



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN "RANGEFINDER"
APLICADO A UN ROBOT MÓVIL

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA

MECÁNICA - APLICADA

P R E S E N T A :

JOSUÉ ENRÍQUEZ ZÁRATE

TUTOR:

**DR. ERNST KUSSUL M.
DRA. TETYANA BAYDYK M.**

2010



JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LÓPEZ PARRA MARCELO

Secretario: DR. DORADOR GONZÁLEZ JESÚS MANUEL

1^{er}. Vocal: DR. KUSSUL ERNST MIKHAILOVICH

1^{er}. Suplente: DRA. BAYDYK MYKOLAIVNA TETYANA

2^{do}. Suplente: DR. SANTILLÁN GUTIÉRREZ SAÚL DANIEL

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Computación Neuronal del
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

TUTORES DE TESIS:

DR. ERNST KUSSUL M.

DR. TETYANA BAYDYK M.

FIRMA

FIRMA

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Computación Neuronal del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) bajo la tutoría de los doctores Ernst Kussul y Tetyana Baydyk. Se contó con el apoyo de una beca para estudios doctorales de la DGEP - UNAM. Además se contó con el apoyo parcial de los siguientes proyectos: CONACYT 50231, PAPIIT IN108606-3, PAPIIT IN116306-3, and ICyTDF 332/2009.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN “RANGEFINDER” APLICADO A UN ROBOT MÓVIL

Tesis doctoral

Resumen

Josué Enríquez Zárate

Facultad de Ingeniería – CCADET
Universidad Nacional Autónoma de México

El presente trabajo de investigación doctoral tiene como objetivo fundamental hacer una propuesta de desarrollo tecnológico. La propuesta consiste en diseñar y construir un sistema automatizado para el mantenimiento en los heliostatos de plantas solares, el cual tiene como objetivo particular el lavado de los espejos en los heliostatos. El proyecto prácticamente se divide en los siguientes módulos:

- Diseño y construcción de una plataforma móvil
- Diseño y construcción de un sensor de distancias o rangefinder

Una de las aportaciones sobresalientes en este trabajo de investigación, es la minimización de los costos en su desarrollo tecnológico.

El módulo del robot móvil considera un diseño mecánico, eléctrico-electrónico. En lo particular el diseño eléctrico se enfoca al desarrollo tecnológico de los motores asociados a la motricidad del robot, realizándose un diseño electrónico sencillo y económico para su control.

El módulo referente al diseño y la construcción del rangefinder que es el objetivo principal sobre el que se desarrolla esta tesis de desarrollo tecnológico, consiste en presentar un diseño y construcción de un sensor de distancias o rangefinder de bajo costo con aplicaciones en el mantenimiento de plantas solares. En lo particular el rangefinder está diseñado para funcionar en espacios donde la incidencia de la luz solar es un factor ambiental importante. El rangefinder en su totalidad se diseñó y construyó en el CCADET, UNAM. Para evaluar el desempeño del rangefinder diseñado, se realizaron pruebas con diferentes tipos de obstáculos y con ello determinar los valores máximos de distancias permitidas por el sensor. Fundamentalmente el rangefinder además de localizar los obstáculos en su espacio de trabajo, permite calcular la distancia del mismo con respecto a su posición. Así mismo el principio de funcionamiento del sensor, permite abarcar un espacio de trabajo de aproximadamente 180°.

Las contribuciones de la presente tesis doctoral se centran en los siguientes aspectos:

- Se diseñó y construyó dos tipos de motores a pasos tanto para el robot móvil como para el rangefinder. Estos motores a pasos son del tipo reluctancia variable y de imán permanente.
- El principio de funcionamiento para la detección de obstáculos del rangefinder es innovador desde el punto de vista del diseño óptico, debido a que presenta un espejo adicional con respecto a las configuraciones convencionales, y además una lente adicional asociado a este espejo oscilante, lo que permite mejorar la respuesta del sensor en la detección de los obstáculos.

Por último es importante mencionar que se tiene propuesto utilizar los resultados obtenidos para aplicarlos en un prototipo de investigación en desarrollo tecnológico. Este prototipo consiste en diseñar un cinturón que contenga un rangefinder para personas invidentes.

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A "RANGEFINDER" APPLIED TO A
MOBILE ROBOT**

Doctoral thesis

Abstract

Josué Enríquez Zárate

**Faculty of Engineering – CCADET
National Autonomous University of Mexico**

This doctoral study's main purpose is to propose an alternative of technological development. The proposal is to design and build an automated system for the maintenance of solar heliostats, which aims to direct the washing of the heliostat mirrors. The practical project is divided into the following modules:

- Design and construction of a mobile platform
- Design and construction of a distance sensor and rangefinder

One of the outstanding contributions in this research is the minimization of costs in its technological development.

The module considers the mobile robot mechanical design, electrical-electronic. In particular the electrical design focuses on the technological development related to the drive motors of the robot, performing a simple and inexpensive electronic design for control.

The module for the design and construction of rangefinder which is the main objective on which this thesis develops technology development is to present a design and construction of a distance sensor or inexpensive rangefinder with applications in maintenance of solar plant. In particular the rangefinder is designed to operate in areas where the incidence of sunlight is an important environmental factor. The rangefinder in its entirety was designed and built in the CCADET, UNAM. To evaluate the performance of the rangefinder designed, it was tested with different types of obstacles and thus determine the maximum distance allowed by the sensor. Fundamentally also rangefinder is designed to locate obstacles in its workspace to calculate the distance of the same with respect to its position. The sensor can cover a workspace of approximately 180 °.

The contributions of this thesis focus on technological development in the following aspects:

- It was designed and built two types of stepper motors for both the mobile robot to the rangefinder. These stepper motors are of variable reluctance and permanent magnet.
- The operating principle for the detection of obstacles in the rangefinder is innovative from the standpoint of optical design, because it has an additional mirror with respect to conventional configurations, plus an additional lens associated with the oscillating mirror, which improves the response of the sensor to detect obstacles.

Finally, it is important to mention that we have proposed to use the results to be applied in a research prototype in technological development. This prototype can be used for the special belt containing a rangefinder for help to the blind people.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Alcances y logros	3
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Objetivo de la tesis	5
1.4. Objetivo general	6
1.5. Objetivos específicos	6
1.6. Justificación	7
1.7. Contribuciones de la tesis	7
1.8. Organización de la tesis	8
2. Algunos preliminares	9
2.1. Introducción	9
2.2. Métodos para medir distancias y aplicaciones	9
2.3. Métodos para medir distancia en forma acústica y RF	10
2.4. Métodos ópticos para la medición de distancias	10
2.4.1. Método TOF	13
2.5. Sensores para la navegación	14
2.5.1. sensores de visión	15
2.5.2. Sónar	15
2.5.3. Escáner láser de medición de distancias	17
2.5.4. Extracción de características mediante láser	20
2.6. Configuración Robots móviles	21
2.6.1. Tipos de ruedas	22
2.6.2. Distribución de las ruedas	23
2.6.3. Tracción y dirección	25
2.7. Fototransistor	28
2.7.1. Rechazo de la luz del ambiente	30
2.7.2. Corrección de la línea de base	33
2.7.3. La técnica de corriente diferencial	35
3. Diseño y construcción de la plataforma móvil	37
3.1. Diseño y fabricación de motores a pasos para el robot móvil	39
3.1.1. Diseño y maquinado del estator	40

3.1.2.	Diseño y construcción del rotor	44
3.2.	Control de los motores a pasos en el robot móvil	47
3.2.1.	Modo estable del 555	48
4.	Diseño y construcción del <i>rangefinder</i>	53
4.1.	Principio de funcionamiento	56
4.2.	Nuevo modelo de rangefinder	59
4.3.	Análisis comparativo del <i>rangefinder</i>	60
4.4.	Construcción del <i>rangefinder</i>	63
4.4.1.	Esquema de funcionamiento de las lentes	65
4.4.2.	Esquema de funcionamiento de los espejos	65
4.5.	Diseño y fabricación de los motores del <i>rangefinder</i>	66
4.5.1.	Esquema de funcionamiento de los motores	66
4.5.2.	Diseño y construcción del estator	66
4.5.3.	Diseño y construcción del rotor	67
4.5.4.	Principio de funcionamiento de los motores	68
4.5.5.	Control de los motores en el <i>rangefinder</i>	69
5.	Experimentos con el protótipo de <i>rangefinder</i>	77
5.1.	Resultados experimentales preliminares	80
5.1.1.	Respuesta del sensor de acotamiento superior	81
5.1.2.	Respuesta del <i>rangefinder</i> en diferentes obstáculos	82
6.	Resultados experimentales finales	89
6.1.	Amplificación de señal	90
6.2.	Implementación del rangefinder en el robot móvil	91
7.	Conclusiones, aportaciones y trabajos a futuro	100
	Bibliografía	102
	A. Artículos publicados <i>en extenso</i>	106

Índice de figuras

1.1. Proceso de lavado actual de los heliostatos en una planta solar	5
2.1. Emisión y recepción de señales en un sensor ultrasónico [3]	17
2.2. Interferencias en el sónar: a) directa. b)indirecta. [3]	17
2.3. a) Escáner láser lms 221 de sick. b)Sistema de funcionamiento interno [3]	18
2.4. a) Amplitud de barrido del sick lms 221. b) Ejemplo de barrido láser [3]	19
2.5. Fotografía de un escenario real junto con su correspondiente barrido láser [3]	21
2.6. (a) Rueda fija, (b) Rueda orientable centrada, (c) Rueda loca [7]	22
2.7. Rueda sueca y su distribución sobre una estructura mecánica [7]	23
2.8. Maniobrabilidad de Robot omnidireccional con ruedas suecas [7]	24
2.9. Robot omnidireccional con ruedas orientables centradas [7]	25
2.10. Sincronismo entre el sistema de tracción y dirección con ruedas omnidireccionales. (a) Mecánico, (b) Electrónico [7]	25
2.11. Estructura de un robot unicycle [7]	26
2.12. Estructura de un robot triciclo [7]	26
2.13. Sistema de dirección <i>Ackerman</i> [7]	27
2.14. Sistema de tracción y dirección en ejes independientes [7]	27
2.15. Sistema de tracción y dirección sobre un mismo eje [7].	28
2.16. Sistema de tracción y dirección sobre todos los ejes [7]	28
2.17. Esquema simple de un <i>IR</i>	29
2.18. Incidencia de la luz del sol en el IR produce falsas lecturas	29
2.19. Modulación de la intensidad de la luz utilizando transistores NPN	30
2.20. Esquema aumentado en el comportamiento del IR	31
2.21. Amplificador transimpedancia	33
2.22. Circuito corrector de la línea de base	34
2.23. Circuito corrector de la línea de base	35
2.24. Técnica diferencial	36
3.1. Dimensiones físicas del robot móvil	37
3.2. Protótipo del robot diferencial	38
3.3. Mecanismo de engranes para la motricidad del robot móvil	38
3.4. Acoplamiento de la relación de engranes con la rueda del robot móvil	39
3.5. Bobina con sus respectivas dimensiones diseñado en Mechanical Desktop	40
3.6. Soportes para el embobinado diseñado en Mechanical Desktop	41

3.7.	Bobina cubierta por hilo grueso para aislar el hierro	42
3.8.	Bobina cubierta de alambre de cobre electromagnético	43
3.9.	Colocación de las ocho bobinas en forma circular	44
3.10.	Base en la que se han de colocar las ocho bobinas con centro	45
3.11.	Diametro adecuado para cada una de las bobinas	46
3.12.	Radio del estator a partir de cada bobina con respecto al centro	47
3.13.	Buje ubicado en el estator por que ha de pasar la flecha del rotor del motor	48
3.14.	Ensamble final del estator	49
3.15.	Vista del rotor superior en los dos motores diseñados	50
3.16.	Vista del rotor inferior en uno de los motores diseñados	50
3.17.	Escareo entre el estator y el rotor del motor diseñado para su libre desplazamiento	51
3.18.	Diagrama electrónico para el control de los motores a pasos	51
3.19.	Configuración en modo astable del oscilador	52
3.20.	Circuito electrónico ensamblado para el control de los motores	52
4.1.	A compact, low power two-axis scanning laser rangefinder for mobile robots	54
4.2.	Vista en 3D y 2D de la lente óptica y una imagen en el plano	55
4.3.	Principio de funcionamiento del <i>rangefinder</i> infrarojo de la serie PBS de la compañía HOKUYO	56
4.4.	Principio de operación del láser Rangefinder URG-04LX de la compañía HOKUYO	56
4.5.	<i>catadioptric single-shot rangefinder</i>	57
4.6.	Geometría de triangulación	58
4.7.	Esquema de triangulación del rangefinder analógico	59
4.8.	Nuevo modelo de rangefinder	60
4.9.	Circuito lógico para obtener información del rangefinder	61
4.10.	Esquema electrónico de los sensores de acotamiento y el disparador	62
4.11.	Diagrama de tiempos (caso A y B)	63
4.12.	Primer prototipo de <i>rangefinder</i>	64
4.13.	Esquema de funcionamiento del nuevo prototipo de <i>rangefinder</i>	65
4.14.	Sensor de distancias <i>rangefinder</i> con el nuevo esquema de funcionamiento	66
4.15.	Lente propagadora del haz de luz en el <i>rangefinder</i>	67
4.16.	Lente real colocada en el prototipo de <i>rangefinder</i>	67
4.17.	Espejo diseñado para reflejar el haz de luz en el <i>rangefinder</i>	68
4.18.	Espejo Plano real diseñado para reflejar el haz de luz en el <i>rangefinder</i>	69
4.19.	Estator del motor para el nuevo diseño de <i>rangefinder</i>	70
4.20.	Estator individual	70
4.21.	Bobina del estator	71
4.22.	Tapas del estator	71
4.23.	Buje de estator	72
4.24.	Prototipo de estator	72
4.25.	Rotor acoplado al estator del motor	73
4.26.	Espejo plano acoplado en la flecha del motor	73
4.27.	Desplazamiento del motor bipolar en modo de paso completo	74
4.28.	Tabla con la secuencia de excitación para un motor bipolar de paso completo	74

4.29. Configuración interna del motor a pasos	75
4.30. Tabla con la secuencia de combinaciones para excitar al motor bipolar de paso completo	75
4.31. Electrónica de potencia para el control de los motores a pasos en el <i>rangefinder</i>	76
5.1. Estructura mecánica del sensor de distancias <i>rangefinder</i> con una vista lateral	77
5.2. Estructura mecánica del sensor de distancias <i>rangefinder</i> con una frontal	78
5.3. Inclinación del segundo espejo en la estructura del <i>rangefinder</i>	79
5.4. Filamento de la fuente de luz del sensor en un obstáculo	80
5.5. Haz de luz reflejado directamente hacia fototransistor	81
5.6. Placa limitadora entre fuente de luz y fototransistor	82
5.7. Variación de V_s a partir del valor de intensidad en la fuente de luz	83
5.8. Fototransistor con valores de funcionamiento	83
5.9. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 50cm	84
5.10. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 30cm	84
5.11. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 19.5 cm	85
5.12. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 8 cm	85
5.13. Diagrama comparativo de la respuesta del <i>rangefinder</i> y del sensor de acotamiento	86
5.14. Respuesta del <i>rangefinder</i> sobre una superficie en color azul	86
5.15. Respuesta del <i>rangefinder</i> sobre una superficie plana de latón	87
5.16. Respuesta del <i>rangefinder</i> sobre una superficie de terciopelo en color negro	87
5.17. Esquema comparativo en la respuesta del fototransistor a una distancia de 30 cm	88
6.1. Protótipo de <i>rangefinder</i> completo	90
6.2. <i>Rangefinder</i> frente a la guía de desplazamiento del obstáculo	91
6.3. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 1 cm	92
6.4. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 10 cm	92
6.5. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 20 cm	93
6.6. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 30 cm	93
6.7. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 33 cm	94
6.8. Curva que indica el comportamiento del <i>rangefinder</i> con respecto a la posición del obstáculo	94
6.9. Amplificador de señal en el <i>rangefinder</i>	95
6.10. Amplificador real	95
6.11. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 10 cm	96
6.12. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 30 cm	96
6.13. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 50 cm	97
6.14. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 1 m	97
6.15. Respuesta del <i>rangefinder</i> a una distancia de 1.37 m	98
6.16. Acoplamiento de los motores a pasos de reluctancia variable en la plataforma móvil	98
6.17. Integración del sistema en forma completa	99

Agradecimientos

Para tí que siempre estuviste y has estado ahí y que nunca te he podido ver...

Gracias a ustedes por estar conmigo y hacer este sueño realidad

Dr. Ernst Kussul M.
Dra. Tetyana Baydyk
Dr. Gerardo Silva Navarro
Dr. Gengis Kanh Toledo Ramírez

y en especial para tí Rocío.

Sinceramente muchas gracias.



Josué Enríquez Zárate

Capítulo 1

Introducción

Debido a que en los últimos años se han establecido grandes cambios en el sector energético, se ha optado por la búsqueda de nuevas formas de obtener energía. Estas nuevas formas generalmente se resumen en el aprovechamiento de alternativas en energía como:

- eólica
- solar
- geotérmica
- y bioenergéticos como el etanol

Un factor muy importante que no ha permitido aprovechar en forma adecuada dichas alternativas energéticas es el factor económico. Debido a que estas tecnologías se encuentran en proceso de desarrollo, es difícil que se encuentren disponibles en el mercado a un costo accesible. En este sentido los costos de mantenimiento en los dispositivos implementados son también elevados, y sumado a esto, el factor del tiempo en la realización de este mantenimiento y de la generación de la energía coadyuva a que la comercialización de estas tecnologías sea difícil y hasta cierto punto incosteable. Como una alternativa a esto, en la actualidad se han implementado principios de automatización en estos procesos que han de permitir reducir los costos en la producción de electricidad.

En este sentido la automatización en el proceso de obtener la energía solar juega un papel muy importante. En relación con esto, es importante mencionar que existen plantas solares que se estima puedan generar una potencia de 300Mw para el 2013 y que sea capaz de abastecer a 180,000 hogares.

La mayoría de estas plantas solares, han adoptado un sistema muy particular, el de la creación de un campo de espejos. Los cuales mediante motores siempre reflejan el sol hacia una abertura en una torre. La altura de dicha torre puede variar pero habitualmente ésta es de 115 metros y posee una ventana en la parte superior de unos 100 metros cuadrados [1]. El interior de una planta solar está revestido de refractarios sobre el que encontraremos el circuito de agua que se calienta debido a la radiación; esta agua recalentada se convertirá luego en vapor para atravesar un sistema de turbinas y generar electricidad.

Existen parques solares del tipo cilindros parabólicos que alcanzan a cubrir un área de 23,3 km² de desierto, la de platos solares y las torres de energía solar esta última está formada por una base de 624 helióstatos de 120 m² cada uno [1]. Cada uno de las plantas solares antes mencionadas necesita de un adecuado mantenimiento para su excelente funcionamiento, lo que implica que la cantidad de energía captada por cada heliostato sea la mayor en el menor tiempo.

La calidad en la superficie de los espejos en cada uno de los heliostatos que integran la planta solar inciden directamente en la cantidad de energía captada por cada uno de los heliostatos. En este sentido los espejos en lo particular se encuentran expuestos a varias condiciones ambientales que inciden en la cantidad de energía solar captada. Estas condiciones se resumen en:

- polvo
- agua
- una mezcla de ambos

La presencia de cada uno de estos elementos ambientales o la combinación de ambos crea condiciones necesarias y suficientes para reducir la cantidad de energía captada por cada heliostato. Para mantener en buen estado la calidad de los espejos es necesario realizar un mantenimiento (lavado) en los mismos en forma periódica. Este trabajo aumenta el costo en la producción de energía solar. Con la finalidad de reducir este costo se propone automatizar el lavado de los espejos, y lograr éste objetivo implica utilizar un sistema autónomo móvil con módulos de sensado para su adecuado desplazamiento dentro de la planta solar con la finalidad de ubicar la estructura de los helióstatos y evitar los obstáculos dentro de su área de trabajo.

En lo particular existe una gran variedad de métodos de sensado que permiten obtener la medición de distancias en sistemas tipo robots que se desplazan en áreas principalmente con obstáculos. La medición de estas distancias han de permitir que el sistema autónomo móvil ó robot evite los obstáculos, permitiendo con esto alcanzar el objetivo final a partir de un análisis de trayectorias propuestas.

Básicamente son tres diferentes enfoques para la medición de distancias:

- sensores basados en la medición del tiempo de vuelo o *Time Of Flight* (TOF) de un pulso de energía emitida viajando hacia un objeto que la refleja, posteriormente haciéndose eco regresa hacia un receptor.
- El cambio de la fase de medición (o fase de detección) la técnica supone la transmisión de onda continua en contraposición a los pulsos cortos producidos usados en los sistemas (TOF).
- sensores basados en Frecuencia Modulada (FM) de radar. Esta técnica es algo relacionado a la técnica de cambio de la fase de medición (amplitud modulada).

En este sentido cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas, las cuales pueden ser en menor o mayor escala como se explica en Leonard and Whyte [2].

Una de las desventajas de los sensores consiste prácticamente en la calidad de sensado que se realiza bajo ciertas condiciones de operación incluyendo las ambientales. En este sentido el

factor de la luz natural juega un papel muy importante. Así mismo es interesante mencionar que el escaneo o barrido de información en el área de trabajo del robot en un cierto radio es de considerarse importante, debido a que la posibilidad de determinar la mayor cantidad de obstáculos en un cierto radio en un solo escaneo, permite obtener una mayor información del espacio de trabajo, logrando con ello anticiparse a una selección de la mejor trayectoria ahorrando con ello tiempo en la toma de decisiones por parte del control implementado en el robot.

En la actualidad existen medidores de distancias con una tendencia hacia el uso de dispositivos como láseres por su robustez en el rango de desempeño y exactitud. La mayoría de ellos basados en el principio de triangulación para obtener la ubicación del obstáculo. Una de las desventajas en estos dispositivos medidores es su costo tecnológico. En la actualidad existe una tendencia en desarrollar tecnología que permita obtener los mismos resultados o mejores con un menor costo.

1.1. Alcances y logros

Esta tesis de investigación en desarrollo tecnológico presenta los siguientes alcances concluidos con respecto a diseño y construcción incluyendo el diseño mecánico, eléctrico y electrónico de dos módulos: diseño y construcción de una plataforma móvil y el diseño y construcción de un sensor de distancias o *rangefinder*.

El diseño y construcción del robot móvil en configuración diferencial incluye el diseño y construcción de un par de motores a pasos de reluctancia variable de bajo costo tanto en su parte eléctrica como en la electrónica de su control en base a diseño. El diseño y construcción del *rangefinder* incluye el diseño mecánico, eléctrico y electrónico en base a diseño, a partir del principio de funcionamiento óptico para determinar la presencia de los obstáculos. Estos dos módulos se alcanzaron y concluyeron exitosamente.

El desarrollo tecnológico de esta tesis presenta los logros alcanzados en los dos módulos. Estos logros los podemos enumerar de la siguiente manera:

- Se tiene el diseño y la construcción completa del robot móvil. En este aspecto lo único que hace falta agregar al sistema, es un *encoder* en cada uno de los motores diseñados para determinar la posición actual de cada una de las llantas del robot móvil. En este aspecto el robot no es autónomo, y no se tiene una ley de control que requiera la información de estos *encoder's*, para obtener un lazo cerrado en el control de la trayectoria del robot móvil.
- Se tiene el diseño y la construcción completa del *rangefinder*, en lo particular este módulo se acopló directamente sobre la superficie del robot móvil y se implementó para detectar obstáculos dentro de un espacio cerrado. En este sentido, en los experimentos realizados es posible observar la respuesta del sensor a diferentes valores de distancia de los obstáculos. En los capítulos cinco y seis es posible analizar gráficamente las respuestas del sensor incluyendo su respuesta en presencia de obstáculos de diferentes colores. Es importante mencionar que la etapa de amplificación del fototransistor requiere una etapa de filtrado, con la finalidad de obtener una mejor respuesta en la detección del obstáculo. Esta etapa no fue posible agregarla en el prototipo final, más sin embargo se tiene una propuesta de diseño para ser construido y agregado al sistema final. Por último es importante mencionar

que se logró la detección de obstáculos y se tiene el aparato matemático para determinar el valor de la distancia del obstáculo. En el capítulo cuatro se encuentra una sección que muestra una tabla comparativa en términos de desempeño del *rangefinder* diseñado contra dos modelos comerciales de *rangefinder*'s.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad existe una tendencia hacia el desarrollo tecnológico en el área de las energías alternas como les el caso de la energía solar. En este aspecto las investigaciones se han enfocado un poco más hacia aspectos como:

- mejorar la calidad y cantidad de energía eléctrica obtenida de los paneles solares
- mejoramientos de las tecnologías para la captación de la energía solar
- mejoramiento en los bancos de almacenamiento de la energía obtenida
- y en el control en forma automatizada de la orientación en los paneles solares o en su caso los heliostatos

El mantenimiento en general de esta tecnología es una inversión que se ve reflejada en el costo de la misma. Como se mencionó en la introducción de esta investigación doctoral la tendencia en la mayoría de los desarrollos tecnológicos independientemente de que se realicen con la finalidad de resolver una problemática dada, es importante tener presente el costo de su desarrollo e implementación. El principio de la automatización permite en gran medida reducir costos. El mantenimiento en los espejos de los heliostatos o los heliostatos en sí, requieren de mantenimiento para limpiar las impurezas, como se mencionó en la introducción afectan la cantidad de energía capturada por estos espejos [34]. Por otro el proceso de mantenimiento o lavado se ve reflejado en grandes costos para las empresas dedicadas a la implementación de este tipo de tecnologías [34]. Existen algunas propuestas de investigación en desarrollo tecnológico que realizan aportaciones interesantes para el lavado automatizado de estos espejos o heliostatos. Recientemente la empresa *ECILIMP* [35] presenta tres propuestas de lavado interesantes:

- limpieza por chorro de agua
- limpieza por chorro de aire
- limpieza mediante frotado

En cualquiera de los tres métodos, se analiza al menos en los ensayos realizados en un campo o espacio de trabajo de la empresa mencionada, es decir, que los heliostatos no se encuentran en su espacio de trabajo original, sino que son trasladados a un campo de trabajo para realizar el mantenimiento del lavado. Si analizamos esto en términos de costo y de producción, la generación de energía es afectada directamente y las pérdidas son significativas. Existen otros trabajos de desarrollo tecnológico que buscan resolver la importancia del lavado de los heliostatos como el siguiente proyecto conocido como *Robot Gecko* [36]. En lo particular este robot realiza el

mantenimiento sobre las superficie de los paneles solares en una forma invasiva, es decir, el robot realiza este trabajo "montado" sobre la superficie del panel solar. Uno de los aspecto interesantes que se observan en esta propuesta de robot es el área de trabajo efectivo que abarca en su proceso de limpieza y el segundo aspecto, es el tiempo en que realiza este proceso.

Es importante hacer énfasis en que este robot en lo particular esta diseñado para implementarse en el mantenimiento de paneles solares, más no en el mantenimiento de heliostatos de una planta solar.

En la actualidad el mantenimiento de los heliostatos se realiza con el método de limpieza por agua, para llevar acabo este proceso se requiere de pipas con tanques contenderas de agua, las cuales con la ayuda de un operador realizan el lavado de impurezas en los espejos de los heliostatos [37].



Figura 1.1: Proceso de lavado actual de los heliostatos en una planta solar

1.3. Objetivo de la tesis

El presente trabajo de investigación doctoral tiene como objetivo fundametal hacer una propuesta de desarrollo tecnológico. La propuesta consiste en diseñar y construir un sistema automatizado para el mantenimiento en los heliostatos de plantas solares. El proyecto prácticamente se divide en los siguientes módulos:

- Diseño y construcción de una plataforma móvil
- Diseño y construcción de un sensor de distancias o *rangefinder*
- y el diseño del controlador para el seguimiento de trayectorias

Una de las aportaciones sobresalientes en este trabajo de investigación, es la minimización de los costos en su desarrollo tecnológico. Es por tal motivo que el módulo de la plataforma o robot móvil y el módulo del *rangefinder* se diseñaron y construyeron completamente en el desarrollo del proyecto.

1.4. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis doctoral que es un proyecto de desarrollo tecnológico, consiste en presentar un sistema automatizado para el mantenimiento de los heliostatos en una planta solar. Para llevar a cabo la automatización de este mantenimiento, el cual consiste particularmente en el lavado de los espejos en los heliostatos, la tesis se enfoca en el desarrollo tecnológico de dos módulos del proyecto de investigación. Estos dos módulos son el diseño y construcción de una plataforma o robot móvil y el diseño y construcción de un *rangefinder*.

1.5. Objetivos específicos

Debido principalmente a que el proyecto original es complejo y extenso. En la presente tesis de desarrollo tecnológico, se presentan los resultados de los módulos referentes al diseño y la construcción de una plataforma o robot móvil y el diseño y la construcción de un *rangefinder*. El módulo del robot móvil considera un diseño mecánico y eléctrico-electrónico. En lo particular el diseño eléctrico se enfoca al desarrollo tecnológico de los motores asociados a la motricidad del robot, realizándose un diseño electrónico sencillo y económico para su control.

El módulo referente al diseño y la construcción del *rangefinder*, es el objetivo específico principal sobre el que se desarrolla esta tesis de desarrollo tecnológico. Este módulo consiste en presentar un diseño y construcción de un sensor de distancias o *rangefinder* de bajo costo con aplicaciones en el mantenimiento de plantas solares. En lo particular el *rangefinder* está diseñado para funcionar en espacios donde la incidencia de la luz solar es un factor ambiental. El diseño mecánico y la mayoría de los elementos que componen al *rangefinder* se han de diseñar y construir en el CCADET, UNAM; esto ha de permitir reforzar el concepto de bajo costo en el diseño del sensor. Estos elementos consideran el diseño y construcción de los motores a pasos que se indican en el diseño del sensor. Para evaluar el desempeño del *rangefinder* diseñado se han de realizar pruebas con diferentes tipos de obstáculos y con ello determinar los valores máximos de distancias permitidas por el sensor.

