

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**DISEÑO DE SUBSISTEMA EMISOR,
PARA DETECCIÓN DE OBSTACULOS USANDO
BARRIDO CON LASER**

T E S I S
que presenta:

LUIS FELIPE DEVIA CRUZ

para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. OLEG SERGIYENKO**

Mexicali, B. C.

Septiembre de 2008

ÍNDICE

1. Introducción	6
1.1. Objetivos	7
1.1.1. Objetivo General	7
1.1.2. Objetivos Específicos	7
1.2. Organización del trabajo	8
1.3. Estado del arte	8
1.4. Planteamiento del problema.	12
1.5. Resumen de la solución propuesta	13
2. Marco teórico	14
2.1. Medición Remota	14
2.2. Técnicas de medición	15
2.3. Láser	17
2.3.1. Fuente Láser	17
2.3.2. Descripción de un haz de luz láser Gaussiano	19
2.3.3. Propagación en la atmósfera	24
2.3.4. Reflexión de radiación en una superficie	26
2.4. Técnicas de telemetría láser	28
2.4.1. Medición de tiempo de Vuelo	29
2.4.2. Detección de fase	29
2.4.3. Triangulación	30
3. Desarrollo del prototipo	31
3.1. Escenario	31
3.2. Medición de distancia	33
3.3. Determinación de coordenadas tridimensionales	35
3.3.1. Coordenada y	36
3.4. Sistema técnico de proyección	38
3.4.1. Fuente Láser	38
3.4.2. Grados de libertad	39
3.4.3. Control de movimiento y dispositivos móviles	39
3.4.4. Algoritmo de control de movimiento	43
3.5. Procesamiento de señales y datos	45
3.5.1. Señales de entrada	47
3.5.2. Determinación de ángulos	51
3.5.3. Almacenamiento de coordenadas	52
3.5.4. Implementación de algoritmo en C++	52
3.5.4.1. Declaración de Variables.	53
3.5.4.2. Función: ShowCoord()	53
3.5.4.3. Función: GrafXY()	53
3.5.4.4. Funciones: OpenFile(), CloseFile(), AutoSave() y SaveFile()	54
3.5.4.5. Función: Autobarrido() y LeerCiclo	54
3.5.4.6. Función Menu():	55
3.5.4.8. Función: Main ().	55
3.5.4.9. Funciones: pasoarr(), pasoaba(), pasoizq(), pasoder	55
4. Experimentos y Resultados	56
4.1. Experimento 1: Patrón de Reflexión Angular	56
4.2. Experimento 2: Atenuación de Reflexión	58
4.3. Experimento 3: Medición de coordenadas Bidimensionales 1.	60
4.4. Experimento 4: Medición de coordenadas Bidimensionales 2	62
4.5. Experimento 5: Medición múltiple de coordenadas Bidimensionales para un sólo punto.	64

5. Conclusiones Finales	68
6. Bibliografía	70
7. APÉNDICES	74
APÉNDICE A. Índice de figuras	74
APÉNDICE B. Índice de tablas	75
APÉNDICE C. Tablas de datos experimentales	76
APÉNDICE D. Programa en matlab: distribucion de potencia radial de haz laser	82
APÉNDICE E. Variación de la intensidad de luz láser, según algoritmo de Poon	84
APÉNDICE F. Programa de control de movimiento y procesamiento de datos en C++	85

RESUMEN de la Tesis de Luis Felipe Devia Cruz, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA EN ELECTRONICA. Mexicali, Baja California, México. Octubre de 2008.

**DISEÑO DE SUBSISTEMA EMISOR, PARA DETECCIÓN DE OBSTACULOS
USANDO BARRIDO CON LASER.**

Resumen aprobado por:

Dr. OLEG SERGIYENKO

Director de tesis

En el presente texto se muestra un nuevo método rápido y un sistema de bajo costo para obtener datos tridimensionales de la superficie de un obstáculo, utilizando el principio de triangulación y barrido láser. Centrado en subsistema de emisión se describen los aspectos del principio del diseño así como sobre el funcionamiento y la interacción de los elementos del sistema. Se describen también las operaciones matemáticas para el tratamiento de la información digital dentro del sistema, para la determinación de las distancias y las medidas angulares en el sistema. Se exponen los resultados de los experimentos en los que se calculó la exactitud, la velocidad de funcionamiento, el rango de acción, y las limitaciones del sistema. Por último se proponen nuevas ideas con el fin de mejorar el rendimiento del sistema.

Palabras clave:

Láser, triangulación, cavidad óptica, medición de distancia, coordenadas, localización, navegación, superficie de obstáculo.

ABSTRACT of the thesis, presented by Luis Felipe Devia Cruz in order to obtain the **MASTER of ENGINEERING DEGREE in ELECTRONICS ENGINEERING**. Mexicali, Baja California, México. October, 2008.

SUBSYSTEM EMITTING DESIGN, FOR DETECTION OF OBSTACLES BY MEAN OF SWEPT WITH LASER.

Approved by:

Dr. OLEG SERGIYENKO

Thesis Advisor

A new fast operating and low cost system to obtain tridimensional data about a obstacle surface, using laser triangulation principle is offered. It is focused on the emissive subsystem, questions of principle design and also about functioning and interaction of units and elements of the system are described. The mathematical apparatus for processing of digital information inside system, and also for determination of distances and angular measures in offered system are described too. Results of experiments which calculate the accuracy, functioning speed, range of action, and limitations of the system are shown. Finally new ideas in order to improving the performance of the system are proposed.

Keywords:

Laser, triangulation, optical cavity, distance measurement, coordinates, location, navigation, obstacle surface.

Capítulo 1.

Introducción

Percibir las características del medio que nos rodea, como la dimensión de un cuerpo, distancia hasta el mismo y la profundidad de un espacio, son funciones que llevan a cabo algunos seres vivos de manera natural, permitiéndoles interactuar con el medio y realizar labores complejas de auto localización y de detección de obstáculos. La visión es un sentido que arroja datos significativos acerca del medio que nos rodea; ya que ofrece información variada de un entorno (o escena), como profundidad, textura, color, y forma.

En la practica, la necesidad de optimizar la percepción del entorno para ser usado por sistemas móviles autónomos, hace que la sistematización de procesos análogos al sentido natural de la visión, sea una de las principales metas de algunos ingenieros al momento de diseñar sistemas automáticos de reconocimiento y navegación.

Determinar la ubicación de un robot móvil en relación a un marco de coordenadas absoluto, es uno de los temas mas importantes en navegación autónoma [11], necesidad que ha promovido el desarrollo de variados sistemas que se basan en fenómenos ópticos como cámaras o Ladares, electromagnéticos como los radares y acústicos como los sonares. La mayoría tipos de sistemas de detección remota son complejos, y su eficiencia demanda altos recursos computacionales, físicos y económicos.

Con el fin de contribuir a la tarea de auto localización y navegación en sistemas móviles autónomos, maximizando la función costo-eficiencia, el presente trabajo de tesis, muestra el proceso de diseño, construcción y prueba de un sistema que ilumina una cantidad limitada de puntos una superficie con luz láser, y luego mediante el análisis de la triangulación de trayectorias de emisión y recepción de los haces de luz, ofrece en su salida de datos un conjunto de coordenadas correspondientes a cada punto observado. El objetivo de este análisis espacial, está enfocado en determinar la presencia y la distancia a la que se encuentra un obstáculo en un rango determinado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Diseñar y evaluar un nuevo método basado en un sistema mecánico y óptico electrónico que permita determinar las coordenadas tridimensionales puntos en la superficie de un obstáculo en una zona determinada.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir el sistema mecánico para la realización del barrido con luz láser dentro de una zona tridimensional.
- Desarrollar un circuito electrónico de interfase para el control del sistema de barrido de láser.
- Desarrollar una herramienta de cómputo en C++ para realizar el barrido de luz láser sobre un escenario, y para determinar el ángulo de emisión de luz láser para cada punto explorado, en tiempo real.
- Desarrollar una herramienta de cómputo en C++ que lleve a cabo los cálculos de coordenadas bidimensionales de puntos explorados, a partir del conocimiento de ángulos de emisión y recepción, en un tiempo razonable.
- Analizar el comportamiento de la intensidad de la luz reflejada sobre una superficie en relación con la distancia hasta el emisor y elaborar recomendaciones.
- Obtener datos experimentales de mediciones en 3 dimensiones y evaluar parámetros de funcionamiento del sistema propuesto.

1.2. Organización del trabajo

La presente tesis describe los procesos de diseño, construcción y verificación del subsistema de emisión de luz láser, usado en un sistema de detección de obstáculos usando barrido con láser. En el primer capítulo se exponen los antecedentes del problema planteado, las técnicas más relevantes usadas para su solución y una introducción a la solución propuesta. En el segundo capítulo se muestran los elementos básicos y las posibles aplicaciones de la medición remota de distancia; en el tercer capítulo se presenta la formulación matemática de la triangulación en la medición de distancia que sustenta el funcionamiento de la propuesta y en el cuarto capítulo se presenta y explica el funcionamiento del dispositivo de la fuente láser. En el quinto capítulo se exponen algunos elementos del sistema de barrido y finalmente en el sexto capítulo se describen las funciones de procesamiento y almacenamiento de datos que se desarrolla en este subsistema. Finalmente, en el séptimo capítulo se exponen los resultados de los experimentos realizados en los que se y las conclusiones finales.

1.3. Estado del arte

La navegación en un sistema autónomo consiste en dirigirlo y movilizarlo hasta una posición final o a través de serie de posiciones sucesivas, rodeando obstáculos presentes en su ruta. En la práctica la planeación de la ruta de un robot móvil, se puede clasificar en dos tipos. El primer tipo es cuando el robot tiene almacenada información sobre la zona por la cual transita. El segundo tipo corresponde a rutas en entornos desconocidos, y en los que cada cambio de dirección a causa de obstáculos implica un rediseño de la ruta siguiente.[39]

Idealmente un robot debe conocer con precisión, su ubicación actual, la ubicación de los obstáculos que debe evitar y la localización de la posición final. Existen diferentes técnicas y combinaciones de ellas, con las que un robot puede determinar su localización y la de la

ruta mas confiable a su destino. Dentro de estas técnicas se tienen: ladar, sonar, estéreo visión, balizas láser, vehículos filoguiados.

El Ladar (LAsEr Detection And Rangin) es una técnica de teledetección que se basa en el principio del radar tradicional y puede determinar la distancia desde un dispositivo hasta una superficie. Se origina a partir del hecho de que las propiedades básicas de las ondas de radio pueden ser extrapoladas a fuentes de radiación coherentes y monocromáticas.

Un ladar consta de un sensor electromagnético activo en frecuencias electroópticas[39]. El transmisor es un láser que normalmente se opera en longitudes de onda en la zona infrarroja [38].

Dentro de las ventajas encontramos, el reducido tamaño de la zona iluminada gracias a las propiedades ópticas del láser y una gran distancia de operación, normalmente dada en el orden de kilómetros. Estos equipos presentan la desventaja principal de un costo elevado, debido a que usa tecnología rápida, para detectar los cortos valores de tiempo de vuelo de la señal lumínica. Así la resolución de un sistema Ladar depende de la precisión de medición del tiempo de vuelo, , por ejemplo, dicha resolución es de 0.01 m en el equipo SpeedLaser.

El sonar se basa en el principio del radar en cuanto a la medición del tiempo de vuelo (ida y vuelta) de una señal acústica en la zona ultrasónica, es decir una frecuencia mayor que la máxima audible por el oído humano, normalmente de trabaja a 40 KHz.

Los sensores de ultrasonidos son muy utilizados en robótica móvil debido principalmente a su bajo coste y rapidez de operación y se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo campo de acción, tiene forma cónica [40]. Y en la posterior detección del tiempo que tarda cada tren de pulsos en llegar hasta el obstáculo y regresar al sensor.

La medición del tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco determina la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha reflejado el sonido emitido. Aun siendo una técnica simple, existen factores relacionados con la naturaleza del ultrasonido y del entorno que afectan directamente las medidas realizadas con un sonar.

Entre los diversos factores que afectan las lecturas encontramos: que el campo de acción del pulso ultrasónico emitido tiene forma cónica. Así, el eco recibido de la reflexión indica la presencia de un obstáculo cercano dentro del cono acústico, pero no especifica la localización angular del mismo.

Otra desventaja del sonar, se deriva de que la cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende directamente de la textura de su superficie. Adicionalmente, algunos sensores ultrasónicos, utilizan el mismo transductor como emisor y receptor. Tras la emisión del pulso ultrasónico se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Ésto implica que existe una distancia mínima a partir de la cual el sensor mide con mayor precisión. Existe además una dependencia este tipo de sistema de las condiciones de aire por el cual se trasmite el sonido; la densidad del aire depende de la temperatura, afectando directamente la velocidad de propagación de la onda.

Los vehículos filoguiados, corresponden a una modalidad de sistemas móviles autónomos, que siguen una ruta establecida, ubicada debajo de la superficie por la cual circula el vehículo. Cada sistema filoguiado posee una antena consistente en dos bobinas situadas a ambos lados del cable que alimentan directamente un motor de control de dirección. Si el sistema avanza centrado sobre el cable, las tensiones generadas en las bobinas serán iguales; de otro modo si el sistema se desvía de la trayectoria, la diferencia de potencial que se crea entre las bobinas le indicará cuánto debe girar y en qué sentido hacerlo.

Este tipo de sistemas de navegación posee las siguientes ventajas: es un sistema sencillo y preciso, donde nunca se pierde su trayectoria. Algunos de los inconvenientes de ésta técnica son el tener que levantar el suelo para establecer las rutas, implicando altos costos de instalación y dificultad para reprogramar rutas. Este sistema de vehículo filoguiados, no puede detectar obstáculos en la ruta. Ni transitar en sitios desconocidos, donde no exista la guía subterránea. Es por lo tanto un sistema fijo difícil de adaptarse a entornos cambiantes.

La técnica de estereo visión se basa en el principio de visión animal, en la que la disparidad entre las dos imágenes captadas, es utilizada para determinar la posición relativa de los objetos en la escena con el sistema de visión.

Un sistema de estereo visión, requiere equipo de cómputo y al menos dos sensores ópticos tipo matriz o vector, evidenciando los altos costos que puede implicar. El funcionamiento de este tipo de sistemas implica realizar operaciones y comparaciones matemáticas entre cada par de información obtenido, dando origen a largos periodos de tiempo para estos análisis. Aunque los resultados son apreciables desde el punto de vista infográfico, la técnica de visión estereo está restringida a entornos que presentan una naturaleza geométrica plano-paralela (típicamente espacios interiores). [41]

Los equipos guiados con balizas láser cuentan con una torreta giratoria, emisora y receptora de láser. El entorno donde se movilizan debe estar dotado de balizas reflectantes. Cada sistema móvil mide la distancia y ángulo a los que se encuentran, por lo menos tres reflectantes, luego y usando un proceso trigonométrico de triangulación se logra obtener la coordenada absoluta en la que se encuentra.

Al igual que los sistemas filoguiados, requiere de una instalación previa del sistema de reflectantes en la zona de operación. Esto imposibilita al robot móvil a salirse de de cierto rango y explorar zonas desconocida. Otra desventaja de este tipo de técnica, es la necesidad constante de una línea de vista entre el elemento sensible del sistema y los reflectantes. Este sistema no permite detectar obstáculos en la ruta.

1.4. Planteamiento del problema.

Los sistemas de robot móviles necesitan detectar los obstáculos presentes en la ruta de operación. Algunas técnicas de detección de obstáculos implican un elevado uso de recursos económicos y operativos debido a que son sistemas con óptica compleja y robustos sistemas de procesamiento de datos.

Gran parte del uso de robots móviles se lleva a cabo en lugares hostiles o desconocidos, donde la automatización de la tarea de navegación es una prioridad para aumentar la velocidad y seguridad del recorrido. La velocidad de movimiento de un robot móvil depende directamente de la velocidad con la que puede analizar el escenario y tomar decisiones sobre la dirección que debe tomar en cada instante de tiempo. Existen espacios despejados que usando sistemas de visión artificial para detección de obstáculos, toman el mismo tiempo en ser analizados que cuando hay obstáculos presentes.

El problema a resolver consiste en mejorar ese tipo de sistemas tradicionales, por un sistema de bajo costo, que usando elementos simples pueda adaptarse a las condiciones del escenario y mejore la respuesta en tiempo de exploración y así contribuir a la rapidez de desplazamiento de un sistema móvil autónomo.

1.5. Resumen de la solución propuesta

La solución propuesta se basa en usar tecnología de no contacto con un obstáculo para que éste pueda ser detectado y caracterizado para tareas de navegación de un robot móvil. La técnica usada es la triangulación, y consiste en formar un triángulo en el que uno de sus vértices corresponde a un punto iluminado sobre la superficie del obstáculo. Los dos lados adyacentes a dicho vértice corresponden a al trayecto de luz láser emitida y el otro lado al trayecto de la luz reflejada por la superficie del obstáculo. El lado opuesto al punto proyectado es una barra de longitud fija, en cuyos extremos se instalan el emisor láser y el foto detector respectivamente.

El subsistema de emisión se encarga de controlar los ángulos de emisión de la luz láser y el subsistema de recepción de detectar el ángulo de reflexión. Conociendo esos ángulos y la longitud de la barra que contiene al emisor y al detector, es posible determinar matemáticamente la distancia desde la barra hasta el punto iluminado sobre el obstáculo. De esta forma se puede caracterizar las coordenadas de cada punto explorado en tiempo real.

El plano, en el que se forma el triángulo, puede girar verticalmente para explorar puntos a diferentes alturas, y el emisor láser puede cambiar su ángulo de emisión horizontal para explorar puntos a lo ancho de su escenario de navegación.

El sistema está en capacidad de cambiar la distancia vertical y horizontal entre cada punto explorado, mejorando así la velocidad de exploración. De esta forma se puede aumentar la velocidad de exploración en escenarios despejados y consecuentemente a la velocidad de desplazamiento del sistema móvil autónomo.

El sistema propuesto, entrega de manera electrónica el mapa de puntos explorados en un escenario, preparados para un posterior análisis. Las coordenadas de los puntos encontrados en el escenario son almacenadas en un archivo electrónico.

Capítulo 2.

Marco teórico

Este capítulo describe inicialmente el estado del arte de la teledetección láser y de otras técnicas que también son usadas para determinar la posición y las posibles rutas de un sistema autónomo de movimiento. Posteriormente, se exponen los fundamentos matemáticos que describen el comportamiento y variaciones dimensionales de un haz de luz láser propagado a través del aire. El presente capítulo finaliza con una breve explicación de las técnicas de teledetección en la que se usa el láser.

2.1. Medición Remota

La medición remota es la capacidad de un sistema para cuantificar características de un objeto distante, sin contacto y a partir de sus características radiantes [28]. Dicha cuantificación implica dos procesos básicos: captar información y posteriormente procesarla.

Actualmente existen equipos que realizan ésta tarea, y que se desarrollaron buscando optimizar tiempo, costos y riesgos de dicha tarea. La habilidad de detectar objetos y determinar las distancias hasta ellos en tres dimensiones se esta incrementando de manera importante en campos como navegación autónoma y detección de obstáculos, creación de mapas, supervisión de escenarios y mediciones en ambientes hostiles. [13].

En el campo del transporte por ejemplo, la necesidad de conocer la distancia entre un vehículo en movimiento (marítimo, aéreo, o terrestre) y un punto conocido, genera la necesidad de desarrollar sistemas de radar que pueden realizar esta tarea con eficiencia. La necesidad de conocer una temperatura extrema de la sustancia, sin hacer contacto con ésta,

promueve el desarrollo de pirómetros de radiación eficientes. Éstas y otras tareas de medición de parámetros a distancia se basan en la caracterización de la radiación y de la trayectoria desde un punto de origen hasta un sistema de detección.

2.2. Técnicas de medición

Las técnicas de medición remota de distancia, se basan en la medición de parámetros físicos de ondas de radio, de ondas sonoras o de ondas luminosas.

La luz es un fenómeno físico adecuado para técnicas de medición, ya que por su modelo corpuscular o de adición de Newton, que la describe como un camino recto de partículas llamados fotones [10], permite describir en un espacio líneas y trazos geométricos, que pueden ser analizados para deducir información de interés.

Las características radiantes de un objeto se pueden cuantificar remotamente y se clasifican según el parámetro óptico medido [31]. Véase Tabla 1.

Existen dos tipos de sistemas que permiten realizar una medición remota: activos ó pasivos.

Pasivos: Cuando la radiación caracterizada es propia del mismo escenario.

Activos: donde la radiación es resultado de la reflexión de radiación artificial aplicada por el sistema mismo. [31].

En general, los métodos de barrido pasivos, son susceptibles a condiciones de poca iluminación. De manera contraria, los métodos activos proyectan energía sobre el obstáculo de forma controlada y estructurada [5] (normalmente láser, con diferentes geometrías: puntos, líneas etc.); y presentan la ventaja de no ser afectados por las condiciones lumínicas del ambiente. [26].

Las condiciones ambientales naturales son difíciles de controlar tanto en forma espacial como temporal, por tal motivo, se requiere el uso de fuentes artificiales de radiación para detectar parámetros espaciales de objetos distantes.

Características cuantificables remotamente	Parámetros ópticos a analizar
Espaciales	Tamaño, orientación y forma. Ángulos de Difracción y Reflexión,
Espectrales	Distribución de energía en función de frecuencia
Temporales	Variación de flujo Vs. Tiempo
Coherencia	Evaluación de la fase. (efecto Doppler)
Polarización	Orientación del Vector eléctrico E

Tabla 1. Parámetros físicos y características detectables.

