

Universidad Autónoma de Baja California

INSTITUTO DE INGENIERÍA



*“Diseño de un amplificador de fotosensor para acondicionar la señal óptica de un sistema de barrido láser.”*

AVANCE DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

PRESENTA

Ivan Yeniseysk Alba Corpus

DIRECTOR

Dr. Lars Lindner

CODIRECTOR

Dra. Wendy Flores Fuentes

Mexicali, B.C. a 14 de junio de 2021

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Ivan Yeniseysk Alba Corpus, declaro que esta tesis titulada, “Diseño de un amplificador de fotosensor para acondicionar la señal óptica de un sistema de barrido láser” y el trabajo presentado en ella es de mi autoría. Y confirmo que este trabajo enviado para mi evaluación es original y se expresa en mis propias palabras y fue realizado principalmente para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en esta Universidad. Afirmo que he citado el trabajo de otros y he proporcionado debidamente las fuentes de estas citas. Cualquier uso que hice de la información de las obras de otros autores en cualquier forma y momento (tales como ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente. Constató que en esta tesis he reconocido el trabajo hecho por mí en colaboración con otros aclarando explícitamente mi contribución y la aportación de otros. Por último, ratifico que esta tesis fue revisada en su totalidad por un comité evaluador.

Firma:



---

Fecha: 14 de Junio de 2021

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a todas las personas que conforman el departamento de Optoelectrónica y Mediciones Automáticas de la Universidad Autónoma de Baja California, especialmente a mi director de tesis el Dr. Lars Lindner y a mi co-directora la Dra. Wendy Flores Fuentes por su incondicional apoyo, su gran guía en mi desarrollo como estudiante y por su inmensa paciencia, disponibilidad y fuerte ética de trabajo. También agradezco al Dr. Oleg Sergiyenko por compartir su muy amplio conocimiento en el campo de la física aplicada y por su gran apoyo. Siempre estaré agradecido de haber tenido la oportunidad de aprender del personal académico de esta institución durante mi estancia dentro del Instituto de Ingeniería.

## **DEDICATORIA**

Para mis abuelos, a los que les debo totalmente quien soy y sin el apoyo de los cuales mi vida seria muy diferente. A mi madre y a mi hermana cuyas buenas decisiones en la vida me recuerdan que con trabajo y una meta clara siempre se puede lograr lo que se propone en la vida. Para mis tías que hasta el día de hoy se siguen superando. Para Laura que por muchos años me ha apoyado en todas mis decisiones siempre mirando al futuro y para el resto de mi familia, quienes con su ejemplo me han enseñado a ser una buena persona.

## RESUMEN

RESUMEN de la tesis de Ivan Yeniseysk Alba Corpus, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA, EN EL ÁREA DE OPTO-ELECTRÓNICA, Mexicali, Baja California, México, Mayo de 2021.

“DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR DE FOTOSENSOR PARA ACONDICIONAR LA SEÑAL ÓPTICA DE UN SISTEMA DE BARRIDO LÁSER”

Resumen aprobado por:



---

Dr. Lars Lindner

La presente tesis de maestría muestra los resultados obtenidos durante la investigación realizada en el área de optoelectrónica y mediciones automáticas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California durante el periodo 2019-2021. En ella, se describen el diseño e implementación de un amplificador de transimpedancia para incrementar la amplitud de la señal optoelectrónica adquirida por un sistema de barrido láser, denominado TVS3, es decir, prototipo No. 3 del Technical Vision System desarrollado en la UABC para la obtención de coordenadas espaciales en 3D bajo el principio de triangulación dinámica. Se desarrolló además el programa de cómputo para la adquisición de la señal optoelectrónica y el cálculo de coordenadas, el cual fue utilizado para realizar mediciones de coordenadas 3D de objetos escaneados con el objetivo de evaluar el rango

de alcance proveído al TVS3 con el diseño e implementación de dicho amplificador de transimpedancia.

En esta investigación se logro:

- Diseñar e implementar un amplificador de transimpedancia utilizando componentes óptimos para el tipo de láser usado en el sistema TVS3.
- La extensión de la distancia máxima de sensibilidad del sistema en comparación con prototipos anteriores.
- La captura de la señal optoelectrónica y el cálculo de coordenadas.
- La implementación de filtros para la señal optoelectrónica obtenida durante el barrido para la reducción de ruido.
- El desarrollo de un programa de computó para automatizar la adquisición de señales optoelectrónicas y el calculo de las coordenadas.
- La aplicación del método de triangulación dinámica para la obtención de puntos 3D.

Aunado a lo anterior, las pruebas realizadas en esta investigación se realizaron usando dos objetos con diferentes tipos de superficie, un cilindro metálico y un objeto cubierto por papel representando una pared blanca.

# ÍNDICE

<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
<b>2. PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	9
2.1.1. Teoría de funcionamiento . . . . .	13
2.1.2. Triangulación estática. . . . .	16
2.1.3. Triangulación dinámica. . . . .	16
2.2. Planteamiento del problema . . . . .	17
2.3. Justificación . . . . .	17
2.4. Hipótesis . . . . .	18
2.5. Objetivos de la investigación . . . . .	18
2.5.1. Objetivo general . . . . .	18
2.5.2. Objetivos específicos . . . . .	19
<b>3. INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</b>	<b>21</b>

3.1. Introducción . . . . .	21
3.1.1. Principios de diseño . . . . .	23
3.2. Métodos de medición . . . . .	24
3.2.1. Tiempo de vuelo . . . . .	24
3.2.2. Medición de fase . . . . .	25
3.2.3. Triangulación . . . . .	25
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
4.1. Conceptos fundamentales . . . . .	27
4.1.1. Luz y espectro magnético . . . . .	27
4.1.2. La reflexión y el efecto fotoeléctrico . . . . .	28
4.1.3. Fotoconducción . . . . .	30
4.1.4. Fotosensores . . . . .	30
4.1.5. Acondicionamiento y adquisición de señales . . . . .	31
4.1.6. Conversión de señal . . . . .	31
4.1.7. Filtrado . . . . .	32
4.1.8. Adquisición de datos . . . . .	33
4.1.9. Amplificador Operacional . . . . .	34
4.1.10. El amplificador de transimpedancia . . . . .	34
4.2. Fotosensores . . . . .	35
4.3. Amplificadores . . . . .	36
4.4. Sistema de visión técnica (TVS) . . . . .	37
4.4.1. TVS1 . . . . .	37
4.4.2. TVS2 . . . . .	37
4.4.3. TVS3 . . . . .	38
4.5. Placas de control . . . . .	39
<b>5. METODOLOGÍA Y RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>41</b>
5.1. Descripción de diseño de experimentos. . . . .	41

5.2. Componentes y consideraciones involucradas en la experimentación . . .	42
5.3. Caracterización de sensor y emisor . . . . .	46
5.4. Experimentación . . . . .	51
5.5. Búsqueda de señales de interferencia en mediciones. . . . .	57
5.6. Triangulación y mapeado de objetos . . . . .	60
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>69</b>
<b>7. PRODUCTOS ACADÉMICOS</b>	<b>71</b>
REFERENCIAS . . . . .	76

# Índice de Figuras

1.1. Triangulación dinámica . . . . .	2
1.2. Campo de visión discreto . . . . .	4
1.3. Campo de visión continuo . . . . .	5
2.1. Imagen muestra el prototipo (centro) y controladores de posición (derecha).	10
2.2. Captura de pantalla de interfaz con motores DC del sistema de posicionamiento. . . . .	11
2.3. Laser reflejado en superficie. . . . .	12
2.4. Triangulación de objetos. . . . .	13
2.5. Triangulación con láser. . . . .	16
3.1. Medición de fase . . . . .	24
3.2. Medición de fase . . . . .	25
4.1. Entre más alta la frecuencia, más energía transporta el fotón. . . . .	28
4.2. Efecto fotoeléctrico . . . . .	29
4.3. Diagrama de bloques de la adquisición de datos. . . . .	33
4.4. Amplificador no inversor. . . . .	34
4.5. Amplificador de transimpedancia . . . . .	35
4.6. Campo de visión discreto de TVS2 . . . . .	38
4.7. Campo de visión continuo de TVS3 . . . . .	39
4.8. Diseño de placa impresa 1 . . . . .	40
4.9. Diseño de placa impresa 2 . . . . .	40
4.10. Diseño de placa para amplificador de transimpedancia . . . . .	40

5.1. Medición directa a reflejo de luz de láser. . . . .	44
5.2. Medición de reflejo en apertura de escaneo. . . . .	45
5.3. Experimentación en configuración de triangulación estática. . . . .	46
5.4. Configuración del posicionamiento del sistema y objeto de medición en triangulación estática. . . . .	47
5.5. Apertura de escaneo es expuesta a interferencia por luz ambiental. . . . .	48
5.6. Comparación resultado de amplificador de transimpedancia con luz de láser reflejada de pared en blanca cuando la interferencia luz de laboratorio encendida y apagada, como mostrado en tablas. . . . .	49
5.7. Comparación resultado de amplificador de transimpedancia con luz de láser reflejada en cilindro metálico cuando la interferencia luz de laboratorio encendida y apagada, como mostrado en tablas. . . . .	50
5.8. Obtención de señal Gaussiana. . . . .	51
5.9. Posicionador de láser en ángulo 1 . . . . .	53
5.10. Señal Barrido láser 1 . . . . .	53
5.11. Posicionador de láser en ángulo 2 . . . . .	53
5.12. Señal Barrido láser 2 . . . . .	54
5.13. Posicionador de láser en ángulo 3 . . . . .	54
5.14. Señal Barrido laser 3 . . . . .	54
5.15. Opciones de Interfaz. . . . .	56
5.16. Medición no usable por ruido. . . . .	57
5.17. Filtro de Savitzki-Golay. No luz, 300 rpm. . . . .	58
5.18. Filtro de Savitzki-Golay. No luz, 500 rpm. . . . .	58
5.19. Filtro de paso bajo. No luz, 500 rpm. . . . .	59
5.20. Gráfica barrido objeto 25 cm. . . . .	61
5.21. Gráfica barrido objeto 30 cm. . . . .	63
5.22. Gráfica barrido objeto 10 cm. . . . .	65
5.23. Gráfica barrido objeto 65 cm. . . . .	67

# Índice de Tablas

5.1. Factores utilizados en experimentación . . . . .	42
5.2. Evaluación del fototransistor TEPT5600 sin amplificador. . . . .	44
5.3. Evaluación del fotodiodo BPW21R sin amplificador. . . . .	44
5.4. Evaluación de sensores recibiendo ruido ambiental en apertura de escaneo (Amplificador de transimpedancia resistencia 1 M $\Omega$ ). . . . .	45
5.5. Evaluación de sensores recibiendo señal optoelectrónica en apertura de escaneo (Amplificador de transimpedancia resistencia 1 M $\Omega$ ). . . . .	45
5.6. Valores usando amplificador de transimpedancia, luces apagadas. . . . .	48
5.7. Valores usando amplificador de transimpedancia, luces encendidas. . . . .	48
5.8. Comparación de ruido ambiental (Sin luz de láser) usando luz artificial en laboratorio. . . . .	49
5.9. Factores utilizados en experimentación . . . . .	61
5.10. Tabla de datos. . . . .	62
5.11. Factores utilizados en experimentación . . . . .	63
5.12. Tabla de datos. . . . .	64
5.13. Factores utilizados en experimentación . . . . .	65
5.14. Tabla de datos. . . . .	66
5.15. Factores utilizados en experimentación . . . . .	67
5.16. Tabla de datos. . . . .	68

# Lista de símbolos y abreviaturas

Lista de símbolos usados en tesis.

- $\alpha$     Ángulo de emisor en TVS.
- $\beta$     Ángulo de objeto en TVS.
- $\Delta$     Cambio en medición.
- $\gamma$     Ángulo de emisor en TVS.
- $A$     Extremo en TVS para calculo de triangulación.
- $B$     Extremo en TVS para calculo de triangulación.
- $C$     Extremo en TVS para calculo de triangulación.
- $d$     Distancia total entre puntos A y C.
- $d1$     Distancia entre punto A y L.
- $d2$     Distancia entre punto C y L.
- $L$     Distancia entre base de TVS y el objeto escaneado.

# Lista de ecuaciones

1.	Calculo de ángulo faltante . . . . .	13
2.	Despeje de $\beta$ . . . . .	13
3.	Ley de los senos . . . . .	14
4.	Despeje ley de los senos . . . . .	14
5.	Despeje ley de los senos . . . . .	14
6.	Distancia $d$ entre B y C . . . . .	14
7.	Distancia L . . . . .	14
8.	Distancia A C . . . . .	14
9.	Distancia B C . . . . .	15
10.	Distancia ML . . . . .	15

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

Del campo de visión artificial, los sistemas de escaneo láser son ampliamente usados en aplicaciones como la robótica, construcción y topografía, tanto en el sector industrial como en la investigación [1]. En estos campos, un requerimiento común y de mucha importancia constituye la obtención de coordenadas 3D del entorno o de superficies de objetos. Para este propósito se utiliza la triangulación, que representa un área de la geodesia, una ciencia que emplea métodos matemáticos para el cálculo de las superficies terrestres [2]. Dentro de esta área se encuentra la triangulación dinámica [1], una técnica desarrollada en la Universidad Autónoma de Baja California y que consiste en el movimiento constante de dos elementos que cambian sus ángulos constantemente, el emisor o posicionador láser, representado por el ángulo  $\gamma$ , y apertura de escaneo representada por el ángulo  $\beta$ . Este proceso se puede ver en Figura 1.1.

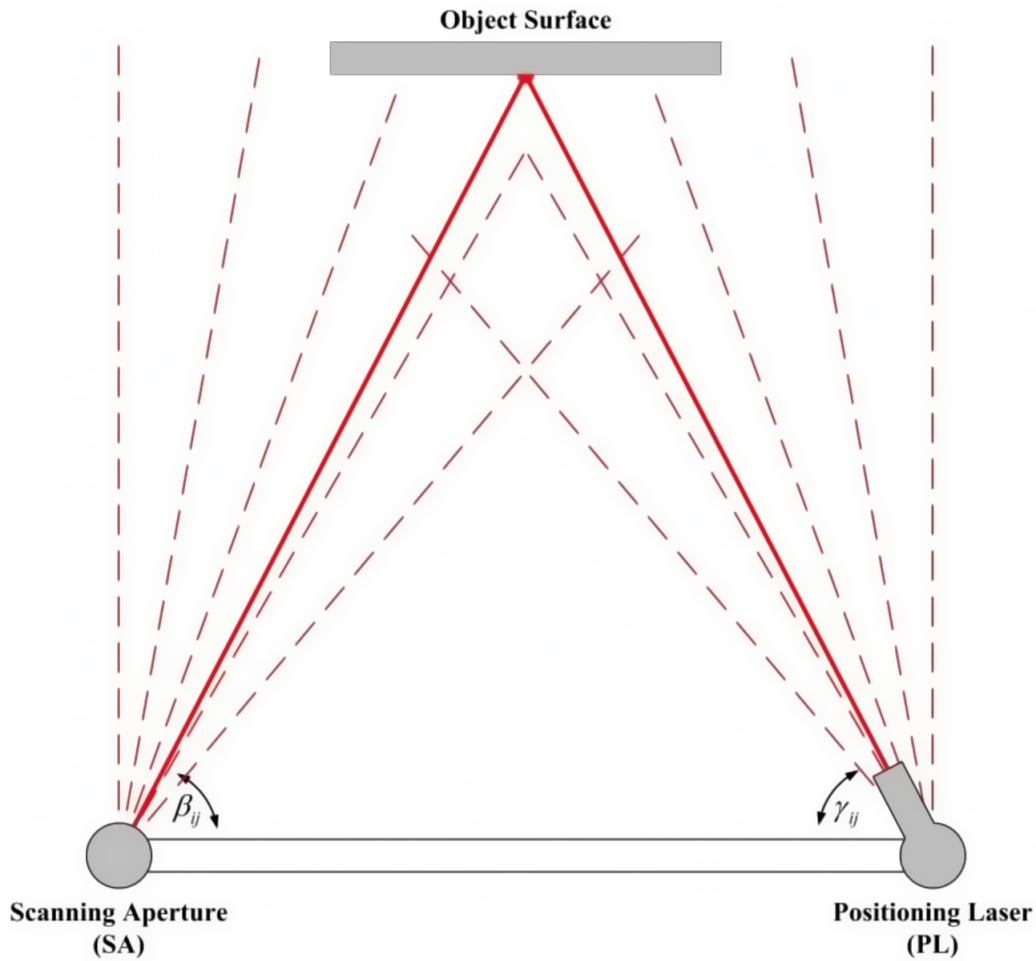


Figura 1.1: Triangulación dinámica [1].

El apuntador láser es dirigido a una sección específica del campo de visión, donde al incidir sobre la superficie de un objeto, este se refleja, para entonces ser capturado por la apertura de escaneo que gira a una velocidad constante en busca de esta reflexión láser. Esto hace que la triangulación dinámica, que utiliza ángulos no fijos para el emisor y receptor, tenga un intervalo de medición independiente del tamaño del sensor que se utiliza para la detección ya que al estar en movimiento los elementos del sistema automáticamente se encuentran con la cara del objeto siendo escaneado, al contrario de en la triangulación estática donde el tamaño del sensor esta vinculado a la luz que regresa al sensor. Al utilizar estos elementos de los cuales se obtiene una curva gaussiana con la

información de la distribución de energía del objeto escaneado, además de la información de los ángulos en los que los actuadores se encontraban, se puede utilizar trigonometría simple para triangular el punto donde se encuentra el objeto [1].

En investigaciones anteriores como por ejemplo [3], se utiliza el TVS en una forma novedosa al utilizar el barrido láser para la detección de parámetros biométricos; para este propósito se han desarrollado métodos de detección que utilizan un fotosensor como una fotoresistencia y un comparador de voltaje para la detección de presencia de objetos siendo escaneados por el sistema, para entonces utilizar un método de conteo de pulsos para determinar el ángulo y distancia en que se encuentran los objetos siendo escaneados, esta investigación logro obtener mediciones a una distancia de 50 a 70 cm.

Prototipos anteriores al TVS3 utilizaban motores a pasos y un sistema de engranes para posicionar tanto el posicionador de láser como la apertura de escaneo, mientras esto daba a exactitud y confiabilidad al sistema de posicionamiento. El uso de un campo de visión discreto hace imposible el escaneo de objetos de menor tamaño a la resolución de este, haciendo este problema mas notorio mientras el objeto a escanear se encuentre mas lejos del sistema, esta es la principal desventaja de los prototipos anteriores. Como en visto en [1] este ejemplo de campo de visión puede ser observado en la Figura 4.6.

