



Universidad  
de La Laguna

Escuela Superior de  
Ingeniería y Tecnología  
Sección de Ingeniería Informática

Trabajo de Fin de Grado

---

Telemetría Láser

*Laser Telemetry*

Luis Antonio Orta Méndez

---

La Laguna, 7 de julio de 2015

D. **Jonay Tomas Toledo Carrillo**, NIF 78.698.554-Y,  
Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ing.  
Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna,  
como tutor

**C E R T I F I C A (N)**

Que la presente memoria titulada:

*"Telemetría Láser."*

ha sido realizada bajo su dirección por D. **Luis Antonio Orta Méndez**, con N.I.F. 78.647.588-P.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 7 de julio de 2015.

## Agradecimientos

Agradecimientos especiales al mi tutor Jonay Toledo por toda la ayuda prestada con los temas de electrónica.

También a toda la gente que me ha prestado apoyo en los momentos más difíciles de la elaboración de este proyecto.

# Licencia



© Esta obra está bajo una licencia de  
Creative Commons Reconocimiento 4.0  
Internacional.

## Resumen

*El objetivo de este trabajo ha sido la construcción de un telémetro láser, un instrumento capaz de medir distancias mediante la proyección y captación del reflejo de un haz de luz.*

*Los modelos construidos se han basado en dos métodos de medición a los que se ha denominado "Desfase de Onda" y "Frecuencia de Conmutado".*

*En este Trabajo de Fin de Grado se tratarán detalladamente los pasos seguidos para el desarrollo del sistema electrónico usado como hardware del telémetro, sus componentes y funciones, además del software realizado para este sistema empotrado.*

*El procedimiento para medir distancias usando el método del Desfase de Onda consiste en configurar el láser de manera que emita una serie de pulsos con una frecuencia determinada. Esos pulsos se reflejarán en la superficie de destino e incidirán sobre un sensor lumínico, consiguiendo otra serie de pulsos, que coincidirán con la serie emitida, pero con un determinado desfase. Usando esa medida, es posible calcular la distancia, ya que son valores directamente proporcionales.*

*En el método de la Frecuencia de Conmutado el procedimiento hace que el láser genere luz siempre que el sensor no la esté recibiendo, y viceversa. De esta manera se consigue una señal en forma de onda cuadrada, con una determinada frecuencia. La frecuencia de esa onda depende directamente del tiempo que tarda el haz de láser en reflejarse en la superficie sobre la que se quiere medir, por lo que conseguimos una proporción directa entre estos dos valores.*

*Se ha desarrollado, también, un programa en Arduino, con el fin de utilizar un microcontrolador de esta misma distribución como unidad central de procesamiento.*

**Palabras clave:** Telemetro, Telemetría, Láser, Desfase, Onda, Frecuencia, Conmutado, Distancia, Arduino, Empotrado.

## Abstract

The goal of this project is the construction of a laser range finder, which is an instrument that has the ability of making distance measures by projecting a light beam and capturing its reflection.

Different models had been built using two different measuring methods that had been named "Phase Shift" and "Switching Frequency".

This final degree project will include all the details of the steps followed in the electronic design development which is used as the laser range finder's hardware, and it will define its components and functions, and also the software developed for controlling the results of this embedded system.

The procedure of making distance measures using Phase Shifting method consists in configuring the laser module in a way that it emits a series of pulses with a specific frequency. These pulses will reflect in the target area, and this reflection will be captured by a light sensor. The reflected wave has the same values that the original one, but it will have a shift value. Using that shift value, it is possible to get the distance value, due to the direct proportion between both values.

On the other hand, measurements using Switching Frequency method follows a different behavior. This method configures the laser module in a way that only will be on if the light sensor is not activated, and vice versa. Using this pattern, the system can produce a square signal with a specific frequency. That frequency's value depends directly from the distance of the target object, so it's possible to measure the distance value.

The software of this embedded system has been developed in an Arduino board, so the system uses this microcontroller as its processing center.

**Keywords:** Telemetry, Distance measuring, Laser, Phase Shift, Wave, Frequency, Switching, Distance, Arduino, Embedded.







# Índice General

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Utilidad de las medidas de distancia .....	1
1.3 Técnicas usuales de medida de distancia .....	2
<b>Capítulo 2. Telemetría Láser por Desfase de Onda</b>	<b>6</b>
2.1 Desfase de Onda .....	6
2.2 Procedimiento de Medición .....	7
2.3 Medida de desfase de onda matemáticamente .....	9
2.4 Primer diseño - Diseño Básico .....	9
2.4.1 Esquema físico .....	9
2.4.2 Resultados .....	10
2.5 Diseño 2 - Amplificación .....	11
2.5.1 Esquema físico .....	11
2.5.2 Resultados .....	12
2.6 Diseño 3 - Amplificación de láser con transistores	13
2.6.1 Esquema físico .....	13
2.6.2 Resultados .....	14
2.7 Descarte por inviabilidad del método .....	15
<b>Capítulo 3. Frecuencia de Conmutado</b>	<b>16</b>
3.1 Descripción del método .....	16
3.2 Ventajas respecto al Desfase de Onda .....	17
3.3 Diseño 1 - Diseño Básico con Inversor .....	18
3.3.1 Descripción .....	18
3.3.2 Funcionamiento .....	18
3.3.3 Conclusiones .....	19
3.4 Diseño 2 - Diseño definitivo .....	19
3.4.1 Descripción .....	19
3.4.2 Componentes .....	21
3.4.3 Funcionamiento general .....	29
3.5 Software .....	30
3.5.1 Lenguaje utilizado .....	30
3.5.2 Librería FreqCount .....	31
3.5.3 Medición de Frecuencias .....	32

3.5.4	Calibrado de medidas .....	32
3.5.5	Programa completo .....	34
3.5.6	Resultados .....	34
3.6	Posibles mejoras .....	35
3.6.1	Comparación dinámica respecto a la luz ambiente .....	36
3.6.2	Filtro de infrarrojos .....	37
3.6.3	Lente de enfoque al infinito.....	37
3.7	Imágenes del modelo construido .....	37
3.7.1	Módulo láser y sistema óptico.....	37
3.7.2	Alimentador de módulo láser.....	38
3.7.3	Circuito general .....	39
3.7.4	Arduino .....	39
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>42</b>
4.1	Conclusiones de desfase de onda .....	42
4.2	Conclusiones de frecuencia de conmutado .....	42
4.3	Conclusiones software .....	43
4.4	Futuras líneas de trabajo .....	43
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Summary and Conclusions</b>	<b>45</b>
5.1	Phase Shift conclusions .....	45
5.2	Switching Frequency conclusions .....	45
5.3	Software development conclusions .....	46
5.4	Future complementary work .....	46
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>47</b>
6.1	Presupuesto general .....	47
<b>Bibliografía</b>		<b>49</b>

# Índice de figuras

Figura 1.1. Ultrasonidos .....	3
Figura 1.2. Triangulación Láser .....	4
Figura 2.1. Onda sinusoidal base .....	6
Figura 2.2. Desfase de Onda .....	7
Figura 2.3. Salida de puerta XOR .....	8
Figura 2.4. Diseño Básico .....	10
Figura 2.5. Amplificación de fotodiodo .....	12
Figura 2.6. Amplificación de Láser .....	12
Figura 2.7. Amplificación por Emisor Común .....	13
Figura 2.8. Mosfet y driver de Mosfet .....	14
Figura 3.1. Secuencia de frecuencia de conmutado .....	17
Figura 3.2. Diseño básico con inversor .....	18
Figura 3.3. Diseño definitivo .....	20
Figura 3.4. Limitador de voltaje y corriente .....	23
Figura 3.5. Diagrama de rayos/Dispersión .....	23
Figura 3.6. Diagrama de rayos de una lente convergente .....	24
Figura 3.7. Distancia focal en función de la distancia al obstáculo .....	24
Figura 3.8. Divisor de voltaje .....	26
Figura 3.9. Activación con Mosfet .....	28
Figura 3.10. Distribución de los valores de frecuencia en función a la distancia .....	33
Figura 3.11. Comparador de luz ambiente dinámico .....	36
Figura 3.12. Foto de láser y óptica .....	38
Figura 3.13. Foto de alimentador de láser .....	38
Figura 3.14. Foto circuito general. ....	39
Figura 3.15. Foto Arduino .....	39

# Índice de tablas

Tabla 7.1. Tabla de presupuesto general. ....	47
---	----

# Capítulo 1.

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

La definición de telemetría abarca todas aquellas tecnologías que permitan realizar mediciones de magnitudes físicas de manera remota, con un posterior envío de la información calculada al usuario.

En este Trabajo de Fin de Grado, se realizará la construcción de un telémetro de distancias de propósito general, que pueda ser utilizado para diversas aplicaciones. Puesto que la distancia es una magnitud requerida normalmente para diversos cálculos, el telémetro resulta ser una herramienta versátil, ya que permite el uso de esta medida en multitud de campos.

El telémetro a construir, utilizará la emisión de láser como método para realizar las mediciones. El láser es uno de los sistemas más precisos dentro del ámbito que se desea abarcar en este proyecto, por lo que, en teoría, sería posible obtener medidas de precisión milimétrica.

Además, con un calibrado correcto, se pueden obtener mediciones a las velocidades que permita la electrónica, lo que permite poder hacer una cantidad amplia de mediciones diferentes en un tiempo reducido.

Por último, se intentará que los componentes utilizados sean de coste económico reducido, intentando lograr la máxima precisión y efectividad que se pueda conseguir con dichos artículos.

### 1.2 Utilidad de las medidas de distancia

Las medidas de distancia dinámicas tienen multitud de utilidades en distintas disciplinas de la ciencia en

general. Las utilidades más directas pueden ser las explicadas a continuación.

En el ámbito de la topografía permiten medir distancias concretas, áreas de superficies y volumen de un recinto. Además es posible utilizar medidas tomadas con un dispositivo de medición de distancias para la realización de mapas en dos o tres dimensiones de una porción de terreno concreta.

También es usado en detección de velocidades. Dada una diferencia de distancias en un tiempo fijo, es posible determinar la velocidad a la que se mueve un cuerpo. Los usos prácticos de este método derivan en radares o medidores de velocidad portátiles que controlan, por ejemplo, la rapidez de los vehículos en las carreteras.

En el ámbito de la robótica, el uso de medidores de distancia tiene usos de muchos tipos. Ejemplos concretos son: mapeo dinámico de un robot que se mueve automáticamente, comprobar la separación de varios robots en la robótica de enjambre, sistemas de frenado automático cuando se sitúe un obstáculo a cierta distancia de un vehículo y un largo etcétera.

Al ser la distancia una magnitud usada como parámetros en multitud de aspectos, es muy frecuente el uso de estos telémetros en casi cualquier aplicación que requiera este tipo de medición, ya que permiten medirla, como se ha dicho anteriormente, con bastante precisión y facilidad.

### **1.3 Técnicas usuales de medida de distancia**

En la telemetría de distancias, hay varios métodos de realizar las medidas, en función de la precisión que se requiera, o de las utilidades que se presenten como ventajas en cada uno de los sistemas.

En este apartado, se enumerarán los modelos más usados para realizar este cálculo, junto con sus ventajas e inconvenientes.

**Ultrasonidos:** Este método consiste en emitir una onda sonora al espacio entre el emisor y la superficie de destino. El reflejo de dicha onda en la superficie es captado por un receptor diseñado con ese propósito, de manera que, conociendo la velocidad del sonido y la diferencia de tiempo entre la emisión y la recepción, es posible calcular la distancia que separa los dos puntos, utilizando la definición de velocidad.