De las características básicas que deben presentar las fuentes artificiales de radiación se tienen las siguientes:

- *Coherencia*: factor que reduce el ancho del espectro de radiación usado, con el fin de eliminar la incidencia de otras fuentes artificiales o naturales presentes en el escenario de medición.
- *Direccionalidad*: capacidad de reducir el campo de emisión de radiación al campo necesario, buscando eficiencia energética y evitando generar ruido en otros campos adyacentes.
- *Potencia*: la potencia de emisión de radiación debe ser analizada, controlada en magnitud y distribución espacial, y alcanzar un valor mínimo necesario para transferir propiedades ópticas desde su origen hasta el objeto de interés.

La radiación láser, presenta las características antes mencionadas, por tal razón gran parte de los sistemas de barrido láser, se incluyen en el grupo de sistemas activos sin contacto, y actualmente su capacidad para recolectar datos tridimensionales de alta resolución, es una ventaja sobre técnicas tradicionales de supervisión espacial como el radar o el sonar, especialmente en el monitoreo de deformación de superficies [12].

2.3. Láser

La mayoría de sistemas de barrido con láser usan una fuente de haz de luz gaussiana [19]. En el presente capítulo se presentan las características elementales de una fuente de radiación láser. Se explica además la forma como se distribuye potencia de la radiación desde la fuente láser hasta un obstáculo. Para éste análisis se requiere explicar cómo se propaga el haz de luz láser geoméricamente.

Se usó un algoritmo en Matlab [21] para determinar el tamaño de una proyección y su distribución de energía en la medida que la fuente de radiación se aleja del obstáculo.

2.3.1. Fuente Láser

Un sistema de luz Láser, esta constituido básicamente por un medio (o sustancia) que proporciona los átomos que serán estimulados, una cavidad resonante que intensifica las radiaciones emitidas y una fuente externa para lograr la excitación del medio. Este grupo de dispositivos (figura 2.1) permiten desarrollar una fuerte densidad de energía estimulada y amplificada [6].

La fuente externa de energía (óptica, térmica, eléctrica o química.) genera una diferencia de poblaciones entre los niveles energéticos de los electrones de los átomos del medio, tal diferencia, estimula cambios de nivel entre algunos electrones de cada átomo, y a su vez, esos cambios de niveles energéticos, provocan una emisión de radiación a una cierta longitud de onda, sumada a la emisión espontánea de algunos electrones. Por lo anterior se establece que dentro en un sistema láser se llevan a cabo 3 procesos importantes: absorción, emisión estimulada y emisión espontánea.

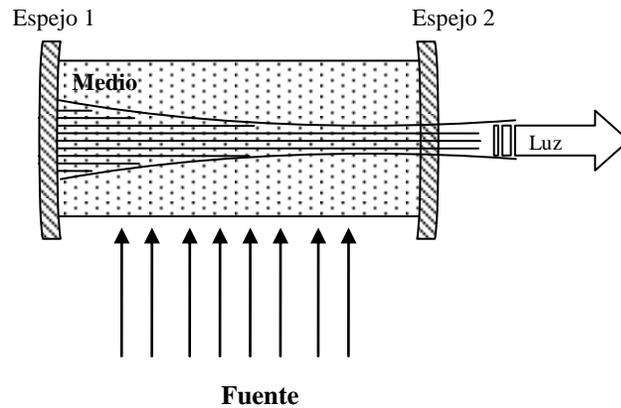


Figura 2.1. Fuente de radiación Láser: Cavidad reflexiva con energía externa.

La cavidad es reflectiva en su interior, y es la encargada de amplificar la radiación emitida por el medio mediante resonancia. Este espacio (la cavidad) está delimitado por un espejo de reflexión total y otro que permite el paso parcial de los rayos hacia la parte exterior. Dichos rayos, se reflejan internamente, hasta salir por uno de los extremos mediante el espejo semireflectivo. Dependiendo del fabricante, la semireflectividad, puede variar entre un 90% y casi un 100%, para láser rojos e infrarrojos. [23]

Actualmente, la mayoría de los espejos que forman las cavidades, suelen ser esféricos para minimizar los problemas de alineación, ya que estos permiten cierta desviación entre ellos, esta propiedad geométrica no la poseen las cavidades con espejos planos. [6]

La radiación proveniente de un sistema láser, posee características especiales que contribuyen y estimulan el desarrollo de nuevas aplicaciones en torno a las cualidades ópticas de dicha radiación. Las cualidades básicas de un láser (que lo diferencia de otras fuentes de radiación), son su coherencia espacial y su coherencia temporal; propiedades derivadas de la emisión estimulada de fotones con frecuencias asociadas casi iguales. [33]

La coherencia espacial, tiene relación directa con la capacidad de emitir fotones en una misma dirección, haciendo que la fase de dos puntos distintos en una sección transversal del haz luminoso sea la misma [7] . Evitando así la interferencia del haz consigo mismo.

Dicha capacidad se conoce comúnmente como Direccionalidad y en los sistemas láser suele ser muy alta, es decir, la radiación emitida está limitada a un ángulo pequeño, en orden de los miliradianes.

La coherencia espectral, se relaciona directamente con la monocromaticidad, y es la capacidad de emitir radiación en un ancho de espectro muy angosto. Ésta se debe al tipo de amplificación que se lleva a cabo dentro de la cavidad láser: amplificación resonante. La resonancia de las ondas dentro de la cavidad, provoca la amplificación selectiva de las ondas cuya longitud de onda coincida con la longitud entre los espejos reflectores. Debido a las características geométricas y a posibles imperfecciones en la cavidad, algunos haces de luz tendrán unas longitudes de onda ligeramente mas largas o cortas que la longitud de diseño. Esto asegura la presencia de ondas con diferentes longitudes de onda, pero el ancho de esas ondas adicionales suele ser muy angosto, del orden de unos cuantos KHz. [16]. Por lo anterior, se establece que la radiación de un sistema láser, es cuasimonocromática.

Estas dos características, coherencia espectral y espacial, permiten que un láser pueda concentrar su potencia en un haz radiante a largas distancias.

2.3.2. Descripción de un haz de luz láser Gaussiano

Las propiedades básicas del láser vistas en el apartado anterior, se mantienen con variaciones despreciables a lo largo de la proyección de un haz radiante de manera muy similar a una onda electromagnética plana [35]. Sin embargo, la distribución de la intensidad es un parámetro importante que varía con la distancia, el ángulo de divergencia y la longitud de onda. Así, la intensidad transmitida se va redistribuyendo, cuando el radio del haz aumenta con la distancia Ver figura 2.2.

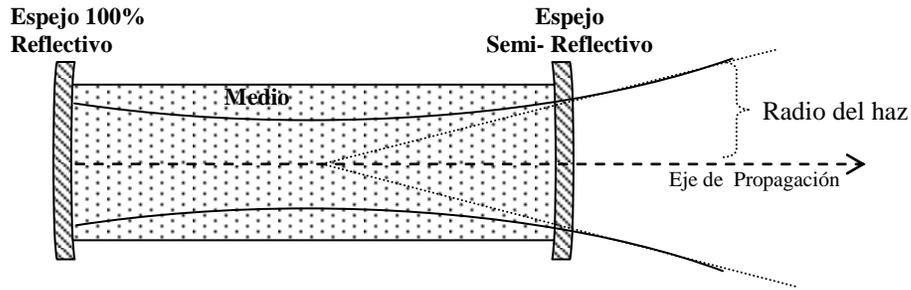


Figura 2.2. Propagación de un haz desde una cavidad láser.

Es importante entender el comportamiento gaussiano de la intensidad del haz en relación con su radio, debido a que el centro de la distribución gaussiana, (ubicación de la mayor intensidad del haz) es conocido como el marco de referencia del haz láser. Así, la búsqueda de una proyección láser sobre un objeto, debe coincidir con ese centro de distribución su intensidad radial [36].

Para el factor *distancia*, es importante analizar el comportamiento de la intensidad y su distribución transversal en torno al eje de propagación paraxial, para determinar el tamaño de la mancha proyectada en una superficie. En la mayoría de los sistemas Láser comerciales que operan en modo TEM_{00} , es decir que perpendicularmente al eje de propagación se emite solamente un lóbulo de onda electromagnética de forma senoidal, (y por tal motivo no hay ceros ó intensidades nulas en la distribución de intensidad transversal), poseen una distribución gaussiana de la intensidad. Este tipo de haz se denomina: haz gaussiano, y su tipo de distribución de intensidad a lo largo del eje de propagación, provee una descripción matemática muy conveniente de la propagación de un haz de luz centrado en un eje [33], tal como sucede en un sistema láser.

El perfil transversal de un haz gaussiano, varía con la distancia de propagación según el principio Huygens-Fresnel [7], donde la intensidad disminuye de forma gaussiana en la medida que aumenta el radio (Figura 2.2). En la ecuación 4.2.1, muestra la relación de proporcionalidad A entre la intensidad I para cada valor del radio r y el exponencial que

involucra al radio y a la distancia de propagación z y donde la función $w(z)$, es el radio del haz a una distancia z desde la fuente

$$I(r) = A \cdot \exp(-r^2/w(z)^2) \quad [4.2.1]$$

. A la distancia r del centro la intensidad, no es nula, sino que ha disminuido (87%) $1/e^2$ veces la intensidad máxima cuando $r=0$. La función $w(z)$, está dada en la expresión 4.2.2:

$$w(z) = w_o \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_o^2} \right)^2} \quad [4.2.2]$$

En la ecuación 4.2.2, w_o , es el valor del radio mínimo del haz¹, que en cavidades confocales suele estar ubicado en su centro. Existe además un valor de distancia $Z=Z_R$, para el cual el valor del radio $w(z)$ es $\sqrt{2}$ veces el valor de w_o . Reemplazando en 4.2.2, se obtiene:

$$\sqrt{2} \cdot w_o = w_o \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z_R}{\pi \cdot w_o^2} \right)^2} \quad [4.2.3]$$

Elevando al cuadrado ambos lados de 4.2.3, queda:

$$2 = 1 + \frac{\lambda \cdot z_R}{\pi \cdot w_o^2} \quad [4.2.4]$$

Despejando Z_R de 4.2.4, obtenemos la siguiente función:

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_o^2}{\lambda} \quad [4.2.5]$$

El nuevo termino Z_R , ya esta contenido dentro del radical de 4.2.3, simplificando se obtiene 4.2.6:

$$w(z) = w_o \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad [4.2.6]$$

El rango delimitado por Z_R se conoce como zona Raleigh (Figura 2.3) o zona cercana, dentro de la cual las variaciones de W_o no son lineales respecto a los cambios de Z . A partir

¹ La sección transversal de menor diámetro $2 W_o$ se conoce como cintura del haz, en esta sección el frente de onda es plano. [7]

de la Z_R la curva que delimita al haz gaussiano tiende a comportarse linealmente con la distancia.

Para caracterizar un haz gaussiano y determinar el tamaño de su proyección, es necesario conocer la longitud de onda, la distancia de propagación, y al menos uno de los siguientes tres parámetros, ángulo de divergencia (φ), rango Raleigh (Z_R) ó el radio mínimo del haz (W_0).

El ángulo de divergencia de un haz gaussiano φ , es equivalente a 2δ , donde δ es el ángulo entre el límite exterior del haz y el eje de propagación, y puede deducirse geoméricamente de la siguiente manera:

$$\tan \delta = \frac{w(z)}{z} \quad [4.2.7]$$

La ecuación 4.2.7 es válida para valores grandes de z , con lo que el término unitario dentro del radical en la ecuación numero 4.2.3 es despreciable, y se puede replantear en la ecuación 4.2.8, de la siguiente manera:

$$w(z) = w_0 \sqrt{\left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2}\right)^2} \quad [4.2.8]$$

Eliminando el radical de 4.2.8 se tiene:

$$w(z) = \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0} \quad [4.2.9]$$

$$\frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad [4.2.10]$$

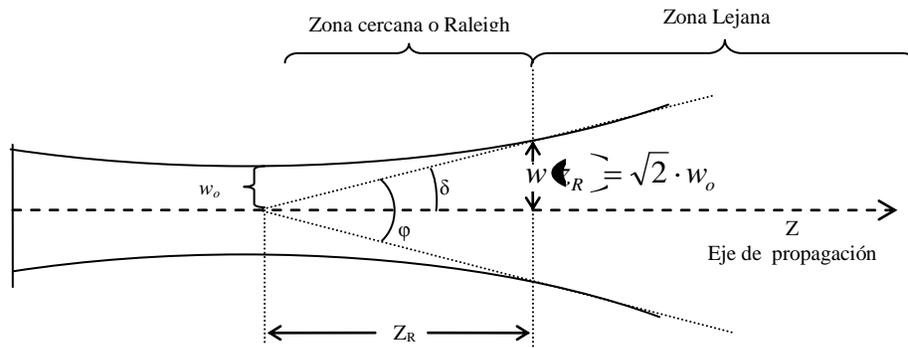


Figura 2.3. Propagación antes y después del rango de Raleigh.

Para valores pequeños de δ , se puede decir que $\tan \delta = \delta$. Sustituyendo 4.2.7, en 4.2.10, tenemos una expresión reducida 4.2.11.

$$\delta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad [4.2.11]$$

Con la implementación del algoritmo [Apéndice D] de Poon [21] para determinación del tamaño de la proyección usando matlab, podemos predecir la distribución de la intensidad y su valor máximo y el tamaño de la mancha de un haz gaussiano cuando se proyecta sobre una superficie ubicada a una distancia z , desde el emisor láser.

En este caso, se conocen los siguientes datos del láser²:

$w_0=0.68$ mm

Ángulo de divergencia 1.2 mrad.

Los datos anteriores, se ingresan al programa de simulación en matlab, junto con la distancia de prueba, que varía entre 2.5m y 15m.

La tabla 2, muestra el comportamiento de la intensidad máxima I_0 del haz gaussiano a lo largo de la distancia.

² Referencia del láser: JDS 1135P HeNe Uniphase.

I_o	2.5 m	5.0 m	7.5 m	10.0 m	12.5 m	15.0 m
100%	88.95 %	69.75 %	54.43 %	43.76 %	36.28 %	30.86 %

Tabla 2. Distancia y potencia máxima del centro de haz gaussiano.

En la figura 2.4, se muestra la variación de la distribución de potencia radial de un haz gaussiano.

Las gráficas de la figura 2.5 muestran un comportamiento teórico de la distribución transversal de la intensidad para varias distancias: 0 metros y 10 metros. Se basó en el algoritmo de Poon, para determinar la distribución de potencia y su atenuación con la distancia, tomando los valores característicos del emisor láser y de la distancia de propagación. En el apéndice E se muestra la distribución de potencia para otros valores de distancia según Poon.

2.3.3. Propagación en la atmósfera

Es difícil conocer completamente la naturaleza de la luz, los dos modelos existentes logran describir algunos comportamientos de la luz, pero ninguno de ellos completamente. Las técnicas de trazado de rayos de luz, están basadas básicamente en el modelo de la luz, como un camino recto de partículas llamadas fotones. [10]. Dichos fotones, además de su trayectoria rectilínea condicionada por el índice de refracción del medio, poseen una frecuencia asociada a los niveles energéticos de su origen. La interacción de las partículas de un medio con los fotones, es lo que determina la atenuación de un rayo luminoso. Pero en el caso de los gases, por ser homogéneos (sin transiciones) y no adicionar oscilaciones cercanas a la del láser, podemos decir que la atenuación es mínima. La transmisión del haz láser a través de la atmósfera es significativa para aplicaciones en la intemperie o donde el rango de distancia está en el orden de varios cientos de metros [4]

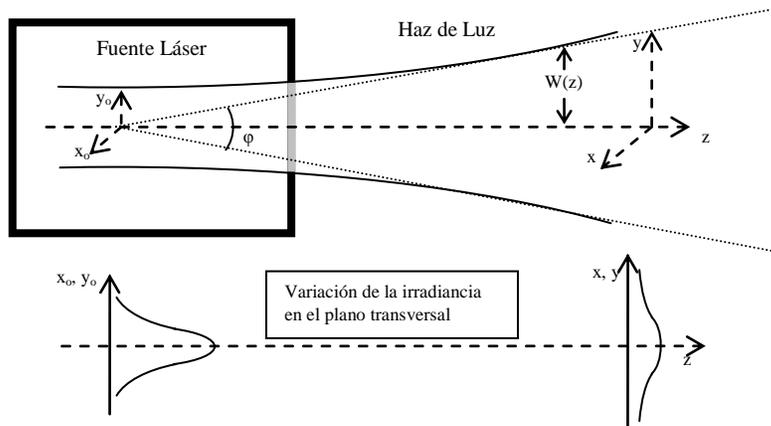


Figura 2.4. Variación de la distribución de potencia según la distancia.

Distancia	Perfil Lateral de Intesidad (%)	Distribución Espacial de Intensidad (%)
0.0 m		
10.0 m		

Figura 2.5. Distribución axial de potencia Vs. Distancia de proyección.

El índice de refracción es un factor propio de cada medio, y depende directamente de su influencia en la velocidad de propagación de una onda electromagnética, comparada con la velocidad de la luz en el vacío.

Así, el índice de refracción es un factor adimensional, se puede definir como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio de interés.

$$n = c / v \quad [4.3.1]$$

El índice de refracción del aire a condiciones normales es 1.00029 [22], así que la influencia de este tipo de medio en la velocidad e intensidad de las ondas electromagnéticas que pasa a través de éste, se puede despreciar.

2.3.4. Reflexión de radiación en una superficie

En la etapa de diseño fue necesario comprender el comportamiento de la luz láser, cuando se proyecta sobre la superficie de los objetos que buscamos caracterizar. Este objetivo resulta complejo debido a que los procesos de la interacción Radiación-Superficie, no se pueden generalizar y dependen de diversas variables, entre ellas algunas propiedades moleculares, siendo muy particular para cada caso. En las pruebas preliminares del sistema en desarrollo, algunas de esas variables tienen un valor predeterminado por las características de los dispositivos, por ejemplo la potencia y longitud de onda del láser.

El tipo de superficie más adecuado para realizar barridos en búsqueda de proyecciones, son las superficies Lambertianas (difusores ideales). Este tipo de superficie se caracteriza porque la reflexión de luz es constante independientemente del ángulo desde donde se observe. Las características de la superficie para la realización de pruebas, se pueden simplificar, usando superficies con propiedades reflectivas cercanas a las ideales, como las superficies con acabado “mate” [5].

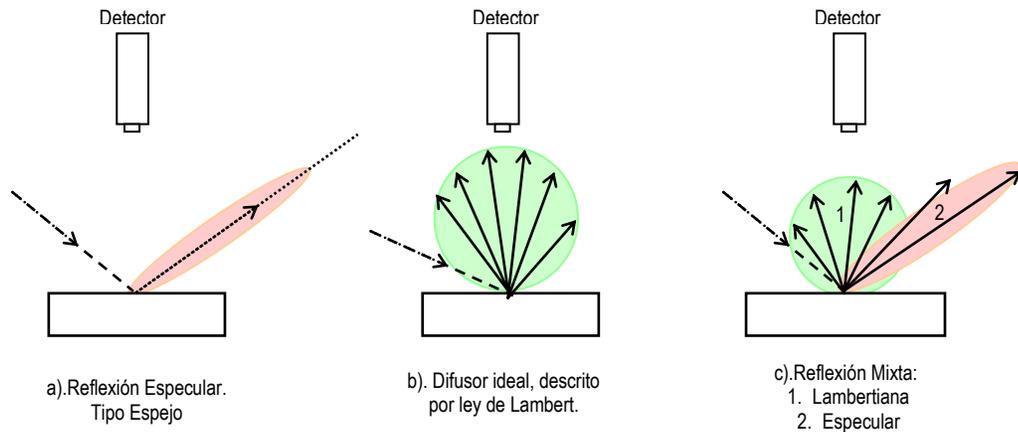


Figura 2.6. Patrones de Reflexión a). Especular, b). Ideal, y c). Mixto.

La mayoría de superficies que encontramos en la naturaleza, reflejan la luz de manera difusa no uniforme (ó mixta), es decir, una mezcla entre reflexión especular (tipo espejo) y difusa Lambertiana, razón por la que pueden ser vistas por el ojo humano [25]. En la figura 2.6 se muestran los tres tipos de reflexión más comunes.

El sistema desarrollado, está diseñado para explorar superficies de reflexión mixta. La reflexión difusa uniforme es una reflexión ideal y por lo tanto imposible de alcanzar. Existen, sin embargo algunas sustancias que tienen reflexiones muy uniformes y en las que la intensidad de la luz reflejada sólo dependen del ángulo de incidencia del haz en la superficie, (figura 2.7). La intensidad reflejada de las superficies que se denominan Lambertianas esta dada por:

$$I_r = K_\lambda \cdot I_i \cdot \cos\phi$$

Donde I_r , es la intensidad de la luz reflejada, I_i , es la intensidad de la luz incidente, K_λ , es una constante de reflectividad de la superficie para esa longitud de onda y ϕ es el ángulo entre la luz incidente y la normal a la superficie.

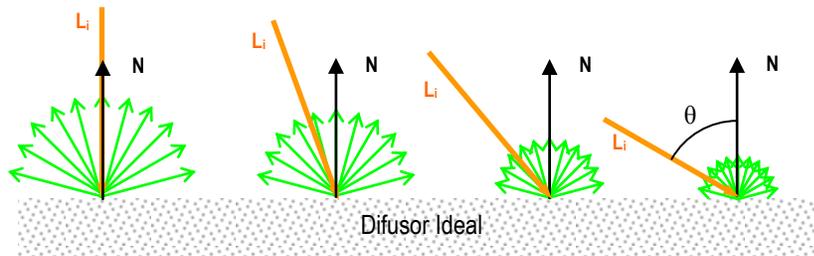


Figura 2.7. Reflexión Lambertiana.