Fundamentalmente el *rangefinder*, además de localizar los obstáculos en su espacio de trabajo, ha de permitir calcular la distancia del mismo con respecto a su posición utilizando para esto, un programa de computo que ha de realizar el cálculo adecuado. Por otro lado el diseño propuesto con respecto al principio de funcionamiento del sensor, permite abarcar un espacio de trabajo aproximadamente de 180°.

Específicamente, para que el *rangefinder* pueda detectar los obstáculos, en este caso los heliostatos en la planta solar, se considera el diseño de una plataforma móvil, en este caso un robot en configuración diferencial. Este robot móvil se ha de diseñar completamente con la mayoría de sus componentes incluyendo los motores a pasos para su motricidad en el CCADET, UNAM. [21, 22, 29].

1.6. Justificación

Tradicionalmente el problema de detección de obstáculos en diversas aplicaciones de automatización industrial se ha abordado desde varios puntos de vista, principalmente con esquemas pasivos y activos. Más recientemente, los esquemas activos, los cuales emplean retroalimentación y prealimentación de señales del sistema, han captado la atención de la comunidad académica e industrial. En particular, el trabajo realizado experimentalmente contribuye de alguna manera en la presentación de varias alternativas para la detección de obstáculos, algunas de las cuales resultan en sensores muy robustos sobre todo para realizar el seguimiento de trayectorias en presencia de perturbaciones, como la luz ambiental.

El trabajo realizado contempla el diseño de un sensor de distancias de bajo costo conocido como *rangefinder*, para la detección de obstáculos y se realizaron pruebas experimentales para determinar el alcance máximo, así como su respuesta en presencia de diferentes tipos de obstáculos. La parte fundamental del trabajo consistió en realizar el diseño, la construcción y determinar la respuesta de resolución del *rangefinder* en presencia de diferentes tipos de obstáculos y ambientes.

En muchas de las investigaciones realizadas con respecto al uso de este tipo de sensores *rangefinder*, que utilizan el principio de triangulación para la determinación de obstáculos, utilizan como fuente de luz un láser. Por este motivo en la mayoría de los trabajos analizados para la presentación de este trabajo de investigación doctoral los sensores utilizados se conocen como Laser RangeFinder (LRF). En lo particular nuestro diseño considera el uso de una fuente de luz que no es más que una lámpara de halógeno de baja potencia. Aún cuando en la actualidad muchas tecnologías de láseres son relativamente baratas no se comparan con lo económico y fácil que es manipular una lámpara de halógeno.

De esta forma fue posible llevar a cabo un estudio comparativo de la respuesta del sensor con respecto a trabajos de investigación realizados con algunos otros tipos de sensores de distancias, las cuales fueron aplicadas en presencia de diferentes tipos de obstáculos y a diferentes valores de distancia.

El motivo personal por el cual se realizó este trabajo de investigación doctoral fue el llegar a comprender de una manera clara y concisa el proceso de diseñar y aplicar sensores de distancias sobre plataformas móviles para la realización del mantenimiento en sistemas como una planta solar, específicamente los espejos en los heliostatos. Permitiendo conocer sus ventajas y desventajas al aplicarlos a sistemas reales. Además de adquirir experiencia en el diseño y control sobre todo en áreas como la mecatrónica.

Por último, es importante subrayar que los problemas considerados son de interés para la investigación aplicada, extrapolándose a aplicaciones reales en ingeniería civil, mecánica, mecatrónica, energías alternas, etc.

1.7. Contribuciones de la tesis

Las contribuciones de la presente tesis doctoral de desarrollo tecnológico se centran en los siguientes aspectos. El diseño y construcción del robot móvil considera el diseño y construcción de dos motores a pasos de reluctancia variable para la motricidad del robot. Estos motores por su diseño económico y facilidad en su control se consideran como una aportación factible para

proyectos de investigación en robótica móvil. Por otro lado el principio de funcionamiento de bajo costo, para la detección de obstáculos del *rangefinder* es innovador desde el punto de vista del diseño óptico, debido a que presenta un espejo adicional con respecto a las configuraciones convencionales, y además una lente adicional asociado a un espejo oscilante, lo que permite mejorar la respuesta del sensor en la medición de la distancia de los obstáculos. Estos espejos se controlan en forma independiente por motores a pasos de imán permanente, lo que permite mejorar la respuesta del sensor en la medición de la distancia de los obstáculos. Por tal motivo también se considera la propuesta para realizar una patente en el principio de funcionamiento y el diseño mismo del *rangefinder*.

La mayoría de las aplicaciones en robótica móvil, utilizan sensores comerciales bajo el principio de funcionamiento TOF. Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación, ofrecen una alternativa para la detección de obstáculos bajo un principio de funcionamiento de bajo costo como es el de triangulación.

1.8. Organización de la tesis

La tesis está organizada en siete capítulos. El primer capítulo es una introducción general que describe el estado del arte y el contenido de la tesis. El segundo capítulo incluye algunos conceptos básicos de sensores, robótica móvil e instrumentación, particularmente en fototransistores, necesarios para comprender el contenido de los capítulos subsecuentes. El tercer capítulo presenta una descripción de los componentes y configuración de la plataforma móvil, con la cual se verificó experimentalmente el desempeño del *rangefinder*. En el capítulo cuatro se presentan los componentes diseñados mecánicos y electrónicos para el funcionamiento del *rangefinder*. En el capítulo cinco se presentan algunos resultados experimentales previos del *rangefinder* obtenidos en presencia de diferentes obstáculos. En el capítulo seis se presentan resultados experimentales del *rangefinder* con un dispositivo amplificador de la señal del sensor. El capítulo siete consta de algunas conclusiones del trabajo de tesis, explicando las ventajas y limitaciones encontradas a lo largo del estudio analítico y experimentos, las metas alcanzadas y algunas perspectivas. Al final se incluye un apéndice, donde se anexan los artículos presentados en algunos congresos nacionales e internacionales como resultado de la investigación realizada.

Capítulo 2

Algunos preliminares

2.1. Introducción

La automatización de procesos o servicios en general requiere que los sistemas dedicados a realizarlos, de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos. Independientemente de la dinámica del sistema que se proponga se requiere un sistema mínimo o de computo a través de un lenguaje de programación que nos permita realizar un sistema automatizado en forma completa. En lo particular la automatización de servicios requieren constantemente la validación de los espacios o áreas de trabajo, para esto utilizan dispositivos de sensado como son: cámaras digitales, sensores de proximidad, sensores de contacto, etc.

La descripción de algunos de sensores exteroceptivos más utilizados en robótica: sensores de visión, el sónar y el láser. En contraposición a los propioceptivos, los sensores exteroceptivos solamente detectan lo que ocurre en el exterior del robot. Las medidas de este tipo de sensores normalmente son interpretadas por el robot para extraer características del entorno y construir un modelo del mismo.

A continuación se realiza un breve recordatorio de conceptos y técnicas de control que se utilizarán en los siguientes capítulos.

2.2. Métodos para medir distancias y aplicaciones

Las técnicas para medir las distancias son necesarias para determinar la posición, dimensión o movimiento del obstáculo. Las posibles aplicaciones son por ejemplo: control de dimensiones o calidad en la industria, medir velocidad o aceleración, controlar un área segura, aplicaciones militares o medir distancias para aeroplanos o satélites [3]. Las aplicaciones relacionadas para visión en 3D son reconocimiento de objetos, identificación de la orientación del objetos o calcular el número de objetos. Las aplicaciones de visión en 3D frecuentemente relacionan para guiar a un robot en tareas complicadas o la navegación de un robot desplazándose en un área de trabajo [3].

La medida de las distancias pueden ser realizadas sin contacto, es decir, en forma acústica por medio de sonido ultrasónico, por Radio Frecuencia (RF), ondas electromagnéticas u ópticamente con luz [3]. En todo los métodos una señal es enviada hacia el obstáculo y la distancia es calculada

basandose en las propiedades de la señal reflejada de regreso desde el obstáculo.

Un factor común entre los buscadores de rango como el RF y el óptico, es que el ángulo de resolución depende de la longitud de onda. La divergencia del haz decae, cuando la longitud de onda decae. Los métodos ópticos son los más adecuados cuando una alta resolución en dimensiones vertical y horizontal es requerido. Como los métodos ópticos también disponen de la mejor resolución y calidad en la medida de las distancias, son los métodos más aceptables para obtener una imagen 3D de mejor calidad del obstáculo, esto siempre y cuando el medio utilizado (normalmente aire) no tiene muchas partículas como el humo.

2.3. Métodos para medir distancia en forma acústica y RF

La medida de distancias utilizando en las ondas de sonido usan frecuencias en un rango ultrasónico de 20 KHz a algunos megahertz [3]. La ventaja de los métodos ultrasónicos son relativamente las bajas frecuencias, las cuales son fácilmente manejables con electrónica, sencilla y estructura barata de los dispositivos también como la capacidad para medir en superficies como metal, espejos y vasos, los cuales son difíciles para medidores ópticos.

La principal desventaja es la gran divergencia del haz (el ancho del haz es de algunos diez grados), menos lentos, múltiples reflexiones y una gran atenuación en distancias muy largas. El ángulo y la resolución de la distancia puede ser resuelta usando varios receptores o procesando la señal. La velocidad puede ser incrementada aumentando la frecuencia de operación. Para la medición de distancias de unos pocos centímetros también, la medición puede ser buena, en cada 0.2 mm. Los métodos ultrasónicos son más funcionales en distancias cortas (algunas decenas de metros a lo máximo), y para algunas aplicaciones en las cuales el proceso de medición es simple, por ejemplo, las alarmas de colisión en autos y robots o para aplicaciones en las cuales hay una gran cantidad de polvo u otras partículas en el aire. Sin embargo, también los sensores ultrasónicos en 3D tienen funcionamiento.

Las ondas electromagnéticas de RF fueron utilizadas desde 1930 en radares tradicionales (radar=detección de radio y rastreo), los cuales son utilizados para la medición de distancias en toda la variedad de materiales en aplicaciones de barcos, aviones y militares y del espacio [3]. Los radares utilizan frecuencias desde algunos miles de MHz hasta arriba de 100GHz. Las frecuencias más populares son microondas en el rango de 1-10 GHz. La resolución en la medición del ángulo o distancia es usualmente peor que los métodos ópticos. El ángulo de divergencia es miles de millones de *mrad* (desde algunos grados hasta miles de grados) en microondas (1-40 GHz) y 10-20 *mrad* (aproximadamente 1 grado) en milímetros de onda (arriba de 40 GHz). Pulsos de alta potencia (algunos megawatts) y la medición a lo largo del rango, también en condiciones de humo, son alcanzables con radares de RF. Por ejemplo los radares de policías utilizados para el control de velocidad son capaces de alcanzar un kilómetro de distancia de trabajo, pero la divergencia es relativamente alta, 200-300 *mrad* [3].

2.4. Métodos ópticos para la medición de distancias

Los medidores de distancias ópticos son también llamados LADARs o LIDARs (LADAR=detección y rastreo por láser y LIDAR= detección y rastreo por luz) o con el término range finder

por láser. El término de radar láser incluye ambos buscadores de rango por láser (medidores de distancia por láser), y los dispositivos medidores de la absorción y la dispersión de la luz en la atmosfera [3].

Los métodos de medición de distancia óptico pueden ser divididos en muchas formas, uno de ellos es la clasificación de los métodos en forma pasiva y activa [3]. El método pasivo no necesita su propia fuente de luz, ellos utilizan la luz del ambiente para la recolección de la información de la distancia desde el obstáculo. El método activo tiene una fuente de luz propia para iluminar el obstáculo. Los métodos activos más importante son los métodos interferométricos, método geométrico (triangulación) y el de tiempo de vuelo. Otra clasificación divide los métodos para basados en imágenes y métodos directo. El método directo entrega una distancia inequívoca para algunos puntos en el obstáculo. En el método basado en imágenes la distancia es calculada con algunos algoritmos basados en tonos o posiciones relativas de las diferentes partes del obstáculo. El tercer tipo de clasificación divide los métodos en métodos de medición de vistas múltiples y monocular. Los métodos monocular pasivo están frecuentemente basados en el cálculo de las formas a partir del sombreado, textura, movimiento o enfocado desde una imagen creada con una *CCD* (una matriz de fotodiodo unidimensional) o sensores de imagen *CMOS* (matriz de fotodiodos) [3]. En este método los problemas típicos son las pequeñas diferencias en la iluminación (especialmente al aire libre) o la reflejación del obstáculo. El método de vistas múltiples están también clasificados como métodos de triangulación o como estereo visión.

Los métodos de triangulación son los más comunes métodos medidores de distancia, por que son más simples y fiable dentro de un ambiente industrial exigente. La idea dentro de la triangulación pasiva es medir el ángulo formado entre los puntos de dos receptores (cámaras) y un obstáculo. La distancia más grande entre los receptores, lo mejor la sensibilidad, pero entonces hay también una mayor posibilidad para tener un problema de "pérdida de partes", lo cual significa que el obstáculo esta parcialmente sombreado por algún otro objeto en la escena. La ventaja de los métodos pasivos es su estructura simple y segura; no hay peligro para los ojos humanos. Los *CCD* o *CMOS* o un *PSD* (detector fotosensitivo), es suficiente como un sensor de triangulación pasiva [3], [4]. Hay varias variaciones de la estereo visión. Por ejemplo, el obstáculo puede estar en movimiento, en tal caso una cámara es suficiente. Muchos de ellos sin embargo, están basados en algunas variedades de sistemas de triangulación.

Los métodos de vistas múltiples activas están basadas en estereo visión (triangulación) con una contribución de iluminación activa del obstáculo, los cuales hacen más fácil calcular la distancia. La contribución de iluminación es realizada con un haz de láser, las cuales usualmente tienen la forma de una banda, red o algunos otros patrones. La ventaja de utilizar un láser es la pequeña divergencia y los pequeños tamaños de manchas, pero la alta coherencia puede también traer patrones de interferencia no deseados. Las manchas iluminadas pueden también ser realizados con una fibra rallada. Aquí la fibra rallada significa que las dos capas (en un ángulo de 90 grados por cada otro) de fibras paralelizadas son usados como lo óptico para la creación de una red de manchas. La precisión para la medición de una mancha puede alcanzar incluso la precisión de 50 μm en una distancia de 3 metros [3].

Los métodos monocular directo activo son métodos interferométrico y los métodos TOF. También el método de "forma de x ", en el cual x significa, sombreado, movimiento o foco, puede estar activo, si el obstáculo esta iluminado con una banda de luz desde un láser. El método interferométrico incluye técnicas de *Moiré*, interferometría holográfica y difracción de *Fresnel*

[3]. En la técnica de *Moiré* el obstáculo es iluminado con una luz de láser a través de un rallado y la imagen del obstáculo es capturada a través de otro rallado con una cámara. Los rallados crean un patrón de difracción y la distancia puede ser calculada midiendo la posición de la difracción rayadas. En la interferometría holográfica un holograma es creado desde el obstáculo y el holograma es utilizado como una referencia del objeto. Cuando un holograma y el obstáculo original son iluminados con un haz de láser, su combinación crea un patrón de interferencia. La distancia puede ser calculada desde la distancia entre las líneas dentro del patrón [3]. La difracción de Fresnel está basada en la iluminación de un rallado con una luz coherente, lo cual el rallado crea patrones de interferencia en distancias regulares, las cuales pueden ser para medir la distancia. En general, los interferómetros son muy exactos, incluso en el rango de μm . El problema es que sin las distancias de referencia es imposible medir las distancias sin ambigüedades, y únicamente la diferencia en la distancia puede ser medida. Utilizando varias longitudes de onda también medidas absolutas pueden ser llevadas a cabo. Una aplicación de la interferometría es la medida de los movimientos de la corteza de la tierra. Los sensores de visión monocular 3D usualmente utilizan escaneo de buscadores de rango láser TOF. El escaneo es realizado con espejos los cuales son cambiados por galvanómetros (vueltas de alambres en un campo magnético), motores a pasos o cristales acústico-ópticos, en los cuales una alta frecuencia de onda acústica produce un serie de coeficientes de refracción diferentes dentro de un cristal piezoeléctrico [3]. El ángulo de inflexión puede ser medido, por ejemplo con un sensor capacitivo, si son utilizados galvanómetros. El método TOF puede también tener dos ejes ópticos, en los cuales el caso de un eje es para el transmisor y el otro para el receptor, pero por que los ejes ópticos están muy cercanos uno a otro, el método es clasificado como monocular.

En la tabla 2.1 algunos métodos medidores de distancia ópticos son presentados según la clasificación presentada que están por encima de 8 clases, pero solo 5 clases son implementados en la práctica [3].

Tabla 2.1. Métodos ópticos para medir distancias

	Pasivo, directo	Pasivo basado en imágenes	Activo, directo	Activa, basada en imágenes
Monocular		Shape from shading Shape from texture Shape from motion Shape from focus	Método interferométrico Método TOF	Illuminated shape from x
Multiple vista	Triangulación pasiva		Triangulación activa	

Los obstáculos también pueden ser clasificados como activos o pasivos, cuando la mayoría de los métodos ópticos son utilizados [3]. Los métodos pasivos significan obstáculos no cooperativos, los cuales pueden tener una muy grande variación del coeficiente de reflexión. La reflectancia puede también variar mucho como una función de la medición del ángulo, desde una superficie de *Lambertian* (con iguales brillos para todas las direcciones) hacia superficies reflectivas como los espejos. El obstáculo será activo, cuando algunos reflectores, tales como una cinta reflectiva o una esquima prisma, es sumado en éste. Los reflectores artificiales reflejan el haz entrante muy efectivamente regresando hacia la dirección de su fuente.

2.4.1. Método TOF

Dos de las principales ventajas del método TOF son que los haces transmisores y receptores son coaxiales y que la precisión en la medición no depende sobre la distancia (el cual no es el caso de la triangulación) [3]. En los buscadores de rango laser TOF también el pulso, amplitud o frecuencia de modulación es utilizado. En el método de modulación de pulso, el tiempo de vuelo del pulso reflejado desde el obstáculo es medido.

En el método de la modulación de amplitud la diferencia de fase entre el seno modulado transmitido y el haz reflejado son medidos. En la técnica de la modulación de la frecuencia, la señal de frecuencia es barrida en algunas frecuencias de rango limitados. Usando técnicas heterodino una frecuencia intermedia es generada, la frecuencia de las cuales depende en la distancia del obstáculo. Los métodos más populares son el de modulación por amplitud y pulso. En algunos trabajos de investigación se ha demostrado con cálculos que el método por pulso tiene una mejor precisión que el método de modulación por amplitud, cuando el promedio de la potencia de salida son iguales. La máxima incertidumbre de la distancia medida con el método de modulación por amplitud es solo la mitad de la longitud de onda. Si las distancias son muy grandes para ser medidas, varias frecuencias de modulación deben ser usadas. Con altas frecuencias de modulación una alta resolución puede ser alcanzada, pero el rango de medición es corto. También una alta precisión puede ser alcanzada con un promedio largo de veces. Por ejemplo, un *rangefinder* de láser comercial modulado por amplitud usa tres frecuencias de modulación [3]. La precisión alcanzada fue ± 6 mm con un tiempo promedio de 9 segundos y una distancia de 1 km medido para un ángulo prisma como objetivo. En distancias cortas (0-7 m) y una pequeña potencia en la salida del láser (2 mW) una precisión de 3 mm fue logrado con 10 de nuestro tiempo promedio una precisión de ± 0.08 mm en 60 m, el rango de distancia fue logrado cuando se utilizó un retro reflector como el obstáculo.

En el método TOF tanto los métodos de detección coherente o directos pueden ser usados en el receptor. En la detección directa la señal de potencia de el detector es medido como una función del tiempo. Una ventaja de la detección coherente es la capacidad para medir no solo la distancia, la información de la fase es preservada en el receptor y la velocidad puede ser calculada desde la frecuencia *Doppler*. Los dos métodos alternativos en la detección coherente son los métodos heterodino y el homodinas. En el método heterodino la señal llega desde el obstáculo es resumido ópticamente con la señal de el oscilador local. El láser Oscilador Local (LO) debe ser temporalmente y localmente coherente con la señal de el láser transmisor en un orden para alcanzar el mejor radio Señal-Ruido (S/N) [3].

El fotodiodo del receptor opera como un filtro pasa bajas y los filtros fuera de la frecuencia óptica dejando la información del obstáculo en una frecuencia, igual a la diferencia de frecuencias (frecuencia intermedia) entre la señal recibida y las radiaciones LO. Un demodulador eléctrico es necesario para inducir la señal de frecuencia de el IF hacia la frecuencia de banda base original. La distancia del obstáculo es calculado sobre la base de la fase, amplitud o frecuencia de la señal IF (Frecuencia Intermedia) acorde al tipo de modulación seleccionado. Una mejor sensibilidad puede ser logrado con la detección coherente que con la detección directa, por que la potencia del oscilador local puede ser alta. En este caso la fuente del ruido dominante es el ruido del disparo de la señal. El oscilador local emitido puede ser realizado, por ejemplo, con un modulador acústico-óptico, el cual define la frecuencia intermedia. En el método homodinas, el

haz del láser esta dividido dentro de dos haces, uno de los cuales es el obstáculo haz y el otro opera como un oscilador local. En este caso la señal es transferida directamente a la banda base, hacia la señal de frecuencia original. Otras posibilidades para osciladores locales son utilizando un láser con dos frecuencias, en el cual la diferencia de las frecuencia de la luz de salida es lo suficientemente pequeña para amplificarla, por ejemplo uno de 1GHz, o la modulación de la corriente del láser transmisor. El principio de operación de un *rangefinder* tipo láser se basa en el uso del láser también como un receptor y la medida del efecto *selfmixing* en el láser. La precisión alcanzada fue 1.8 mm en una distancia de 3 m [3].

Algunos *rangefinders* basados en el método TOF disponibles comercialmente son presentados en la tabla 2.2 [3]. El principio de operación son pulsos y la modulación de la amplitud (onda sinusoidal). Todos los *rangefinders* en la tabla 2.2 utilizan un método de detección directa. Los métodos de pulsos son usados principalmente en distancias grandes y en aplicaciones en la cuales se necesita la medida de tiempos cortos.

Tabla 2.2. Rangefinders laser disponibles comercialmente utilizando laseres semiconductores [3]

NOMBRE	MODULACIÓN	MEDIDA (RANGO)	PRECISIÓN	MEDIDA (TIEMPO)
LaserTech Impulse 100LR	Pulso (900 nm)	0-575m	3 cm @ 50 m, obstáculo blanco	0.3-0.7 s
Riegl FG21-HA	Pulso (904 nm)	2-600 m	+/- 5 cm	0.1-1 s
Riegl LD90-3100VHS-FLP	Pulso	2-200 m (reflejo 80%)	+/- 2.5 cm	0.5 ms
LaserOptronix LDM500 MIL	Pulso	0-999 m	+/- 1 m	-
Leica DISTO pro	Onda senoidal	0.3-100m	+/- 3 mm	0.5-4 s
LaserOptronix PH30	Onda senoidal	0-30m	+/- 5 mm	-

2.5. Sensores para la navegación

Para poder navegar por cualquier tipo de entorno, los robots necesitan sensores que les permitan percibir el medio que los rodea. Al igual que los humanos tenemos diferentes sentidos, los robots se pueden equipar con gran variedad de sensores que hoy en día son capaces de medir estímulos muy variados: color, distancia, fuerza, presión, inclinación, etc.

Los sensores se pueden agrupar de diversas maneras. Una de las clasificaciones más habituales consiste en separarlos en propioceptivos y exteroceptivos [3].

Los del primer tipo sirven para observar el estado interno del robot, como la orientación de un brazo robótico, o el nivel de carga de las baterías. Los sensores exteroceptivos miden estímulos que se originan en el exterior del robot, como distancias a objetos, o la temperatura ambiente, y su función es proporcionar al robot una representación del entorno en el que se encuentra. Es importante tener un buen conocimiento del modo de funcionamiento de los sensores, ya que

de este modo se logrará aprovechar al máximo las prestaciones que ofrecen. A continuación se expondrán brevemente algunos de los sensores más empleados para la navegación.

2.5.1. sensores de visión

Los sensores de visión son muy importantes, debido a que proporcionan una enorme cantidad de información acerca del entorno, probablemente más que ningún otro tipo de sensor ([3]). Mediante la visión, se pueden realizar una gran cantidad de tareas diferentes, como por ejemplo, reconocer patrones, detectar movimiento, estimar la posición, extraer características, etc. En las máquinas, los sensores de visión tratan de emular a la vista humana por medio de sensores que sean capaces de detectar la luz del mismo modo que nosotros la detectamos. Actualmente existen dos tecnologías diferentes para construir sensores de visión: CCD y CMOS, siendo ambas más limitadas que la visión humana [3].

Los CCD (*Charge-Coupled Devices*) están formados por una matriz de varios millones de diminutas células fotoeléctricas sensibles a la luz denominadas píxels (picture elements). Cada píxel se puede entender como un condensador sensible a la luz, con un tamaño de entre 5 y 25 μm . Para medir la luz, en primer lugar los condensadores se cargan y después comienza el periodo de integración. Cuando los fotones de la luz llegan a cada píxel, liberan electrones, que son capturados y retenidos por campos eléctricos. A medida que pasa el tiempo, cada píxel acumula un nivel de carga, basado en el número total de fotones que ha almacenado. Una vez terminada la acumulación de fotones, se procede a leer la carga de cada píxel. Este proceso se efectúa en una esquina del chip CCD. Los píxeles de la fila inferior se transportan hasta la esquina y se leen, y a continuación las células de la fila superior se transportan hasta la fila inferior y se repite el proceso. Este proceso es muy complejo, y es crucial que las cargas sean transportadas correctamente a través del *chip* [3].

Los sensores de visión CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), al igual que los CCD, también están compuestos por una matriz de píxels, con la diferencia de que al lado de cada píxel se encuentran varios transistores específicos para ese píxel. Los píxels acumulan carga durante el periodo de integración, como en los CCD, pero a la hora de leer los valores de cada píxel, no hace falta leerlos por filas, sino que se pueden leer todos de una sola vez, gracias a los transistores colocados en cada píxel. Una de las ventajas de los CMOS respecto a los CCD, es que tiene un menor consumo de energía, y su coste es menor. Ambos sensores proporcionan varios millones de datos, y tanta información es lenta de procesar. Además, extraer características visuales para la navegación no es una tarea fácil, más aún si en lugar de una cámara de visión se utilizan dos (visión estéreo), para emular la visión humana [3]. A pesar de que la visión por computador lleva estudiándose desde hace décadas, existen pocos algoritmos robustos. Los métodos existentes suelen funcionar muy bien bajo determinadas circunstancias, pero si por ejemplo se modifica la iluminación o la textura del fondo, su rendimiento disminuye.

2.5.2. Sónar

El vocablo sónar es el acrónimo de “*SOund Navigation And Ranging*”, o “navegación y localización por sonido”, en español. Los sensores de tipo sónar son los más empleados habitualmente en robots móviles de interiores [3]. La razón de su popularidad es que son muy fáciles de obten-

er, tienen un coste muy bajo, son muy sencillos de controlar, y además existen artículos de investigación en los que se hace uso de este tipo de sensor, con lo cual se dispone de algoritmos de control que están al alcance de la mano [3]. Debido a su bajo precio, es común combinar de estos dispositivos para equipar una plataforma robótica con cinturón de sónares, cubriendo 360°. El principio de funcionamiento del sónar es utilizar energía acústica para efectuar medidas de distancia. Un dispositivo emisor envía un paquete de ondas de presión ultrasónicas, y posteriormente se registra el tiempo que tardan las ondas en reflejarse y volver a un receptor. El tiempo de ida y vuelta se denomina tiempo de vuelo (*time of flight*). La distancia (d) al objeto que causó la reflexión se puede calcular basándose en la velocidad de propagación del sonido (c), y el tiempo de vuelo (t):

$$d = \frac{ct}{2} \quad (2.1)$$

La velocidad del sonido en el aire (c) viene dada por:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.2)$$

donde γ es el coeficiente adiabático, R es la constante universal de los gases, y T es la temperatura absoluta en grados Kelvin. En el aire, en condiciones normales de presión y temperatura, la velocidad del sonido es aproximadamente $c = 343$ m/s. La Fig. 2.1 muestra el funcionamiento de envío y recepción de señales de un sensor ultrasónico [3]. Primero, se emiten una serie de pulsos de sonido, conocidos como paquete de ondas. Cuando la transmisión de ondas termina, un integrador comienza a incrementar su valor, con el objeto de medir el tiempo desde la transmisión de las ondas hasta la detección de un eco. En el receptor se establece un valor umbral, que en caso de ser superado al recibir una onda de sonido, se considera que la onda es un eco de entrada válido. Normalmente en el sónar, el emisor y el receptor son el mismo dispositivo, pero no al mismo tiempo. La transformación de uno en otro no puede ser instantánea, porque la membrana electrostática que se usa para emitir los pulsos ultrasónicos no puede usarse como receptor hasta que no haya dejado de vibrar por completo. El tiempo que tarda en detenerse la membrana se denomina *blanking time* (tiempo de borrado). Debido a esto, durante la transmisión del pulso de sonido y durante el tiempo de borrado, el umbral se fija con un valor más alto de lo normal para eliminar la posibilidad de que el receptor detecte las vibraciones de la onda emitida. Una vez pasado el tiempo de borrado, si se recibe una onda que supere el umbral, el sónar producirá una señal digital y calculará la distancia utilizando el valor del integrador [3].

Uno de los inconvenientes del sónar es que la propagación de la energía acústica se ve afectada por varios factores, como puede ser la reflectividad acústica de los materiales del entorno. Algunos materiales pueden no reflejar la onda con la intensidad necesaria para ser detectada por el sónar. Por ejemplo, la espuma y las prendas de piel, pueden absorber las ondas de sonido. Otro problema, que se produce cuando se tiene un robot móvil con sónares cubriendo los 360°, son las interferencias, representadas en la Fig. 2.2. Las interferencias directas se dan cuando el sónar " x " emite un pulso de sonido y al reflejarse directamente en una pared u otro objeto, lo recibe el sónar " x ", junto con los sónares " y ", adyacentes. Las interferencias indirectas se dan cuando el sónar " x " envía un pulso de sonido y mediante una serie de reflexiones, lo reciben los sónares " y ", pero no el " x ". Para eliminar las interferencias hay que evitar utilizar todos los sónares simultáneamente.