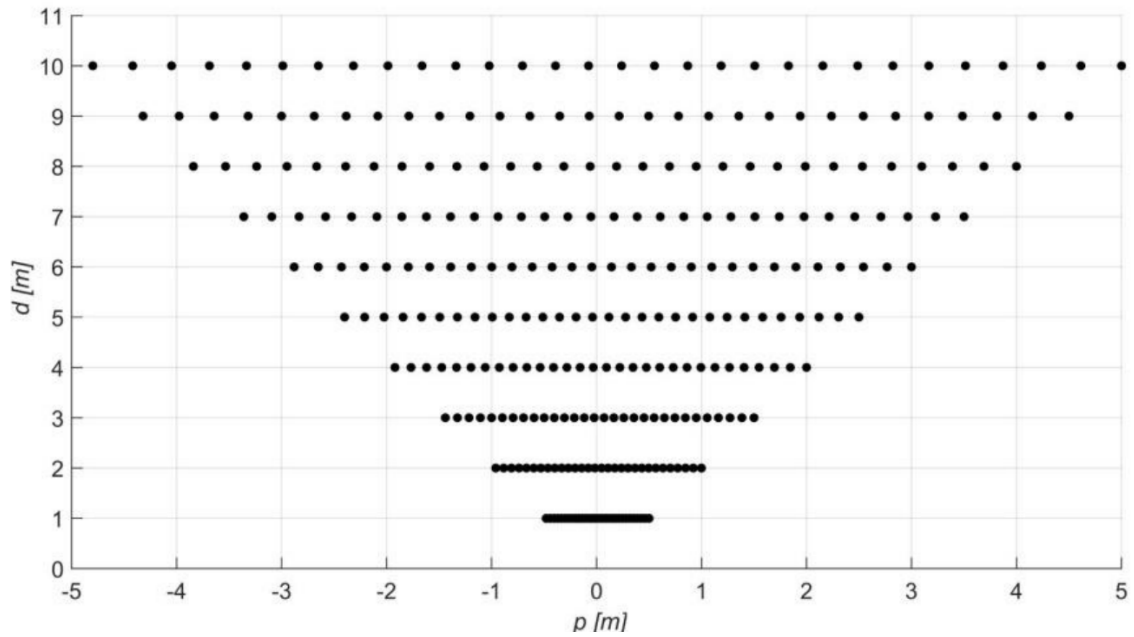


Figura 1.2: Campo de visión discreto [1].

Con el fin de mejora del TVS, en otra investigación [4] se ha aumentado considerablemente la resolución del prototipo de TVS actual (TVS3), utilizando un campo de visión continuo al reemplazar los motores a pasos usados en el prototipo 2 por motores de corriente directa siendo usados como servomotores mediante la adición de codificadores rotativos. Al hacer esto se ha aumentado considerablemente la resolución del sistema, obteniendo un campo de visión continuo, como se muestra en Figura 4.7.

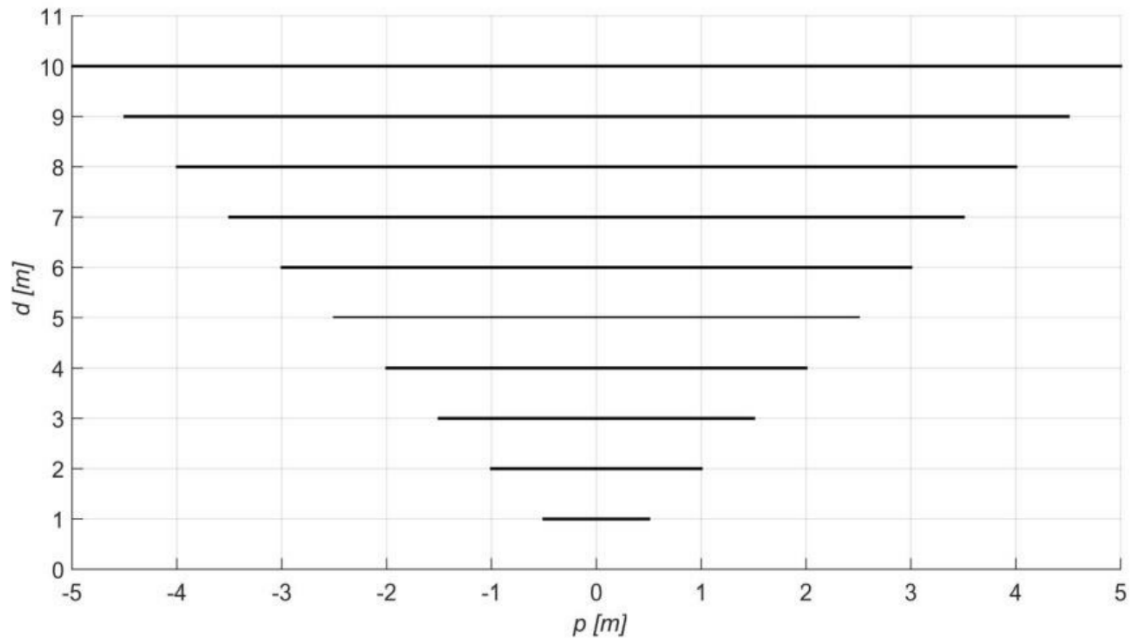


Figura 1.3: Campo de visión continuo [1].

Además, se ha desarrollado un sistema de control para estos servomotores para el posicionamiento exacto de estos motores, haciendo posible que, entre otras cosas, se abrieran posibilidades para un escaneo de objetos mas preciso o el escaneo de puntos lejanos los cuales no era posible medir con anterioridad. Para mejorar mas las capacidades del prototipo 3 y hacer posible el escaneo preciso de estos puntos del recorrido intermedios y lejanos se decidió implementar un amplificador de transimpedancia, con el fin de incrementar la amplitud de la señal optoelectrónica adquirida por la apertura de escaneo. Estos amplificadores de transimpedancia son ampliamente usados en otras aplicaciones que requieren de la conversión de una corriente muy pequeña proveniente de un fotosensor.

Esta investigación de maestría se basa en el uso exclusivo del prototipo No. 3 del Technical Vision System (TVS) que se ha desarrollado en UABC para hacer uso del principio de triangulación dinámica; mediante su uso y utilizando diferentes fotosensores para la detección de luz visible, cuyos picos de sensibilidad son altamente compatibles con el tipo de luz verde generada por el láser del sistema, se probaron las mejoras propuestas

con el uso de un amplificador de transimpedancia, las cuales se listan a continuación:

- Con el fin de la automatización del posicionamiento del láser en los objetos y subsecuente barrido en el que se debe de guardar una cantidad significativa de datos, se modificó el programa de interfaz con motores DC existente para el control preciso de los motores DC contenidos en el prototipo 3 [4] para aceptar comandos externos y enviar una respuesta cuando estos son ejecutados.
- Los comandos intercambiados por los paquetes de software consisten en la recepción del ángulo, o coordenadas, donde el programa de interfaz con los motores DC debe posicionar el láser para entonces responder en caso de terminar satisfactoriamente la trayectoria, o en caso de encontrarse un problema al intentar ejecutar un comando.
- Se creó una interfaz programada en C para el control y comunicación con el programa de interfaz con motores DC, cuyo objetivo es planear una ruta y dividir en secciones la trayectoria que seguirá el posicionador láser.
  - En esta interfaz se puede especificar si es deseado solo escanear una porción del campo de visión o en su caso la cantidad de grados que representan un paso.
  - Tras la especificación de esta información el software permite el inicio del recorrido, donde enviara los comandos necesarios para que el posicionador láser se ubique en cada uno de los puntos del recorrido.
  - Al ubicarse en cada punto el software toma la información de barrido de la apertura de escaneo para entonces ser guardada en disco, junto con la información de rotación de la apertura de escaneo.
- La captura de la distribución de energía la cual se observa como una señal gaussiana permitirá el análisis de elementos importantes del material siendo escaneado, como lo son el color, textura, tipo de material y ubicación de esquinas de estos.

- La detección de estos puntos se realiza mediante un amplificador de transimpedancia, es importante mencionar que la velocidad de respuesta del amplificador de transimpedancia limita la velocidad de escaneo del prototipo 3 dependiendo del nivel de amplificación que se requiere, debido a que el tiempo de descarga del amplificador esta ligado al nivel de amplificación.

Tras el guardado de los datos de barrido se puede utilizar un programa de computó adicional para la detección de picos de la señal, o uno de los métodos discutidos en [5] para la detección del centro energético de la señal gaussiana con el cual se define el ángulo  $\beta$  con mayor precisión. Con el uso de estos métodos de identificación es posible utilizar la información de posicionamiento de ambos apertura de escaneo y posicionador láser para realizar la triangulación de cada uno de los puntos tomados en el barrido de láser. Al tener cada uno de estos puntos es posible compilar en una nube de puntos 3D para la posterior conversión a un modelo holográfico. Es importante recalcar sin embargo que mientras que esta investigación de maestría llevo a la triangulación de puntos 3D, no se llevo a la creación de nubes de puntos. Por otro lado cabe destacar que el rango máximo de lectura con el prototipo 3 se extendió considerablemente con el uso de un amplificador en comparación a prototipos anteriores. Llegando a pruebas con motores estáticos de hasta 3 metros de distancia, habiendo entonces aun un cambio medible en la señal obtenida al apuntar a un objeto y a una pared blanca, siendo este aun medible con instrumentos suficientemente precisos si se deseara expandir aun mas el rango.

Un ejemplo de uno de estos amplificadores de transimpedancia siendo usado en aplicaciones de alta velocidad con corrientes muy pequeñas se puede encontrar en [6] donde a fin de lograr comunicación entre dos FPGA y computadoras se utiliza el amplificador OPA656 para la rápida conmutación que requiere este proceso. Es importante hacer notar que en este tipo de amplificación, al aumentar la ganancia de este amplificador la rapidez del circuito disminuye.

Al mismo tiempo, algunos amplificadores de transimpedancia ya son utilizados en aplicaciones de tipo LIDAR [7] donde se utiliza un diseño de estos amplificadores para una aplicación que requiere una rapidez muy alta.

En resumen, se observa en base al estado del arte que los amplificadores de transimpedancia en esta área de investigación tienen amplios usos y amplio potencial para seguir usándose en otros dispositivos distintos a los mencionados anteriormente. De igual manera se puede asumir con la información encontrada que la velocidad de respuesta de estos amplificadores es adecuada para los propósitos en los que se desea utilizar el prototipo. Por lo anterior, uno de los objetivos esenciales de esta investigación es la comprobación de la eficacia del uso de estos dispositivos, así como la recolección de los datos que en su caso permitan la reconstrucción de las superficies que se escanean creando puntos de nube 3D.

# CAPÍTULO 2

## PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Antecedentes

En el Instituto de Ingeniería de la UABC se ha creado el tercer prototipo de visión (mostrado en la Figura 2.1) para la obtención de coordenadas tridimensionales de objetos mediante la detección del reflejo de un láser y el método de medición llamado Triangulación Dinámica. A este sistema se le llama el Technical Vision System (o TVS prototipo No. 3), con el cual se logró hacer la ubicación precisa de los tres actuadores que se utilizan para hacer los escaneos de objetos; brazo, posicionador láser y apertura de escaneo usando motores de corriente directa y codificadores rotatorios, en lugar de motores a pasos [4]; esto para tener un mayor control de la posición del láser y para cambiar la característica física, de un campo de visión discreto a un campo de visión continuo. El sistema utiliza el reflejo de la luz y su intensidad para calcular el ángulo en el que visualiza el objeto desde la apertura de escaneo, entonces utiliza la distancia fija entre el posicionador de láser y la apertura de escaneo, junto con los ángulos en los que estos se encuentran con respecto al objeto para encontrar la distancia y posición de los objetos bajo observación.

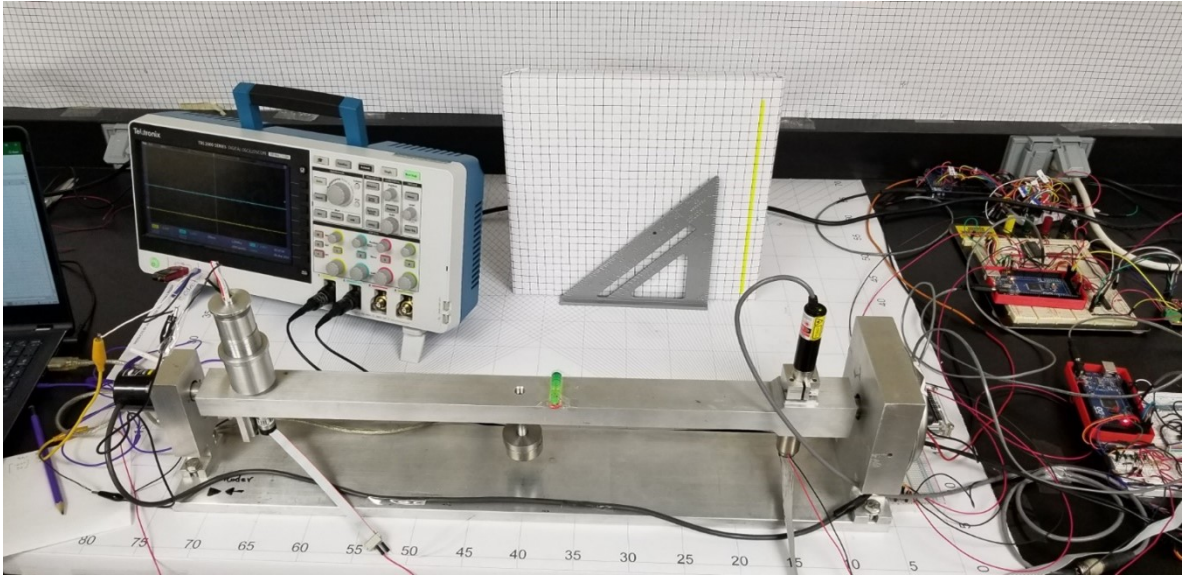


Figura 2.1: Imagen muestra el prototipo (centro) y controladores de posición (derecha).

El posicionamiento de los motores se lleva a cabo mediante comunicación serial con un microcontrolador Arduino MEGA central, que comunica a cada controlador las instrucciones de posición en tiempo real, usando un algoritmo que permite controlar la posición y velocidad de los motores en cada momento.

Usando un control de lazo cerrado con los codificadores rotativos y un controlador de precisión LM629, se controlan motores DC y servomecanismos usando un control de posición incremental cuádruple, permitiendo el control preciso de posición del motor.

Lo anterior se consigue haciendo uso de una interfaz gráfica programada en LabView donde se controlan los parámetros de cada controlador, así como se puede observar información importante de funcionamiento y valores de la ecuación de control. Esa Interfaz Gráfica (GUI) se muestra en la siguiente Figura 2.2:

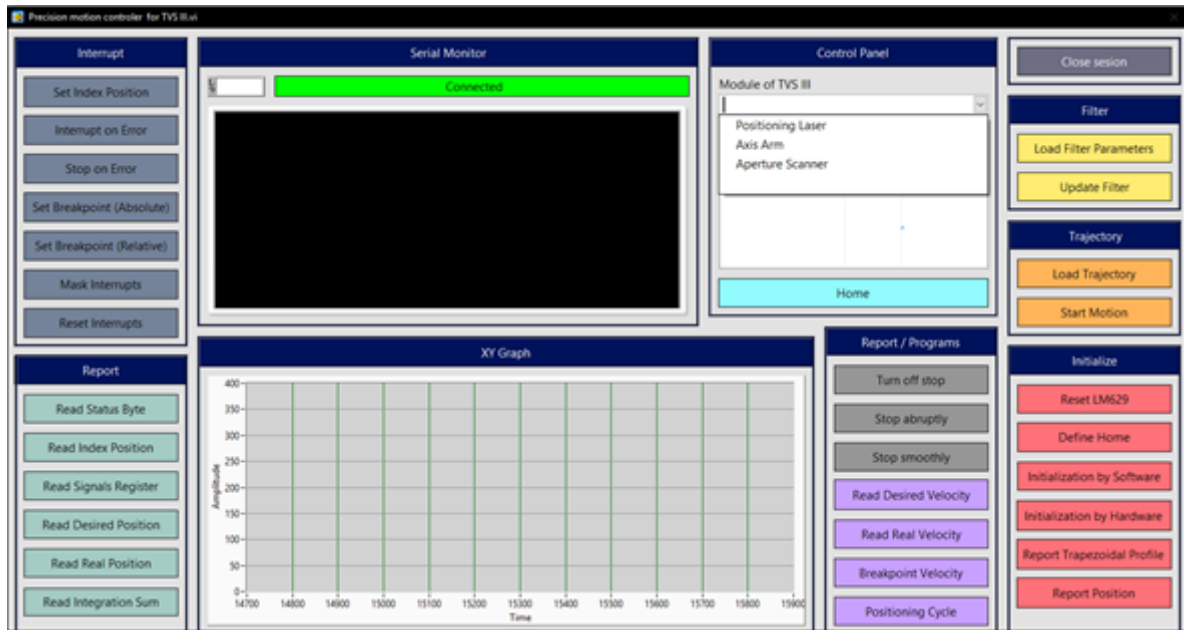


Figura 2.2: Captura de pantalla de interfaz con motores DC del sistema de posicionamiento.

La interfase cuenta con opciones para control de posición y control de velocidad, así como la capacidad de empezar y detener el movimiento del actuador. Por otro lado, para la comunicación de la interfase hacia el controlador se utilizan bibliotecas especialmente creadas para transmitir los diferentes comandos que el controlador LM629 acepta o reporta a través de sus salidas.

El sistema cuenta con un circuito de controlador creado para cada uno de los motores de posición. Dichos controladores cuentan con librerías especialmente desarrolladas en el lenguaje C para la comunicación con la interfase de usuario y el correcto posicionamiento, aceleración, control y corrección constante de coordenadas. Dicho proceso se logra mediante un algoritmo para calcular la trayectoria y dar ordenas al controlador LM629.

Se considera posible detectar el reflejo de una fuente de luz concentrada como un láser lanzado a una pared, usando un fototransistor como sensor para la detección del reflejo como se muestra en Figura 2.3. Sin embargo, se tienen limitaciones por factores como la sensibilidad del sensor o la superficie donde se refleja la luz.

Por ello, se desea llegar a la mejor combinación de sensor de luz, sea este un fotodiodo o fototransistor y amplificador operacional, para medir la intensidad de la luz que se ve reflejada de los objetos.

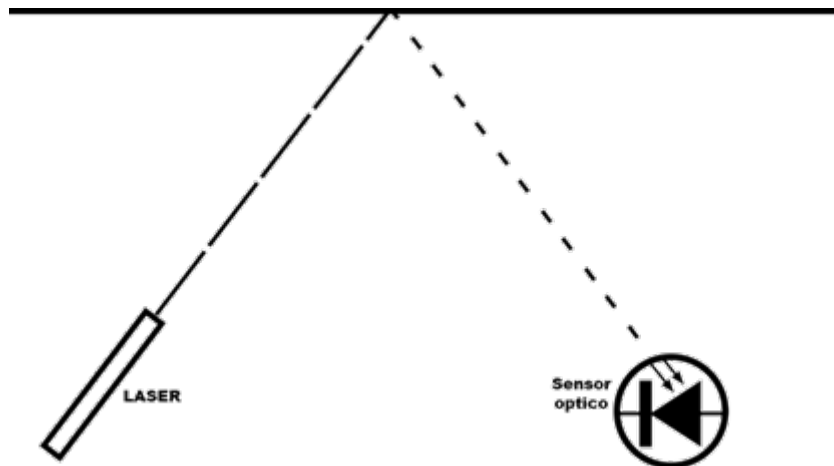


Figura 2.3: Laser reflejado en superficie.

### 2.1.1. Teoría de funcionamiento

La triangulación se utiliza en campos tan variados, desde la navegación hasta la ingeniería civil, pues ofrece la precisa ubicación o posición de, por ejemplo, un barco o la dirección en que debe de ir un túnel en construcción o una carretera. Aunque lo anterior es un ejemplo, los casos en los que se requiere la ubicación precisa de un objeto a distancia son muchos. Todo esto está basada en trigonometría básica, que usa al menos un lado y dos ángulos de un triángulo, para determinar los otros dos ángulos y lado. La Figura 2.4 muestra una representación de los ángulos de un triángulo, seguido por las ecuaciones que representan la igualdad de los ángulos, y la ley de los senos.

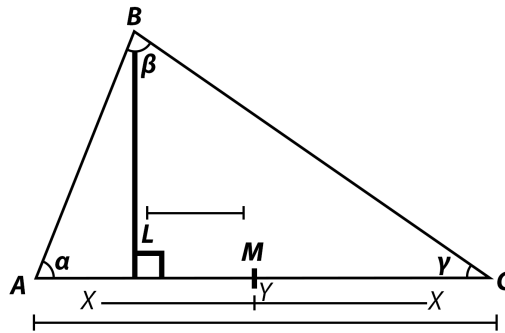


Figura 2.4: Triangulación de objetos.

