla 3: Especificaciones técnicas del telémetro láser modelo PCE LDM 50

Rango de medición	0.05 m. – 50 m.
Precisión	± 1.5 mm.
Resolución	1 mm.
Tipo diodo láser	Clase II
Longitud de onda diodo láser	635 nm, < 1 mW
Desconexión automática	Después de 180 s.
Medida continua (función tracking)	Sí
Adición / sustracción	Sí
Función Pitágoras (2 puntos)	Sí
Tipo de protección	IP 54
Memoria	Últimos 20 valores
Alimentación	4 baterías AAA
Duración de la batería	Hasta 5000 mediciones
Dimensiones	110x45x27 mm.
Peso	135 g.
Temperatura de almacén	-10 – 60° C
Temperatura operativa	0 – 40° C
Método de medición	Comparación de fase

Fuente: http://www.pce-instruments.com/espanol/product_info.php/info/p11128_Telemetro-laser-PCE-LDM-50.html/XTCsid/1a160673ac7f603944526ec45dff4298

Estos son solo tres ejemplos de los muchos que hay actualmente en el mercado (y cada uno con características que los hacen sobresalir de los demás), pero estos son bastante caros (como se observa estos sobrepasan los \$120 en el extranjero). En el Perú esta diferencia de precios y características crece aún más en un mercado en el cual es difícil encontrar esta clase de instrumentos de medición, los cuales brindan las funciones básicas a un alto costo.

Cabe resaltar también que todos estos instrumentos usan la misma tecnología: Triangulación; variando entre ellos los componentes utilizados (diferencia de precio).

Es así que el presente trabajo de tesis muestra un prototipo, que si bien en principio ofrece la función básica de la medición de la distancia, se puede modificar con facilidad para realizar las mismas operaciones de los equipos existentes. Asimismo, se busca implementar en el mercado nacional una alternativa de bajo costo, alto rendimiento y fácil de realizar y/o modificar según las necesidades de la aplicación, de modo que pueda competir con los equipos ya existentes en el mercado.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo general presentar el diseño e implementación de un dispositivo capaz de medir distancias de hasta 10 metros con un porcentaje de error menor o igual al 5%.

Este planteamiento tiene como principal aplicación el futuro diseño de un bastón para ayuda de personas invidentes, y que a través de una señal de alerta la persona pueda reaccionar ante un posible obstáculo. Con la distancia y resolución planteados el usuario puede tener una idea bastante clara de que tan despejado está su camino.

1.4.2 Objetivos específicos

Para poder cumplir íntegramente con el objetivo general, y con ayuda de los laboratorios con los que cuenta la Universidad, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Comparar los diferentes métodos para realizar la medición de distancias de forma no contactante.
- Obtener un rango de medición de hasta 10 metros con una resolución de 0.5cm.
- Obtener un porcentaje de error menor o igual al 5%.



Capítulo 2: Marco teórico relacionado con la medición de distancias

2.1. El diodo láser

2.1.1. Definición

El diodo láser [1-2] es un dispositivo semiconductor similar a los diodos LED, pero que, bajo las condiciones de alimentación adecuadas, produce y emite luz láser.

La ganancia en los diodos láser es generada por el paso de la corriente eléctrica entre las junturas p-n y en algunos casos junturas p-i-n (con mayor frecuencia). En dicha estructura, los huecos de la región p se mueven hacia la región n y los electrones de la región n se mueven hacia la región p, ambos en una misma región, éstos se recombinan formando energía en forma de fotones, este proceso puede ser espontáneo, pero también puede ser estimulado por fotones incidentes.

En condiciones apropiadas, el electrón y el hueco pueden coexistir un breve tiempo, del orden de nanosegundos, antes de mezclarse nuevamente, de forma que un fotón con la energía apropiada al pasar por allí durante ese periodo, se producirá la emisión estimulada, es decir, al producirse la recombinación el fotón emitido tendrá igual frecuencia, polarización y fase que el primer fotón. En pocas palabras, la recombinación de un electrón estimulado con uno que no lo está, produce la energía de un fotón emitiendo luz.

El accionamiento del láser se caracteriza por tener un nivel umbral de excitación por encima del cual la producción del haz láser aumenta bruscamente, para el caso del diodo láser este nivel de excitación viene dado por la corriente, la cual se denomina corriente umbral.

2.1.2. Características:

Un diodo láser presenta las siguientes características [1-2]:

- *Tamaño y peso pequeño:* miden unos cuantos milímetros y pesan menos de un gramo, lo que los hace ideales para el uso de equipos portátiles.
- *Baja corriente, voltaje y requisitos energéticos:* la mayoría de los diodos láser requieren pocos mili vatios de energía y se activan con un voltaje constante de 3 a 12 voltios y sus corrientes son del orden de los miliamperios (normalmente 30mA), por lo que pueden funcionar con fuentes pequeñas de energía.
- *Intensidad reducida:* un diodo láser no se puede utilizar para grandes propósitos, tales como realizar perforaciones en el metal o realizar el taladrado en alguna superficie dura, pero lo que los hace atractivos son su salida coherente, que resulta de alta eficiencia; y su facilidad de modulación, lo cual los hace bastante útiles en las comunicaciones.

2.1.3. Aplicaciones

Desde el la aparición del láser, este ha ocupado un lugar preferente en el desarrollo científico. El diodo láser, por la flexibilidad en sus especificaciones, poseen un amplio rango de aplicaciones, entre ellos tenemos [1-3]:

- *Lectura y grabación de datos en medios ópticos:* Se utilizan diodos láser de baja potencia, los cuales son usados en CD-ROMs, DVDs, Blu-ray, entre otros. Para cada medio, los diodos láser pueden operar en diferentes dominios espectrales (desde la región infrarroja hasta la región azul o violeta), con longitudes de onda cortas que densidades de grabación más altas. En este caso, lo que varía es la intensidad del haz de luz, tanto para la lectura como la escritura.
- *Comunicaciones mediante el uso de fibra óptica:* Particularmente en la transmisión de datos, en los que en algunos casos la modulación se hace

directamente en la corriente de alimentación. La comunicación por fibra óptica se realiza para enviar información a muy altas velocidades. Por esto, se requiere que exista una unidad de modulación, para la emisión del haz de luz; y otra de recepción, para volver a convertir la señal de luz a una eléctrica. Para este caso, el diodo láser debe ser de media o alta potencia, de modo que pueda transmitir datos a largas distancias con ancho de banda considerable.

- *Punteros laser:* Se hace uso de los diodos láser que se encuentran en el espectro rojo y sean de luz visible. Para esta aplicación se requiere de diodos láser de baja a media potencia, dependiendo de la distancia final a la que se quiera apuntar. En este caso, no se necesita de ninguna modulación, simplemente se requiere encender el diodo láser.
- *Medición de distancias:* Comúnmente realizada con diodos láser modulados de bajo consumo (los que también son usados en las impresoras láser, escáneres y lectores de código de barra). Para este caso, se requiere que exista una realimentación óptica y que la emisión del haz de luz sea modulado. Existen diferentes tipos de métodos para medir distancias, los cuales serán explicados posteriormente.
- *Aplicaciones médicas:* Ciertas aplicaciones quirúrgicas y terapias dermatológicas se realizan con diodos láser de mayor potencia. Se utiliza para microcirugías en el ojo, para problemas de desprendimiento de retina, cataratas y para el tratamiento de enfermedades de la córnea (miopía). Asimismo, se ha utilizado con éxito en la destrucción de tumores en ciertas áreas del aparato digestivo. Además, se utiliza en la fototerapia que básicamente es el tratamiento de problemas de la piel (mancha, tumores, etc.) y para la eliminación de tatuajes. En este caso, también, se necesita que el diodo láser este modulado a altas frecuencias y sea lo más preciso posible para afectar únicamente el área dañada.

- *Procesamiento de materiales:* Para poder realizar las tareas de corte y/o soldadura, se hace uso de un diodo láser de muy alta potencia, modulado a altas frecuencias.

2.1.4. Clases de un diodo láser

La clase de un láser indica el grado de peligrosidad, que supone la utilización de un diodo con estas características. Asimismo, el tipo de un diodo láser se encuentra definido por factores específicos, tales como: longitud de onda, duración o tiempo de exposición y potencia o energía del haz de luz. Dichos factores se presentan en la tabla 4:

Tabla 4: Clases de un diodo láser.

Clase	Longitud de onda	Tiempo exposición al haz	Potencia / energía haz
Clase I	De 0 a 13.000 nm.	Se presupone "intrínsecamente seguro", pero debe evitarse.	Como máximo, 10^{-3} W.
Clase II	De 400 a 700 nm.	Exposición ocular: 0,25 segundos. Proteger el ojo.	Entre 10^{-6} W y 10^{-3} W.
Clase III a	De 0 a 13.000 nm.	Exposición ocular: debe evitarse por completo. Proteger el ojo. Exposición dérmica: evitar.	Desde 10^{-9} W hasta 0,5 W aprox.
Clase III b	De 0 a 13.000 nm.	Debe evitarse por completo. Proteger el ojo. Exposición dérmica: proteger.	Desde 10^{-9} W hasta 0,5 W aprox.
Clase IV	De 0 a 13.000 nm.	Debe evitarse por completo.	Desde 0,75 W hasta 10 W aprox.

Fuente: Láser: Clases, riesgos, medidas de control; Universidad Politécnica de Valencia.

2.2. Técnicas para la medición de distancias mediante el uso del láser

La tecnología láser puede ser usada de múltiples formas para medir distancias o desplazamientos sin la necesidad que haya un contacto físico. Esta medición puede darse desde distancias milimétricas hasta distancias tan grandes como en el orden de los kilómetros, de forma rápida (velocidad de la luz) y precisa. Dependiendo de la distancia que se vaya a medir y la precisión necesaria, se puede aplicar diferentes técnicas para realizar esta tarea:

2.2.1. Interferometría

Se tiene un haz de luz inicial, el cual es disparado hacia el objetivo. Como se ilustra en la figura 4, este haz principal es separado en dos haces de luz (haciendo uso de un divisor, que puede ser un espejo transmisor) y es almacenado en el dispositivo para ser usado como referencia. Una vez que el haz regresa del objetivo, es superpuesto con el haz de referencia en el foto detector, con lo que se obtiene una señal de forma $\cos(2ks)$, con $k=2\pi/\lambda$, siendo k el número de ondas, λ la longitud de onda y 2π el número de radianes por longitud de onda. De esta forma, se puede contar los incrementos en la distancia en unidades de $\lambda/2$. Si bien puede ser la técnica con mayor sensibilidad, tiene como desventaja que esta medición representa básicamente una medición de distancia incremental (mediante el incremento de $\lambda/2$ cuentas), y no una medición de distancia de forma absoluta (como en las otras técnicas) [3-4].

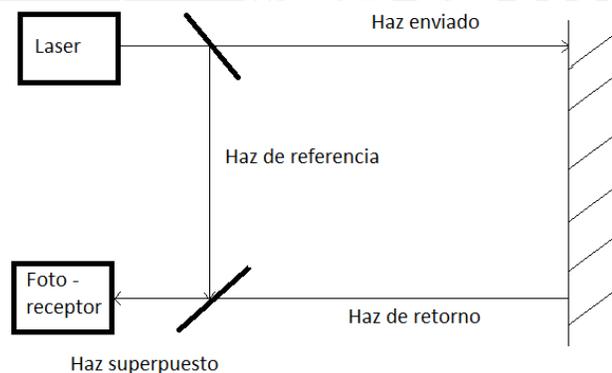


Figura 4: Medición de distancia mediante interferometría

2.2.2. La técnica del tiempo de vuelo o tiempo de propagación

Este método [3-4] es usado para distancias mayores, en el orden de los kilómetros, en el cual se emite un pulso láser de corta duración y mide el tiempo T que demora en ir y regresar una porción del rayo láser enviado. Este tiempo viene dado por: $T=2L/c$, siendo L la distancia a medir y c la velocidad de la luz, el 2 es debido a que el tiempo es el de ida y de vuelta, recorriendo dos veces la distancia. Entonces

despejando, la distancia viene dada por: $L=cT/2$, con una incertidumbre en la medición de la distancia de $\Delta L=c\Delta T/2$.

Para la realización de este método, se requiere de diodos láser de gran potencia, que puedan llegar a kilómetros y sean capaces de retornar una porción de la luz; y equipos, dispositivos e integrados que trabajen a gran velocidad, ya que el tiempo T está relacionado con la velocidad de la luz ($c=300'000\text{Km/h}$).

De acuerdo a la distancia que se desee medir, la técnica del tiempo de vuelo se puede realizar de la siguiente forma:

2.2.2.1. Haz láser pulsado

Partiendo del hecho que la luz viaja a una velocidad conocida y constante a través del medio, puede llegar a medirse el tiempo que demora un haz de luz en viajar de una fuente emisora al blanco y regresar, esto se efectúa a través del uso de un láser pulsado el cual envía un pulso de luz que rebota en el blanco y luego es recibido por un foto receptor, midiendo así el tiempo entre la emisión y recepción de dicho pulso para aproximar el tiempo de vuelo de la onda, a través de la siguiente relación: $T=2L/c$, siendo $T=t_1+t_2$ (t_1 es el tiempo de ida y t_2 es el tiempo de retorno), L la distancia a medir y c la velocidad de la luz ($c=300'000\text{Km/h}$). Este método se ilustra en la figura 5:

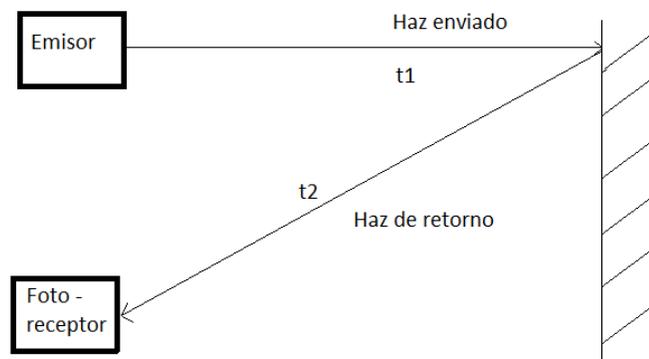


Figura 5: Medición de distancia mediante el haz pulsado

Esta técnica se utiliza para medir grandes distancias, ya que a partir de la relación anterior para conseguir una exactitud de 0.5cm, la etapa de procesamiento de la señal debe ser capaz de tener una resolución de tiempo de 50ps. Mediante el uso de esta técnica se pueden medir distancias de 100 km o más, e incluso con técnicas avanzadas (que involucran telescopios de alta calidad y sistemas de foto detección bastante sensibles) es posible medir la distancia que existe entre la Tierra y la Luna, con un error de pocos centímetros [4].

2.2.2.2. El método del cambio de fase

Se basa en la medición de la diferencia de fase entre la luz emitida y recibida [3-4], y usa esta medida para estimar el tiempo de vuelo y de esta manera la distancia al blanco. Para realizar esta tarea se usa un haz de láser continuo de potencia moderada.

Pero como la longitud de onda del haz de luz láser es pequeña (entre 600 y 700 nm) el método no resulta muy práctico. Para dar solución a este inconveniente, se realiza una modulación en amplitud de la corriente de alimentación del diodo láser a una frecuencia f mayor (por ejemplo una señal sinusoidal moduladora de 10 MHz para obtener una distancia de 30 metros). Entonces, se tiene que el tiempo que demora una porción del haz láser en ir y regresar del objetivo, que puede ser medido a partir de la fase $\varphi=2\pi fT$.

Cuando se envía el rayo láser modulado, parte de la luz reflejada rebota en el blanco, dicho rebote se capta y monitorea a través de un foto-receptor, el cual transforma la señal de luz nuevamente a eléctrica.