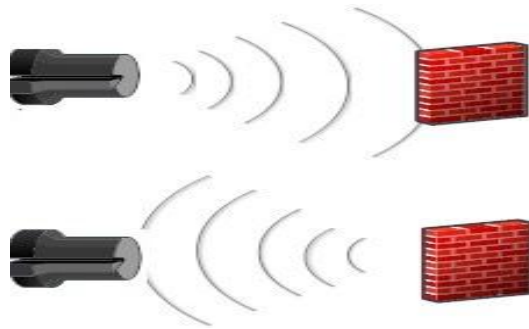


Figura 1.1. Ultrasonidos

El método de medir la diferencia de tiempo entre la emisión y la recepción recibe el nombre de "tiempo de vuelo" (TOF, Time of Flight), y es usado como base para la medida de distancias utilizando otros métodos.

Las ventajas que posee la medición por ultrasonidos, es que la onda emitida tiene una velocidad relativamente baja (unos 340 m/s), por lo que se puede tratar electrónicamente sin demasiados inconvenientes de cuellos de botella por parte de algún componente que no soporte altas frecuencias. Además permite cubrir distancias amplias. Sin embargo, poseen el inconveniente de no son capaces de determinar exactamente dónde se encuentra el obstáculo detectado, ya que la reflexión de la onda puede producirse en cualquier punto dentro de la expansión de la onda en el espacio.

**Láser por tiempo de vuelo:** Para evitar el problema de los ultrasonidos, la ciencia de la telemetría ha comenzado a usar láser. El láser por tiempo de vuelo, funciona exactamente igual que lo haría el ultrasonido, salvo porque la expansión en el espacio de la onda del láser es significativamente menor, por lo que es posible obtener el punto exacto del espacio dónde está ubicado el obstáculo detectado. Sin embargo, la velocidad de la luz del láser ( $3 \times 10^9$  m/s), es también significativamente

mayor que la del sonido, lo que da lugar a que la diferencia de tiempos entre la emisión y la recepción sean demasiado pequeños para ser detectados por componentes electrónicos.

Para eliminar estos inconvenientes, normalmente se utilizan métodos alternativos para realizar las mediciones, como la triangulación, el desfase de onda, o la frecuencia de conmutación.

**Láser por triangulación:** Este método utiliza comúnmente una fila de sensores alineados. Al emitir el haz de láser sobre la superficie de destino, el reflejo resultante activará unos determinados sensores, dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto. Para conseguir esto, es necesario que la fila de sensores esté en un determinado ángulo y alineado con el emisor de láser.

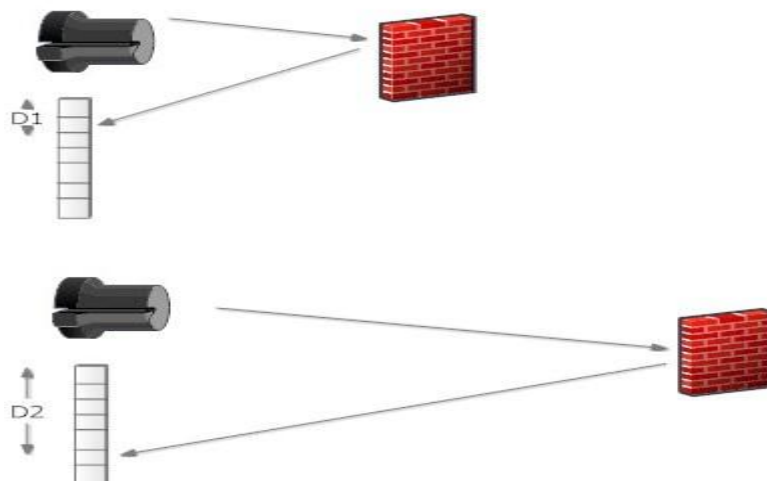


Figura 1.2. Triangulación Láser

La ventaja de este método es que no depende de la velocidad a la que viaje la onda emitida, ya que puede medirse simplemente detectando cual de los sensores está recibiendo el reflejo de la misma. El inconveniente principal deriva de la necesidad de colocar la fila de sensores formando un ángulo, ya que esto supone que el rango de distancias que se puede medir con este sistema es dependiente del mismo.

**Otros métodos:** Además de los sistemas descritos anteriormente, se pueden usar otros métodos para medir distancias, como son el **desfase de onda** o la **frecuencia**



**de conmutado**, que son los que se han utilizado a lo largo del proyecto, y que se explicarán en los capítulos siguientes de este informe.

# Capítulo 2.

## Telemetría Láser por Desfase de Onda

En el capítulo anterior se ha descrito lo que es la telemetría, la magnitud que se intentará medir durante el desarrollo de este proyecto (distancia) y los métodos usualmente utilizados.

En este capítulo se desarrollará el primero de los métodos: Desfase de Onda.

### 2.1 Desfase de Onda

El desfase de una onda se puede definir como la diferencia entre sus fases, es decir, el tiempo o ángulo que separa al mismo valor de dos ondas en distintos lugares del espacio.

Para explicar este concepto se define una onda sinusoidal, la cual se supone que será emitida por cualquier tipo generador de frecuencias asociado a algún tipo de sistema de telemetría.

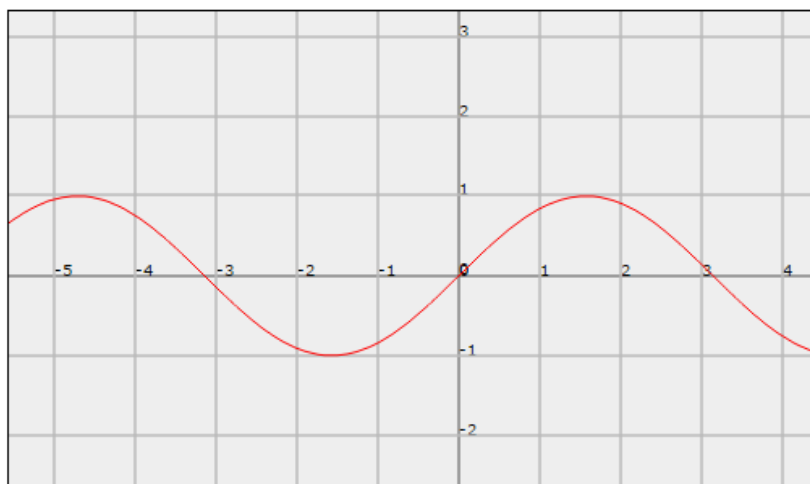


Figura 2.1. Onda sinusoidal base

Esta onda se propagará por el espacio de separación entre el emisor y un obstáculo situado a cierta distancia. Una vez esta serie de pulsos alcancen la superficie del objeto, se reflejarán en la misma, por lo que parte de este reflejo se propagará paralelamente al haz emitido. Este haz reflejado estará desplazado, con respecto a la onda original, en función de la distancia hasta el obstáculo.

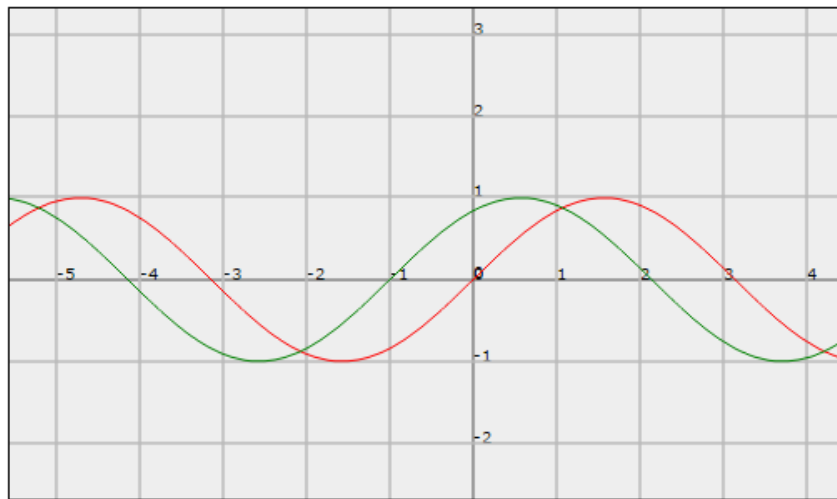


Figura 2.2. Desfase de Onda

Al igual que pasa con las ondas sinusoidales, se puede extender el modelo a las ondas cuadradas, de manera que puedan ser usadas con mayor facilidad en la implementación de sistemas digitales, puesto que la onda se refleja y se mide de forma más sencilla. Por esta razón, en el desarrollo de este proyecto se usarán ondas cuadradas.

## 2.2 Procedimiento de Medición

El procedimiento para medir distancias usando este método consiste en configurar el láser de manera que emita una serie de pulsos con una frecuencia determinada. Esos pulsos se reflejarán en la superficie de destino e incidirán sobre un sensor lumínico, consiguiendo otra serie de pulsos, que coincidirán con la serie emitida, pero con un determinado desfase.

Teniendo las dos ondas, es posible calcular el desfase obtenido, es decir, se obtiene un tiempo o ángulo.

Conociendo la velocidad de la luz, se puede calcular la distancia pertinente que recorre el haz de láser para conseguir el desfase obtenido.

Para medir el desfase, se usará una puerta XOR. Esta puerta tendrá como salida un valor binario 1 siempre que la onda de emisión y la de recepción no coincidan en sus valores. La tabla de verdad de la puerta XOR es la siguiente.

Entrada 1	Entrada 2	Salida
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Como se puede observar, el valor de salida de esta puerta lógica, será alta cuando una de las dos señales de entrada esté en alta, y la otra en baja. Si ambas están en alta o en baja, el valor de salida será en baja. De esta manera, calculando el ancho de la señal de salida en alta se puede identificar el tiempo de desfase, siendo esos dos valores directamente proporcionales.

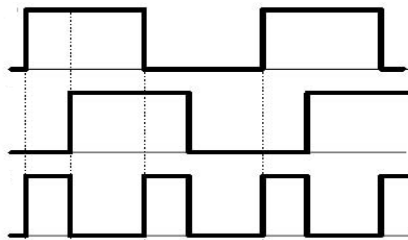


Figura 2.3. Salida de puerta XOR

La salida de la puerta XOR generará una PWM (Modulación por Ancho de Pulsos) en función de la distancia. Cuanto mayor sea el pulso de la PWM, mayor será la distancia asociada a la misma.

Para conseguir que esta PWM se comporte como una fuente de corriente continua conmutada, se usaría un transformador consistente en una bobina y un condensador, de manera que se convierte la señal PWM de alta frecuencia a una señal analógica de baja frecuencia que es posible medir con un microcontrolador.

Una vez teniendo una fuente de voltaje conmutada, esta será procesada por la unidad analógico-digital de un

microcontrolador Arduino Uno. Usando este procesador se transformará el valor analógico de la onda en un valor numérico de distancia. El cálculo consiste en la calibración mediante una tabla de valores que relacione el ancho del pulso en alta con la distancia pertinente, estimando, a partir de esta tabla, una ecuación matemática con la que se pueda calcular automáticamente el valor de distancia en función del ancho del pulso desde un programa en C ejecutado en el Arduino.

## **2.3 Medida de desfase de onda matemáticamente**

El desfase de una onda se puede medir matemáticamente en función de la distancia de reflexión ( $d$ ) y la frecuencia de la onda ( $f$ ) mediante la siguiente expresión, donde  $c$  es la velocidad de la luz:

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{2d}{c}$$

Como se puede observar, para una determinada distancia, siendo la velocidad de la luz constante, el desfase depende únicamente de la frecuencia de la onda emitida. En las pruebas que se han realizado durante el desarrollo de este proyecto, se han usado distancias de hasta 1 metro de longitud. Por tanto, para conseguir desfases perceptibles en los valores más pequeños de distancia (del orden de los pocos centímetros) es necesaria una frecuencia bastante alta. Se ha elegido que esa frecuencia sea de aproximadamente 10 MHz.

## **2.4 Primer diseño - Diseño Básico**

### **2.4.1 Esquema físico**

Se trata de un diseño inicial simple, con el que se pretende medir el rango de voltaje y frecuencia al que puede trabajar el sistema.