Para el cálculo, se debe obtener primero el ángulo faltante del triángulo. Sabiendo que:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (1)$$

$$\beta = 180 - \alpha - \gamma \quad (2)$$

y usando la ley de los senos entonces:

$$\frac{b}{a} = \frac{\text{sen}\beta}{\text{sen}\alpha} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{\left(\frac{\text{sen}\beta}{\text{sen}\alpha \cdot b}\right)} \quad (4)$$

$$c = a \cdot \frac{\text{sen}\gamma}{\text{sen}\alpha} \quad (5)$$

Mientras que los puntos  $B$  y  $C$  se mantengan a una distancia constante y conocida del centro se puede saber que:

$$d = d_1 + d_2 \quad (6)$$

Y siempre que los valores  $\alpha$  y  $\gamma$  sean medibles, la tangente de cada ángulo en uno de los triángulos rectángulos formados entre el centro de ambas mediciones es la relación entre la longitud del lado opuesto y la longitud del lado adyacente, en este caso:

Sabiendo que:

$$L = d \cdot \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\gamma)}{\text{sen}(\alpha + \gamma)} \quad (7)$$

Mientras que para resolver las distancias entre  $A$  a  $C$  y de  $B$  a  $C$  se utiliza:

$$AC = AB \cdot \frac{\text{sen}(\gamma)}{\text{sen}(\alpha + \gamma)} \quad (8)$$

$$BC = AB \cdot \frac{\text{sen}(\alpha)}{\text{sen}(\alpha + \gamma)} \quad (9)$$

Para entonces obtener la distancia de  $M$  a  $L$ :

$$ML = \frac{AB}{2} - BC \cdot \cos(\gamma) \quad (10)$$

Donde la abscisa es la  $X$  correspondiente a la distancia de  $M$  a  $A$  o  $C$  y la ordenada es la  $Y$  y correspondiente a la distancia  $L$ , mientras que el punto  $B$  corresponde a la coordenada del punto escaneado.

### 2.1.2. Triangulación estática.

Si toda superficie puede reflejar una porción de la luz que se le dirige, entonces, teóricamente es posible hacer incidir la luz láser sobre una superficie y que su reflexión sea capturada por un sensor, creando un triángulo y al saber los ángulos que el triángulo forma y la distancia entre el emisor del láser y el receptor, detectar objetos y distancias mediante la técnica llamada triangulación. Una representación del proceso de triangulación se puede apreciar en Figura 2.5.

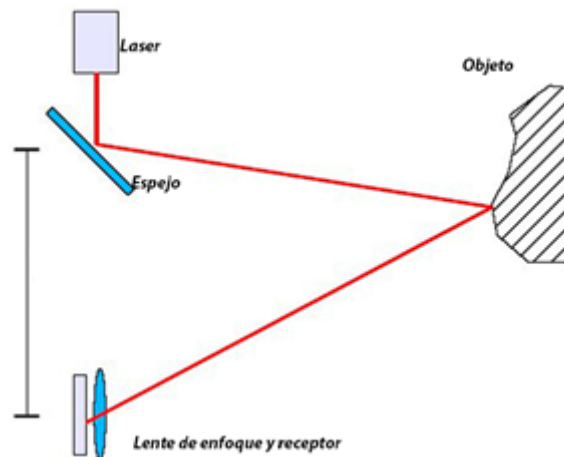


Figura 2.5: Triangulación con láser.

### 2.1.3. Triangulación dinámica.

La triangulación de objetos en sistemas de barrido láser puede ser estática o dinámica. La operación dinámica se refiere al principio de variar el ángulo del emisor y el receptor de láser para eliminar comportamientos estáticos en la triangulación y para incrementar el campo de visión del escáner láser [8].

## 2.2. Planteamiento del problema

Mientras que otros prototipos del TVS para la triangulación dinámica tienen un funcionamiento comprobado [9], también es cierto que se ha identificado la necesidad de aumentar el alcance del rango de medición, por lo tanto el objetivo de esta investigación requiere del desarrollo de un amplificador de transimpedancia para su adaptación en el prototipo No. 3 del TVS, con el propósito de obtener una lectura legible en forma de una señal gaussiana y, mediante el procesamiento de esta la obtención de información de posicionamiento 3D de los objetos a ser escaneados por el sistema. Además, se debe establecer la mejora en el alcance del rango de medición, así como evaluar su exactitud a través de mediciones obtenidas con el sensor acondicionado con dicho amplificador.

## 2.3. Justificación

La obtención de puntos de posicionamiento 3D de los prototipos de sistema que utilizan el método de la triangulación dinámica en general utilizan un método de conteo de pulsos [8] aunado a un sistema de detección de presencia básica utilizando un sensor óptico y un voltaje relativamente alto para facilitar la detección de cambios pequeños en la señal obtenida de la luz reflejada de los objetos siendo escaneados. Mientras que estos y otros sistemas de triangulación funcionan, la cantidad de información recolectada por el sistema podría ser relativamente baja o puede facilitar la detección de falsos positivos de presencia, especialmente cuando el sistema reconoce la presencia del objeto siendo escaneado mediante un circuito de comparación de niveles de voltaje [3]. Por lo anterior, este trabajo se centra en la creación e implementación de un amplificador de transimpedancia, de su adaptación al prototipo No. 3 del TVS y de la toma de datos de dicho amplificador, al ser este un método que permite la conversión directa de una corriente minúscula detectada en la apertura de escaneo del sistema a una señal que puede ser digitalizada mas fácilmente. Además, la posibilidad de obtener información adicional al estudiar la forma

de la señal digitalizada por el sistema. De esta señal podría potencialmente obtenerse información como la forma, material o color del objeto siendo escaneado por el sistema, dependiendo del comportamiento de la señal obtenida por el sensor óptico. De este modo se tiene la oportunidad expandir el rango de detección del sistema en comparación con investigaciones anteriores, esto al tener un control de la amplificación aplicada a la corriente detectada en el sensor de la apertura de escaneo de sistema, para convertir esta información en coordenadas 3D.

## **2.4. Hipótesis**

De las principales áreas de oportunidad detectadas en esta investigación, sobresalen las posibles ventajas en el cálculo de coordenadas al tener información más completa sobre el objeto que se escanea, además de contar con una amplificación activa que permite ampliar el rango de escaneo del sistema. Por los puntos anteriores se propone que: “El uso de un amplificador de transimpedancia en el prototipo No. 3 del TVS es posible utilizando el láser actualmente instalado, lo cual mejorará la distancia máxima posible desde la cual se puede escanear un objeto y la señal obtenida del amplificador podrá usarse para mejorar la exactitud de la detección del centro energético de la forma de la señal.”

## **2.5. Objetivos de la investigación**

Este capítulo se dedica a la explicación y listado de los objetivos generales y específicos de esta investigación.

### **2.5.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es el desarrollo de un sistema de amplificación para las señales optoelectrónicas obtenidas por un fotosensor en la apertura de escaneo del prototi-

po tres del Technical Vision System (TVS3) desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UABC, usando un amplificador de transimpedancia y con este obtener con mayor detalle los datos de la distribución energética de la señal reflejada por los objetos escaneados, así como la obtención de un incremento en la distancia máxima detectable en comparación con prototipos anteriores durante la triangulación dinámica para la obtención de puntos 3D.

### **2.5.2. Objetivos específicos**

Adicionalmente, para cumplir con el objetivo previamente mencionado, los objetivos específicos de esta investigación y que la presente tesis enumera, son los siguientes:

1. Investigación del estado del arte de amplificadores, fotosensores y métodos de procesamiento.
2. La definición de una combinación de sensor y de un circuito de amplificación de transimpedancia óptimos para el láser marca COHERENT modelo STR-520-10-A-HR-D01 marcado como 520 nm en su longitud de onda, usado en el prototipo 3 del TVS.
3. La extensión del rango máximo de escaneo alcanzado por prototipos anteriores (aproximadamente 70 cm) mediante el uso de un amplificador de transimpedancia.
4. Diseño y producción de placas de circuitos.
5. Desarrollo e implementación de un sistema de almacenamiento de datos de escaneo de puntos utilizando como base algoritmos de movimiento de motores DC [4].
6. Desarrollo de programa para implementar filtros de señal obtenida y de reconocimiento de picos en señal.

7. Desarrollo de programa de computó para la triangulación, conversión y visualización de coordenadas 3D.

# CAPÍTULO 3

## INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Introducción

Actualmente existen numerosas aplicaciones que implementan sistemas de medición de superficies en el área de la investigación para realizar mediciones precisas de la geometría de la superficie de los objetos [10]. Estos sistemas funcionan esencialmente midiendo un conjunto de puntos a través de la superficie de un objeto, a partir de los cuales se puede construir una representación basada en triangulación o parches de superficie (imágenes). Entonces se utilizan medidas geométricas precisas en la creación de modelos computacionales tridimensionales para diferentes aplicaciones, como navegación autónoma en tareas robóticas, en topografía para determinar con precisión la posición terrestre de puntos, distancias y ángulos utilizando instrumentos de nivelación, sobre salud estructural se realiza un monitoreo para obtener una base de datos completa de la estructura y obtener un diagnóstico de ensamblaje completo, y principalmente en la industria manufacturera se aplica en la creación de diseño asistido por computadora (CAD) para diseñar o realizar ingeniería inversa de piezas que de otra manera sería imposible. Estos sistemas de me-

dición suelen trabajar con procesos minuciosos especialmente en navegación autónoma para detectar obstáculos y evitar colisiones o cuando las piezas diseñadas deben encajar en equipos existentes, minimizando la posibilidad de error en las medidas geométricas. Es frecuente que los sistemas de medición de superficies cuenten con técnicas de medición por contacto como micrómetros o máquinas de medición por coordenadas, sin embargo, en ocasiones el objeto de interés no puede tener contacto directo con los instrumentos para obtener la información geométrica por diferentes factores: su tamaño, la dificultad para alcanzarlo o la naturaleza del material. Para este tipo de tareas, existen numerosas técnicas de medición de superficies sin contacto que son capaces de realizar una medición precisa de la geometría de la superficie. Una de las opciones para la medición de estos objetos son los escáneres de cámaras y escáneres láser, que utilizan estos para obtener la información sobre la superficie o coordenadas de estos.

La ventaja de las cámaras es que se asemejan a la forma de la visión humana [11], lo que facilita la implementación de algoritmos para la detección de diferentes escenarios en un entorno desconocido, además, los resultados del escaneo no dependen de las propiedades de la superficie del objeto examinado cuando se utilizan cámaras, un ejemplo de este tipo de escáneres puede encontrarse en [12] donde se utiliza un escáner de óptico que utiliza tres cámaras para la reconstrucción de piezas para ingeniería inversa. Las cámaras sin embargo no son recomendables en mediciones de coordenadas o de distancia, debido a que generan una gran cantidad de datos y por su dependencia a las condiciones climatológicas y existencia de luz visible. Sin embargo, los sistemas de escaneo láser son adecuados para mediciones de coordenadas precisas, que pueden realizar a objetos a largas distancias e independientemente de la luz ambiental. También tienen la ventaja de una medición rápida y una configuración óptica simple con elementos de bajo costo [13]. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que, para los sistemas de escaneo láser, las lecturas de medición dependen de la superficie de escaneo y que se requiere un post procesamiento debido a conjuntos de datos 3D grandes y de alta resolución. Un ejemplo de escáner láser

puede encontrarse en [14] donde de la misma manera se utiliza un escáner láser montado en un brazo para medición con el propósito de realizar ingeniería inversa en objetos con geometrías desafiantes.

Los escáneres láser se pueden clasificar según los principios de diseño y los métodos de medición, que se describen brevemente en las dos secciones siguientes [15].

### **3.1.1. Principios de diseño**

Los principios de diseño describen las características por las que se compone un escáner láser y definen su construcción. Se pueden determinar tres principios de diseño principales para los escáneres láser:

- Escáneres láser portátiles.
- Escáneres láser móviles.
- Escáneres láser estacionarios.

Los escáneres láser portátiles son dispositivos pequeños y compactos, que se encuentran cada vez en más aplicaciones, donde la flexibilidad y la movilidad juegan un papel central para la determinación de coordenadas. A diferencia de los escáneres láser estacionarios, tienen un rango de escaneo más corto. Los escáneres láser portátiles se utilizan a menudo como lectores de códigos de barras o dispositivos portátiles de medición de coordenadas. En los escáneres láser estacionarios (también llamados escáner láser terrestre), la geometría de la superficie de los objetos se registra digitalmente. De este modo, se produce un conjunto de puntos de muestra discretos, denominados nube de puntos. Luego, esta nube de puntos se convierte en datos de usuario mediante un post procesamiento mediante métodos matemáticos. Los escáneres láser estacionarios, como las cámaras, se operan sobre trípodes y también se encuentran instalados permanentemente en edificios o en instituciones, con fines de control y supervisión.

## 3.2. Métodos de medición

### 3.2.1. Tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo consta de una fuente emisora de láser, dos foto-receptores y una unidad de procesamiento de señales. Este método utiliza el tiempo, la amplitud o la frecuencia como variable para calcular la distancia entre una fuente láser y su reflejo sobre la superficie. El escáner láser mide el tiempo de vuelo absoluto  $t$  de un pulso láser emitido y recibido. De este modo, el pulso láser debe llegar y reflejarse perpendicularmente sobre la superficie medida, de modo que el transmisor y el receptor se puedan combinar en la misma unidad de medida. Estos métodos tienen como ventaja la rápida velocidad de reacción, mientras que su desventaja principal es su alto costo al requerir de una alta resolución. Un ejemplo de este método de medición puede verse en [16] donde se utiliza el tiempo de vuelo directo en un sistema LiDAR usando 32 sensores diferentes.

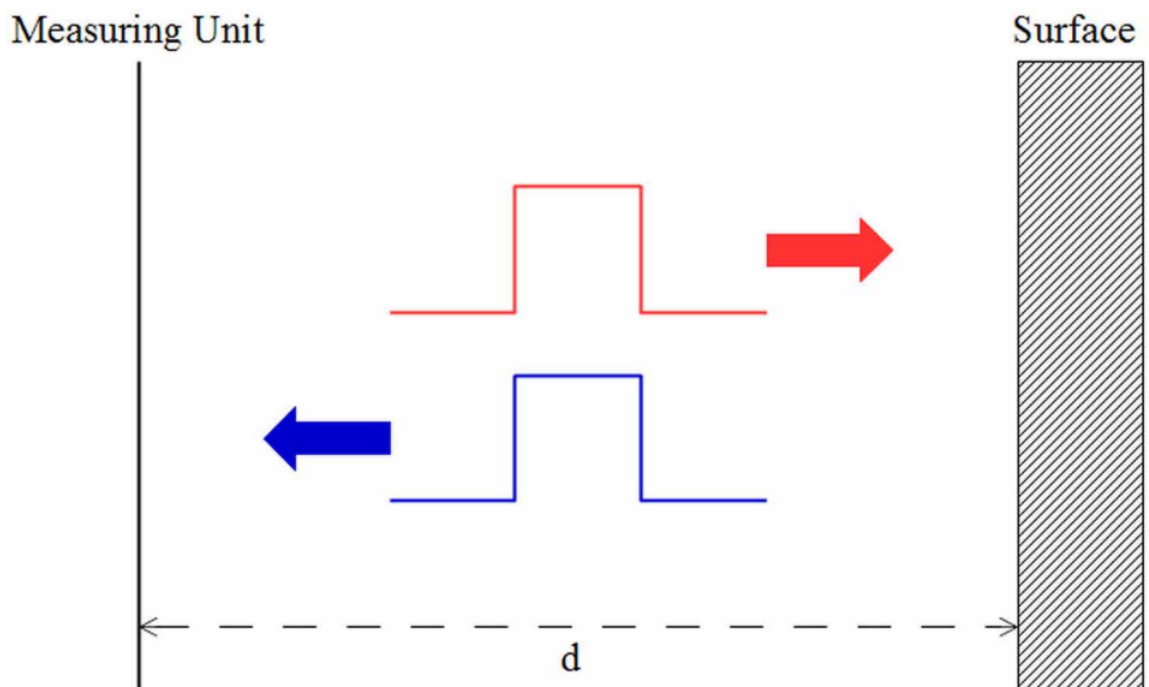


Figura 3.1: Tiempo de vuelo [15].

### 3.2.2. Medición de fase

Para el método de medición de fase, se envía una señal láser armónica y se superpone con su señal reflejada. La principal ventaja de este método es su capacidad para resultar en una alta resolución, mientras que su principal desventaja es la baja distancia que resulta del uso de este en el escaneo de objetos. La distancia entre la unidad de medida y la superficie medida se determina utilizando el desplazamiento de fase entre el tren de pulsos láser emitido (rojo) y reflejado (azul), como se muestra en Figura 3.2.

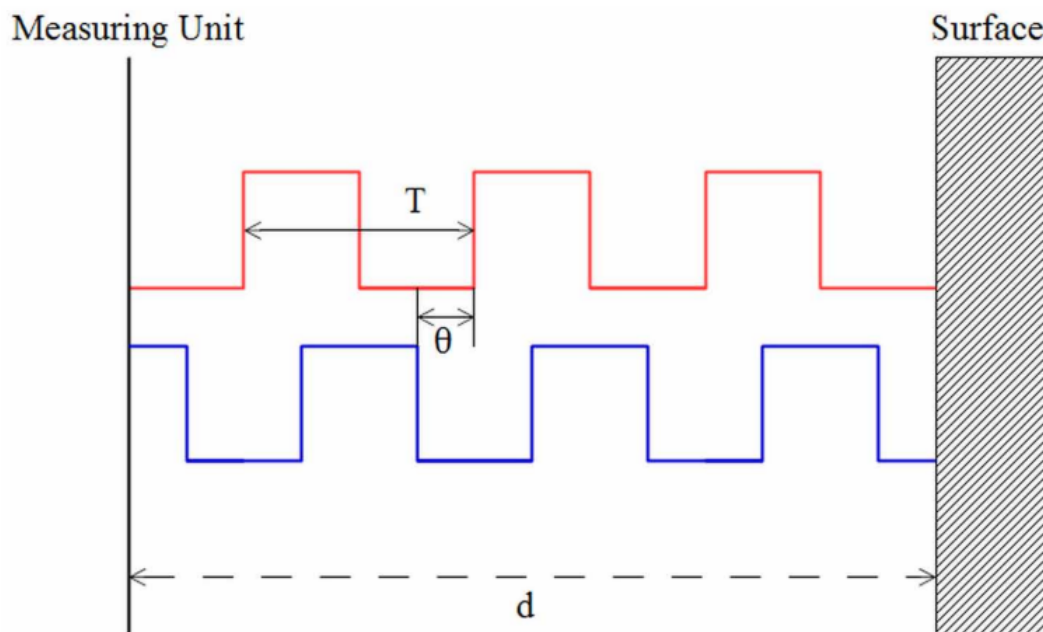


Figura 3.2: Medición de fase [15].

### 3.2.3. Triangulación

Como se ha mencionado, la triangulación es un método clásico de la topografía en el área de la geodesia y consiste en dividir y medir un área mediante triángulos. A partir de estos triángulos, las coordenadas del vértice del triángulo se determinan utilizando el lado opuesto de este vértice y los dos ángulos adyacentes de este lado. Los escáneres láser, que utilizan la triangulación, suelen constar de un transmisor y una unidad receptora.