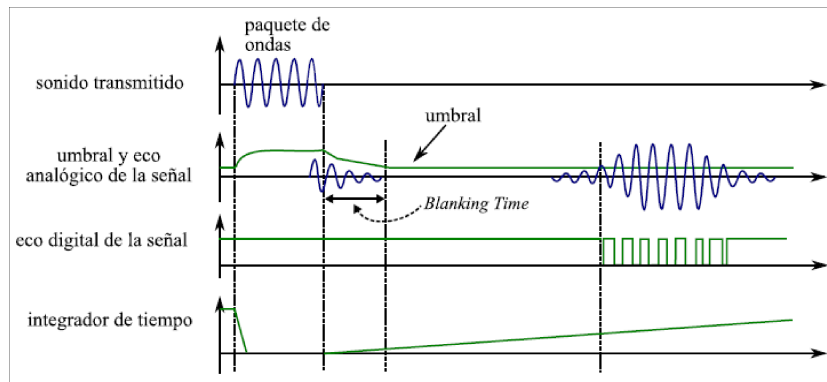


Figura 2.1: Emisión y recepción de señales en un sensor ultrasónico [3]

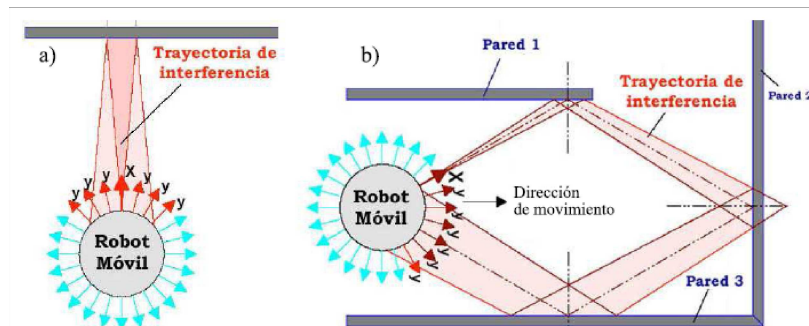


Figura 2.2: Interferencias en el sónar: a) directa. b) indirecta. [3]

2.5.3. Escáner láser de medición de distancias

La palabra LASER responde a las siglas *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz mediante la emisión inducida de radiación). Al igual que el sónar, utiliza el principio de tiempo de vuelo para medir distancias (ecuación. 2.1). Entre sónar y láser existe una diferencia fundamental: la velocidad de propagación. Para el sonido es 0,3 m/ms, mientras que para las señales electromagnéticas es 0,3 m/ns, es decir, 1 millón de veces más rápido. Por ejemplo, en una distancia de 3 m, un sónar tardaría 10 ms, mientras que un láser mediría la distancia en 10 ns. Es evidente que para medir el tiempo de vuelo de señales electromagnéticas se necesita una tecnología más avanzada que para medir el tiempo de vuelo de un sónar. Esto explica que el precio de un láser sea mucho más elevado que el de un sónar. En general, se pueden citar como ventajas de los sensores láser las siguientes [3]:

- En la mayoría de los casos, las medidas pueden ser consideradas como instantáneas. Esto significa que no hace falta tener en cuenta si el robot se desplaza mientras se efectúa la medición, debido a que la velocidad de movimiento del robot es despreciable en compara-

ción con la velocidad de la luz. El sónar, por el contrario, puede requerir compensaciones de movimiento del robot para que la medida de distancia sea más exacta.

- La precisión de un láser es mucho mayor que la de un sónar. Por ejemplo, existen modelos que tienen una desviación estándar de error en la medida de tan sólo 1 mm, la distancia máxima que pueden medir es de 80 m, y la resolución angular es de 0.25° .
- Los datos de un escáner láser pueden interpretarse directamente, puesto que representan distancias a objetos. Esto también se cumple para un sónar, pero no para los sensores de visión, cuyas imágenes son mucho más difíciles de analizar.
- Con respecto a los sensores de visión, el tiempo de procesamiento de los datos de un láser es mucho menor. Una imagen de una cámara de visión está compuesta por millones de píxeles, mientras que en un barrido completo, un láser obtiene del orden de 300 medidas de distancia.

Como principales desventajas se pueden contar su elevado precio y el hecho de que algunos materiales como el cristal son invisibles al sensor, debido a que los pulsos de luz lo atraviesan. Otro inconveniente es que normalmente los datos de un láser se limitan a un plano, si bien esto se puede solventar colocando el sensor en un dispositivo *pan and tilt* [5], de modo que se puedan obtener datos en 3D balanceando y girando el láser en diferentes planos.

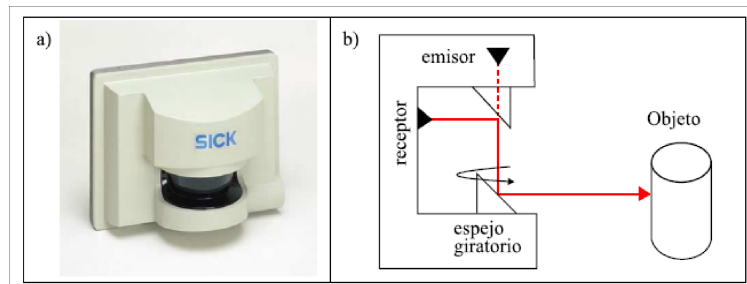


Figura 2.3: a) Escáner láser lms 221 de sick. b) Sistema de funcionamiento interno [3]

Debido a sus ventajas con respecto al resto de sensores, el uso de escáneres láser de medición de distancia está muy difundido últimamente y es un campo muy activo de investigación hoy en día. El escáner láser SICK LMS *Laser Measurement System* (sistema de medición basado en láser) 221 (Fig. 2.3a) [3]. Es un modelo que escanea su entorno en un plano 2D y está especialmente diseñado para poder trabajar tanto en ambientes interiores, como en ambientes exteriores con condiciones extremas (lluvia, nieve, niebla, frío). El LMS 221 basa su funcionamiento en la medida del tiempo de vuelo. Como se muestra en la Fig. 2.3b, para determinar la distancia a la que se encuentra un objeto, el láser emite un pulso de luz infrarroja. Cuando el pulso incide sobre el objeto más cercano, regresa hacia el sensor y se determina el tiempo transcurrido. Conocido

el tiempo de ida y vuelta del pulso (tiempo de vuelo), se calcula fácilmente la distancia al objeto detectado. De este modo se puede medir la distancia en una sola dirección, pero gracias a que dispone internamente de un espejo rotatorio, se logra un efecto de barrido en dos dimensiones. La amplitud del barrido en este modelo es siempre de 180° , como se ilustra en la Fig. 2.4a. En esta Figura también se puede observar que si los pulsos emitidos no indican sobre ningún objeto cercano, el láser devuelve la distancia máxima, dando lugar a un conjunto de medidas que forman un semicírculo. Al conjunto de medidas que obtiene el láser se le denomina barrido láser.

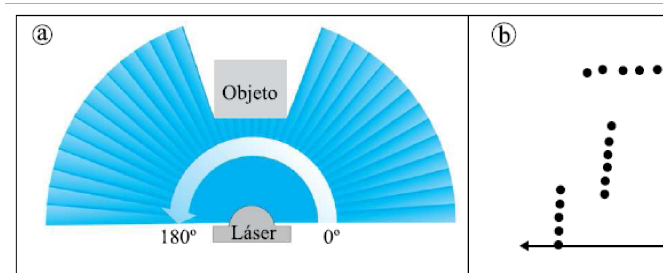


Figura 2.4: a) Amplitud de barrido del sick lms 221. b) Ejemplo de barrido láser [3]

El láser proporciona los datos en formato polar, $R = \{(\rho_i, \varphi_i) | i = 1, \dots, n\}$ (Fig. 2.4b), donde n puede valer 181 ó 361, y (ρ_i, φ_i) son las coordenadas del i -ésimo punto detectado por el sensor. El término ρ_i indica la distancia al obstáculo detectado al emitir el pulso de luz con orientación φ_i . Los puntos son adquiridos secuencialmente por el escáner, en sentido antihorario, y con una resolución angular $\rho_{i+1}, \rho_i = \varphi$ que puede valer 0.5° ó 1° . El modelo LMS 221 permite configurar los siguientes parámetros:

- Resolución angular del barrido: 1° , 0.5° ó 0.25° . Dependiendo de la selección, la amplitud de barrido y el número de mediciones realizadas es variable. (Tabla 2.3)

Tabla 2.3. Resolución angular

Resolución angular	0.25°	0.5°	1°
Amplitud de barrido	100°	180°	180°
Número de mediciones	401	361	181

- Tasa de transmisión de datos: 9.6 ,19.2 , 38.4 ó 500 Kbaudios. Los datos obtenidos se transmiten a un PC a través del puerto serie utilizando el estándar RS-232 o el RS-422.
- Máxima distancia de detección de objetos: hasta 8 m, o hasta 80 m. Dependiendo de una u otra selección, la desviación estándar del error en la medida es de 5 mm ó 10 mm, respectivamente.

En la tabla 2.4 se resumen las características técnicas del *SICK LMS 221* [3]. La configuración más habitual del láser con respecto a la resolución angular es 0.5° , debido a que ofrece mayor número de datos que con una resolución de 1° . Además el barrido para 0.5° ó 1° , es más rápido que para 0.25° , dado que para lograr esta resolución se necesita unir dos barridos: uno de 0° a 180° y otro de 0.5° a 179.5° , ambos con una resolución angular de $0,5^\circ$.

Tabla 2.4. Datos técnicos del láser

Amplitud de barrido	180°
Resolución angular	de 0.25° a 1°
Tiempo de respuesta	de 13 a 52 ms
Resolución	10 mm
Alcance del láser	80 m
Interfaz de datos	RS-422 o RS-232
Velocidad de transmisión de datos	9.6, 19.2, 38.4 ó 500 Kbaudios
Longitud de onda	Infrarrojo ($\lambda=905$ nm)
Suministro de voltaje	24 V DC
Consumo de potencia	20 W
Peso	9 kg
Dimensiones	196 x 352 x 266 mm

con esta resolución, el tiempo de respuesta es de 26,6 ms y por tanto la tasa de muestreo máxima es de 37 Hz, aproximadamente.

2.5.4. Extracción de características mediante láser

En la parte superior de la Fig. 2.5 se muestra una fotografía de una sala, y sobre ella se ha dibujado una línea punteada, correspondiente a una aproximación del plano en el que el láser ha efectuado las medidas. En la parte inferior de la misma Figura se muestra una gráfica del barrido láser realizado por el láser en dicha sala. Observando con detenimiento la Figura, hay dos tipos de características que es especialmente importante poder detectar en el barrido láser [6] los puntos de ruptura y los segmentos. Los primeros indican discontinuidades en el proceso de escaneado, y se producen normalmente debido a la existencia de objetos o superficies que obstaculizan la detección de otros elementos más lejanos. La detección de puntos de ruptura permite clasificar los puntos en grupos denominados clusters. Por otra parte, los segmentos están formados por conjuntos de puntos consecutivos que forman entre sí una línea recta. Estos segmentos son el resultado de escanear superficies planas en el entorno, como armarios, mesas o paredes. En la Fig. 2.5 se indica un ejemplo de punto de ruptura, y además se pueden observar

varios segmentos rectilíneos. Dentro de la variedad de características detectables por un láser, este trabajo se centra en algoritmos de clustering y de extracción de líneas.

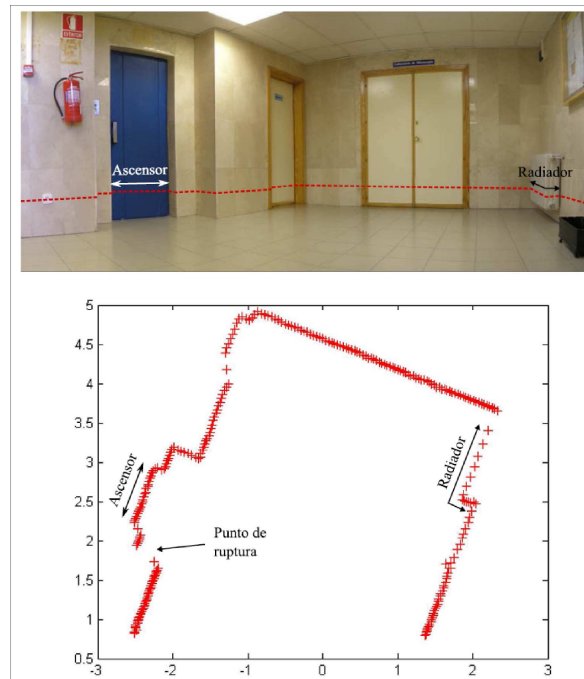


Figura 2.5: Fotografía de un escenario real junto con su correspondiente barrido láser [3]

2.6. Configuración Robots móviles

La mayoría de los robots móviles poseen características particulares que los hacen aptos para una determinada tarea [7]. Es la tarea misma la que determina en una primera etapa las particularidades estructurales del robot que van desde el tipo de rueda, el sistema de tracción y dirección y la forma física del robot. En una segunda etapa la tarea determinará las características sensoriales del robot.

En general los robots móviles distribuyen sus sistemas de tracción y dirección sobre los ejes de sus ruedas de acuerdo a las exigencias de velocidad, maniobrabilidad y características del terreno. La precisión y rapidez con que el robot móvil debe alcanzar su destino, implica tener un sistema de tracción confiable y un sistema de dirección que dé maniobrabilidad al robot. Esta confiabilidad y maniobrabilidad que debe tener el robot móvil, determinan las características del sistema de tracción y dirección, no sólo en lo que respecta a la técnica, sino también al número de ruedas necesarias y al tipo y disposición de éstas para lograr una estructura mecánica estable.

Según el área de trabajo el entorno del robot puede ser interior o exterior. Es interior cuando el área de trabajo está claramente definida por paredes y cielorrasos. Además la iluminación es

principalmente artificial. Por el contrario es exterior cuando el área de trabajo no está claramente delimitada y el tipo de iluminación es principalmente natural. Ejemplos clásicos de entornos interiores y exteriores son los grandes edificios públicos y los parques o bosques respectivamente. Según los objetos presentes el entorno del robot puede ser estructurado o no estructurado. Es estructurado cuando los objetos presentes en el entorno son estáticos (no cambian de forma ni de posición) y poseen características físicas particulares (forma, color, etc.) que permiten asociarlos con Figuras geométricas conocidas como prismas o cilindros o permiten distinguir unos objetos de otros (puertas abiertas, mesas de trabajo, etc.). En el otro sentido el entorno es no estructurado cuando la asociación entre los objetos del entorno y determinadas características físicas no es viable, cuando el entorno es dinámico (que cambia con el transcurrir del tiempo) y estos cambios, además, pueden ser impredecible.

2.6.1. Tipos de ruedas

Entre los robots terrestres con ruedas su movilidad está caracterizada por dos factores: el tipo de ruedas que poseen y su disposición sobre una estructura mecánica [7]. Se asume que, durante el movimiento el plano de la rueda se mantiene vertical y que las ruedas rotan alrededor de su eje (horizontal), que tiene una orientación con respecto a la estructura que puede ser fija o variable. Se distinguen entre dos clases básicas de ruedas: la rueda convencional y la rueda sueca (*swedish wheel*) [7]. En ambos casos, se supone que el contacto entre la rueda y el terreno se reduce a un único punto del plano. Para una rueda convencional el contacto entre la rueda y el terreno se supone que satisface la rotación pura sin resbalamiento. Esto significa que la velocidad del punto de contacto es igual a cero (tanto la componente paralela como la componente perpendicular al plano de la rueda). A su vez entre las ruedas convencionales se distinguen tres tipos: Rueda fija: El eje de la rueda está fijo a la estructura del robot (Fig. 2.6a). En general está asociada al sistema de tracción del robot.

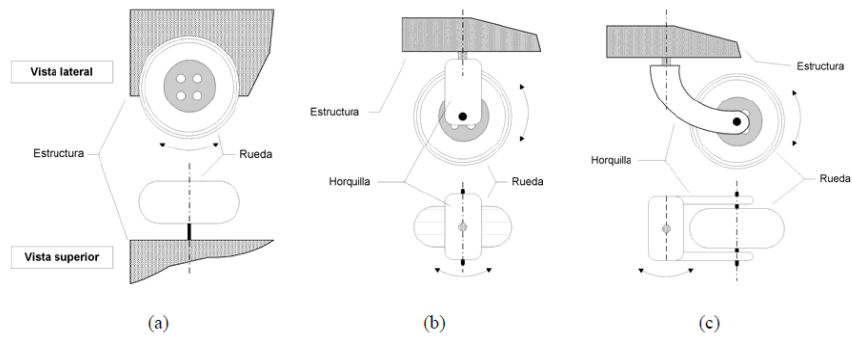


Figura 2.6: (a) Rueda fija, (b) Rueda orientable centrada, (c) Rueda loca [7]

Rueda orientable centrada: Es aquella en la que el movimiento del plano de la rueda con respecto a la estructura es una rotación alrededor de un eje vertical que pasa a través del centro de la rueda (Fig. 2.6b). Suele cumplir funciones como rueda de dirección o como rueda de tracción-dirección. Rueda orientable no-centrada (rueda loca): También conocida como rueda

castor (*castor wheel*) es una rueda orientable con respecto a la estructura, tal que la rotación del plano de la rueda es alrededor de un eje vertical el cual no pasa a través del centro de la rueda (Fig. 2.6c). Su principal función es la de dar estabilidad a la estructura mecánica del robot como rueda de dirección. Para una rueda sueca, solo una componente de la velocidad del punto de contacto de la rueda con el terreno se supone igual a cero a lo largo del movimiento (Fig. 2.7). Esto le permite, gracias a los rodamientos montados en la superficie de la rueda, desplazarse en dirección perpendicular al plano de la rueda.

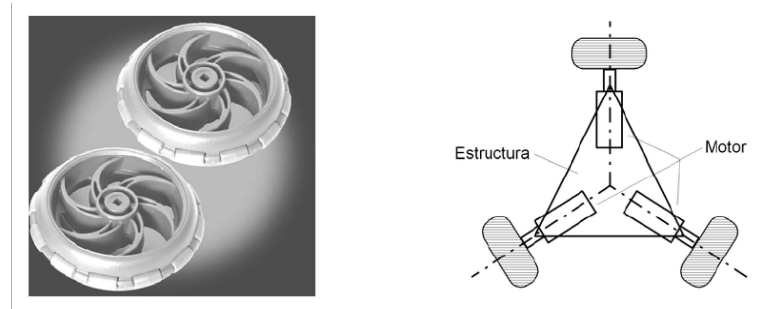


Figura 2.7: Rueda sueca y su distribución sobre una estructura mecánica [7]

2.6.2. Distribución de las ruedas

La combinación de los diversos tipos de ruedas lleva a tener una gran variedad de robots móviles que se diferencian por su grado de maniobrabilidad. A continuación se presentan brevemente las principales características de diseño de diversos tipos de robot móviles. Esta descripción no pretende ser exhaustiva, sin embargo se la ha limitado a ejemplos concretos de estructuras no singulares y no redundantes.

Robot omnidireccional

Estos robots tienen máxima maniobrabilidad en el plano; esto significa que ellos pueden moverse en cualquier dirección sin necesidad de reorientarse (Fig. 2.8 y Fig. 2.9) [7]. En contraste, los otros tipos de robots tienen una maniobrabilidad restringida. De acuerdo a la rotación de cada una de las ruedas el robot puede avanzar, girar o desplazarse lateralmente sin necesidad de reorientarse.

En la Fig. 2.9 se presenta otra versión de robot omnidireccional con ruedas orientables centradas. En este caso el robot puede cambiar la dirección de su movimiento simplemente cambiando la orientación de las ruedas. Este movimiento sincronizado se puede lograr por medios mecánicos (Fig. 2.10a) empleando sistemas de tracción y dirección por correas o por medios electrónicos (Fig. 2.10b) mediante señales de accionamientos simultáneas a partir de la electrónica que comanda cada uno de los motores en las ruedas.

Las ventajas de un robot omnidireccional se ven desminuidas por la complejidad mecánica y/o electrónica necesarias para conservar una buena coordinación entre las ruedas y evitar derivas en la pose del robot.

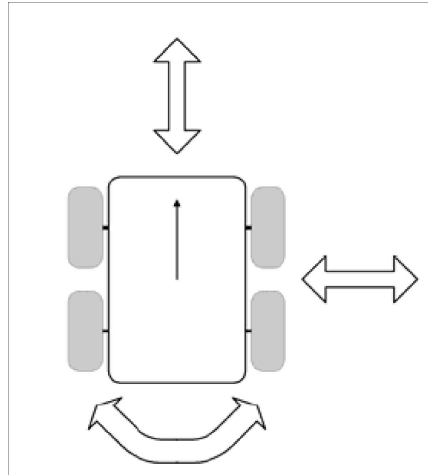


Figura 2.8: Maniobrabilidad de Robot omnidireccional con ruedas suecas [7]

Uniciclo

El robot tipo uniciclo es, en general, el elegido por los investigadores a la hora de probar nuevas estrategias de control por tener una cinemática sencilla [7]. Es una estructura que consta de dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda loca que le confiere estabilidad (Fig. 2.11).

El sistema de tracción-dirección asociado al robot le permite independizar las consignas de velocidad lineal y angular respectivamente. Las ventajas que se derivan de la estructura mecánica y de la electrónica de control hacen de esta configuración la preferida para robots de laboratorio.

Triciclo

El robot tipo triciclo está formado por dos ruedas convencionales fijas sobre un mismo eje y una rueda convencional centrada orientable que concentra las funciones de tracción-dirección (Fig. 2.12).

Al igual que en el caso anterior, la estructura mecánica y la electrónica de control son sencillas, su tratamiento cinemático resulta de interés en áreas específicas del control de robots móviles. En cuanto a aplicaciones industriales esta configuración es apta para el transporte de cargas pesadas a baja velocidad.

Cuatriciclo

Un problema asociado con la configuración tipo triciclo es que el centro de gravedad del vehículo se posiciona, en algunas ocasiones, en los límites de la superficie de equilibrio, definida por las tres ruedas, cuando el vehículo está en movimiento [7]. Esto produce una pérdida de tracción en el vehículo y es fuente de error a la hora de estimar la posición del robot. Una solución a este problema lo presenta el sistema de dirección *Ackerman*. Como se observa en la Fig. 2.13, los ejes de las dos ruedas frontales se interceptan en un punto C que pertenece al eje

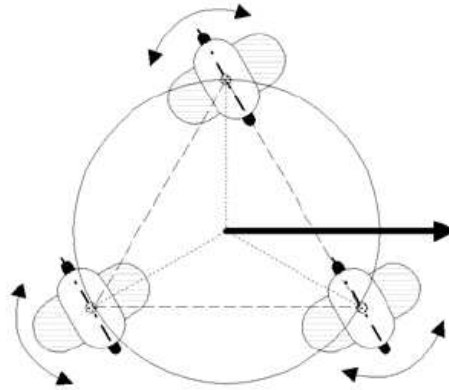


Figura 2.9: Robot omnidireccional con ruedas orientables centradas [7]

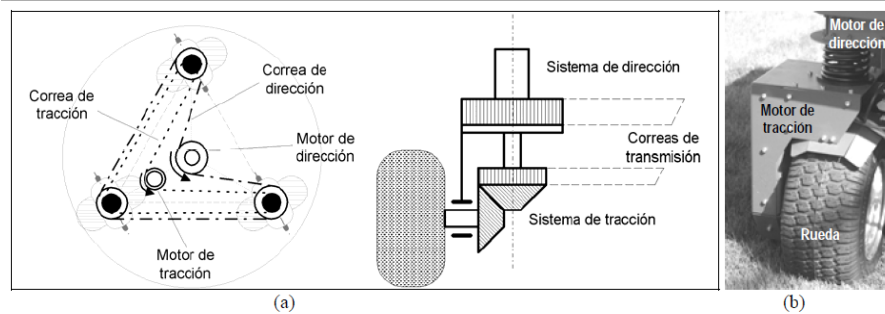


Figura 2.10: Sincronismo entre el sistema de tracción y dirección con ruedas omnidireccionales. (a) Mecánico, (b) Electrónico [7]

común de las ruedas traseras. El lugar de los puntos en el plano trazados por cada rueda, alrededor de este punto C , es un conjunto de arcos concéntricos donde todos los vectores velocidad instantánea son tangente a estos arcos. Esta estructura, además de brindar mayor estabilidad, evita el deslizamiento en la ruedas y por lo tanto reduce los errores de odometría.

Si bien su cinemática, su estructura mecánica y su electrónica de control no son tan sencillas esta configuración presenta un gran interés para los amantes de los robots todo terreno en donde los principales desarrollos se producen en la recolección de información sensorial y su posterior tratamiento para lograr reconstrucción de entornos o para el control en tiempo real.

2.6.3. Tracción y dirección

Otros de los aspectos a tener en cuenta en el diseño de un robot móvil es el sistema de tracción y dirección a emplear. El sistema de tracción y dirección no sólo está relacionado con la disposición de ruedas adoptada, sino que también lo está con los algoritmos de control local de los

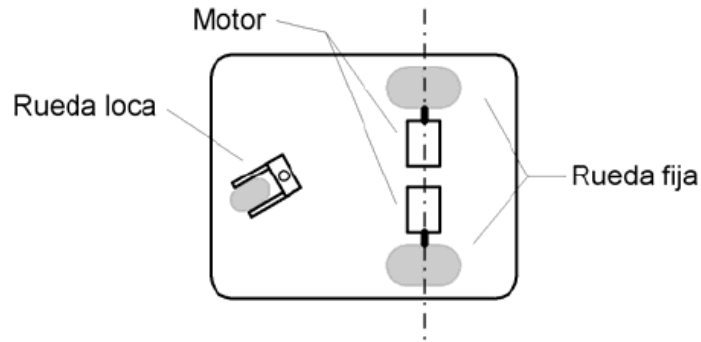


Figura 2.11: Estructura de un robot unicycle [7]

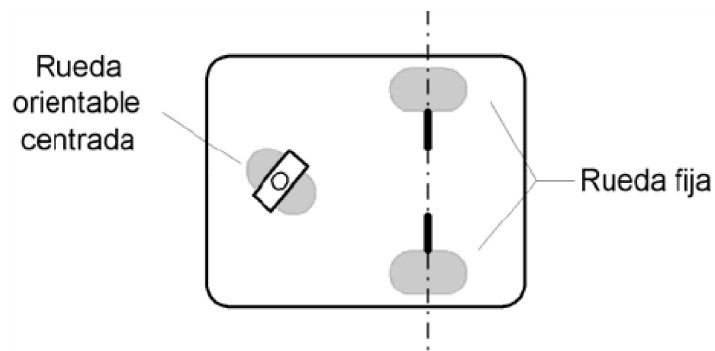


Figura 2.12: Estructura de un robot tricycle [7]

motores y la mecánica asociada a estos. A medida que se requiere, del robot, más confiabilidad (alta maniobrabilidad, máxima tracción en sus ruedas motorizadas, máxima adherencia de todas sus ruedas, etc.) la mecánica, electrónica e informática asociadas es más compleja.

Existen tres sistemas básicos a partir de los cuales se pueden obtener diversas configuraciones: Tracción y dirección en ejes independientes, Tracción y dirección en un mismo eje, Tracción y dirección sobre todos los ejes.

Tracción y dirección en ejes independientes

La tracción se efectúa en las ruedas traseras y el control de dirección en las ruedas delanteras o viceversa (Fig. 2.14). Si bien el control de dirección es más sencillo, la precisión en la dirección depende de la adherencia de las ruedas correspondientes; esto se debe básicamente a la masa despreciable de estas ruedas respecto al resto de la estructura. Además posee un radio de giro bastante elevado en relación a otros sistemas, por lo que en este tipo de modelos no se pueden lograr cambios de dirección muy cerrados.

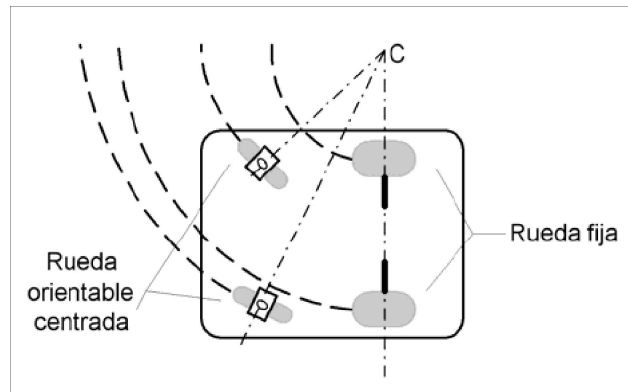


Figura 2.13: Sistema de dirección *Ackerman* [7]

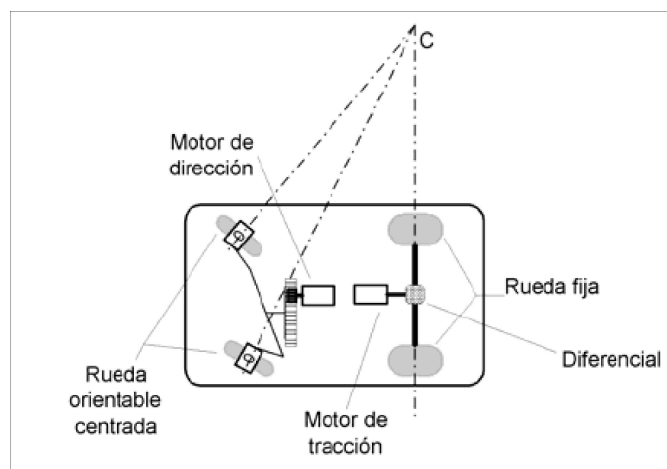


Figura 2.14: Sistema de tracción y dirección en ejes independientes [7]

Tracción y dirección en un mismo eje (Tracción diferencial)

Esto se logra con motores independientes en las ruedas de un mismo eje y ruedas "locas" en el resto de los ejes (Fig. 2.15). Este modelo es de construcción sencilla y permite radios de giro del orden del tamaño del vehículo [7]. La única desventaja que posee es que los motores deben ser de características idénticas, para que el control de estos sea simple.