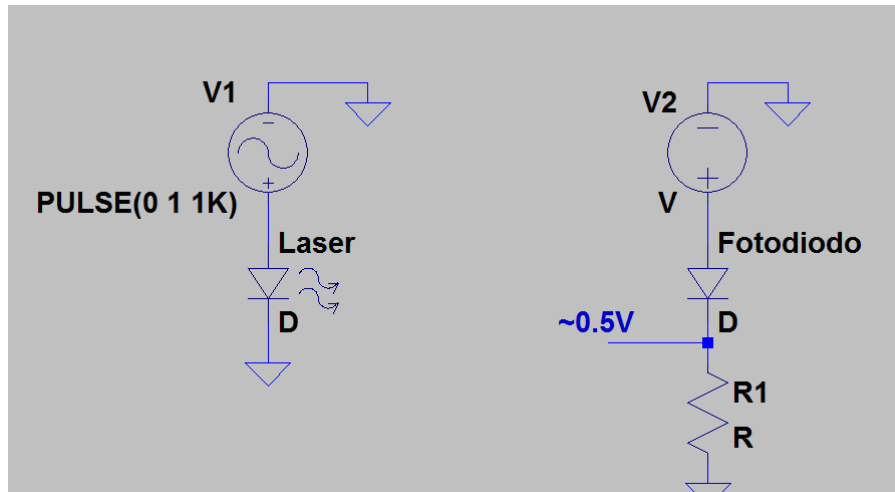


Figura 2.4. Diseño Básico

Se han utilizado, en primer lugar un puntero láser común y un fotodiodo BPW34 formando el circuito de la figura anterior. Usando estos componentes simples, se pretende medir la viabilidad del sistema.

Se conecta la alimentación del puntero láser a un generador de pulsos, con el fin de establecer una onda de emisión con un valor de frecuencia aproximado de 10 MHz.

El generador de pulsos HP 33120A es un dispositivo electrónico capaz de generar diversos tipos de onda, entre los que se incluyen las sinusoidales, cuadradas o triangulares. Es capaz de dotar a estas ondas de una amplitud definida entre 50 mVpp y 10 Vpp, y de una frecuencia desde unos pocos microhertzios hasta varios megahertzios (100  $\mu$ Hz - 15 MHz).

El fotodiodo se conecta a 5V y se toma como medida la salida del mismo.

Un fotodiodo es un componente que actúa como una célula fotovoltaica, es decir, genera una pequeña cantidad de corriente cuando hay una radiación lumínica incidiendo sobre su superficie.

### 2.4.2 Resultados

Se ha comprobado que tanto el puntero láser como el fotodiodo no soportan frecuencias de más de 1 MHz.

Dada esa frecuencia, el resultado obtenido han sido unas diferencias de desfases en función de la distancia que son demasiado pequeñas para ser perceptibles, debido a que la frecuencia de emisión es demasiado baja. Estas diferencias no pueden ser diferenciadas usando un medidor externo, en este caso, un osciloscopio.

Dado que 1MHz es una frecuencia insuficiente dados los 9 - 10 MHz que son necesarios para obtener medidas precisas, se ha hecho un cambio en los componentes utilizando un láser de grabadora de DVD y un fotodiodo con mejor capacidad de respuesta (PDB-C158-ND).

Con este cambio se ha incrementado la velocidad de conmutación de ambos componentes. Sin embargo, la amplitud de la onda emitida por el módulo láser es demasiado baja, debido a que el generador de funciones utilizado no es capaz de proporcionar la potencia suficiente, por lo que resulta casi indetectable para el fotodiodo.

## **2.5 Diseño 2 - Amplificación**

### **2.5.1 Esquema físico**

Con este diseño, se trata de solucionar el problema de la detección de la onda emitida por el módulo láser por parte del fotodiodo, mediante la técnica de la amplificación de voltaje, mejorando así la amplitud de la señal para que pueda excitar al sensor.

Se trata de un circuito con la misma base que el Diseño 1, pero añadiendo amplificadores a la entrada del láser para aumentar el voltaje (amplitud) de la señal, de manera que pueda ser detectada por el fotodiodo, solucionando así el problema del Diseño 1. También se añade un amplificador a la salida del fotodiodo, de manera que podamos conseguir una señal de salida con una amplitud en la que se pueda trabajar cómodamente.

En el caso del fotodiodo, se ha utilizado un amplificador operacional LF355N conectado como se especifica en la siguiente figura.

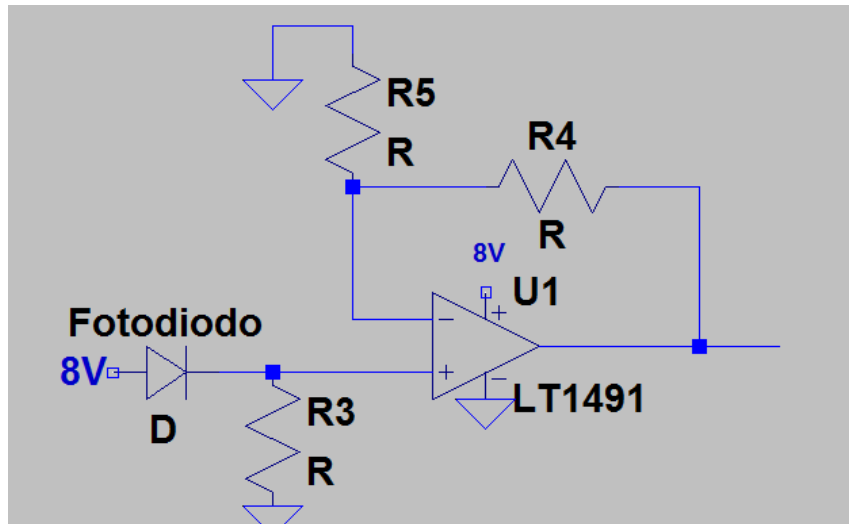


Figura 2.5. Amplificación de fotodiodo

Para el láser, se ha usado un transistor, cuyo colector estará conectado a la alimentación del circuito, de manera que se aumenta la intensidad de la señal emitida. El módulo láser se conecta en paralelo al emisor del transistor, como se muestra en la siguiente figura.

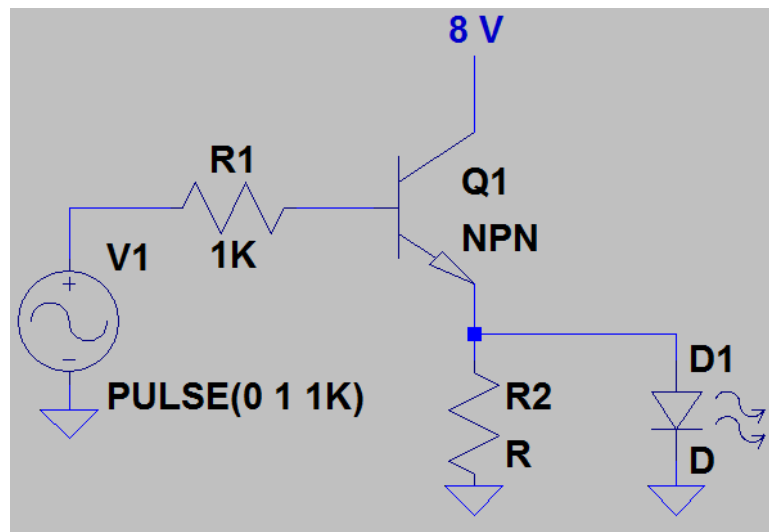


Figura 2.6. Amplificación de Láser

### 2.5.2 Resultados

En el caso de la salida del módulo láser, el resultado obtenido es la misma señal, pero desplazada en amplitud, lo que permite que sea detectada por el sensor, al ser la onda más intensa.



Se puede observar que la señal de salida del fotodiodo no es amplificada correctamente. Esto se debe a que el amplificador operacional no es lo suficientemente rápido para la frecuencia en la que se está trabajando. Se ha intentado solucionar este problema con el siguiente modelo (Diseño 3).

## 2.6 Diseño 3 - Amplificación de láser con transistores

### 2.6.1 Esquema físico

En este diseño se ha tratado de conseguir una amplificación de ambos componentes (láser y sensor) mediante componentes capaces de conmutar más rápido. Para el sensor se ha usado un modelo de circuito denominado amplificador en emisor común. Este circuito se suele utilizar para amplificar el voltaje de salida en frecuencias medias y altas. El esquema es el siguiente.

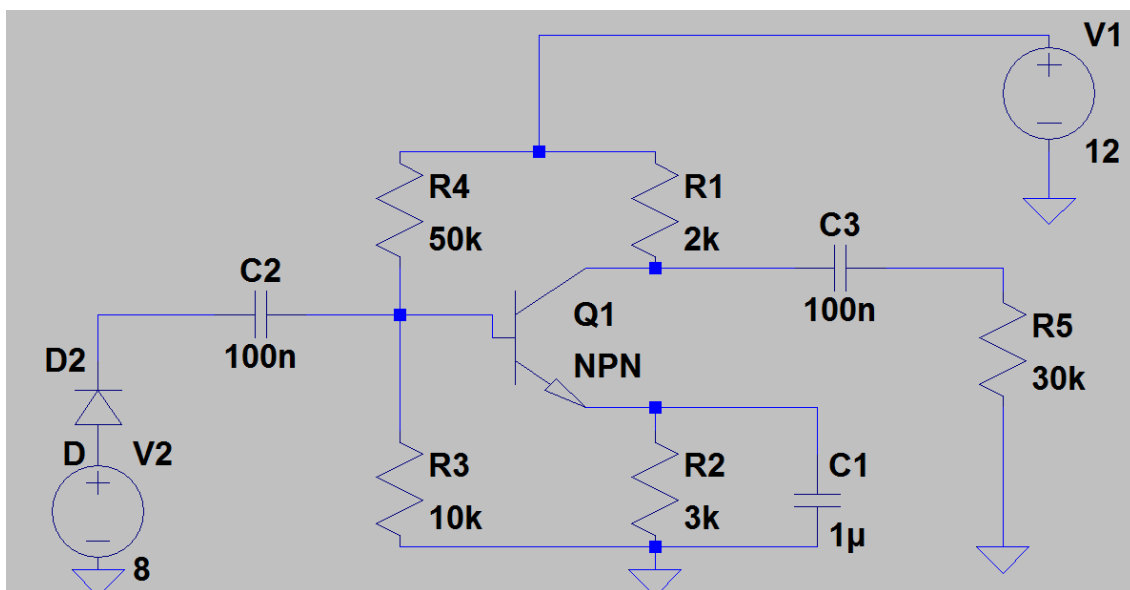


Figura 2.7. Amplificación por Emisor Común

En el caso del láser, se ha cambiado el transistor que había anteriormente por un transistor Mosfet. Un Mosfet es un transistor que no se activa por corriente, sino por voltaje. Este tipo de transistores muy utilizados en la fabricación de circuitos integrados debido a su gran velocidad de conmutación y su bajo consumo de corriente.

Para la utilización de este componente es necesario un controlador o driver de Mosfet. Puesto que este transistor es utilizado como un interruptor activado por la tensión en la compuerta o gate, se necesita saturar esa entrada. El voltaje de saturación de un Mosfet es de entre 7 y 20 voltios, sin embargo, se necesita una intensidad de pico alta, ya que este componente consume mucho al inicio, por lo que se usa este driver.

El modelo de driver de Mosfet utilizado es el MIC4451.