El transmisor envía un rayo láser constante o pulsado y lo coloca en el campo de visión (FOV) del escáner láser. El rayo láser se refleja (total o difuso) en la superficie del objeto examinado y es medido por la unidad receptora. El uso del método de triangulación en sistemas de escáner láser puede ser de naturaleza estática o dinámica. Se utilizan funciones trigonométricas para el cálculo de coordenadas espaciales 3D. La principal ventaja de este método es su buena relación costo-beneficio mientras su principal desventaja es su comportamiento inconsistente en diferentes materiales y superficies. Un ejemplo de este método puede observarse en [17] donde se utiliza un escáner basado en triangulación activa para adquirir la textura de pavimento.

# CAPÍTULO 4

## MARCO TEÓRICO

### 4.1. Conceptos fundamentales

#### 4.1.1. Luz y espectro magnético

La luz visible es parte del espectro electromagnético, que va desde las microondas hasta los rayos gamma. Las ondas electromagnéticas, como su nombre lo indica son fluctuaciones de campos eléctricos y magnéticos, que pueden transportar energía de un lugar a otro [18]. La radiación electromagnética también puede ser descrita como una corriente de fotones; partículas que, aunque están cargadas de energía, no tienen masa; cada una viajando con propiedades parecidas a las de una onda a la velocidad de la luz. Al viajar como una onda, la luz puede definirse por su longitud de onda y frecuencia, propiedades que indican la cantidad de energía que transporta cada fotón.

Como se aprecia en Figura 4.1, la luz visible por otro lado no es diferente a otras partes del espectro electromagnético, con la excepción de que el ojo humano puede detectarla usando los fotodetectores químicos en sus retinas. Estos fotorreceptores convierten la luz visible en energía electroquímica y es procesada por el cerebro [20].

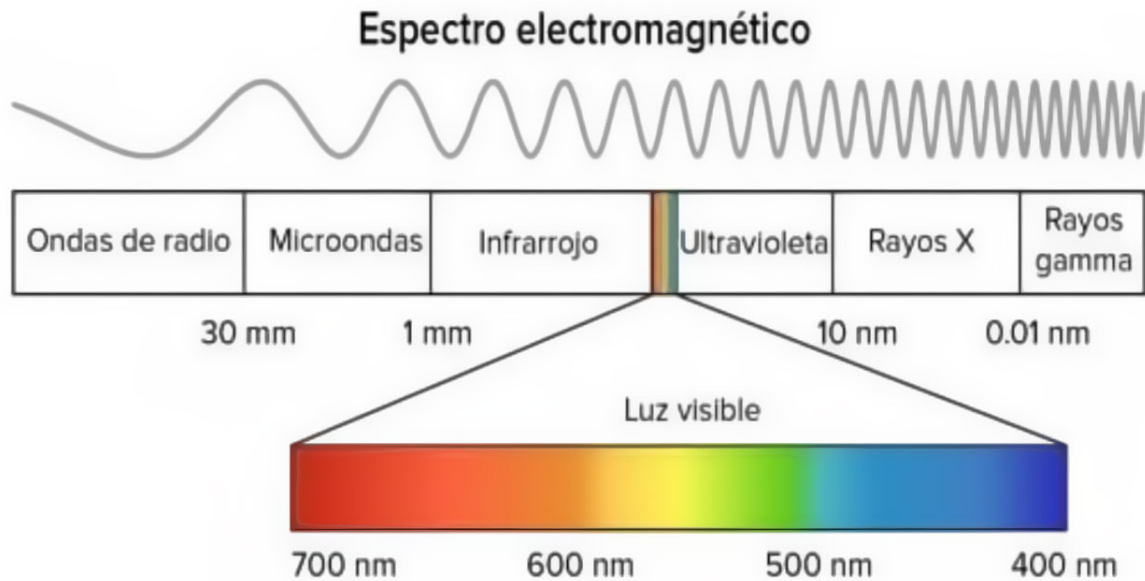


Figura 4.1: Entre más alta la frecuencia, más energía transporta el fotón.[19]

#### 4.1.2. La reflexión y el efecto fotoeléctrico

La ley de la reflexión dice que cuando la luz se colisiona con una superficie, esta rebota de cierta manera. En el caso de la reflexión especular, el ángulo en que choca, llamado ángulo de incidencia siempre es igual al ángulo que se refleja de la superficie, llamado ángulo de reflexión. Esto es, que la luz que incide en una dirección se redirige también en una sola dirección. En caso de la reflexión difusa sin embargo, la luz vuelve al medio del que provenía en muchas direcciones. El efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotones, impactan con los electrones de un metal arrancándolos de sus átomos como se muestra en Figura 4.2.

Existen dos tipos de efectos fotoeléctricos, interno y externo. En el caso del efecto fotoeléctrico externo, se emiten electrones libres desde una superficie mediante la absorción de fotones energéticos, se observa principalmente con metales dentro de un recinto al vacío y su rendimiento es generalmente menor al 50 %. En caso del efecto fotoeléctrico

interno, se observa principalmente en semiconductores, cuya menor opacidad hace que el efecto principal se produzca a una profundidad donde muy pocos electrones pueden escapar a la superficie. El proceso consiste en la absorción de un fotón energético que crea un par, un electrón y un hueco. Cuando el fotón tiene una energía mayor que el intervalo vacío de conducción de banda de materiales, los portadores de carga están libres para moverse en la banda de conducción. El electrón se mueve durante el proceso, dando origen a una corriente eléctrica [21]. Este fenómeno es aprovechado en las plantas que utilizan paneles solares usando el efecto fotoeléctrico interno, los cuales reciben la energía lumínica del sol transformándola en electricidad.

Heinrich Hertz, alrededor de 1887, descubrió este efecto en que, al irradiar una superficie metálica con luz de longitud de onda corta, podía producir emisión de electrones. Como en este fenómeno participan la luz y la electricidad, se le denominó efecto fotoeléctrico [22].

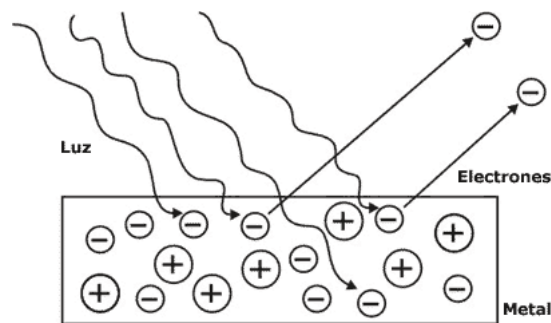


Figura 4.2: Efecto fotoeléctrico [23]

### 4.1.3. Fotoconducción

La fotoconductividad es definida como el cambio de la conductividad eléctrica de un material debido a la acción de radiación incidente. El primer reporte sobre fotoconductividad ocurrió en 1873 por W. Smith, quien observa que la resistividad del selenio disminuía por efecto de la radiación del sol. El principio básico sobre el que se basa la fotoconductividad es:

- Cuando un fotón de energía mayor o igual que la brecha del material incide sobre un semiconductor puede ser absorbido por el material, pasando un electrón a la banda de conducción, dejando un hueco (vacío) en la banda de valencia; estos dos portadores contribuyen al aumento de la conductividad del material. En este caso la conductividad es denominada intrínseca [24].
- En el caso de materiales con defectos, impurezas o cualquier tipo de distorsión puede ocurrir que un fotón de energía menor que la brecha del material sea absorbida y los electrones pasen a la banda de conducción o se formen huecos en la banda de valencia, en este caso solo se incrementa un tipo de portador. Este proceso da lugar a la fotoconductividad extrínseca [25].

### 4.1.4. Fotosensores

Un fotosensor es un componente electrónico que detecta la presencia de luz visible, luz infrarroja y/o luz ultravioleta. La mayoría de los fotosensores consiste de un semiconductor con propiedades fotoconductoras, en el que la conducción eléctrica varía dependiendo de la intensidad de la radiación que llega al material.

Los tipos de fotosensor más comunes son los fotodiodos, los fototransistores y los fotofets. Estos dispositivos son esencialmente los mismos diodos, transistor bipolar y FET comunes, exceptuando que los paquetes tienen ventanas transparentes que permiten a la

luz llegar a las uniones entre los materiales del semiconductor interno. Los transistores bipolares y FET proveen una amplificación adicional a sus capacidades de detección [26].

### **4.1.5. Acondicionamiento y adquisición de señales**

En instrumentación, el acondicionamiento de una señal es un proceso por el cual es posible convertir una señal de entrada, sea esta eléctrica o mecánica, en una señal de salida; una señal compatible con un proceso de control, que puede ser interpretada por otro sistema, y se puede manejar o usar para hacer cálculos o para obtener mediciones más precisas y con ello tener una idea más exacta del comportamiento del sistema bajo investigación. La señal puede ser, por ejemplo, demasiado pequeña para la medición, podría contener interferencia debido a señales de otros procesos.

### **4.1.6. Conversión de señal**

La función principal de acondicionar una señal consiste en obtener una señal medida como calor, corriente, intensidad de luz u otros tipos y transformarla en una señal eléctrica que sea compatible con un proceso. Debido a la enorme cantidad de procesos, aplicaciones industriales, tipos de sensores para hacer una medición, las señales obtenidas de estos sensores pueden no ser compatibles con el sistema de control y puede requerirse el convertirlas. Aunque casi todo sistema real tiene características no lineales, es decir, la relación entrada-salida no puede ser representada por una ecuación diferencial lineal, muchos sistemas pueden describirse razonablemente por modelos lineales al menos dentro de ciertos rangos de operación. Algunos acondicionadores de señales pueden linealizar la señal de salida (en otras palabras, si las señales proporcionadas por un sensor no corresponden de manera lineal con la magnitud física, el acondicionador lleva a cabo un proceso de interpretación de la señal). Este método se emplea para obtener una mayor exactitud, ya que no todos los sensores son totalmente lineales.

Por un lado, muchas veces se requiere incrementar la señal para procesamiento o digitalización. Para la amplificación se cuenta con dos métodos: incrementar la resolución de la señal de entrada o aumentar la relación señal-ruido [27]. Por otro lado, contrario a la amplificación, la atenuación de la señal se requiere cuando los voltajes a medir están fuera del rango posible del controlador elegido. Esta forma de acondicionamiento de la señal disminuye la amplitud de la señal de entrada de modo que la señal acondicionada quede dentro del rango permitido del controlador.

### **4.1.7. Filtrado**

Una función importante al acondicionar una señal es el filtrado. El filtrado consiste en filtrar el espectro de frecuencia de la señal conservando solo las frecuencias útiles y separar la señal útil del ruido o bloqueando todo el ruido. Los filtros pueden consistir en componentes pasivos, activos o en un algoritmo digital. Un filtro pasivo utiliza exclusivamente capacitores, resistencias e inductores con una ganancia máxima de uno mientras que, por otro lado, un filtro activo utiliza componentes pasivos combinados con componentes activos como amplificadores operacionales, resistencias y transistores que usan fuentes de poder externa y con ello pueden amplificar la señal de entrada [28]. También existen filtros digitales; filtros matemáticos utilizados para manipular una señal, utilizando componentes lógicos como circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC) o matrices de puertas programables (FPGA) [29].

### 4.1.8. Adquisición de datos

La adquisición de datos es el proceso en el que se convierten fenómenos o condiciones físicas en la vida real a datos que pueden ser comprendidos por una computadora. Figura 4.3 muestra un esquema con una representación de este proceso.

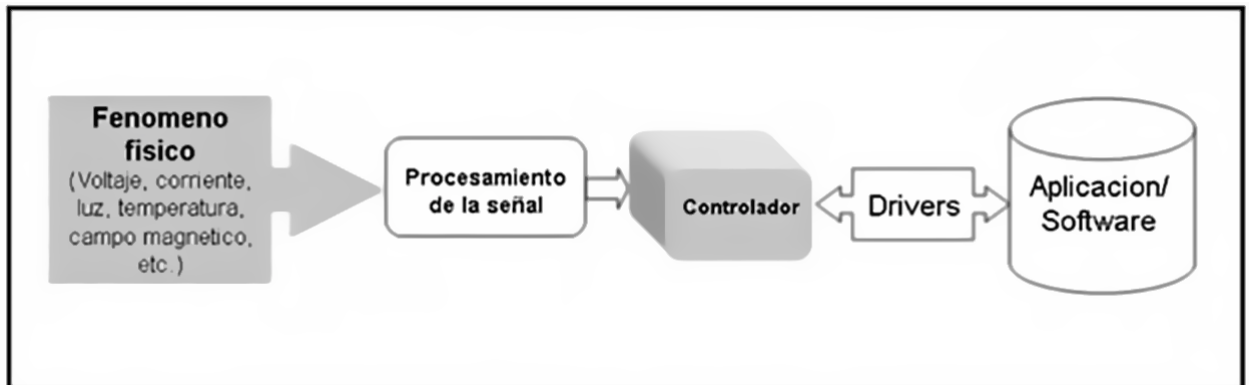


Figura 4.3: Diagrama de bloques de la adquisición de datos.

Las señales entonces deben transmitirse desde los sensores hasta el control del sistema, utilizando interfaces. La más simple de las interfaces podría considerarse como el alambre por el que se transmite una señal analógica, mientras que las interfaces más complejas pueden incluir un sinnúmero de aplicaciones como transmisión a distancia mediante ondas electromagnéticas o mediante la red de manera digital. Existen interfaces analógicas y digitales. Las interfaces analógicas típicas son señales de voltaje o corriente, estas señales varían de forma continua entre un límite superior e inferior. La principal ventaja de estos sistemas es el aprovechamiento de la relación señal-ruido del dispositivo. Las señales digitales por otro lado utilizan variables eléctricas de bien diferenciados que se alternan en el tiempo, transmitiendo de esa manera código. Cada nivel eléctrico representa un 1 o 0 [30].

### 4.1.9. Amplificador Operacional

El amplificador operacional (OpAmp) es el fundamental para muchos tipos de acondicionamiento de señal. El OpAmp es un amplificador de alta ganancia de corriente directa, con entradas diferenciales y usualmente una sola salida. En esta configuración el OpAmp produce una salida de potencial que es típicamente miles de veces más grande que la diferencia de potencial entre sus terminales. Uno de los usos mas comunes del OpAmp consiste en el amplificador no inversor (mostrado como diagrama en Figura 4.4) tiene la señal de entrada conectada a su entrada no inversora, por lo tanto se detecta una impedancia infinita en su entrada. El OpAmp entonces dirige corriente a  $R_F$  hasta que la entrada negativa esta al mismo nivel que  $V_{IN}$ . Entonces se puede usar la regla del divisor de voltage para calcular  $V_{out}$  [31].

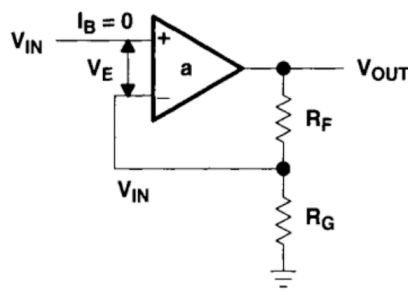


Figura 4.4: Amplificador no inversor.

### 4.1.10. El amplificador de transimpedancia

Un uso mas especifico del OpAmp son los amplificadores de transimpedancia (Trans-Impedance Amplifiers – TIA, mostrado como diagrama en Figura 4.5) que contrario al amplificador no inversor, son dispositivos que utilizan una señal de corriente y la transforman en una señal de tensión, manteniendo una ganancia específica a la señal. Esto es de vital importancia en numerosas aplicaciones de la óptica, ya que los medios para censar una señal luminosa son los fotodetectores pues en general, estos fotodetectores toman una

señal de intensidad de luz y generan una señal de corriente, que, operando correctamente, es proporcional a dicha intensidad. Sin embargo, muchos de los dispositivos de medición (como, por ejemplo, osciloscopios, conversores analógicos-digitales, analizadores de espectro, etc.) manejan señales de tensión, y que además poseen un cierto rango dinámico. Por otro lado, dependiendo de la aplicación en la cual se utilicen los fotodetectores, y sus especificaciones, las corrientes producidas por los mismos pueden ser considerablemente bajas (en el caso de los fotodiodos que se utilizan en este trabajo, en el orden de micro amperes). Es por esto que, además de transformar la señal de corriente en tensión, se debe amplificar.

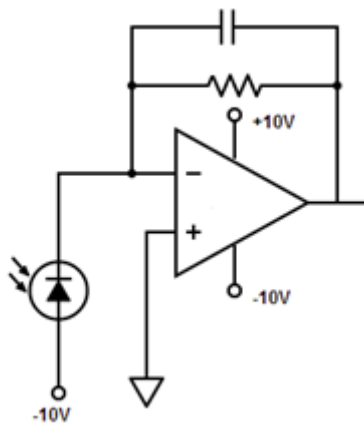


Figura 4.5: Amplificador de transimpedancia

## 4.2. Fotosensores

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores básicos que convierten luz en una corriente eléctrica, son similares a diodos regulares en su funcionamiento y su principal uso es como sensores de luz. La corriente se genera cuando un fotón es absorbido por un fotodiodo. Los fotodiodos están divididos en 4 tipos principales; PN, PIN, Avalanche y Schottky [32]. El fototransistor por otro lado es un dispositivo semiconductor capaz de detectar los niveles de luz y alterar la corriente que fluye entre su emisor y colector de

acuerdo a los niveles de luz que este recibe. Tanto los fototransistores como los fotodiodos pueden ser usados para detectar luz, pero el fototransistor es más sensible que el fotodiodo debido a la ganancia provista por ser un transistor bipolar.

En principio, se comparó la eficacia de diferentes sensores de luz teniendo en cuenta la rapidez con la que se puede tomar la medición y el rango de la luz visible que es posible para dicho sensor en específico detectar. De las opciones disponibles se determinó reducir hasta obtener dos sensores que cumplieran las características del proyecto. De estos, se compararon resultados usando un experimento desarrollado para medir la amplificación posible de ambos sensores combinados con dos diferentes amplificadores. Los sensores en cuestión son:

- Fotodiodo BPW21R, VISHAY
- Fototransistor TEPT5600, VISHAY

### **4.3. Amplificadores**

Como complemento a los fotosensores, se seleccionaron dos amplificadores para el experimento, seleccionados por su uso en experimentos parecidos o facilidad de uso. Estos amplificadores son:

- Amplificador OPA656, caracterizado por tener un buen diseño para proyectos ópticos y un bajo ruido en entradas. Como desventajas el uso de un empaque SOIC.
- Amplificador LM324N, caracterizado por su facilidad de uso y comercialidad, junto al empaque DIP que hace fácil la experimentación con el mismo.

## 4.4. Sistema de visión técnica (TVS)

El sistema TVS fue desarrollado para el uso del método de triangulación dinámica en la UABC, a continuación se muestran detalles de cada uno de los prototipos desarrollados.

### 4.4.1. TVS1

Desarrollado en el laboratorio de optoelectrónica y mediciones automatizadas de UABC, el TVS está constituido principalmente de un sistema de triangulación dinámica, haciendo uso de motores a pasos para la ubicación de una apertura de escaneo y un posicionador láser. El apuntador láser es dirigido a una sección específica del campo de visión, donde al incidir sobre la superficie de un objeto, este se refleja, para entonces ser capturado por la apertura de escaneo que gira sobre un motor DC en busca de esta reflexión láser [8]. Esto hace que la triangulación dinámica, que utiliza ángulos no fijos para el transmisor y receptor, tenga un rango de medición independiente del tamaño del sensor que se utiliza para la detección [1]. Mientras que este prototipo fue reemplazado por el TVS2 y TVS3 y no se encuentra en uso, el principio de funcionamiento del prototipo 2 y 3 es el mismo.

### 4.4.2. TVS2

El predecesor del sistema prototipo actual, el prototipo 2 o TVS2 consta de dos partes mecánicas principales, el posicionador láser y la apertura de escaneo. Al utilizar el principio de la triangulación dinámica, este sistema cuenta con ventajas en comparación a sistemas tradicionales basados en cámaras, estas partes mecánicas son movidas por motores a pasos, lo cual crea un campo de visión discreto. El uso de campos de visión discreto hace imposible el escaneo de objetos de menor tamaño a la resolución de este, siendo esta la principal desventaja del sistema. Como es mencionado en [1] este ejemplo de campo de visión puede ser observado en la Figura 4.6, la distancia entre los puntos  $p$  aumenta

mientras aumenta la distancia de escaneo  $d$ .