Tracción y dirección sobre todos los ejes

En la Fig. 2.16 se muestra la estructura y un modelo de un robot con aplicaciones destinadas a terrenos hostiles, donde la velocidad de traslación es menos importante que una buena adherencia al terreno [7].

Esta configuración necesita de un sistema odométrico complejo debido a la incertidumbre

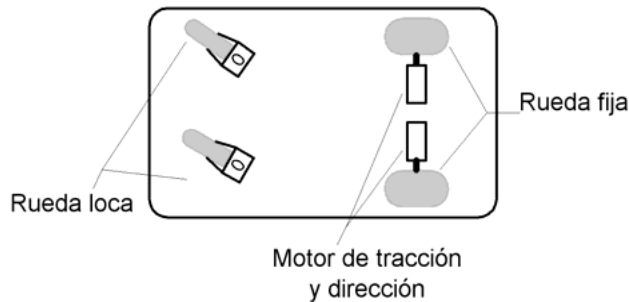


Figura 2.15: Sistema de tracción y dirección sobre un mismo eje [7].

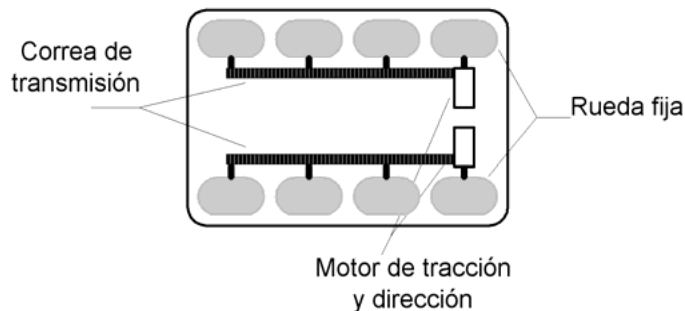


Figura 2.16: Sistema de tracción y dirección sobre todos los ejes [7]

en los radios de giro asociada a este sistema de tracción y dirección, aunque existen entre los robots omnidireccionales estructuras que presentan menor complejidad para resolver los errores por odometría.

2.7. Fototransistor

Existen muchas maneras de realizar la detección de objetos u obstáculos a distancia. La forma más simple es utilizando un Diodo Emisor de Luz (*LED*) y un fototransistor. El Infrarojo (*IR*) *LED* emite luz con una longitud de onda de aproximadamente 850 nanómetros. La luz llega a los obstáculos y es reflejada de regreso y es recogida por un fototransistor [11].

La medición en los cambios de voltaje es realizada en el punto que se muestra en la Fig. 2.17.

Este cambio de voltaje es proporcional a la intensidad de la luz recogida por parte del fototransistor. Un comparador o un CAD puede ser utilizado para realizar la conversión a formato digital y decidir si existe un obstáculo delante del robot móvil. Por ejemplo si el suministro de voltajes es 5V; un valor de 4.5V significa que el obstáculo está lejos y un valor de 1V significa que se encuentra cercano (en el fototransistor la corriente fluye y la caída de voltaje en la resistencia aumenta o crece conforme a la ley de Ohm, y la tensión en el punto de medición decrece). Este esquema tiene algunos inconvenientes importantes. El sol es uno de ellos, debido a que éste es

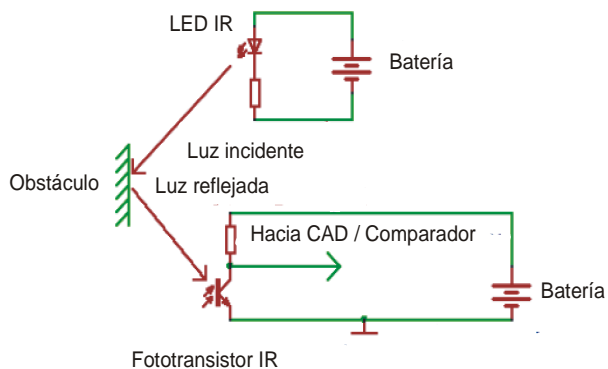


Figura 2.17: Esquema simple de un IR

una fuente de IR de gran alcance y puede entregarnos falsos resultados en la lectura, como se observa en la Fig. 2.18. También cualquier bombilla o fuente de luz emite IR en forma intensa, lo que nuevamente puede entregar falsos resultados en la lectura.

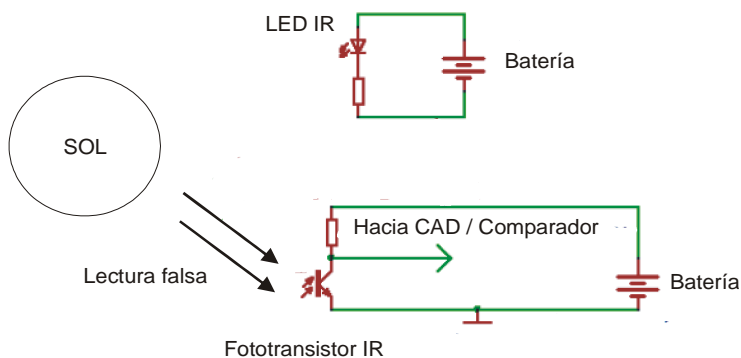


Figura 2.18: Incidencia de la luz del sol en el IR produce falsas lecturas

Existe una forma de cortar la luz del ambiente parcialmente. Esto es posible con un filtro de color y dejar que solo la luz del LED llegue al fototransistor. El filtro de color más simple es un pedazo de película de fotografía, expuesto a la luz fluorescente. La película puede verse o parecer en negro, pero está deja pasar la luz con una longitud de onda de 820-1050 nm. Sin embargo, incluso con esta mejora el esquema carece de estabilidad. Existe un mejor método para mejorar el diseño. Es posible modular la respuesta del IR-LED como se muestra en la Fig. 2.19.

El cual consiste en el encendido y apagado del LED. El transistor NPN es utilizado para no exigir demasiada corriente del microcontrolador (MCU); ya que está puede estar por encima de los 50 miliamperes durante el impulso. La intensidad de la luz será modulada y el voltaje en la salida del receptor también será modulada. Ahora el ruido del ambiente es una señal de Corriente Directa (DC), pero la señal del transmisor es de Corriente Alterna (AC). El capacitor es utilizado para bloquear la señal de DC y únicamente obtener el voltaje proporcional en AC

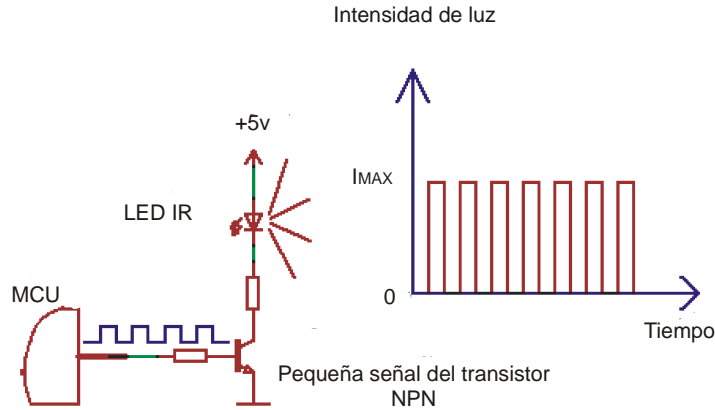


Figura 2.19: Modulación de la intensidad de la luz utilizando transistores NPN

[11].

Posteriormente la señal es amplificada y rectificadora adecuandola para el reconocimiento del MCU. Ver Fig. 2.20.

de esta forma la luz ambiental que no cambia puede ser rechazada. Existen algunas aspectos importantes a considerar con respecto al desempeño del fototransistor en su implementación. Estas consideraciones se mencionan acontinuación.

2.7.1. Rechazo de la luz del ambiente

El fotodetector debe tener algún mecanismo para hacer caso omiso de la iluminación del ambiente. La iluminación interfiere en dos formas: una componente de frecuencia cero (*DC*) debido a fuentes como la luz del sol, y una componente en 120Hz debido al alumbrado de corriente alterna, en las fuentes de iluminación artificial, como las lámparas incandescentes. Estas fuentes pueden ser tratados como el ruido que empeora la relación Señal / Ruido (S/N) en el detector. El detector de objetos se supone que tiene una fuente local de la iluminación, por lo general de color rojo de alta intensidad *LED* o infared *LED*. Así, el (S/N) en el detector, que debe ser lo más grande posible, depende de la relación entre el total de iluminación en el detector, contra la componente generada por la fuente local [12].

Métodos ópticos

Dos medidas ópticas pueden ser aplicadas para mejorar la relación señal-ruido.

- *Restricted Beamwidth*: Si el ancho del haz del detector es restringido, entonces es posible mejorar el (S/N). Para ello es necesario que el detector sea capaz de ver la iluminación generada por la fuente local. El ancho del haz se puede disminuir mediante el uso de una lente con una apertura más grande que el detector o restringiendo el campo de visión del detector con un tubo o un alfiler (un diafragma de apertura). Puesto que una lente recoge la luz sobre una mayor área, generará una señal más grande en el detector. Sin embargo,

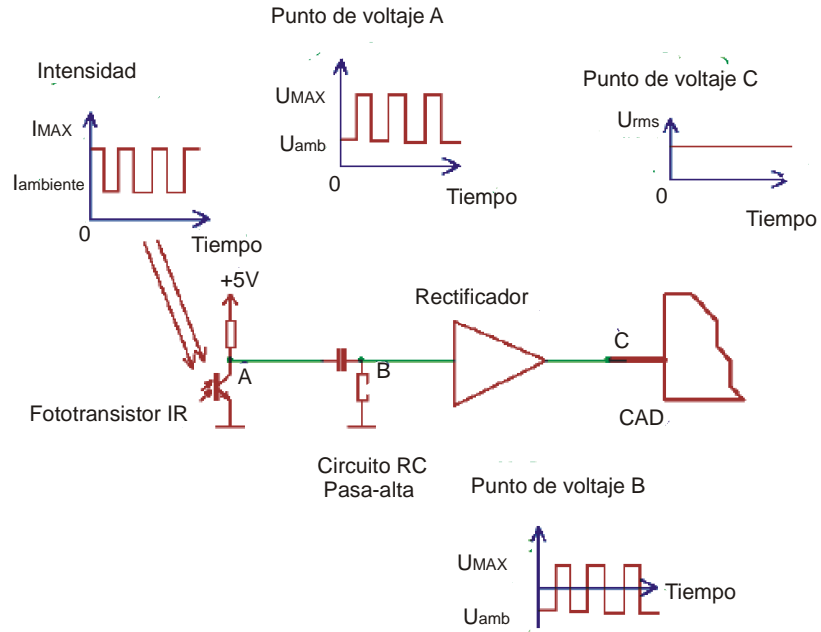


Figura 2.20: Esquema aumentado en el comportamiento del IR

aunque la señal sea la adecuada pero el (S/N) es pobre, un diafragma de apertura será suficiente. Dicho de otra manera, una lente aumenta la sensibilidad de detección ya que recoge más energía. Un diafragma de apertura mejorará la relación señal-ruido, pero no aumentará la sensibilidad del detector. El diafragma de apertura trabajará donde hay una señal fuerte, pero pobre (S/N). La lente funcionará cuando la señal es débil.

- *Colour Filtering*: Un filtro de banda estrecha de color restringe el ancho de banda de la luz que entra en el detector a la de la fuente local. Al rechazar la luz ambiente que no está en la misma onda que la fuente local, mejora el (S/N). Un examen exhaustivo de captación en contraste mediante el filtrado es posible analizar en [13].

Frecuencia cero de la luz ambiente

Se supone que el detector de objetos tiene una fuente local de iluminación, por lo general de color rojo de alta intensidad *LED* o *infrared LED*. Hay dos métodos para rechazar la frecuencia cero (estado estacionario), componente de la iluminación de fondo.

- *Subtraction of Background*: El método más simple de rechazar la componente de frecuencia cero de la iluminación ambiental, es tomar una lectura del nivel background con el *LED* de iluminación apagado, y luego restar esto desde una lectura con el *LED* de iluminación encendido. Si hay un objeto en el campo de visión, la segunda lectura será más grande. El valor de diferencia es proporcional a la reflectividad y la distancia del obstáculo. Este método es más fácil de realizar con un microprocesador que detecta el nivel de detección

a través de un convertidor (A/D). Esto también se puede hacer con circuitería analógica con dos circuitos sample-hold que salvan o resguarda las dos lecturas de los capacitores de almacenamiento. Los voltajes de los condensadores se sustraen para obtener la diferencia de la lectura. El método sólo funciona cuando la luz debido a la luminosa del *LED* excede el nivel de fondo. Obviamente, esto también funciona mejor si el campo de visión del detector coincide con el del *LED* iluminador.

- *High Frequency Switching*: Si el *LED* está encendido iluminando a cierta frecuencia, la señal detectada puede ser *AC*, acoplado para quitar el componente de frecuencia cero de la iluminación ambiental siempre y cuando la iluminación del ambiente no sea tan fuerte como para saturar el detector. Este requisito suele dar lugar a un compromiso entre la sensibilidad del detector y la inmunidad a la luz ambiental.

120HZ luz ambiental

Cuando la fuente de luz se acciona desde la línea de 60 Hz, habrá un fuerte componente de iluminación a 120Hz. Este componente puede ser removido por una media de un ciclo completo de corriente alterna o por un filtro de paso alto.

- *Averaging Over One Cycle*: El valor promedio de una forma de onda *AC* es cero. En consecuencia, si la lectura de una serie de detectores se toman más de un ciclo completo y se promedia, el resultado es el promedio o componente de CD de la onda. De hecho, dos lecturas serán suficientes si se toman $\frac{T_{120}}{2}$ en segundos de diferencia, donde T_{120} es el período de una forma de onda de 120 Hz (8,3 milisegundos). Esto es más fácil hacerlo con un microprocesador. En consecuencia, si se estuviera usando el método de la resta para detectar la presencia de un reflejo, una buena estrategia sería:

1. tomar lecturas de 8.3 milisegundos de separación, con la fuente local desactivado. Esto le da la componente de CD de la luz ambiental.
2. tomar lecturas de 8.3 milisegundos de separación, con la fuente local encendido. Esto le da la componente de CD de la luz ambiental más la fuente de iluminación local.

- *High Pass Filtering*: Si la fuente local esta conectada a una cierta frecuencia f_s , como 2400Hz, entonces puede ser separado de la componente de 120 Hz por un filtro f_n pasa altas. En la práctica, el componente de 120 Hz de *AC* puede ser mucho mayor que la señal deseada, de manera muy notable (es decir, de múltiples polos) resultando necesario el filtrado.

Por ejemplo se ha determinado la existencia de 80 milivolts de ruido de *AC* a 120Hz en la presencia de 10 milivolts de la señal en f_s . Es posible ampliar la componente en f_c , lo que significa que la componente de *AC* en f_n , deberá ser sustancialmente atenuada. En este caso si la componente de ruido se reduce a la misma amplitud de la señal, el ruido sería atenuado por un factor de 8 o 18 dB. Un filtro de dos polos tiene una atenuación de 20 dB por década. Por lo que un filtro pasa altas de dos polos *Sallen-Key* con una frecuencia de corte f_c de 1200Hz funcionaría [14].

La respuesta del filtro pasa altas se ha reducido a 3dB en la frecuencia de corte y el cambio de fase es de más de 45 grados (es decir, la señal de salida conduce la entrada de 45 grados), por lo que es conveniente tener la frecuencia f_s de la señal en el doble de la frecuencia de corte del filtro, donde la atenuación y el cambio de fase es mucho menor. Alternativamente uno o más filtros pasa banda, centrado en la frecuencia de la señal, se puede utilizar [15].

2.7.2. Corrección de la línea de base

Un circuito de corrección de la línea de base es un circuito de retroalimentación que mantiene la salida de la etapa del sensor en algún valor promedio. Esto se hace mediante la adición o sustracción de la corriente del sensor, a una frecuencia que no tiene ningún efecto en la frecuencia de la señal [12].

El circuito de amplificación transimpedancia del sensor de base se muestra en la Fig. 2.21 [19].

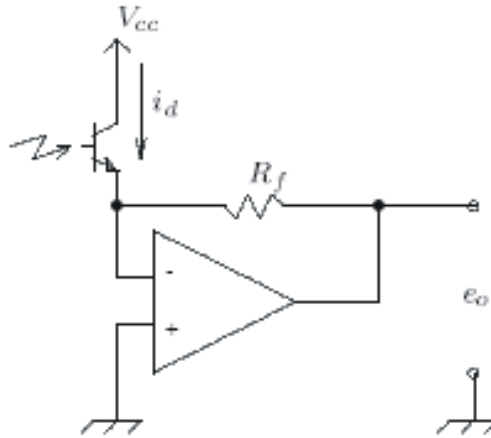


Figura 2.21: Amplificador transimpedancia

La salida de este amplificador es simplemente

$$e_0 = -i_d R_f \quad (2.3)$$

donde i_d es el detector de corriente inducida por la iluminación del fototransistor. Es importante analizar que el voltaje del emisor del fototransistor es un punto de tierra virtual, por lo que el amplificador operacional se mantiene cerca del valor de cero volts. El voltaje del colector en el transistor es V_{cc} . Por lo que el voltaje en el transistor es fijo, lo que le permite cambiar rápidamente. El valor de la resistencia R_f de retroalimentación tiene una cierta condición para un buen desempeño del circuito. Por un lado, debe hacerse lo más grande posible, para hacer que la etapa de salida del sensor sea lo más grande posible. Sin embargo, si hay un alto nivel de luz ambiental, esto impulsará un exceso de corriente a través del fototransistor, lo que llevará

a la salida del amplificador operacional a su valor limite inferior. Un valor más pequeño de R_f reduce la probabilidad de que esto ocurra. El circuito de corrección de la línea de base se muestra en la Fig. 2.22. Un integrador de respuesta lenta se conecta a la salida del amplificador transimpedancia de manera que genere una señal proporcional al valor promedio de la salida. Si la salida e_0 no es cero, el integrador impulsará una corriente en la unión sumandola para obtener e_0 nuevamente a cero volts.

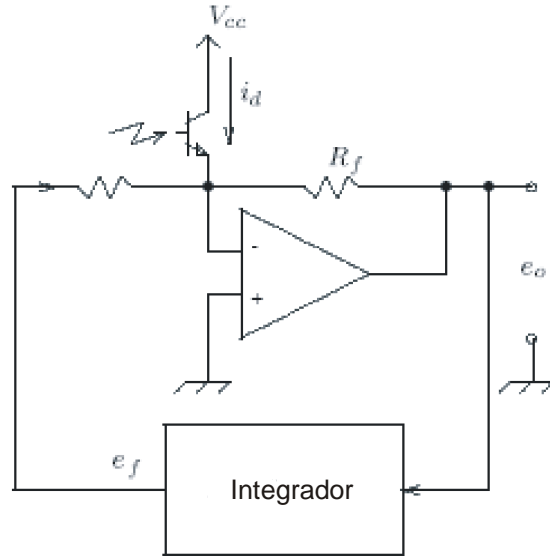


Figura 2.22: Circuito corrector de la línea de base

Por ejemplo si existen cambios de nivel en la luz ambiental , entonces el valor de e_0 será negativo. El integrador de salida e_f gradualmente dibuja una rampa negativa más la corriente en la salida de la unión se sumará hasta que regrese e_0 al valor de cero volts nuevamente. Teniendo en cuenta que el integrador responde con lentitud, pasa por alto las señales de alta frecuencia, tales como la señal luminosa conectada que aparece en la salida previamente. Por lo tanto el componente constante de la iluminación se quita de la señal, pero la componente de alta frecuencia se mantiene [12].

Un circuito más completo se muestra en la Fig. 2.23.

Un análisis de este circuito muestra que la función de transferencia es

$$\frac{e_0}{i_d} = -\frac{sR_c}{1 + s\frac{R}{R_f}C} \quad (2.4)$$

donde $R = R_2R_3$ y $s = j\omega$ en las frecuencias altas (donde $s\frac{R}{R_f}C$ es grande en comparación a 1), esto se reduce a $\frac{e_0}{i_d} = -R_f$. Sin embargo R_f puede hacerse más grande debido a que el corrector de la línea de base tiende a evitar la saturación a medida que aumenta el nivel de luz del ambiente.

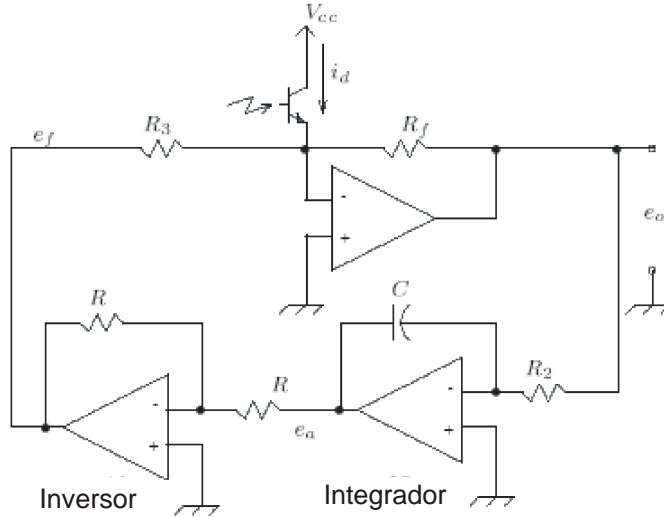


Figura 2.23: Circuito corrector de la línea de base

Esta función de transferencia es un filtro de paso alto con frecuencia de corte

$$f_{cutoff} = \frac{R_f}{2\pi R_2 R_3 C} \text{Hz} \quad (2.5)$$

Esta frecuencia de corte debería situarse por debajo de la frecuencia de la señal conectada. Con los siguientes valores utilizados $R_f = 10K\Omega$, $R_2 = 1M\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $C = 100nF$, se obtiene una frecuencia de corte de 159Hz, muy por debajo la frecuencia de la señal de 2400Hz. Si la frecuencia de corte se hubiera trasladado a un valor aproximado a 1000 Hz, esto habría permitido rechazar la iluminación del ambiente de 120Hz. Sin embargo, es posible aplicar una técnica diferente [16] y [17].

2.7.3. La técnica de corriente diferencial

Una técnica diferencial puede ser utilizada para cancelar la iluminación de fondo, si la frecuencia es cero o 120Hz. Dos fototransistores se utilizan. Uno (el dispositivo de referencia) detecta la iluminación de fondo. El otro (el detector de dispositivo) mide la iluminación de fondo, más la señal deseada. La diferencia entre estos dos mediciones es la señal deseada. Cuando se utiliza un amplificador transresistencia [20], añadiendo el dispositivo de referencia es tan simple como agregar un segundo fototransistor, como se muestra en la Fig. 2.24.

Cuando la terminal de referencia del amplificador está conectado a tierra, el transistor inferior debe estar sesgado por un suministro de voltaje negativo V_{ee} . En este arreglo, los dos transistores conducen una corriente proporcional a la iluminación del ambiente, pero la resistencia de retroalimentación sólo conduce la diferencia de corriente (la señal), por lo que puede hacerse más grande que si tuviera que conducir la corriente debido a la iluminación del ambiente.

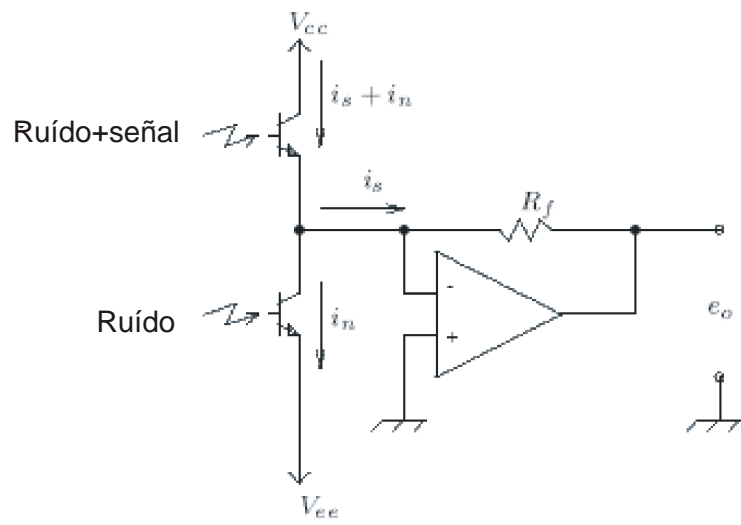


Figura 2.24: Técnica diferencial

Capítulo 3

Diseño y construcción de la plataforma móvil

El diseño y la construcción de un robot móvil en el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, realizar el desplazamiento del *rangefinder* para ubicar cada uno de los heliostatos u obstáculos dentro de la planta solar, y posteriormente realizarse la tarea de mantenimiento en los espejos de los heliostatos. Con la finalidad de realizar un diseño propio, se propuso hacer todo el diseño mecánico, así como el motriz incluyendo el diseño de los motores asociados al robot móvil.

En base al análisis de las ventajas y desventajas que ofrecen los esquemas de configuración descritos en el capítulo anterior y considerando además tres aspectos importantes como son: la orientación, dirección y tracción en las ruedas. Se propuso realizar un diseño en configuración diferencial [8], que se presenta en la Fig. 3.1 y Fig. 3.2 respectivamente.

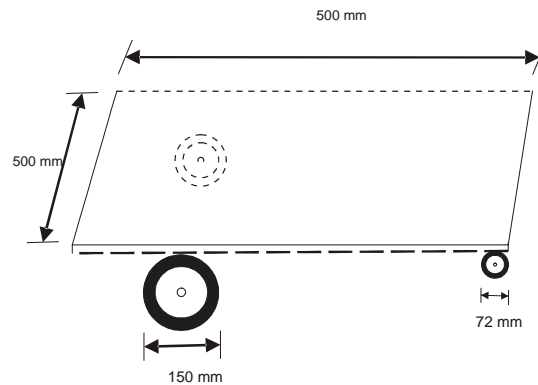


Figura 3.1: Dimensiones físicas del robot móvil

El modelo dinámico de esta configuración de robots ha sido estudiado y analizado y se encuentra disponible en varios libros de la robótica móvil [9], lo que facilita un poco la implementación de algunos esquemas de control para el seguimiento de trayectorias, como el control heurístico basado en redes neuronales.



Figura 3.2: Protótipo del robot diferencial

El diseño mecánico para la locomoción del robot consiste en una relación de engranes tal y como se puede ver en la Fig. 3.3.

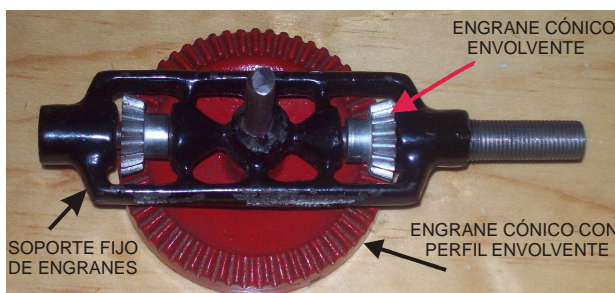


Figura 3.3: Mecánismo de engranes para la motricidad del robot móvil

Esta relación de engranes esta compuesta por dos tipos de engranes. El primer engrane es del tipo cónico con perfil envolvente, este engrane conocido como tipo *corona* tiene un diámetro de 82 mm y un total de 56 dientes. El segundo engrane es del tipo cónico envolvente conocido como tipo *piñon* con un diámetro de 24.2 mm con un total de 15 dientes rectos. El mecanismo de transmisión en sí, esta configurado de tal forma que existen dos engranes tipo piñon, ubicados en cero grados con respecto a la corona. Estos dos piñones se encuentran soportados por una estructura como se muestra en la figura. Este soporte se encuentra fijo en la estructura del robot, es decir, no realiza ningún tipo de desplazamiento angular, únicamente los piñones son los que realizan este trabajo mecánico.

El engrane corona se encuentra acoplado directamente en la rueda del robot móvil. Esto es que existe una flecha entre el mecanismo de transmisión de engranes y la rueda , y que asu vez existe otra flecha en la que se acopla directamente cada uno de los motores a pasos diseñados como se muestra en la Fig. 3.4, de tal forma que se obtiene la motricidad del robot móvil.



Figura 3.4: Acoplamiento de la relación de engranes con la rueda del robot móvil

3.1. Diseño y fabricación de motores a pasos para el robot móvil

El tipo de motores a pasos diseñados en el CCADET, UNAM, básicamente consta de un estator y de un rotor con sus respectivos devanados y entradas de alimentación. Como primera parte en el diseño del motor a pasos propuesto, se tiene el diseño y construcción del estator. El estator es el alma del motor, en esencia permite determinar la fuerza o potencia del motor en plena carga. La determinación en forma inmediata de dicha potencia, depende del embobinado en cada uno de las bobinas del motor, esto es, el número de vueltas, lo cual se encuentra indirectamente asociado con el diámetro del núcleo de la bobina, la que generalmente es de un metal como el hierro.

Los motores a pasos utilizados en el control de la tracción del robot móvil son del tipo de reluctancia variable. Este tipo de motores tienen la característica de mantener el par correspondiente mientras se encuentre energizado el par de bobinas que le corresponde. Existe mucha literatura disponible al respecto, si se desea profundizar en su funcionamiento interno. En lo particular estos motores están diseñados bajo el concepto de tecnología de bajo costo con alta eficiencia. Es importante mencionar que estos motores se diseñaron a partir de los requerimientos y necesidades del prototipo de robot móvil presentado en este trabajo de investigación, si analizamos esto, es válido mencionar que en términos de costo y beneficio en comparación de un motor a pasos manufacturado industrialmente es más alto en costos y muchas de sus funciones probablemente quedarían sin utilidad.

Estos motores están diseñados particularmente para funcionar a un valor de 24 pasos y admiten una corriente máxima de 6 A a 24 Volts. El robot móvil está acondicionado con un par de baterías recargables cada una de 12 Volts a 8 A, las cuales alimentan eléctricamente a ambos motores.