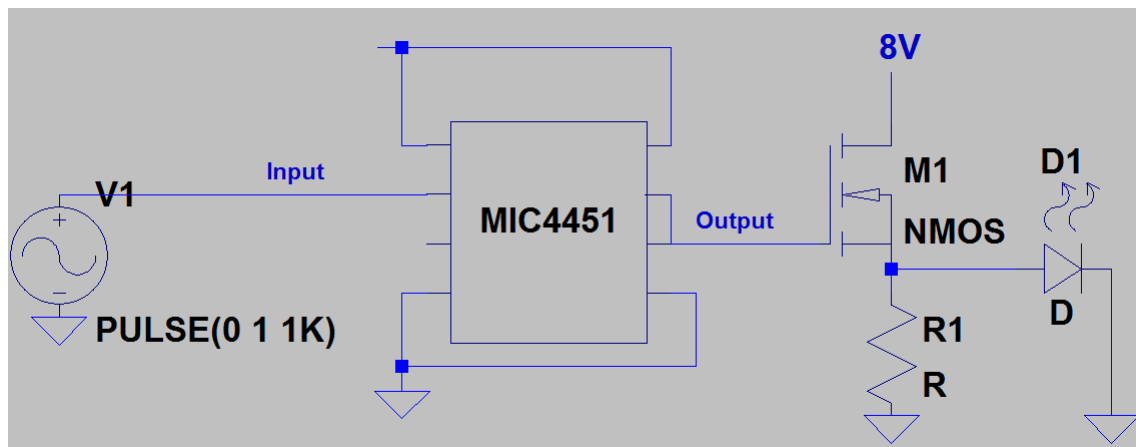


Figura 2.8. Mosfet y driver de Mosfet

Por último, se ha añadido un buffer no inversor en la salida del fotodiodo. Este componente se utiliza para estabilizar una señal con cierto ruido. El buffer tendrá como salida un valor binario de 1 si la señal de entrada tiene un valor por encima de un umbral determinado, y un 0 si está por debajo de ese umbral.

### 2.6.2 Resultados

Con este circuito se ha conseguido una señal estable y de amplitud detectable en ambos componentes.

Sin embargo con el aumento de la frecuencia, las señales tienden a disminuir en amplitud (voltaje), por lo que no es posible, dados los componentes disponibles, lograr una señal con voltaje detectable y de alta frecuencia, por lo que el desfase entre la onda de emisión y de recepción es imperceptible.

## **2.7 Descarte por inviabilidad del método**

Debido a los resultados obtenidos en las pruebas de los 3 diseños descritos anteriormente, se ha decidido clasificar este método como inviable con los equipos disponibles en el laboratorio, y por lo tanto descartarlo, por diversos motivos explicados a continuación.

El primer motivo para la toma de esta decisión, se basa en el los dispositivos construidos no son capaces de soportar altas frecuencias.

El generador de pulsos utilizado era capaz de generar las frecuencias requeridas, pero al ser la velocidad de conmutación tan alta, las ondas generaban una acumulación de ruido en altas frecuencias, lo cual dificultaba el trabajo de recepción de la onda emitida por parte del fotodiodo.

Además, las altas frecuencias, unido al ruido incluido en la señal emitida, también hacen difíciles las tareas de amplificación de cualquiera de las dos señales usando amplificadores operacionales, o incluso transistores.

Esto podría haberse solucionado usando componentes que lograran una mayor precisión o velocidad/frecuencia de conmutado, pero se ha descartado esta idea, dado que uno de los requisitos iniciales del proyecto consiste en construir el telémetro láser usando elementos de bajo coste, descripción que no cumplen esos componentes de altas características.

Por último, este sistema de telemetría requiere generador de ondas externo. Aun no siendo esta una razón de peso para descartar el sistema, sí que es una desventaja añadida para la portabilidad y el coste del sistema al completo.

Con estos argumentos, se ha descartado esta línea de trabajo y se ha profundizado en la técnica de la frecuencia de conmutado, que se explicará en el siguiente capítulo.

# Capítulo 3.

## Frecuencia de Conmutado

En este capítulo se describirá el método de medición por frecuencia de conmutado, los diseños realizados y la descripción de sus componentes, además del modelo definitivo funcional.

### 3.1 Descripción del método

El método de la frecuencia de conmutado consiste en la generación de una serie de pulsos cuya frecuencia varía en función de la distancia a medir. Esta serie de pulsos se crearán mediante la activación y el apagado del módulo láser con una determinada frecuencia. El método se explicará paso por paso a continuación.

En este circuito, el fotodiodo utilizado como sensor y el módulo láser no están en módulos independientes, como sucedía en el método del desfase de onda. En este caso, ambos componentes forman parte de un solo modelo, que comunica ambas partes.

Al igual que en el resto de modelos, el módulo láser emitirá una serie de pulsos que se reflejarán en una superficie. Este reflejo incidirá sobre un sensor lumínico.

El procedimiento hace que el láser genere luz (se active) siempre que el sensor no la esté recibiendo, y viceversa. Con este sistema, el sensor recibirá inicialmente radiación procedente del módulo láser, lo cual producirá una señal de apagado de ese módulo. Al apagarse la fuente de luz, el sensor no la estará recibiendo, por lo que se enviará una señal de encendido al módulo láser.

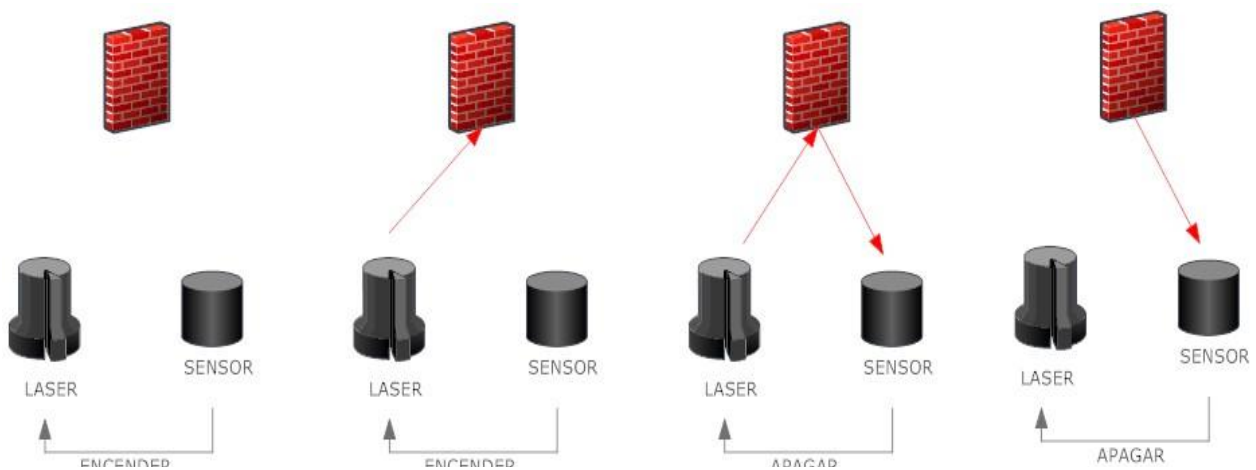


Figura 3.1. Secuencia de frecuencia de conmutado

Las dos acciones descritas anteriormente se repiten periódicamente. De esta manera se consigue una señal en forma de onda cuadrada, con una determinada frecuencia.

Como se puede observar, la frecuencia de encendido y apagado depende directamente de dos factores: el tiempo que tarda el haz de luz en reflejarse en la superficie de destino y excitar el fotodiodo, y el retardo producido por la electrónica al procesar la salida del sensor y enviar la señal de apagado o encendido correspondiente. Este último retardo es fijo, por lo que se obtiene una frecuencia con un valor directamente proporcional al valor de la distancia de separación entre el emisor de láser y la superficie reflectora.

### 3.2 Ventajas respecto al Desfase de Onda

Este método de telemetría soluciona dos de los inconvenientes que poseía el método del desfase de onda. En primer lugar, las frecuencias de trabajo son significativamente menores, por lo que se pueden usar componentes de bajo coste en la fabricación del telémetro. Esta disminución de la frecuencia se debe al retardo producido por la electrónica al enviar las señales de activación o desactivación al módulo láser.

Además, con este modelo no se requiere un generador de pulsos externo, ya que la frecuencia es generada a partir de la conmutación del sistema láser-sensor, reduciendo el tamaño físico del modelo y disminuyendo el coste de los componentes esenciales.

### 3.3 Diseño 1 - Diseño Básico con Inversor

#### 3.3.1 Descripción

Se trata de un diseño inicial, con el que tomar contacto con el método de la frecuencia de conmutado. Con este diseño se pretende encontrar las ventajas y las dificultades que este sistema presenta, además de realizar algunas pruebas con el fin de discernir los componentes electrónicos que mejor se adapten a las funciones necesarias para el telémetro.

Se ha construido un diseño sencillo, usando dos transistores y un inversor, o puerta NOT, además del fotodiodo y el módulo láser usado en el sistema anterior de desfase de onda.

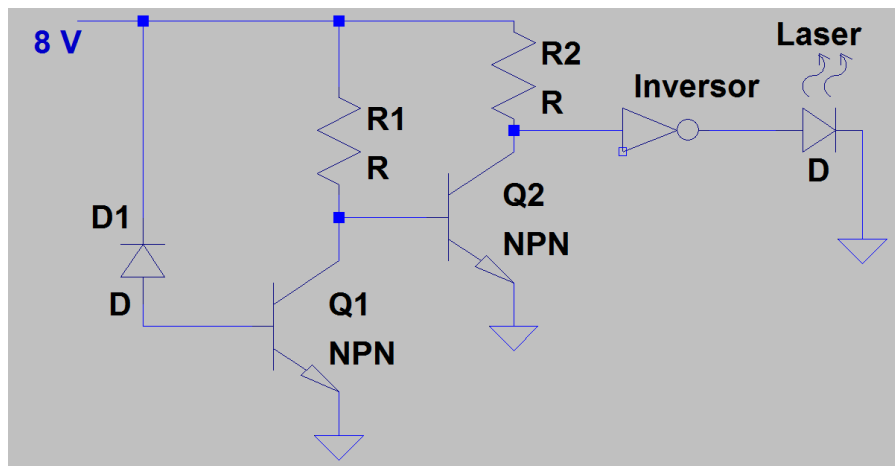


Figura 3.2. Diseño básico con inversor

#### 3.3.2 Funcionamiento

Como se ha explicado en el apartado anterior, el circuito conmutará debido a un apagado y encendido continuo del módulo láser y la incidencia a ráfagas del mismo en el sensor.

Para lograr que el láser se apague cuando el sensor recibe luz, y viceversa, es necesaria una puerta inversora, con el fin de generar el flanco contrario al que está recibiendo. La salida de este inversor estará

conectada al láser, que encenderá o apagará el LED correspondiente.

Sin embargo, la salida del fotodiodo es bastante débil, por lo que no es suficiente para activar el inversor. Para solucionar esto, al igual que se ha hecho anteriormente, se usarán transistores con el fin de amplificar la señal de de entrada al inversor.

### **3.3.3 Conclusiones**

El funcionamiento del sistema construido no da lugar a buenos resultados, ya que la señal resultante en la salida del fotodiodo es bastante ambigua. Esto desemboca a que la entrada del inversor no sea estable, y por tanto tenga una salida deformada, dando lugar a un comportamiento errático del sistema.

Sin embargo, con este circuito se han podido observar varios de los parámetros a tener en cuenta para la construcción de un modelo más fiable, como son las correcciones de la señal, el uso de una lente para converger los rayos reflejados, el uso de elementos de mayor facilidad de conmutación para activar o desactivar el módulo láser y el control de la luz ambiente.

## **3.4 Diseño 2 - Diseño definitivo**

### **3.4.1 Descripción**

Este es el modelo definitivo que se ha utilizado para construir el telémetro láser requerido en este proyecto. Se ha tratado de corregir los problemas ocasionados en los diseños anteriores, concretamente en el Diseño 1 de este capítulo. Además se ha tratado utilizar los mínimos componentes posibles, eliminando elementos que no aportaban ninguna función concreta y que habían estado presentes en modelos anteriores.

Por último, se ha tratado de hacer un sistema lo más claro posible, con módulos bien diferenciados y con una función específica.

Para solucionar el problema de la señal deformada que podía ocasionar problemas en el inversor, se ha usado un comparador. Al usar este componente, se evita tener que amplificar la salida del fototransistor, como se explicará en apartados anteriores, y es posible generar una señal en forma de onda cuadrada bastante estable.

También se ha usado un transistor tipo Mosfet como interruptor activado por voltaje para la activación del módulo láser.

Además, para evitar utilizar superficies reflectantes, como los espejos que se han usado para las pruebas del Diseño 1, se ha incluido un sistema óptico que pueda concentrar los haces reflejados por una superficie menos reflectante de objetos convencionales.