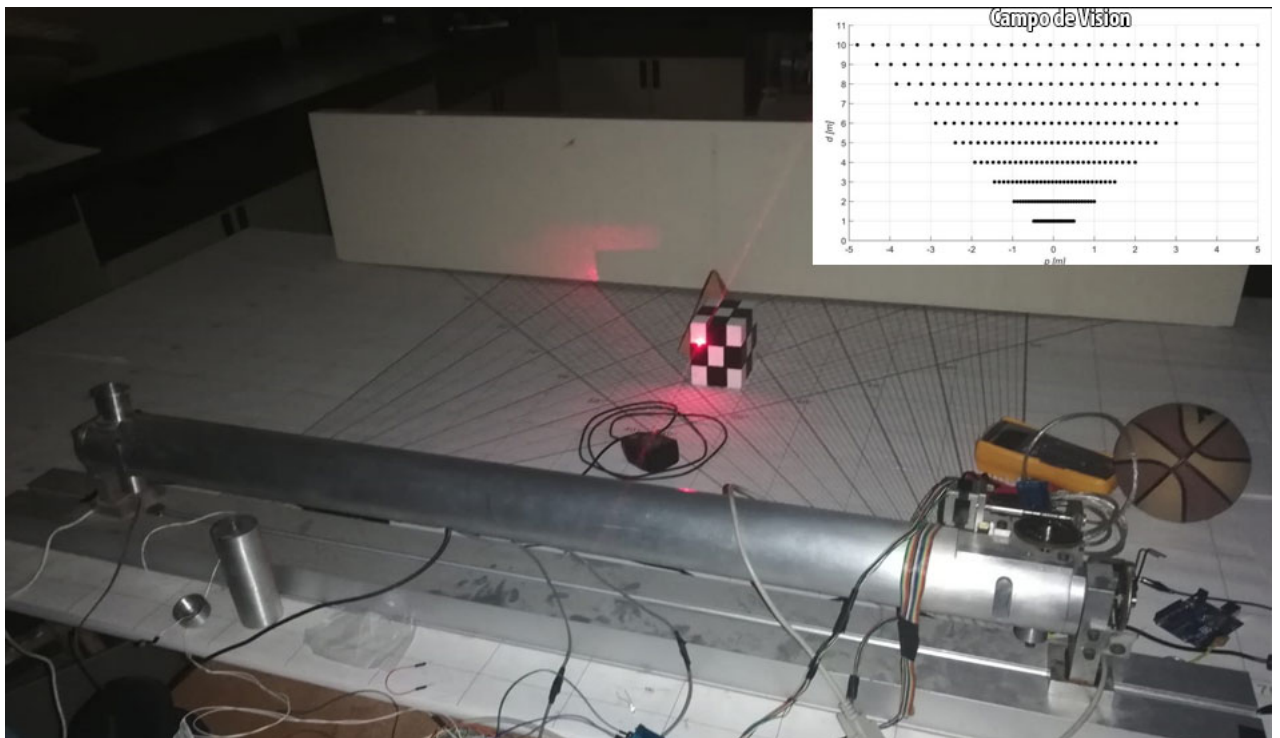


Figura 4.6: Campo de visión discreto de TVS2 [1].

#### 4.4.3. TVS3

El prototipo de TVS actual, o TVS3, por otro lado, utiliza un campo de visión continuo al recurrir al reemplazo de los motores a pasos usados en el prototipo 2 del TVS por motores de corriente directa siendo usados como servomotores mediante la adición de codificadores rotativos. Al hacer esto se ha aumentado considerablemente la resolución del sistema, obteniendo un campo de visión continuo, como se muestra en Figura 4.7 . Además, en una investigación anterior se ha desarrollado un sistema de control para estos servomotores para el posicionamiento exacto de estos motores, haciendo posible que, entre otras cosas, se abrieran posibilidades para un escaneo de objetos mas preciso [4].

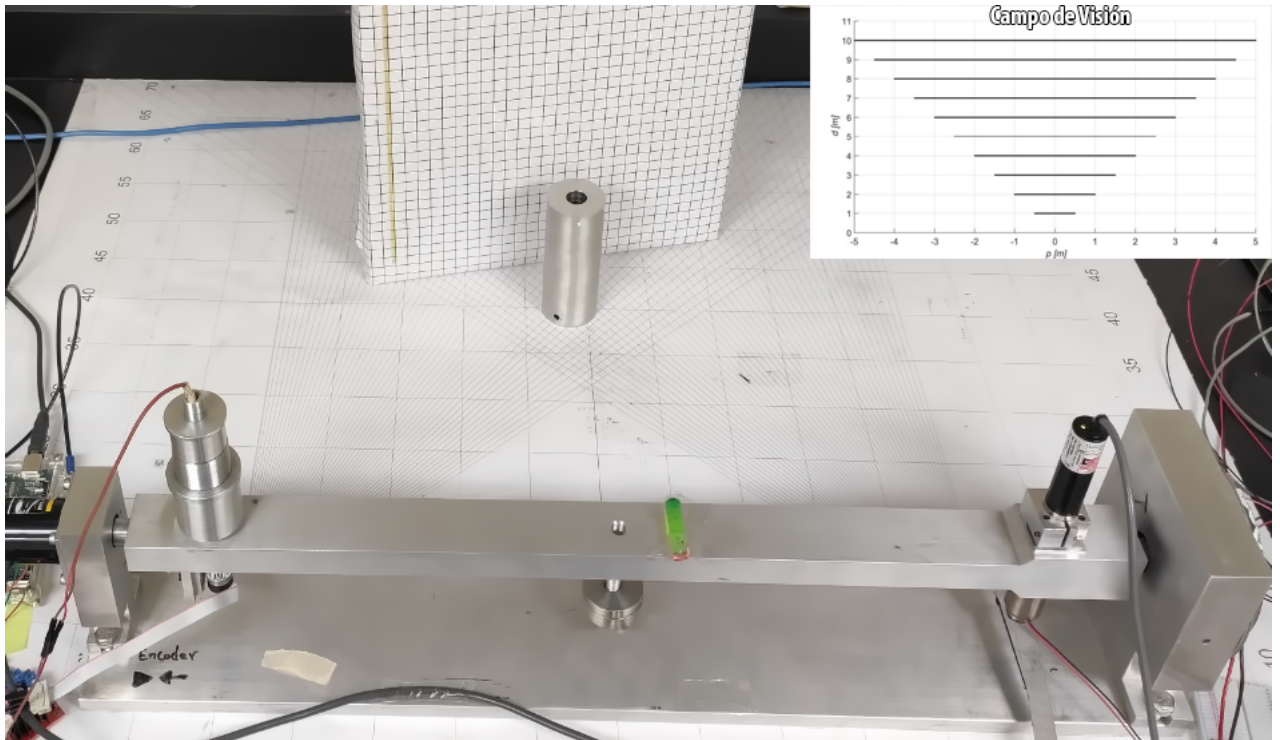


Figura 4.7: Campo de visión continuo de TVS3 [1].

## 4.5. Placas de control

En una investigación anterior [4] se desarrolló un sistema para el posicionamiento y control de velocidad de los actuadores del sistema TVS3. Con el propósito de la simplificación del sistema de control se ordenó la manufactura de placas de circuito impresas (Figura 4.8 y 4.9) que podrían ser incrustadas directamente en el microcontrolador Arduino MEGA en formato SHIELD. Adicionalmente se creó el diseño para el amplificador de transimpedancia en el mismo formato (ver Figura 4.10), esta diseño de placa impresa incluye dos niveles de amplificación seleccionables mediante un conector jumper y al mismo tiempo incluye conector de entrada y salida para el fotosensor. Trabajo futuro en este tema es unir todos los circuitos en una sola placa de control integrada.



# **CAPÍTULO 5**

## **METODOLOGÍA Y RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN**

La siguiente sección describe la metodología del desarrollo de los experimentos realizados para la identificación de componentes óptimos para el funcionamiento del circuito de amplificación y la subsecuente captura de datos de barrido.

### **5.1. Descripción de diseño de experimentos.**

La experimentación realizada adelante consistió en la toma de datos para la verificación de las características de la apertura de escaneo del TVS3 equipada con un amplificador de transimpedancia en diferentes configuraciones de amplificación según la distancia estimada, a medir, para ello, antes de esta experimentación se caracterizaron los sensores y amplificador de transimpedancia y se realizó una comparación de resultados con otros amplificadores propuestos. La caracterización de estos componentes se realizó primero con los fotosensores, midiendo directamente el reflejo de luz de láser de un objeto cilíndrico y verificando resultados. Una vez hecho esto se procedió a verificar estos resultados instalando los sensores dentro de la apertura de escaneo y tomar nuevas mediciones del

amplificador. Se seleccionó entonces el sensor de mayor eficacia. Los factores tomados en cuenta en la experimentación con la apertura de escaneo fueron el nivel de luz en laboratorio (medido con un luxómetro como 1076 Lux), la tensión de voltaje en el fotosensor utilizado, la resistencia utilizada para el amplificador de transimpedancia (que esta ligada directamente al nivel de amplificación), la velocidad a la que la apertura de escaneo gira y la distancia a la que el objeto a escanear se encontraba. La Tabla 5.1 muestra los factores que se tomaron en cuenta en la experimentación.

Tabla 5.1: Factores utilizados en experimentación

<b>Tabla de factores de experimentación.</b>		
<b>Efecto medido</b>	<b>Forma de medición</b>	<b>Cambio <math>\Delta</math> en factor</b>
Luz en laboratorio	Luz encendida y apagada	1076 Lux
Tensión en fotosensor	5 V a 7 V	1 V
Resistencia para amplificador	1 M $\Omega$ a 10 M $\Omega$	1 M $\Omega$
Velocidad de apertura de escaneo	300 rpm ó 500 rpm	
Distancia del objeto escaneado	10 a 50 cm	5 cm

## 5.2. Componentes y consideraciones involucradas en la experimentación

Para la amplificación de la señal láser reflejada por un objeto al ser capturada por la apertura de escaneo, y tomando en consideración las características identificadas como la longitud de la onda de luz de 518 nm emitida por el posicionador láser y el medio donde se harían mediciones, se identificaron las siguientes limitantes:

- La atenuación de la luz reflejada por el objeto a causa del medio.
- La reflexión en diferentes direcciones cuando la superficie donde se refleja la luz no es plana o si presenta textura.

- La detección accidental de luz ambiental por parte de la apertura de barrido al contar con un fotodetector en el mismo rango de detección que la luz de láser.
- Señales optoelectrónicas adquiridas por la apertura de escaneo de muy baja amplitud.

Para pruebas en inicio, se seleccionaron dos diferentes sensores para la detección de la luz, estos sensores fueron seleccionados debido a su alta sensibilidad al espectro electromagnético usado por el láser, teniendo la luz de láser un tamaño de 518 nm y los sensores un pico de sensibilidad de alrededor de 560 nm. Estos sensores son el fototransistor TEPT5600 del fabricante VISHAY [33] y el fotodiodo BPW21R de VISHAY [34].

Para la verificación del funcionamiento de estos sensores se utilizaron 2 diferentes tipos de amplificadores, con el fin de comparar resultados en los métodos de amplificación. Los amplificadores seleccionados para comparación fueron:

- Amplificador de transimpedancia (usando CI LM358)
- Amplificador de voltaje no inversor (usando CI LM358)

Para ello, con luz de laboratorio apagada se comprobó la sensibilidad de cada sensor con una ronda de mediciones del reflejo de la luz de láser contra un objeto metálico de manera directa, usando 5V en cada uno de los sensores fuera de la apertura de escaneo como se muestra en Figura 5.1 con el fin de tener mediciones base.

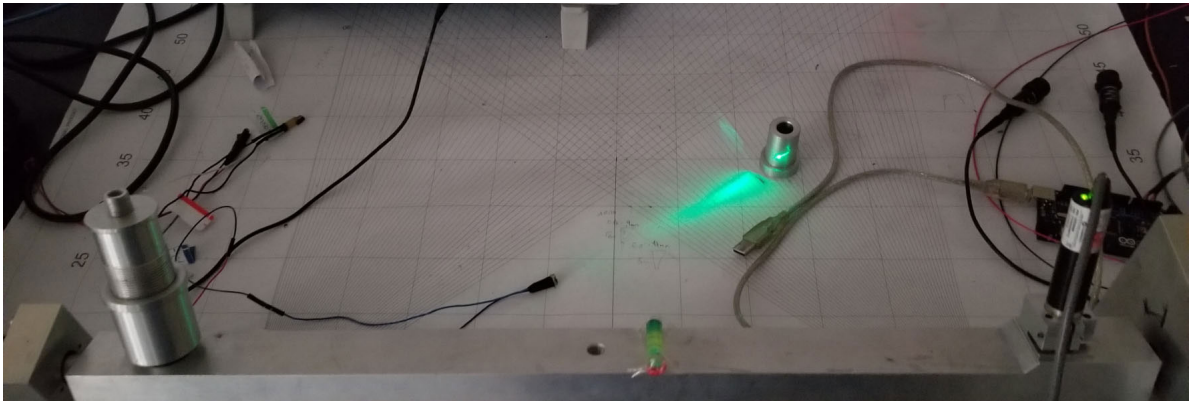


Figura 5.1: Medición directa a reflejo de luz de láser.

Encontrándose los resultados mostrados en la siguiente Tabla 5.2 y 5.3:

Tabla 5.2: Evaluación del fototransistor TEPT5600 sin amplificador.

<b>Sensor TEPT5600 en medición sin amplificador.</b>	
<b>Estado</b>	<b>Medición máxima (Cilindro metálico)</b>
Recibiendo señal optoelectrónica por reflejo	1.622V
Ruido ambiental	0.013V

Tabla 5.3: Evaluación del fotodiodo BPW21R sin amplificador.

<b>Sensor BPW21R en medición sin amplificador.</b>	
<b>Estado</b>	<b>Medición máxima (Cilindro metálico)</b>
Recibiendo señal optoelectrónica por reflejo	0.759V
Ruido ambiental	0.014V

Después de lo anterior se evaluó el comportamiento de estos sensores al instalarlos dentro de la apertura de escaneo (AE), para ello se utilizó un objeto cilíndrico metálico a 30 cm frente al sistema (Figura 5.2), mientras que se apuntó manualmente el espejo de la apertura de escaneo y el posicionador láser al objeto y se implementaron los dos circuitos de amplificación a modo de comparación teniendo los resultados que se muestran en tablas 5.4 y 5.5:

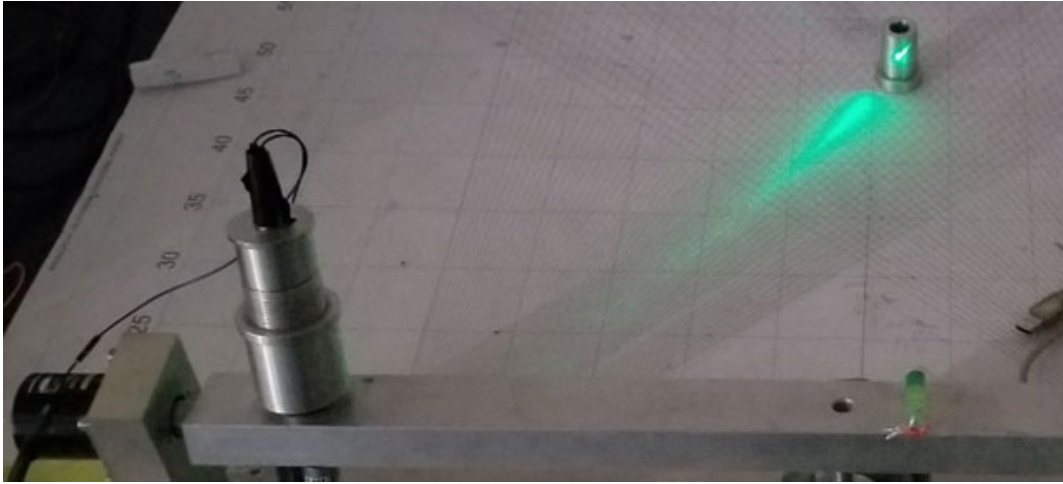


Figura 5.2: Medición de reflejo en apertura de escaneo.

Tabla 5.4: Evaluación de sensores recibiendo ruido ambiental en apertura de escaneo (Amplificador de transimpedancia resistencia 1 M $\Omega$ ).

<b>Medición de ruido ambiental.</b>		
<b>Sensor</b>	<b>Medición máxima</b>	<b>Amplificador usado</b>
BPW21R	0.013V	Amplificador de transimpedancia
BPW21R	0.013V	Amplificador no inversor 30x
TEPT5600	0.349	Amplificador de transimpedancia
TEPT5600	0.014V	Amplificador no inversor 30x

Tabla 5.5: Evaluación de sensores recibiendo señal optoelectrónica en apertura de escaneo (Amplificador de transimpedancia resistencia 1 M $\Omega$ ).

<b>Medición señal optoelectrónica recibida.</b>		
<b>Sensor</b>	<b>Medición máxima</b>	<b>Amplificador usado</b>
BPW21R	0.104V	Amplificador de transimpedancia
BPW21R	0.015V	Amplificador no inversor 30x
TEPT5600	2.960V	Amplificador de transimpedancia
TEPT5600	0.459V	Amplificador no inversor 30x

Basado en los datos anteriores se acordó el utilizar el sensor TEPT5600 por la ganancia adicional de voltaje obtenida con su uso. Adicionalmente la comparación con un amplificador no inversor determinó que mientras obtener una respuesta es posible, se determinó

que la curva de respuesta a la foto-corriente del sensor es lineal, mientras que la respuesta de voltaje no lo es, por lo tanto no es viable el uso de un amplificador de voltaje utilizando este sensor.

### 5.3. Caracterización de sensor y emisor

Se diseñó un experimento una vez seleccionado el sensor TEPT5600 en el que, con propósito de verificar la capacidad de amplificación de la señal optoelectrónica recibida en la apertura de escaneo, rango de funcionamiento del circuito construido y características de la apertura de escaneo. Para la toma de estas mediciones se decidió usar factores como la distancia, combinados con la luz ambiental con el objetivo de mediciones usando el amplificador y teniendo los motores del sistema en modo de reposo, utilizando el principio de triangulación estática apuntando hacia un objeto reflejante, con el propósito de verificar la amplificación del circuito (amplificador de transimpedancia) construido y la configuración del experimento a seguir.

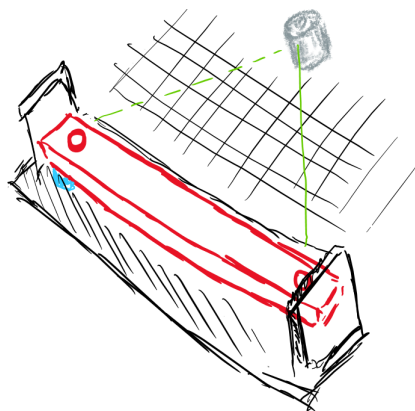


Figura 5.3: Experimentación en configuración de triangulación estática.

Las mediciones se realizaron cada 50 cm con las luces de laboratorio apagadas y encendidas, usando como objeto a detectar tanto un cilindro metálico como una pared blanca. Los espejos y la apertura de escaneo se alinearon para hacer las mediciones apuntando

el láser directamente al espejo de la apertura de escaneo y verificando que el haz de luz estuviera completamente al centro del espejo. Las mediciones se realizaron alineando el objeto en el centro del TVS, apuntando el láser al centro del objeto, esto se tomó como perfil para medir con la misma configuración los objetos cada vez.