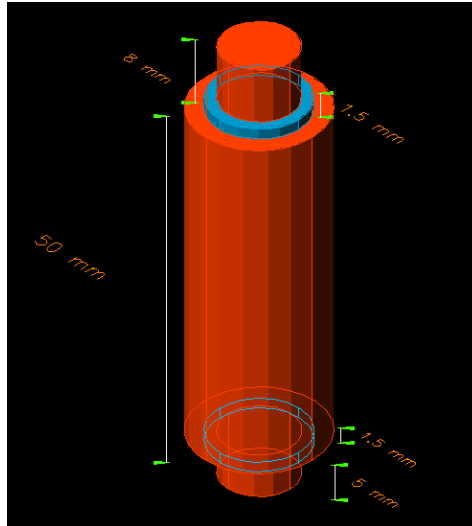


Figura 3.5: Bobina con sus respectivas dimensiones diseñado en Mechanical Desktop

3.1.1. Diseño y maquinado del estator

Los motores propuestos están diseñados para ser implementados en una aplicación de robótica móvil. Estos motores están compuesto por un número de 8 bobinas asociados a un movimiento rotacional de 24 pasos o ángulos respectivamente.

Diseño y maquinado de las bobinas

Primeramente como parte del estator la primera pieza a diseñar es prácticamente el conjunto de bobinas que se requieren, para lo que se considera el maquinado de las flechas de cada una de las bobinas, así como el maquinado de cada uno de los soportes tanto superior como inferior que permiten sujetar a cada embobinado, el cual se realiza con hilo magnético en cada bobina. En la Fig. 3.5 y Fig. 3.6 se pueden observar una de las bobinas diseñadas con sus respectivas dimensiones, así como los soportes para el embobinado.

Es importante recordar que las flechas de las bobinas están elaborados de un metal como el hierro. Por lo tanto es necesario aislar dicho metal de alambre de cobre para el embobinado. Si bien es cierto que el alambre de cobre contiene un aislante conocido como “esmalte”, es necesario aislarlos completamente. Para ello se utiliza un tipo de hilo grueso que cubrirá toda la zona metálica de la flecha la cual posteriormente ha de cubrirse con el alambre de cobre electromagnético.

En la Fig. 3.7 es posible observar una de las bobinas maquinadas a partir del diseño anterior en el CCADET.

En la Fig. 3.8 es posible observar una de las ocho flechas embobinadas con el alambre de cobre electromagnético

de la misma forma y debido a las consideraciones de diseño del estator, es posible observar en la Fig. 3.9 la colocación de las ocho bobinas en una configuración circular.

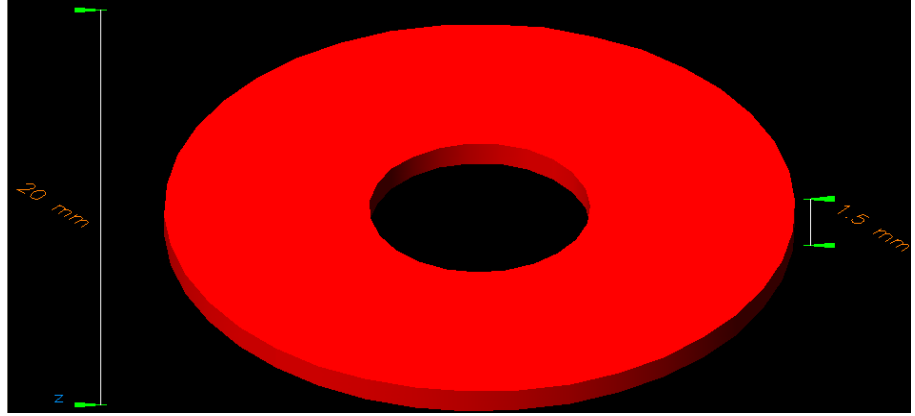


Figura 3.6: Soportes para el embobinado diseñado en Mechanical Desktop

Es posible analizar que las ocho bobinas se encuentran colocadas sobre una base en el fondo con una capa de cobre, la cual previamente ha sido perforada con la finalidad de ubicar dichas bobinas en una forma geométrica uniforme, es decir, que las distancias entre cada una de ellas es exactamente la misma, para esto se aplica una expresión matemática que analizaremos más adelante.

Primeramente se debe de tener en cuenta que las ocho bobinas con sus respectivas bases se encuentran equidistantes de un punto denominado centro, dicho centro para este caso en particular tiene un diámetro de 9.5 mm. Tal y como se muestra en la Fig. 3.10. Es posible analizar que la forma geométrica de la base es cuadrada y que por lo tanto es posible realizar en forma directa la ubicación de los ocho puntos, que en este caso serán tratados como centros en la base de cada una de las bobinas.

Como parte del diseño mecánico y considerando el movimiento rotacional del rotor entre cada una de las bobinas que conforman al estator del motor, se considera que los pasos suficientes y necesarios para lograr un desplazamiento del motor con una potencia considerable sea de cuatro pasos entre cada bobina. En este caso para llegar a la siguiente expresión matemática se considera el diámetro de las flechas de cada bobina, sin olvidar que el espacio entre cada una de ellas es importante en la definición de las características del motor a construir. Por lo tanto se tiene que el diámetro mencionado es de 5.5 mm. como se puede observar en la Fig. 3.11.

Por lo tanto resulta:

$$D_R = D_B * N_{PB} \quad (3.1)$$

donde

D_R = distancia entre cada bobina

D_B = diámetro de las flechas de las bobinas

N_{PB} = número de pasos entre cada bobina

$$D_R = (5,5\text{mm}) * (4) \quad (3.2)$$



Figura 3.7: Bobina cubierta por hilo grueso para aislar el hierro

$$D_R = 22,0\text{mm} \quad (3.3)$$

El valor obtenido representa el desplazamiento que se requiere por parte del rotor en cada bobina, es decir que para determinar el desplazamiento total del rotor en las ocho bobinas y completar una vuelta se requiere al resultado anterior aplicarle lo siguiente:

$$D_{8B} = DP_B * N_{TB} \quad (3.4)$$

donde

D_{8B} = desplazamiento total del rotor en las ochos bobinas

DP_B = desplazamiento por bobina

N_{TB} = número total de bobinas

$$D_{8B} = (22,0\text{mm}) * (8) \quad (3.5)$$

$$D_{8B} = 176,0\text{mm} \quad (3.6)$$

Ahora bien, para determinar la longitud de la circunferencia que han de formar las ocho bobinas D_{C8} , se requiere dividir el resultado anterior entre el valor de π obteniendo:

$$D_{C8} = \frac{176,0}{\pi} \quad (3.7)$$

$$D_{C8} = 56\text{mm} \quad (3.8)$$



Figura 3.8: Bobina cubierta de alambre de cobre electromagnético

con lo que obtenemos la longitud de la circunferencia y posteriormente dividimos entre 2 con la finalidad de obtener el radio, el cual es el mismo entre cada bobina a partir del centro de la circunferencia, esto es:

$$R_{C8} = \frac{56}{2} \quad (3.9)$$

donde

R_{C8} = radio de la circunferencia de las ocho bobinas

$$R_{C8} = 28\text{mm} \quad (3.10)$$

lo que se puede observar en la Fig. 3.12.

De esta forma obtenemos los valores adecuados para el diseño del motor a pasos. Por otro lado es importante mencionar que si bien es cierto que se utilizan ocho bobinas en este diseño, el rotor que esta diseñado en forma de engrane permite conectar a cada una de las bobinas que se encuentran en el estator, tiene un número total de seis dientes y recordando que para pasar de una bobina a otra se requieren cuatro pasos, esto es:

$$N_{PM} = N_{DR} * N_{PB} \quad (3.11)$$

donde

N_{PM} = número total de pasos del motor

N_{DR} = número de dientes a utilizar por el rotor son seis

N_{PB} = número de pasos entre bobinas

$$N_{PM} = (6) * (4) \quad (3.12)$$



Figura 3.9: Colocación de las ocho bobinas en forma circular

$$N_{PM} = 24 \quad (3.13)$$

Nota: Debido a que la base sobre la que se encuentran montadas las bobinas tienen en una de sus caras una pequeña placa de cobre, fue necesario seccionar en un extremo dicha placa con la finalidad de evitar pérdidas en la fuerza del motor por el fenómeno conocido como “corrientes parásitas”.

Para complementar la elaboración del estator es necesario asociar a las bases que soportan las ocho bobinas el centro sobre el cual se ha de acoplar la flecha del eje del rotor.

En la Fig. 3.13 es posible observar dicho centro.

y así mismo los alambres de cobre de cada uno de los extremos de las flechas embobinadas se han de unir a estas mismas bases de cobre. En la Fig. 3.14 es posible observar el ensamble final del estator.

3.1.2. Diseño y construcción del rotor

En el diseño del rotor es necesario maquinar la flecha que ha de soportar las dos piezas en forma de engrane asociadas al rotor en el motor. Esta flecha se coloca dentro del eje que soporta a las placas que permiten agrupar a las ocho bobinas del estator. En la Fig. 3.15 es posible observar el ensamble de la flecha con el rotor del lado superior

y en la Fig. 3.16 es posible observar el rotor ensamblado en el lado inferior del estator

Ahora bien, es importante mencionar que cada uno de los rotores tienen un total de 6 dientes, esto se debe a que el motor a pasos que se propone, tal y como se mencionó anteriormente es de un total de 24 pasos, esto es:

$$N_{PM} = N_{DR} * N_{PB} \quad (3.14)$$

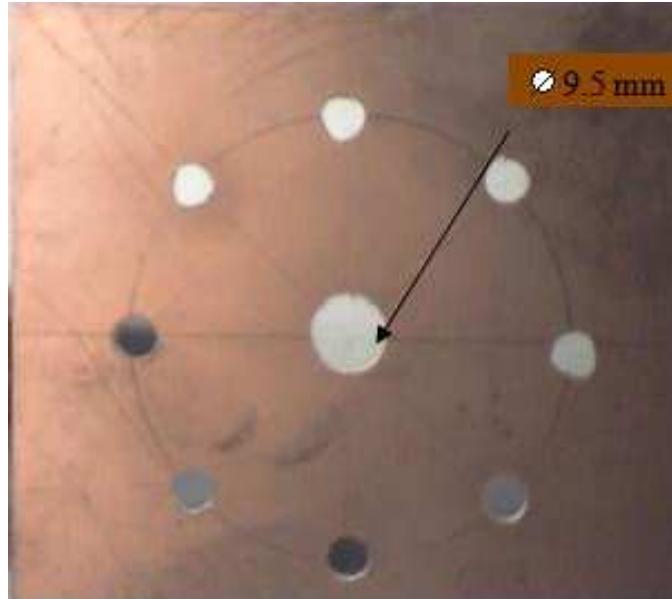


Figura 3.10: Base en la que se han de colocar las ocho bobinas con centro

donde

N_{PM} = número total de pasos del motor

N_{DR} = número de dientes a utilizar por el rotor

N_{PB} = número de pasos entre bobinas

$$N_{PM} = (6) * (4) \quad (3.15)$$

$$N_{PM} = 24 \quad (3.16)$$

Para ubicar las distancias correctas entre cada uno de estos dientes se establece lo siguiente: el diámetro total que forman las ocho bobinas es de 176.0 mm. Éste valor lo dividimos entre el número de dientes de cada rotor (6 dientes), lo que nos entrega un valor de:

$$D_{DR} = \frac{D_{T8}}{N_{DR}} \quad (3.17)$$

donde

D_{DR} = distancia entre cada diente del rotor

D_{T8} = diámetro total que forman las ocho bobinas

N_{DR} = número de dientes por cada rotor

$$D_{DR} = \frac{176,0}{6} \quad (3.18)$$

$$D_{DR} = 29,3\text{mm} \quad (3.19)$$

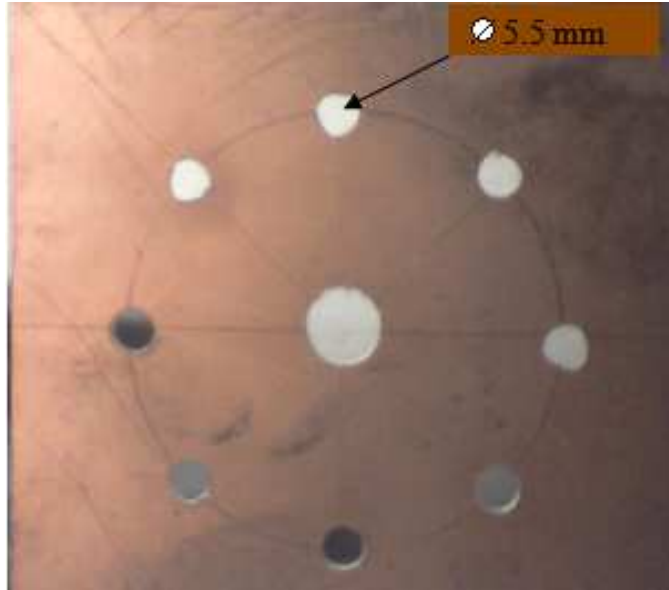


Figura 3.11: Diametro adecuado para cada una de las bobinas

Ahora bien debemos recordar que el desplazamiento del rotor en cada bobina es igual 22.0 mm y si restamos el último valor obtenido de 29.3 mm; se obtiene el valor de:

$$V_{DBR} = D_R - D_{DR} \quad (3.20)$$

donde

V_{DBR} = valor de desfaseamiento entre cada bobina y rotor

D_R = desplazamiento del rotor en cada bobina

D_{DR} = distancia entre cada diente del rotor

$$V_{DBR} = (22,0\text{mm}) - (29,3\text{mm}) \quad (3.21)$$

$$V_{DBR} = 7,3\text{mm} \quad (3.22)$$

éste valor obtenido nos indica el desfaseamiento entre cada bobina y cada diente del rotor.

Así mismo los diámetros entre la flecha del rotor y el eje sobre el cual ha de ubicarse dicha flecha son ligeramente diferentes (unos cuantos milímetros), esto se debe a que es necesario incorporar un tipo lubricante entre ambas piezas (grasa) con la finalidad de minimizar los efectos de fricción entre ambas partes.

Como parte del diseño del rotor y como acoplamiento de éste al estator, es importante mencionar que el movimiento circular libre del rotor depende en gran medida, no solo de un buen lubricante como se mencionó anteriormente, si no también del maquinado realizado con el torno en ambas caras del estator, es decir, que debe de existir un “escareo” de aproximadamente 2

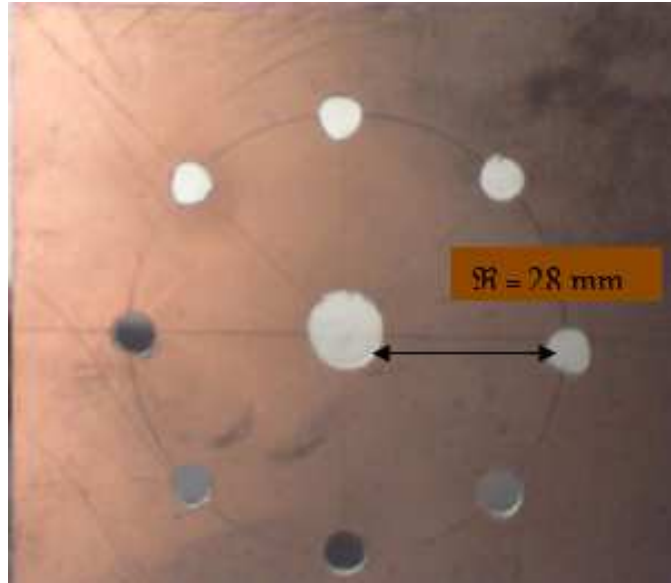


Figura 3.12: Radio del estator a partir de cada bobina con respecto al centro

mm en un diámetro ubicado entre las salientes de las bobinas y el centro del estator, claro sin tocar el eje de la flecha. Lo anterior se puede observar en la Fig. 3.17.

3.2. Control de los motores a pasos en el robot móvil

Para lograr que cada uno de estos motores entreguen el par mecánico que se necesita para alcanzar un desplazamiento adecuado por parte del robot móvil, se requiere diseñar un control y una etapa de potencia con ciertas características, las cuales están en función del diseño de estos motores. En la siguiente Figura se puede observar el diagrama electrónico relacionado con el control y la potencia de estos motores (Fig. 3.18).

El circuito electrónico está formado por un generador de pulsos a una frecuencia de 1 kHz, el cual es conectado directamente a través de su salida a un circuito integrado contador de tipo decada, el cual tiene cuatro salidas acopladas cada una de ellas a un transistor de potencia tipo darlington NPN, que a su vez es conectado a cada par de bobinas del motor a pasos de reluctancia variable diseñado.

La frecuencia a la que está diseñado un generador de pulsos determina hasta cierto punto la velocidad en la que el rotor estará entregando un par mecánico. El 555 es un integrado que puede ser configurado en diferentes modalidades. Una de estas modalidades es la de multivibrador astable, para lo cual el circuito oscila a una frecuencia y ciclo de trabajo configurables mediante resistencias y condensadores o capacitores externos. La versatilidad de este integrado de tecnología bipolar, es que las frecuencias y ciclos de trabajo resultantes no dependen de la fuente de alimentación.

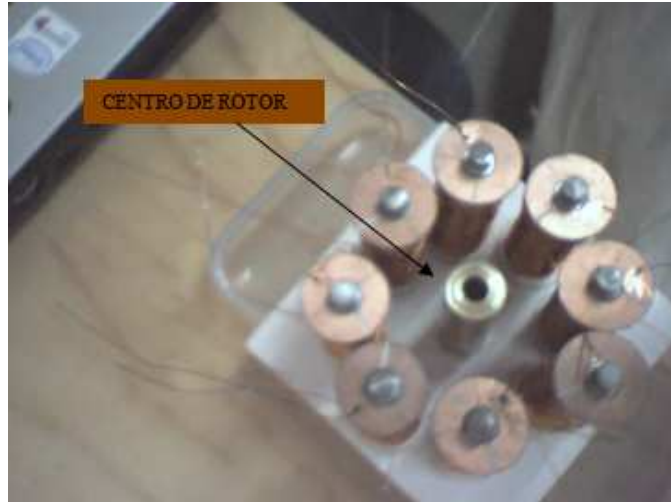


Figura 3.13: Bujé ubicado en el estator por que ha de pasar la flecha del rotor del motor

3.2.1. Modo astable del 555

La frecuencia depende de los valores de R_A , R_B y C_T y se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1,44}{C_T (R_A + R_B)} \quad (3.23)$$

para que se cumpla esta expresión, el valor de R_B debe ser menor de $\frac{R_A}{2}$, sino el circuito no puede oscilar, por que el voltaje en el PIN 2 (*trigger*) del 555 nunca alcanzaría el nivel de disparo ($\frac{1}{3}$ de V_{cc}).

En este circuito, el ciclo de trabajo depende de los valores de R_A y R_B y se calcula así:

$$D(\%) = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B} \quad (3.24)$$

En este circuito, no es posible alcanzar una onda simétrica pura. Lo que se puede hacer para alcanzar una onda cuyo ciclo de trabajo sea lo más cercano al 50%, R_A debe ser una resistencia mucho mayor al de R_B .

Para producir las distintas frecuencias, se deben escoger los condensadores apropiados:

- Para un 1 Hz escogemos un condensador de $100 \mu F$
- Para 10 Hz escogemos un condensador de $10 \mu F$
- Para 100 Hz escogemos un condensador de $1 \mu F$
- Para 1 KHz escogemos un condensador de $0.1 \mu F$



Figura 3.14: Ensamble final del estator

posteriormente los valores de las resistencias, serán:

$$f = \frac{1,44}{C_T (R_A + 2R_B)} \quad (3.25)$$

en este caso tenemos que $R_A = R_B$, entonces tenemos que para los siguientes valores de frecuencia:

$$1Hz = \frac{1,44}{100\mu F(3R)}; R = 4,8K\Omega$$

$$10Hz = \frac{1,44}{10\mu F(3R)}; R = 4,8K\Omega$$

$$100Hz = \frac{1,44}{1\mu F(3R)}; R = 4,8K\Omega$$

$$1KHz = \frac{1,44}{0,1\mu F(3R)}; R = 4,8K\Omega$$

En la Fig. 3.20 es posible observar el control y la etapa de potencia electrónica ensamblada de los motores apartir del diseño propuesto en la Fig. 3.18. Posteriormente este módulo sera colocado en la superficie de la plataforma del robot móvil.



Figura 3.15: Vista del rotor superior en los dos motores diseñados

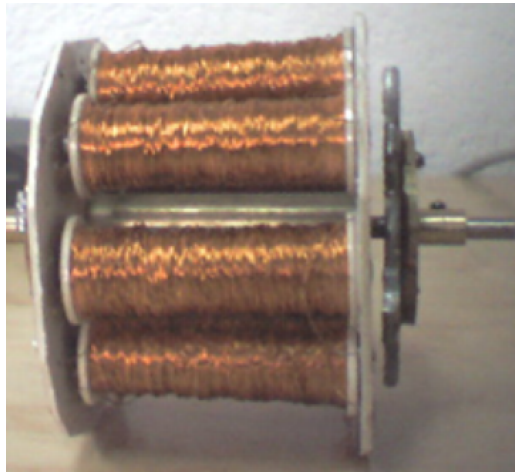


Figura 3.16: Vista del rotor inferior en uno de los motores diseñados

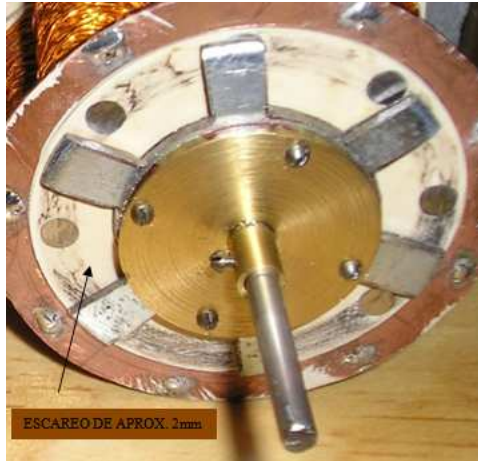


Figura 3.17: Escareo entre el estator y el rotor del motor diseñado para su libre desplazamiento

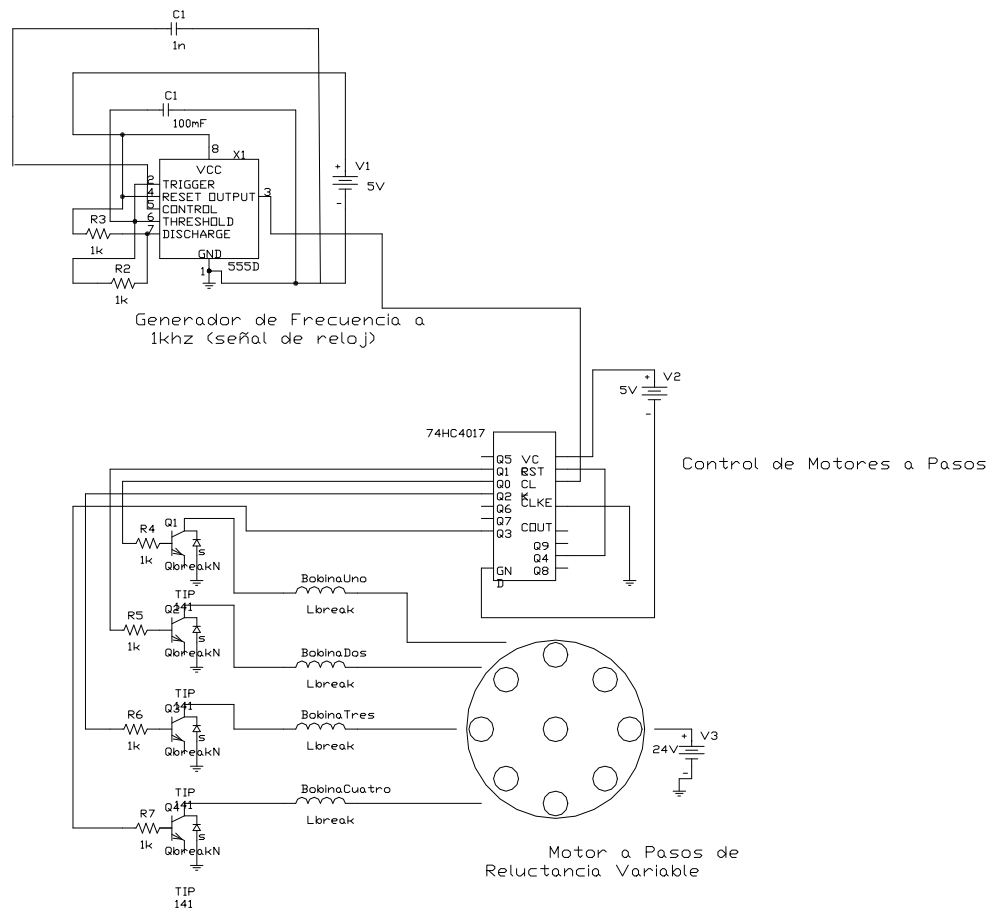


Figura 3.18: Diagrama electrónico para el control de los motores a pasos

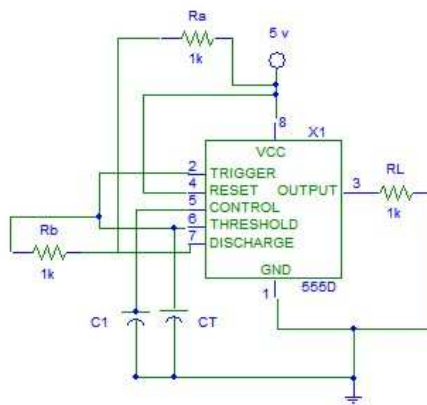


Figura 3.19: Configuración en modo astable del oscilador

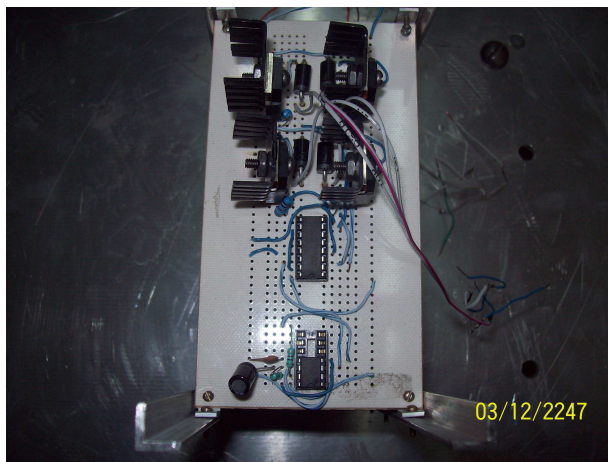


Figura 3.20: Circuito electrónico ensamblado para el control de los motores

Capítulo 4

Diseño y construcción del *rangefinder*

Existen algunos trabajos de investigación que presentan resultados relacionados con el uso de sensores de distancias del tipo *rangefinder*, como el que se presenta en este trabajo de investigación doctoral. Estos *rangefinders* implementan diversos metodos y elementos para la detección de los obstáculos utilizados en un robot móvil. *Nassin Bahari* [23] presenta resultados de una investigación para la localización de obstáculos en un ambiente cerrado para un robot móvil implementando un odometro, un láser *rangefinder* y una cámara de visión panorámica, con la finalidad de obtener una estimación más realista de la posición y orientación del robot móvil. *Geoffrey Hollinger* [24] presenta resultados de una investigación que combina dos factores importantes como son: la acción y la búsqueda en robots móviles. En este trabajo el robot móvil utiliza un brazo robótico y en su muñeca una cámara para el reconocimiento de los objetos y un láser *rangefinder* para determinar su localización en su ambiente de trabajo. En *Vitor Sequeira* [25] se presentan resultados de un láser *rangefinder* montado en la superficie de un robot móvil, que permite modelar las escenas del mundo real en 3D. En *Héctor C. Vargas* [26] se presentan resultados de la aplicación de un láser *rangefinder* modelo UTM-30LX de la marca HOKUYO Corp., sobre la estructura de un robot móvil PIONEER 3-AT, para ser posible la autonomía en la navegación del robot móvil. *Charles F. Bergh* [27] presenta un mecanismo de escaneo compacto y de baja potencia. En su diseño se hace énfasis en el uso de dos motores, uno de ellos del tipo ultrasonico, un espejo y un láser *rangefinder* para la reconstrucción de ambientes y navegación en robots móviles. En este trabajo se presenta un estudio comparativo del prototipo diseñado con diferentes modelos de *scanning laser rangefinders* en el que se analiza el desempeño a partir de sus características de diseño.

Alireza Saberhari [28] presenta un análisis con respecto a la determinación de la distancia de un objeto u obstáculo. Para obtener esta distancia utiliza un método llamado *line-stripe* el cual se integra a un *rangefinder* y se hace un análisis de las lentes ópticas y se hace un análisis matemático para determinar el valor de la distancias a partir de los datos obtenidos de los pixeles de una imagen.

Je-Goon Ryu [29] presenta los resultados de la implementación de un *rangefinder* infrarojo, una de las aportaciones de este trabajo radica en la reducción de los costos, aunque obviamente

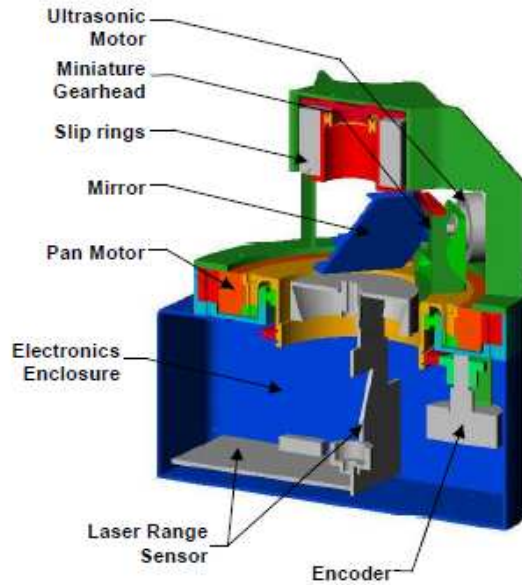


Figura 4.1: A compact, low power two-axis scanning laser rangefinder for mobile robots

como se indica en su artículo existen algunos problemas de errores en los calculos por la no linealidad del sensor. Más sin embargo se considera como una buena alternativa para la robótica móvil. En este sentido el prototipo de *rangefinder* que nosotros presentamos en esta tesis doctoral igualmente ofrece una alternativa de *rangefinder* que permite reducir costos en su diseño e implementación.