De esta manera, se tienen dos señales con distintas fases: la señal emitida (con fase φ_1) y la señal de retorno (con fase φ_2), tal como se observa en la figura 6:

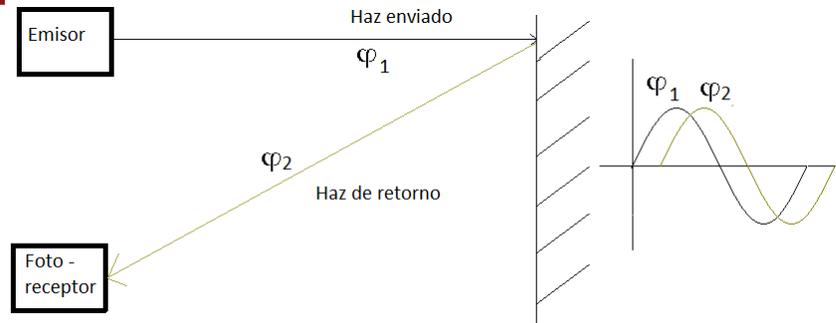


Figura 6: Medición de distancia mediante el cambio de fase

La diferencia de fase es proporcional a la distancia que se desea medir. Este cambio de fase obtenido es 2π veces el tiempo de vuelo o propagación y la frecuencia de modulación. Entonces, la distancia L se puede determinar a partir de la siguiente relación:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_o T = 2\pi f_o \frac{2L}{c} \tag{2.1}$$

De donde:

- $\Delta\varphi$: Cambio de fase
- f_o : La frecuencia de modulación
- T : Tiempo que demora en ir y regresar el haz láser

Con esta técnica se pueden alcanzar distancias de 100 metros con una resolución de 5mm a algunos cm, dependiendo de la frecuencia moduladora utilizada.

Las principales limitaciones de esta técnica son: la compleja circuitería, ya que se requieren de circuitos para la modulación, interpretación del cambio de fase, de control, entre otros; dificultad para realizar mediciones pequeñas, ello porque la frecuencia viene determinada directamente por la distancia mínima que se desea medir; para una distancia de 1 metro; y la frecuencia de modulación, la cual debe ser aproximadamente 150GHz, dificultando esto al momento de realizar pequeñas mediciones.

2.2.3. Triangulación

En este método [4] usa la habilidad del láser para mantener su forma cuando es propagado a cortas distancias. Generalmente, el rayo láser ilumina un punto a la distancia y se realiza la medición, es así que, esencialmente, el láser se usa como un puntero. Luego, un arreglo de detectores ópticos, conocido como CCD (Charge Coupled Device) es colocado a una distancia conocida D del rayo láser, de tal forma que la fuente del rayo láser, el objetivo y el detector formen un triángulo recto. Si se proyecta la ubicación de las partes en un plano 2D quedarían distribuidas de la siguiente manera:

- En una misma línea vertical se ubicaría el diodo láser (emisor) a una distancia conocida con el CCD (receptor), la distancia se determina de acuerdo a parámetro de diseño del dispositivo.
- En una misma línea horizontal se ubicaría el diodo láser con el blanco del que se quiere saber la distancia.

Este arreglo se ve ilustrado en la figura 7:

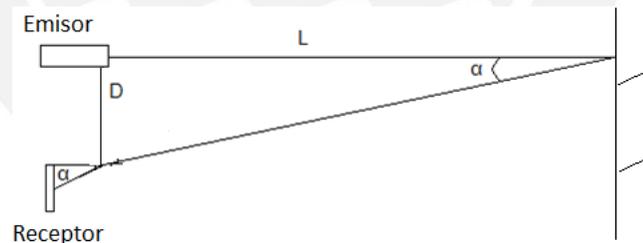


Figura 7: Medición de distancia mediante el método de triangulación

A través de la medición del ángulo α (ángulo formado entre la línea de luz del láser y el arreglo de detectores), la distancia se puede determinar por medio de:

$$L=D/\tan(\alpha)$$

Dónde:

- L : es la distancia desconocida que se quiere medir.

- D: es la distancia fija entre el emisor y el receptor.
- α : es el ángulo entre el blanco y el receptor.

Como este ángulo α es muy pequeño, se puede realizar la siguiente aproximación:

$$L=D/\alpha$$

La distancia L es mucho mayor que la distancia D, la variación del ángulo sería muy pequeña, casi imperceptible por el CCD. Por ello, se hace uso del lente receptor convergente para poder tener una proyección en un triángulo más pequeño, manteniendo el valor de α y así tener un valor de distancia más confiable.

En sus inicios, se utilizaban los teodolitos, sin la medición del ángulo α ; y las reglas, para establecer la distancia D. Sin embargo, su precisión es bastante pobre, debido a que si la distancia a medir L es mucho más pequeña que la distancia preestablecida D, el ángulo α a ser medido se vuelve muy pequeño con lo que la distancia L se ve afectada por errores e imprecisiones.

Como se observa en la figura 7, la distancia mínima y máxima que se puede medir del dispositivo al blanco, depende de la distancia máxima y mínima entre el diodo láser y el arreglo de receptores y la resolución de este método viene dada por el número de pixeles que contiene el CCD

Este método es relativamente sencillo de implementar con pocos y pequeños componentes, lo que lo hace un dispositivo bastante compacto y fácil de transportar, con un alto grado de confiabilidad. No obstante, a pesar de su sencillez, no está libre de posibles errores en su diseño e implementación. Por un lado, se encuentra la necesidad de utilizar filtros ópticos, para no permitir la interferencia de otras señales luminosas tales como: luz solar, luz artificial, etc. Por otro lado, se presenta el problema de la no linealidad de la resolución ya que para distancias pequeñas el porcentaje de error es bastante bajo (aproximadamente 0.1% para distancias de 1 metro), mientras que para las distancias mayores, este error puede ser de hasta 5% (para distancias cercanas a los 10 metros) [4]. Finalmente, otro inconveniente sería la necesidad de que los componentes se encuentren totalmente

alineados, ya que un pequeño error en su distribución puede provocar una variación considerable en la medición.

2.2.4. Comparación de técnicas

En base a lo previamente analizado [3-4], la tabla 5 presenta una comparación de los métodos anteriormente expuestos:

Tabla 5: Comparación de métodos de medición de distancia usando diodo láser

Características	Interferometría	Tiempo de vuelo		Triangulación
		Haz de láser pulsado	Diferencia de fase	
Rango de medición	Para distancias cortas y largas (desde pocos metros hasta varios kilómetros)	Para grandes distancias (en el orden de los kilómetros).	Para medianas distancias (hasta 100 metros)	Para cortas y medianas distancias (desde varios centímetros hasta 10 metros)
Porcentaje de Error	En el orden de los micrómetros (dependiendo del incremento de la longitud de onda de referencia)	En el orden de los centímetros (dependiendo de la frecuencia de procesamiento)	En el orden de los milímetros (dependiendo de la frecuencia de modulación)	En el orden de los milímetros (limitado por el número de pixeles)
Método de comparación	Comparación de la longitud de onda.	A través de la medición de emisión y retorno de un haz de luz.	Medición de la diferencia de la señal de emisión y de retorno	Distribución triangular entre el emisor, blanco y receptor y obtención de ángulo entre el blanco y el receptor
Requerimientos para la Implementación	Lente divisor y lente receptor, diodo láser, foto receptor, etapa de procesamiento	Láser de alta potencia, óptica avanzada para la detección del retorno, procesamiento de alta velocidad	Etapas de modulación de la alimentación del diodo láser, comparador de fase, lente receptor, foto receptor, etapa de procesamiento	Diodo láser, arreglo de receptores (CCD), lente receptor y etapa de procesamiento
Interpretación	Comparación del incremento de la longitud de onda en relación de la onda de referencia	Realimentación óptica para medición de distancia absoluta	Procesamiento de la diferencia de fase	Medición de distancia en función de la recepción en un arreglo de receptores

Fuente: Propia

2.3. Desarrollo del método de triangulación

Para lograr el correcto funcionamiento del sistema, primero se configura el arreglo de receptores para detectar el haz de luz, luego se emite el haz, se detecta su proyección en el arreglo de receptores con lo que se obtiene un valor a la salida de dicho arreglo, la cual es proporcional a la distancia del blanco; y finalmente, este valor es leído e interpretado por el controlador, obteniendo así la distancia a la que se encuentra el blanco.

La descripción del método elegido se resume en el siguiente diagrama de bloques:

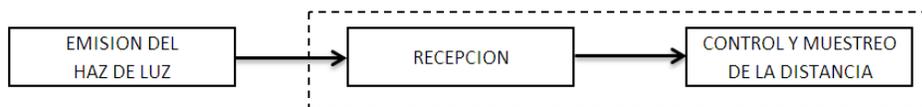


Figura 8: Diagrama de bloques del método de triangulación

2.3.1. Emisión del Haz de Luz

Esta etapa, básicamente, hace referencia a la emisión de luz mediante el uso del diodo láser, el cual se puede activar directamente con la alimentación del dispositivo, ya que no requiere ser modulado.

2.3.2. Recepción

Esta etapa consta de dos partes: un lente receptor para poder enfocar el haz de retorno y proyectar el triángulo formado por el receptor, el láser y el objetivo en el receptor, y el arreglo de receptores o CCD para detectar la proyección e interpretar la distancia. Para un mejor entendimiento de la presente etapa, se conceptualizará a continuación los dos componentes principales:

2.3.2.1. Lente receptor

Los lentes [6] son objetos transparentes, por lo general de vidrio y limitados por dos superficies, de las cuales una por lo menos es curva. Los lentes más comunes

están diferenciados de acuerdo al grado de refracción que experimentan los rayos de luz, al incidir en puntos diferentes del lente. Entre ellas están las utilizadas para ayudar en los problemas de visión (anteojos), también se usan lentes, o combinaciones de lentes y espejos, en telescopios y microscopios.

De mismo modo, existen instrumentos capaces de hacer converger o diverger otros tipos de ondas electromagnéticas y a los que se les denomina también lentes, por ejemplo, en los microscopios electrónicos los lentes son de carácter magnético.

2.3.2.1.1. Clasificación

- **Lente convergente (o positiva):** Los rayos inicialmente paralelos convergen en un solo punto después de atravesar la lente.

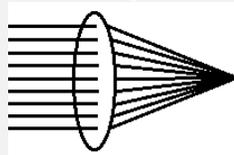


Figura 9: Lente convergente

- **Lente divergente (o negativa):** Los rayos inicialmente paralelos divergen después de atravesar la lente.

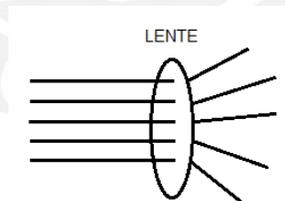


Figura 10: Lente divergente

2.3.2.1.2. Definiciones básicas

- **Foco:** Punto donde convergen los rayos después de atravesar un lente.
- **Distancia focal:** Separación entre el foco y la lente.

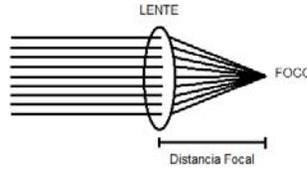


Figura 11: Lente convergente, distancia focal y foco

- **Ángulo de visión:** Angulo que determina la apertura que se puede captar después de atravesar el lente.

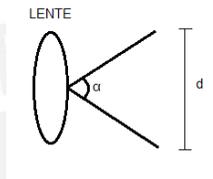


Figura 12: Ángulo de visión

$$\alpha = 2\arctan\left(\frac{d}{2f}\right)$$

- **Imagen Real:** Es aquella que se forma cuando atraviesa el lente, y los rayos de luz que traspasan convergen. Para poder ser perceptible, se hace uso de una pantalla que refleje la imagen.

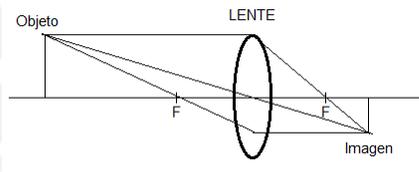


Figura 13: Imagen real

Si el objeto está a distancia menores que la distancia focal, entonces la imagen será mayor (la lente actúa como lupa), como se observa en la siguiente imagen.

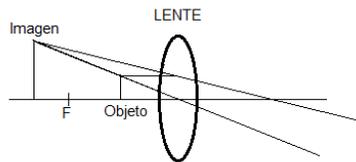


Figura 14: Lente como lupa

- **Apertura numérica (AN):** Rango de ángulos para los cuáles el lente acepta la luz, es decir, el rango de ángulos para los cuales la imagen se ve de manera nítida. A mayor AN se puede visualizar con mayor detalle.

$$AN = \frac{2\lambda}{n\pi D}$$

Donde:

- λ es la longitud de onda de la luz.
 - n es el índice de refracción que para el caso del aire es 1.
 - D diámetro del haz de luz más estrecho.
- **Aberraciones:** Son las distorsiones que presente la lente sobre la luz. E lente afecta de manera diferente a cada señal de luz, es decir, la lente afecta de manera distinta a la luz dependiendo de su longitud de onda.
 - **Capacidad de Captación:** Es una característica importante para la elección del lente la cual define la longitud de onda con la que se quiere trabajar.

2.3.2.2. Arreglo de receptores o CCD

El arreglo de receptores o CCD (Charge Coupled Device - Dispositivo de acoplamiento de carga) [5] es un dispositivo que consiste en un arreglo de varios receptores, pueden ser transistores que pasan de corte a saturación o condensadores que se cargan y descargan, enlazados o acoplados que convierten señales ópticas en eléctricas.

Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico, en el que los fotones que inciden en la superficie del CCD se transforman en un patrón de carga eléctrica en el silicio. Cada píxel (receptor individual en el CCD) funciona como una posición de carga independiente. El patrón de carga se transporta a la salida mediante señales eléctricas, para mover las posiciones de carga, es así que en la salida del CCD la carga se convierte en valores de voltaje.

Los CCD se clasifican en dos grandes grupos:

- **CCD lineales:** cuentan solo con una línea de fotodetectores y para analizar el área en cuestión tienen que realizar un barrido sobre la misma. Este tipo de CCD realizan una lectura de las líneas cercanas entre sí hasta completar toda el área a estudiar.
- **CCD matriciales:** cuentan con una matriz de líneas y columnas ordenadas de detectores, con lo cual se puede realizar el análisis del área correspondiente al mismo tiempo, evitando la necesidad de realizar un barrido como en el caso de los CCD lineales.

2.3.2.2.1. Aplicaciones

- **Fotografía y video digital:** Los píxeles son capaces de detectar tres colores básicos: rojo, verde y azul; por lo que un arreglo de tres píxeles es capaz de detectar cualquier color en la imagen. Cada color se diferencia por su longitud de onda e incidencia propia sobre los píxeles, obteniendo una señal eléctrica con electrones proporcionales a cada color.

Para realizar esto, se hace uso de la máscara de Bayer, la cual consiste en enmascarar o hacer una malla cuadrículada de filtros para 4 píxeles, uno para el color rojo, otro para el azul y dos para el verde. Ello porque el ojo humano es más sensible a las tonalidades verdes; finalmente, se interpreta mediante el software adecuado.

Astronomía: Debido a su alta linealidad en los resultados, los CCD son ideales para este campo. Se utiliza en aplicaciones astronómicas ultravioleta e infrarrojas, además de ser muy eficiente en aplicaciones cuánticas. Otra aplicación muy útil, es la que emplea el método de deriva, el cual permite seguir el movimiento de las nubes, a través de la conversión de un telescopio fijo en uno de rastreo mediante el uso del CCD.