El diseño final es el siguiente:

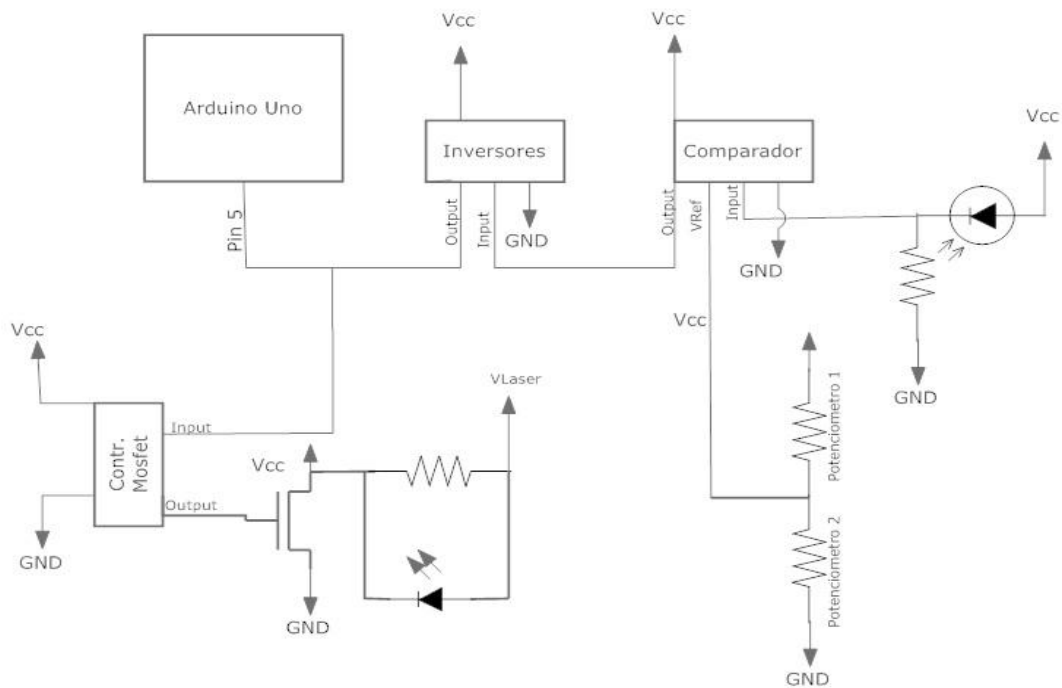


Figura 3.3. Diseño definitivo

A continuación, en el siguiente apartado, se describirá cada uno de los componentes y la función concreta que toman en este diseño.



### **3.4.2 Componentes**

#### **Sensor/Fototransistor infrarrojo**

Se trata de un componente que funciona como un transistor normal, salvo porque la base del mismo puede activarse mediante cierta cantidad de luz. Se usa como sensor que detectará la incidencia de láser en la entrada del circuito.

Se ha sustituido el fotodiodo por este componente, debido a su mayor capacidad de respuesta y su mayor sensibilidad a la radiación lo que lo hace más adecuado para detectar un haz reflejado en una superficie poco reflectante.

Este componente ha sido elegido entre los que poseen la propiedad de ser más sensibles en la longitud de onda del espectro infrarrojo, puesto que, además de ser los más comunes, la radiación infrarroja del láser es menos dañina a la vista humana que la luz roja de este mismo componente. Además, existe menos radiación infrarroja en el espectro de luz ambiente, por lo que el ruido en la señal será menor.

Se han probado diferentes modelos de fototransistor entre ellos el TEPT5600, TEPT4400, TEPT5700 y TSL13SM.

Al final se ha optado por utilizar el modelo TSL13SM debido a posee un amplificador de voltaje integrado, por lo que proporciona una señal de salida más potente y por tanto, más útil a la hora de proporcionar esta salida a otros componentes.

#### **Módulo láser grabadora de CD/DVD:**

El módulo usado para la fuente emisora de láser ha sido el componente correspondiente de una grabadora de CD/DVD convencional.

Este tipo de módulos posee dos tipos de láser: uno con longitud de onda correspondiente al infrarrojo usado para la grabación y lectura de CD y uno con longitud de onda visible roja, que es usada para la misma función en DVD.

En un principio se ha usado láser visible de color rojo, correspondiente a la grabadora de DVD, pero, debido al resultado de algunas pruebas, se decidió optar por el

infrarrojo por tres razones: el fototransistor tiene mayor sensibilidad en esa longitud de onda, es menos dañino a la vista humana y la radiación infrarroja de la luz ambiente es menor, por lo que habrá menos ruido en la señal.

Sin embargo, al ser complicado ajustar el impacto de la radiación láser en el sensor con luz infrarroja (ya que no es visible), se ha decidido usar también el láser rojo. Con este láser se apuntará a la superficie que se desee y de esta manera se puede conocer el punto de incidencia del láser y el punto de concentración de los rayos convergentes por el sistema óptico. Por lo tanto, se puede saber donde se está midiendo, y donde colocar el sensor.

Para hacer esto, se ha utilizado un conmutador de tres posiciones, las cuales corresponden cada una a la alimentación de uno de los dos diodos láser del módulo, y uno más que corresponde a una alimentación general. Al cambiar de posición el activador mecánico del conmutador, se puede conectar la alimentación general a la alimentación particular de cada uno de los diodos láser. De esta manera es posible alternar entre luz infrarroja o visible roja a voluntad.

### **Alimentador de Láser**

Puesto que los módulos láser de grabadoras de CD/DVD son dispositivos bastante delicados, requieren un voltaje y una corriente concreta y sin picos que puedan dañarlo.

Durante todo el desarrollo de la construcción del telémetro, varios módulos láser resultaron dañados por este motivo, por lo que al final se ha decidido construir un alimentador con regulador específico para ellos, consistente en dos limitadores, que concretaban la potencia máxima que podía llegar al módulo láser.

Los componentes usados son el LM7805, un regulador que limita el voltaje de salida a 5 voltios, y el LM317, que se usará como limitador de corriente.

Los dos elementos estarán conectados en serie, de manera que el voltaje máximo sea de 5V y el valor de corriente

máximo sea 0.1 A (valores a los que puede trabajar el módulo láser sin sobrecalentarse o dañarse).

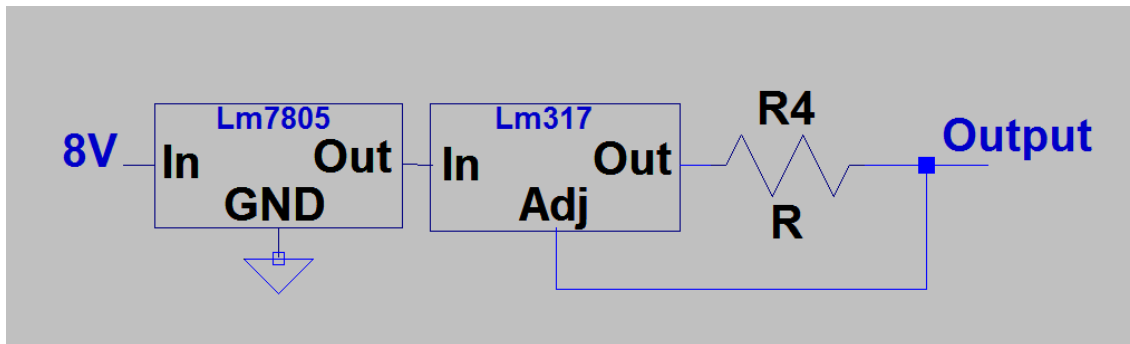


Figura 3.4. Limitador de voltaje y corriente

### Sistema óptico

Cuando el haz de láser, emitido por el módulo descrito anteriormente, incide sobre una superficie poco reflectante, como puede ser una pared o cualquier otro objeto convencional, el haz se divide en varios haces menos potentes, que se dispersan en todas direcciones.

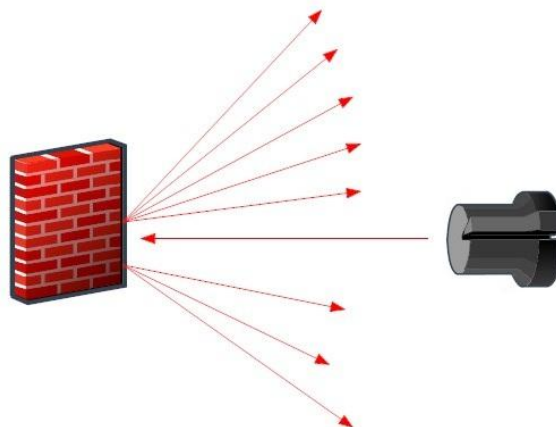


Figura 3.5. Diagrama de rayos/Dispersión

El haz dividido que puede incidir en sobre la parte sensible del fototransistor usado como sensor tiene una potencia significativamente más baja que el haz inicial, lo cual no es suficiente para excitarlo.

Para solucionar esto se ha construido un sistema óptico consistente en dos componentes: una lente convergente y un sistema de enfoque.

Con la lente convergente se consigue captar una cantidad mayor de rayos reflejados, debido a su mayor superficie. Estos rayos se concentran en un solo haz en un punto

denominado foco. En este foco será donde estará situado la zona sensible a la luz del fototransistor, de manera que uniendo la potencia de cada uno de los haces concentrados, se pueda excitar el sensor.

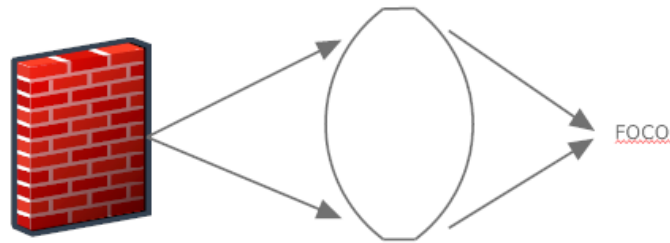


Figura 3.6. Diagrama de rayos de una lente convergente

Sin embargo, el foco de una lente no es un punto fijo, puesto que varía en función de la distancia al objeto que refleja la radiación. Esto puede resultar un problema, ya que el sensor no puede colocarse en un punto fijo del sistema óptico.

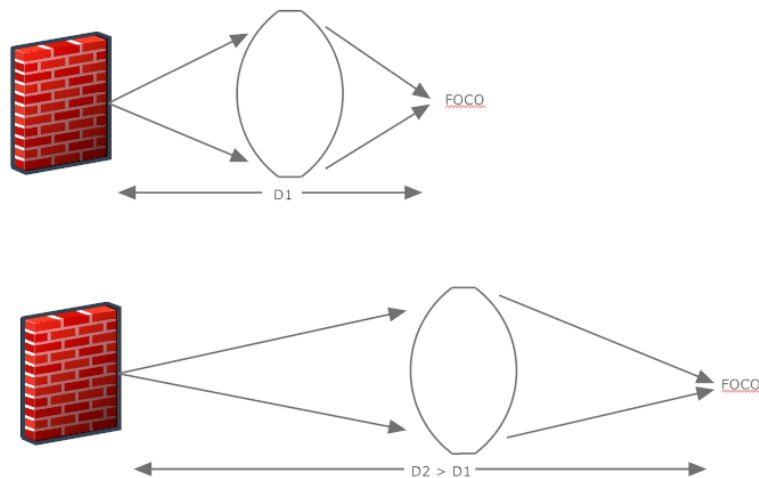


Figura 3.7. Distancia focal en función de la distancia al obstáculo

Al acto de colocar el sensor en la posición del espacio donde se encuentra el foco, se denominará enfoque. Para construir un sistema de enfoque para el telémetro, simplemente se ha elaborado una superficie plana, perpendicular al foco. En esta superficie se coloca el fototransistor, conectado al resto del circuito. La superficie estará sujeta a un sistema de raíles con los que se puede ajustar la distancia del sensor con respecto a la lente. De esta manera, se puede colocar el sensor en

la zona espacial donde se encuentra el foco en un determinado momento, de forma manual.