Yoichi Okubo [30] presenta los resultados de la caracterización de un láser *rangefinder* modelo URG-04LX de la compañía HOKUYO. En lo particular es un modelo más pequeño, que consume menos potencia, más ligero y es posible aplicarlos con más facilidad con robots más pequeños, sean estos móviles o no. Por otro lado se presenta una tabla comparativa del sensor, en el que la especificación del rango máximo del sensor disminuye considerablemente. Por otro lado es interesante analizar que los dos espejos giran a razón de las revoluciones del motor que se encuentra directamente acoplados.

Existen algunas aplicaciones en las que se combina el principio de triangulación para láser rangefinder con una cámara digital para determinar posición y la distancia de los obstáculos en ambientes naturales. En M. Bualat [31] se presenta un trabajo de investigación de la NASA, en la que se diseñó un *Scanning Laser Rangefinder* para determinar la inspección y localización de obstáculos por parte de un robot móvil, en un terreno de rocas o piedras y caminos difíciles para un robot convencional. En lo particular una de las propuesta interesantes de este artículo es la potencia requerida por el láser para realizar una detección de obstáculos a distancias máximas de 5 metros, las cuales son suficientes para aplicaciones de robótica móvil.

Una de las tantas aplicaciones interesantes de los sensores *rangefinder* se describen en MacLachlan [32], la cual consiste en evitar la colisión de un vehículo con otros objetos u obstáculos que

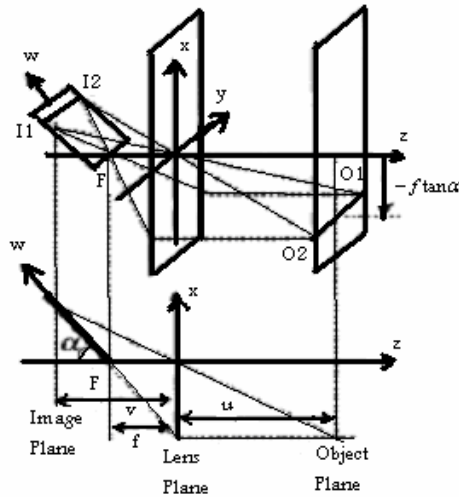


Figura 4.2: Vista en 3D y 2D de la lente óptica y una imagen en el plano

no simplemente se encuentren estáticos, sino que también se encuentren en desplazamiento al mismo tiempo que el vehículo. Para lograr este objetivo, el vehículo se encuentra provisto por varios tipos de sensores entre ellos un sensor *laser rangefinder*, en lo particular se utiliza el modelo SICK LMS 200.

Existen algunas otras aplicaciones como *Orghidan* [33], donde el *laser rangefinder* es utilizado como *catadioptric single-shot rangefinder*. Este tipo de sensores utiliza espejos parabólicos y cónicos en combinación con una cámara para determinar obstáculos, implementados en un robot móvil. En lo particular este tipo de prototipo es una variante en cuanto al diseño de los *rangefinder* convencionales. Es posible considerar este diseño de espejos para ser utilizados en investigaciones futuras con el diseño propuesto en esta investigación doctoral, para la detección de obstáculos a una mayor distancia.

El robot móvil requiere realizar el mantenimiento dentro de una planta solar y si analizamos en un espacio coordinado al conjunto de heliostatos, estos se encuentran separados unos con respecto a otros a una misma distancia. Esta información permite ser de gran ayuda al momento de que el robot móvil encuentre físicamente a cada uno de los heliostatos. En el presente trabajo de investigación, se propuso que la ubicación física y la determinación de la distancia de los heliostatos con respecto a la posición actual del robot móvil, se realizara implementando un sensor de distancias óptico conocido como *rangefinder*.

Este sensor de distancias se diseñó bajo el principio de la tecnología de bajo costo pero de alta eficiencia. El diseño mecánico, eléctrico y de potencia del sensor se diseñó, maquinó y construyó durante de la realización de esta tesis. A partir de la información que se presenta en el capítulo dos, y realizando un análisis comparativo entre el esquema de funcionamiento de cada uno de los diferentes sensores, se decidió trabajar con el esquema del sensor basado en el principio de la triangulación.

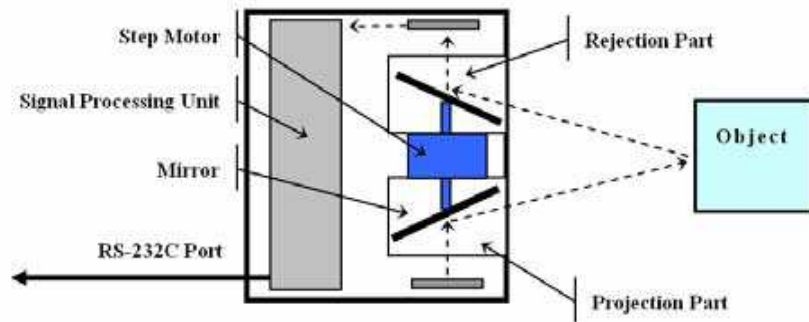


Figura 4.3: Principio de funcionamiento del *rangefinder* infrarrojo de la serie PBS de la compañía HOKUYO

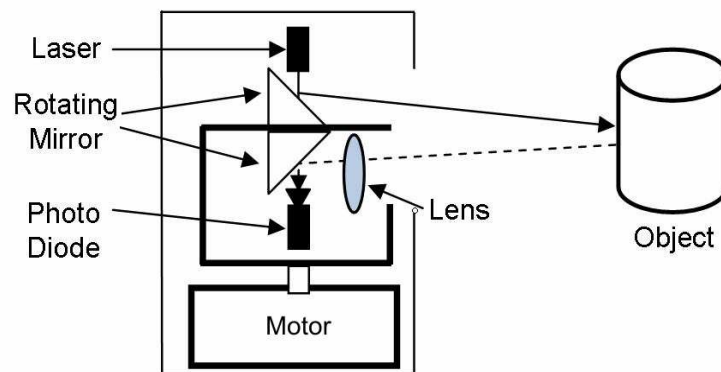


Figura 4.4: Principio de operación del láser Rangefinder URG-04LX de la compañía HOKUYO

El método basado en triangulación es sencillo y su interpretación matemática es relativamente sencilla en comparación con otros métodos. La ventaja de "robustez" que ofrece permite ser aplicable en diferentes ambientes de trabajo como en una planta solar.

4.1. Principio de funcionamiento

Varios prototipos de *rangefinder* ópticos fueron desarrollados con éxito e implementados en robots móviles del Instituto de Cibernética de la Academia de Ciencias de Ucrania [18]. Uno de estos rangefinder utilizó un sistema electrónico analógico y se basó en el principio de la triangulación para la medición de distancias (ATR).

El principio de triangulación para la medida de distancias se muestra en la Fig. 4.6.

El *rangefinder* tiene el emisor y el receptor de la luz. El emisor de luz envía los haces de luz con la a diferentes ángulos. Si el haz de luz se encuentra con el obstáculo, el receptor obtiene el haz de luz reflejado. En ese momento el *rangefinder* determina el ángulo β y α . Después de que

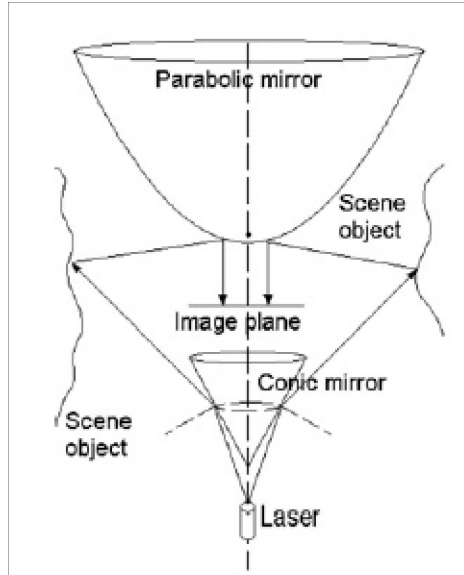


Figura 4.5: *catadioptric single-shot rangefinder*

el rangefinder determina el ángulo γ mediante la ecuación:

$$\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta) \quad (4.1)$$

con los valores α, β y γ , el *rangefinder* determina los valores de la distancia desde el rangefinder hasta el obstáculo D_1 y D_2 :

$$D_1 = \frac{H}{\sin \gamma} * \sin \beta \quad (4.2)$$

$$D_2 = \frac{H}{\sin \gamma} * \sin \alpha \quad (4.3)$$

El esquema del *rangefinder* analógico se presenta en la Fig. 4.7. El *rangefinder* contiene la fuente de luz que envía el haz de luz a través de la lente uno hacia al espejo bilateral. El motor de corriente directa (no se muestra en la figura) gira el espejo en el sentido anti horario a 1500 revoluciones por minuto (25 revoluciones por segundo). El espejo refleja el haz de luz que escanea el medio ambiente debido al espejo en rotación del rangefinder. El *rangefinder* contiene en la parte superior 8 sensores ópticos. La lente dos enfoca el medio ambiente hacia los sensores ópticos, por lo que cada sensor obtiene una parte correspondiente del medio ambiente. Cuando el haz de luz de espejo giratorio pasa por este punto, el sensor genera un pulso que es utilizado para el cálculo de la distancia.

Dos ángulos α, β son necesarios para calcular la distancia hasta el obstáculo.

El ángulo α es constante para cada sensor y pueden ser obtenido a partir de la geometría del *rangefinder*. El ángulo β puede ser calculado usando el tiempo t_i entre los pulsos del sensor de acotamiento uno y el i -th sensor de la parte superior del *rangefinder*.

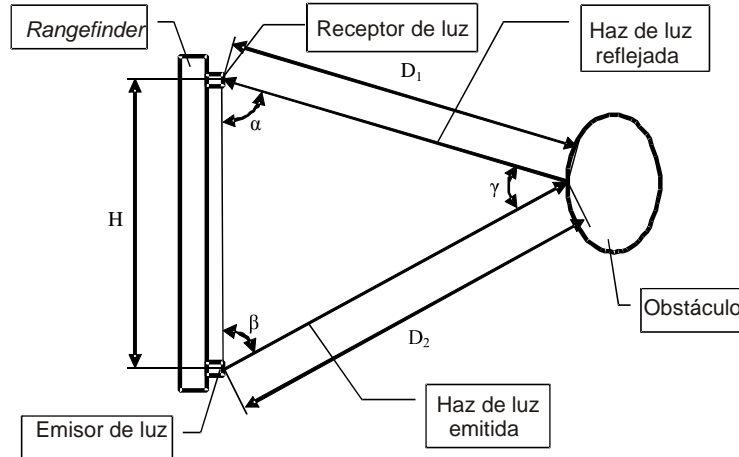


Figura 4.6: Geometría de triangulación

$$\beta = \varphi - 2 * \omega * t_i \quad (4.4)$$

donde φ es el ángulo entre el eje vertical del *rangefinder* y la posición del sensor de acotamiento uno (Fig. 4.7), y ω es la velocidad angular de rotación del espejo.

El *rangefinder* tiene una rotación adicional de baja velocidad alrededor del eje vertical para investigar el medio ambiente que lo rodea.

El espejo bilateral rotatorio con 25 revoluciones por segundo envía hacia el medio ambiente 50 emisiones de escaneo por segundo. La parte superior del *rangefinder* tiene 8 sensores. Cada sensor entrega una medición de distancia de cada haz, por lo que el rangefinder realiza $50 * 8 = 400$ mediciones por segundo. La distancia máxima de este *rangefinder* fue de 5 m. Todos los cálculos se hicieron con los dispositivos electrónicos analógicos.

El ATR se instaló en el robot móvil "TAIR" en ambiente exterior [18]. Uno de los problemas fue el de eliminar la interferencia de la luz solar. Para este propósito se separó cada sensor óptico de la parte superior del *rangefinder* de su amplificador de voltaje con un filtro. Los parámetros del filtro se ajustaron experimentalmente de manera que las señales generadas por la rotación lenta del *rangefinder* sobre el eje vertical no pasaran por el filtro y las señales generadas con los haces de luz de la rápida rotación del espejo pasaran por el filtro. Como resultado, el ATR trabajó bien en diferentes condiciones.

El segundo problema fue la interferencia generada por las chispas de los motores de corriente utilizados para la rotación del espejo y del *rangefinder*. Estas interferencias no permitían la amplificación de las señales bajas de los sensores ópticos. Para aumentar estas señales fue necesario amplificar el tamaño de los componentes ópticos, por ejemplo: los diámetros de las lentes de hasta 100 mm, y los lados del espejo hasta 140 mm. Esto condujo a la disminución de la velocidad de rotación del espejo y el aumento del tamaño en general del *rangefinder*.

El siguiente inconveniente del ATR fue que se redujo el ángulo de visión θ (Fig. 4.7) en la parte superior del *rangefinder*. Como resultado, el robot móvil "TAIR" con este *rangefinder* detectó los

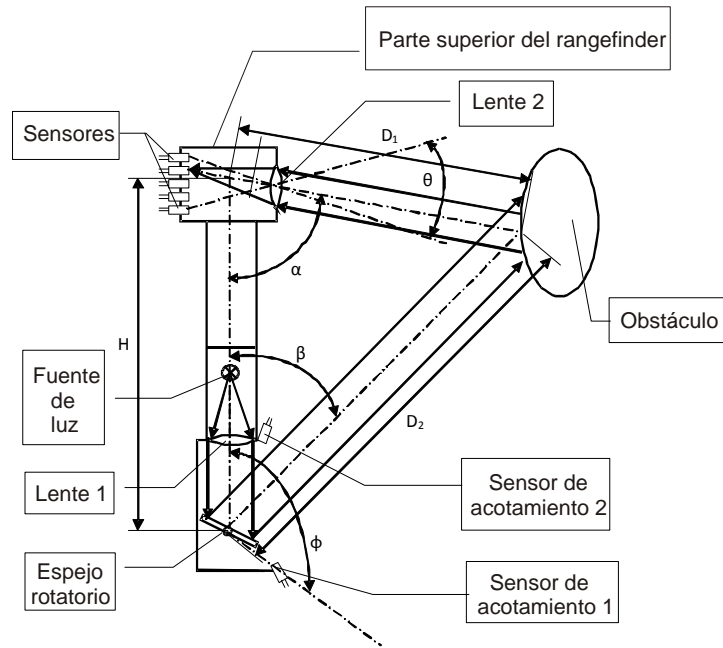


Figura 4.7: Esquema de triangulación del rangefinder analógico

obstáculos en el suelo, pero en ocasiones no podía detectar obstáculos como las ramas de los árboles.

4.2. Nuevo modelo de rangefinder

Para eliminar los inconvenientes mencionados anteriormente, se ha desarrollado un nuevo *rangefinder* que se muestra en la Fig. 4.8.

Este *rangefinder* contiene dos lentes, la fuente de luz, la línea de sensores ópticos, el espejo giratorio, los sensores de acotamiento. El nuevo elemento es el espejo oscilación que permite ampliar el ángulo de visión. El motor paso a paso bipolar controla el espejo giratorio. Para descifrar la información que nos da el *rangefinder* se diseñó el siguiente circuito lógico (Fig. 4.9).

los principales elementos de este circuito son los disparadores de los sensores de línea o arreglo de sensores y los contadores binarios. Las conexiones de un disparador y un contador binario se muestran en la Fig. 4.10.

El disparador del sensor de línea viene fijado por el estado "1" con el pulso del sensor de acotamiento uno y se puede restablecer al estado "0" con el pulso del sensor de línea o con el pulso del sensor de acotamiento dos. Dos casos de un disparo en el *reset* se muestran en la Fig. 4.11.

El caso A se produce cuando el sensor de línea da la respuesta a la emisión de la luz reflejada por el obstáculo (ver Fig. 4.8). En este caso, el disparador preserva el estado "1" durante el tiempo (Fig. 4.11, el caso A). Si el sensor de línea no da respuesta, el disparador preserva el

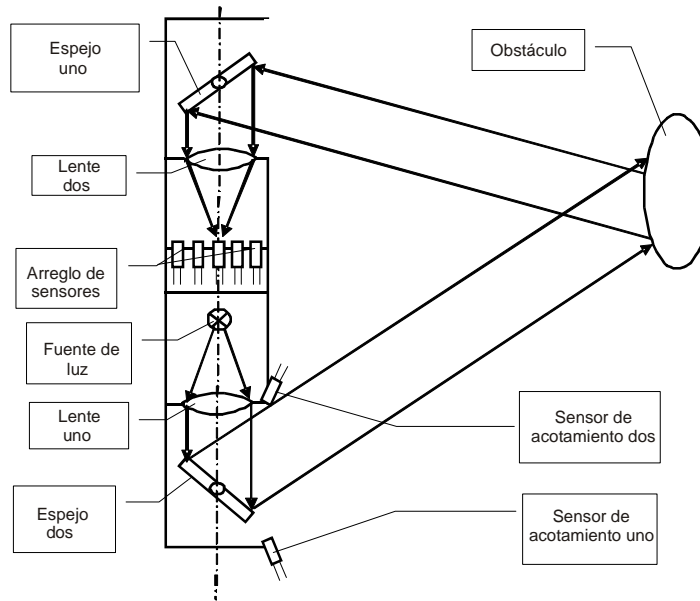


Figura 4.8: Nuevo modelo de rangefinder

estado "1" durante el tiempo (Fig. 4.11, el caso B).

El tiempo corresponde a en la ecuación (6). Esto permite hacer todos los cálculos necesarios para obtener la distancia del obstáculo.

El caso B se lleva a cabo cuando el sensor de línea no da ninguna respuesta. Esto puede ocurrir cuando el obstáculo está demasiado cerca o lejos del *rangefinder*. El tercer caso (especiales) puede tener lugar cuando el obstáculo se oculta del haz de luz emitido con otro objeto. En cualquier caso, el tiempo en la Fig. 4.11 indica que la distancia del obstáculo no puede ser calculada.

El disparador del sensor de línea permite el pulso del contador de pulsos que proviene del generador de pulsos durante el tiempo t . El resultado del conteo es transmitido a uno de los registros de desplazamiento con el pulso del sensor de acotamiento dos. Posteriormente los registros de desplazamiento transfieren la información hacia la interfaz de la computadora.

El caso B, cuando el sensor de línea no da ninguna respuesta, debido a que el obstáculo se encuentra demasiado cerca se muestra en la Figura. 5.20. Dos casos de un tipo cuando el sensor de línea da respuesta con diferentes distancias del obstáculo se muestran en la Figura. 5.21 y 5.21, del capítulo 5.

4.3. Análisis comparativo del *rangefinder*

Un análisis comparativo del desempeño y funcionamiento del *rangefinder* diseñado, con respecto a otros *rangefinders* disponibles comercialmente se presenta en Yoichi Okubo [30]. En lo particular se realiza un análisis comparativo utilizando como referencia la tabla comparativa que se presenta a continuación.

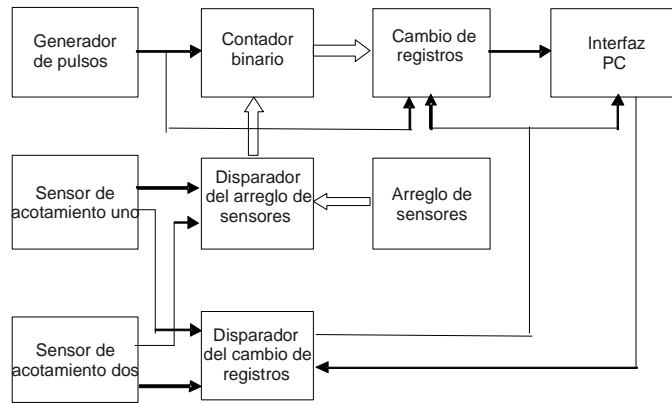


Figura 4.9: Circuito lógico para obtener información del rangefinder

Tabla 4.1. Análisis comparativo de rangefinder comerciales Sick LMS-200 y Hokuyo URG-04LX

	Units	Sick LMS-200	Hokuyo URG-04LX
Max range	m	80	4.0
Resolution	mm	10	1
Scan angle	deg	180	240
Angular resolution	deg	1*	0.36
Scan rate	scans/ sec	75	10
PC interface		RS-232/RS-422	USB/RS-232C
Data transfer rate	KB/sec	9.6 – 500	12,000 (USB) 19.2-750 (RS-232C)
External Dimension	mm	185x156x210	50x50x70
Weight	kg	4.5	0.16
Power Consumption	W	20	4.0 (maximum)

*Note: In interlaced scan mode, the sensor's angular resolution is 0.5° or 0.25°

A partir de la tabla anterior nuestro análisis comparativo se centra en los siguientes parámetros:

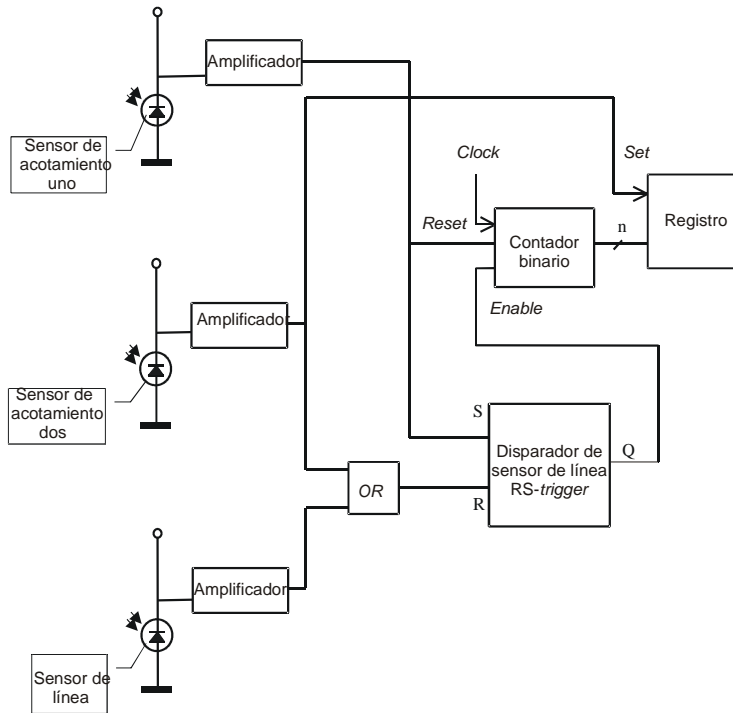


Figura 4.10: Esquema electrónico de los sensores de acotamiento y el disparador

Tabla 4.2. Análisis comparativo del rangefinder diseñado con respecto a los modelos Sick LMS-200 y Hokuyo URG-04LX

	Unidades	Sick LMS-200	Hokuyo URG-04LX	Rangefinder diseñado
Rango Max.	m	80	4.0	1.37
Ángulo de escaneo	grados	180	240	Aprox. 180
Interfaz-PC		RS – 232/RS - 422	USB/ RS – 232C	USB
Dimensión externa	mm	185 x 156 x 210	50 x 50 x 70	130 x 130 x 450
Peso	Kg	4.5	0.16	1.5
Frecuencia de escaneo	Scans/sec	75	10	200
Consumo de potencia	W	20	4.0 (máximo)	20
Precio	USD	\$6000.00	\$2375.00	\$200.00

como resultado inmediato de la tabla anterior se deducen los siguientes aspectos:

- Los dos modelos comerciales utilizan una fuente de luz como el láser mientras que la fuente

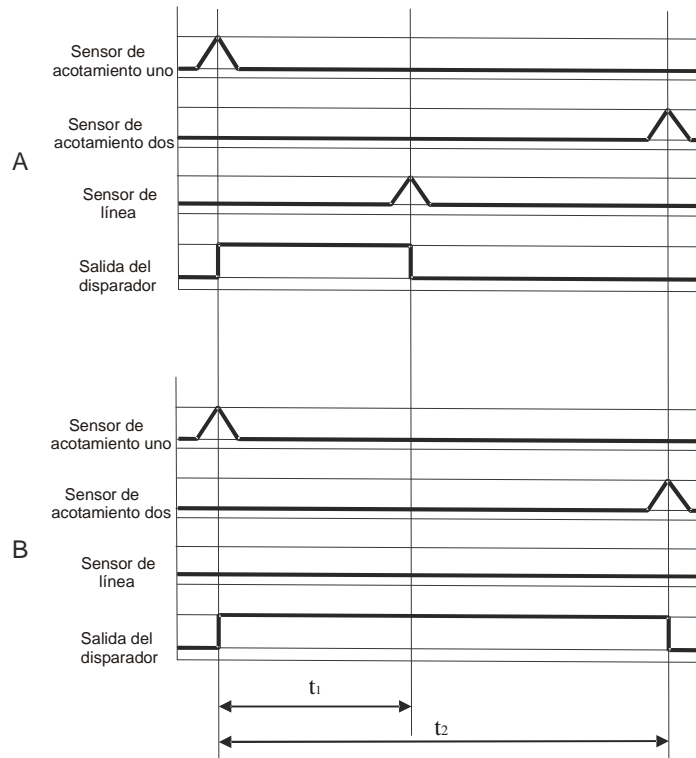


Figura 4.11: Diagrama de tiempos (caso A y B)

de luz del *rangefinder* diseñado, es una fuente de halógeno

- La distancia máxima obtenida de los *rangefinders* comerciales presentados, dependen de la potencia de la fuente de luz.
- La dimensión física de los *rangefinders* particularmente se deben a la tecnología del principio de funcionamiento que utilizan para realizar la detección de los obstáculos.
- En lo particular el principio de funcionamiento del modelo *Hokuyo URG-04LX* utiliza un esquema de dos espejos como el principio de funcionamiento del *rangefinder* propuesto, más sin embargo este modelo utiliza únicamente una lente en su diseño y el principio de funcionamiento es del tipo *Time of Flight*.
- Los costos con respecto al *rangefinder* diseñado son muy considerables, esto es, que se obtiene un alto margen en la reducción de los costos.

4.4. Construcción del *rangefinder*

En el presente trabajo de investigación se presentaron y trabajaron dos propuestas de diseño y construcción de *rangefinder*. La primera propuesta consistió en el principio básico de

funcionamiento del sensor de distancias (Fig. 4.7). El diseño propuesto se diseño utilizando dispositivos electrónicos digitales, con la finalidad de obtener una mejor calidad de la información. Este prototipo se presenta en la Fig. 4.12, la cual consiste de una estructura a base de acrílico con una dimensión de 130 mm de ancho por 130 mm de largo y con 450 mm de altura. Internamente la estructura esta cubierta por una capa de pintura en color negro. En la parte superior se tiene ubicado una primera lente con un diámetro de 25 mm, que asu vez se encuentra asociada a un motor a pasos de reluctancia variable, el cual en el extremo de su flecha se tiene acoplado un espejo con una dimensión de 25 mm de ancho con 30 mm de largo. En la parte inferior de la estructura en una de las laterales, esto es, la del lado izquierdo observando la estructura de frente, se encuentra ubicada una segunda lente con las mismas dimensiones de la primer lente. Por último es posible observar la electrónica de potencia diseñada para controlar al motor.

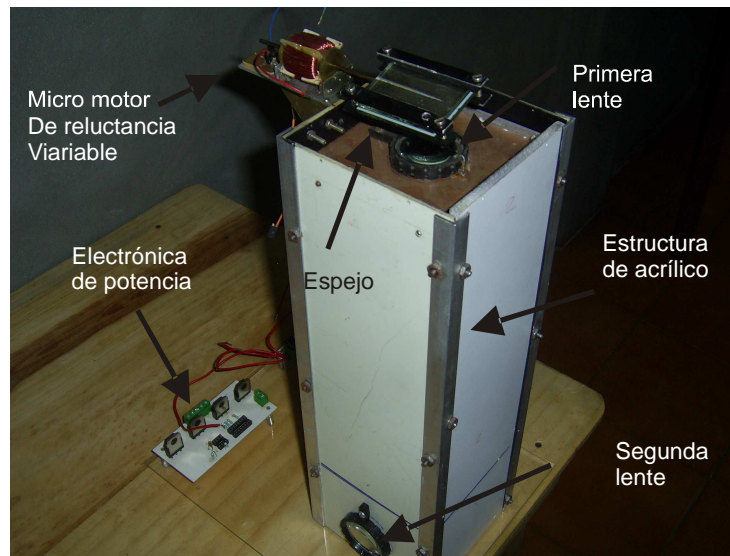


Figura 4.12: Primer protótipo de *rangefinder*

Considerando que el ambiente de trabajo del robot móvil requiere una visión más amplia para la ubicación de los heliostatos u obstáculos y que además la rápida ubicación de estos obstáculos dentro de la planta solar sea en un tiempo menor, se propuso un nuevo esquema de funcionamiento. Este principio se muestra en la Fig. 4.13.

En este diseño los sensores de acotamiento uno y dos se encuentran ubicados en la entrada de la lente número dos y además se tiene incorporado un segundo espejo plano acoplado en la flecha de un motor en la parte inferior del *rangefinder*, asociado a una segunda lente. Es importante mencionar que este segundo espejo no gira a una velocidad constante como lo realiza el primer espejo plano. La función de este espejo practicamente es ofrecer una variación en los ángulos de incidencia del haz de luz, permitiendo con ello mejorar el ángulo de observación.

En la Fig. 4.14 se puede observar el sensor de distancias fabricado a partir del principio de funcionamiento que se muestra en la Fig. 4.13.

A continuación se hace una descripción del funcionamiento de cada uno de los elementos que

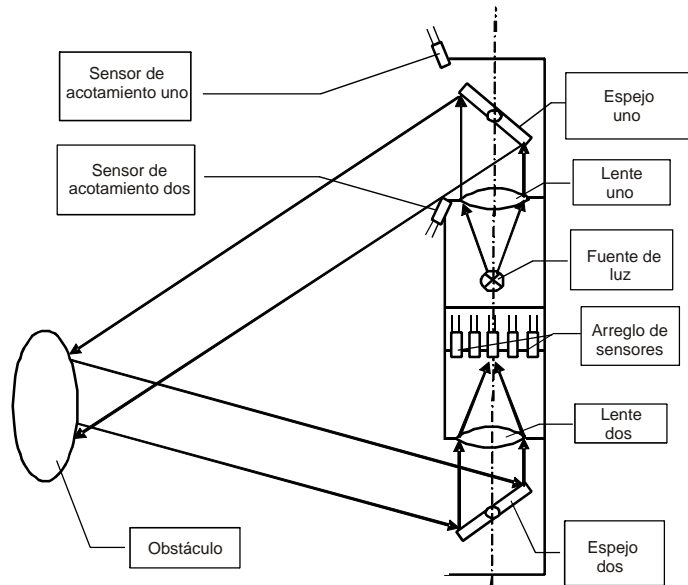


Figura 4.13: Esquema de funcionamiento del nuevo prototipo de *rangefinder*

componen a este nuevo esquema de sensor de distancias.