- **Medición de distancias:** Mediante el método de triangulación, el cual viene siendo explicado en el presente capítulo.

Luego de la conceptualización de las dos principales partes de la recepción, se puede explicar con mayor detalle esta etapa.

Para poder obtener una correcta recepción del haz de luz, se deben alinear correctamente el láser, el lente receptor y el CCD, de lo contrario podría realizarse una medición incorrecta de la distancia o incluso no se obtendría medición alguna.

Este método responde a la trigonometría básica, como se observa en la figura 15, la medición se basa en la obtención de la tangente del ángulo α formado entre la línea delimitada por el haz de luz y la detección de su proyección en el CCD. Como el rango de valores del ángulo es bastante pequeño, la tangente se puede reducir al valor del ángulo y teniendo la distancia al blanco que se desea medir como variable, se obtiene la siguiente fórmula:

$$L = D/\alpha \quad (2.1)$$

Dónde:

- L: es la distancia desconocida que se quiere medir.
- D: es la distancia fija entre el emisor y el receptor.
- α : es el ángulo entre el blanco y el CCD.

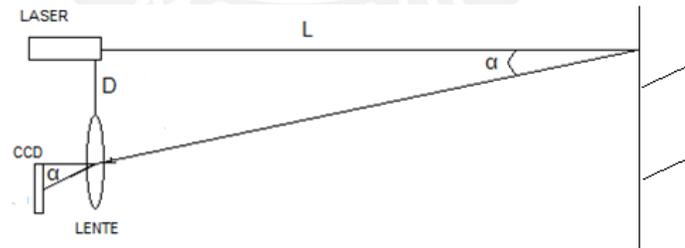


Figura 15: Medición de distancia mediante el método de triangulación

Para el triángulo reflejado por el lente receptor, se tienen como valor constante a “ l ” que no es más que la distancia focal del lente, “ d ” es el valor de la porción del CCD en donde se proyecta el haz de retorno del láser y “ α ” es el ángulo que forman l y d ,

que tiene el mismo valor del triángulo formado por el diodo láser, el CCD y el blanco, como se observa en la figura 16:

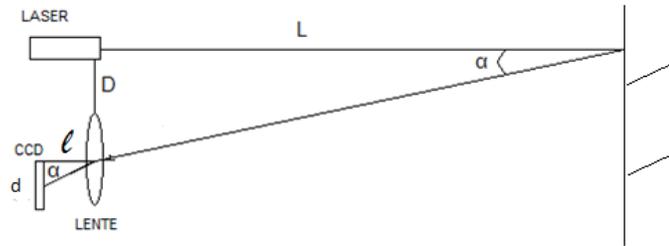


Figura 16: Método de triangulación incluyendo el triángulo reflejado por el lente

Entonces el valor del ángulo del triángulo reflejado viene dado por:

$$\alpha = \frac{d}{l} \quad (2.2)$$

Como este ángulo es el mismo que el triángulo formado por el láser, lente y el objetivo, igualando (2.1) y (2.2) se obtiene:

$$L = \frac{Dxl}{d} \quad (2.3)$$

De la relación anterior, la única variable a determinar es la distancia L, ya que las variables D, d y l son determinadas al momento del diseño del dispositivo.

A partir de la figura 16, se puede determinar el rango de medición del dispositivo con la ayuda de la relación (2.2), ya que l es un valor fijado en el diseño y el valor de d depende de los parámetros del CCD, específicamente, de la distancia de separación de cada pixel dentro del CCD y del número de pixeles.

Para obtener el rango de medición teórico de dispositivo, tenemos que obtener primero el valor del ángulo α :

- **Para obtener la distancia mínima (L_{\min}):** Para esta distancia, el valor del ángulo es máximo (ya que el ángulo es inversamente proporcional a la distancia a medir), el cual determina la distancia d como máxima (viene a ser el producto del número total de los pixeles y la distancia de

separación de cada pixel). Este valor se reemplaza en la relación (2.1), con lo que se obtiene la distancia mínima a medir.

- **Para obtener la distancia máximo (L_{\max}):** Para esta distancia el valor del ángulo es mínimo, el cual determina la distancia d como mínima (viene a ser el valor de la separación entre dos pixeles). Este valor se reemplaza en la relación (2.1), con lo que se obtiene la distancia máxima a medir.

Con estos dos valores se conforma el rango total que puede medir el CCD, que viene dado por:

$$L \in [L_{\min}; L_{\max}] m$$

La resolución queda definida, principalmente, por la distancia focal del lente y la distancia de éste al diodo láser, ya que son éstos los que hacen variar el ángulo que se forma entre el diodo láser, el blanco y el receptor.

2.3.3. Control y muestreo de la Distancia

El control del dispositivo involucra, básicamente, la activación y desactivación del diodo láser, manipulación de las señales de entrada y salida del CCD, interfaz de interacción con el usuario, todas estas operaciones se realizan mediante una etapa de control.

Luego de que en la etapa de control se termina el procesamiento y convierte la señal de salida del CCD a valores de distancia, estos se muestran al usuario mediante una interfaz gráfica que se debe elegir de acuerdo a las necesidades de dispositivo.

2.4. Ventajas del sistema

El desarrollo de un sistema con estas características, presenta las siguientes ventajas:

- Sencillo de desarrollar, ya que consta de tres etapas poco complejas en su implementación.
- Bastante confiable, pues al ser un dispositivo digital, nos da mayor confianza en la medición de la distancia que con los medios mecánicos.
- Al ser un método de medición no contactante, ofrece mediciones rápidas y precisas, sin la necesidad de desplazarse de un lugar a otro para obtener el valor de la distancia medida.
- Dispositivo portátil, lo cual permite un fácil transporte y manipulación.
- El hacer uso de un diodo láser de clase II, nos permite saber a qué objeto se está apuntando.
- Es un dispositivo bastante flexible, ya que permite variaciones en sus etapas, dependiendo de la necesidad requerida por aplicación final, sin la necesidad de cambiar todo el esquema.
- Ofrece una gran variedad de aplicaciones en diferentes ámbitos, tal como se mencionó anteriormente, puede ser aplicado en la industria, en aplicaciones clínicas, en construcción, diseño de interiores y exteriores, etc.

Capítulo 3: Diseño del dispositivo

3.1. Elección del método

Para el desarrollo de dispositivo, se eligió el método de triangulación (a partir de lo descrito en el capítulo 2) debido a:

- **Su simplicidad**, ya que consta de tres etapas básicas que son implementadas sencillamente, con pocos componentes pequeños y fáciles de encontrar.
- **Su eficiencia** ya que se puede obtener distintos rangos de medición con porcentajes de error bastante bajos.
- **Su multiplicidad**, pues mediante simples modificaciones en el diseño del hardware y software se puede modificar los parámetros del dispositivo (rango de medición, precisión).
- **Su portabilidad** ya que consta de circuitos bastante reducidos lo que permite llevar este instrumento a todo lugar con facilidad
- Finalmente mediante la implementación de este método se puede cumplir con todos los objetivos específicos planteados en la presente tesis.

Como se mencionó anteriormente, el dispositivo cuenta con las siguientes etapas, añadiéndole además la alimentación general, con lo que obtenemos el diagrama de bloques general del dispositivo presentado en la figura 17:



Figura 17: Etapas para el diseño del medidor de distancias

3.2. Etapa de emisión del haz de luz

Como se mencionó anteriormente, esta etapa consta del diodo láser, el cual se encargará de emitir el haz de luz visible, en este caso se ha elegido usar un diodo láser que emita luz roja con la suficiente potencia para poder ser detectado por el receptor.

3.2.1. Elección del diodo láser

El diodo láser debe cumplir con ciertas características básicas como:

- Alimentación 5V y bajo consumo de potencia.
- Que tenga una longitud de onda entre 620 y 750 nm (luz roja)
- Tenga la potencia para ser visto a una distancia de 10 metros.

Se presenta la tabla 6 con algunas alternativas presentes en el mercado:

Tabla 6: Cuadro comparativo para la elección del diodo láser

Características	HL7851G	VLM-650002-LPA2	SLD302WT	LL-3R-CLDRV
Voltaje de alimentación	2.3 Vdc (aceptable)	3 – 10 Vdc (cumple)	15 Vdc (no cumple)	5 Vdc (cumple)
Longitud de onda (620 – 750nm)	785 nm (no cumple)	650 nm (cumple)	800 nm (no cumple)	630 nm (cumple)
Potencia de consumo baja	60 mW (cumple)	30 mW (cumple)	180 mW (cumple)	30 mW (cumple)
Apreciación	Cumple con las especificaciones requeridas.	Cumple con las especificaciones requeridas.	No cumple con las especificaciones requeridas.	Cumple con las especificaciones requeridas.

- Fuente: Digikey (www.digikey.com)

A partir del cuadro anterior, los diodos láser HL7851G, LL-3R-CLDRV y VLM-650002-LPA2 cumplen con las especificaciones requeridas, pero se descarta el HL7851G ya que esto implicaría una etapa extra de alimentación para generar el voltaje de 2.3V.

Finalmente se decide hacer uso del VLM-650002-LPA2 [7] debido a su facilidad de encontrar en el mercado, su buen desempeño, y además porque cuenta con una

etapa de adaptación del voltaje de entrada que mantiene una potencia de salida constante (lo que mantiene un nivel de luz constante) y porque cumple con los requisitos de diseño solicitados.



Figura 18: Diodo láser VLM-650002-LPA2

3.3. Etapa de recepción

El diseño de esta etapa depende de la elección del lente receptor y del CCD, con los datos de estos componentes se puede luego realizar la distribución final de ambos y el diodo láser.

3.3.1. Elección del lente receptor

El lente debe cumplir con las siguientes características

- El lente a utilizarse para el método de triangulación es un lente convergente para tener reflejado el haz de luz como un punto sobre el CCD.
- Que tenga un valor de captación que oscile entre 620 y 750nm (para que sea capaz de captar la luz roja emitida por el diodo láser.)
- Que tenga un ángulo focal y una distancia focal que permita recorrer toda la superficie del CCD y así recorrer todos sus pixeles.
- Considerar que no se presentan aberraciones en este dispositivo ya que solo se utilizará la luz roja.

En el mercado internacional se encuentra gran cantidad de lentes con aplicaciones para óptica, diseñados para trabajar con diodos láser cuyos precios oscilan alrededor de los 50 dólares.

Las variaciones que presenta un lente de otro son básicamente en su tamaño físico, la distancia focal y el ángulo focal, manteniendo el mismo precio de venta.

Para este caso en particular se hará uso de un lente de 5cm de tamaño y 5cm de distancia focal con la capacidad de detectar y reflejar la longitud de onda de la luz roja sobre el CCD. Este lente fue proporcionado por el Laboratorio de Óptica de la sección de Física de la PUCP.



Figura 19: Lente convexo

3.3.2. Elección del CCD

Se requiere que cumpla con los siguientes requisitos básicos:

- Alimentación de 5V.
- Arreglo de receptores para tener una resolución del 2% en promedio y poder medir distancias de 1 a 10 metros.
- Capaz de detectar luz roja (620 a 750 nm de longitud de onda)
- Fácilmente programable

En la tabla 7 se presentan distintas opciones disponibles:

Tabla 7: Comparación del CCD

Características	ILX526A SONY	TCD2561D TOSHIBA	PD3573 NEC	MN3611 PANASONIC
Voltaje de alimentación	5V (cumple)	12V (no cumple)	12V (no cumple)	12V (no cumple)
Cantidad de receptores	3000 fotodiodos (cumple)	5340 fotodiodos (cumple)	2048 fotodiodos (aceptable)	2160 fotodiodos (aceptable)
Tipo de CCD	Lineal	Matricial	Lineal	Lineal

Detección de longitud de Onda	650 nm (cumple)	Todos los colores (cumple)	550 nm (no cumple)	550nm (no cumple)
Programación	3 señales (cumple)	3 señales más que color detectar (aceptable)	4 señales (aceptable)	4 señales (aceptable)
Tamaño físico	32 mm (cumple)	53.6 mm (aceptable)	39.6 mm (cumple)	No indica (no es crítico)
Apreciación	Cumple con todos los requisitos	Cumple con todos los requisitos, pero implica mayor etapas de programación para la detección de color	No cumple con la longitud de onda a detectar	No cumple con los requisitos

Fuente: Digikey (www.digikey.com)

Se eligió el CCD ILX526A de SONY [10] ya que a parte que cumple con todos los requisitos del dispositivo, este integrado fue proporcionado de forma inmediata por el Laboratorio de Óptica de la sección de Física de la PUCP.



Figura 20: CCD ILX526A

3.3.2.1. Configuración del CCD

Para lograr el correcto funcionamiento del CCD primero se necesita configurarlo a través de la generación de tres señales digitales [12]:

- CLK: señal de reloj de 500KHz recomendada por el fabricante.
- ROG (Readout Gate pulse input): señal que da inicio a la lectura de los receptores.

- SHUT (Electrical Shutter pulse input): señal que integra los valores leídos en los receptores.

Los tiempos en alta y baja de cada una de las señales se aprecian en la siguiente imagen obtenida de la hoja de datos del fabricante [10]:

Clock Timing Diagram (Without S/H mode)

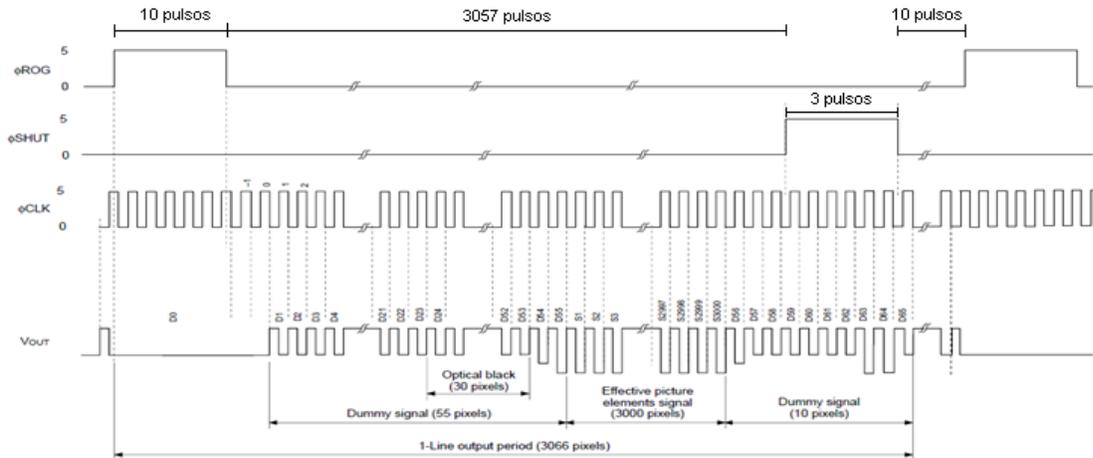


Figura 21: Diagrama de tiempos para configurar el CCD [10]

Como se observa, si se configuró correctamente el CCD, la señal de salida V_{out} variará (pasará de nivel alto a nivel bajo) dependiendo de cuál o cuáles pixeles se activaron por la incidencia del rebote del haz de luz en el CCD, lo que está directamente relacionado con la distancia a medir.

3.3.2.2. Circuito de recepción

El diseño del circuito de la presente etapa se basa en el presentado en la hoja de datos del fabricante [10]. Se alimenta con un voltaje de 5V (V_{DD}) y cuenta con los condensadores C1, C2 y C3 para eliminar el ruido que genera la etapa de alimentación.

La salida se obtiene en el pin 20, la cual es un pulso positivo constante que varía a valores de '0' lógico cuando los receptores detectan el haz de luz.