Así, con la ley del coseno de Lambert, se puede determinar cuanta porción de la radiación incidente en una superficie difusa uniforme es reflejada.

En los experimentos realizados con el sistema propuesto, se utilizó una superficie de papel, ya que este posee cierta cantidad de carbonato de calcio, que evita la translucidez, dando al papel propiedades reflectivas adecuadas para la etapa de experimentación, donde se buscaba simplificar las interacciones de la luz con la superficie.

2.4 Técnicas de telemetría láser

La aplicación de láser en robótica se ha incrementado debido a la portabilidad, eficiencia, costos y bajo consumo energético de los nuevos tipos de diodo láser. [4]. Para el presente trabajo, se establece trabajar con luz láser debido a que las cualidades propias como la direccionalidad (divergencia < 1 mrad), posibilita la generación de un haz altamente colimado manteniéndose una alta densidad de energía incluso a grandes distancias [18]; esta cualidad es consecuencia natural del hecho de que el medio activo (gas HeNe) esta colocado en una cavidad resonante. [7].

2.4.1 Medición de tiempo de Vuelo

En estos sistemas activos, se emite un haz pulsado y se mide el tiempo que invierte el pulso de energía en retornar³ a un foto detector, a este tiempo se le llama tiempo de vuelo [25] . Posteriormente se analiza la diferencia desde el instante de emisión con del de recepción, y ese tiempo es proporcional a la distancia en cuestión. Esto complica la medida de rangos pequeños; por ello las aplicaciones más abundantes de TOFM (tiempo de vuelo)se centran en mediciones de distancias superiores 5 Km [11]. Así, cuando se realiza una medida con una capacidad de discriminación de 1 mm, teniendo en cuenta la velocidad de la luz, se debe contar pulsos con periodo de 3 ps. Este hecho limita en gran medida las resoluciones en distancia alcanzables mediante esta técnica de telemetría [24].

2.4.2 Detección de fase

Esta técnica se basa en medir diferencia de fase entre un haz emitido y el recibido. El tipo de láser usado con esta técnica, se suele llamar láser de onda continua (CW Laser). El haz emitido corresponde a una fuente de luz láser modulada en amplitud.

La radiación reflejada es dirigida a un foto detector, cuya señal eléctrica de salida se filtra y luego se compara con la señal de referencia mediante un analizador de fase. El corrimiento de fase se utilizó para calcular de una forma directa la distancia. El rango de uso de esta técnica es hasta 100 mm, con errores de unos pocos milímetros [7]

Esta técnica puede provocar la obtención de medidas ambiguas, cuando las señales se desfasan en más de un periodo. Por tanto, la utilización de este tipo de sistemas de telemetría se recomiendan para entornos donde la máxima distancia este dentro del rango en el cual no se produzca un desfase mayor de 360 grados. [18].

³ Retorno por efecto de reflexión del haz emitido sobre superficie de interés.

2.4.3 Triangulación

El conocimiento y la aplicación de la trigonometría en la resolución del problema de obtención de coordenadas de un punto en un espacio tridimensional, han contribuido ampliamente al desarrollo de sistemas automáticos de determinación de coordenadas. Se conoce como triangulación a la técnica que determina las características de un triángulo cualquiera, usando mínimo tres datos del triángulo [5]. Así, si una de las características desconocidas de un triángulo es el dato de interés⁴, usando tres datos de ese triángulo se puede deducir matemáticamente el dato desconocido.

La técnica que se utilizó en este proyecto consiste de una fuente de energía láser y un detector de radiación puntual. Así, conociendo el ángulo de emisión del haz láser, el de recepción (eje de reflexión) y la distancia a la entre emisor y receptor, mediante triangulación (cálculos trigonométricos) se puede deducir la distancia a la que se encuentra un determinado objeto dispersor de la luz. [30]

En los sistemas basados en triangulación el rango y la variación de la medición limitada a debido a la presencia de zonas oscuras y una dependencia de la precisión con las dimensiones de triángulo que sirve como base de los cálculos. Contrariamente los sistema TOFM, poseen una resolución baja, un rango de medición amplio, sin zonas prohibidas [27].

⁴ Para este proyecto la distancia hasta el obstáculo es el dato de interés.

Capítulo 3.

Desarrollo del prototipo

3.1 Escenario

El desarrollo del prototipo se fundamenta en resolver el problema de navegación de un robot autónomo, que se mueve dentro de un entorno urbano, es decir, con construcciones civiles en las que los espacios para desplazarse son los que se han diseñado para personas.

La meta del proyecto es ofrecer un sistema de detección de distancias hasta un obstáculo y la descripción mínima necesaria del mismo, para su evasión durante la navegación del robot que porta dicho sistema. Para simplificar y aproximar las dimensiones del campo de visión del sistema de visión artificial (SVT) a las de un pasillo de un edificio civil, se seleccionaron las siguientes medidas, 1 metro de alto, 2 metros de ancho y 10 metros de profundidad. Sin embargo, cabe mencionar, que estas medidas pueden variar de manera dinámica durante la navegación, cambiando solamente parámetros en el programa que controla el sistema.

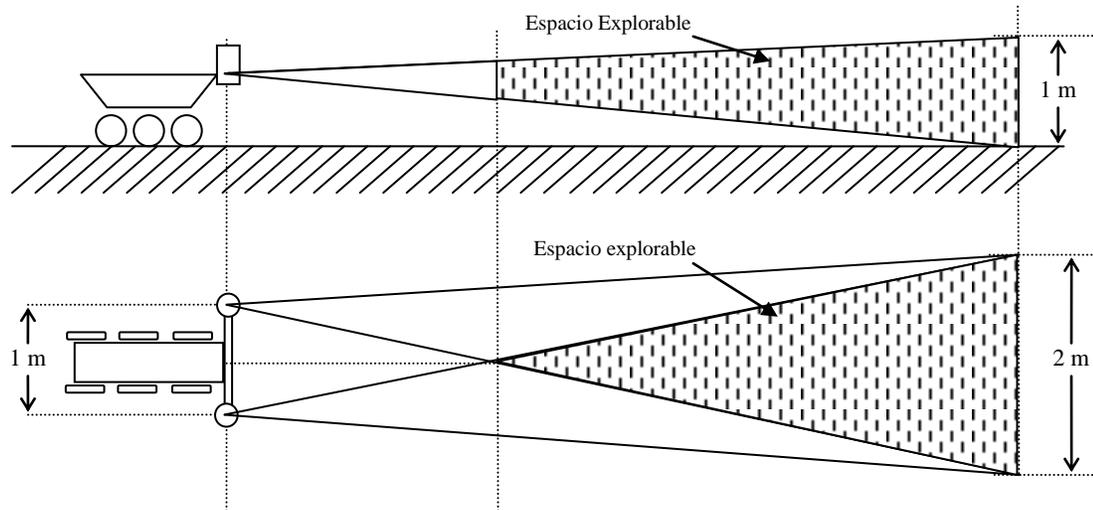


Figura 3.1. Vista lateral y superior del espacio explorable.

Las dimensiones del Campo de Visión junto con los puntos de origen y recepción de la información óptica limitan el espacio explorable, teniendo en cuenta que esos puntos están separados (por una distancia conocida), se puede concluir que el escenario explorable por el SVT, corresponde al espacio interfecto de dos pirámides de igual base con vértices en los puntos extremos del SVT. (Figura 3.1)

Geoméricamente, es posible determinar el espacio que puede explorarse a una distancia determinada con el SVT propuesto. (Figura 3.2). El tamaño detectable de un objeto usando el rastro de luz láser, no depende directamente de su tamaño, sino del tipo de reflexión de su superficie [1]. De este modo, un obstáculo con una superficie difusora casi ideal, presentará más puntos explorados que uno del mismo tamaño que tenga zonas de alta reflectividad especular o de reflectividad nula.

3.2. Medición de distancia

La técnica de triangulación consiste en determinar la altura h (que corresponde a la distancia de interés) a partir de 3 datos conocidos de un triángulo⁵, dos ángulos (**C** y **B**) y la longitud de la base (a) de el triángulo. (Figura 3.3)

Se puede decir entonces que existe una función matemática $D(a,C,B)$ para el valor de distancia que depende de las variables a , B y C . Dicha función se deduce a partir de algunas propiedades de los triángulos. La primera que se utiliza es la Ley de senos [2]:

$$\frac{a}{\text{sen } A} = \frac{b}{\text{sen } B} = \frac{c}{\text{sen } C} \quad (3.1)$$

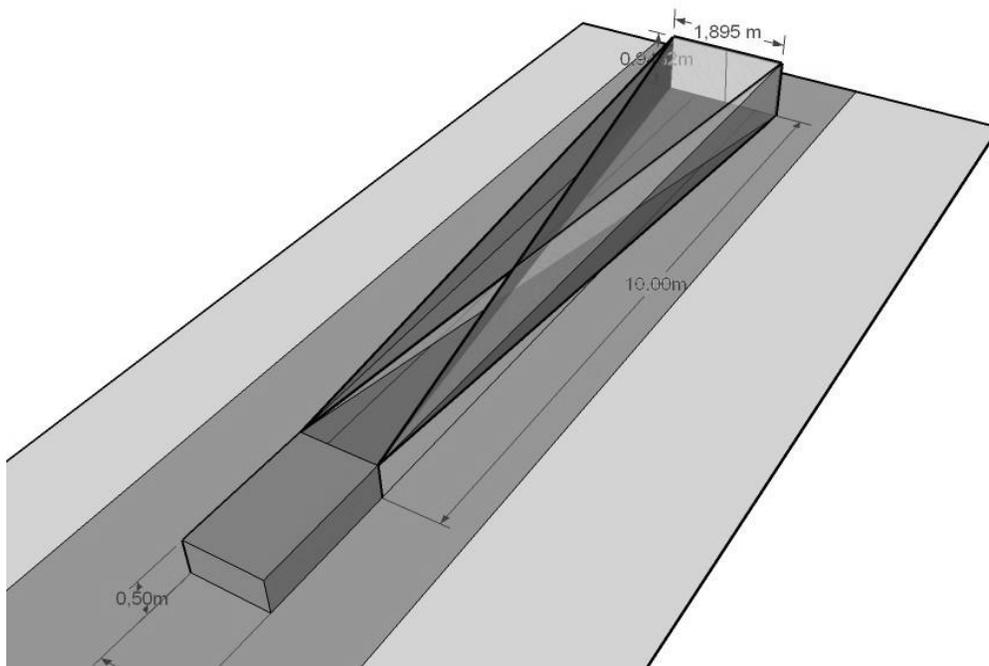


Figura 3.2. Escenario Explorable en vista tridimensional.

⁵ Para éste sistema, un lado del triángulo se forma con un haz de luz láser, el segundo lado se forma desde la proyección del láser en una superficie hasta el receptor óptico, y la dimensión de la base es la distancia entre el emisor de luz y el receptor.

En la Figura 3.3 puede ver que la distancia desconocida d coincide con la altura del triángulo formado por Emisor-Proyección-Receptor. Y matemáticamente se establece que:

$$\text{sen } C = \frac{d}{b}, \text{ despejando } b, \text{ se tiene: } b = \frac{d}{\text{sen } C} \quad (3.2)$$

$$\text{sen } B = \frac{d}{c}, \text{ despejando } c, \text{ se tiene: } c = \frac{d}{\text{sen } B} \quad (3.3)$$

Reemplazando ecuaciones (3.2) y (3.3) en (3.1) se eliminan las distancias (desconocidas) b y c , y se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{d}{\text{sen}(C)\text{sen}(B)} = \frac{a}{\text{sen}(A)} \quad (3.4)$$

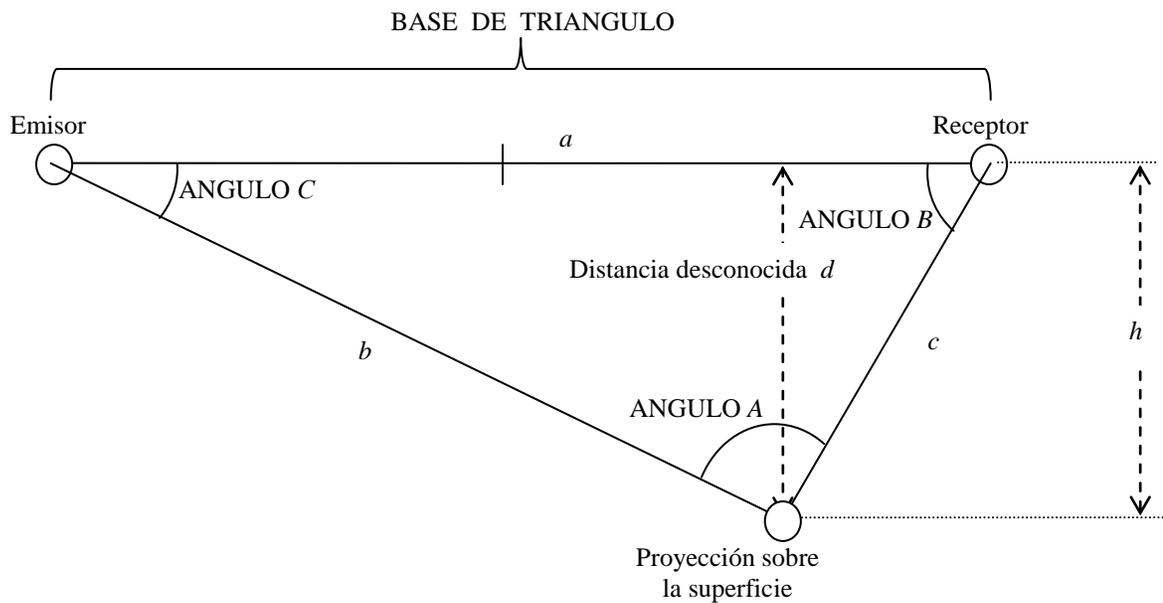


Figura 3.3. Triangulación en la medición de distancia.

Por propiedad general de los triángulos [27] se sabe que la suma de los ángulos internos A, B y C es 180 grados, así se obtiene que:

$$A = 180 - (B + C) \quad (3.5)$$

Sustituyendo la ecuación (3.5) en (3.4) se tiene:

$$\frac{d}{\text{sen}(C)\text{sen}(B)} = \frac{a}{\text{sen}(180 - (B + C))}$$

Despejando d , se obtiene la función $d(a, B, C)$:

$$d(a, B, C) = \frac{a \cdot \text{sen}(B) \cdot \text{sen}(C)}{\text{sen}(180 - (B + C))} \quad (3.6)$$

De esta forma, a partir del teorema de senos [30] y de tres parámetros iniciales (ángulo de emisión C , ángulo de recepción B , y distancia entre emisor y receptor a), se determina la distancia d desde la base hasta la proyección de un haz de luz en el obstáculo.

La distancia $d(a, B, C)$, es el valor de distancia entre el sistema Emisor-Receptor y el punto de proyección de luz láser sobre una superficie para cualquiera que sea el ángulo vertical de proyección-emisión θ .

3.3. Determinación de coordenadas tridimensionales

La triangulación para este caso en particular, supone, la creación y análisis de un triángulo de altura d . A partir de la función de distancia $d(a, B, C)$ y del valor del ángulo vertical de proyección θ , es posible conocer más detalles del punto explorado: sus coordenadas tridimensionales.

Las coordenadas tridimensionales $P_{m,n}(x, y, z)$ de cada punto explorado esta en función de tres variables:

- i. *Ángulo de emisión horizontal (C).*
- ii. *Ángulo de emisión vertical (θ).*
- iii. *Ángulo de detección horizontal (B).*

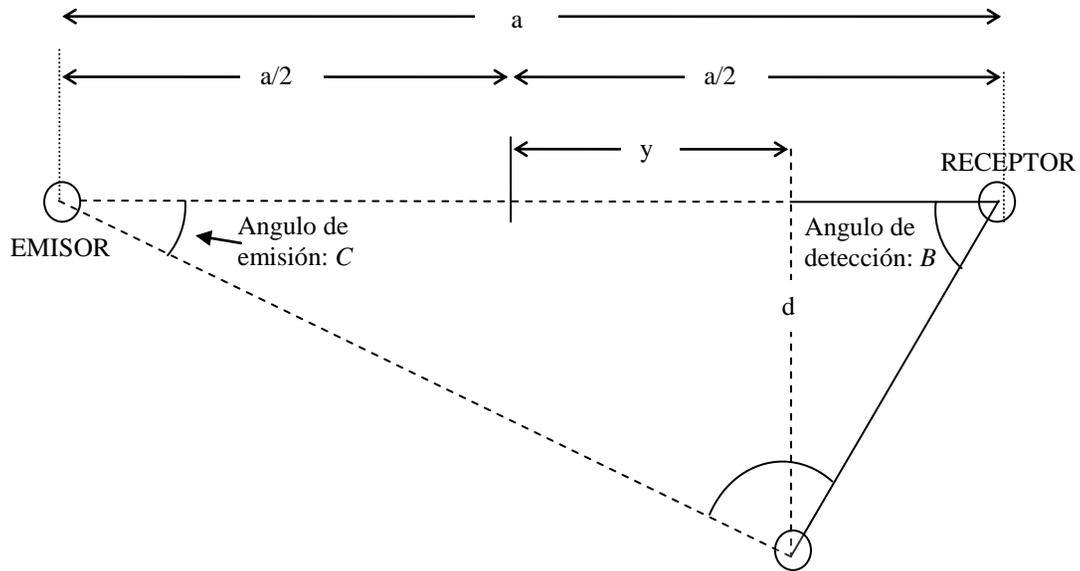


Figura 3.4. Triangulación en la determinación de coordenada y .

El único dato que se obtiene del punto explorado, es el ángulo de recepción (B) de la señal óptica reflejada, una vez determinado dicho ángulo se completa la información necesaria para la determinación de las coordenadas tridimensionales del punto $P_{m,n}(x, y, z)$.

3.3.1. Coordenada y

Del triángulo rectángulo punteado de la Figura 3.4 se tiene que:

$$\tan(C) = \frac{d}{\frac{a}{2} + y} \quad (3.7)$$

Despejando y de la ecuación (3.7), se tiene que:

$$y = \frac{d}{\tan(C)} - \frac{a}{2} = d \frac{\cos(C)}{\sen(C)} - \frac{a}{2} \quad (3.8)$$

Sustituyendo el valor de d en (3.8), se tiene:

$$y = \frac{a \cdot \sen(B) \cdot \sen(C)}{\sen(180 - (B + C))} \cdot \frac{\cos(C)}{\sen(C)} - \frac{a}{2} \quad (3.9)$$

Simplificando la expresión (3.9) se obtiene el valor final de la coordenada y , que corresponde a la posición horizontal del punto proyectado:

$$y = a \left[\frac{\text{sen}(B) \cdot \cos(C)}{\text{sen}(180 - (B + C))} - \frac{1}{2} \right] \quad (3.10)$$

3.4.2. Coordenadas x y z .

La figura 3.5 muestra una vista lateral del sistema desarrollado. Del triángulo rectángulo en figura 3.5 se tiene que:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{z}{d} \quad (3.11)$$

Despejando z de la ecuación (3.11) se obtiene el valor final de la coordenada z :

$$z = d \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.12)$$

En la Figura 3.5 se puede observar que la coordenada x es la magnitud de la proyección de la distancia d sobre una paralela al suelo. Basándose en el valor del ángulo vertical de proyección θ se puede deducir el valor de x de la siguiente manera:

$$\cos(\theta) = \frac{x}{d} \quad (3.13)$$

Despejando x de la ecuación (3.13) se obtiene el valor de la coordenada x :

$$x = d \cdot \cos(\theta) \quad (3.14)$$

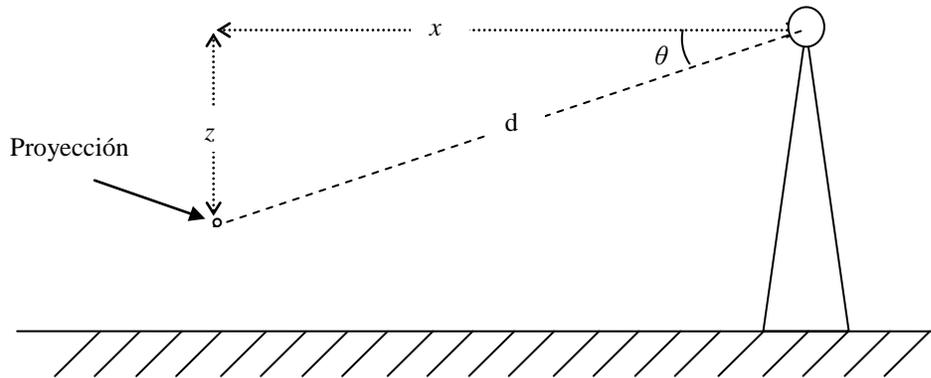


Figura 3.5. Triangulación para determinar coordenada vertical z .

3.4. Sistema técnico de proyección

En el presente capítulo se describen las dimensiones que se tomaron en cuenta para diseñar y determinar los límites operativos del sistema. Se consideraron algunas de las dimensiones usuales de edificios civiles, considerando que el sistema pueda ser capaz de percibir los obstáculos que un entorno urbano presenta en sus etapas experimentales.

3.4.1. Fuente Láser

El equipo de emisión de radiación Láser utilizado en éste proyecto, hace parte del conjunto de equipos ópticos del laboratorio del instituto de Ingeniería. Dicho dispositivo no es portátil y debido a que requiere corriente alterna para operar, y la finalidad del proyecto precisa dispositivos que posean características de portabilidad en cuanto a tamaño y a alimentación. Por ahora se usa en la etapa experimental del proyecto.