4.4.1. Esquema de funcionamiento de las lentes

Las lentes uno y dos que se encuentran ubicadas en el rangefinder tiene como objetivo ayudar al haz de luz que emite la fuente de luz. Estas lentes se pueden observar en la Fig. 4.15 y en la Fig. 4.16.

Ambas lentes tienen la misma dimensión y se encuentran a una determinada distancia entre cada una de ellas, a partir del centro de la estructura del rangefinder, en el que se encuentra ubicado exactamente la fuente de luz.

4.4.2. Esquema de funcionamiento de los espejos

Los espejos que se encuentran ubicados en el rangefinder tienen como objetivo principal el de reflejar el haz de luz que emite la fuente. Estos espejos que se encuentran ubicados tanto en la parte superior como inferior del rangefinder, se diseñaron de tal forma que se encuentran acoplados a la flecha de cada motor. Uno de ellos se hace girar a una velocidad constante, y el otro se mantiene fijo a un cierto valor de ángulo. En la siguiente Fig. 4.17 se puede observar el diseño de estos espejos con sus respectivas dimensiones y en la Fig. 4.18 se muestran los espejos fabricados.

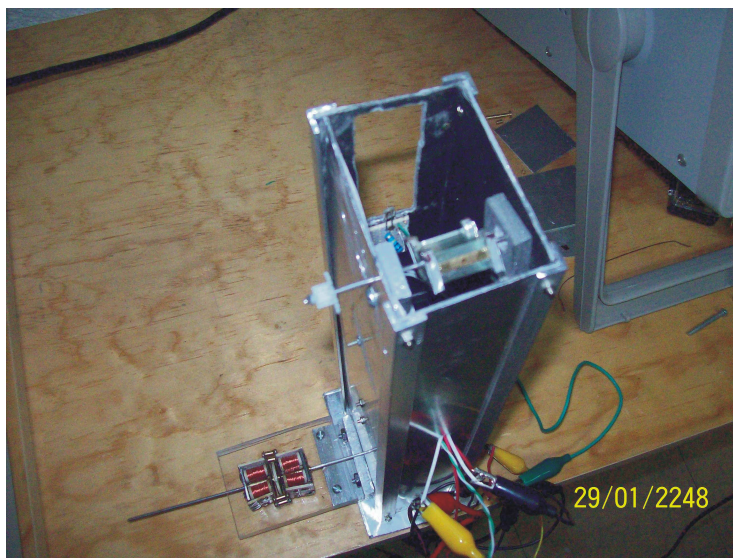


Figura 4.14: Sensor de distancias *rangefinder* con el nuevo esquema de funcionamiento

4.5. Diseño y fabricación de los motores del *rangefinder*

El diseño original del *rangefinder* consiste en el uso de tres motores con sensores de posición; cada uno de estos sensores se encuentra acoplado a la flecha de los motores correspondientes.

4.5.1. Esquema de funcionamiento de los motores

Para el diseño de estos motores se propuso el siguiente esquema de funcionamiento. El estator está formado por ocho bobinas en dos grupos de cuatro. Cada bobina tiene un embobinado de 125 vueltas. El estator se puede observar en la siguiente Fig. 4.19.

En el diagrama es posible observar los dos grupos de cuatro bobinas unidas por un tubo de latón por el cual pasa la flecha del rotor. Así mismo esta flecha se une a un sensor de posición diseñado para determinar la ubicación digitalmente del motor.

4.5.2. Diseño y construcción del estator

El estator que se propone en este tipo de motores está formado por dos bloques de estatores cada uno con cuatro bobinas, tal y como se puede observar en la siguiente Fig. 4.20.

Las dimensiones correspondientes a cada una de las bobinas se pueden observar en la siguiente Fig. 4.21.

Las cubiertas laterales de cada estator están fabricadas en una placa con la finalidad de ligar las terminales de cada bobina, estas placas tienen las siguientes dimensiones tal y como se observa en la siguiente Fig. 4.22.

Es importante observar que la placa se encuentra dividida en cuatro secciones, esto se debe a que cada bobina tiene dos terminales y son cuatro bobinas en cada estator.

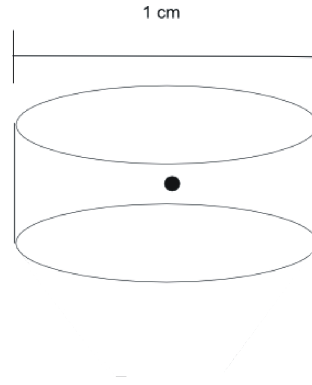


Figura 4.15: Lente propagadora del haz de luz en el *rangefinder*



Figura 4.16: Lente real colocada en el prototipo de *rangefinder*

En cada estator se tiene diseñado la colocación de un buje que envuelve o cubre la flecha del rotor que atraviesa a los dos estatores de cada motor. Este buje tiene las siguientes dimensiones tal y como se puede observar en la siguiente Fig. 4.23

Es posible observar en la Fig. 4.24 el estator completo en la primera fase diseñado y maquinado en el CCADET, UNAM.

4.5.3. Diseño y construcción del rotor

Para el diseño del rotor se propuso un principio basado en un conjunto de seis pequeños imanes agrupados en una secuencia de Polo Norte-Polo Sur. Lo que permite que al momento de energizar a cada una de las bobinas del estator en forma individual. Estos imanes se alinien con un par de bobinas, de tal forma que a cada energización se corresponde a un desplazamiento angular del rotor. Es importante mencionar que estos desplazamientos dependen del tiempo que es determinado por la frecuencia del control electrónico del motor. El diseño de este rotor se

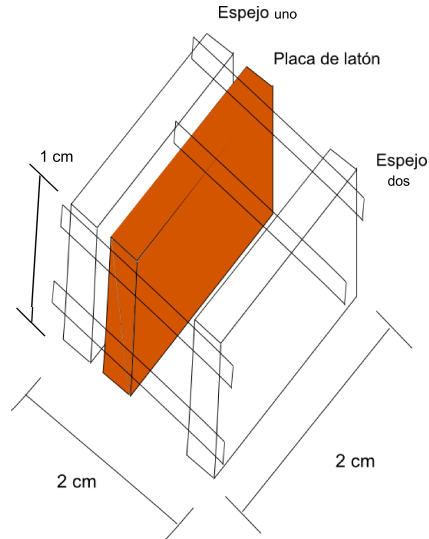


Figura 4.17: Espejo diseñado para reflejar el haz de luz en el *rangefinder*

puede observar en la Fig. 4.25.

El rotor consta de una flecha directamente acoplada en el centro del mismo. Esta flecha está diseñada de tal forma que en uno de sus extremos ha de acoplarse un pequeño espejo y en el otro extremo una pequeña caja de engranes que ha de funcionar un tipo de reductor de velocidad asociado directamente a un encoder para determinar las posiciones del motor y controlar posteriormente la velocidad del mismo. En la Fig. 4.26 es posible observar el acoplamiento del pequeño espejo a la flecha del motor.

4.5.4. Principio de funcionamiento de los motores

Los motores a pasos diseñados y fabricados tienen como principio de funcionamiento el esquema de los motores a pasos bipolares. Estos motores generalmente están formados por dos bobinas, y la corriente que circula por ellas invierte su sentido sucesivamente (a esto se refiere el nombre de bipolares). Es posible reconocerlos externamente debido a que presentan cuatro conductores, uno para cada extremo de una bobina. Su funcionamiento está basado en las fuerzas de atracción-repulsión que experimentan los cuerpos sometidos a un campo magnético.

El motor bipolar más sencillo está compuesto por dos bobinas (polos) por los que irá circulando corriente en uno u otro sentido según una secuencia definida. Mientras no circule corriente por ninguna de las bobinas el rotor se encontrará en reposo en una posición cualquiera. Si aplicamos corriente a ambas bobinas, de la manera que indica la Fig. 4.27a, el rotor girará hasta la posición indicada en dicha figura. Si se invierte el sentido de la intensidad aplicada a la bobina de terminales AB, el campo magnético variará, y el rotor girará de nuevo orientándose ahora de la manera mostrada en la Fig. 4.27b. Se observa que el motor se ha desplazado un paso (90°). Invirtiendo sucesivamente el sentido de la corriente en ambas bobinas, obtendremos el giro completo del motor, que se muestra en la Fig. 4.27.

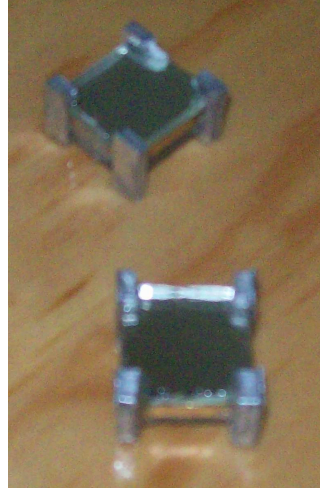


Figura 4.18: Espejo Plano real diseñado para reflejar el haz de luz en el *rangefinder*

En la siguiente tabla es posible visualizar la combinación de la alimentación entra cada paso del motor bipolar

En este sentido, cada vez que se aplica un pulso distinto a la entrada del motor, éste gira un paso completo se dice que está funcionando en modo *paso completo*. Para aumentar la resolución se tienen varias opciones. La más sencilla de todas y que no requiere un cambio físico en el diseño del motor, consiste en cambiar la secuencia de alimentación. En modo de funcionamiento de paso completo, las bobinas nunca quedan sin alimentación. Por otro lado si entre cada cambio en el voltaje de alimentación de una bobina, esta se deja de alimentar, podemos conseguir una posición del rotor intermedia entre dos pasos, a la cual se le conoce como forma de funcionamiento de *medio paso*.

Los motores de imán permanente bipolares diseñados y fabricados en este trabajo de investigación, consisten en dos estatores, cada uno de ellos formados por cuatro bobinas. Las ocho bobinas se encuentran interconectadas en forma serial y se obtienen los cuatro conductores o terminales que determinan el control del desplazamiento angular del motor, tal y como se observa en la Fig. 4.29.

La secuencia de combinaciones para el desplazamiento angular del motor bipolar diseñado y fabricado se pueden observar en la siguiente tabla

4.5.5. Control de los motores en el *rangefinder*

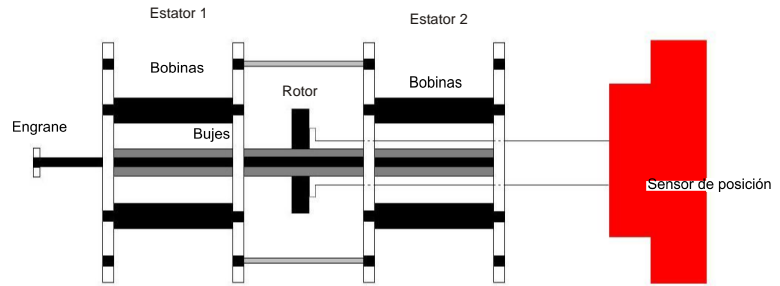


Figura 4.19: Estator del motor para el nuevo diseño de *rangefinder*

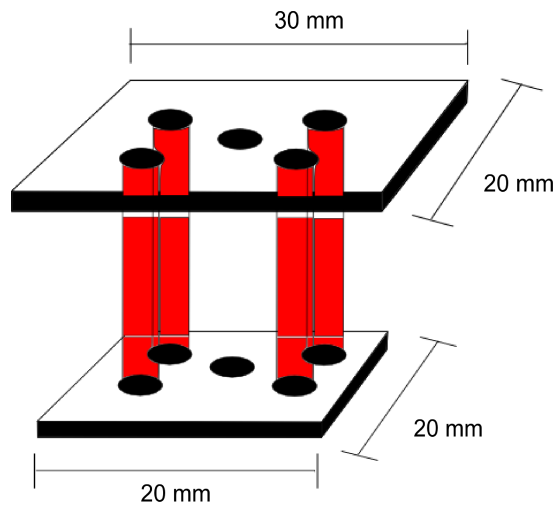


Figura 4.20: Estator individual

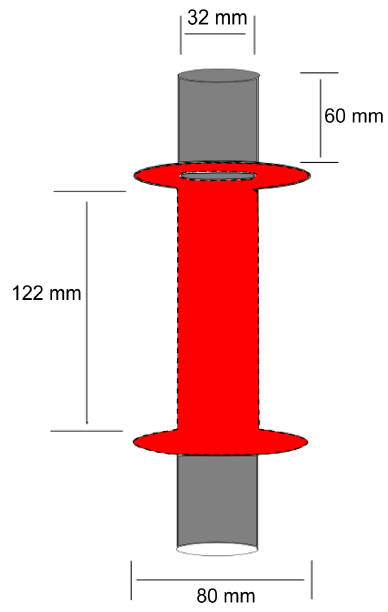


Figura 4.21: Bobina del estator

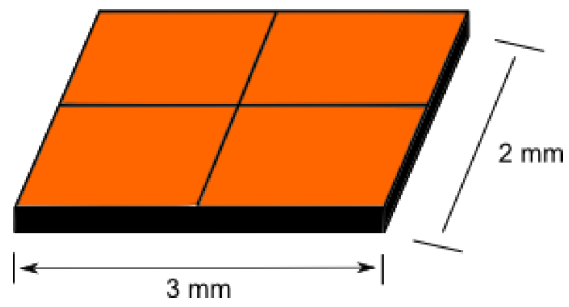


Figura 4.22: Tapas del estator

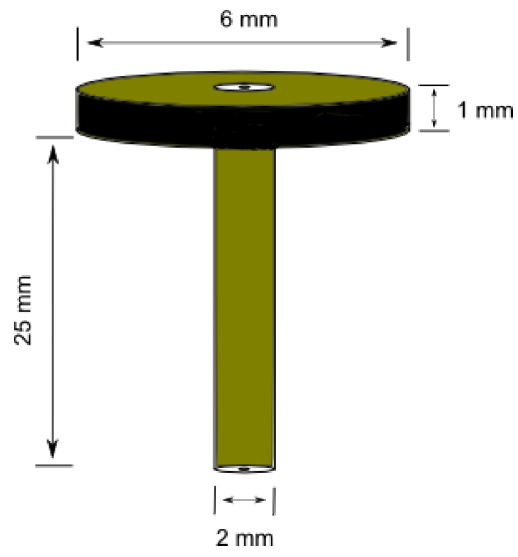


Figura 4.23: Buje de estator

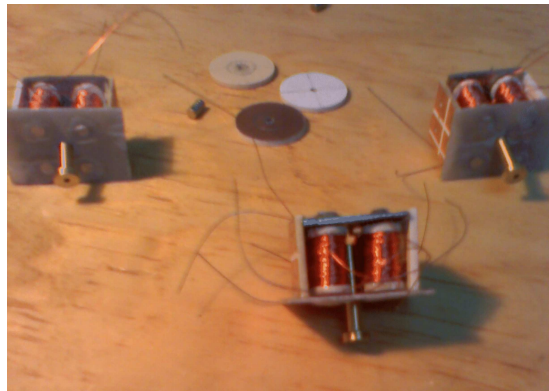


Figura 4.24: Protótipo de estator

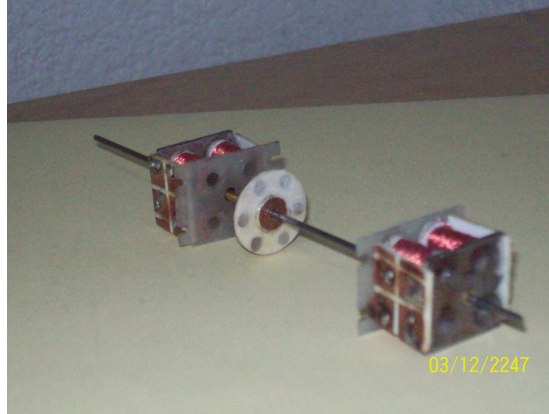


Figura 4.25: Rotor acoplado al estator del motor

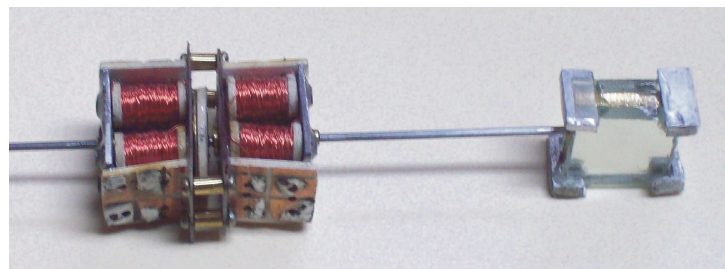


Figura 4.26: Espejo plano acoplado en la flecha del motor

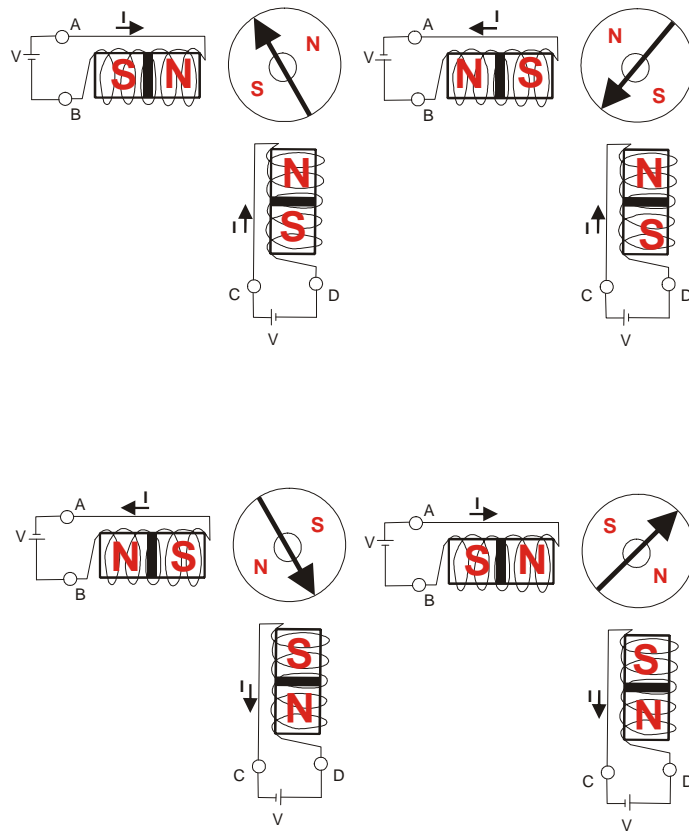


Figura 4.27: Desplazamiento del motor bipolar en modo de paso completo

Paso	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	-V	+V	+V	-V
3	-V	+V	-V	+V
4	+V	-V	-V	+V

Figura 4.28: Tabla con la secuencia de excitación para un motor bipolar de paso completo

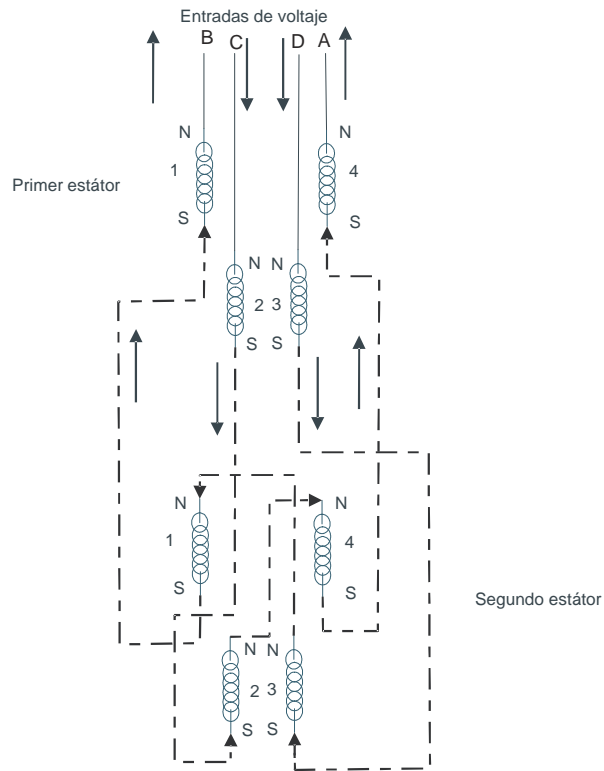


Figura 4.29: Configuración interna del motor a pasos

Paso	A	B	C	D
1	V-	V+	0	0
2	0	0	V-	V+
3	V+	V-	0	0
4	0	0	V+	V-

Figura 4.30: Tabla con la secuencia de combinaciones para excitar al motor bipolar de paso completo

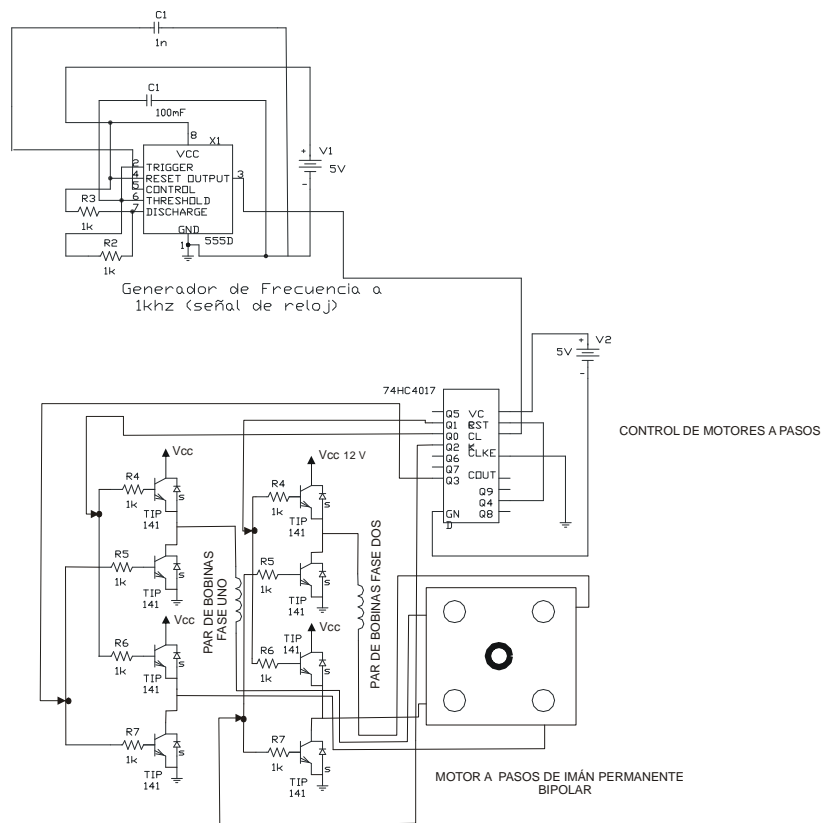


Figura 4.31: Electrónica de potencia para el control de los motores a pasos en el *rangefinder*

Capítulo 5

Experimentos con el prototipo de *rangefinder*

La fabricación de un prototipo requiere de ajustes en lo que respecta a su diseño. En este sentido el prototipo de sensor de distancia desarrollado en el grupo de Computación Neuronal del CCADET, requirió de varios diseños mecánicos con la finalidad de obtener el mejor resultado de sensado. En las Fig. 5.1 y Fig. 5.2 es posible observar la estructura del sensor de distancias construido con dos vistas diferentes.

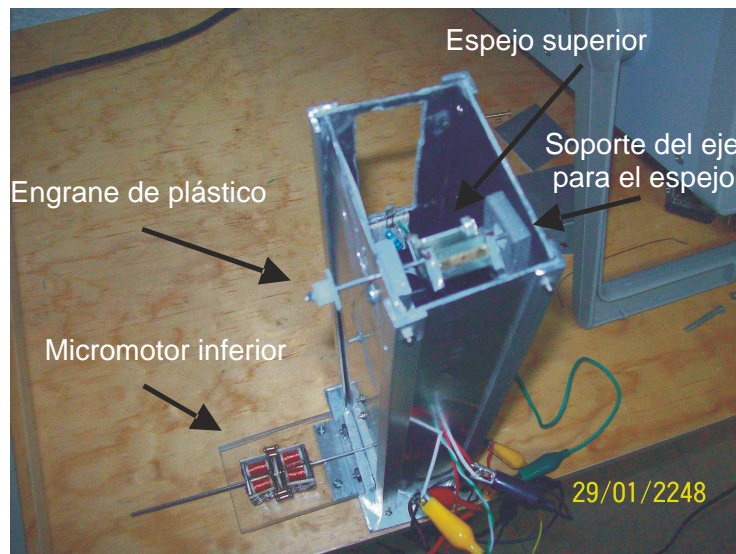


Figura 5.1: Estructura mecánica del sensor de distancias *rangefinder* con una vista lateral

En la Fig. 5.1 es posible observar que se tiene montado un espejo sobre la parte superior de la estructura, el cual gira sobre un eje de acero que se encuentra soportado por dos baleros pequeños con rodamientos de bolas. Este eje en uno de sus extremos tiene acoplado un engrane de plástico, el cual tiene un diámetro de 7.4 mm de diámetro y un total de 10 dientes. Este engrane



Figura 5.2: Estructura mecánica del sensor de distancias *range finder* con una frontal

tiene como finalidad disminuir los problemas de vibraciones en la estructura y disminuir los esfuerzos de desplazamiento angular que ha de realizar el espejo. Estos problemas de vibraciones se interpretan de la siguiente manera: Debido a que el espejo tiene un cierto valor de peso (dos espejos y una placa de latón) y se tiene acoplado en la parte final de uno de los extremos de la flecha del motor y considerando que dicho motor gira a una velocidad constante, está actuando como una excéntrica, generando un efecto vibratorio que podría extenderse en toda la estructura mecánica del sensor. Es por tal motivo que en el diseño se consideró incluir este engrane que se ha de acoplar directamente con un motor. Este motor tiene en uno de sus extremos de la flecha del rotor acoplado un engrane con las mismas características, con lo que se tiene una relación 1:1 en la transmisión de desplazamiento angular y esfuerzo por parte del motor.

La Fig. 5.1 muestra la estructura del sensor sin la presencia del motor superior. Esto se debe a que las primeras pruebas del sensor de distancias se realizaron en forma manual, con la finalidad de analizar el comportamiento de los fototransistores en lazo abierto. El motor que se encuentra ubicado en la parte inferior de la estructura tiene acoplado en la flecha de su rotor un espejo similar al que se mencionó anteriormente con la diferencia en que este motor no gira a una velocidad constante. Este motor permite la localización de dicho espejo a un valor de ángulo aproximado a 45° con respecto a la horizontal. La inclinación de este espejo se puede observar en la Fig. 5.3.

Es importante mencionar en este apartado que la inclinación del espejo debe permitir que el haz de luz rebotado por el obstáculo u objeto ingrese a través de la segunda lente que se encuentra en la parte inferior de la estructura y que proyecta este haz directamente hacia el fototransistor del sensor. Experimentalmente se determinó la importancia de la inclinación de este espejo, es decir, que la inclinación es posible cambiarla unos cuantos grados con respecto a la lente con la finalidad de analizar la calidad de la respuesta del fototransistor a ciertos valores de



Figura 5.3: Inclinación del segundo espejo en la estructura del *rangefinder*

distancia con respecto al obstáculo.

La fuente de luz del sensor de distancia es un foco de halógeno a 12V con una potencia de 20W y que mide aproximadamente 30 mm de largo y aproximadamente 1 cm de ancho. Para la determinación de los obstáculos y considerando el principio de funcionamiento del sensor explicado en el capítulo tres, es importante considerar la posición del filamento que se tiene en el foco. Esta posición se define como vertical u horizontal. En lo particular para el sensor de distancias se requiere que el filamento se encuentre en posición horizontal por restricciones de diseño. El haz de luz que emite la fuente ha de conducirse por la lente superior de la estructura y posteriormente proyectarse hacia el obstáculo con ayuda del espejo a través de una ranura ubicada en la parte frontal de la superficie de la estructura del sensor como se puede observar en la Fig. 5.4.

Es importante mencionar que fue necesario modificar en varias ocasiones el diseño del sensor debido a la existencia de algunos problemas con la respuesta del fototransistor. Estos problemas se relacionan directamente con el haz de luz que proviene de la fuente. El haz de luz se proyecta directamente sobre los espejos tanto superior como inferior para detectar el obstáculo y posteriormente su distancia. El ángulo relativo en el que se encuentren dichos espejos afectan directamente en la respuesta del fototransistor. Particularmente cuando el ángulo de los espejos coincide con la posición horizontal completa de los mismos, la cantidad máxima del haz de luz se proyecta directamente del sobre el fototransistor tal y como se puede observar en la Fig. 5.5. Obteniendo una respuesta en falso por parte del fototransistor.

Para evitar este problema en el sensor fue necesario incorporar en el diseño una placa con superficie en negro, entre el módulo del fototransistor y la fuente de luz, tal y como se puede observar en la Fig. 5.6.

Existe una relación directa entre la potencia de la fuente de luz y el diametro de las lentes. Esta relación determina la calidad de la respuesta del fototransistor, esto es, que la cantidad de voltaje que se obtiene como respuesta del fototransistor en su salida V_s depende de la intensidad



Figura 5.4: Filamento de la fuente de luz del sensor en un obstáculo

de luz que se aplique en la base del fototransistor, tal y como se muestra en la Fig. 5.7.

Es posible aplicar otra alternativa que consiste en la amplificación de la respuesta de salida del fototransistor. Para esto se requiere diseñar un circuito electrónico a partir de amplificadores operacionales, tal y como se mencionó en el capítulo tres.

La medición de las distancias que el sensor ha de realizar están orientadas hacia objetos con formas geométricas múltiples e inespecíficas y con diversos colores. Para determinar los comportamientos del sensor en presencia de objetos con características en cuanto a los colores se propuso utilizar como herramienta de apoyo un fotómetro, con la finalidad de determinar los valores de la intensidad de la luz reflejada en los objetos por parte de la fuente de luz del *rangefinder*.