A su vez el sistema tiene dos maneras de mostrar la señal: como variaciones de pulsos independientes por receptor o como una sola de acuerdo al grupo de receptores que estén detectando. Se ha elegido para este diseño, que el CCD en

su salida envié las variaciones de los receptores en grupo y no independientemente para poder procesarla más fácilmente, esto se obtiene colocando el pin S/H (pin 12) a GND. En caso se desee desactivar este modo, se cambia la conexión del pin12 de GND a V_{DD} . En base a estas consideraciones y la configuración recomendada por el fabricante [12] se tiene el siguiente circuito:

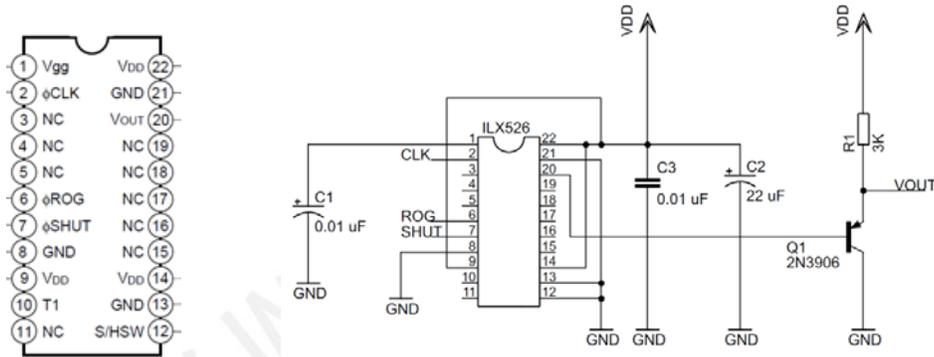


Figura 22: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante y distribución de pines [12]

3.3.3. Distribución física de los componentes

Como se mencionó en el capítulo anterior, la correcta ubicación de los componentes es fundamental para el funcionamiento del dispositivo, ya que si se ubican de forma incorrecta se tendría un error bastante grande o incluso no se obtendría ninguna medición.

Con el valor de la distancia focal (f) dada por el lente y (d) siendo el producto de la distancia entre pixeles y el número de ellos (de la hoja de datos el CCD tiene 3000 pixeles con una distancia de separación de 7 μm .), tenemos el triángulo reflejado:

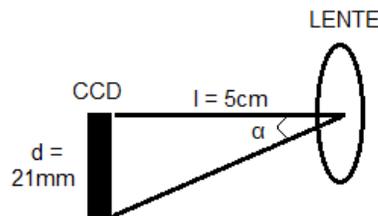


Figura 23: Triángulo reflejado

Para determinar el rango de medición primero se tiene que determinar el ángulo mínimo y máximo que se forma en el triángulo reflejado que viene dado por la relación (2.2):

- Para poder determinar el ángulo mínimo se necesita que el reflejo del láser incida en el primer pixel del CCD lo cual determina una distancia d de $7\mu\text{m}$:

$$\alpha_{min} = \frac{7\mu\text{m}}{5\text{cm}}$$

$$\alpha_{min} = 1.4 \times 10^{-4}$$

- Para poder determinar el ángulo máximo se necesita que el reflejo del láser incida en el último pixel del CCD lo cual determina una distancia d de 21mm :

$$\alpha_{max} = \frac{21\text{mm}}{5\text{cm}}$$

$$\alpha_{max} = 0.42$$

A continuación se realiza la proyección de estos ángulos al triángulo formado por la distribución del diodo láser, el CCD y el blanco, para esto se debe definir la distancia a la que se encuentra el lente, y por ende el CCD del diodo láser. Un criterio para definir la distancia entre el láser y el lente es usar la misma distancia que la distancia focal ($D = \ell = 5\text{cm}$).

Además el CCD se ubicará a la mitad del lente para que el reflejo del haz láser pueda activar cualquiera de los 3000 pixeles dependiendo de la distancia que se esté midiendo. Con estos datos la ubicación definitiva de todos los datos queda de la siguiente manera:

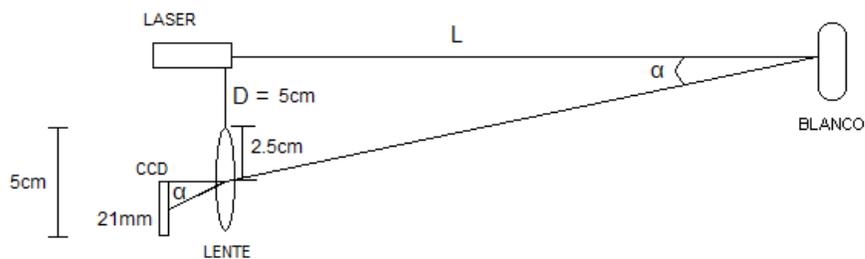


Figura 24: Distancias reales para el método de triangulación

Con estos valores se puede determinar finalmente el rango de L , el cual depende del ángulo correspondiente y la distancia del diodo láser a CCD (que viene a ser 7.5cm)

$$L \in [L_{\min}; L_{\max}] m$$

- Para hallar el L_{\min} se usará el ángulo máximo y la distancia del diodo láser al CCD, reemplazando en (2.1) se obtiene:

$$L = \frac{7.5}{0.42}$$

$$L_{\min} = 17.86cm$$

- Para hallar el L_{\max} se usará el ángulo mínimo y la distancia del diodo láser al CCD, reemplazando en (2.1) se obtiene:

$$L = \frac{7.5}{1.4 \times 10^{-2}}$$

$$L_{\max} = 535.71m$$

Con esto finalmente queda el rango de distancias teórico que puede medir el sistema:

$$L \in [0.179; 535.71] m$$

Como se mencionó anteriormente el rango de distancia puede variar dependiendo de:

- **La distancia focal del lente:** varía el valor de ℓ , también varían los ángulos máximos y mínimos de detección.
- **La distancia entre el lente y el diodo laser:** varía el valor de D , haciendo que varíe el valor de L .

La resolución queda definida principalmente por la distancia focal del lente y la distancia de éste al diodo láser. Esta relación se obtiene igualando (2.1) y (2.2):

$$L = \frac{D}{\tau} \quad (3.1)$$

Reemplazando por los valores constantes de D y ℓ , la ecuación (3.1) queda de la siguiente manera:

$$L = \frac{37.5 \times 10^{-4}}{d} \quad (3.2)$$

Con la relación (3.2) y fijando distintos valores de d se obtiene la tabla 8 con la que se puede determinar el porcentaje de error de todo el rango de medición:

Tabla 8: Relación de L y el % de error en función de d

Fotodiodo	d [μm]	L [m]	% error
1	7	535.714286	50.00%
2	14	267.857143	33.33%
3	21	178.571429	25.00%
4	28	133.928571	20.00%
5	35	107.142857	16.67%
6	42	89.2857143	14.29%
7	49	76.5306122	12.50%
8	56	66.9642857	11.11%
9	63	59.5238095	10.00%
10	70	53.5714286	9.09%
11	77	48.7012987	8.33%
12	84	44.6428571	7.69%
13	91	41.2087912	7.14%
14	98	38.2653061	6.67%
15	105	35.7142857	6.25%
16	112	33.4821429	5.88%
17	119	31.512605	5.56%
18	126	29.7619048	5.26%
19	133	28.1954887	5.00%
20	140	26.7857143	4.76%
≈			
54	378	9.92063492	1.82%
55	385	9.74025974	1.79%
56	392	9.56632653	1.75%
57	399	9.39849624	1.72%
58	406	9.2364532	1.69%
59	413	9.07990315	1.67%
60	420	8.92857143	1.64%
61	427	8.78220141	1.61%
62	434	8.640553	1.59%
63	441	8.50340136	1.56%
64	448	8.37053571	1.54%
65	455	8.24175824	1.52%
66	462	8.11688312	1.49%
67	469	7.99573561	1.47%
68	476	7.87815126	1.45%

≈			
2976	20832	0.18001152	0.03%
2977	20839	0.17995105	0.03%
2978	20846	0.17989063	0.03%
2979	20853	0.17983024	0.03%
2980	20860	0.17976989	0.03%
2981	20867	0.17970959	0.03%
2982	20874	0.17964932	0.03%
2983	20881	0.1795891	0.03%
2984	20888	0.17952892	0.03%
2985	20895	0.17946877	0.03%
2986	20902	0.17940867	0.03%
2987	20909	0.17934861	0.03%
2988	20916	0.17928858	0.03%
2989	20923	0.1792286	0.03%
2990	20930	0.17916866	0.03%
2991	20937	0.17910875	0.03%
2992	20944	0.17904889	0.03%
2993	20951	0.17898907	0.03%
2994	20958	0.17892929	0.03%
2995	20965	0.17886954	0.03%
2996	20972	0.17880984	0.03%
2997	20979	0.17875018	0.03%
2998	20986	0.17869056	0.03%
2999	20993	0.17863097	0.03%
3000	21000	0.17857143	0.03%

Fuente: Propia

Se puede apreciar que la distancia L y el % de error no responden de manera lineal, sino como se muestra a continuación:

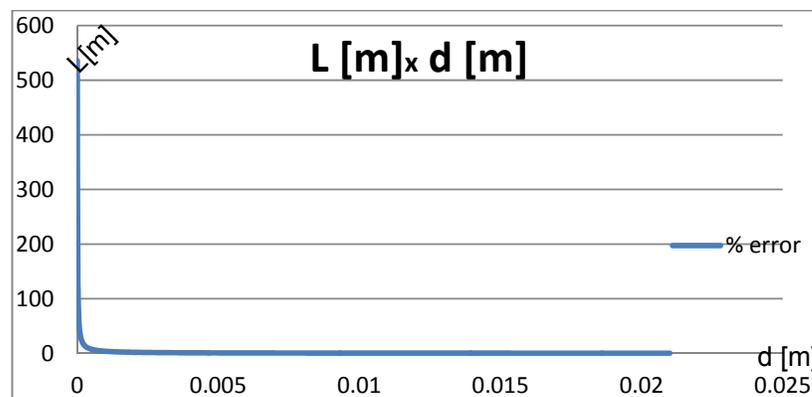


Figura 25: Distancia L en función de d

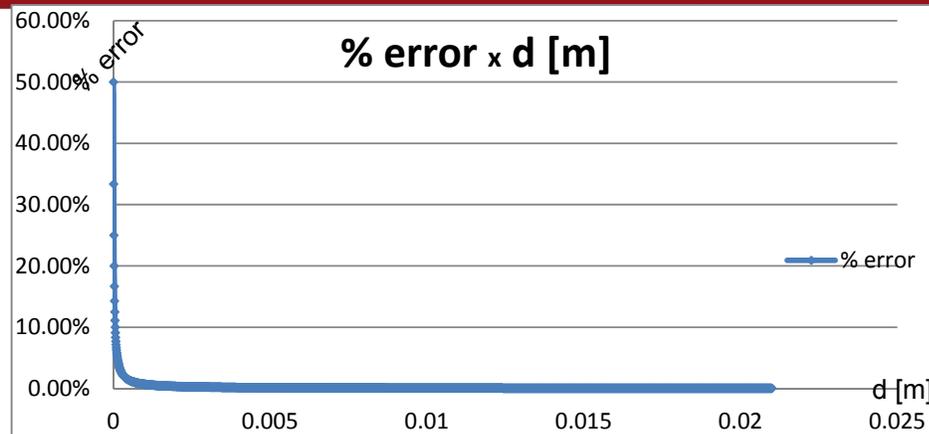


Figura 26: % de error en función de d

De la tabla y gráficas anteriores se puede desprender lo siguiente:

- Para una distancia de 50 a 535 metros el porcentaje de error es de 9% a 50%.
- Para una distancia de 10 a 50 metros el porcentaje de error es de 2% a 9%
- Para una distancia de 1 a 10 metros el porcentaje de error es de 0.1% a 2%
- Para una distancia menor a 1 metro el porcentaje de error es de 0.03% a 0.2%

3.4. Etapa de control y muestra de la distancia

En la presente etapa se realiza el control del CCD, procesamiento de su salida, conversión de esta salida a valores de distancia y finalmente las muestra numéricamente al usuario.

3.4.1. Muestra

En esta etapa se muestra numéricamente en un interfaz gráfico los valores de distancia obtenidos luego de que se procesa la información enviada por el CCD.

3.4.1.1. Elección de componentes

Se requiere que cumpla con los siguientes requisitos básicos:

- Alimentación de 5V y bajo consumo de potencia.

- Poder mostrar distancias con dos dígitos enteros y un dígito decimal separados por el punto decimal correspondiente.
- Compacto
- Fácil de programar

Según el análisis de mercado, la muestra de distancia se puede realizar: a través de un visualizador de 7 segmentos o una pantalla LCD, cuya comparación se realiza en la tabla 9:

Tabla 9: Comparación de visualizadores

Características	Visualizador de 7 segmentos de 3 dígitos	Display LCD de 2x16
Voltaje de alimentación	5V (cumple)	5V (no cumple)
Consumo de potencia	50mW por dígito, 150mW en total	7.5mW (50mW adicionales si se usa la luz de fondo)
Cantidad de Dígitos a mostrar	Cuatro dígitos incluido el punto decimal (cumple)	Dos líneas de 16 caracteres, 32 en total (cumple)
Tamaño físico	5 x 2cm (cumple)	8 x 3.5 cm (aceptable)
Apreciación	Cumple con todos los requisitos	Cumple con todos los requisitos, pero es un poco grande

Fuente: Digikey (www.digikey.com)



Figura 27: Display LCD 2x16

Se decide utilizar el Display LCD de 2x16 por su bajo consumo de potencia, facilidad de programación, porque cumple con los requisitos mínimos de la distancia

que se desea mostrar y dimensiones no tan exageradas como para disminuir la portabilidad.

Un display de cristal líquido o LCD [14] está conformado por dos placas de vidrio transparente que protegen dos capas de electrodos transparentes entre las cuales se encuentra un líquido especial, llamado cristal líquido, que es una sustancia orgánica que tiene la estructura molecular similar al cristal. Sus moléculas pueden ser controladas por un campo eléctrico, para esto se hace uso de los electrodos del LCD, haciendo que sus moléculas giren en un patrón ordenado en un mismo ángulo. Si no se aplica voltaje sobre los electrodos, las moléculas del cristal líquido mantienen su ángulo por defecto y dejan pasar la luz a través de ellas. Finalmente se refleja la luz en una capa reflectora ubicada en la base del LCD. Si se aplica un valor de voltaje a los electrodos, las moléculas de cristal líquido giran e impiden el paso de luz, con lo que se aprecia una zona oscura en el vidrio del LCD. Es de esta forma que el LCD usa estas zonas oscuras como puntos de un carácter, formándose así los distintos caracteres:

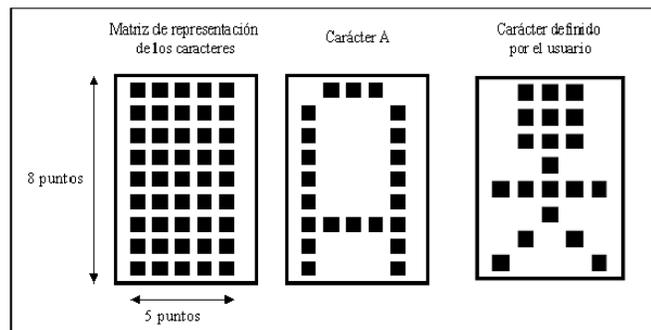


Figura 28: Matriz de 5x8 puntos para formar diversos caracteres [8]

El LCD es una clase de tecnología que no emite luz para formar los caracteres, por lo que en ambientes de poca iluminación no podría ser utilizado, es por esto que se le aplica una luz de fondo para poder identificar las zonas oscuras en ambientes de poca luz. Esta luz de fondo es generada por un LED ubicado en la parte de fondo de los vidrios del LCD.