3.4.2. Grados de libertad

Una alternativa económica para la obtención de mapas tridimensionales consiste en montar un sistema de barrido bidimensional sobre una base que permita movimientos verticales (arriba y abajo). [32]. En este orden de ideas, se debe entonces dirigir el haz de luz láser, en dos direcciones (vertical y horizontal), y desde un mismo punto, de esta forma el movimiento del haz es de dos grados de libertad, ver figura 3.6.

Debido al peso y fragilidad del emisor láser, se diseñó un sistema de movimiento con dos espejos y con dos grados de libertad, logrando minimizar a un sólo grado de libertad (vertical) de movimiento que se realiza sobre el emisor láser. Mientras que el segundo grado de libertad (horizontal) del haz, lo proporciona un espejo de 45 grados que rota sobre el eje de un motor.

El arreglo de los espejos permite ubicar el emisor láser entre los extremos del SVT. La ubicación del eje de giro en el centro del espejo rotatorio garantiza que el haz reflejado de éste, tenga un mismo punto de origen, para cualquier valor de ángulo vertical.

3.4.3 Control de movimiento y dispositivos móviles

El barrido con el haz, resulta angularmente lento comparado con la velocidad angular del receptor, debido a que el haz de luz se debe proyectar hasta que el receptor detecte la reflexión sobre el obstáculo.

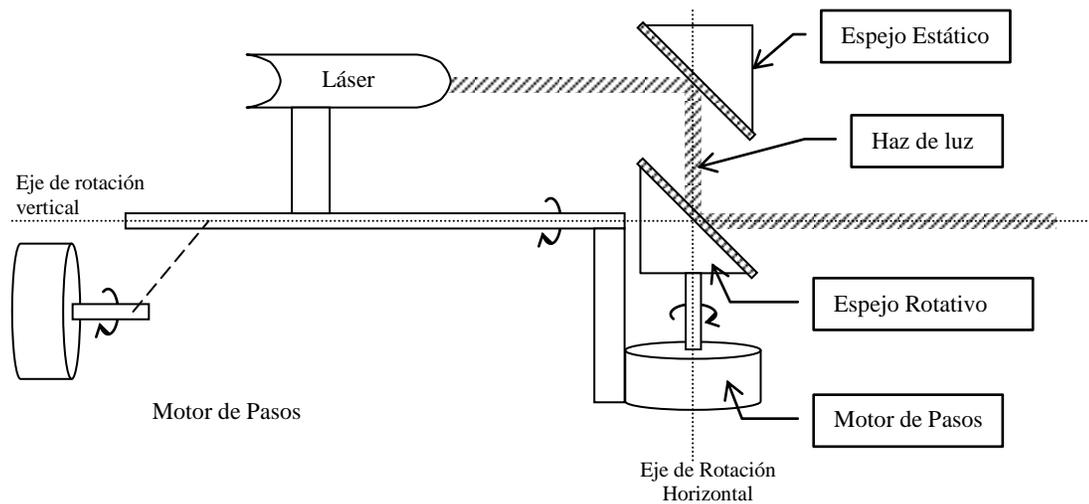


Figura 3.6. Esquema básico de sistema emisor de luz láser.

Éste comportamiento, exige detener momentáneamente el giro horizontal por un lapso de tiempo suficiente para determinar la presencia ó ausencia de una reflexión en una superficie. Por esta razón y debido a que es posible conocer la posición angular instantánea de los motores de pasos (siempre que el punto de inicio del movimiento sea el mismo), éstos son una alternativa viable, para este tipo de movimientos.

Con el fin de maximizar la precisión de las mediciones, se seleccionaron los motores con el paso angular más pequeño disponible, dicha característica la ofrecen los motores con reducción mecánica. El motor elegido para controlar el movimiento horizontal, posee una relación de reducción de 82.5:1, ésta reducción mecánica del ángulo de cada paso, es un factor determinante del tiempo que tomará el sistema para realizar un barrido completo.

Así por cada 82.25 revoluciones del motor de pasos (en su eje interno), el eje de salida habrá rotado una vuelta completa. De este modo un paso del motor interno, que es de 7.5 grados, da como resultado, un movimiento en el eje externo de $7.5/82.25$ grados que es igual a 0.09118 grados.

El motor de giro horizontal no realiza un esfuerzo apreciable al girar al espejo, ya que no hay fuerzas externas que se opongan a su movimiento. El motor de giro vertical realizara esfuerzo en contra de cada movimiento, ya que el centro de masa del sistema no coincide con el eje de rotación vertical. Éste esfuerzo extra se compensó usando una relación entre los radios del eje de motor de pasos y el engrane del eje vertical.

Motor Modelo # C35M048A03-X:

- Tensión de Operación: 12V DC
- Impedancia de cada Solenoide: 155 ohm
- Corriente: 0.0774 mA

El envío y recepción de datos desde y hacia el sistema de control (computador portátil) se realiza por medio del puerto paralelo, de conexión DB25 (Figura 3.7).

Con este rango de voltaje y corriente, se decide usar el circuito integrado ULN2003A y los optoacopladores MOC 3021, para el diseño de la interfaz entre un computador y los motores de pasos.

La interfaz (Figura 3.8) permite en este caso:

1. Controlar tensiones de 12 voltios.
2. Ofrecer la corriente que necesita cada bobina de cada motor para funcionar adecuadamente.
3. Proteger el sistema digital (PC) contra posibles cortos circuitos externos en las conexiones y/o motores.

El control electrónico del movimiento del subsistema emisor deberá cambiar de posición angular el vector de proyección del haz láser según un patrón determinado. En nuestro caso dicho patrón es el campo de visión planteado para un sistema de visión en un entorno urbano es de 20 proyecciones a lo ancho, por 10 proyecciones en altura; sin embargo, este patrón puede modificarse, según la aplicación del sistema.

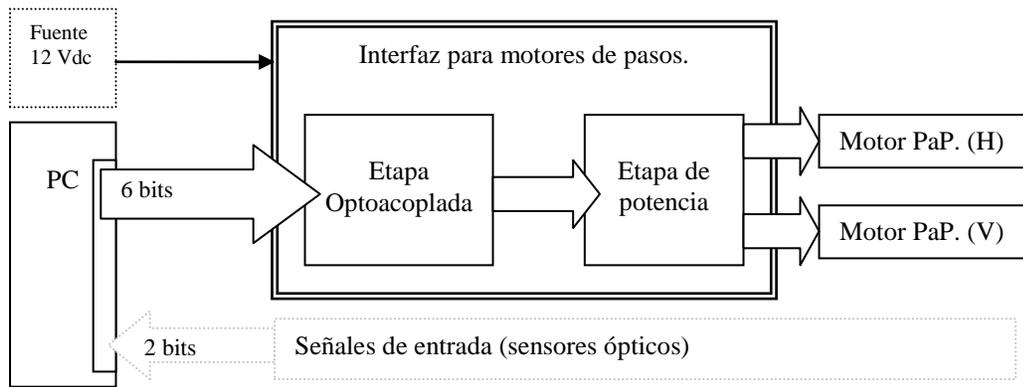


Figura 3.7. Diagrama de flujo de datos.

El control de movimiento se hace mediante el puerto paralelo de un computador. El software que controla el flujo de datos desde y hacia el puerto, es el C++. Este software se seleccionó, debido a su capacidad de manejar bit a bit los datos del puerto paralelo. Una vez seleccionado el puerto, se seleccionaron los 6 bit de éste, que serán usados para el control de movimiento. Los dos bits restantes, se usarán para recibir las señales que se generan por los sensores ópticos del sistema.

Para optimizar el uso de numero de bits se propone un circuito multiplexor en la entrada de la etapa de potencia, con el cual se logra controlar 8 bits para el movimiento de los 2 motores de pasos, usando solamente 4 bits de datos y dos de control. Así, en el puerto quedan 2 bits disponibles, que se usan para la entrada de señales digitales.

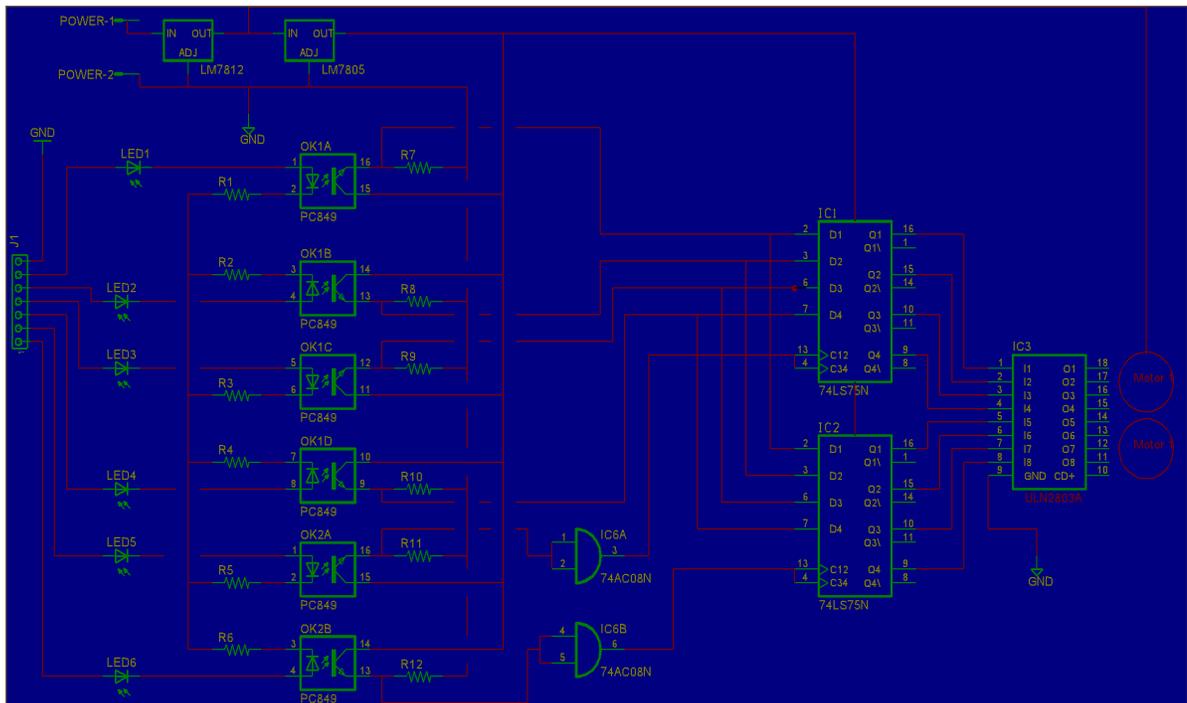


Figura 3.8. Circuito esquemático de la interfase electrónica.

3.4.4. Algoritmo de control de movimiento

En el sistema de procesamiento de datos (actualmente un computador portátil) se implementaran dos tipos de algoritmos, ver figura 3.9.

1. El primer algoritmo corresponde al de control de posición angular de haz y se repite cada dos imágenes completas de la escena, ya que la ruta de retorno al punto inicial puede aprovecharse para generar otra imagen.
2. El segundo algoritmo que se implementa, corresponde al cálculo y almacenamiento de coordenadas, y lleva a cabo tres procesos básicos que se mostrarán en el siguiente capítulo.

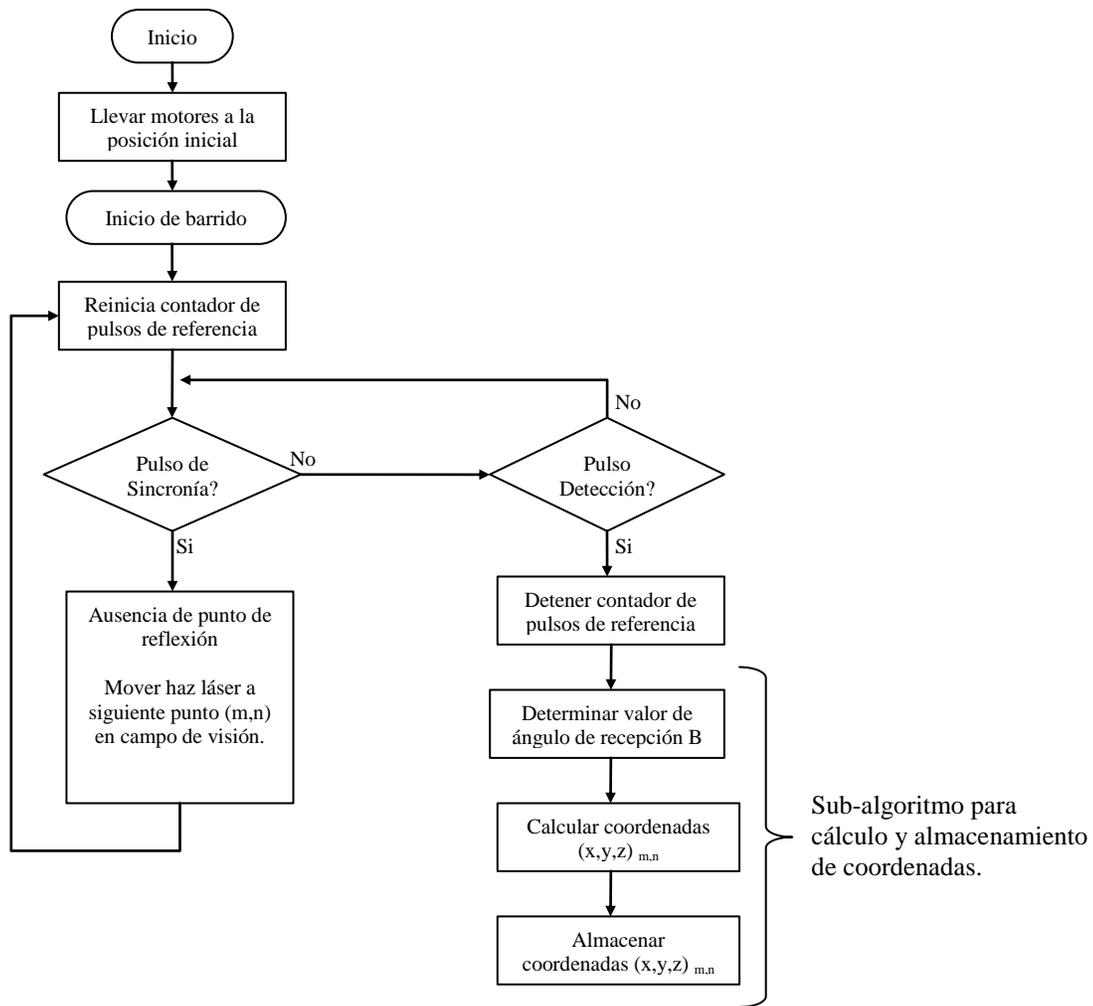


Figura 3.9. Diagrama de flujo del algoritmo general.

El movimiento del haz de luz, generado por los motores de pasos, es un movimiento que se repite en cada barrido de una escena, se puede entonces, determinar su comportamiento, mediante un algoritmo de control. El algoritmo tiene la siguiente estructura básica, donde el haz se mueve horizontalmente a la izquierda desde una posición inicial.

En cada nueva posición, el algoritmo espera a que aparezca el pulso de sincronía. Pulso desde el cual comienza a contar hasta la aparición del pulso de detección. Si no existe el pulso de detección, el espejo rota hacia la siguiente posición.

Si el pulso de detección existe, se determina el ángulo de detección. Posteriormente se calculan las coordenadas (con base en cálculos trigonométricos de la técnica de triangulación), y se almacenan según su orden de aparición. Este algoritmo se repite siempre para cada punto explorado.

Al momento de explorar un punto con otra altura, se realiza un paso en el motor vertical, y el algoritmo se repite de nuevo.

3.5. Procesamiento de señales y datos

En éste apartado se explica el procedimiento para obtener las coordenadas de la superficie explorada.

La generación de imágenes a partir de barridos con luz láser, consiste en coleccionar información individual de cada punto, que en conjunto constituye un modelo tridimensional de la escena original [8].

Los datos que el sistema entrega inicialmente, son dos variables dependientes del tiempo. Una de ellas, denominada dentro del texto como pulso de sincronía, corresponde a una señal digital que es generada siempre en cada rotación del espejo en la apertura óptica (receptor). La segunda señal denominada en el texto como pulso de detección, corresponde a un pulso que existe siempre y cuando se ha detectado una señal luminosa del láser sobre una superficie dentro del rango de barrido del emisor láser.

El tiempo entre el pulso de Sincronía, y el pulso de Detección, determina el ángulo de recepción de la proyección del láser sobre una superficie.

El conocimiento del ángulo de recepción, permite mediante operaciones trigonométricas determinar cada una de las coordenadas rectangulares del punto iluminado. El algoritmo que se implementó realiza un conjunto de cuatro tareas básicas la determinación del ángulo, determinación de coordenadas, y almacenamiento.

La determinación del ángulo de recepción se realiza mediante un conteo de pulsos entre la aparición de la señal de sincronía y la señal de detección. Si la señal de detección no se presenta en un barrido, el sistema continua explorando el siguiente punto.

Para aumentar la confiabilidad de las mediciones, en la etapa a experimental cada punto es explorado 10 veces, así, si un punto es detectado, el ángulo de detección se almacena en diez locaciones de memoria diferentes y luego se promedia.

Teniendo el valor promedio del ángulo de detección, se procede a calcular las coordenadas tridimensionales del punto explorado. Para hacerlo se evalúan tres ecuaciones correspondientes a cada coordenada, usando el valor del ángulo B obtenido en el primer paso.

Finalmente, cada terna de coordenadas, se almacena en un archivo, al cual se le adicionan los datos de los nuevos puntos detectados.

La información obtenida información puede ser enviada a otro sistema de cómputo para su análisis y reacción por parte del robot móvil. En la etapa de diseño, las variables se almacena en el disco duro del computador donde se implementó el algoritmo.

3.5.1. Señales de entrada

Son dos las señales de entrada al sistema de procesamiento de datos: la señal de detección y la señal de sincronía.

3.5.1.1. Señal de detección

Esta señal es generada por el sensor óptico de la apertura. Se genera cuando la luz láser incide sobre un objeto y su reflejo incide sobre la superficie de un fotodiodo. Es decir, que esta señal, existe sólo cuando existe una superficie (u obstáculo) en la que se refleja la luz del emisor. Es importante mencionar, que la salida del fotorreceptor es una señal análoga y es necesario incluir una etapa de acondicionamiento para convertir dicha señal en un pulso digital.

El ancho del pulso generado por el fotorreceptor depende directamente de dos variables: la velocidad del motor del receptor y el tamaño de la mancha sobre el obstáculo. Y se puede calcular de la siguiente manera:

$$T_{pulso} = \frac{60 \cdot D_p}{2 \cdot \pi \cdot V_{rpm} \cdot X_o} \quad (3.15)$$

Donde:

D_p : es el diámetro de la mancha sobre el objeto, en centímetros.

X_o : es la distancia del sensor al obstáculo, en centímetros.

V_{RPM} : es la velocidad del motor de sensor, en revoluciones por minuto.

T_{pulso} : es la duración del pulso óptico, en segundos

Si se usan los siguientes datos:

$$D_p = 1 \text{ cm}, \quad X_o = 100 \text{ cm}, \quad RPM = 10$$

Se obtiene que: $T_{pulso} = 9.55 \text{ ms}$.

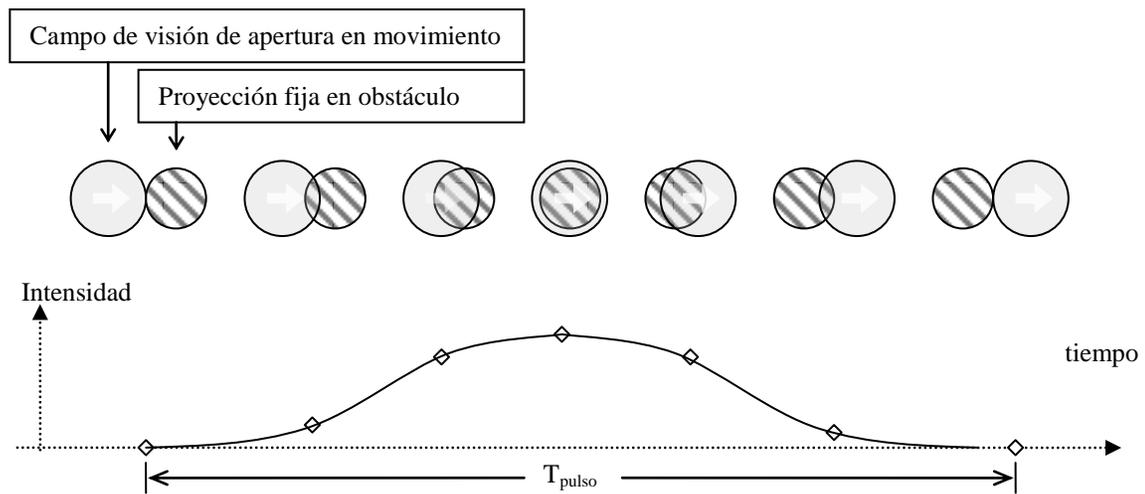


Figura 3.10. Intensidad de señal de sensor vs. Tiempo.

Los experimentos realizados, presentaron limitantes con la distancia, permitiendo experimentar a 1 metro del obstáculo. Para ese valor tenemos los siguientes cálculos del ancho de pulso.

$$D_p = 0,1 \text{ cm} , X_o = 100 \text{ cm} , \text{RPM} = 10$$

Se obtiene que: $T_{\text{pulso}} = 0.095 \text{ ms}$.

La forma de la señal generada tiende a comportarse como una función gaussiana, debido a la distribución gaussiana de la reflectancia de la proyección, y al movimiento del vector de recepción sobre la proyección. Figura 3.10.