Figura 5.4: Configuración del posicionamiento del sistema y objeto de medición en triangulación estática.

Estas mediciones fueron obtenidas usando el amplificador de transimpedancia apuntando los dos espejos del prototipo manualmente a un cilindro metálico y una pared blanca mediante un multímetro y con una iluminación ambiental de 1076 Lux. En Tabla 5.6 y 5.7 se puede observar la diferencia en las mediciones en pared con luz encendida y apagada, mientras que en 5.8 se muestra el ruido ambiental medido. Se debe considerar que en las tablas mostradas las mediciones mayores a 2 metros aumentan en amplitud, esto es debido a que la apertura de escaneo es expuesta a recibir interferencia por luz ambiental en posiciones en el eje Z mayores a 0 grados, un ejemplo gráfico de esto puede verse en Figura 5.5. Las figuras 5.6 y 5.7 muestran de forma de gráfica la comparación de las mediciones de voltaje de la apertura de escaneo al medir el reflejo de los dos objetos con interferencia de luz artificial en laboratorio y sin interferencia, esto usando el amplificador de transimpedancia.

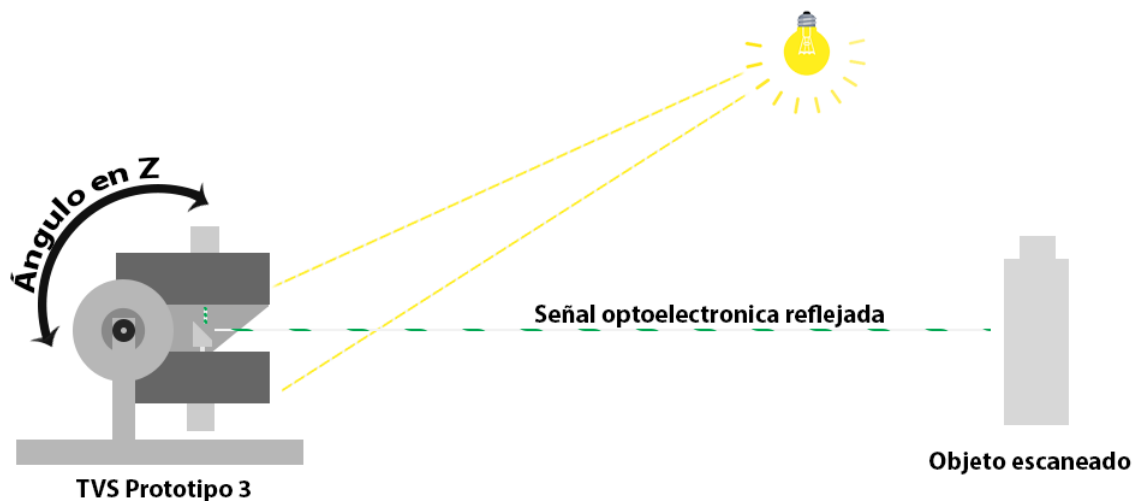


Figura 5.5: Apertura de escaneo es expuesta a interferencia por luz ambiental.

Tabla 5.6: Valores usando amplificador de transimpedancia, luces apagadas.

<b>Valores usando amplificador de transimpedancia, luces apagadas</b>		
<b>Estado</b>	<b>Medición máxima (Cilindro metálico)</b>	<b>Medición máxima (Pared)</b>
0.5m	2.957V	1.517V
1m	2.804V	1.406V
1.5m	1.850V	1.201V
2m	1.532V	0.960V
2.5m	1.102V	0.975V
3m	0.850V	0.719V

Tabla 5.7: Valores usando amplificador de transimpedancia, luces encendidas.

<b>Valores usando amplificador de transimpedancia, luces encendidas</b>		
<b>Estado</b>	<b>Medición máxima (Cilindro metálico)</b>	<b>Medición máxima (Pared)</b>
0.5m	3.504V	2.502V
1m	3.523V	2.416V
1.5m	2.950V	2.179V
2m	2.552V	1.970V
2.5m	2.719V	2.857V
3m	2.652V	3.045V

Tabla 5.8: Comparación de ruido ambiental (Sin luz de láser) usando luz artificial en laboratorio.

<b>Comparación de ruido ambiental (sin luz de láser)</b>	
<b>Estado ruido ambiental</b>	<b>Medición máxima</b>
Luz de laboratorio encendida	1.695V
Luz de laboratorio apagada	0.350V

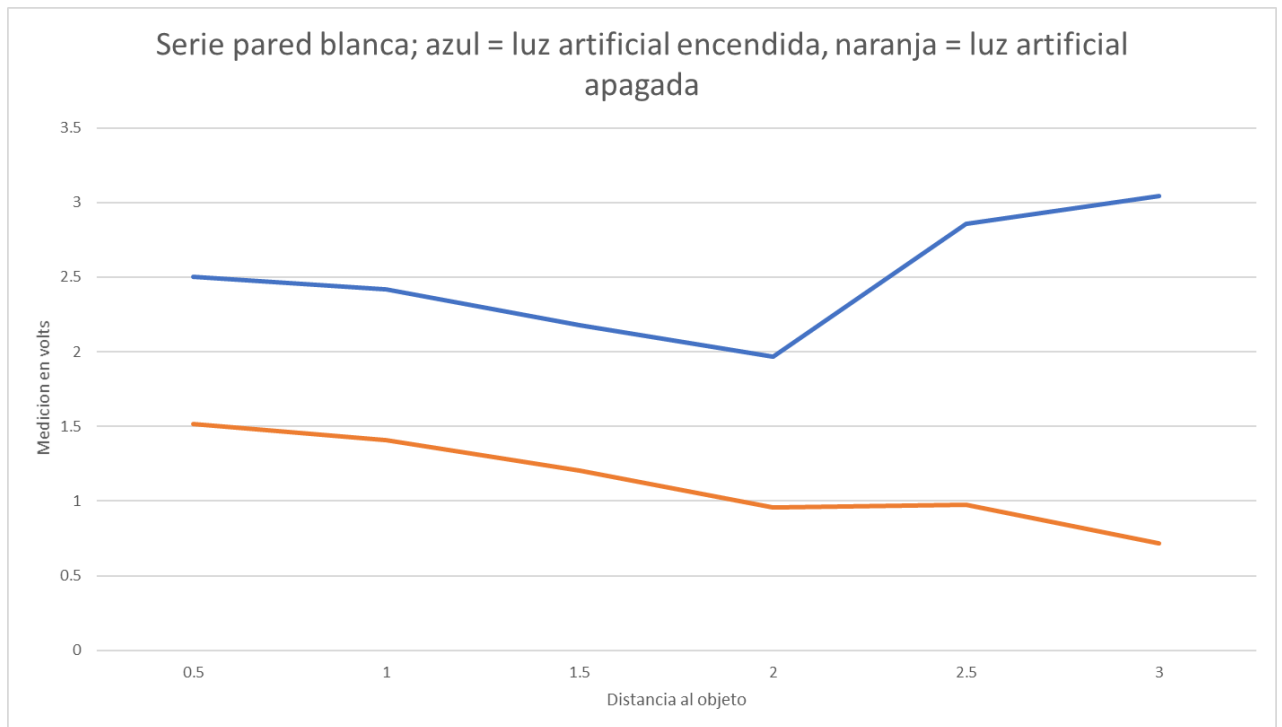


Figura 5.6: Comparación resultado de amplificador de transimpedancia con luz de láser reflejada de pared en blanca cuando la interferencia luz de laboratorio encendida y apagada, como mostrado en tablas.

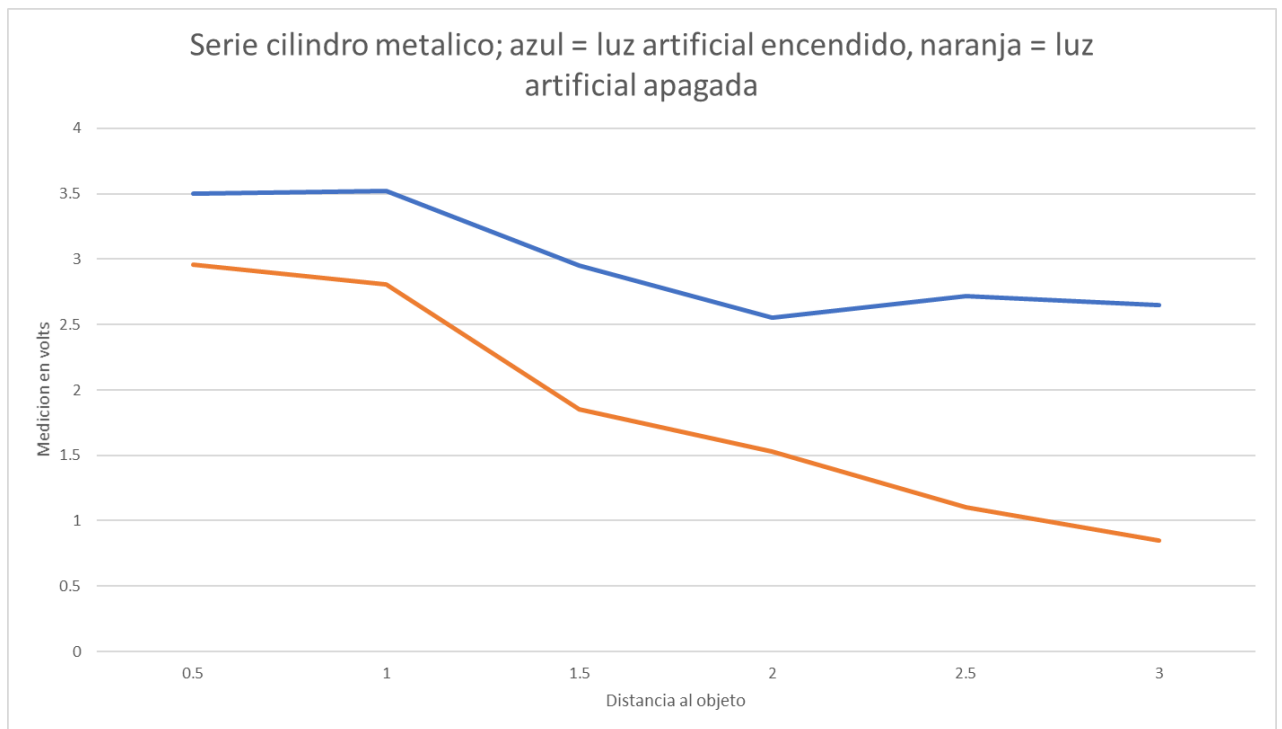


Figura 5.7: Comparación resultado de amplificador de transimpedancia con luz de láser reflejada en cilindro metálico cuando la interferencia luz de laboratorio encendida y apagada, como mostrado en tablas.

## 5.4. Experimentación

Para el barrido de un objeto se requiere del uso combinado de los dos sistemas, el sistema de manejo de los motores DC del posicionador láser y el posicionador del eje z, con el fin de ubicar el láser cada cierta cantidad de grados en el objeto con respecto al posicionador láser del sistema TVS y mantener la posición angular del eje z estable. Entonces, se obtiene un barrido. La captura de estas señales se realizó mediante el uso de un microcontrolador Arduino Mega utilizado para manejar el motor dedicado a la apertura de escaneo a una velocidad constante, esto al recibir un comando desde un equipo de cómputo, usando cada nuevo pulso de codificador rotativo para guardar 200 datos en un arreglo en memoria RAM, para después ser reportados al sistema de cómputo (Figura 5.8) . Los datos guardados son velocidad, ángulo en el que la apertura de escaneo se encontraba en ese momento y la lectura obtenida del sensor usando el ADC interno del microcontrolador.

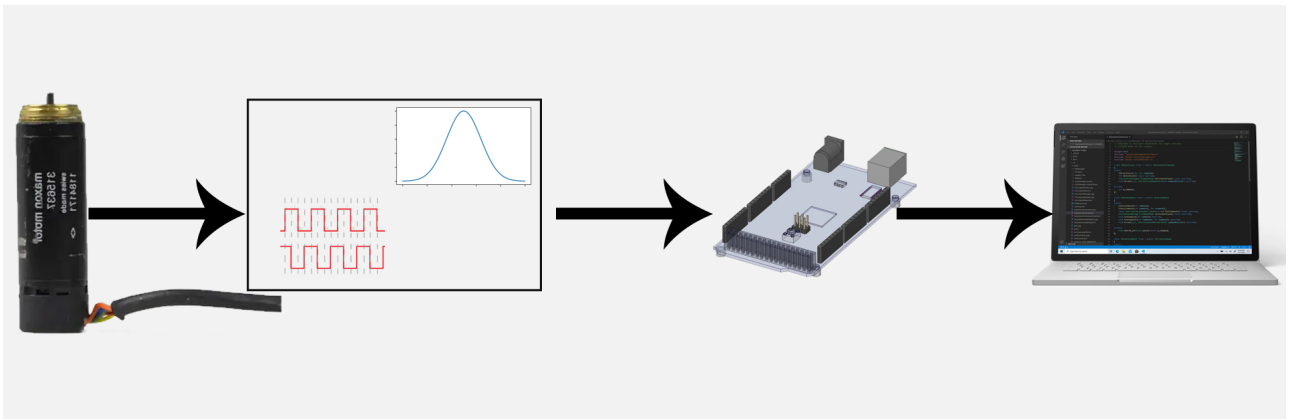


Figura 5.8: Obtención de señal Gaussiana.

Estas mediciones son transmitidas al equipo de cómputo mediante comunicación serial al terminar la captura de datos, para entonces cambiar el ángulo en el que apunta el posicionador láser y empezar la captura de nuevos datos.

En la siguiente sección se muestran la serie de pasos involucrados en la toma de datos al hacer un barrido y como estos son guardados antes de ser procesados para obtener una distancia y ángulo al objeto medido.

Como se ha mencionado anteriormente, para el escaneo de los objetos se debe mover la apertura de escaneo a una velocidad constante. Para estos propósitos se ha desarrollado un programa de interfaz entre el sistema de control de motores y al mismo tiempo recolecte la información de cada punto para el posterior procesamiento de los mismos. Esta herramienta programada en C utiliza un cliente-servidor para enviar paquetes mediante el protocolo UDP con una serie de coordenadas a una interfaz de control de los motores DC modificada para recibir como orden la serie de ángulos al cual el posicionador láser debe moverse. Estos ángulos son predefinidos por el usuario, así como el área o sección de esta que se planea escanear. Una vez posicionado el láser, se aumenta el ángulo por la cantidad predefinida al recibir confirmación de parte de la interfaz de control de los motores que el posicionador láser ha sido ubicado correctamente.

A continuación se muestra la respuesta en osciloscopio del amplificador de transimpedancia a diferentes secciones de un objeto cilíndrico siendo escaneado en Figura 5.9 a Figura 5.14. La primera Figura 5.9 muestra la posición del láser en el objeto en una sección que impide el reflejo de la luz hacia la apertura de escaneo, mientras que la Figura 5.10 muestra la señal obtenida mediante osciloscopio en ese momento. En Figura 5.11 se muestra la siguiente posición del láser, mostrando en Figura 5.12 del amplificador de transimpedancia tomada mediante osciloscopio. Figura 5.13 muestra una posición del láser central en el objeto escaneado, obteniendo una respuesta alta por parte del amplificador y siendo mostrada en Figura 5.14. Se debe considerar que en las figuras anteriores se puede apreciar ruido eléctrico causado por la construcción metálica del prototipo 3.

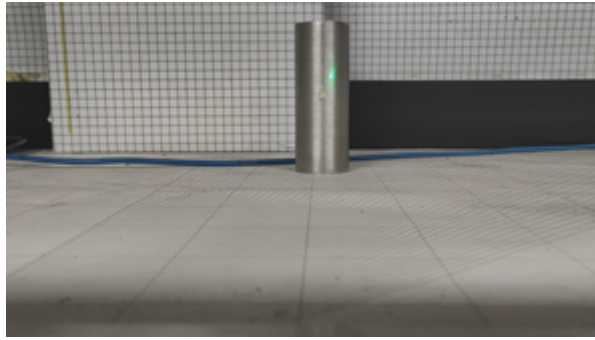


Figura 5.9: Posicionador de láser en ángulo 1

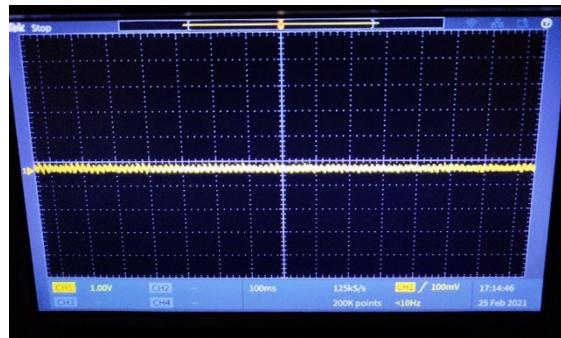


Figura 5.10: Señal Barrido láser 1

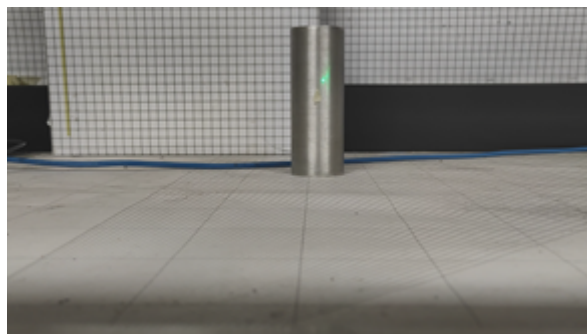


Figura 5.11: Posicionador de láser en ángulo 2

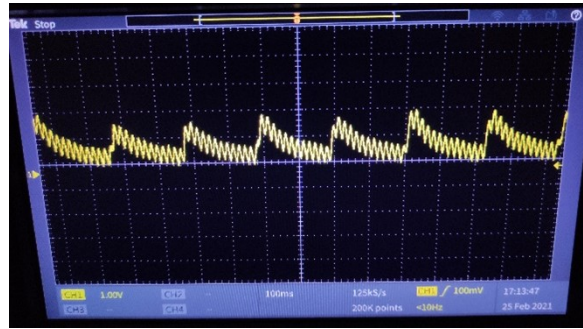


Figura 5.12: Señal Barrido láser 2

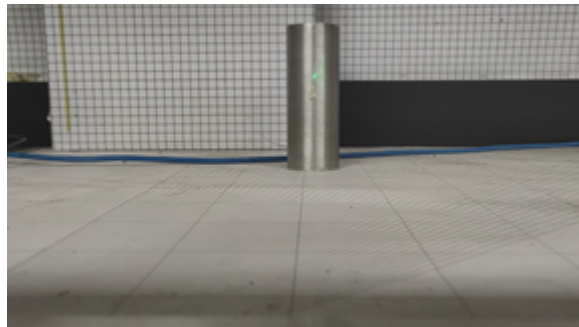


Figura 5.13: Posicionador de láser en ángulo 3

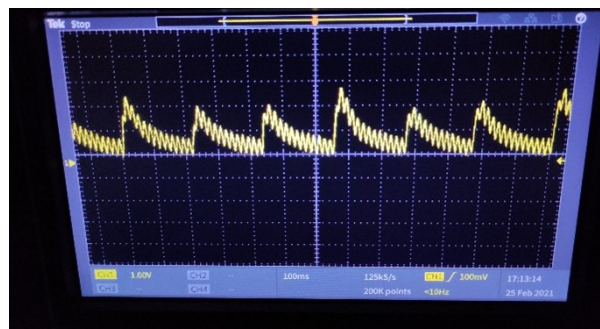


Figura 5.14: Señal Barrido laser 3

Una vez recibido la confirmación por parte de la interfaz de control de los motores DC, la herramienta hace uso de eventos para automáticamente pedir al microcontrolador que se haga un guardado de datos. Al guardar los datos el microcontrolador responde con una cadena de caracteres para entonces avanzar al siguiente ángulo automáticamente o de ser preferido al momento de presionar siguiente en la interfaz de control. Estos datos se guardan utilizando un prefijo predefinido por el usuario junto con el ángulo del posicionador láser en ese momento y otros datos útiles que son recopilados incluyendo el ángulo de la apertura de escaneo en cada medición, la velocidad de la apertura de escaneo y la medición del ADC. Estos datos son entonces guardados con la información del ángulo del posicionador láser.