### **Comparador**

A la hora de recibir la radiación reflejada del láser en el sensor, después de ser concentrada por el sistema óptico, el circuito debe poder conocer si la radiación que está recibiendo pertenece al reflejo del láser o si se trata de luz ambiente. Para esta función se ha usado un comparador.

Se denomina comparador a un amplificador operacional conectado de tal manera que no existe realimentación entre su entrada y su salida.

Este componente es capaz de devolver un valor binario, con un valor de voltaje equivalente a su valor de alimentación (8 voltios en este caso) o el correspondiente a 0 voltios, en función de una entrada de voltaje variable. Para esto posee una entrada para un voltaje fijo de referencia. Por tanto, el comparador tendrá como salida 8V, en el caso de que la entrada de voltaje sea superior al voltaje de referencia, y 0V en caso contrario.

Si se ajusta el voltaje de referencia al nivel de voltaje que genera el sensor con la luminosidad ambiente, los valores que queden por encima del mismo serán los procedentes del láser (1 binario) y los demás no (0 binario).

Se ha usado el modelo LM393N.

### **Divisor de voltaje con potenciómetros**

Dado que la luz ambiente no tiene un valor fijo, es posible ajustar los valores de referencia del comparador mediante dos potenciómetros, que son resistencias variables mecánicamente.

Con los dos potenciómetros se ha construido un circuito denominado divisor de voltaje o de tensión. Se trata de un modelo capaz de repartir el voltaje de entrada del

mismo entre dos resistencias conectadas en serie, con lo que consigue una salida de voltaje menor que la de entrada.

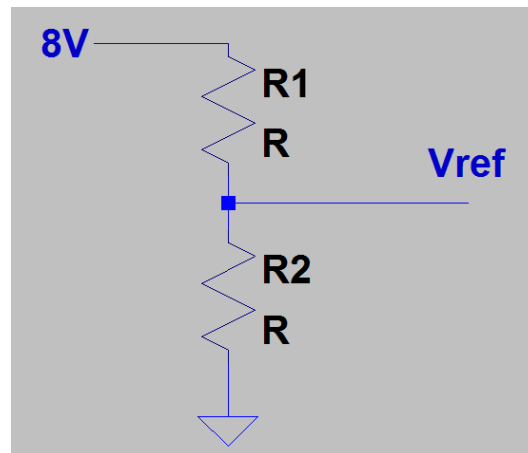


Figura 3.8. Divisor de voltaje

El voltaje de salida se corresponde con la siguiente expresión, siendo R1 y R2 el valor de las resistencias en serie:

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot V_{in}$$

Usando potenciómetros, los valores de R1 y R2 pueden variar, dando lugar a un voltaje de salida diferente. De esta manera se puede ajustar el valor del voltaje de referencia del comparador descrito en el apartado anterior, en función de la intensidad de la luz ambiente.

### **Inversores**

Puesto que se necesita desactivar el módulo láser cuando haya luz incidente en el fototransistor, y las señales que se generan en el interior del circuito en ese momento están todas en alta (8V), es necesario colocar una puerta NOT en el circuito.

Con esta puerta, la señal se invierte y pasa de estar en alta a estar en baja (0V), lo cual desencadenaría el apagado del módulo láser.

Estas puertas también actúan como un corrector de la señal, haciendo que la onda cuadrada esté mejor definida en la salida de la misma, que en su entrada

(correspondiente a la salida del comparador). Por ello, se usa la salida de la puerta NOT como punto de referencia para obtener la señal final desde la cual se medirá la frecuencia para calcular el valor de distancia. Esta salida estará conectada, por tanto, a un microcontrolador Arduino Uno, que se encargará de realizar dicha conversión.

Además, el uso de puertas lógicas genera un retardo electrónico, que es útil para tener una señal de baja frecuencia y de fácil manipulación.

### **Mosfet**

Al igual que se ha usado en el método del desfase de ondas, también se utilizará un transistor tipo Mosfet a modo de interruptor accionado por voltaje, que se encarga del encendido y apagado del módulo láser. Este transistor tiene su compuerta o gate conectada a la salida de la puerta inversora, por lo que habrá tránsito de corriente entre el surtidor y el drenador cuando la salida de la misma tenga un valor binario de 1, es decir, cuando no exista una incidencia de luz en el sensor.

La toma de alimentación negativa o tierra del sistema de alimentación del módulo láser está conectada directamente al surtidor del transistor, lo que conlleva a que haya 8V en la conexión de voltaje negativa del LED láser y 5V en la toma positiva, generando un apagado del láser cuando el sensor recibe luz. Asimismo, cuando el sensor no recibe luz, el transistor estará activado, por lo que habrá 0V en el surtidor (y por tanto en la toma de voltaje negativo del LED) y 5V en la toma positiva, lo que conlleva a un encendido del láser.

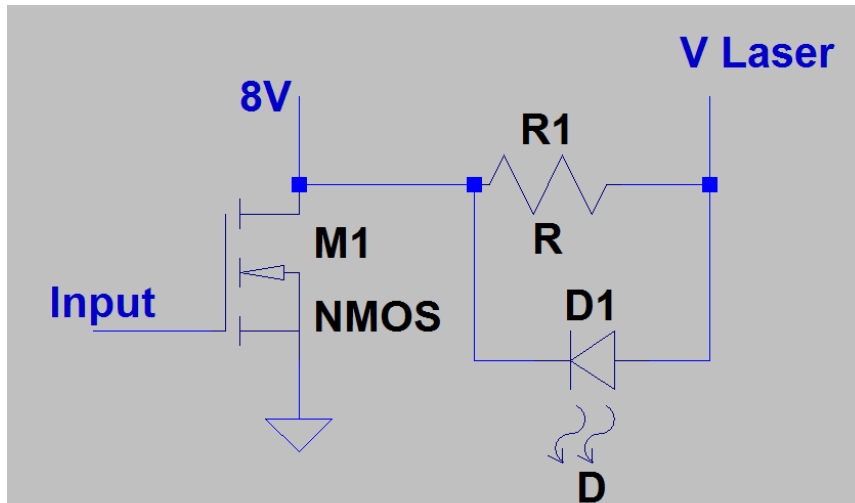


Figura 3.9. Activación con Mosfet

### Arduino UNO

Para convertir la señal binaria procedente del circuito a un valor numérico de distancia, se usa un microcontrolador Arduino Uno.

Arduino Uno es un microcontrolador open source de bajo coste y fácil programación, basado en el procesador ATmega328.

Tiene 14 pines digitales y 6 analógicos, memoria flash de 32KB, SRAM de 2KB y EEPROM de 1KB, además de un reloj capaz de alcanzar los 16 MHz.

Este microcontrolador estará alimentado desde su conexión USB, ya que, además, se va a usar la línea serial del mismo para comunicar la placa Arduino con un ordenador. También se usará la conexión del pin 5 de la misma, donde estará conectada la salida del circuito construido, y que será el parámetro de entrada del programa del controlador.

En el apartado de Software, se explicará en profundidad como se ha hecho la transformación y los cálculos dentro de la Arduino.



### 3.4.3 Funcionamiento general

Una vez explicados los componentes que forman parte de este telémetro, su funcionamiento particular y sus características, es posible explicar el funcionamiento del sistema de un modo general.

Supongamos una situación inicial en la que el sensor no detecte ninguna incidencia de luz en su zona sensible.

Esto producirá que el fototransistor, usado con este fin, no produzca ninguna señal, es decir, la línea de entrada estará a una tensión de 0V. En un caso práctico, esta línea no estará a 0V, sino a unos pocos milivoltios, correspondientes a la incidencia de luz ambiente.

Puesto que, con la luz ambiente, la señal del fototransistor puede dar problemas, se usa el comparador para filtrar la radiación ambiente, de la radiación del láser. En el caso que se está desarrollando, el comparador tendrá un valor de voltaje de entrada menor que su umbral de referencia, por lo que su salida será de 0V.

Acto seguido esos 0V pasarán a ser 8V tras pasar por la puerta inversora.

La salida del inversor estará conectada a la compuerta o gate del transistor tipo Mosfet, lo cual hará que el transistor se active, dejando 0V en el surtidor, donde está conectada la tierra del LED láser.

Puesto que la tierra vale 0V y la alimentación (Vcc) del láser es siempre de 5V, el láser tendrá una corriente a favor del diodo, por lo que se encenderá, haciendo incidir luz sobre el sensor que inició el procedimiento.

El funcionamiento cuando el sensor recibe luz es exactamente igual que en el caso descrito hasta ahora, salvo que los valores de voltaje estarán invertidos. Una vez termine el segundo procedimiento, el sensor volverá a estar sin excitar, por lo que se vuelve a repetir el primero. Esto genera un funcionamiento cíclico, que creará la frecuencia de encendido y apagado del láser y permitirá medir distancias en función de ella.

## 3.5 Software

### 3.5.1 Lenguaje utilizado

El lenguaje utilizado es el propio de Arduino. Este lenguaje tiene su base en Wiring, un lenguaje de programación open source, diseñado como un framework para la programación de microcontroladores.

El lenguaje Arduino es una versión de C/C++ simplificada con el fin de ahorrar en potencia computacional y memoria, evitando cargar componentes innecesarios que puedan ralentizar el funcionamiento de los programas, y los sistemas que dependan de ellos.

Además, se incluyen funcionalidades que permiten acceder directamente a muchos de los módulos de la placa, como los pines, los temporizadores, las memorias y demás componentes.

Para programar la placa, se utiliza el entorno de programación Arduino IDE que está basado en Processing, una herramienta de programación diseñada en Java. Este entorno engloba todas las funciones necesarias para hacer funcionar el microcontrolador como validaciones y compilaciones del código, y el cargado del mismo en la placa. Además también tiene herramientas útiles durante la ejecución, como un monitor serial, que se usará en este proyecto para visualizar los resultados de frecuencias y distancias.

La programación en Arduino se estructura en dos zonas diferenciadas: el método `setup()` y el método `loop()`. En `setup()` se escribe el código que está preparado para ejecutarse al principio de la ejecución. Este código sólo se procesará una vez.

El `loop()` se desarrolla el bucle principal del software del sistema empotrado. El código que está dentro de esta función se repetirá indefinidamente, hasta que el microcontrolador sea reiniciado o apagado.

### 3.5.2 Librería FreqCount

En Arduino existen multitud de librerías que se usan para tener un acceso sencillo a algunos de sus componentes.

En el desarrollo del software del telémetro, se ha usado la librería FreqCount.h. Esta librería es capaz de medir la frecuencia de una señal en un pin específico, contando los pulsos que tiene la señal en un tiempo especificado.

FreqCount tiene el inconveniente de que debe ser utilizado con un pin específico que depende exclusivamente del modelo de Arduino que se esté utilizando, puesto que cada placa posee hardware específico para realizar este conteo en una zona distinta. En el caso de Arduino Uno, el pin utilizado es el pin número 5.

Internamente, FreqCount utiliza un temporizador para controlar el intervalo de tiempo de las medidas, por lo que se debe tener cuidado de no tener otras interrupciones que puedan causar retardos en este temporizador, puesto que las medidas no serían del todo precisas.

La librería proporciona unas funciones que se utilizarán en el desarrollo del software del telémetro:

**FreqCount.begin(int GateInterval) :** Se trata del inicializador de la clase, al que se le pasa por parámetro el intervalo en el que se cuentan las oscilaciones de la señal.

**FreqCount.available() :** Devuelve un booleano que indica si existe una medida disponible o no.

**FreqCount.read() :** Devuelve la medida almacenada en el buffer. Puesto que sólo puede haber una medida almacenada en el buffer al mismo tiempo, la librería no tomará ninguna otra medida hasta que la anterior sea leída con este método.

**FreqCount.end() :** Detiene el conteo de frecuencias.

En el siguiente apartado se desarrollará una explicación práctica de estas funciones en el software programado para el telémetro.