3.5.1.2. Señal de sincronía

Esta señal es generada por un sensor óptico ubicado sobre el eje de giro vertical. Y se genera cada vez que el sistema rotatorio del receptor da una vuelta. El sensor es del tipo Emisor-Receptor, y el pulso se genera debido a que la luz (de un led infrarrojo) pasa del emisor al receptor a través de un orificio en la base del espejo receptor. Figura 3.11.

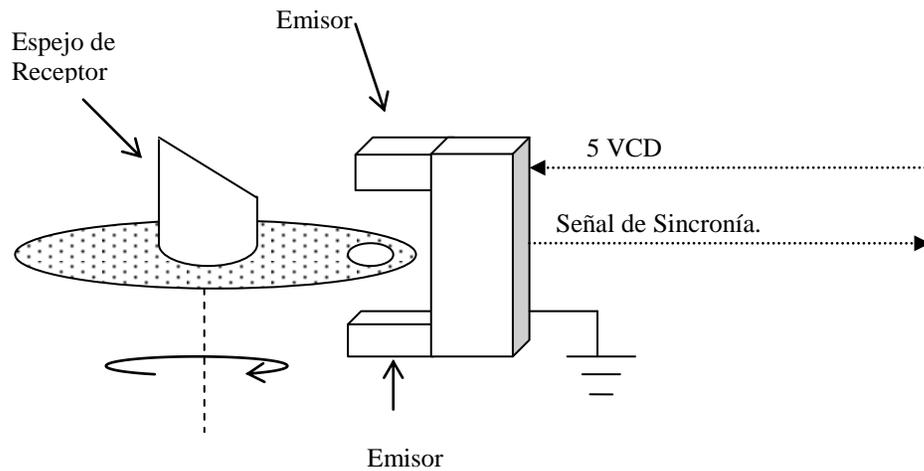


Figura 3.11. Generador de pulso de sincronía.

El pulso de sincronía, permite al sistema reconocer el inicio de cada vuelta en el espejo de recepción, así como determinar la frecuencia de rotación del mismo.

Debido a que el diámetro del agujero es constante, es constante también la relación entre el ancho de pulso de sincronía y la duración de una revolución. A partir de mediciones realizadas con un osciloscopio digital, se obtiene el valor de esa relación, a la que también se le puede llamar Ciclo de Trabajo del pulso de sincronía. Ver figura 3.12.

Es fácil, apreciar que la duración del periodo de una vuelta es la suma de los pulsos Inactivo y Pasivo. La relación en la ecuación (3.16) es constante.

$$\frac{T_1}{T_2} = \delta \quad (3.16)$$

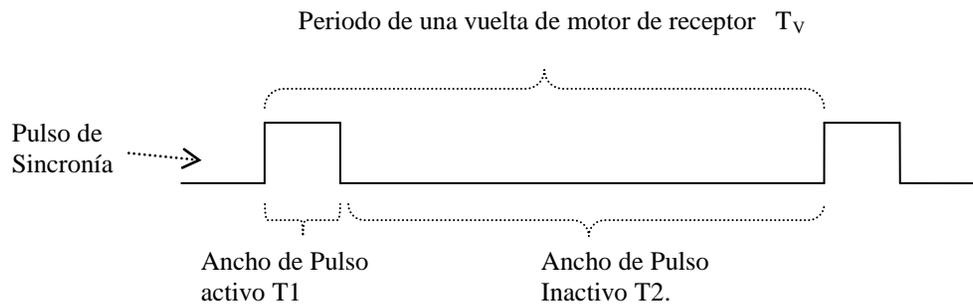


Figura 3.12. Ciclo de trabajo de la señal de sincronía.

Se realizaron 21 mediciones de los pulsos T1 y T2, a diferentes velocidades del motor del receptor y se obtuvieron los valores para δ . En la tabla 3 se aprecian los valores máximos y mínimos de δ a diferentes velocidades de rotación. .

	Δ
Maximo (3.09 Hz)	0.053056027
Minimo (201.5 Hz)	0.038655373
Promedio	0.042757426

Tabla 3. Datos experimentales de señal de sincronía.

Se observa como el periodo del pulso de sincronía varia de un 3.865% hasta un 5.305% del periodo de una vuelta. Es importante conocer el comportamiento de éste parámetro, que teóricamente debe ser constante, ya que servirá dentro del algoritmo de determinación de ángulo de recepción, para obtener una medición precisa del periodo total de cada revolución. Se aprecia además que este cambio en el valor de δ , es una causa de error en el sistema, ya que no es constante, a diferentes velocidades de rotación.

3.5.2. Determinación de ángulos

El sistema de procesamiento de datos debe tener la capacidad de conocer el valor de los ángulos vertical, de proyección y de recepción, para poder determinar las coordenadas de un punto detectado sobre un obstáculo.

Los valores del ángulo de emisión y el ángulo vertical, se conocen de manera permanente pues esos valores están almacenados en variables del tipo acumulador, que cambian conforme cambian las posiciones de los motores de pasos.

La determinación del ángulo de recepción, se basa en el conteo de los pulsos (de referencia) que ocurren desde el pulso de Sincronía y hasta que aparece el pulso de detección. Ver figura 3.13.

En éste trabajo la frecuencia de los pulsos de referencia, equivalen a la tasa de muestreo del algoritmo. Y su frecuencia es de 114.675 Hz.

Si el motor gira a 10 RPM, el tiempo que tarda en hacer una revolución es 0.1 ms.

Ahora bien, con una frecuencia de referencia de 114.675 Hz, se tendrá la siguiente relación de pulsos y radianes:

$$11467 \text{ pulsos} = 2\pi \text{ rad} = 360^\circ = \text{Vuelta completa}$$

Con base en la anterior relación, se calcula el ángulo de recepción, a partir de los pulsos contados desde el pulso de posición cero. No se puede determinar con exactitud el ángulo de detección, ya que los pulsos de referencia no son infinitesimales. Gracias a que los pulsos tienen una duración de 8.72 microsegundos, ese será el tiempo máximo que difiere del momento real de la detección. Así, se tiene que el error metodológico máximo que genera este proceso es de:

$$360^\circ / 11467 \text{ microsegundos} = \pm 0.0052^\circ$$

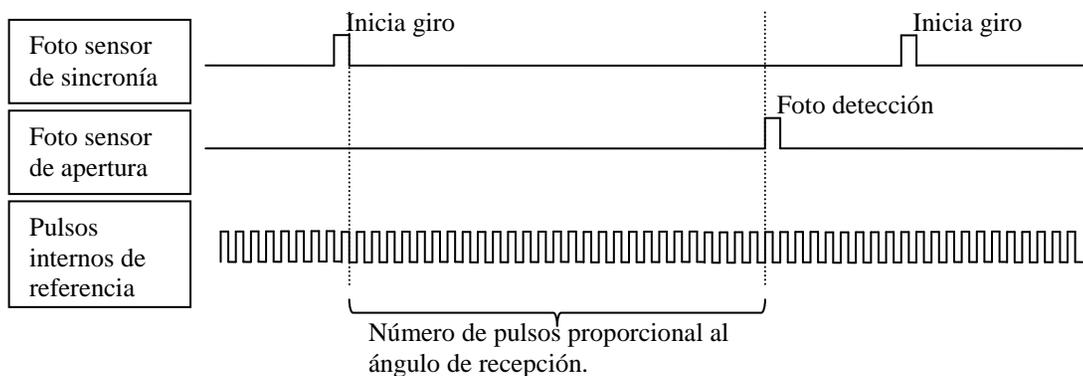


Figura 3.13. Diagrama de señales eléctricas en la medición del ángulo de recepción.

3.5.3. Almacenamiento de coordenadas

En los experimentos realizados, se utilizó una matriz de $2 \times N$ elementos, donde N es la cantidad de puntos muestreados. No se utilizó la matriz $M \times N$, debido a que no fue posible realizar mediciones de la coordenada Z , a causa de un mal funcionamiento del sistema de posicionamiento vertical. De éste modo, las coordenadas almacenadas fueron las coordenadas bidimensionales X y Y . El algoritmo, crea un archivo de texto con los datos de las coordenadas.

3.5.4 Implementación de algoritmo en C++

Este apartado describe el proceso que se lleva a cabo en los principales módulos del algoritmo, que fue implementado en el programa C++, bajo la plataforma DOS 6.1®. Se seleccionó esta plataforma debido a la característica de ser mono-tarea; cualidad que permite enfocar todo la capacidad de proceso a una sola tarea.

3.5.4.1 Declaración de Variables.

La primera declaración corresponde a un vector llamado *COORD*, de 300 campos disponibles; donde cada campo, es del tipo *COORDENADAS*, donde cada cual contiene tres campos internos, dos del tipo *ENTERO DOBLE*, usado para el valor de las coordenadas y uno adicional del tipo *ENTERO* para un índice.

Luego se declara una variable del tipo *PUNTERO A ARCHIVO*, para el almacenamiento de datos en disco. Otras variables, relacionadas con la detección de ángulos, son declaradas según el tipo de dato que se almacena en ellas.

Se declaran además 4 tablas, del tipo *ENTERO*, en las cuales se cargan los datos que se imprimen en el puerto al momento de hacer los movimientos de los motores. Se hacen 4 para tener la opción de dar varios tipos de paso.

3.5.4.2. Función: ShowCoord()

Esta función se encarga de imprimir en la pantalla un listado de las coordenadas almacenadas en disco. Logra mediante el uso de un ciclo *FOR*, repetir una orden que imprime en la pantalla del usuario cada coordenada.

3.5.4.3. Función: GrafXY()

Al principio de ésta función se inicializa el modo grafico. Se seleccionan luego los colores con los que se dibujan luego los ejes *x* y *y*. Esta función principalmente se encarga de imprimir en la pantalla los puntos reales, organizados en forma cartesiana. Para hacerlo se basa en los valores de cada coordenada, almacenados en el vector *COORD*.

3.5.4.4. Funciones: OpenFile(), CloseFile() , AutoSave() y SaveFile()

Estas funciones se encargan de almacenar las coordenadas obtenidas en el disco. La tercera hace un llamado a la apertura y clausura del archivo, antes y después de la escritura respectivamente. La última de ellas, realiza la acción directa de escritura física en el disco.

3.5.4.5. Función: Autobarrido() y LeerCiclo

La función *LeerCiclo()* realiza un movimiento en el sistema de emisión, posicionando el láser en un punto de exploración. . Con cada pulso de sincronía, se inicializa el contador de pulsos *CONT1*. Cuando existe un pulso de detección, el valor de *CONT1* se almacena en *CONT3*, y *CONT1* sigue contando, hasta la nueva aparición del pulso de sincronía. Luego con los valores de ambos contadores se calcula el ángulo de recepción. Se realizan 5 muestras del ángulo de recepción y luego se obtiene un promedio en la variable *ANGLEBPROM*.

Con la relación entre los ángulos de emisión y recepción se obtienen el valor de cada coordenada del punto explorado, para luego seguir con el siguiente punto.

La función *Autobarrido()*, llama de manera repetida a la función *LeerCiclo()*, una posición angular inicial conocida (por lo que debe realizarse una calibración previa del sistema). Una vez calibrado, comienza a realizar pasos horizontales, y en cada paso hace el llamado a *LeerCiclo()*. Si existe un pulso de sincronía consecutivo es indicador de que no hay un objeto, y se posiciona en el siguiente punto de exploración.

3.5.4.6. Función Menu():

Esta función, tiene como finalidad, detectar movimiento en el motor del sistema de apertura óptica. Para hacerlo, verifica un cambio de estado en la señal de sincronía, llamada *ZERO* en el programa. Esta función tiene un valor entero; su valor es uno cuando el motor esta girando, y cero cuando está detenido.

3.5.4.8. Función: Main ().

Esta función es la principal del programa, y se ejecuta cuando otra función no esta ejecutándose. Su finalidad es mostrar la posición actual de cada motor de pasos y canalizar a la función correspondiente la selección del usuario.

3.5.4.9. Funciones: pasoarr(), pasoaba(), pasoizq(), pasoder

Cada una de estas funciones imprime en el puerto paralelo un dato que corresponde al giro y motor que se necesita mover. En cada escritura se actualiza el contador de cada eje de movimiento, con el fin de saber siempre en que posición angular se encuentra cada motor. Al final de cada escritura de un dato, el puerto es llevado a cero en todas sus salidas, con el fin de evitar conflictos en la interfase electrónica.

Capítulo 4.

Experimentos y Resultados

En este capítulo se describirán los experimentos realizados con el sistema. Primero, es necesario determinar el Patrón de Reflexión Angular con el fin de entender la dinámica de la reflexión en la superficie patrón cuando varía el ángulo de incidencia del haz sobre la misma. El experimento de Atenuación de Reflexión determina el límite de distancia máxima detectable para el tipo de láser usado, adicionalmente ofrece información del comportamiento del sensor óptico y su sensibilidad. Dentro de la experimentación de medición de coordenadas bidimensionales, se toma un punto de interés arbitrario y sobre ese punto se realizan mediciones para determinar el error del sistema para una distancia constante.

4.1. Experimento 1: Patrón de Reflexión Angular

La reflexión difusa se presenta cuando incide un haz de luz sobre una superficie, y ésta dispersa la luz en todas las direcciones. Muchas superficies lo hacen de manera no uniforme. En los experimentos realizados con el Sistema de Vision Técnico SVT, se buscó tener una superficie lo más cercana posible a una superficie Lambertiana, es decir con un patrón de reflexión circular uniforme.

La intensidad de la luz reflejada en una superficie difusora perfecta, varía según el ángulo que forma el haz de luz incidente con la normal (vector perpendicular) a la superficie. Así, para un ángulo de reflexión de 0 grados con la normal a la superficie, la reflexión será máxima, ya que el coseno de 0 grados es 1; y decrece a medida que el ángulo con la normal aumenta. Véase Figura 4.1. En la figura 4.2 se muestra en cuadros, el patrón de reflexión angular de una superficie difusora ideal⁶ y en rombos el patrón de la superficie de prueba,

⁶ Que cumple con la ley del coseno de Lambert. Donde la intensidad reflejada es proporcional al coseno del ángulo de incidencia.

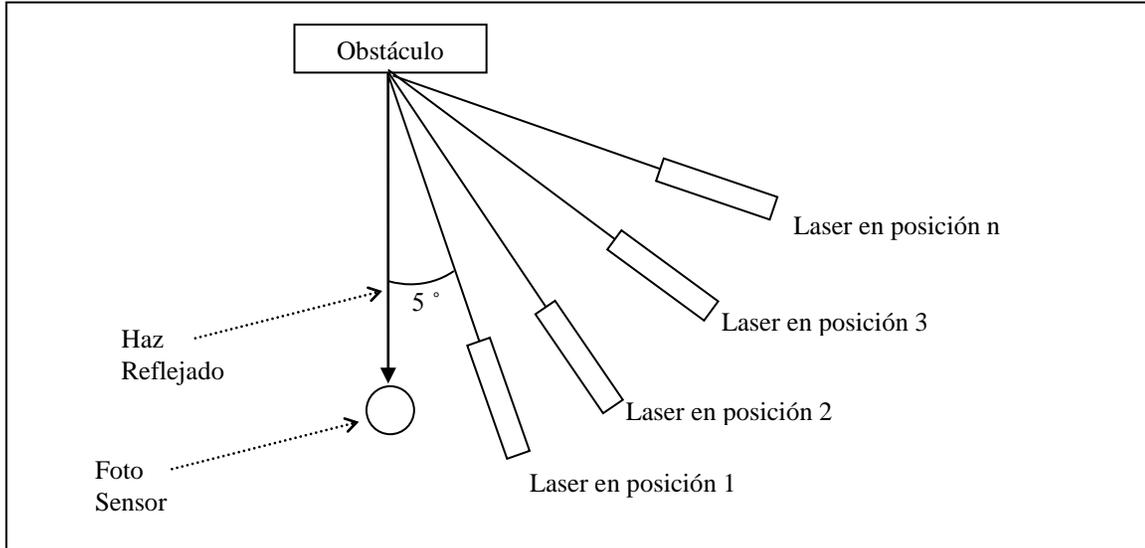


Figura 4.1. Diagrama de experimentación de patrón de reflexión.

que en las experimentaciones fue papel corriente de color blanco. De la figura 4.2 se puede concluir que el papel es un buen difusor, pero no perfecto, ya que para ciertos ángulos de incidencia (entre 20 y 45 grados), la reflectividad es menor que la de un reflector ideal. Característica dada por las características microscópicas del material.

En el experimento se busca el valor de la intensidad máxima reflejada, que se da en un ángulo de 90 grados, según ley de Lambert en la ecuación (4.1)

$$I_r = K_\lambda \cdot I_i \cdot \cos\phi \quad (4.1)$$

Donde I_r es la intensidad reflejada, I_i es la intensidad incidente y K_λ un factor de corrección, dependiente de la longitud de onda.

Se simplifica luego, el factor de intensidad incidente I_i a un valor unitario. Posteriormente se le asigna el valor necesario a K_λ para que coincida con el primer valor experimental. Finalmente se realizan las comparaciones de la grafica resultante con la grafica de un reflector ideal.

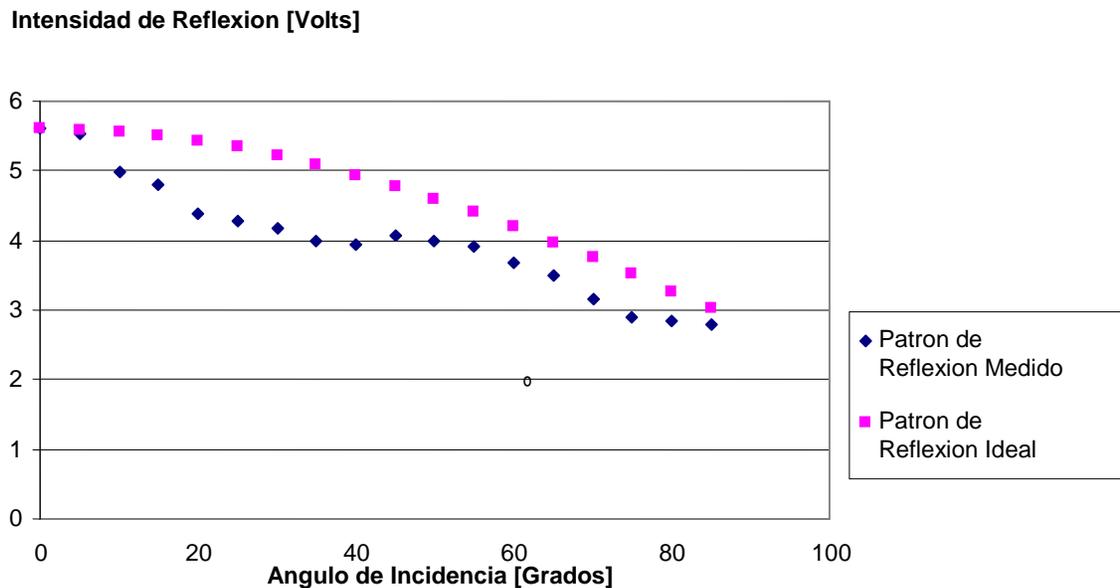


Figura 4.2. Patrón de Reflexión Angular.

Debido a que el valor máximo de intensidad reflejada que arroja el fotodetector, son 5.58 volts. Se asume que la constante K_{λ} toma este valor. De este modo y usando la formula de Lambert, se puede predecir la intensidad para otros ángulos y compararlos con los datos experimentales.

La curva de la figura 4.2 muestra con rombos el patrón de reflexión medido, y tiene un comportamiento de menor reflexión que una superficie ideal, en la zona de 20 a 40 grados en el ángulo de incidencia.

4.2. Experimento 2: Atenuación de Reflexión

El segundo experimento consistió en medir la intensidad de la luz reflejada, mientras se varia la distancia entre el emisor de luz láser y el obstáculo; manteniendo constante la distancia entre el receptor y el obstáculo. Ver Figura 4.3.

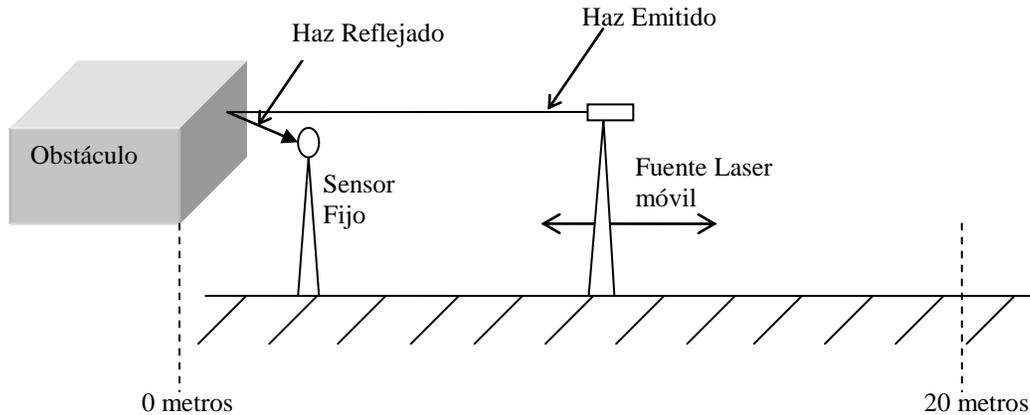


Figura 4.3. Esquema de experimento Atenuación Vs. Distancia.

La distancia varió desde 1 metro, hasta 20 metros. La distancia de separación lateral entre receptor y obstáculo fue de 50 cm. Los ángulos de incidencia y reflexión fueron perpendiculares a la superficie del obstáculo.