3.4.1.2. Diseño de la etapa de muestra

El circuito asociado al LCD [8] es obtenido directamente de la hoja del fabricante y se muestra en la figura 29:

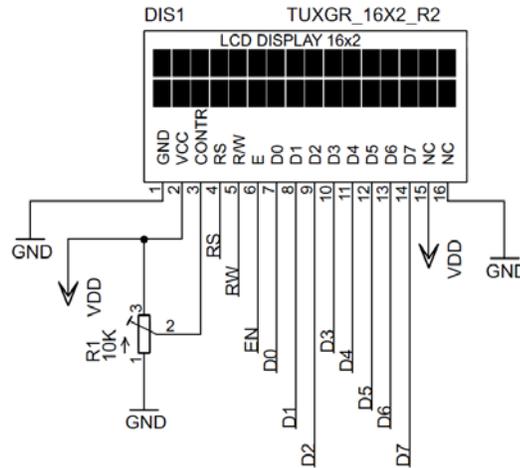


Figura 29: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante

La distribución de pines es como sigue:

- CONTR (Pin 3): se controla el nivel de contraste de los caracteres que se van a mostrar, a través de un potenciómetro de 10K.
- RS (pin 4): se elige si se desea enviar un dato o una instrucción al LCD (en alta se envía un dato y en baja una instrucción).
- RW (pin 5): se selecciona si se desea leer o escribir un dato en el LCD (en alta se lee datos del LCD y en baja se escriben datos).
- D0....D7 (del pin 7 al 14): son los bits de datos, enviados byte por byte.
- A y K (pin 15 y 16 respectivamente): en estos pines se activa la luz de fondo si es necesario (A se conecta a 5V y K a GND).

3.4.2. Procesamiento y control

El procesamiento de las señales y control del dispositivo se realiza a través del uso de un microcontrolador que tendrá como tareas principales:

- Captar la señal externa con la que se da el aviso para medir la distancia.
- Generar las señales necesarias para que el CCD funcione correctamente (CLK, ROG y SHUT)
- Recibir la señal de salida del CCD y convertirla en valores de distancia que el microcontrolador pueda procesar.

- Enviar los valores de distancia a la etapa de muestra para poder visualizar numéricamente en el LCD la distancia medida.

3.4.2.1. Elección de componentes

El microcontrolador debe tener las siguientes características:

- Ser capaz de generar todo el patrón de señales requeridos por el CCD
- Tenga como voltaje de alimentación 5 Vdc.
- Contar con los pines necesarios para poder atender todas las necesidades del dispositivo.
- Poder enviar la distancia medida al visualizador elegido.
- La necesidad de la mayor sincronización posible de las señales requeridas por el CCD, lo que se obtiene con una alta frecuencia de trabajo.
- Se pueda programar en lenguaje ensamblador debido a la facilidad de programación.

Tabla 10: Comparación de microcontroladores

Características	ATmega8	ATmega16A	PIC16C52	PIC18F2455
Voltaje de alimentación	5V (cumple)	De 2.7 a 5V (cumple)	5V (cumple)	5V (cumple)
Pines	28 (aceptable)	40 (cumple)	18 (no cumple)	28 (aceptable)
Frecuencia Interna (MHz)	8	8	4	8
Apreciación	Es una alternativa aceptable	Cumple con todos los requisitos.	No cumple con los requisitos	Es una alternativa aceptable

Fuente: Digikey (www.digikey.com)

Se eligió el ATmega16 de la empresa ATMEL [10] porque se puede asegurar la disponibilidad de pines para las distintas funciones del dispositivo, alta frecuencia interna de reloj que permitirá sincronizar correctamente las señales del CCD y

porque ya se tiene experiencia previa con la familia ATMEL para la programación y uso de sus microcontroladores.



Figura 30: Microcontrolador ATmega16

De la hoja del fabricante [10], se resume que el ATmega16 presenta las siguientes características principales: 130 instrucciones, 32x8 registros de propósito general, hasta 16 MIPS a 16 MHz, programación no volátil y memoria de datos, 16Kbytes de memoria Flash, 512 bytes de EEPROM, 1Kbyte de SRAM, un contador/timer de 16 bits, dos contadores/timers de 8 bits, 8 canales de ADC de 10 bits, USART programable, 32 pines programables como entrada/salida. Tiene un rango de voltaje de 2.7 a 5V, hasta 8MHz de ciclo de reloj y un consumo máximo de 12mA cuando es configurado a 8MHz y 25°C.

3.4.2.2. Configuración de los pines del ATmega 16

Con la elección del ATmega16 como microcontrolador para este diseño, se cuenta con un total de 32 pines disponibles, los cuales se utilizarán de la siguiente manera:

- El Puerto A (PA0-PA7) como bus de datos del display LCD
- El puerto B (PB1) como entrada de la fuente de reloj externa, que en este caso será la señal de reloj del CCD de 500KHz
- El puerto C (PC0-PC2) como bus de control para el LCD
- El puerto D (PD2) como entrada del pulsador que indicará una nueva muestra de distancia en el LCD.
- El puerto D (PD4, PD5, y PD7) como señales ROG, SHUT y CLK del CCD
- El puerto D (PD6) como pin de entrada de la señal de salida del CCD

3.4.2.3. Circuito de procesamiento y control

Luego de la asignación de pines mencionada anteriormente, se diseña el circuito de la figura 31:

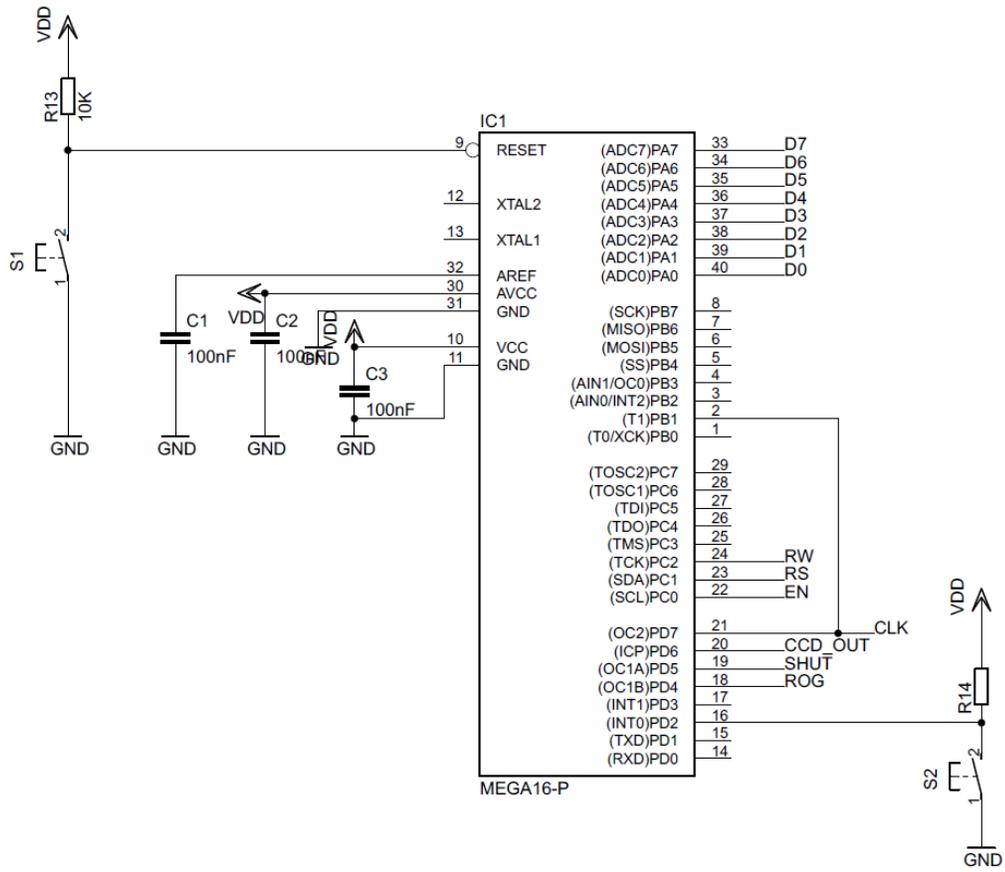


Figura 31: Circuito Receptor según la hoja de datos del fabricante y distribución de pines

Los condensadores C1, C2 y C3 son condensadores de desacople para minimizar los ruidos producidos en las entradas de voltaje y referencia del microcontrolador y además un pulsador de reset S1 para detener y reiniciar el dispositivo ante cualquier eventualidad o problema que pudiera surgir. Finalmente también cuenta con el pulsador S2 que activa la muestra de la distancia en el display LCD.

3.4.2.4. Descripción general del software: Programa principal y subrutinas importantes

Como se mencionó anteriormente, para poder realizar la medición de la distancia al objetivo, es necesario que el microcontrolador realice las siguientes tareas:

- Generar las tres señales de configuración del CCD (ROG, SHUT y CLK)

- Poder leer el valor de salida del CCD que contendrá la información de la distancia medida.
- Poder realizar la interpretación de dicha salida y convertirla a valor de distancia
- Finalmente mostrar la distancia, con una resolución de 5mm., en valores numéricos en el display LCD.

Para esto, se configura el ATmega16 para que tenga una frecuencia de trabajo de 8 MHz mediante su oscilador interno y se hace uso de los siguientes periféricos dentro del microcontrolador:

- Timer/Counter 1: Realizará dos tareas importantes: En la primera actuará como un contador de 16 bits de flancos de subida que tendrá como señal de entrada a la señal de CLK generada para el CCD, esta cuenta servirá como referencia para el cálculo de la distancia a mostrar. Y en la segunda actuará para sensar, a través de una interrupción por captura de eventos, configurado para la detección de flancos de bajada, el cambio de estado de la señal de salida del CCD (cuando cambia de alta a baja).
- Timer/Counter 2: Con este timer se generará la señal de CLK a ser utilizada en el CCD que será de 516KHz (valor más cercano a los 500KHz sugeridos por el fabricante). Además esta señal se usará en el contador anterior.
- Interrupción externa 0: Se usará un pulsador conectado al pin correspondiente, el cual al ser accionado realizará el cálculo de la distancia y la mostrará en el display LCD.
- La distribución de puertos de entrada/salida ya ha sido mencionada anteriormente

Luego de la configuración inicial de la pila, de los puertos del ATmega16, de los periféricos mencionados y del LCD [9], la función más importante del programa principal es la generación de las señales de configuración del CCD, para asegurar el correcto funcionamiento del CCD se sigue el diagrama de tiempos proporcionado por el fabricante:

Clock Timing Diagram (Without S/H mode)

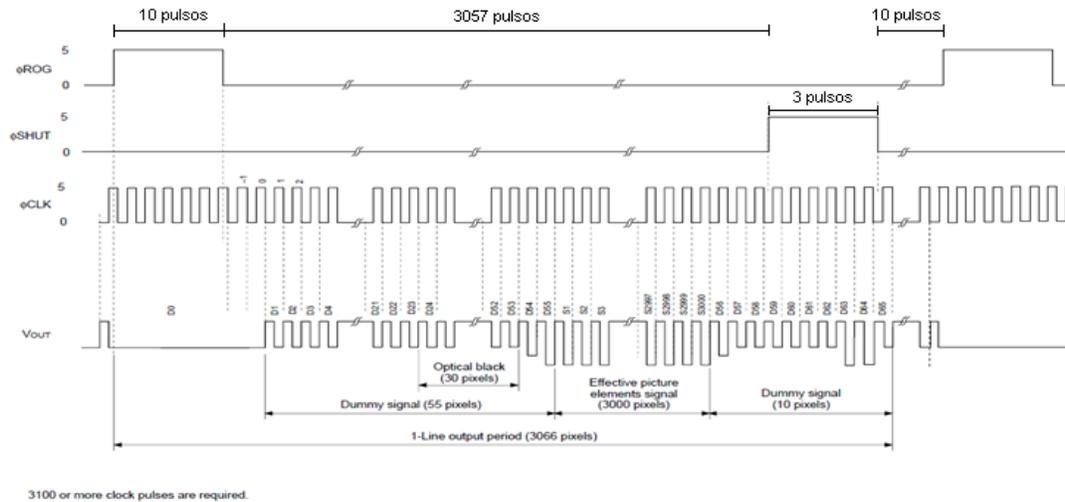


Figura 32: Diagrama de tiempos para configurar el CCD [12]

Todos los tiempos son calculados en base a pulsos de la señal de reloj CLK del CCD, que viene a ser 516 KHz o 1.93798 μ s con lo que se tiene:

- La señal ROG tiene una duración de 10 pulsos o 19.3798 μ s
- El tiempo en baja entre la señal ROG y SHUT es de 3057 pulsos o 5.9244 ms.
- La señal SHUT tiene una duración de 3 pulsos o 5.8139 μ s
- Se sugiere además esperar 10 pulsos o 19.3798 μ s antes de iniciar nuevamente el ciclo.

Adicionalmente a la duración de las señales, también se debe asegurar que las señales generadas por el microcontrolador cumplan las siguientes características:

- La señal ROG debe comenzar y terminar durante un pulso de subida de la señal CLK.
- La señal SHUT debe comenzar y terminar durante un pulso de bajada de la señal CLK.

El ciclo de repite infinitamente mientras se encuentre energizado el dispositivo. Este procedimiento se resume en el siguiente diagrama de flujo del programa principal:

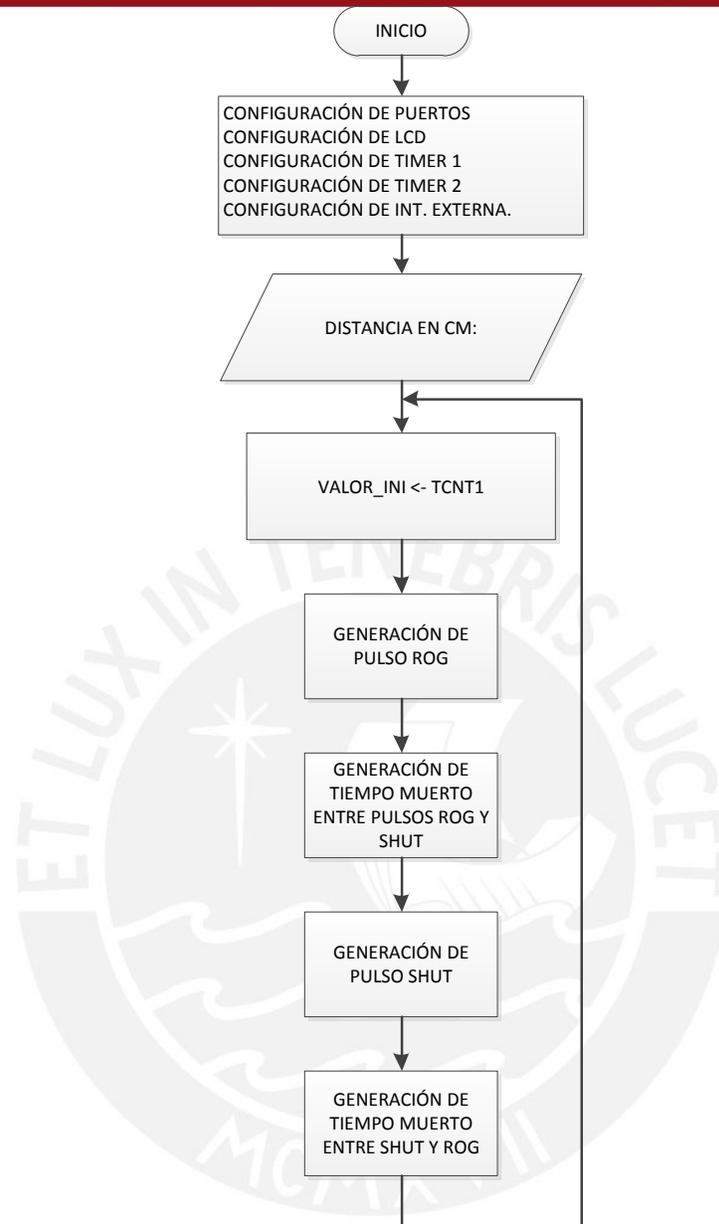


Figura 33: Diagrama de flujo del programa principal

Para la medición de la distancia, en la figura 34 se observa que las variaciones en cada uno de los pixeles de la señal de salida del CCD se dan en cada periodo de su señal de CLK, por lo que a través del uso de un contador que comienza su cuenta desde el inicio de la generación de la señal ROG hasta la incidencia de luz en alguno de sus pixeles (cuando la salida varía de nivel alto a nivel bajo), se puede determinar a qué distancia se encuentra el blanco.