### **3.5.3 Medición de Frecuencias**

Para medir las frecuencias de las señales proporcionadas por el circuito electrónico, se usará la librería FreqCount.h descrita anteriormente. Para utilizarla es necesario incluir la librería en el proyecto de programación.

Usando el método begin(int) de la librería en el método setup de la arduino, se inicializa un cálculo de frecuencia de la señal detectada en el pin 5. Este método funciona con un parámetro en milisegundos, que comprueba cuantas oscilaciones se producen en ese número de milisegundos. Se usará el parámetro de 1000 milisegundos, de manera que se obtenga un valor en hercios directamente, sin hacer ninguna conversión.

Una vez inicializado el contador de oscilaciones, en el método loop, se comprobará si hay una medida disponible con el método available(). Si la hay, se pasará a leer su valor con el método read() y a realizar la transformación de un valor de frecuencia a un valor de distancia, siempre que la frecuencia medida sea mayor que 0 (lo cual indica que no se está midiendo ninguna distancia).

### **3.5.4 Calibrado de medidas**

Para realizar la transformación de medidas de frecuencia a valores de distancia, se ha hecho uso de una calibración manual.

El procedimiento consiste en observar y registrar los valores de frecuencia correspondientes a cada uno de los valores de distancia. Los resultados se dispondrán en una tabla con la que se puede realizar una gráfica.

Para realizar esta calibración, se ha usado el programa Microsoft Office Excel 2007. En esta aplicación, se han introducido los valores en una hoja de cálculo y se ha realizado una gráfica de la distribución de los mismos. Mediante la herramienta "Mostrar línea de tendencia" se puede ajustar la gráfica obtenida a una función

polinómica, exponencial, logarítmica y otras distribuciones. Además, esta herramienta también muestra la expresión matemática de la función, por lo que se puede utilizar en el código para la transformación de frecuencias a distancias.

El calibrado depende de las condiciones de luz ambiente, puesto que no se puede modificar el umbral de referencia de luz (en el comparador situado en el circuito electrónico) de manera dinámica.

Las pruebas realizadas en completa oscuridad ambiente, dieron como resultado la siguiente expresión, usando una estimación polinómica de primer grado, es decir, una recta.

La siguiente gráfica corresponde a la relación entre la distancia en centímetros (eje vertical) y el valor de frecuencia en Hercios (eje horizontal).

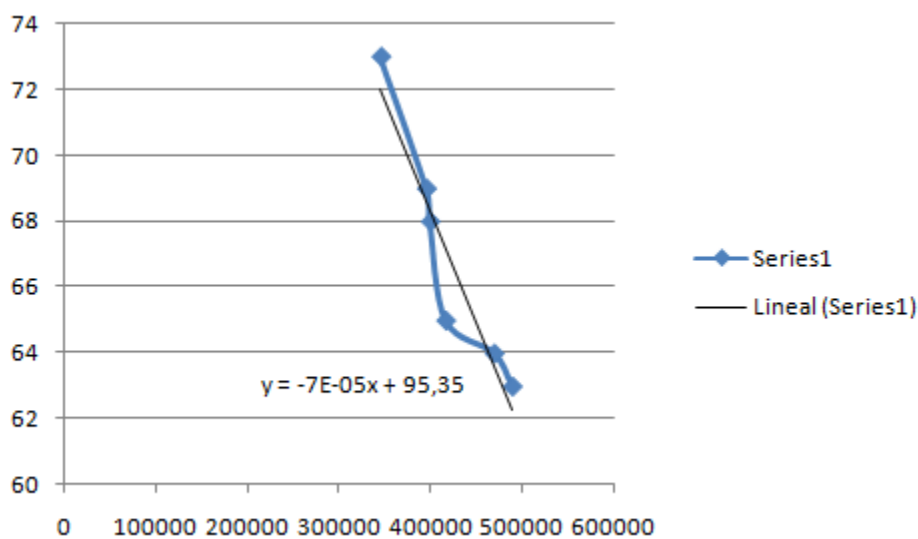


Figura 3.10. Distribución de los valores de frecuencia en función a la distancia

$$7 \times 10^{-6} \times \text{Frecuencia} + 95.35$$

### 3.5.5 Programa completo

```
#include <FreqCount.h>

void setup() {
  Serial.begin(57600);
  FreqCount.begin(1000); //Solo funciona en PIN 5 (Arduino UNO)
}

void loop() {
  if (FreqCount.available()) {
    unsigned long frecuencia = FreqCount.read();
    if(frecuencia != 0){
      float distancia = -0.00007 * frecuencia + 95.35;
      Serial.println(distancia);
    }
    else
      Serial.println("No detectado");
  }
}
```

### 3.5.6 Resultados

Los resultados obtenidos con este telémetro láser han sido bastante satisfactorios. Sin embargo, se deben comentar varias de las conclusiones observadas.

En primer lugar, se puede observar que los resultados obtenidos tienen una precisión centimétrica. La precisión de los resultados depende directamente de la calidad de la señal proporcionada por el circuito electrónico, y de la precisión del método elegido para realizar la calibración. Dado que la primera de las condiciones es prácticamente fija, la precisión del telémetro construido depende casi únicamente por el calibrado.

Al haber utilizado una estimación en forma lineal, existen valores que no se ajusten del todo a esta recta, aunque sea una de las estimaciones que mejor se ajusten. Mediante un ajuste punto por punto de los valores obtenidos durante la realización de este calibrado, se podría haber obtenido una precisión mínimamente más ajustada. Sin embargo, los resultados obtenidos con el ajuste lineal resultaron satisfactorios, por lo que no se realizó mayor ajuste.

El siguiente punto a comentar es el rango de distancias que es posible medir con el sistema. El telémetro construido puede llegar a medir rangos de aproximadamente 30 centímetros. Los límites del rango dependen exclusivamente del ángulo que forman el haz de láser y el centro de la lente del sistema óptico. Por tanto, si se reduce el ángulo (se mueve el láser hacia la alineación paralela con la lente) es posible medir rangos cuyo límite inferior esté a mayor distancia, y si se aumenta el ángulo, a menor distancia.

La distancia mínima que es capaz de medir el telémetro es de aproximadamente 60 centímetros. La distancia mínima depende únicamente del sistema óptico. En función de la longitud del sistema de enfoque, la distancia mínima variará proporcionalmente. La distancia máxima es de 90 centímetros (usando como base la medida mínima, que es de 60). Como ya se ha dicho, los máximos pueden variar en función del ángulo del haz de láser con respecto al centro de la lente.

El siguiente parámetro a considerar es la repetitividad de la medida, es decir, si para una misma medida se obtienen siempre los mismos resultados. En el telémetro construido, las medidas suelen tener una buena repetitividad con una luz ambiente fija. En las pruebas realizadas con ausencia total de luz ambiente, los resultados oscilan unas décimas (medidas en centímetros). Si se añade luz ambiente, la oscilación de valores puede llegar a varios centímetros, en función de la intensidad de la misma.

En general, el telémetro construido usando este esquema tiene un buen funcionamiento en cuanto a precisión teniendo en cuenta los componentes de bajo coste que se han usado y el tiempo de desarrollo, por lo que se ha decidido que éste fuera el diseño final del mismo en este proyecto.

### **3.6 Posibles mejoras**

Existen posibles mejoras que se pueden implementar en el sistema del telémetro, que no pudieron implementarse por

escasez de tiempo. Por este motivo, se explicará teóricamente en qué consisten estas modificaciones, con el fin de que esta memoria esté lo más completa posible.

### 3.6.1 Comparación dinámica respecto a la luz ambiente

Como se ha explicado anteriormente, el nivel de luz ambiente puede llegar a interferir en la fiabilidad de las medidas del telémetro. Es posible cambiar el umbral de detección de esa luz ambiente mediante el divisor de voltaje, variando mecánicamente el valor de resistencia de los potenciómetros.

Sin embargo, este proceso resulta tedioso, pues habría que comprobar en cada momento el nivel de luz y ajustar las resistencias con cada cambio de radiación ambiental. Por este motivo, se ha ideado un sistema de cambio del umbral de manera dinámica. Este circuito consta de un condensador para integrar los valores de la señal en cada momento y obtener un valor medio, y un divisor de voltaje como el que estaba conectado anteriormente. Todo esto estará conectado a la salida del sensor, de manera que se pueda obtener el valor de luz en todo momento.

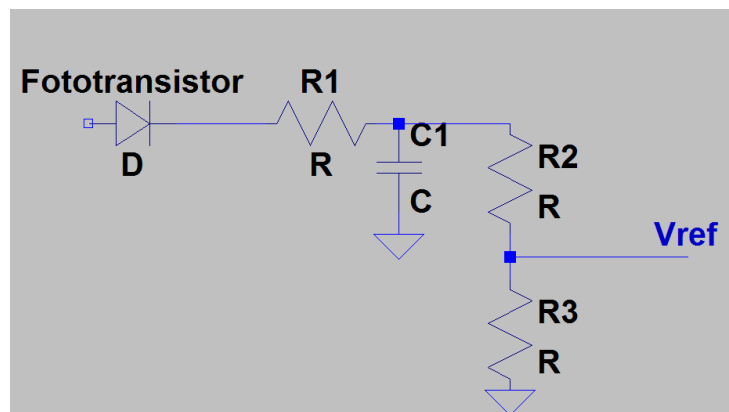


Figura 3.11. Comparador de luz ambiente dinámico

De esta manera el valor de referencia del comparador estará a un nivel medio que pueda variar en función de la luz incidente en el fototransistor. Además, en el caso de que haya incidencia de láser en el sensor, el valor de referencia del comparador será menor, debido al divisor de voltaje, por lo que no tendría problemas de activación.



El uso de este componente permitiría que el telémetro se pueda usar en entornos con variaciones de luz constantes o con interferencias de medios externos.

### **3.6.2 Filtro de infrarrojos**

Debido a que se usa un láser infrarrojo para realizar las mediciones, se puede descartar una cantidad considerable de radiación ambiente usando un filtro de infrarrojos.

Con el uso de este componente se puede mejorar la diferencia entre la luz ambiente y la luz del módulo láser, complementando así la función del comparador.

### **3.6.3 Lente de enfoque al infinito**

El enfoque al infinito se puede definir como el estado de una lente cuando forma una imagen de un objeto a una distancia infinita en su foco, lo que corresponde a enfocar sobre los rayos paralelos.

Usando una lente con enfoque al infinito, se puede colocar el puntero láser de tal manera que no haga falta un enfoque manual en función a la distancia del sistema óptico, ya que el enfoque será el mismo independientemente de la separación de los objetos.

## **3.7 Imágenes del modelo construido**

### **3.7.1 Módulo láser y sistema óptico**

En la parte superior el módulo láser y en la parte inferior el sistema óptico.

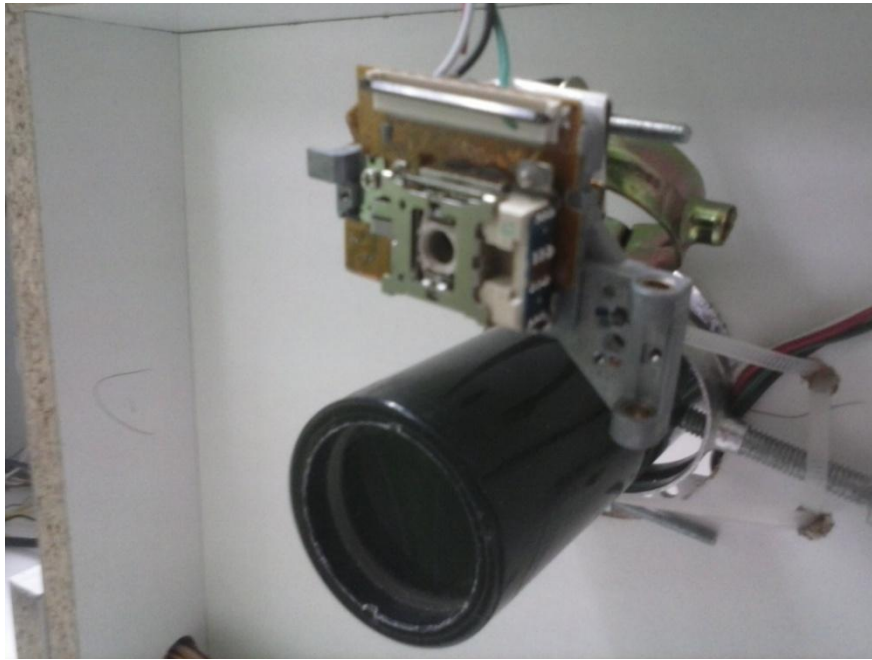


Figura 3.12. Foto de láser y óptica

### 3.7.2 Alimentador de módulo láser

De izquierda a derecha, el conmutador de tres posiciones, LM7805 y LM317.