La grafica 25 muestra la intensidad del la reflexión medida para cada distancia:

De este segundo experimento se puede concluir que en un rango de distancia⁷ de 0 m a 20 m, las variaciones de intensidad reflejada van desde un valor máximo (100%), cuando la fuente está a 1 m del obstáculo, disminuyendo hasta un 40% de la potencia inicial, cuando a fuente está a 20 m del obstáculo. Éste dato permite determinar la sensibilidad del sistema de recepción óptica.

Según el patrón Gaussiano de distribución de potencia de un haz láser, es de esperarse que el comportamiento sea una curva lineal suave. En el experimento, la curva no se portó de la manera esperada, posiblemente se debió a errores aleatorios, que pueden corregirse con una muestra mayor de datos.

⁷ Rango que cubre la distancia de referencia inicial que es de 10 m.

Intensidad Medida [Volts.]

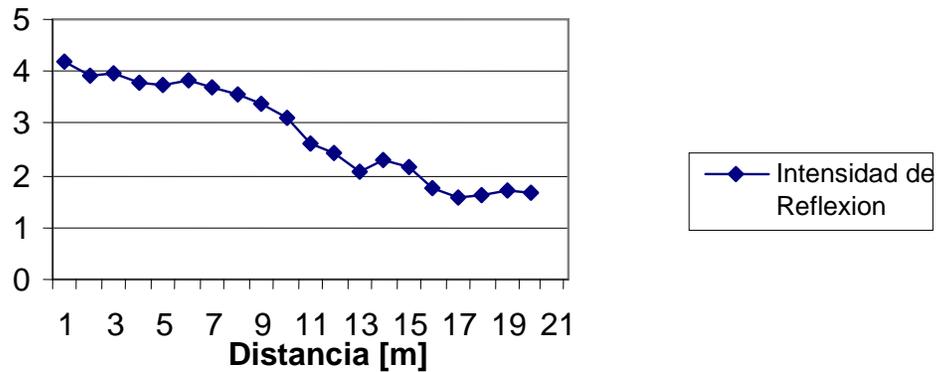


Figura 4.4. Intensidad de Reflexión vs. Distancia.

4.3. Experimento 3: Medición de coordenadas Bidimensionales 1.

Este experimento se llevó a cabo inmediatamente después de comprobar que el sistema podía medir algunos puntos iniciales. La malla de puntos se seleccionó por la disponibilidad de usar una mesa de precisión con puntos cada 25 cm. vertical y horizontalmente. (Figura 4.5)

En éste experimento se utilizó una fuente de luz láser, apuntando a un obstáculo de prueba hecho de papel blanco, el cual, manualmente se ubicaba sobre cada punto de prueba. La red de puntos de prueba consistió de una red con 16 puntos. Los puntos se eligieron según el patrón de detección del sistema dentro de un rango máximo de 1 m.

Los rombos de la figura 4.5 corresponden a la ubicación de obstáculo, y los cuadros son las coordenadas experimentales de cada punto.

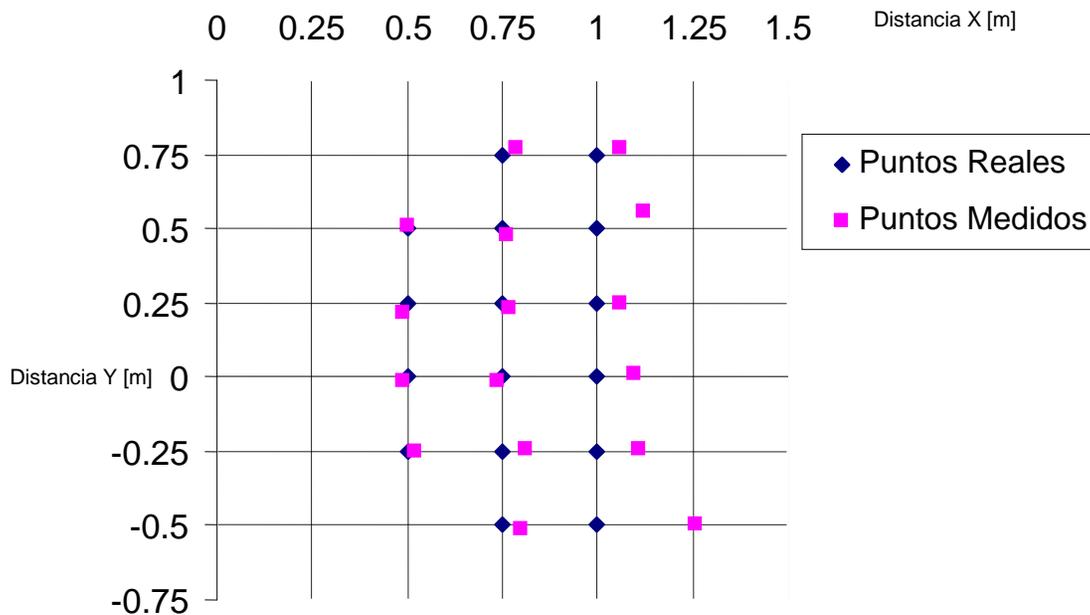


Figura 4.5. Coordenadas Reales y Medidas 2D Primera parte

De la grafica obtenida a partir de las coordenadas medidas con el sistema, se puede concluir que:

- La exactitud del sistema disminuye con la distancia entre el emisor láser y el obstáculo.
- Los puntos de mayor exactitud son los que están en más cerca del centro del sistema de visión.
- No se pueden hacer medidas a distancias mayores de 1.25 m , ya que la intensidad de la señal es casi nula.

4.4. Experimento 4: Medición de coordenadas Bidimensionales 2

Un obstáculo de papel blanco se ubicó en cada punto de la red. En cada punto se realizaron un conjunto 10 mediciones y de los cuales se obtuvo un promedio del ángulo de recepción de cada punto. Adicionalmente, se calculó el valor del ángulo de emisión (ángulo C) para cada punto en prueba. Usando el valor de C , se obtienen las coordenadas finales X y Y , que describen la posición física de cada punto sobre el objeto de papel.

En la figura 4.6 se ilustran las posiciones de los puntos reales (rombos) y las coordenadas experimentales de cada uno (cuadros). Se observa que las zonas centrales y cercanas al centro de la barra son las que presentan mayor exactitud. Este fenómeno se debe básicamente a la poca ganancia que hay dentro del sistema de detección, así, una señal débil proveniente de un punto de poca reflexión, tendrá un centro distinto al centro real, y en consecuencia la medición del ángulo de recepción será errónea.

A partir de estas conclusiones se sigue implementando un sistema electrónico para la detección del centro de cada señal. Para que, sin importar la intensidad de la señal original, la ubicación del centro en la línea de tiempo, sea exacta.

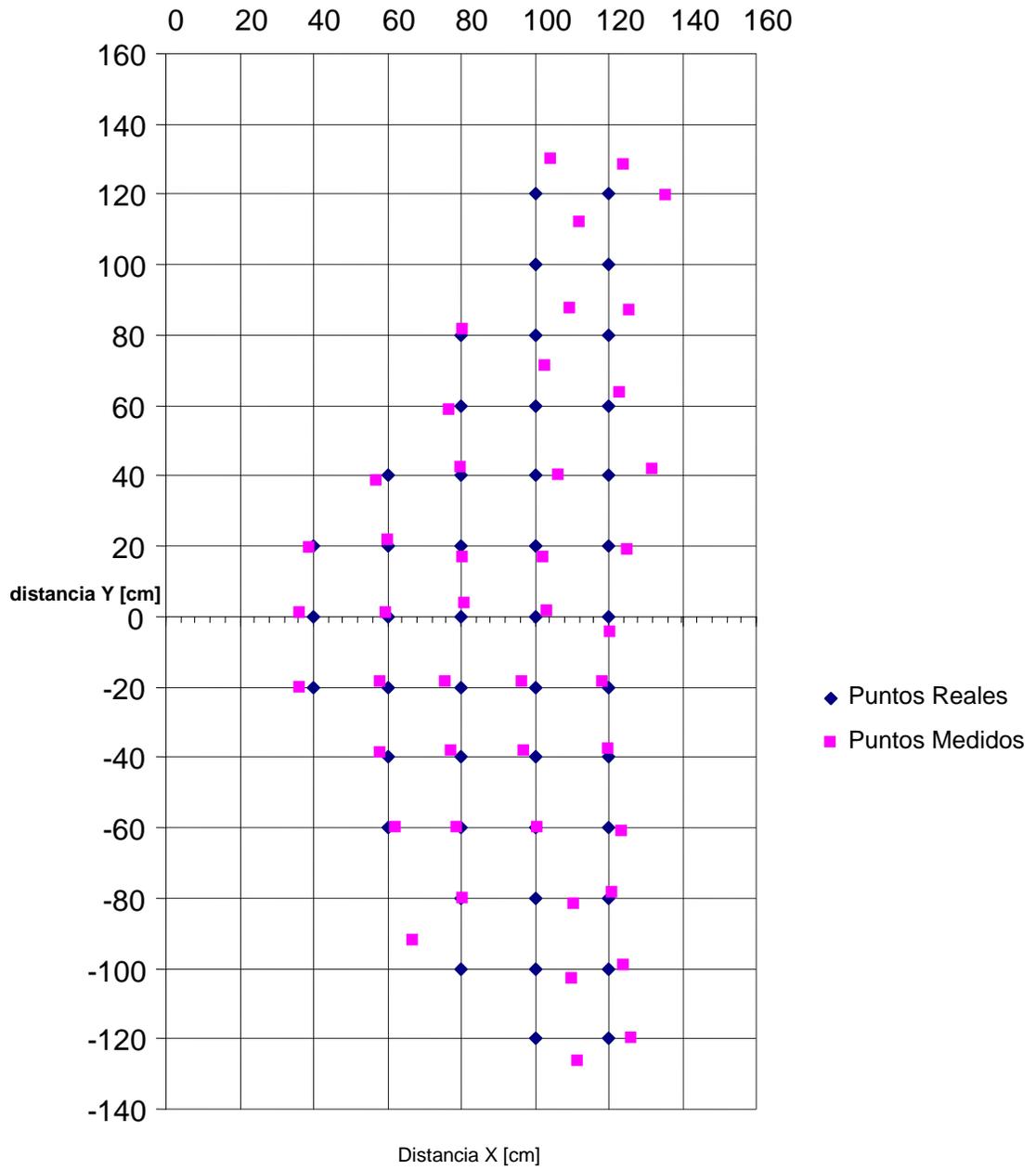


Figura 4.6. Medición de Coordenadas 2D Segunda Parte.

4.5. Experimento 5: Medición múltiple de coordenadas Bidimensionales para un sólo punto.

El objetivo de éste experimento es determinar cual es la exactitud de medición para un solo punto, haciendo 20 mediciones bajo las mismas condiciones. Luego de obtenidas, las coordenadas (Tabla 5) se analizaron estadísticamente de manera independiente, y se obtienen los gráficos (figuras 4.7 y 4.8) de distribución.

El punto seleccionado para estas pruebas (Ver figura 4.8) es el punto justo al frente del sistema. Siendo el origen de coordenadas, el punto de emisión Láser, el punto de prueba se ubica en las coordenadas $(x=100\pm 0.1 \text{ cm}, y= 50\pm 0.1 \text{ cm})$ ⁸. Dicho punto, es de singular interés debido a su simetría con la barra del sistema, y también porque hace parte de una serie de puntos (vector) que inicia en medio de la barra y se prolonga perpendicularmente hacia al frente del sistema y que en aplicaciones dinámicas (navegación), puede constituir un primer punto de exploración, en búsqueda de obstáculos.

Frecuencia

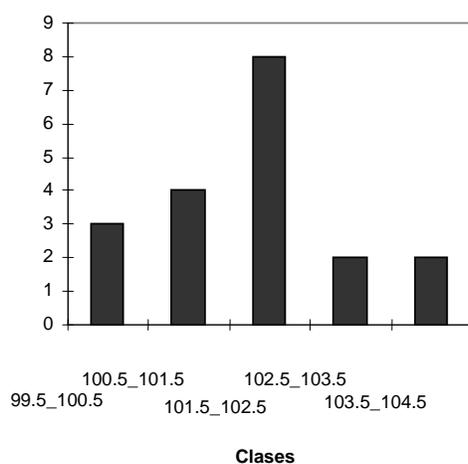


Figura 4.7. Histograma de coordenada X.

Frecuencia

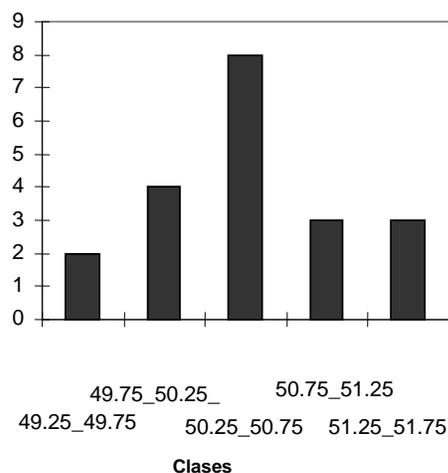


Figura 4.8. Histograma de coordenada Y.

⁸ Este valor se toma como el valor verdadero, en la ecuación de errores relativo y absoluto.

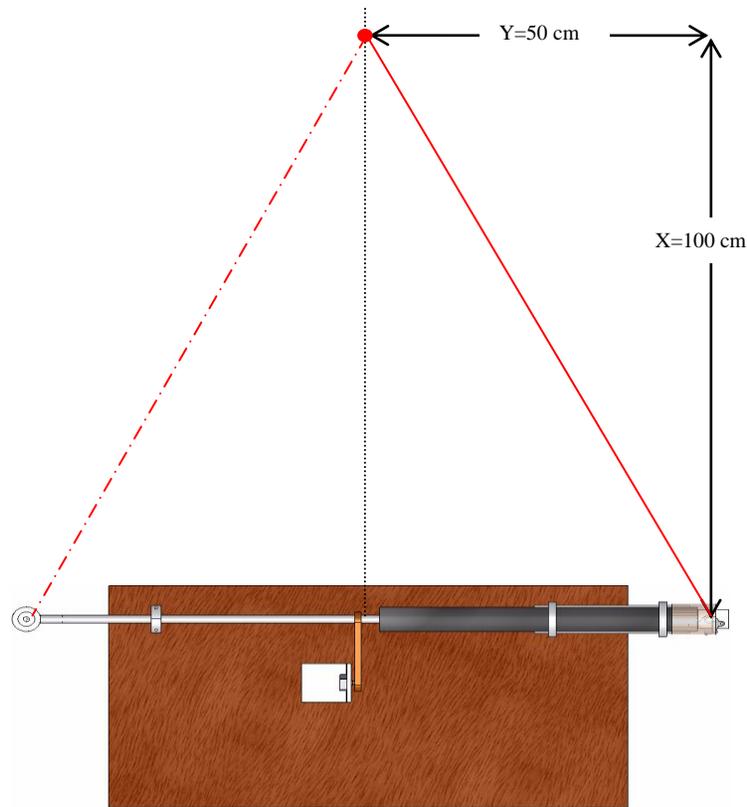


Figura 4.9. Esquema de experimento: Medición Múltiple para un sólo punto.

Es importante aclarar que las dos coordenadas dependen del valor del ángulo de recepción, por tanto su variación es similar. Sin embargo, se tomaron y se analizaron de manera independiente.

De este experimento, basado en el análisis estadístico de la tabla 4 y considerando que las muestras fueron tomadas en las mismas condiciones externas se puede concluir que:

1. La exactitud de mediciones de un punto, tienen un error relativo máximo de 4.3% en coordenada x , y un error relativo de 3.42% en la coordenada y .
2. La desviación estándar indica un error de medición permanente en cada muestra. Los errores que se repiten, suelen ser errores de tipo sistemático, que puede ser corregidos con una adecuada calibración del equipo aprueba y/o aplicando una función lineal ($Ax+B$) a la salida del la variable medida.

	x	y
Media	101.8515	50.48369
Error típico	0.267012611	0.131886751
Mediana	101.857	50.489
Desviación estándar	1.194116696	0.58981548
Varianza de la muestra	1.425914684	0.347882301
Coefficiente de asimetría	0.113416798	0.122434832
Rango	4.654	2.29
Mínimo	99.68	49.42
Máximo	104.334	51.71
Numero de Muestras	20	20
Valor Mayor	104.334	51.71
Valor Menor	99.68	49.42
Nivel de confianza (95.0%)	0.558863816	0.276042141

Tabla 4. Resumen de medición de coordenadas.

3. La pequeña diferencia entre la mediana y el promedio, indica que la cantidad de mediciones por encima del promedio es similar a la cantidad de mediciones por debajo del mismo.
4. La media aritmética de X es: 101.8515, este valor es el error de precisión del sistema. Es un error repetitivo, y que puede corregirse con calibración o compensarse en el procesamiento de datos. Este valor está en el intervalo central, donde se sitúan el 80 % de las mediciones, con error máximo de +/- 1 cm, en 100 cm, un error de un 1%.
5. La media aritmética de X es: 50.5411, este valor es el error de precisión del sistema. Este valor está en el intervalo central, donde se sitúan el 80 % de las mediciones, con error máximo de +/- 0.5 cm, en 50 cm, es decir un error de un 1%.
6. El equipo puede realizar mediciones de un punto particular, y que al igual que un sistema convencional de medición posee un grado de exactitud por encima del 95%.

Coordenada X		Coordenada Y	
<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>
99.5_100.5	3	49.25_49.75	2
100.5_101.5	4	49.75_50.25_	4
101.5_102.5	8	50.25_50.75	8
102.5_103.5	2	50.75_51.25	3
103.5_104.5	2	51.25_51.75	3

Tabla 5. Distribución de Mediciones.

Capítulo 5.

Conclusiones Finales

- Se construyó un subsistema de emisión de luz láser sobre un sector tridimensional con elementos electrónicos, ópticos y mecánicos: El cual trabajando sincrónicamente con un subsistema de barrido y detección de luz láser, demostró que la técnica de triangulación que se propuso inicialmente es útil para determinar la distancia desde el sistema de medición a hasta un punto determinado del espacio.
- Se diseñó un programa en lenguaje de programación C++, que desde un computador portátil permite controlar la posición angular horizontal y vertical de un haz de luz láser, determinar, graficar y almacenar las coordenadas bidimensionales de puntos en un escenario para cada punto explorado en tiempo real. Así, el cálculo de las coordenadas de cada punto explorado, inicia justo después de que el punto es detectado por el sistema de recepción.
- El sistema construido tiene la ventaja de que los movimientos del sistema de emisión de luz láser es configurable. Permitiendo cambiar el patrón de emisión para cada instante de tiempo y según las necesidades de cierta aplicación práctica.
- Al evaluar la precisión del sistema, se obtiene que es de un 95%. Éste grado de exactitud no es suficiente para mediciones profesionales, pero permite afirmar que el prototipo inicial y la técnica de triangulación con láser son un método útil para realizar tareas de navegación.
- El diseño del subsistema de emisión cuenta con distribución de energía en señal emitida que permite posteriormente aplicar las técnicas para disminuir incertidumbre, que fue comprobado experimentalmente.

- Se realizaron pruebas alternas a las de medición, para determinar las causas de error presentes en el prototipo. Estas pruebas, indican que se puede aumentar la exactitud del sistema realizando las siguientes actividades:
 - Realizar cambios en las rutinas del programa, en la etapa de determinación del ángulo de recepción, reduciendo el número de instrucciones, y así obtener un ciclo de trabajo de la señal de sincronía independiente de la velocidad de rotación del sistema de recepción.
 - Aumentar la potencia del láser utilizado o cambiar por emisor de láser pulsado donde se pueda emitir más energía lumínica.
 - Realizar cambios en el sistema de movimiento vertical con pasos de menor grado y minimizando el esfuerzo del motor vertical. Para esto se propone cambiar la interfase de potencia para controlar motores de mayor torque.
- Una de las principales limitaciones que presenta el sistema propuesto, es el tiempo que tarda en realizar el barrido de un escenario. La navegación de un robot, es una actividad dinámica que exige rapidez en la detección de obstáculos; en tanto el sistema aumente la exactitud de sus mediciones, no será necesario hacer múltiples mediciones de un sólo punto para promediar los datos. Con una mejora en la exactitud, el tiempo de barrido podrá disminuirse hasta una décima parte del tiempo que toma actualmente.

6. Bibliografía

- [1] BALTSAVIAS E.P. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas.** Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland Elsevier. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54-1999.199–214.
- [2] BARCHETT, Raymond A. **College Algebra with Trigonometry.** ISBN: 0-07-003864-3. Mc graw hill . USA 1984.
- [3] CALVERT, Charles. **C++ Builder** . Ed. Sams Net. Indianápolis 1997. ISBN:067-231-022-8
- [4] CARMER, D.C. PETERSON Lauren M. **Laser Radar In Robotics.** Proceedings o the IEEE. Vol. 84, No. 2, February 1996 Usa.
- [5] COLLADO, Forest. Tesis Doctoral: **New Methods for Triangulation Based shape acquisition using laser scanners.** Universidad de Girona. 2004. ISBN:84-689-3091-1.
- [6] DITCHBURN, R. W. **Óptica.** Ed. Reverté. Barcelona 1982. ISBN: 8-4291-4036-0
- [7] DORRONSO M., Miguel. **La Tecnologia Laser.** Mc Graw Hill. 262p. 1996. Madrid. ISBN: 84-481-0260-6.
- [8] FORMAN, Paul. PARRY, Iwan. **Rapid Data Collection at Major Incident Scenes Using Three Dimensional Laser Scanning Techniques.** Investigations and Risk Management Group. Transport Research Laboratory. United Kingdom 2001.
- [9] FRANÇA, João Guilherme D. M. GAZZIRO, Mário A. IDE, Alessandro N. SAITO, José H. **A 3d Scanning System Based on Laser Triangulation and Variable Field Of View** . Genova – 0-7803-9134-9/05 ©2005 IEEE.
- [10] GLASSNER, Andrew S. **An Introduction to Ray Tracing.** Morgan Kaufman. San Francisco. 1989. ISBN: 0-12-286160-4
- [11] GONZALEZ, Javier, STENTZ Anthony , OLLERO Anibal. **A Mobile Robot Iconic Position Estimator Using a Radial Laser Scanner.** Journal of Intelligent and Robotic Systems. © 1995 Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- [12] GRANERO M., Luis. DE GRACIA B., Vicente. **Digitalización tridimensional basadas en luz estructurada.** Departamento de Desarrollo de Producto. Unidad de Ingeniería de Producto. Sección de Digitalización Tridimensional. AIDO. Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen (Valencia). 2001.