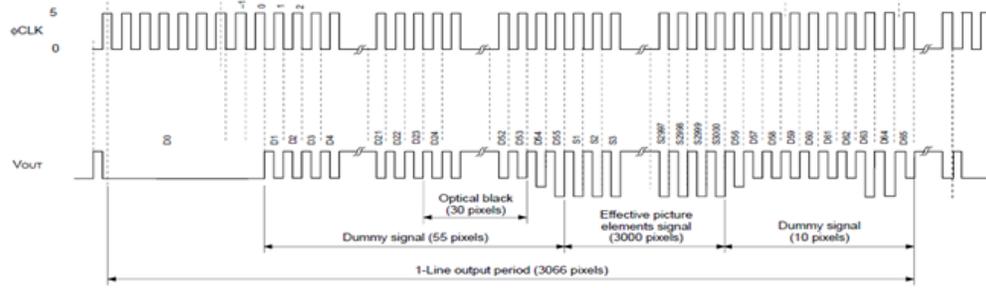


Figura 34: Señal de CLK vs Salida del CCD

Para realizar esta tarea se define lo siguiente:

- Se configura el Timer/Counter 1 como contador de flancos de bajada (almacenando la cuenta en el registro TCNT1), usando como señal de referencia para la cuenta al Timer/Counter 2 que tiene una frecuencia de 516KHz, por lo que la cuenta se incrementará en cada flanco de bajada del Timer/Counter 2.
- Además también en el Timer/Counter 1 se configura la Interrupción de captura de eventos por flancos de bajada, usando la señal de salida del CCD como referencia, para que en el momento que hay una incidencia de luz en el CCD y se produce el flanco de bajada en su salida, se guarda el valor del registro TCNT1 en el registro "VALOR_FINAL". Este valor se actualiza constantemente hasta que se presione el pulsador S2 que habilita la muestra de la distancia en el LCD.

En la figura 32 se observa que para limitar el valor de la cuenta al rango de los 3000 detectores del CCD, se le debe restar los 55 pulsos de la señal Dummy o señal inservible y los 10 pulsos de la señal de ROG. Para resumir lo antes mencionado se presenta la figura 35, que describe la tarea realizada por la interrupción de captura de eventos por flancos de bajada:

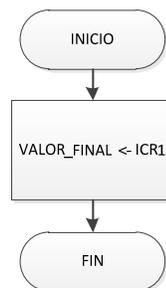


Figura 35: Diagrama de flujo para la interrupción por captura de eventos

Como se mencionó anteriormente, al activar el pulsador S2 se muestra la distancia en el LCD con una resolución de 5 mm, a través del uso de la interrupción externa 0. En esta interrupción se realiza la limitación al rango de los 3000 detectores del CCD previamente mencionada, este valor se almacena en el registro DIST.

Para determinar la distancia en función del valor del contador, se presenta la tabla 11, que muestra los valores de distancias en función de los pixeles del CCD:

Tabla 11: Distancias en función de los pixeles del CCD con una resolución de 5 mm.

L[cm]	Pixel CCD	L[cm]	Pixel CCD
34	2995	47.5	1141
34.5	2901	48	1093
35	2809	48.5	1045
35.5	2719	49	998
36	2633	49.5	953
36.5	2548	50	908
37	2466	50.5	864
37.5	2386	51	821
38	2308	51.5	779
38.5	2233	52	737
39	2159	52.5	696
39.5	2087	53	657
40	2017	53.5	618
40.5	1948	54	579
41	1881	54.5	541
41.5	1816	55	504
42	1753	55.5	468
42.5	1690	56	432
43	1630	56.5	397
43.5	1571	57	363
44	1513	57.5	329
44.5	1456	58	296
45	1401	58.5	263
45.5	1346	59	231
46	1293	59.5	199
46.5	1242	60	168
47	1191		

Finalmente, a partir de comparaciones sucesivas y mediante el uso de la tabla anterior, se puede determinar la distancia a mostrar en el LCD

Este proceso se resume en el diagrama de bloques presentado en la figura 36:

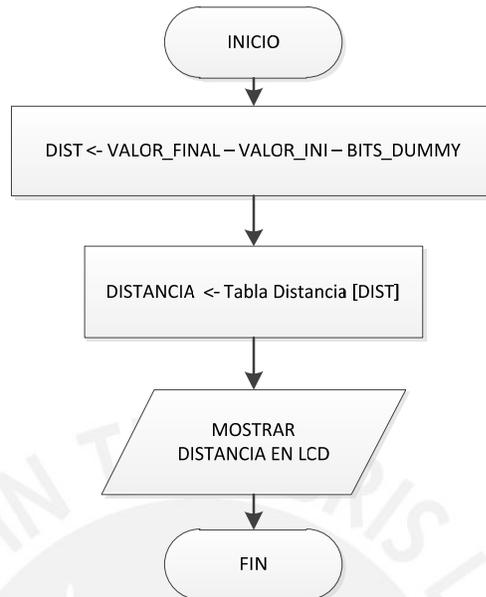


Figura 36: Diagrama de flujo para la interrupción externa

3.5. Fuente de alimentación

Como el circuito va a ser portátil y la alimentación debe de ser continua, se requiere que la alimentación se realice a pila o batería. Para esto se va a hacer uso de una fuente conformada por 4 pilas AA de 1.5Vdc cada una, dando un total de 6Vdc como alimentación, luego este valor debe de ser regulado a 5Vdc para alimentar a todos los componentes del dispositivo (CCD, microcontrolador y display LCD).

Para poder dimensionar correctamente la fuente primero se debe definir el consumo de potencia total del dispositivo.

3.5.1. Consumo de potencia total

Como ya se mencionó, todos los componentes del dispositivo se alimentan con 5V, por lo que solo resta cuantificar la suma total de corrientes de todos los elementos, para así conocer la potencia total requerida.

De las hojas de los fabricantes del diodo láser [7], CCD [12], display LCD [8] y ATmega16 [10], la sumatoria de corriente es:

- Diodo Láser: 27mA
- Microcontrolador a 8MHz: 15mA
- Pulsador de reset: 0.5mA
- Pulsador de muestra de distancia: 0.5mA
- Luz de fondo del LCD: 50mA
- Presentación de los caracteres en el LCD: 7.5mA
- CCD: 17mA

Con lo cual se tiene un total de 117.5 mA, es decir se necesita de una fuente de 5V que entregue como mínimo una potencia de 587.5 mW para poder operar sin problemas.

3.5.2. Elección de los componentes

Para obtener el voltaje de alimentación de 5V se usará un regulador de voltaje para realizar esta tarea, para lo cual se presentan las siguientes opciones a elegir en la tabla 12:

Tabla 12: Comparación de reguladores de voltaje

Características	LM7805	LM2940
Voltaje de alimentación	Entre 7 y 35V (cumple)	Entre 6 y 40V (cumple)
Caida de Voltaje	2V	0.5V
Máxima Potencia	1A	1A
Apreciación	No cumple	Cumple los requisitos

Fuente: Digikey (www.digikey.com)

Se optó por el integrado LM2940 [13] ya que puede proporcionar el voltaje de alimentación correcto (ya que su caída es de solo 0.5V) cuando se utiliza 4 pilas de 1.5V a la entrada, es bastante pequeño y proporciona la cantidad de corriente necesaria para alimentar al dispositivo.

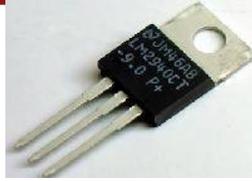


Figura 37: Regulador de Voltaje LM2940

3.5.3. Circuito de alimentación

El siguiente diseño [13] se basa en el modelo propuesto en la hoja de datos del fabricante:

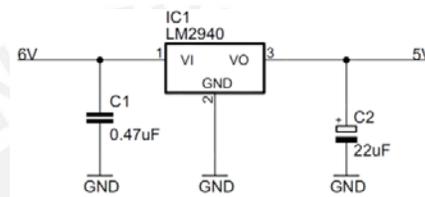


Figura 38: Circuito de la fuente de alimentación

El voltaje de entrada tal como se definió es de 6 voltios (4 pilas AA de 1.5V cada una), se le coloca además en la entrada se coloca un condensador C1 para eliminar las variaciones en la entrada y el condensador C2 es usado para mantener la estabilidad de la etapa.

3.5.4. Independencia de energía

Teniendo en cuenta que la corriente total del dispositivo es de aproximadamente 91mA, de la siguiente imagen obtenida de la hoja del fabricante de la pila AA de Energizer [15], se observa que hay una independencia energética de aproximadamente 5 horas (la caída de voltaje máxima permitida para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo es de 5.5V o 1.36V por pila).

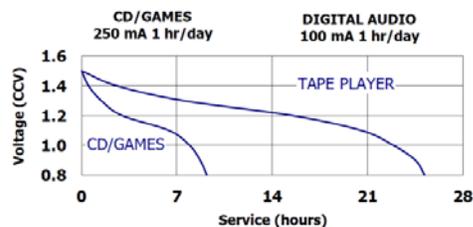


Figura 39: Caída de voltaje vs tiempo de uso [15]

Capítulo 4: Pruebas y resultados

4.1 Pruebas del dispositivo

Para comprobar que el dispositivo funciona correctamente, se tiene que realizar pruebas de cada etapa de forma independiente y finalmente realizar la prueba de todo el dispositivo.

4.1.1 Diodo láser

Como se mencionó en capítulos anteriores el diodo láser utilizado es el VLM-650002-LPA2 que ya cuenta con adaptación del voltaje de entrada, requiriendo el uso únicamente de una fuente de voltaje para su funcionamiento. En la figura 40 se puede apreciar la fuente interna al diodo láser.



Figura 40: Fuente del diodo láser

Se alimenta al diodo láser con 5 voltios para comprobar que funciona correctamente, ver figura 41:

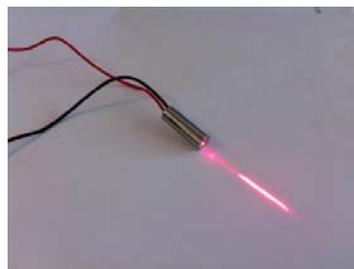


Figura 41: Funcionamiento del diodo láser

También se realizan pruebas para observar cómo responde el diodo láser ante variaciones en su voltaje y determinar sus valores de corriente para el voltaje elegido.

Tabla 13: Relación de corriente en función del voltaje de alimentación del diodo láser

PRUEBA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [mA]
1	0.10	1.50
2	0.50	1.50
3	1.00	1.50
4	1.50	1.50
5	2.00	13.30
6	2.50	21.60
7	3.00	22.86
8	3.50	24.01
9	4.00	25.32
10	4.50	26.50
11	5.00	27.00
12	5.50	28.80
13	6.00	29.83
14	6.50	31.03
15	7.00	32.00

Fuente: Propia

De la tabla 13 se puede concluir que la fuente del diodo láser trabaja como una resistencia entregando un valor de corriente al diodo láser en función del voltaje de alimentación. El valor aproximado de esta resistencia es de 190 ohms.

Por parámetros de diseño y recomendación del fabricante, se alimenta el diodo con 5VDC por lo que consume 27mA de corriente.

4.1.2 Lente receptor convergente

Para el caso del lente se ve que pueda reflejar correctamente el rebote del haz de luz. Para esto se hace una proyección a un blanco a una distancia fija y se ve el reflejo al otro lado del lente, tal como se observa en la figura 42:



Figura 42: Amplificación del rebote del haz de luz con el lente

Se puede apreciar que la distancia focal real del lente es de 11.5 cm; diferente a los 5 cm teóricos considerados en la parte teórica. Esta diferencia de valor afectará considerablemente en el rango de medición. Para poder compensar esta distancia focal y no afectar el rango de medición, se varía la distancia entre el diodo láser y el lente en la misma proporción en que varía este valor.

En la figura 43 se aprecia que a menor distancia entre el lente y la imagen reflejada, es decir, si la distancia focal es menor a la real del lente; este punto reflejado tiene mayor diámetro, haciendo que sean más los píxeles que se activan con el rebote y con menor intensidad de luz, por ende la concentración de luz está más dispersa.



Figura 43: Amplificación del rebote del haz de luz con el lente a una distancia focal de 5cm

Con estas pruebas se puede concluir que el lente convergente cumple su función correctamente ya que el lente capta el rebote y lo refleja en un solo punto de forma correcta en el blanco (que luego será reemplazado por el CCD)

4.1.3 CCD

Para verificar el funcionamiento del CCD, se tiene que primero comprobar la correcta generación de las señales de configuración del mismo para obtener las variaciones en su salida dependiendo de cuál de los receptores se activa con la incidencia de la luz. Para realizar esta comprobación se hace uso del osciloscopio digital portátil Hantek modelo DSO-2090 [16] conectado vía USB a una PC portátil.

4.1.3.1 Generación de señales de configuración

En la figura 44 se observa que se logra obtener la señal de CLK a la frecuencia de 516 KHz, la más cercana a 500KHz obtenible con la configuración del timer del ATmega16.

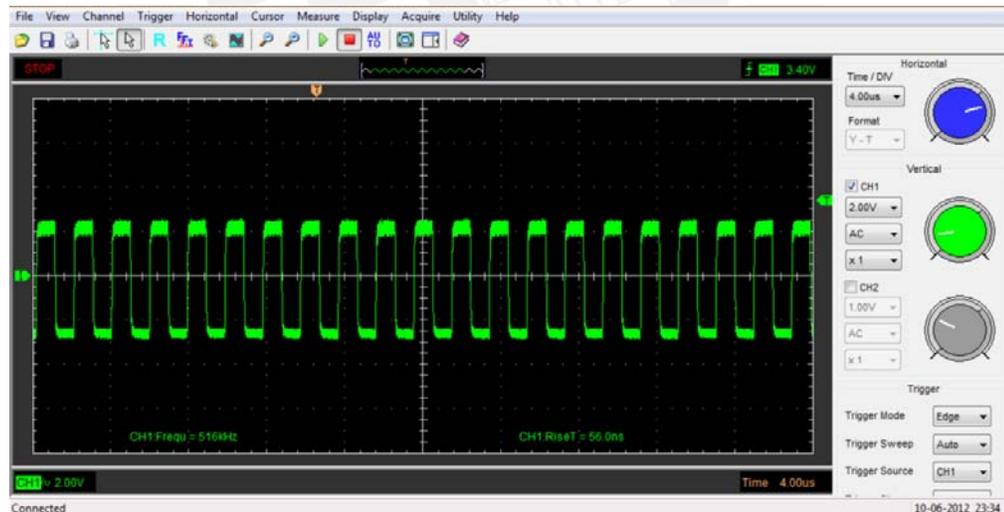


Figura 44: Señal CLK de 516 KHz

Luego en la figura 45 se observa la señal de ROG generada que tiene un tiempo de duración de 19.517 μ s, valor muy cercano al valor teórico de 19.379 μ s y en la

figura 46 se comprueba la sincronía entre la señal de CLK y ROG requerida por el fabricante.