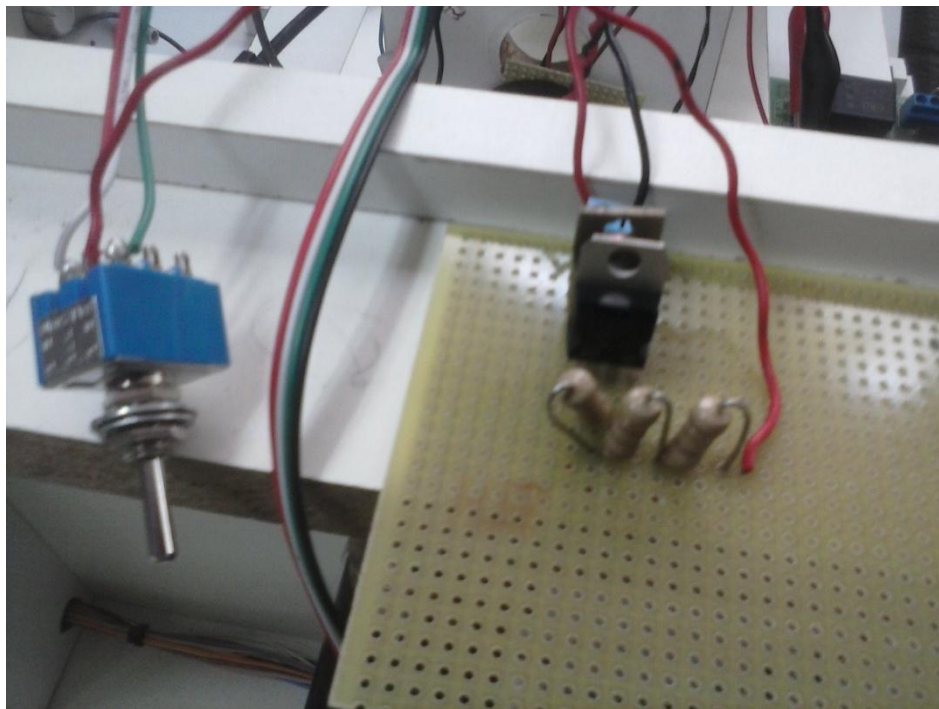


Figura 3.13. Foto de alimentador de láser

### 3.7.3 Circuito general

De izquierda a derecha y de arriba abajo, modulo de inversores, comparador, divisor de voltaje con potenciómetros y Mosfet.

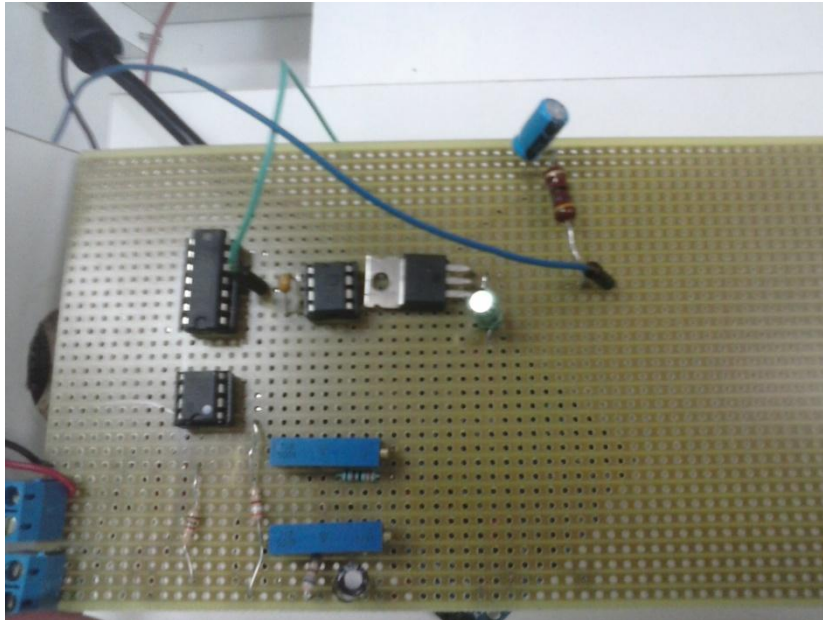


Figura 3.14. Foto circuito general.

### 3.7.4 Arduino

Arduino con entrada al pin 5 y conectado a la línea serial.



Figura 3.15. Foto Arduino





# Capítulo 4.

## Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se tratarán las conclusiones obtenidas en el desarrollo hardware de los dos sistemas, además de las obtenidas en la creación del software. También se añadirán unas líneas de trabajo futuras, que complementarían el trabajo descrito en esta memoria.

### 4.1 Conclusiones de desfase de onda

En el método del desfase de onda, descartado por inviabilidad con el material dispuesto en el laboratorio, se pueden concluir un aspecto principal.

Se trata de un método bastante preciso, por lo que requiere un mayor esfuerzo por parte de los componentes que formarían el sistema hardware. Si estos elementos no soportan las altas frecuencias necesarias para obtener la precisión descrita, el hardware no responderá como estaba previsto.

### 4.2 Conclusiones de frecuencia de conmutado

Del método de la frecuencia de conmutado, se pueden concluir diversos aspectos.

El primero de ellos, es que se trata de un sistema que trabaja a bajas frecuencias, lo cual es una ventaja a la hora de escoger los componentes, ya que estos pueden ser de menor coste económico y proporcionar el mismo resultado, a nivel de precisión.

Además, las bajas frecuencias son menos propensas a las deformaciones, por lo que son más fáciles de leer desde cualquier componente externo.

Sin embargo, también tiene el defecto de que puede tener interferencias con la luz ambiente, en el caso de que no se fabrique un dispositivo capaz de filtrar esa luz, como el que está descrito en el apartado de "Posibles Mejoras" de dicho apartado.

### **4.3 Conclusiones software**

En el diseño de software se puede concluir lo siguiente:

En primer lugar, se puede obtener una mayor precisión con respecto a la transformación de los valores de frecuencia a valores de distancia, usando un ajuste mejor, intentando construir la función matemática punto por punto.

Además, a nivel de software externo, es posible realizar alguna aplicación informática que utilice el telémetro como base para la toma de información. Estas posibles aplicaciones no se desarrollaron por falta de tiempo, pero se propondrán en el siguiente apartado de "Futuras líneas de trabajo".

### **4.4 Futuras líneas de trabajo**

Como posibles continuaciones del trabajo realizado previamente a la realización de esta memoria, se pueden proponer, además de mejoras de componentes, como ya se ha dicho en apartados anteriores, el desarrollo de un software que use el telémetro como proveedor de parámetros.

El primer programa propuesto, puede ser un creador de mapas bidimensionales para sistemas robóticos. Puede usarse ROS como herramienta, en conjunto con unos componentes mecánicos como motores, para hacer girar el telémetro con una determinada velocidad, con el fin de captar las distancias de los obstáculos definidos en un arco desde el centro de un robot móvil, de manera que pueda moverse de manera autónoma.

También puede construirse una aplicación orientada a la seguridad, como un sistema de frenado automático de alguna herramienta peligrosa a nivel industrial, o un vehículo, cuando un objeto esté a cierta distancia.





# Capítulo 5.

## Summary and Conclusions

This chapter will include all the conclusions that have been deduced by the development of both system's hardware, and the ones got in the software creation. It will also include some future work continuations, that would complement all the work described in this project memory.

### 5.1 Phase Shift conclusions

In Phase Shift method, which was dropped because it was not possible to achieve the goals required using the available laboratory material, it is possible to get a principal conclusion.

This is a really accurate method, so it requires a greater effort of the components with which the hardware system is built. If those elements cannot achieve the high frequencies required for the correct functioning, the hardware system will not operate as it was supposed to.

### 5.2 Switching Frequency conclusions

Conclusions deduced from the Switching Frequency method are the ones that follow.

The first decisive fact is that is a system that works with relatively low frequencies, which is an advantage when electronic components have to be chosen, due to they can have a lower economic cost and have the same precision in the test's results.

Moreover, low frequency waves are less susceptible to wave strains, making them more easily readable by any external component.

However, the system has the problem of ambient light interference, which can make the range finder to work in an inappropriate way. There are some ways to avoid this

problem, which are defined in the "Possible Improvements" chapter.

### **5.3 Software development conclusions**

Conclusions made from software development are the ones that follow.

First of all, there can be a possible improvement in the frequency to distance values conversion, using a better setting that fits better to the values proportion.

Also, it is possible to develop some external software that uses the laser range finder as its principal data supplier. These possible applications were not developed due to the lack of time, so they will be proposed as future complementary work, in the next section.

### **5.4 Future complementary work**

As future continuations of the system described in this memory, there can be proposed, apart from electronic components improvements, the development of some external software that can use the laser range finder as parameter supplier.

The first application proposed, can be a bidimensional map creator for robotic systems. This can be done using, for instance, ROS as its principal tool, in addition to some mechanical components like motors. With those components it is possible to achieve a rotary movement of the laser beam, so it can measure the distance of all obstacles in a circle or semicircle which center will be a specific position of a robot, in a way that it can move automatically.

Besides, it can also be developed an application focused on security, for instance, an automatic braking system for any industrial dangerous tool or vehicles, when any object is into a specific distance range.

# Capítulo 6.

## Presupuesto

En este capítulo se desarrollará el presupuesto del sistema de telemetría definitivo, tomando como referencia precios de los componentes en la tienda online RS.

### 6.1 Presupuesto general

Componentes	Coste (€)
Láser de DVD	5.00 (Aprox)
Fototransistor TSL135M	0.29
Regulador de voltaje LM7805	0.008
Regulador de voltaje LM317	0.03
Resistencias varias	0.50 (Aprox)
Lente convergente	14.00 (Aprox)
Comparador LM393N	0.01
Potenciómetros x2	1.56
Inversor	0.29
Transistor Mosfet	3.08
Driver de Mosfet MIC4451	1.6
Arduino Uno	22.58
<b>TOTAL</b>	<b>49.218</b>

Tabla 6.1. Tabla de presupuesto general.



# Bibliografía

- [1] Wikipedia. Desfase de una onda.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Desfase>
  
- [2] Texas Advanced Optoelectric Solutions. TSL13 Datasheet. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/203007/TAOS/TSL13.html>
  
- [3] Fairchild Semiconductor. LM7805 Datasheet. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/82833/FAIRCHILD/LM7805.html>
  
- [4] Educaplus.org. La Luz y sus Propiedades. <http://www.educaplus.org/luz/lentel.html>
  
- [5] National Semiconductor. LM317 Datasheet. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8619/NSC/LM317.html>
  
- [6] Rafael Enríquez Herrador. Guía de Usuario de Arduino, Córdoba, España 2009.  
[http://www.jcarazo.com/tmp/Arduino\\_user\\_manual\\_es.pdf](http://www.jcarazo.com/tmp/Arduino_user_manual_es.pdf)
  
- [7] Freescale Semiconductor. *LM393 Comparator Datasheet*.  
<http://html.alldatasheet.es/html-pdf/3072/MOTOROLA/LM393N/257/1/LM393N.html>
  
- [8] PJRC.com. FreqCount Library.  
[https://www.pjrc.com/teensy/td\\_libs\\_FreqCount.html](https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_FreqCount.html)