- [13] HANCOCKA, John. LANGERA, Dirk. HEBERTA, Martial. SULLIVANB, Ryan. INGIMARSON, Darin. HOFFMAN, Eric. METTENLEITER, Markus. FROEHLICH, Christoph. **ACTIVE LASER RADAR FOR HIGH-PERFORMANCE MEASUREMENTS**. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Belgium - May 1998
- [14] HARTLEY, Richar I. **Triangulation. Computer Vision and Image Understanding**. 1991. Paginas 146-197.
- [15] HOSMER, P. **Use of Laser Scanning Technology for Perimeter Protection**. .Police Scientific Development Branch IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE, 2004.
- [16] IISUKA, Keigo. **Elements of Photonic**. Wiley-Interscience 2002. ISBN: 047-183-938-8
- [17] JARVIS, R.A. **A laser time-of-flight range scanner for robotic vision**. IEEE Trans.Pattern Analysis and Machine Intelligence, 5(5):505{512, 1983.
- [18] JIMÉNEZ R. Antonio Ramón. **Sistema de reconocimiento y localización de objetos cuasi-esféricos por telemetría láser. Aplicación a la detección automática de frutos para el robot Agribot**. Universidad Complutense de Madrid Facultad De Ciencias Físicas. Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática. Tesis doctoral. 1998, 326p.
- [19] MARSHALL, Gerald F. **Handbook of Optical and Laser Scanning**. Marcel Dekker, Inc. New Cork. 2004. ISBN: 0-8247-5569-3
- [20] ORTEGA, James M. **An introduction to C++ and numerical methods**. Oxford University Press. New York 1999. ISBN: 019-511-767-0
- [21] POON, Ting-Chung. **Engineering optics with Matlab**. New Jersey : World Scientific, cop.2006. ISBN: 981-256-872-7
- [22] RESNICK, Robert. **Fisica V2**. Ed. CECSA. 1199. México. 2002. ISBN: 970-24-0326-X
- [23] SAHBA, Kaveh. ALAMEH, Kamal E. SMITH, Clifton L.. **A Proposed Motionless Laser Scanning Architecture for Perimeter Security**. Edith Cowan University. Australia 1-4244-01 74-7/06/ ©2006 IEEE. p.9-16.
- [24] SERGIYENKO, Oleg. TYRSA, Valentyn. BURTSEVA, Larisa. BRAVO, Miguel. TYRSA, Vera. RENDÓN, Ismael. DEVIA, Luis Felipe. UABC. **Mobile Transport Object Control by Technical Vision Means**..p 74-82. ©2006 IEEE. CERMA. Orlando FL.

- [25] SHEPELIOV, Andréi Vadímovich. **Optica**. Moscú : URSS, 2003
ISBN: 5-8360-0484-6
- [26] SINGH, Sanjiv. WEST, Jay. **Cyclone: A Laser Scanner For Mobile Robot Navigation**. *The Robotics Institute. Carnegie Mellon University. Pittsburgh , Pennsylvania. September 1991.*
- [27] SPARKS, Fred W. REES, Paul K. **Trigonometria Plana**. Ed. Reverte.1995. 258p. Mexico. ISBN: 968-670-04-9
- [28] STUART, Gordon. LICHTI, Derek. STEWART, Mike. **Application of a High-Resolution, Ground-Based Laser Scanner for Deformation Measurements**. *Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology. Australia 2001. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements.*
- [29] SURMAN, Hartmut. **A 3D laser range finder for autonomous mobile robots**. *Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics), pp. 153 - 158, 19-21 April 2001.*
- [30] WEHR, Aloysius. LOHR, Uwe. **Airborne laser scanning—an introduction and overview**. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999. p68.*
- [31] WYATT, Clair L. **Electro-optical system design: for information processing**. ISBN: 0-07-072182-X. Mc Graw Hill. 1991.
- [32] YE,Cang. BORENSTEIN, Johann. **Characterization of a 2-D Laser Scanner for Mobile Robot Obstacle Negotiation**. *Proceedings of the 2002. IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC May 2002. The University of Michigan.*
- [33] CHARTIER, Germain. **Introduction to Optics**. Springer 2005. USA. ISBN: 0-387-40346-9.
- [34] Laser Head, Helium Neon (1100 Series)
http://products.jdsu.com/assets/public/pdf/hnlh1100_ds_cl_ae_012506.pdf
- [35] SHARMA, K. K. **Optics : principles and applications**. Academic Press. 2006. 638 p. ISBN : 9780123706119.
- [36] DAVIS J., RAMAMOORTHY R., RUSINKIEWICZ S. **Spacetime stereo: A unifying framework for depth from triangulation**. *In IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003.*
- [37] IBEANUSI ,Ugonna. LAFOND-FAVIERES, Valerie. MCLAWHORN, Latresa. ANDERSON, Scott D. **Understanding Robot Navigation and Control**
Computer Science Department. Spelman Collage

- [38] OSCHER, X Gregory R. YOUNG, Donald S. **Imaging Laser Radar in the Near and Far Infrared**. Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No 2, February 1996. Pag 103-125
- [39] MUÑOZ, José María. MARTÍNEZ, Félix. LÁZARO, Juan Manuel. **Modelado y Cálculo del Alcance de Sistemas LADAR Incoherentes con Array de Plano Focal**. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones Universidad Politécnica de Madrid.
- [40] ZAMORA, M.A., TOMÁS-BALIBREA, L.M. **Navegación Planificada de un Robot Móvil en Entornos Interiores Desconocidos**. Grupo de Visión, Robótica y Proy. Dpto. Inf., Inteligencia Artificial y Electrónica. Facultad de Informática. Universidad de Murcia. Murcia
- [41] SÁEZ, M., PEÑALVER, A., ESCOLANO, F. **Estimación de las acciones de un robot utilizando visión estéreo**. Robot Vision Group. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia. Artificial Universidad de Alicante. 2007.

7. APENDICES.

APÉNDICE A. Índice de figuras

Figuras	Pag
Figura 2.1. Fuente de radiación Láser: Cavity reflexiva con energía externa.	18
Figura 2.2. Propagación de un haz desde una cavity láser.	20
Figura 2.3. Propagación antes y después del rango de Raleigh.	23
Figura 2.4. Variación de la distribución de potencia según la distancia.	25
Figura 2.5. Distribución axial de potencia Vs. Distancia de proyección.	25
Figura 2.6. Patrones de Reflexión a). Especular, b). Ideal, y c). Mixto.	27
Figura 2.7. Reflexión Lambertiana.	28
Figura 3.1. Vista lateral y superior del espacio explorable.	31
Figura 3.2. Escenario Explorable en vista tridimensional.	32
Figura 3.3. Triangulación en la medición de distancia.	34
Figura 3.4. Triangulación en la determinación de coordenada y.	36
Figura 3.5. Triangulación para determinar coordenada vertical z.	38
Figura 3.6. Esquema básico de sistema emisor de luz láser.	40
Figura 3.7. Diagrama de flujo de datos.	42
Figura 3.8. Circuito esquemático de la interfase electrónica.	42
Figura 3.9. Diagrama de flujo del algoritmo general.	44
Figura 3.10. Intensidad de señal de sensor vs. Tiempo.	48
Figura 3.11. Generador de pulso de sincronía.	49
Figura 3.12. Ciclo de trabajo de la señal de sincronía.	50
Figura 3.13. Diagrama de señales eléctricas en la medición del ángulo de recepción.	52
Figura 4.1. Diagrama de experimentación de patrón de reflexión.	57
Figura 4.2. Patrón de Reflexión Angular.	58
Figura 4.3. Esquema de experimento Atenuación Vs. Distancia.	59
Figura 4.4. Intensidad de Reflexión vs. Distancia.	60
Figura 4.5. Coordenadas Reales y Medidas 2D Primera parte	61
Figura 4.6. Medición de Coordenadas 2D Segunda Parte.	63
Figura 4.7. Histograma de coordenada X.	64
Figura 4.8. Histograma de coordenada Y.	64
Figura 4.9. Esquema de experimento: Medición Múltiple para un sólo punto.	65

APÉNDICE B. Índice de tablas

Tabla	Pagina
Tabla 1. Parámetros físicos y características detectables.	16
Tabla 2. Distancia y potencia máxima del centro de haz gaussiano.	24
Tabla 3. Datos experimentales de señal de sincronía.	50
Tabla 4. Resumen de medición de coordenadas.	66
Tabla 5. Distribución de Mediciones.	67

APÉNDICE C. Tablas de datos experimentales.

1. Experimento: Variación de distancia de proyección 0-20m.

Distancia [m]	Potencia [Volt]	Porcentaje
1	4.19	100.00
2	3.91	93.32
3	3.98	94.99
4	3.77	89.98
5	3.76	89.74
6	3.82	91.17
7	3.68	87.83
8	3.56	84.96
9	3.38	80.67
10	3.11	74.22
11	2.61	62.29
12	2.41	57.52
13	2.08	49.64
14	2.28	54.42
15	2.18	52.03
16	1.75	41.77
17	1.58	37.71
18	1.6	38.19
19	1.7	40.57
20	1.68	40.10

Esta tabla muestra la atenuación de la señal eléctrica del fotodetector en la medida que la fuente se aleja de la superficie de reflexión.

2. Experimento: Patrón de reflexión angular.

voltaje	ángulo	teórico
2.784	5	3.029430572
2.832	10	3.272993268
2.906	15	3.512834431
3.16	20	3.747128724
3.496	25	3.974093025
3.676	30	4.192
3.904	35	4.399191245
3.984	40	4.594089909
4.07	45	4.775212696
3.952	50	4.941181152
3.984	55	5.090732157
4.176	60	5.222727537
4.28	65	5.336162728
4.376	70	5.43017442
4.808	75	5.504047127
4.976	80	5.557218632
5.5	85	5.57928427
5.58	90	5.58

Esta tabla muestra la variación de voltaje se salida del fotodetector cuando detecta la luz reflejada por el papel blanco, en la medida que cambia el ángulo de incidencia.

3. Experimento: Medición de distancia de un solo punto.

	Coordenada X	% Error Relativo X	Coordenada Y	% Error Relativo Y
1	99.680	0.32	49.420	1.16
2	102.266	2.266	49.773	0.454
3	103.422	3.422	49.820	0.36
4	101.900	1.9	50.222	0.444
5	100.410	0.41	50.261	0.522
6	102.076	2.076	50.317	0.634
7	100.505	0.505	50.352	0.704
8	102.379	2.379	50.390	0.78
9	102.668	2.668	50.390	0.78
10	101.511	1.511	50.468	0.936
11	101.402	1.402	50.510	1.02
12	104.334	4.334	50.597	1.194
13	101.580	1.58	50.690	1.38
14	103.570	3.57	50.747	1.494
15	101.398	1.398	50.755	1.51
16	102.394	2.394	50.891	1.782
17	100.045	0.045	50.919	1.838
18	101.814	1.814	51.260	2.52
19	100.950	0.95	51.330	2.66
20	102.726	2.726	51.710	3.42

Desv Est	1.194116696	→	0.541404207
Media Arit.	101.8515	→	50.5411
Máximo	104.334	→	51.33
Mínimo	99.68	→	49.42
Rango	4.654	→	1.91
Clases	99.5	→	49.25
	100.5	→	49.75
	101.5	→	50.25
	102.5	→	50.75
	103.5	→	51.25
	104.5	→	51.75

Esta tabla contiene información del experimento en el se realizan 20 mediciones de las coordenadas de un sólo punto. Las coordenadas teóricas son del punto fueron: $x=100$, $y=50$. La parte inferior de la tabla es son datos estadísticos de las mediciones realizadas.

4. Experimento: Medición de coordenadas bidimensionales 1

PUNTO DE PRUEBA	VALORES TEÓRICOS				VALORES MEDIDOS			
	X (m)	Y (m)	B (°)	C (°)	x(m)	y(m)	B (°)	C (°)
A	0.75	0.75	108.43	30.96	0.79	0.77	109.29	31.81
B	1	0.75	104.04	38.66	1.06	0.77	104.38	39.9
C	1	0.5	90.00	45.00	1.12	0.56	93.55	46.4
D	0.75	0.5	90.00	36.87	0.76	0.48	89.16	37.61
E	0.5	0.5	90.00	26.57	0.503	0.506	90.07	26.71
F	0.5	0.25	63.43	33.69	0.49	0.22	60.51	34.27
G	0.75	0.25	71.57	45.00	0.77	0.23	71.22	46.5
H	1	0.25	75.96	53.13	1.06	0.249	76.75	54.84
I	1	0	63.43	63.43	1.1	0.01	66.28	65.21
J	0.75	0	56.31	56.31	0.74	-0.01	55.34	56.77
K	0.5	0	45.00	45.00	0.49	-0.01	43.73	45
L	0.5	-0.25	33.69	63.43	0.52	-0.25	34.73	65.21
M	0.75	-0.25	45.00	71.57	0.81	-0.24	47.68	72.77
N	1	-0.25	53.13	75.96	1.11	-0.24	56.47	76.81
O	1	-0.5	45.00	90.00	1.26	-0.5	51.49	90.17
P	0.75	-0.5	36.87	90.00	0.8	-0.51	38.62	90.87

Esta tabla contiene en la parte izquierda los valores teóricos de las diferentes posiciones y ángulos de emisión y recepción del objeto de prueba en una mesa con cuadrícula de 25cm x 25 cm ubicada frente al sistema de barrido. La parte derecha, tiene los datos obtenidos luego de hacer 10 mediciones promediadas de las coordenadas en cada punto.

5. Experimento: Medición de coordenadas bidimensionales 2

PUNTO DE PRUEBA	VALORES TEÓRICOS				VALORES MEDIDOS			
	X (m)	Y (m)	B (°)	C (°)	x(m)	y(m)	B (°)	C (°)
A	100	120	124.99	30.47	104.2	130.05	127.22	30.05
B	120	120	120.26	35.22	124.21	128.68	123.43	34.8
C	120	100	112.62	38.66	135.78	119.65	117.45	38.67
D	100	100	116.57	33.69	111.97	112.13	118.84	34.62
E	80	80	110.56	31.61	80.52	81.59	111.96	31.46
F	100	80	106.70	37.57	109.53	87.72	109.77	38.5
G	120	80	104.04	42.71	125.8	87.1	106.18	42.53
H	120	60	94.76	47.49	122.92	63.49	96.38	47.28
I	100	60	95.71	42.27	102.73	71.33	101.51	40.25
J	80	60	97.13	36.03	77	58.62	96.57	35.33
K	60	40	80.54	33.69	57.2	38.52	79.39	32.87
L	80	40	82.87	41.63	79.99	42.15	84	40.95
M	100	40	84.29	48.01	106.6	40.29	84.59	49.74
N	120	40	85.24	53.13	132.1	41.83	86.05	55.19
O	120	20	75.96	59.74	125.21	18.9	76.48	61.17
P	100	20	73.30	55.01	102.41	17.07	72.76	56.77
Q	80	20	69.44	48.81	80.71	17.07	68.31	50.27
R	60	20	63.43	40.60	60.33	21.7	64.3	40.07
S	40	20	53.13	29.74	39.14	19.59	52.07	29.35
T	40	0	38.66	38.66	36.52	1.06	36.52	36.73
U	60	0	50.19	50.19	59.8	0.9	49.39	50.625
V	80	0	57.99	57.99	80.93	3.49	56.7	60.11
W	100	0	63.43	63.43	103.58	1.51	63.45	64.68
X	120	0	67.38	67.38	120.72	-4.7	66.23	69.43
Y	120	-20	59.74	75.96	118.54	-18.36	59.95	75.05
Z	100	-20	55.01	73.30	96.72	-18.37	54.7	71.9
A1	80	-20	48.81	69.44	75.79	-18.33	48.03	67.32
B1	60	-20	40.60	63.43	58	-18.53	39.5	61.52
C1	40	-20	29.74	53.13	36.17	-20.31	27.3	50.62
D1	60	-40	33.69	80.54	58.05	-38.63	33.6	78.92
E1	80	-40	41.63	82.87	77.46	-38.26	40.46	81.38
F1	100	-40	48.01	84.29	97.1	-38.02	46.94	82.96
G1	120	-40	53.13	85.24	120.19	-37.41	54.07	84.02
H1	120	-60	47.49	94.76	123.68	-61.03	48.21	95.09
I1	100	-60	42.27	95.71	100.61	-59.91	42.34	95.62
J1	80	-60	36.03	97.13	78.9	-59.73	35.37	97.03
K1	60	-60	28.61	99.46	62.38	-60.03	29.58	99.14
L1	80	-80	31.61	110.56	80.52	-80.21	31.81	110.56
M1	100	-80	37.57	106.70	110.84	-81.77	40.04	106
N1	120	-80	42.71	104.04	121.01	-78.73	43.34	103.35
O1	120	-100	38.66	112.62	124.15	-99.21	39.8	111.62
P1	100	-100	33.69	116.57	110.3	-103	35.82	115.66
Q1	80	-100	28.07	122.01	67.21	-92.27	25.36	122.16
R1	100	-120	30.47	124.99	111.73	-126.15	32.09	124.27
S1	120	-120	35.22	120.26	126.12	-119.92	36.53	119

Esta tabla contiene en la parte izquierda los valores teóricos de las diferentes posiciones y ángulos de emisión y recepción del objeto de prueba en una mesa con cuadrícula de

20cm x 20 cm ubicada frente al sistema de barrido. La parte derecha, tiene los datos obtenidos luego de hacer 10 mediciones promediadas de las coordenadas en cada punto.

6. Experimento: Medición del ciclo de trabajo de la señal de sincronía.

	Fase Activa	Inactivo	Relacion	Velocidad
	T1[ms]	T2[ms]	δ	Hz
1	9.405	246.8	0.03810778	3.903
2	7.302	188.9	0.038655373	5.097
3	4.901	125.8	0.038958665	7.651
4	3.701	94.7	0.039081309	10.16
5	2.397	61.6	0.038912338	15.63
6	1.902	47.8	0.039790795	20.12
7	1.496	37.9	0.039472296	25.38
8	1.301	31.8	0.04091195	30.21
9	1.103	26.9	0.041003717	35.71
10	0.962	23.61	0.040745447	40.98
11	0.799	19.12	0.041788703	50.25
12	0.66	15.86	0.041614124	60.53
13	0.58	13.7	0.042335766	70.03
14	0.468	10.63	0.044026341	90.12
15	0.52	11.84	0.043918919	80.91
16	0.42	9.5	0.044210526	100.8
17	0.359	7.94	0.045214106	120.5
18	0.321	6.819	0.047074351	140.1
19	0.288	5.934	0.048533873	160.7
20	0.266	5.268	0.050493546	180.7
21	0.25	4.712	0.053056027	201.5

Promedio	0.042757426
Máximo	0.053056027
Mínimo	0.038655373

Esta tabla muestra la variación del ciclo de trabajo de la señal de sincronía a diferentes velocidades del motor de recepción. .