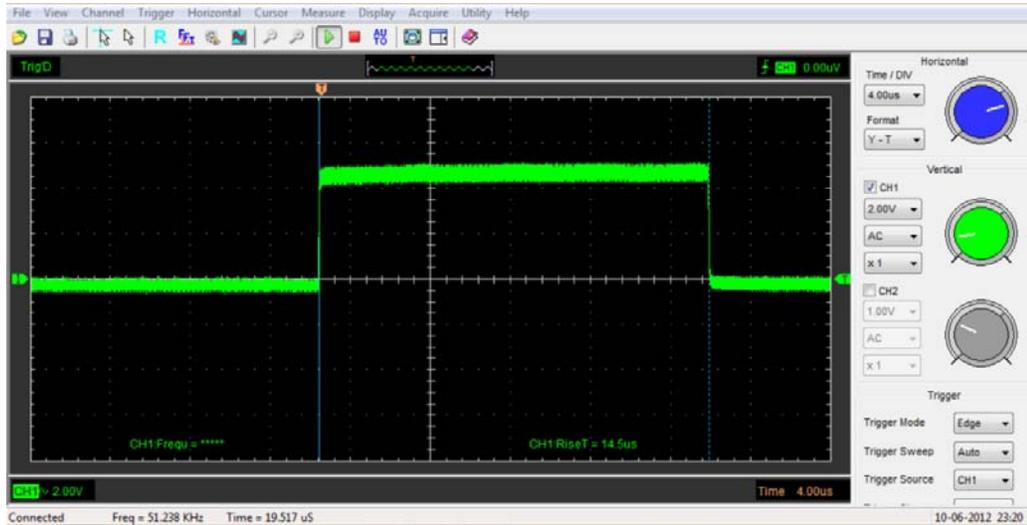


Figura 45: Señal de ROG

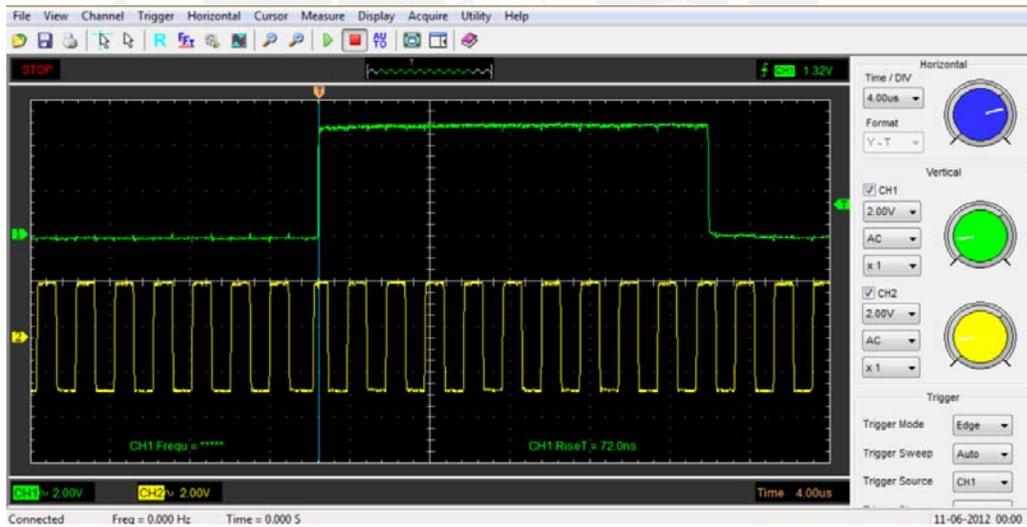
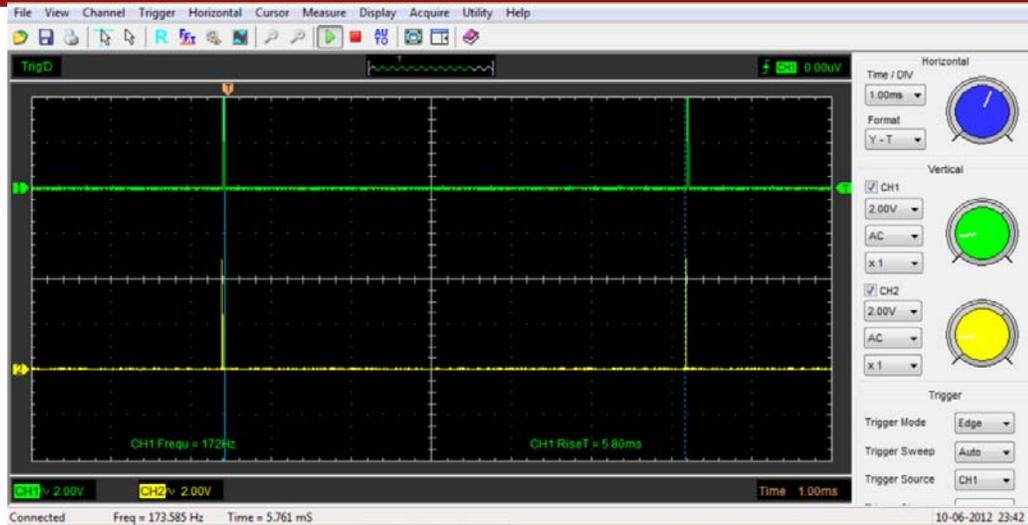
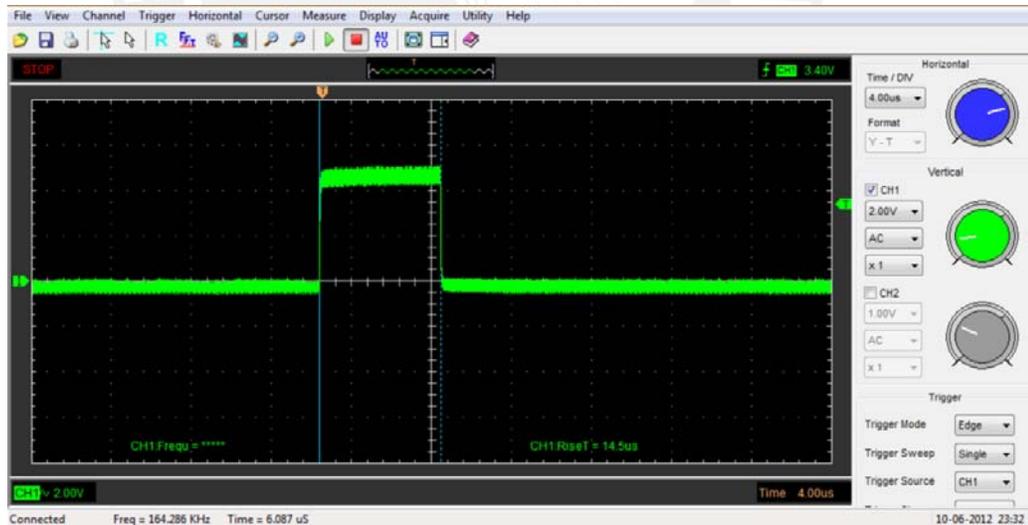


Figura 46: Sincronía de la señal de ROG y el CLK

En la figura 47 se observa que el tiempo en baja entre las señales de ROG y SHUT es 5.761ms, valor más que aceptable frente al valor teórico de 5.924ms calculado anteriormente.



En la figura 48 se observa la señal de SHUT generada que tiene un tiempo de duración de 6.087 μ s, valor muy cercano al valor teórico de 5.813 μ s y en la figura 49 se comprueba la sincronía entre la señal de CLK y SHUT requerida por el fabricante.



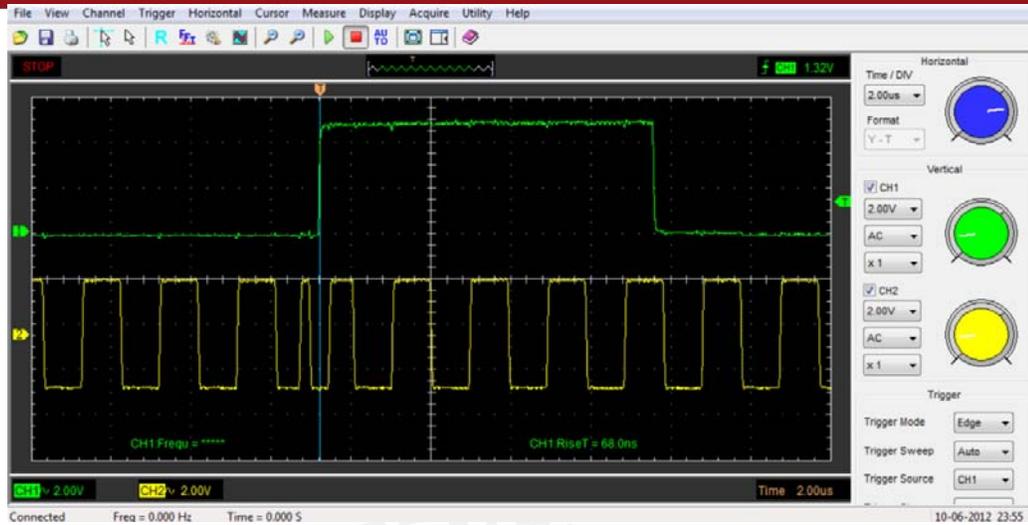


Figura 49: Sincronía de la señal de SHUT y el CLK

Finalmente en la figura 50 se observa que el tiempo en baja para reiniciar el ciclo (tiempo entre la señal SHUT y ROG) es de 19.324 μ s frente al valor teórico calculado de 19.379 μ s.

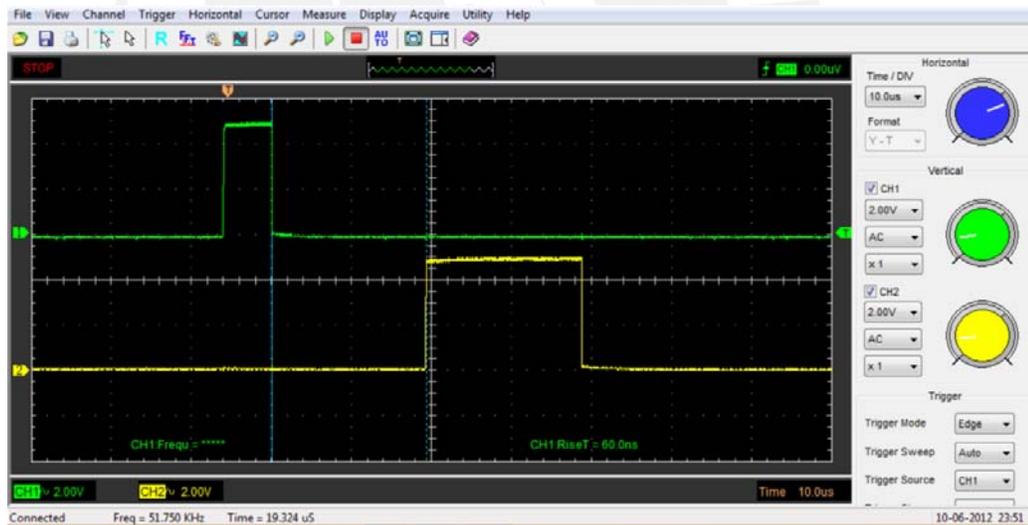


Figura 50: Señal CLK de 518 KHz

4.1.3.2 Activación de la salida

Para comprobar el correcto funcionamiento del CCD según el programa descrito en el capítulo anterior, se envían las señales de configuración al dispositivo, se capta el rebote del haz de luz y se visualiza la variación de la salida del CCD en el

osciloscopio (en el canal 1). Se logra apreciar dicha variación en todo el rango de los detectores del CCD (ver figuras de la 51 a la 54).