Figura 5.15 muestra las opciones configurables de la interfaz para el guardado de datos, que incluye opciones para el puerto serial, el prefijo con el cual los datos serán guardados, el área al frente del sistema TVS que se escaneara y la cantidad de grados que el posicionador láser debe avanzar cada vez que una medición es terminada.

Para los propósitos de automatización de la ubicación se agregó una sección de recepción de coordenadas en la interfaz de control en LabView, para ello se utilizó la estructura de receptor UDP y un señalado de cambio de estado.

Al recibir un dato nuevo el controlador de los motores utiliza la información para generar una nueva trayectoria e iniciar el movimiento. Al terminar la trayectoria satisfactoriamente el control de motor activa el evento para detener el motor y utiliza el transmisor UDP para enviar una señal al equipo de guardado de datos, para que este genere el archivo con el escaneo de datos de ese ángulo y regrese las instrucciones para posicionar el láser en el siguiente punto planeado.

The interface is divided into several sections:

- Prefix:** A text input field containing "cm200rpmcada01gradps102cap".
- Scanning Range:** "Escanear de" with input "52", "A" with input "60", and "Cada" with input "0.05" followed by "Grados". Below are "Detener" and "Empezar" buttons.
- Serial Port Settings:** A panel with dropdown menus for "Port Name" (COM3), "Baud Rate" (19200), "Data Bits" (8), "Parity" (None), and "Stop Bits" (One).
- Control Buttons:** "Log", "Report", "Start", "Enviar", "Guardar", "Start listening", and "Stop listening".
- Display Fields:** "Grados" (322.8), "IP" (192.168.43.199), "Recibido" (Client:OK#322.800000), and "Enviar" (322.8).
- Data Log:** A scrollable text area showing a list of values:
 

```

value 185 = 755.00
value 186 = 1023.00
value 187 = 813.00
value 188 = 818.00
value 189 = 1023.00
value 190 = 859.00
value 191 = 745.00
value 192 = 873.00
value 193 = 1023.00
value 194 = 1018.00
value 195 = 857.00
value 196 = 766.00
value 197 = 772.00
value 198 = 1023.00
value 199 = 1007.00
speed220.00 PWM: 29.40 Ang: 101.25?? 2483.00
      
```

Figura 5.15: Opciones de Interfaz.

## 5.5. Búsqueda de señales de interferencia en mediciones.

Al recibir los primeros conjuntos de mediciones se encontró que la fase de potencia y control de los motores integrados en el sistema generan interferencia de manera que el cuerpo del prototipo TVS redirige dichas señales al sensor de luz, los controladores y la mesa misma donde se encuentra el sistema. Esto da como resultado una de dos señales que oscilan sin control como se muestra en Figura 5.16.

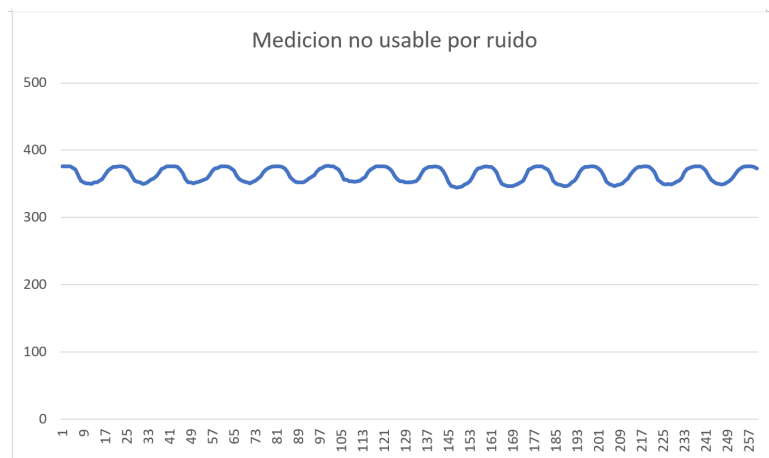


Figura 5.16: Medición no usable por ruido.

Con el propósito de obtener una señal usable del amplificador se agregó una conexión a tierra física al cuerpo principal del prototipo del TVS cumpliendo también como una medida de seguridad necesaria. Al repetir las mediciones se obtuvieron resultados que muestran un comportamiento más cercano a las mediciones esperadas.

Adicionalmente al amplificador y las modificaciones al cuerpo del prototipo, se desarrolló un programa de computo para la implementación de algoritmos para filtrado opcional de los datos de escaneo. Uno de los algoritmos de filtrado consiste en el uso de un filtro de Savitzky-Golay, que se basa en el cálculo de una regresión polinomial local (del grado  $k$ ), con al menos  $k+1$  puntos espaciados, para determinar el nuevo valor de cada punto. La principal ventaja de este método es su tendencia a preservar las características de la distribución inicial, tales como los máximos y mínimos relativos, así como el ancho de los

picos, que normalmente desaparecen con otras técnicas (como la media desplazada, por ejemplo). En Figura 5.17 se muestra un ejemplo de este filtro cuya principal desventaja es su tendencia a desplazar el pico de la señal como se muestra en 5.18 donde se muestran ejemplos de esto. Ambas figuras representan conjuntos de datos filtrado usando 2 puntos espaciados con polinomio de primer grado, contra uno sin filtrar.

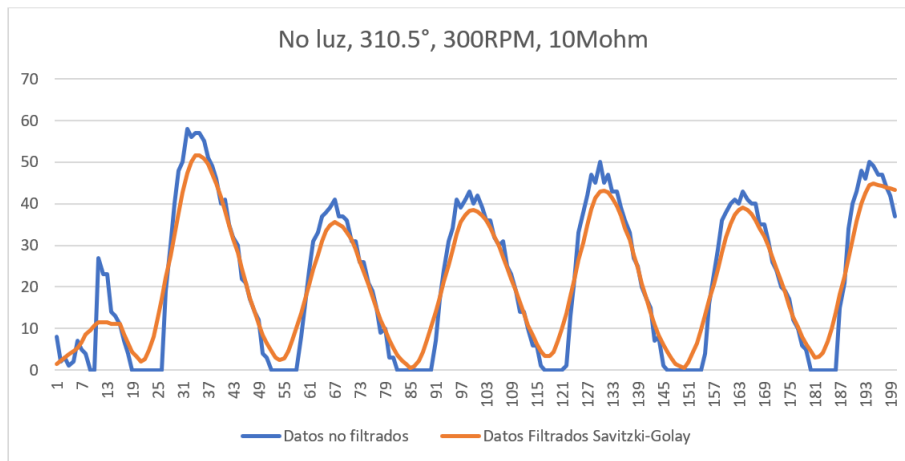


Figura 5.17: Filtro de Savitzki-Golay. No luz, 300 rpm.

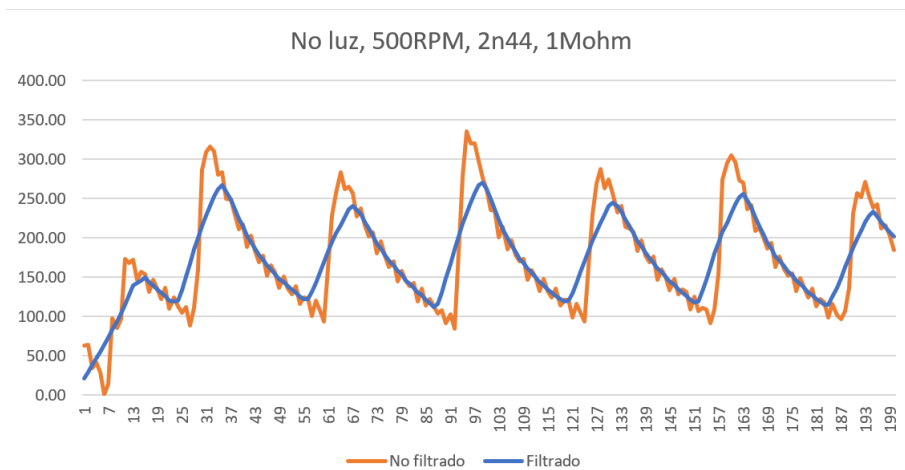


Figura 5.18: Filtro de Savitzki-Golay. No luz, 500 rpm.

Adicionalmente, se incorporó un filtro de paso bajo, el cual es un filtro que permite el paso de señales de una frecuencia especificada, además de atenuar las señales con una frecuencia mas alta que una frecuencia especificada. Cabe decir que la frecuencia exacta

a la que el filtro responde depende del diseño del filtro en particular. En Figura 5.19 se puede apreciar un filtrado de una de las señales de barrido usando una frecuencia de paso de 200Hz, una frecuencia de muestreo de 1000 y una pendiente de 0.5.

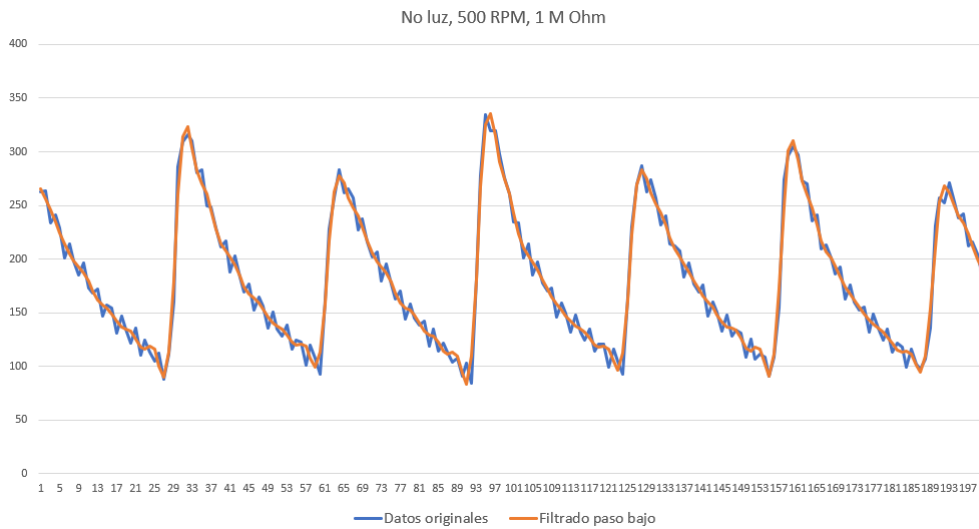


Figura 5.19: Filtro de paso bajo. No luz, 500 rpm.

Una vez la señal del conjunto de datos fue filtrada se utiliza un script en C donde se comparan los puntos del conjunto de datos con los puntos siguientes y anteriores y se genera una lista con los probables picos de la señal. Este proceso se repite hasta que la lista no se puede reducir más. Los puntos obtenidos son considerados los picos de la señal y son presentados como un output de consola, que se puede adaptar fácilmente a otra aplicación para la integración con otras partes del proceso de triangulación.

## 5.6. Triangulación y mapeado de objetos

Para la triangulación y mapeo de los objetos en particular, se requiere el uso de los datos obtenidos en filtro, usando los puntos identificados como picos de la señal, para entonces obtener el ángulo de la apertura de escaneo que se encuentra guardado con la información del escaneo y en ángulo del posicionador láser, también guardado con la información, para usar las ecuaciones de triangulación y que esto nos permita encontrar el punto en 3D y la distancia al objeto, que será agregado al registro en memoria para armar la nube de puntos. Esta sección trata con la generación de estos puntos 3D y la medición de distancias al sistema TVS, con la serie de pasos que el programa automatizado sigue y con el cálculo de puntos individuales usando las ecuaciones de triangulación.

A continuación se muestran resultados obtenidos del barrido de toma de datos al escanear automáticamente los ángulos de un objeto cilíndrico metálico usando diferentes factores para cambiar el comportamiento del sistema. De este objeto se tomaron mediciones cada 0.1 grados con el fin de crear una nube de puntos mientras que la apertura de escaneo se hizo girar en sentido horario o antihorario en una velocidad de 300 rpm o 500 rpm. Para propósitos de comprobación se ha tomado el punto de mayor intensidad que se desglosa en la siguiente sección y con motivo de sencillez en la cantidad de datos mostrados, cada ciclo completo o giro de la apertura de escaneo se dividió en 6 barridos de 32 espacios de los 200 reservados en memoria y de los cuales se utilizó el barrido central. Esta cantidad de muestras o de espacios reservados en memoria puede cambiarse en software.

La siguiente configuración corresponde a un objeto en forma de cilindro de material metálico y se muestra en la Tabla 5.9:

Tabla 5.9: Factores utilizados en experimentación

<b>Tabla de factores de experimentación.</b>	
<b>Efecto medido</b>	<b>Estado del efecto</b>
Luz en laboratorio	Luz apagada
Tensión en fotosensor	5 V
Resistencia para amplificador	1 MΩ
Velocidad de apertura de escaneo	300 rpm
Distancia del objeto escaneado	25 cm
Dirección de giro de AE	Horario

La Figura 5.20 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en este barrido (siendo serie azul los datos obtenidos directamente del ADC del microcontrolador, serie naranja datos aplicando filtrado de Savitzki-Golay, serie gris los datos filtrados mediante filtro de paso bajo y serie amarilla muestra el ángulo en que se encuentra la apertura de escaneo) y Tabla 5.10 muestra los valores:

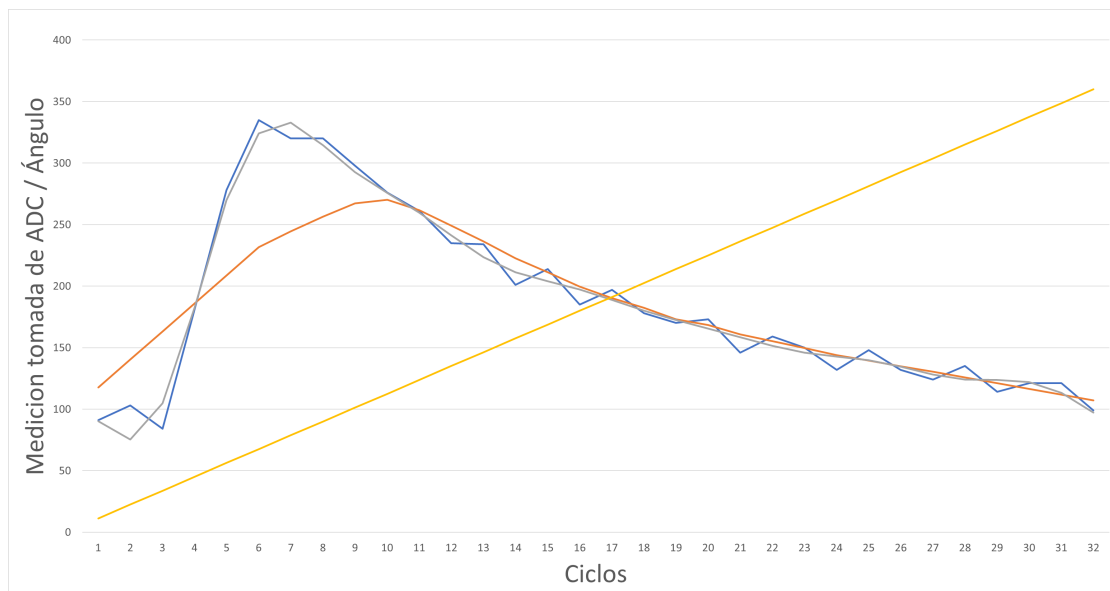


Figura 5.20: Gráfica barrido objeto 25 cm.

Tabla 5.10: Tabla de datos.

Ángulo AE (Grados)	Medición (Registro de ADC)	Velocidad (rpm)
11.25	91	320
22.5	103	320
33.75	84	320
202.45	181	320
56.25	278	300
67.5	335	300
78.75	320	300
90	320	300
101.25	298	300
112.5	276	300
123.75	261	300
135	235	300
146.25	234	300
157.5	201	300
168.75	214	300
180	185	300
191.25	197	300
202.5	178	300
213.75	170	300
225	173	300
236.25	146	300
247.5	159	300
258.75	150	300
270	132	300
281.25	148	300
292.5	132	300
303.75	124	300
315	135	300
326.25	114	300
337.5	121	300
348.75	121	300
360	99	300

Se determino que el pico de la señal coincide con 67.5 grados en AE y 31 grados en posicionador láser. Se determino además mediante (7) que la distancia al objeto era de 24.05 cm.

La siguiente configuración corresponde a un objeto en forma de cilindro de material metálico y se muestra en la Tabla 5.11:

Tabla 5.11: Factores utilizados en experimentación

<b>Tabla de factores de experimentación.</b>	
<b>Efecto medido</b>	<b>Estado del efecto</b>
Luz en laboratorio	Luz apagada
Tensión en fotosensor	5 V
Resistencia para amplificador	1 M $\Omega$
Velocidad de apertura de escaneo	300 rpm
Distancia del objeto escaneado	30 cm
Dirección de giro de AE	Horario

La Figura 5.21 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en este barrido (siendo seria azul los datos obtenidos directamente del ADC del microcontrolador, serie naranja datos aplicando filtrado de Savitzki-Golay, serie gris los datos filtrados mediante filtro de paso bajo y serie amarilla muestra el ángulo en que se encuentra la apertura de escaneo) y Tabla 5.12 muestra los valores:

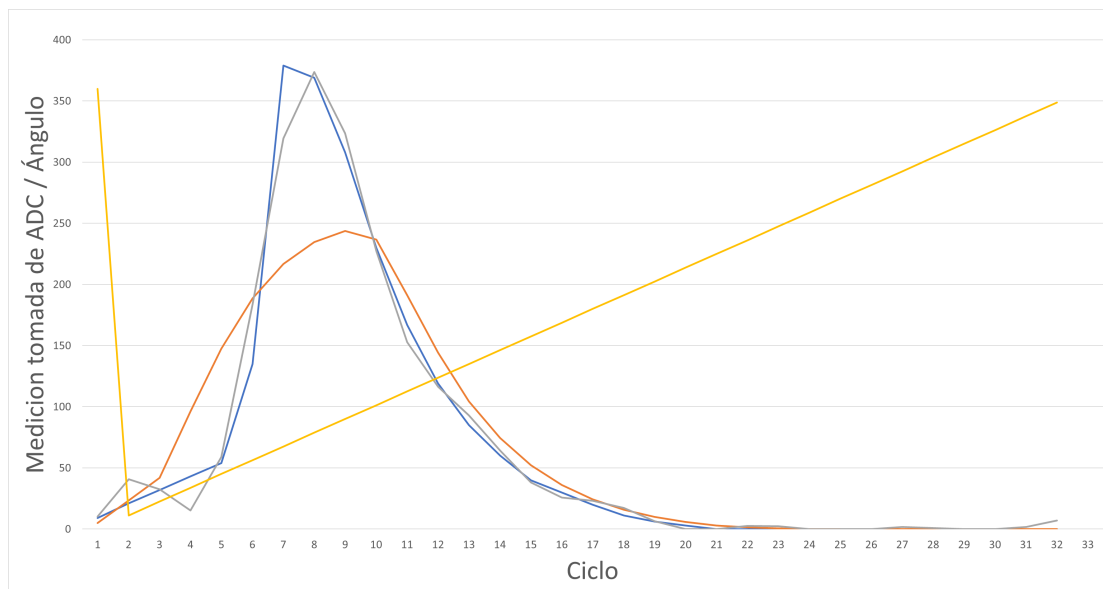


Figura 5.21: Gráfica barrido objeto 30 cm.