APÉNDICE D. Programa en matlab: distribucion de potencia radial de haz laser.

```
%Gaussian Beam.m
%Simulación de difracción de un haz gaussiano
%N: sampling number
N=input('Entre numero de muestras (100 a 500)=');
L=10*10^-3;
Ld=input('Longitud de Onda en nanometros=');
Ld=Ld*10^-3;
ko=(2*pi)/Ld;
wo=input('Radio minimo en milimetros=');
wo=wo*10^-3;
z_ray=(ko*wo^2)/2*10^3;
sprintf('Rango Raleigh = %f[mm]',z_ray)
z_ray=z_ray*10^-3;
z=input('Longitud de superficie en metros=');
z=z;
%dx=step size
dx=L/N;
for n=1:N+1
    for m=1:N+1
        %Ejes espaciales XY
        x(m)=(m-1)*dx-L/2;
        y(m)=(n-1)*dx-L/2;
        %Haz Gaussiano en el espacio
        Gau(n,m)=exp(-(x(m)^2+y(n)^2)/wo^2);
        %Ejes en frecuencia
        Kx(m)=(2*pi*(m-1))/(N*dx) - ((2*pi*(N))/(N*dx))/2;
        Ky(n)=(2*pi*(n-1))/(N*dx) - ((2*pi*(N))/(N*dx))/2;
        %Funcion de transferencia de espacio libre
        H(n,m)=exp(j/(2*ko)*z*(Kx(m)^2+Ky(n)^2));
    end
end
%Haz Gaussiano en el dominio de la Freq.
FGau=fft2(Gau);
FGau=fftshift(FGau);
%Haz gaussiano propagado en el plano de la freq.
FGau_pro=FGau.*H;
%Amplitud maxima inicial del haz gaussiano
Peak_ini=max(max(abs(Gau)));
sprintf('Amplitud maxima inicial del haz=%f[mm]',Peak_ini)
%Haz gaussiano propagado en el espacio
Gau_pro=ifft2(FGau_pro);
Gau_pro=Gau_pro;
%Amplitud maxima del haz propagado
```

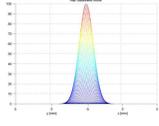
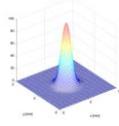
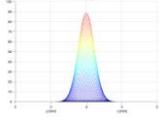
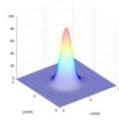
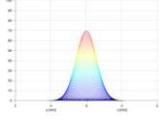
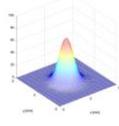
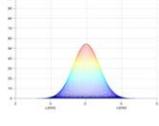
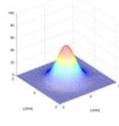
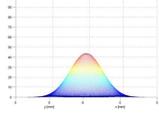
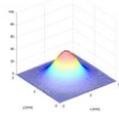
```

Peak_pro=max(max(abs(Gau_pro)));
sprinf('Amplitud maxima del haz propagado=%f[mm]',Peak_pro)
%Ancho calculado
[N M]=min(abs(x));
Gau_pro1=Gau_pro(:,M);
[N1 M1]=min(abs(abs(Gau_pro1)-abs(exp(-1)*Peak_pro)));
Bw=dx*abs(M1-M)*10^3;
sprinf('Hancho calculado del haz =%f[mm]',Bw)
%Ancho Teorico
W=(2*z_ray)/ko*(1+(z/z_ray)^2);
W=(W^0.5)*10^3;
sprinf('Hancho teorico del Haz =%f[mm]',W)
%ejes en escala de mm
x=x*10^3;
y=y*10^3;
figure(1);
mesh(x,y,abs(Gau))
title('Haz Gaussiano Inicial')
xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')
axis([min(x) max(x) min(y) max(y) 0 1])
axis square
figure(2);
mesh(x,y,abs(Gau_pro))
title('Haz Propagado')
xlabel('x [mm]')
ylabel('y [mm]')
axis([min(x) max(x) min(y) max(y) 0 1])
axis square

```

Tomado del libro: **Engineering optics with Matlab**. Ting-Chung Poon, Taegeun Kim:
New Jersey : World Scientific, cop.2006. ISBN: 981-256-872-7.
Se usaron características del láser de laboratorio de Inst. de ingeniería de la UABC.

APÉNDICE E. Variación de la intensidad de luz láser, según algoritmo de Poon.

Distancia	Perfil Lateral de Intesidad	Distribución Espacial de Intensidad
0.0 m		
2.5 m		
5.0 m		
7.5 m		
10.0 m		

Graficas arrojadas por el programa en de Poon, elaborado en Matlab. Y muestra la distribución axial teórica de la potencia de un haz láser a lo largo una trayectoria de 10 m.

APENDICE F. Programa de control de movimiento y procesamiento de datos en C++.

1.	#include <graphics.h>
2.	#include<conio.h>
3.	#include<stdio.h>
4.	#include<stdlib.h>
5.	#include<dos.h>
6.	#include<math.h>
7.	#define porto 0x378
8.	#define time 0
9.	
10.	struct coordenadas
11.	{
12.	double distx,disty;
13.	int pointer;
14.	} coord[700];
15.	
16.	FILE *archivo;
17.	int j=0,i=0,tecla,result, tao=0, spot,zero, port=0x378;//3bc
18.	int bandera1=0,bandera2=0,flag,puntero=0;
19.	float cont1=0, cont2=1, cont3=0, cont4=0, cont5=0, incremento=0;
20.	double freq,anglec,anglecr,angleb1,anglebprom,grados1r,grados1;
21.	double distx,sinb,sinc,cosc,disty,distz,distd;
22.	
23.	int cuentapasos1=0, cuentapasos2=0,k1=0,k2=0,h1=0,h2=0;
24.	int tabla1[4]={0x015,0x016,0x01a ,0x019};
25.	int tabla2[4]={0x025,0x026,0x02a ,0x029};
26.	int tabla3[8]={0x018,0x01a,0x012 ,0x016,0x014,0x015,0x011 ,0x019};
27.	int tabla4[8]={0x010,0x010,0x010 ,0x010,0x010,0x010,0x010 ,0x010};
28.	
29.	float vectorangb[10], prom_angb;//vector para promedio de angulo de recepcion B.
30.	int indb=0; //indice del vector vectorangb.
31.	
32.	int CheckZero();
33.	void ShowCoord();
34.	void GrafXY();
35.	void AutoSave();
36.	void SaveXY();
37.	void AutoSaveArray();
38.	void OpenFile();
39.	void CloseFile();
40.	void SaveFile();
41.	void autobarrido();
42.	void LeerAngulo();
43.	void TestLeerCiclo();
44.	void Menu();
45.	void LeerCiclo();
46.	
47.	void pulso()
48.	{
49.	outport(port,0x011);
50.	outport(port,0x010);

```

51.     }
52.
53.     void pasoarr()//vertical subida
54.     {
55.         h1=h2;
56.         if(h2==7) h2=0;
57.         else h2++;
58.         cuentapasos1++;
59.         outport(port,tabla3[h2]);
60.         // outport(port,0x000);
61.     }
62.
63.     void pasoaba()//vertical bajada
64.     {
65.         h1=h2;
66.         if(h2==0) h2=7;
67.         else h2--;
68.         cuentapasos1--;
69.         outport(port,tabla3[h2]);
70.         // outport(port,0x000);
71.     }
72.
73.     void pasoizq()
74.     {
75.         k1=k2;
76.         if(k2==0) k2=3;
77.         else k2--;
78.         cuentapasos2--;
79.         outport(port,tabla2[k2]);
80.         // outport(port,0x000);
81.     }
82.
83.     void pasoder()
84.     {
85.         k1=k2;
86.         if(k2==3) k2=0;
87.         else k2++;
88.         cuentapasos2++;
89.         outport(port,tabla2[k2]);
90.         // outport(port,0x000);
91.     }
92.
93.     int press(void);
94.
95.     int press(void)
96.     {
97.         int presiono;
98.         presiono=getch();
99.         if(presiono==0)
100.             presiono=100+getch();
101.         return(presiono);
102.     }
103.
104.
105.     void main()
106.     {

```

107.	outport(0x3bc,0x00f);clrscr();
108.	MENU:
109.	do
110.	{
111.	Menu();
112.	grados1=(0.703125*cuentapasos1/2)*1.0667;
113.	grados1r=grados1*3.1416/180;//grados1 en radianes
114.	anglec=0.703125*cuentapasos2/4;
115.	gotoxy(22,17);
116.	printf("motor vertical pos=%f grados.",grados1);
117.	gotoxy(22,18);
118.	printf("motor horizont pasos=%i .",cuentapasos1);
119.	gotoxy(22,20);
120.	printf("motor vertical pos=%f grados.",anglec);
121.	gotoxy(22,21);
122.	printf("motor vertical pasos=%i .",cuentapasos2);
123.	gotoxy(22,22);
124.	printf("Con x igual a 80 cm, Z=%gcm.",80*tan(grados1r));
125.	tecla=press();//llama la funci3n que reconoce las teclas*/
126.	clrscr();
127.	switch(tecla)
128.	{
129.	case 172:{pasoarr(); break;} //arr
130.	case 177:{pasoder(); break;} //der
131.	case 180:{pasoaba(); break;} //aba
132.	case 175:{pasoizq(); break;} //izq
133.	case 48:{cuentapasos1=0; break;} //cero
134.	case 57:{cuentapasos2=0; break;} //nueve
135.	case 56:{cuentapasos1=1800/7.03125; break;} //ocho
136.	case 55:{cuentapasos2=1800/7.03125; break;} //siete
137.	case 54:{cuentapasos1=3600/7.03125; break;} //seis
138.	case 53:{cuentapasos2=3600/7.03125; break;} //cinco
139.	case 50:{autobarrido(); break;} //dos
140.	case 52:{AutoSaveArray(); break;} //cuatro
141.	case 49:{LeerAngulo(); getch();break;} //uno
142.	case 51:{TestLeerCiclo(); getch();break;} //tres
143.	case 102:{AutoSave(); getch();break;} //F guarda
144.	case 103:{GrafXY(); getch();break;} //H
145.	case 104:{ShowCoord(); break;} //H
146.	case 122:{printf("zero=%i",CheckZero());getch();break;} //H
147.	}
148.	}while(tecla!=27);//tecla ESC
149.	clrscr();
150.	printf("Desea Salir? Si (S) o No (Cualquier otra tecla)\n ");
151.	tecla=press();
152.	if(tecla==115) exit(0);
153.	else goto MENU;
154.	
155.	}
156.	
157.	void OpenFile();//abre nuevo archivo y setea puntero
158.	{
159.	archivo=fopen("lasereye.txt","a");
160.	}
161.	
162.	void CloseFile()

```

163.     {
164.         fclose(archivo);
165.     }
166.     void SaveArray()
167.     {
168.         int pin;
169.         for(pin=0;pin<puntero;pin++)
170.         {
171.             fprintf(archivo, "%i.) %g, %g.\n",pin,coord[pin].distx,coord[pin].disty);
172.             printf(".");
173.             delay(100);
174.         }
175.     }
176.
177.     void SaveXYonArray()//guarda vl actules de x y en arreglo de estructura
178.     {
179.         coord[puntero].distx=distx;
180.         coord[puntero].disty=disty;
181.         puntero++;
182.         coord[puntero].pointer=puntero;
183.     }
184.
185.     void SaveFile()
186.     {
187.         printf("guardando, puntero=%i.",puntero);
188.         coord[puntero].distx=distx;
189.         coord[puntero].disty=disty;
190.         puntero++;
191.         coord[puntero].pointer=puntero;
192.         fprintf(archivo, "%i.) %g, %g.\n", puntero,distx,disty);
193.     }
194.
195.
196.     void AutoSaveArray()
197.     {
198.         OpenFile();
199.         SaveArray();
200.         CloseFile();
201.     }
202.
203.     void AutoSave()
204.     {
205.         OpenFile();
206.         SaveFile();
207.         CloseFile();
208.     }
209.
210.
211.     void autobarrido()
212.     {
213.         if(CheckZero()==0) return;
214.         int k,l,m,stephx,steph_maxval, stepvx, stepv_maxval,conth, contv;
215.         clrscr();
216.         puntero=1;
217.         OpenFile();

```

218.	printf("inicia autobarrido. posicion en cero.\n");
219.	printf("Entre el valor maximo de pasos horizontal\n");
220.	scanf("%i",&steph_maxval);
221.	printf("Entre el valor maximo de pasos vertical\n");
222.	scanf("%i",&stepv_maxval);
223.	
224.	for(k=0;k<stepv_maxval;k++)
225.	for(l=0;l<steph_maxval;l++)
226.	{
227.	pasoizq();
228.	for(m=0;m<1;m++)
229.	{
230.	gotoxy(10,22);
231.	printf("paso %i.",l);
232.	LeerCiclo();
233.	SaveXYonArray();
234.	}
235.	}
236.	}
237.	
238.	void LeerAngulo()
239.	{
240.	if(CheckZero()==0) return;
241.	while(!kbhit())//ciclo de lectura de puerto while 1A
242.	{
243.	grados1=0.703125*cuentapasos1/2;
244.	anglec=0.703125*cuentapasos2/4;
245.	anglecr=anglec*3.1416/180;//angulo c en radianes
246.	grados1r=grados1*3.1416/180;//grados1 en radianes
247.	
248.	
249.	WAITA:
250.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
251.	//pulso();
252.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
253.	//0800 mascara 0001000,para solo obtener el valor del bit 9.
254.	tao=cont1; cont1=0; bandera1=0;bandera2=0;cont4++;
255.	incremento=cont4;
256.	
257.	if(zero==0x000) goto WAITA;
258.	else goto WAITB;
259.	WAITB:
260.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
261.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
262.	if(zero!=0x000) goto WAITB;
263.	
264.	//while 1B
265.	while(zero==0x000)//entra al while cuando zero esta bajo
266.	{
267.	result = inport(port);
268.	//pulso();
269.	zero=(result&0x0800);//lee valor de senal zero
270.	spot=(result&0x1000);//lee valor de senal spot
271.	if((spot==0x1000)&&(bandera1==0))
272.	{
273.	cont3=cont1;

274.	bandera1= 1;
275.	indb++;
276.	}
277.	else delay(0);
278.	
279.	cont1++;//incrementa cont1 pa calcular duracion de vuelta completa
280.	
281.	bandera2=1;
282.	freq=1000000/(cont1*13.6*1.056);
283.	};//cierra while 1b
284.	if(cont1!=0) cont2=cont1;
285.	if(bandera1==0) {gotoxy(10,9);printf("no hay obstaculo.");}
286.	if(bandera1==1) {gotoxy(10,9);printf("si hay obstaculo.");}
287.	
288.	cont5=cont3+cont2*0.028;//cont5 es un valor mas real desde
289.	//el centro de zero hata flanco de subida de spot
290.	
291.	gotoxy(10,10);
292.	printf("obstaculo=%i\n",bandera1);
293.	gotoxy(10,11);
294.	printf("cont de zero=%g\n",cont2);//cont2 pulsos de vuelta completa
295.	gotoxy(10,12); // menos los pulsos cont4
296.	printf("cont de spot=%g\n",cont5);//pulsos hasta flanco de subida
297.	gotoxy(10,13);
298.	printf("indice B=%i. \n",indb);
299.	gotoxy(10,21);
300.	printf("freq de rot =%g.\n",freq);
301.	
302.	angleb1=(3600*(cont5))/cont2;
303.	angleb1=angleb1/10;//valor calculado de angulo b
304.	vectorangb[indb-1]=angleb1;//almacena angulo b actual en vector
305.	anglecr=anglec*3.1416/180;
306.	
307.	
308.	if(indb==5)
309.	{
310.	indb=0;
311.	anglebprom=0;
312.	for(j=0;j<=5;j++) anglebprom=anglebprom+vectorangb[j];
313.	
314.	anglebprom=anglebprom/5 ;
315.	gotoxy(10,15);
316.	printf("angulo b = %g\n",anglebprom);
317.	gotoxy(10,16);
318.	printf("angulo c = %g\n",anglec);
319.	gotoxy(10,17);
320.	printf("angulo a = %g\n",grados1);
321.	angleb1=angleb1*3.1416/180;
322.	sinb=sin(angleb1);
323.	sinc=sin(anglecr);
324.	cosc=cos(anglecr);
325.	distd=(sinb*sinc) / (sin(3.1416-(angleb1+anglecr)));//D
326.	distx=distd*cos(grados1r);
327.	disty=(sinb*cosc) / (sin(3.1416-(angleb1+anglecr)))-0.5;
328.	distz=distd*sin(grados1r);
329.	gotoxy(10,18);

330.	printf("distancia x =%g.\n",distx);
331.	gotoxy(10,19);
332.	printf("distancia y =%g.\n",disty);
333.	gotoxy(10,20);
334.	printf("distancia z =%g.\n",distz);
335.	}//cierra de IF de promedios
336.	
337.	};//cierra while 1A
338.	}
339.	
340.	void LeerCiclo()
341.	{
342.	if(CheckZero()==0) return;
343.	grados1=0.703125*cuentapasos1/4;
344.	anglec=0.703125*cuentapasos2/4;
345.	anglecr=anglec*3.1416/180;//angulo c en radianes
346.	
347.	WAIT1:
348.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
349.	//pulso();
350.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
351.	//0800 mascara 0001000,para solo obtener el valor del bit 9.
352.	tao=cont1; cont1=0; bandera1=0;bandera2=0;cont4++;
353.	incremento=cont4;
354.	//while 1B
355.	
356.	//LS SIGTES 5 LINEAS SINCRONIZAN EL PULSO ZERO CON LA LECTURA DE CICLO
357.	if(zero==0x000) goto WAIT1;
358.	else goto WAIT2;
359.	WAIT2:
360.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
361.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
362.	if(zero!=0x000) goto WAIT2;
363.	
364.	while(zero==0x000)//entra al while cuando zero esta bajo
365.	{
366.	result = inport(port);
367.	zero=(result&0x0800);//lee valor de senal zero
368.	spot=(result&0x1000);//lee valor de senal spot
369.	if((spot==0x1000)&&(bandera1==0))
370.	{
371.	cont3=cont1;
372.	bandera1=1; //bandera para entrar una ves al IF en cada WHILE1B
373.	indb++;
374.	}
375.	else delay(0);
376.	cont1++;//incrementa cont1 pa calcular duracion de vuelta completa
377.	bandera2=1;
378.	};//cierra while 1b
379.	if(cont1!=0) cont2=cont1;
380.	if(bandera1==0)
381.	{
382.	gotoxy(10,9);
383.	printf("no hay obstaculo.");
384.	distx=0;disty=0;
385.	return;

386.	}
387.	if(bandera1==1) {gotoxy(10,9);printf("si hay obstaculo.");}
388.	cont5=cont3+cont2*0.028;//cont5 es un valor mas real desde
389.	//el centro de zero hata flanco de subida de spot
390.	gotoxy(10,10);
391.	printf("obstaculo=%i\n",bandera1);
392.	gotoxy(10,11);
393.	printf("cont de zero=%g\n",cont2);//cont2 pulsos de vuelta completa
394.	gotoxy(10,12); // menos los pulsos cont4
395.	printf("cont de spot=%g\n",cont5);//pulsos hasta flanco de subida
396.	gotoxy(10,13);
397.	printf("indice B=%i\n",indb);
398.	gotoxy(10,13);
399.	angleb1=(3600*(cont5))/cont2;
400.	angleb1=angleb1/10;//valor calculado de angulo b
401.	anglecr=anglec*3.1416/180;
402.	
403.	gotoxy(10,15);
404.	printf("angulo b = %g\n",angleb1);
405.	gotoxy(10,16);
406.	printf("angulo c = %g\n",anglec);
407.	angleb1=angleb1*3.1416/180;
408.	sinb=sin(angleb1);
409.	sinc=sin(anglecr);
410.	cosc=cos(anglecr);
411.	distx=(sinb*sinc) / (sin(3.1416-(angleb1+anglecr)));
412.	disty=(sinb*cosc) / (sin(3.1416-(angleb1+anglecr)))-0.5;
413.	gotoxy(10,18);
414.	printf("distancia x =%g.\n",distx);
415.	gotoxy(10,19);
416.	printf("distancia y =%g.\n",disty);
417.	freq=1000000/(cont1*13.6*1.056);
418.	gotoxy(10,21);
419.	printf("freq de rot =%g.\n",freq);
420.	}
421.	
422.	void Menu()
423.	{
424.	clrscr();
425.	gotoxy(1,2);
426.	printf("LaserEye System V1.0\n");
427.	printf("1. escaneo estatico.\n");
428.	printf("2. escaneo automatico horizontal.\n");
429.	printf("3. Prueba estatica de LeerCiclo.\n");
430.	printf("4. Autoguarda VectorXY en archivo.\n");
431.	printf("5. 90 grados a valor horizontal.\n");
432.	printf("6. 90 grados a valor vertical.\n");
433.	printf("7. 45 grados a valor horizontal.\n");
434.	printf("8. 45 grados a valor vertical.\n");
435.	printf("9. 0 grados a valor horizontal.\n");
436.	printf("0. 0 grados a valor vertical.\n");
437.	printf("f. guardar en archivo.distx2 y dixty\n");
438.	printf("g. grafica de distx2 Vs. dixty\n");
439.	printf("h. Elistar coordenadas.\n");
440.	printf("___. salir.\n");
441.	}

```

442.
443. void TestLeerCiclo()
444. {
445. do
446. {
447. LeerCiclo();
448. }while(getch()==51);
449.
450. }
451.
452.
453. void GrafXY()
454. {
455. clrscr();
456. int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
457. int xmax, ymax,grid,l=0;
458. initgraph(&gdriver, &gmode, "\\tc\\bgi");
459. errorcode = graphresult();
460. if (errorcode != grOk)
461. {
462. printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
463. printf("Press any key to halt:");
464. getch();
465. exit(1);
466. }
467.
468. setcolor(getmaxcolor());
469. xmax = getmaxx();
470. ymax = getmaxy();
471.
472. int pun;
473. for(pun=0;pun<puntero;pun++)
474. { putpixel(xmax/2-200*coord[pun].disty,ymax-200*coord[pun].distx,14); }
475.
476.
477. setcolor(4);
478. line(xmax/2,ymax,xmax/2,0);
479. line(0,ymax-200,xmax,ymax-200);
480.
481. setlinestyle(2, 1, 1);
482.
483.
484. putpixel(0,0,14);
485.
486. putpixel(100,100,4);
487.
488. getch();
489. closegraph();
490. return;
491. }
492.
493.
494. void ShowCoord()// enlista las coordenadas guardadas en vector coord.
495. {
496. int pan;
497. for(pan=0;pan<puntero;pan++)

```

498.	{
499.	printf("%i.%g,%g.\n",pan,coord[pan].distx*100,coord[pan].disty*100);
500.	delay(100);
501.	}
502.	getch();
503.	}
504.	
505.	int CheckZero();//revisa si el motor gira o no.
506.	{
507.	long double cont1,cont2;
508.	
509.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
510.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
511.	if(zero==0x000) goto TEST1;
512.	
513.	TEST0://estando en uno busca ceros.
514.	for(cont1=0;cont1<100000;cont1++)
515.	{
516.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
517.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
518.	if(zero==0x000) return (1);
519.	}
520.	goto MOTOFF;
521.	
522.	TEST1://estando en cero busca unos.
523.	for(cont2=0;cont2<100000;cont2++)
524.	{
525.	result = inport(port);//lee dto de puerto paralelo
526.	zero=(result&0x0800);//carga en la variable zero el bit de senal zero
527.	if(zero!=0) return(1);
528.	}
529.	
530.	MOTOFF:
531.	printf("Atencion: El motor NO esta girando!");
532.	getch();
533.	return(0);
534.	
535.	}