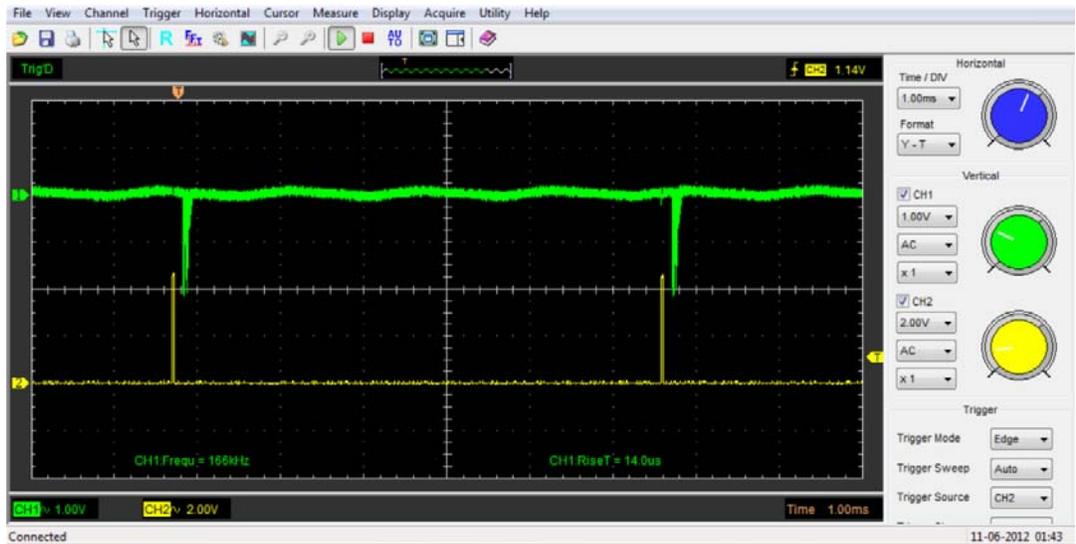


Figura 51: Salida del CCD

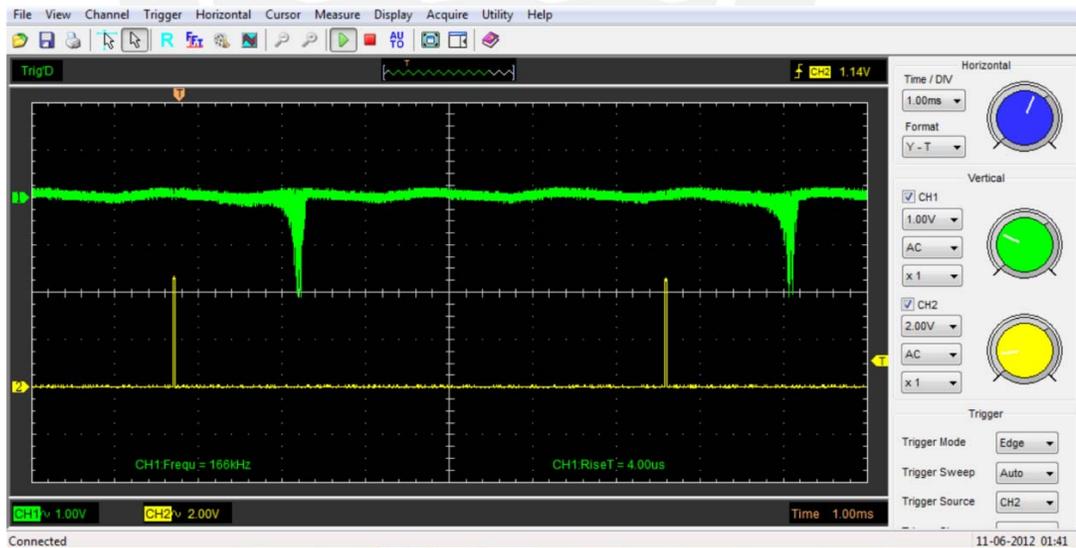


Figura 52: Salida del CCD

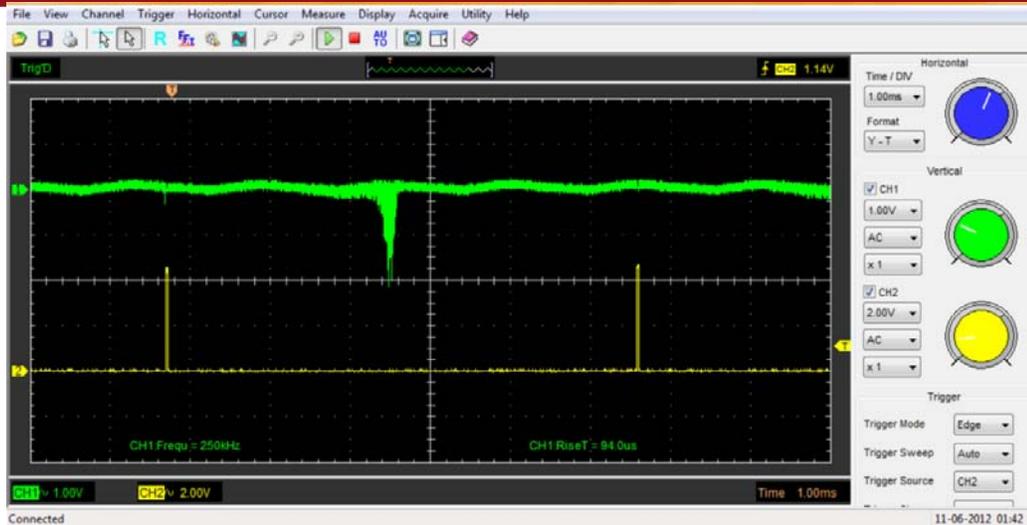


Figura 53: Salida del CCD

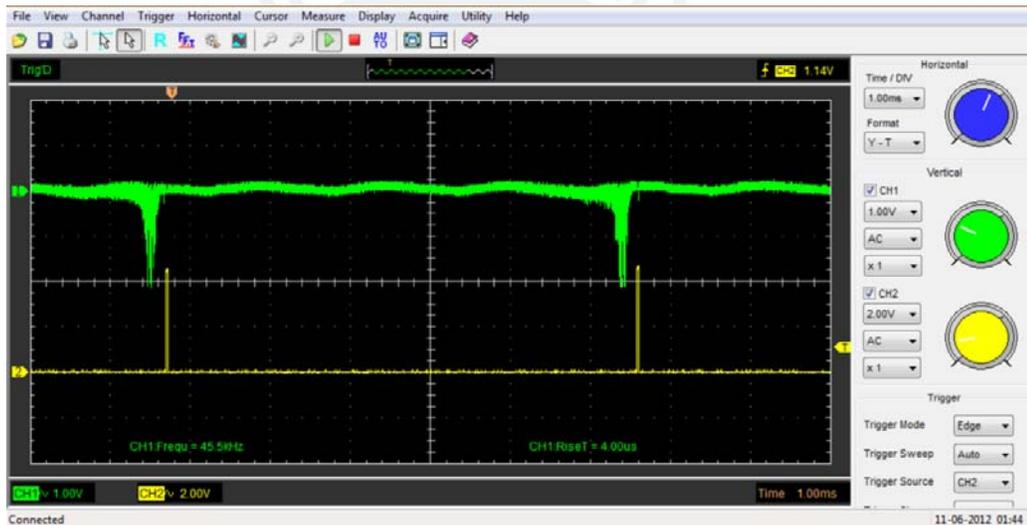


Figura 54: Salida del CCD

Se puede concluir que el CCD ha sido configurado correctamente y se muestra que percibe el rebote de la señal a lo largo de todo el arreglo de receptores dentro del CCD.

4.1.4 Display LCD 2x16

La prueba de funcionamiento del display se realiza de manera similar a la anterior, cargando un programa muy simple en el que se logra apreciar el correcto

funcionamiento del display, mostrando 16 caracteres en cada línea de datos, tal como se aprecia en la figura 55.



Figura 55: Prueba de funcionamiento del display LCD de 2x16

4.1.5 Procesamiento de datos

Indirectamente se ha estado probando el correcto funcionamiento y comunicación con cada una de las partes al realizar la carga de programas para el CCD y el display LCD de 2x16.

4.2 Pruebas del Dispositivo

Todas las pruebas realizadas se hicieron en oscuridad para que otras fuentes de luz no afecten la toma de datos y sobre un objetivo totalmente blanco para facilitar la captación del rebote del haz de luz.

- **Prueba 1: Con los valores de distancia teóricos.**

En este punto no se obtuvo lectura alguna a la salida del CCD, ya que la distancia focal del lente es bastante menor a la real; obteniendo un punto “amplificado” y con muy baja intensidad de luz, por lo que los sensores del CCD con captaban nada.

- **Prueba 2: Con la distancia focal de 11.5 cm manteniendo la distancia entre el diodo láser y el lente.**

Para esta prueba se apreció que el rango de medición de la distancia estaba notablemente reducido a un rango de 35 a 50 cm.

- **Prueba 3: Con distancia focal de 11 cm y aumentando la distancia entre el diodo láser (11 cm) y el lente para compensar la variación del rango de medición.**

De manera similar a la prueba anterior, el rango de medición se vio reducido a valores muy pequeños: de 28 a 60 cm.

Como los valores de distancias teóricas han variado, se hace un nuevo cálculo teórico de los rangos de medición. Haciendo uso de la fórmula (3.9) y reemplazando l por 13.5cm (11.5 de distancia focal más 2.5 del radio del lente) y D por 11cm se obtiene la siguiente fórmula:

$$L = \frac{148.5 \times 10^{-4}}{d} \quad (4.1)$$

- Para el d mayor (4.57cm), L menor se obtiene: 28 cm.
- Para el d menor (2.47cm), L mayor se obtiene: 60.12 cm.

Considerando como d [2.47; 4.57] cm.

En este punto también se comprueba que los rangos de distancia teórico y real son notablemente diferentes. Esto se puede observar de mejor manera en la figura 56:

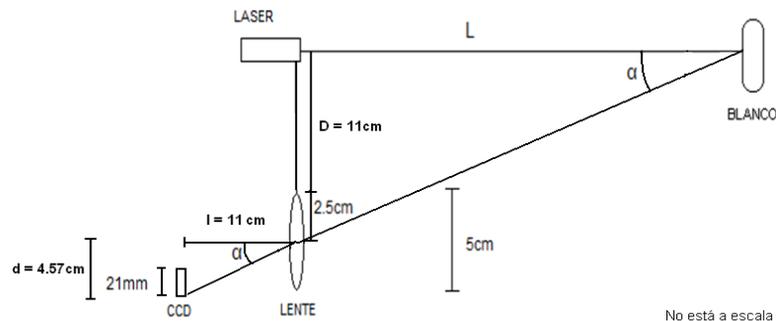


Figura 56: Valores con distancia focal de 11cm

Se aprecia que se tiene un rango en la distancia “d” que actualmente no se puede medir, debido a que no se tiene sensores en esa zona, es por esto que el rango efectivo de medición se reduce. Inicialmente se realiza una prueba de una parte del Sistema: diodo láser, lente, CCD, y control, sin mostrar aún la distancia en el LCD. Para esto se hace uso del osciloscopio digital [16] para obtener el valor de los pixeles y las fórmulas anteriormente desarrolladas, obteniéndose así la tabla 14:

Tabla 14: Relación entre valor teórico vs real sin etapa de muestra

Valores teóricos					Valores reales	
Item	L[cm] teorico	d[cm] teorico	pixel teorico	tiempo us	L[m] real	Porcentaje de error
1	35	4.24	2533	4761	36	2.86%
2	40	3.71	1775	3304	39.5	1.25%
3	45	3.30	1186	2171	44.6	0.89%
4	50	2.97	714	1264	50.1	0.20%
5	55	2.70	329	522	55.9	1.64%
6	60	2.48	7	256	60.2	0.33%
7	60.12	2.47	1	0	60.2	0.13%

Fuente: Propia

Según la tabla 14 el porcentaje de error real vs teórico es de 2.86% como máximo, lo que es bastante aceptable.

También se apreció con estos cambios de distancias, que si bien aumenta la distancia focal y/o la distancia entre el lente y el diodo láser, el rango de medición de la distancia al blanco también aumenta, tanto para el valor mínimo como el máximo, es decir, el rango de medición es directamente proporcional a la distancia focal y entre el lente y el diodo láser. Para el caso de la resolución del sistema se mantiene la forma de las figuras 25 y 26 sin importar la variación de éstas distancias, lo que sí varía son sus valores.

Finalmente, y con la certeza de que el diseño funciona correctamente, se realizan pruebas con la etapa de muestra incluida las cuales se encuentran documentadas en la tabla 15, en la que se aprecia que el porcentaje de error máximo en las mediciones realizadas es de 0.58%:

Tabla 15: Relación final entre valor teórico vs real con etapa de muestra

Ítem	Pixel CCD	L [cm] Teórico	L [cm] Real	Porcentaje de Error
1	2995	34.50	34.20	0.58%
2	2017	40.00	39.70	0.50%
3	1401	48.00	48.40	0.21%
4	908	50.00	49.90	0.20%
5	504	54.00	53.60	0.37%
6	168	60.00	59.70	0.33%

Fuente: propia

Para complementar la información presentada en la tabla 15 se tienen las figuras 57, 58 y 59:



Figura 57: Distancia mostrada de 34.5 vs Distancia real de 34.2



Figura 58: Distancia mostrada de 48.0 vs Distancia real de 48.4

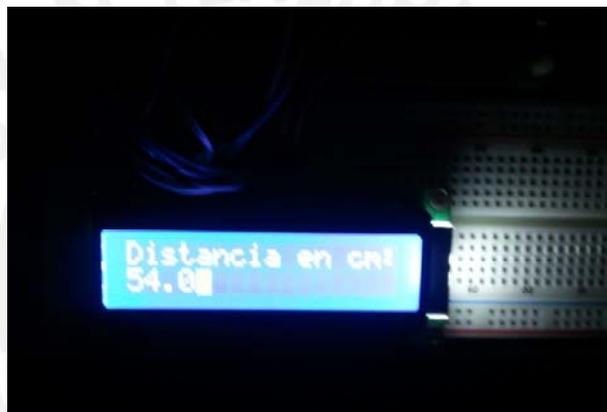


Figura 59: Distancia mostrada de 54.0 vs Distancia real de 53.6

Con todas las pruebas realizadas y descritas anteriormente se comprueba el correcto funcionamiento del método y se aprecia como punto extra que no importa el ángulo que forma el blanco con la línea de proyección del diodo láser, es decir, puede medir la distancia a un blanco en cualquier dirección.

4.3 Costos del sistema

Para el caso se decida vender el dispositivo en el mercado sería aproximadamente a un precio de US\$ 203.48 con el detalle que se muestra en la tabla 16.

Tabla 16: Costos del dispositivo

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TOTAL [US\$]
Diodo láser VLM-650002-LPA2	1	3.08
CCD ILX526A	1	15.00
ATmega16	1	7.40
Lente Convexo	1	50.00
LCD 16x2	1	3.00
Tarjetas Impresas	1	15.00
Componentes	-	10.00
Mano de Obra	1	100.00
		203.48

Fuente: Digikey (www.digikey.com)

Tener en cuenta que este costo es por unidad, si se lanzara al mercado en forma masiva estos costos disminuirán fuertemente.

En caso de vender la ingeniería asociada del sistema, sería de US\$. 5000.00

Conclusiones

A partir de la investigación, desarrollo e implementación del dispositivo a lo largo del documento, se puede concluir:

- A partir de lo investigado en el capítulo 2 y el capítulo 3, se determina que el método de la triangulación es el adecuado para el cumplimiento de los objetivos planteados.
- Se logró un rango de medición de 34 a 62 cm, que puede verse mejorado con el uso de un lente con las características correctas.
- Se obtuvo la resolución de 0.5cm y un porcentaje de error inferior al 5%.
- El CCD elegido para el diseño e implementación, así como el microcontrolador, cubrieron todas las necesidades de diseño para el cumplimiento de los objetivos.

Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda:

- Para poder cumplir con la distancia planteada originalmente, se recomienda adquirir el lente con la distancia focal correcta
- Para poder detectar mediciones con rangos más pequeños y aprovechar el dispositivo, utilizar instrumentación que permitan verificar mediciones en el orden de los micrómetros.
- Basta con cambiar ciertos parámetros dentro del diseño y el software, este dispositivo puede ser aplicado en muchos proyectos futuros, como los mencionados en el capítulo 1.

Además se recomienda tener las siguientes precauciones con respecto al uso del láser en exteriores e interiores:

- No apuntar directamente a una persona el haz de luz del diodo láser ya que puede causar inconvenientes a la piel y en caso de apuntar al ojo puede causar ceguera.
- Se recomienda no utilizar este dispositivo en ambientes con mucha luz, ya que puede modificar las mediciones. Se recomienda también hacer uso de un filtro de luz en la que deje pasar únicamente la longitud de onda del diodo láser (600nm).
- No apuntar a espejos o vidrios ya que éstos variarían la medición de la distancia.

Bibliografía

- [1] L. Bachs, J. Cuesta, N. C., Aplicaciones industriales del láser, *Marcombo, S.A.*, 1988
- [2] MARSHALL, S. L., Laser: Tecnología y aplicaciones, España, Editorial Reverté S.A., 1996
- [3] Paschotta, R., Encyclopedia of Laser Physics and Technology, 2008
- [4] Donati, Silvano, Electro-optical instrumentation : sensing and measuring with lasers, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2004
- [5] Janesick, James R., Scientific charge-coupled devices, Estados Unidos, SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001
- [6] Hecht, Eugene, Estados Unidos, Optics (4th ed.), Addison Wesley, 2002
- [7] Quarton Inc., “VLM-635-02 LPA / VLM-650-02 LPA” , 03/2012, <http://www.quarton.com/>
- [8] Newhaven Display Intl, “NHD-0220JZ-FSB-GBW-ND”, 03/2012, <http://www.newhavendisplay.com/>
- [9] Optrex Corporation, “Dot Matrix Character LCD Module User’s Manual”, 04/2012, <http://www.eng.uwo.ca/electrical/e-shop/data-sheets/LCD.pdf>
- [10] ATMEL, “ATMega16A”, 10/2011, <http://www.atmel.com>
- [11] ATMEL, “ATMega8A”, 10/2011, <http://www.atmel.com>
- [12] SONY, “ILX526A”, 08/2011, http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol07/pdf/ilx526.pdf
- [13] National Semiconductor, “LM2940/LM2940C 1A Low Dropout Regulator”, 11/2011, <http://www.national.com/>
- [14] D.J.R. Cristaldi, S. Pennisi, F. Pulvirenti, Liquid Crystal Display Drivers – Techniques and Circuits, Springer, 2009.
- [15] Energizer, “Energizer E91”, 05/2012, <http://www.energizer.com/>
- [16] Hantek, “DSO-2090 USB”, 08/2011, <http://www.hantek.com.cn/english>
- [17] Bermudez García, Javier, Investigación científica en el Perú: factor crítico de éxito para el desarrollo del país, 07/2012, <http://postgrado.upc.edu.pe/cuaderno-epg/contenido.asp?CON=4950&BOL=29&EJE=438&NSEC=192>