Tabla 5.12: Tabla de datos.

Ángulo AE (Grados)	Medición (Integer de ADC)	Velocidad (rpm)
360	9	260
11.25	21	260
22.5	32	260
33.75	43	260
45	54	260
56.25	135	260
67.5	379	260
78.75	369	260
90	308	260
101.25	230	260
112.5	167	260
123.75	119	260
135	85	260
146.25	60	260
157.5	40	260
168.75	30	260
180	20	260
191.25	11	260
202.5	6	260
213.75	3	260
225	0	260
236.25	0	260
247.5	0	260
258.75	0	340
270	0	340
281.25	0	340
292.5	0	340
303.75	0	340
315	0	340
326.25	0	340
337.5	0	340
348.75	0	340

Se determino que el pico de la señal coincide con 67.5 grados en AE y 40 grados en posicionador láser. Se determino además mediante (7) que la distancia al objeto era de 31.13 cm.

La siguiente configuración corresponde a un objeto en forma de cilindro de material metálico y se muestra en la Tabla 5.13:

Tabla 5.13: Factores utilizados en experimentación

<b>Tabla de factores de experimentación.</b>	
<b>Efecto medido</b>	<b>Estado del efecto</b>
Luz en laboratorio	Luz apagada
Tensión en fotosensor	5 V
Resistencia para amplificador	1 MΩ
Velocidad de apertura de escaneo	300 rpm
Distancia del objeto escaneado	10 cm
Dirección de giro de AE	Anti Horario

La Figura 5.22 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en este barrido (siendo serie azul los datos obtenidos directamente del ADC del microcontrolador, serie naranja datos aplicando filtrado de Savitzki-Golay, serie gris los datos filtrados mediante filtro de paso bajo y serie amarilla muestra el ángulo en que se encuentra la apertura de escaneo) y Tabla 5.14 muestra los valores:

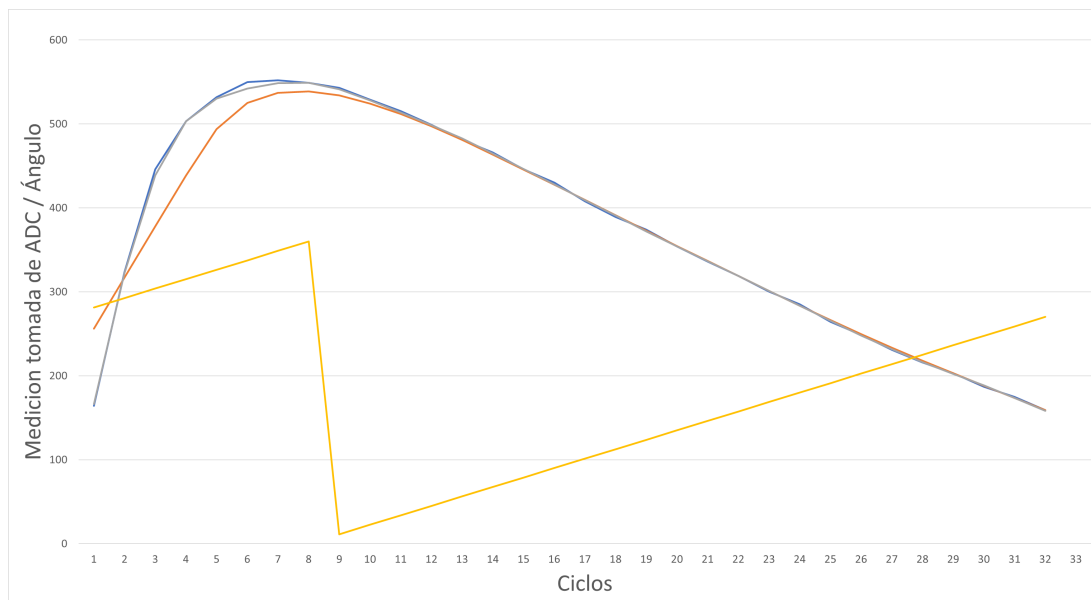


Figura 5.22: Gráfica barrido objeto 10 cm.

Tabla 5.14: Tabla de datos.

Ángulo AE (Grados)	Medición (Integer de ADC)	Velocidad (rpm)
78.75	164	300.00
67.5	323	300.00
56.25	446	300.00
45	503	300.00
33.75	532	300.00
22.5	550	300.00
11.25	552	300.00
0	549	280.00
348.75	543	300.00
337.5	529	300.00
326.25	515	300.00
315	499	300.00
303.75	481	300.00
292.5	466	300.00
281.25	446	300.00
270	430	300.00
258.75	408	300.00
247.5	389	300.00
236.25	374	300.00
225	354	300.00
213.75	336	280.00
202.5	319	280.00
191.25	300	280.00
180	285	320.00
168.75	264	320.00
157.5	249	320.00
146.25	231	320.00
135	216	320.00
123.75	203	320.00
112.5	187	320.00
101.25	175	320.00
90	159	320.00

Se determino que el pico de la señal coincide con 11.25 grados en AE y 70.6 grados en posicionador láser. Se determino además mediante (7) que la distancia al objeto era de 9.69 cm.

La siguiente configuración corresponde a un objeto en forma de cilindro de material metálico y se muestra en la Tabla 5.15:

Tabla 5.15: Factores utilizados en experimentación

<b>Tabla de factores de experimentación.</b>	
<b>Efecto medido</b>	<b>Estado del efecto</b>
Luz en laboratorio	Luz apagada
Tensión en fotosensor	5 V
Resistencia para amplificador	10 MΩ
Velocidad de apertura de escaneo	300 rpm
Distancia del objeto escaneado	65 cm
Dirección de giro de AE	Horario

La Figura 5.23 muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en este barrido (siendo serie azul los datos obtenidos directamente del ADC del microcontrolador, serie naranja datos aplicando filtrado de Savitzki-Golay, serie gris los datos filtrados mediante filtro de paso bajo y serie amarilla muestra el ángulo en que se encuentra la apertura de escaneo) y Tabla 5.16 muestra los valores:

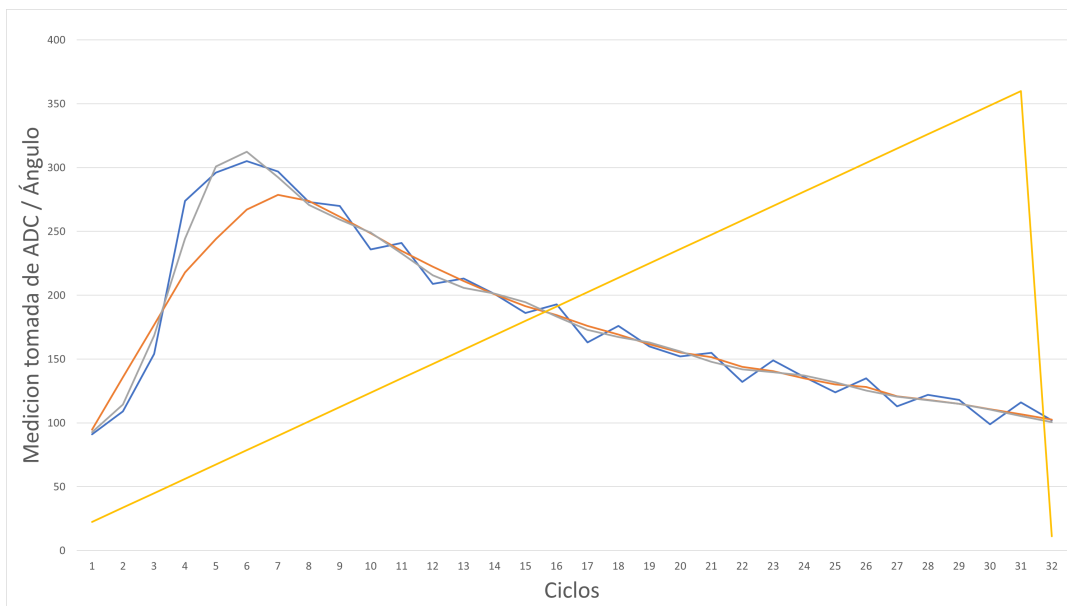


Figura 5.23: Gráfica barrido objeto 65 cm.

Tabla 5.16: Tabla de datos.

Ángulo AE (Grados)	Medición (Integer de ADC)	Velocidad (rpm)
22.5	91	280.00
33.75	109	280.00
45	154	280.00
56.25	274	300.00
67.5	296	300.00
78.75	305	300.00
90	297	300.00
101.25	273	280.00
112.5	270	280.00
123.75	236	300.00
135	241	300.00
146.25	209	300.00
157.5	213	300.00
168.75	201	300.00
180	186	300.00
191.25	193	300.00
202.5	163	300.00
213.75	176	300.00
225	160	300.00
236.25	152	300.00
247.5	155	300.00
258.75	132	300.00
270	149	280.00
281.25	136	300.00
292.5	124	300.00
303.75	135	320.00
315	113	320.00
326.25	122	320.00
337.5	118	320.00
348.75	99	320.00
360	116	320.00
11.25	102	300.00

Se determino que el pico de la señal coincide con 78.75 grados en AE y 59.4 grados en posicionador láser. Se determino además mediante (7) que la distancia al objeto era de 64.26 cm.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

El uso de un amplificador de transimpedancia con el motivo la ampliación de las señales optoelectrónicas que llegan a una apertura de escaneo la cual recibe una señal reflejada de un objeto de interés es un enfoque novedoso que debe continuar expandiendo su desarrollo a futuro, para ser incorporado y expandir las capacidades de los prototipos actuales o futuros. Según el estado del arte el uso de este tipo de amplificador para una aplicación similar a esta no existe, esto conlleva que es la primera vez que se utiliza esta tecnología a los sistemas de visión técnica basados en la triangulación dinámica. La falta de uso de estos amplificadores podría ser debido al comportamiento observado en el que el tiempo de desaturación depende considerablemente del nivel de amplificación que se requiere, por lo que la velocidad de respuesta del sistema baja considerablemente. A pesar de esto, el tiempo de respuesta parece ser suficiente para el uso y correcto funcionamiento de la apertura de escaneo, para respaldar esto se puede usar como evidencia el hecho de que en esta investigación se llegó a usar una velocidad máxima de 500 rpm.

Además de lo anterior, el uso de un amplificador de transimpedancia causó que el rango de sensibilidad del sistema en el prototipo donde se usó fuera expandido notoriamente en comparación con prototipos anteriores. Se puede recomendar el uso de un nivel de aplicación bajo para objetos que requieren rapidez en el escaneo de sus caras, mientras

que se puede usar un escaneo que tome mas tiempo en situaciones en las que el rango de sensibilidad adicional sea importante. Una novedad aplicada al ramo por el uso de un amplificador de transimpedancia es la capacidad adquirida de obtener la información de distribución energética de los objetos escaneados, es claro que el estudio de esta nueva información proporcionada puede ramificarse en múltiples investigaciones. Una posibilidad de trabajos futuros puede incluir el análisis de esta información de distribución energética, la cual puede proporcionar información como la textura del objeto, el material del cual esta hecho y hasta el color de su superficie, además de técnicas avanzadas para la detección de los centros energéticos y picos de las señales.

# CAPÍTULO 7

## PRODUCTOS ACADÉMICOS

Artículo de Congreso:

Alba Corpus, I. Y.; Lars Lindner; Oleg Sergiyenko; Mykhailo Ivanov; Wendy Flores Fuentes; Julio C. Rodriguez; Daniel Hernandez Balbuena; Fabián N. Murrieta Rico; Alexander Gurko (2020, June). “Transimpedance Amplifier for Laser Scanning System Range Extension,” 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2020, pp. 1421-1426, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152487.

# Transimpedance Amplifier for Laser Scanning System Range Extension

Ivan Yeniseysk Alba Corpus, Lars Lindner, Oleg Sergiyenko, Mykhailo Ivanov.  
Department of optoelectronics and automated measurements, Engineering Institute,  
Autonomous University of Baja California

Wendy Flores Fuentes, Julio C. Rodríguez, Daniel Hernandez Balbuena, Fabián N. Murrieta Rico.  
Engineering faculty, Autonomous University of Baja California.  
Mexicali, Baja California, Mexico.

Alexander Gurko.  
Kharkov National Automobile and Highway University

**Abstract-** The present paper shows the experimentation results and the steps taken for the detection of presence and distance of objects using a low power laser scanning system developed at the Engineering Institute of UABC, called the Technical Vision System (TVS). The obtained experimental results, using two different sensors and forms of amplification are shown. This TVS has been developed as part of multiple thesis research done previously [1]; however, it has been presenting problems detecting objects relatively close to the system.

**Keywords-** Amplification, transimpedance amplifier, laser scanner, technical vision system.

## I. INTRODUCTION.

From machine vision, laser scanning systems are widely used in industrial applications and research such as robotics, construction and surveying, where vision systems to obtain 3D coordinates of the surroundings is essential and where, contrary to camera-based vision systems, laser scanning systems will work under zero light conditions.

A prototype of a novel Technical Vision System (TVS prototype No.3, Fig.1) has been developed at the Engineering Institute of UABC for object detection, using the Dynamic Triangulation measuring principle [1]. The TVS consists of three main components moved by DC motors of which the precise positioning of all three was accomplished in previous research using rotary encoders, replacing previously used stepper motors and resulting in a continuous field-of-view [2]. The applications of this TVS can be extended, for example for to mobile robot navigation, scanning of static or dynamic structures.

The TVS currently uses a low power green laser, which is currently difficult to detect, using the available sensors installed in the system, even when measuring objects that are less than 30cm away from the system. Coupled with the low availability of sensors with high sensitivity for green light and interference in the sensors caused by natural and artificial light going from 400nm to 700nm, which is in the same spectrum of sensibility for the sensors, which has a wavelength of peak sensitivity of 565nm and the laser light which is 518nm, makes it necessary to develop a filter, amplifier and algorithm to condition the optical signal received by the system.



Fig 1. TVS system and components.

Measurements taken with the current available sensors show that the output current is too low to be measured and that these sensors only output a specific amount of voltage and current depending on the received light, without it being possible to augment the output by changing the voltage supply. Thus, conditioning of the signal is needed and an amplification

# Referencias

- [1] Lars Lindner and Oleg Sergiyenko. *Theoretical method to increase the speed of continuous mapping in a three-dimensional laser scanning system using servomotors control. [recurso electrónico].* 2017., 2017.
- [2] Ashley A Manzoor, Lars H Lindner, Chelsea D Landon, Ji-Young Park, Andrew J Simnick, Matthew R Dreher, Shiva Das, Gabi Hanna, Won Park, Ashutosh Chilkoti, et al. Overcoming limitations in nanoparticle drug delivery: triggered, intravascular release to improve drug penetration into tumors. *Cancer research*, 72(21):5566–5575, 2012.
- [3] Julio Cesar Rodríguez Quiñonez and Oleg Sergiyenko. *Medición de parámetros biométricos por medio de barridos laser dinámicos. [recurso electrónico].* 2013.
- [4] Miguel Reyes García, Lars Lindner, and Oleg Sergiyenko. *Método teórico para disminuir el error de posicionamiento en un sistema de barrido láser usando un controlador digital embebido y motores de corriente directa. [recurso electrónico].* 2019.
- [5] Luis C. Basaca-Preciado, Julio C. Rodriguez-Quiñonez, Oleg Segiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Paolo Mercorelli, and Fabian N. Murrieta-Rico. Accuracy improvement of vision system for mobile robot navigation by finding the energetic center of laser signal. In *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 2406–2411, 2014.

- [6] S. Fuada, A. P. Putra, Y. Aska, and T. Adiono. Trans-impedance amplifier (ha) design for visible light communication (vlc) using commercially available op-amp. In *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, pages 31–36, 2016.
- [7] A. Baharmast and J. Kostamovaara. A low noise front end trans-impedance amplifier channel for a pulsed time-of-flight laser radar. In *2017 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, pages 285–288, 2017.
- [8] Lars Lindner, Oleg Sergiyenko, Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Wendy Flores-Fuentes, and Ivan Giannoccaro, editors. *Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0: Advances in Computational Intelligence and Robotics*. IGI Global, 2021.
- [9] Moises J Castro-Toscano, Julio C Rodríguez-Quiñonez, Oleg Sergiyenko, Wendy Flores-Fuentes, Luis R Ramírez-Hernández, Daniel Hernández-Balbuena, Lars Lindner, and Raúl Rascón. Novel sensing approaches for structural deformation monitoring and 3d measurements. *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [10] Oscar Real, Moises Castro-Toscano, Julio Rodríguez-Quiñonez, Oleg Serginyenko, Daniel Hernandez-Balbuena, Moises Lopez, Wendy Flores-Fuentes, and Lars Lindner. *Surface Measurement Techniques in Machine Vision: Operation, Applications, and Trends*, pages 79–104. 01 2019.
- [11] O. Yu. Sergiyenko. Optoelectronic system for mobile robot navigation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 46(5):414–428, Oct 2010.
- [12] P. Stoklasek, T. Vecera, and J. Moravek. Case study research: Optical digitization, reverse engineering and rapid prototyping as a solution in pedal car development process. In *MATEC Web of Conferences*, volume 210, 2018. Cited By :1.
- [13] Yang Zhongdong, Wang Peng, Li Xiaohui, and Sun Changku. 3d laser scanner

- system using high dynamic range imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, 54:31–41, 03 2014.
- [14] Alan A. Author, Bill B. Author, and Cathy Author. Title of article. *Title of Journal*, 10(2):49–53, 2005.
- [15] L. Lindner. *Laser Scanners*. 2016.
- [16] Alan A. Author, Bill B. Author, and Cathy Author. Title of article. *Title of Journal*, 10(2):49–53, 2005.
- [17] Alan A. Author, Bill B. Author, and Cathy Author. Title of article. *Title of Journal*, 10(2):49–53, 2005.
- [18] H. Pérez Montiel. *Temas Selectos De Física 2*. Grupo Editorial Patria.
- [19] Universidad de Buenos Aires. Espectro electromagnetico, 2020.
- [20] Nicolás Cuenca Navarro. Los fotorreceptores, esas fascinantes células. Technical report, nov 2009.
- [21] A.B. Meinel and M.P. Meinel. *Aplicaciones de la energía solar*. Editorial Reverte, 1982.
- [22] Royal Society (Great Britain). *Proceedings of the Royal Society. Section A, Mathematical and Physical Science*. Number v. 393. Harrison and Son, 1984.
- [23] Wikimedia Commons. Photoelectric effect, 2007.
- [24] A.P. Godse and U.A. Bakshi. *Electron Devices and Circuits*. Technical Publications, 2020.
- [25] R.L. Boylestad, L. Nashelsky, and C.M. Barraza. *Electronica: Teoria de Circuitos Y Dispositivos Electronicos*. Pearson Education, 2003.
- [26] N.C. Braga. *Electrónica Analógica*. Curso de Electrónica. Editora NCB, 2019.

- [27] W. Bolton. *Mediciones y Pruebas Eléctricas y Electrónicas*. ACCESO RÁPIDO. Marcombo, 1995.
- [28] W.K. Chen. *Passive, Active, and Digital Filters*. The Circuits and Filters Handbook, 3rd Edition. CRC Press, 2018.
- [29] R. Woods, J. McAllister, G. Lightbody, and Y. Yi. *FPGA-based Implementation of Signal Processing Systems*. Wiley, 2017.
- [30] Federico Miyara. *Conversores DA y AD*. Universidad Nacional de Rosario.
- [31] R. Mancini. *Op Amps for Everyone: Design Reference*. Electronics & Electrical. Newnes, 2003.
- [32] *Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics*. Cambridge University Press.
- [33] Vishay Semiconductors. Tept5600, 2014.
- [34] Vishay Semiconductors. Bpw21r, 2011.