5.1. Resultados experimentales preliminares

Los primeros resultados experimentales obtenidos del sensor de distancias se obtuvieron realizando pruebas en forma manual, esto es, se realizó el desplazamiento angular del espejo plano superior, sin el uso del motor acoplado en el eje del espejo. Estas pruebas permitieron obtener la respuesta del fototransistor modelo PT331C de la marca *Steren*[®], energizado con un valor $V_{cc} = 10$ V. Este voltaje se aplica directamente como se indica en la Fig. 5.8.

La fuente de luz es un foco de halógeno con un voltaje de alimentación $V_{cc} = 10$ V. En las siguientes figuras es posible observar el comportamiento del sensor de distancias a partir de un voltaje de alimentación $V_{cc} = 10$ V, tanto para la fuente de luz como para el fototransistor, lo que demanda de la fuente de alimentación un valor de corriente $I = 1,41$ A. El voltaje de salida V_s del fototransistor sin la presencia del haz de luz de la fuente, se mantiene a un valor de referencia o $V_{ref} = 4,81$ V. En la Fig. 5.9 se observa la respuesta del *rangefinder* a una distancia de 50 cm, teniendo como obstáculo una pared en color blanco.

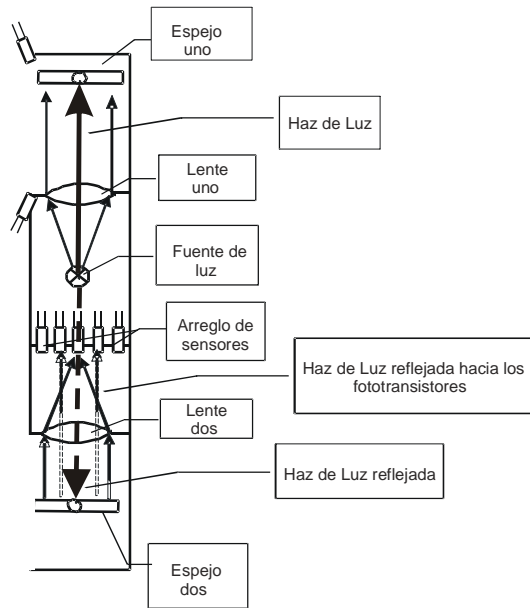


Figura 5.5: Haz de luz reflejado directamente hacia fototransistor

La señal de salida muestra pequeños picos o crestas que representan la respuesta del fototransistor en cada instante, en que el haz de luz se proyecta en el espejo inferior de la estructura del sensor de distancias e ingresa a través de la lente.

En la Fig. 5.10 se observa la respuesta del *rangefinder* a una distancia de 30 cm, teniendo como obstáculo una pared en color blanco.

es posible analizar que la respuesta del sensor de distancia es mucho mejor con respecto a la medición obtenida en a una distancia de 50cm. Esto se debe a que existe una relación entre la cantidad de haz de luz y la distancia del obstáculo, lo que incide directamente sobre la respuesta del fototransistor.

En la Fig. 5.11 se observa la respuesta del *rangefinder* a una distancia de 19.5 cm, teniendo como obstáculo una pared en color blanco.

La respuesta del sesor de distancias mejora mucho más con respecto a la distancia de 30 cm, debido a que la distancia se ve acotada. Es importante mencionar que existe un valor de distancia que por el diseño de la estructura mecánica del sensor y por la naturaleza del mismo sistema es difícil obtener una respuesta del fototransistor, este valor es de aproximadamente 8 cm de distancia con respecto al obstáculo y se puede observar en la Fig. 5.12. Teniendo como obstáculo una pared en color blanco

5.1.1. Respuesta del sensor de acotamiento superior

El sensor de distancias para determinar cierta información relacionada con la distancia de los obstáculos, requiere de la información de uno de los sensores de acotamiento que se mencionan en el capítulo tres. Este sensor se localiza en la parte superior de la estructura del sensor, como

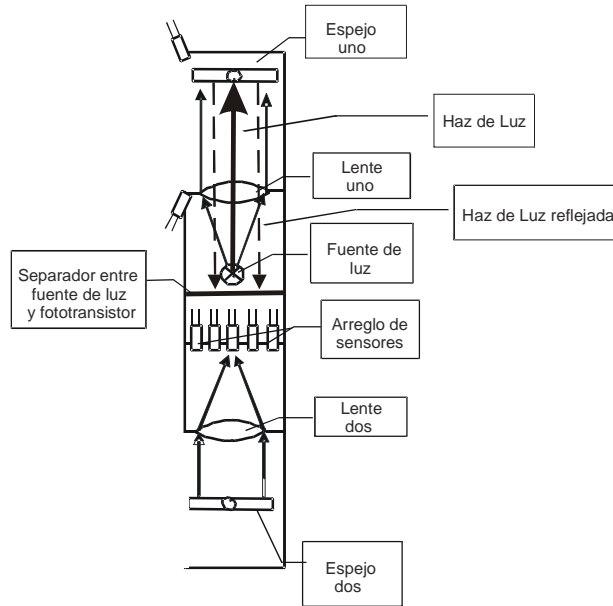


Figura 5.6: Placa limitadora entre fuente de luz y fototransistor

se puede observar en la Fig. 4.13. Es importante hacer énfasis que la sincronización tanto del sensor de acotamiento como del fototransistor determinan junto con la rotación del espejo plano superior parte importante de la información que se requiere para determinar computacionalmente la distancia del obstáculo. En la Fig. 5.13 es posible observar la respuesta experimental tanto del sensor de acotamiento como del fototransistor. En la gráfica se identifica que existe un desfase entre cada señal. La respuesta del sensor es la primera que ocurre, debido a que el haz de luz de la fuente de halógeno, se proyecta primero en él sensor de acotamiento y posteriormente en el obstáculo.

5.1.2. Respuesta del *rangefinder* en diferentes obstáculos

Con la finalidad de analizar la respuesta del *rangefinder* en presencia de diferentes obstáculos y con diferentes colores, es posible observar en las siguientes figuras estas respuestas. En la Fig. 5.14 se puede observar la señal del fototransistor sobre una pared de color azul a una distancia de 30 cm.

En la Fig. 5.15 se puede observar la señal del fototransistor sobre una barra de latón a una distancia de 30 cm.

En la Fig. 5.16 se puede observar la señal del fototransistor sobre una superficie de terciopelo en color negro a una distancia de 30 cm.

En la Fig. 5.17 se observa una comparación de la Fig. 5.14 y 5.15. Es importante mencionar que la barra de latón muestra en la mayor parte de su superficie impurezas que se reflejan en la respuesta del fototransistor.

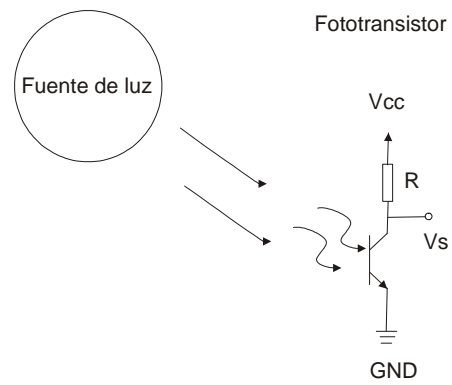


Figura 5.7: Variación de V_s a partir del valor de intensidad en la fuente de luz

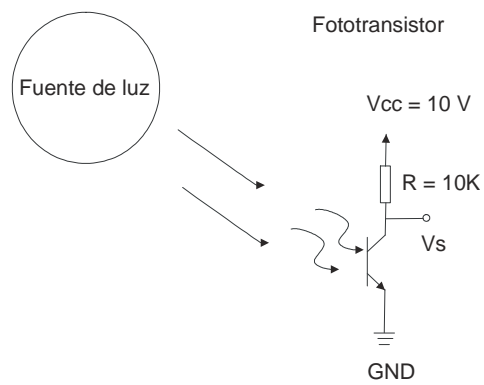


Figura 5.8: Fototransistor con valores de funcionamiento

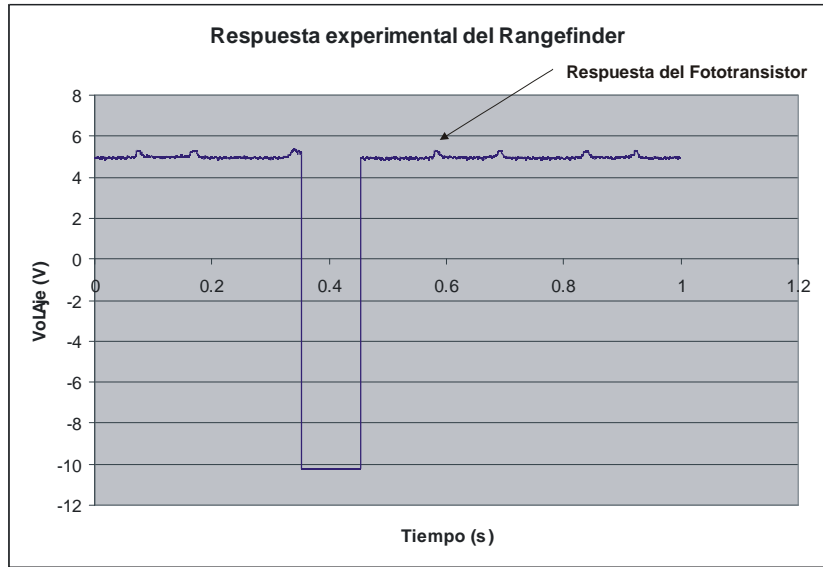


Figura 5.9: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 50cm

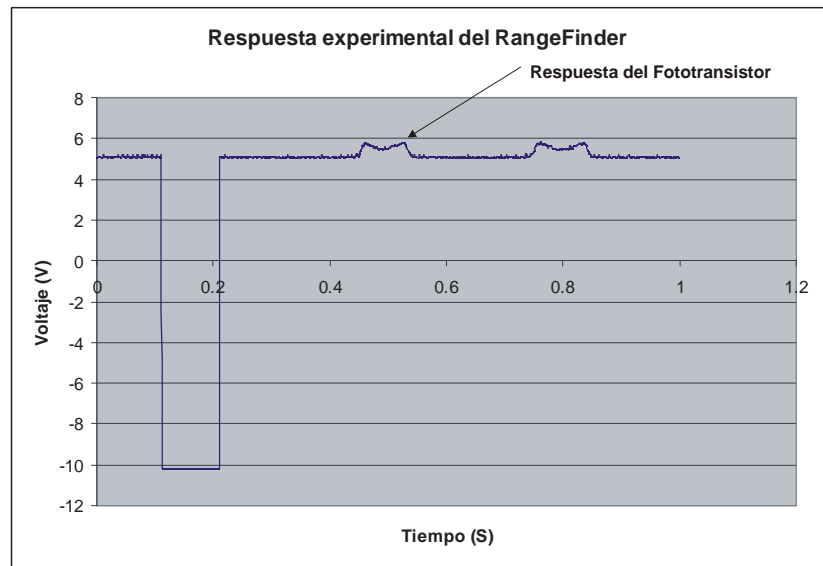


Figura 5.10: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 30cm

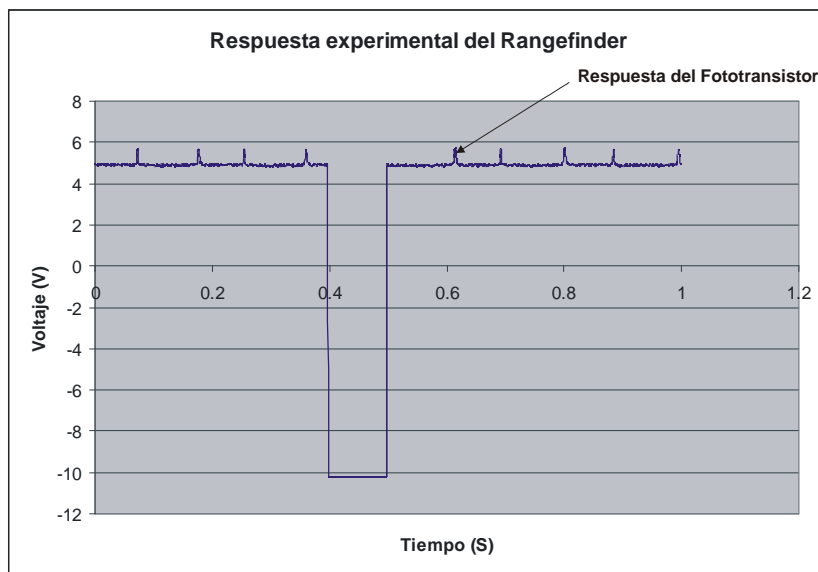


Figura 5.11: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 19.5 cm

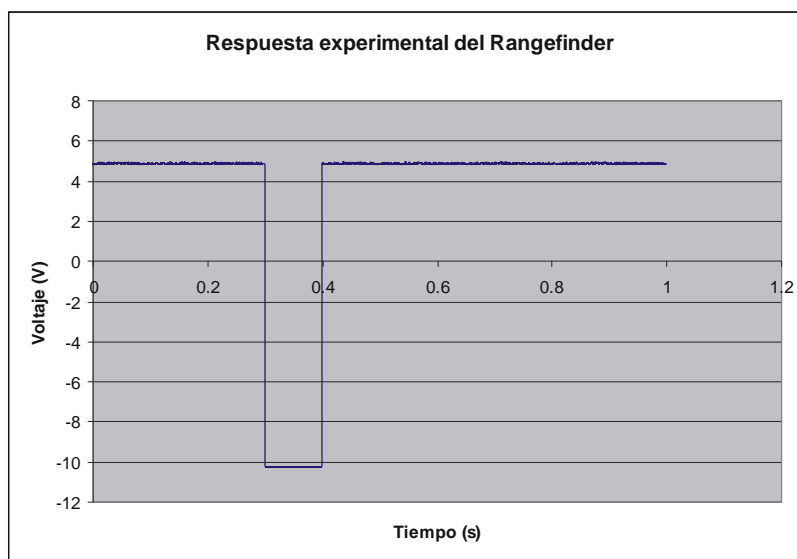


Figura 5.12: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 8 cm

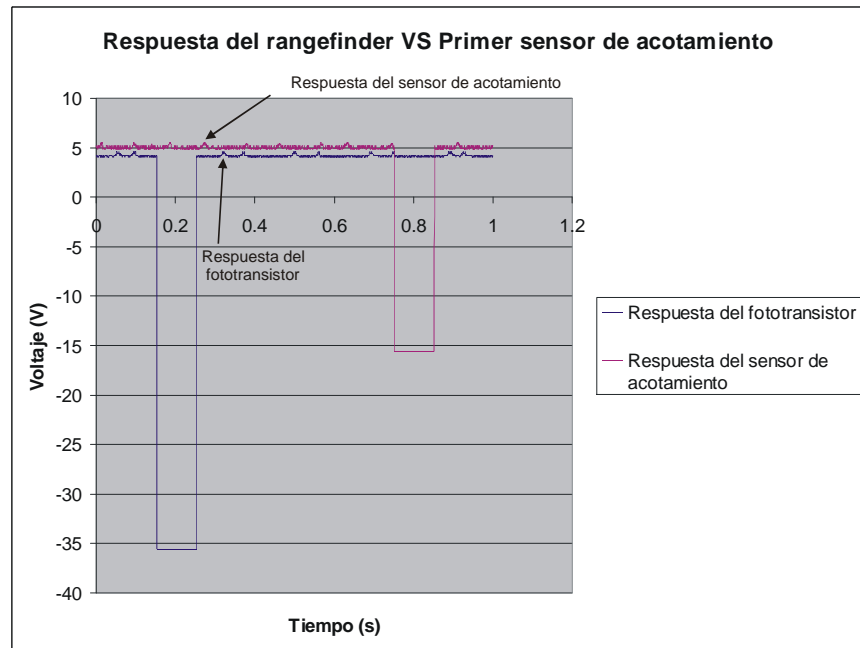


Figura 5.13: Diagrama comparativo de la respuesta del *rangefinder* y del sensor de acotamiento

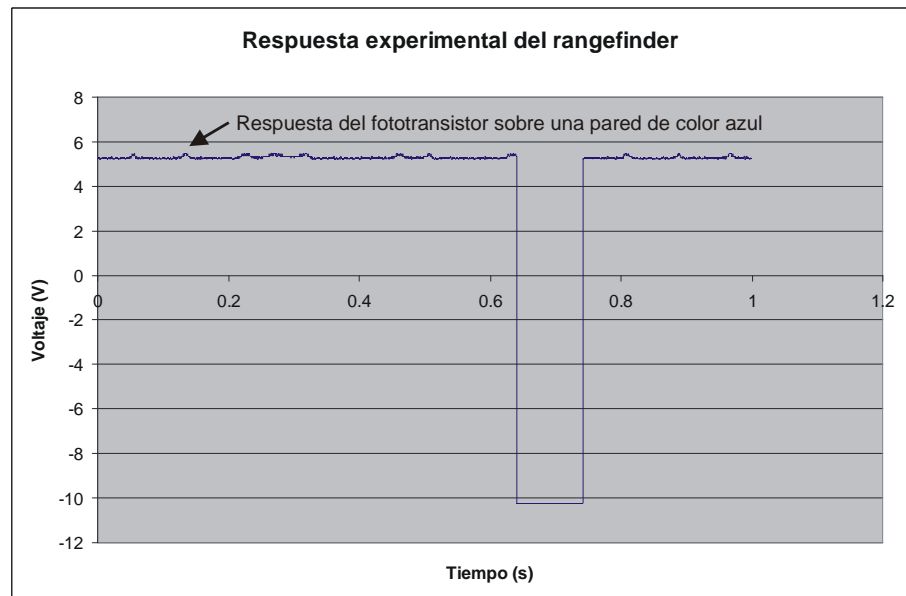


Figura 5.14: Respuesta del *rangefinder* sobre una superficie en color azul

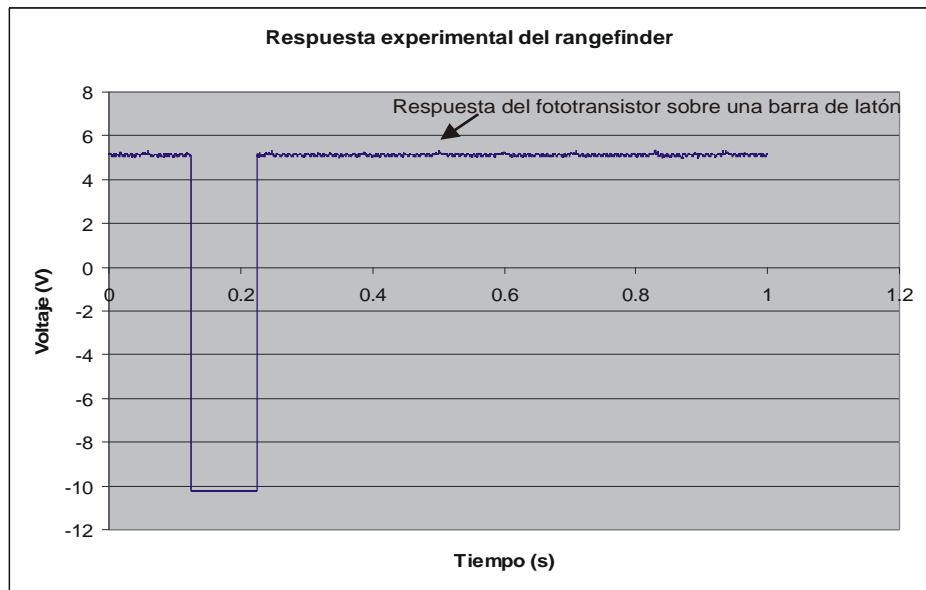


Figura 5.15: Respuesta del *rangefinder* sobre una superficie plana de latón

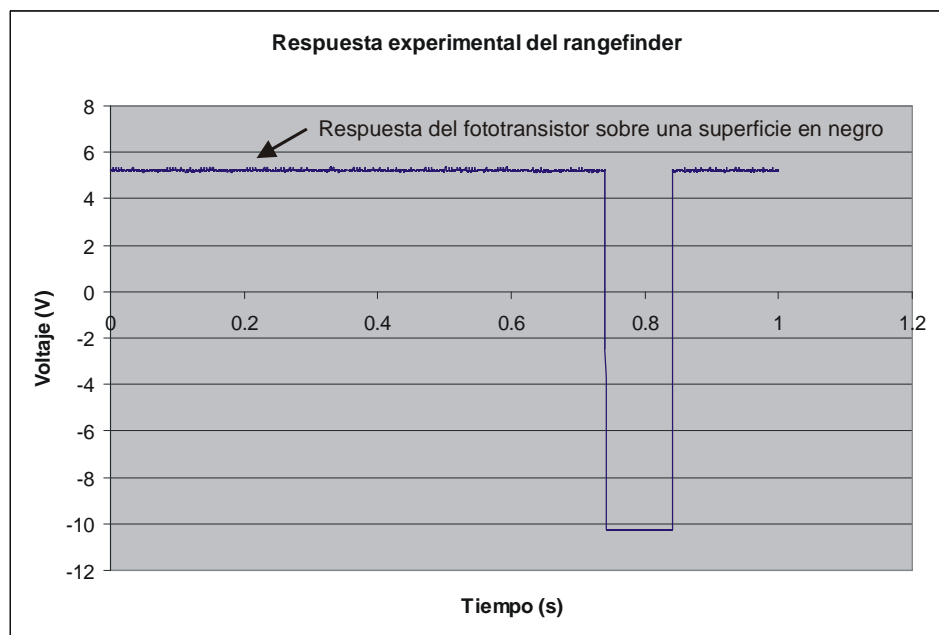


Figura 5.16: Respuesta del *rangefinder* sobre una superficie de terciopelo en color negro

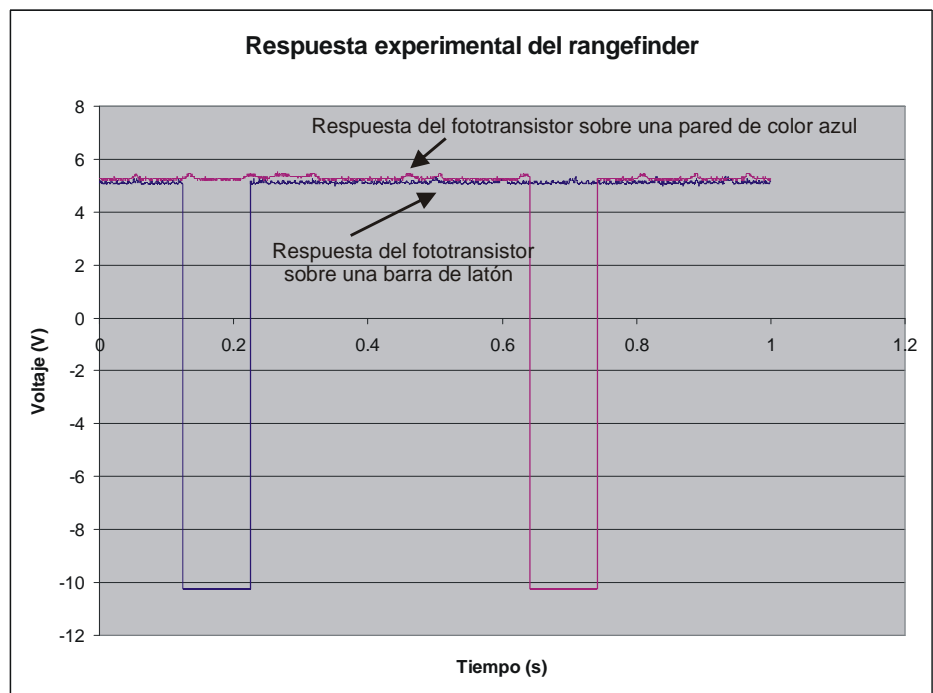


Figura 5.17: Esquema comparativo en la respuesta del fototransistor a una distancia de 30 cm

Capítulo 6

Resultados experimentales finales

Los siguientes resultados experimentales adquiridos del sensor de distancias se obtuvieron realizando pruebas a partir de un desplazamiento angular del espejo plano superior del *rangefinder* y un ángulo de ubicación fijo en el espejo plano inferior. Este desplazamiento angular se obtuvo utilizando un motor a pasos bipolar de la marca *Fuji Electrochemical C.o.*, de 24 V a 18 Ω . Este motor se encuentra acoplado como se observa en la Fig. 6.1.

Los experimentos realizados corresponden a la determinación de un obstáculo a un cierto valor de distancia con respecto al punto de referencia del *rangefinder*. Para determinar estos valores, se diseñó una guía de desplazamiento del obstáculo manteniendo en un punto fijo la ubicación del sensor. Esta guía de desplazamiento se observa en la Fig. ??.

Esta guía de desplazamiento, permite que el obstáculo (en este caso una hoja en color blanco) se desplace en forma vertical con respecto al *rangefinder* y alcanza un desplazamiento máximo de 33 cm. Los resultados obtenidos en las siguientes figuras, nos permite observar la variación de la señal del fototransistor del *rangefinder* a partir de la variación del desplazamiento del obstáculo. Para obtener estos resultados fue necesario utilizar un osciloscopio digital de la marca *Tektronix*®. Éste instrumento permite manipular las señales obtenidas en forma directa con un programa de computo de la misma marca. En la Fig. 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 es posible observar el comportamiento del *rangefinder* a diferentes valores de distancias del obstáculo.

En cada una de las figuras la línea superior corresponde a la señal del sensor de acotamiento superior, el cual permanece fijo en cada momento de desplazamiento del *rangefinder*, esto es posible gracias a la señal del *trigger* que se observa en cada una de las figuras; la línea inferior corresponde a la señal del fototransistor, que varía su comportamiento en desplazamiento y amplitud conforme se aproxima o retrocede el obstáculo. Experimentalmente se obtuvo el valor de la señal del *rangefinder* con respecto al desplazamiento del obstáculo, hasta un valor máximo de desplazamiento del obstáculo de 33 cm. Utilizando el programa de computo de *Matlab*® se obtuvo una gráfica que corresponde al comportamiento del sensor en diferentes posiciones del obstáculo. Esta gráfica se puede observar en la Fig. 6.8.

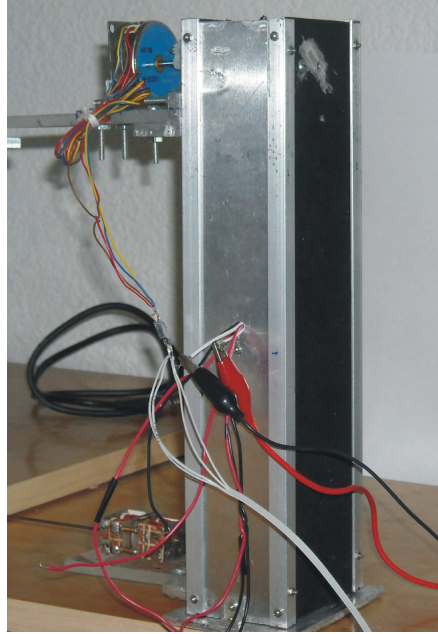


Figura 6.1: Protótipo de *rangefinder* completo

6.1. Amplificación de señal

A partir de los resultados obtenidos y considerando que la aplicación del rangefinder está diseñado para ambientes donde el factor de la distancia del obstáculo es fundamental. Es indispensable mejorar su respuesta, esto es, que el valor máximo de distancia obtenido (33 cm) debe ser mayor. Para alcanzar valores de distancias más grandes en la medición del rangefinder, se requiere incorporar un diseño electrónico que amplifique la señal obtenida del fototransistor. Este diseño electrónico se presenta en la Fig. 6.9.

El amplificador construido a partir del diseño electrónico de la Fig. 6.9, se puede ver en la Fig. 6.10.

A partir de la implementación del amplificador de la señal directamente en el fototransistor del *rangefinder* es posible observar su respuesta en la Fig. 6.14, Fig. 6.11, Fig. 6.12, Fig. 6.13 y Fig. 6.15 que validan que existen un aumento en el valor de la distancia medida por parte del sensor.

A partir de las resultados experimentales obtenidos del *rangefinder*, es posible observar que el aumento en la distancia de la medición de los obstáculos por parte del sensor. Por otro lado el principio de amplificación de la señal conlleva a diseñar un dispositivo electrónico que permita evitar los problemas de ruido eléctrico"generado por fuentes de luz exógenas a la fuente de luz del sensor, incluyendo los problemas en la medición del sensor por señales como el ruido eléctrico"generado por las fuentes de *CA* (**ver Capítulo 1 en la sección de Fototransistores**).

En este trabajo de investigación de desarrollo tecnológico no se implementó tal dispositivo, más sin embargo se tiene en proceso de diseño un filtro *RC* que ha de evitar estos inconvenientes

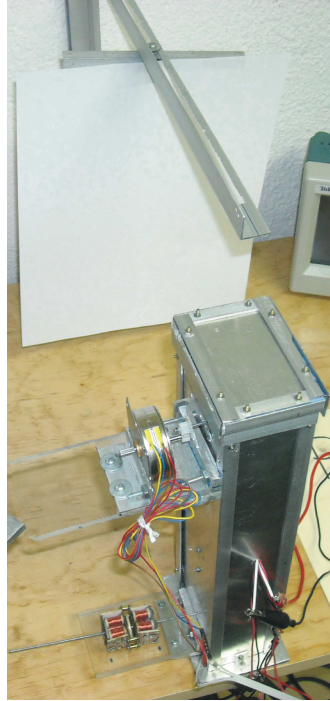


Figura 6.2: *Rangefinder* frente a la guía de desplazamiento del obstáculo

en la medición del *rangefinder* aplicado directamente el ambiente de la planta solar.

6.2. Implementación del rangefinder en el robot móvil

El objetivo en esta sección es realizar la integración de cada uno de los elementos diseñados y fabricados para validar el funcionamiento del rangefinder en la plataforma móvil. En la Fig. 6.16 es posible observar el acoplamiento de los motores a pasos de reluctancia variable, diseñados en el capítulo cuatro. El circuito electrónico de estos motores se encuentra ubicado en la parte central superior de la plataforma móvil. La fuente de alimentación que se menciona en capítulos anteriores corresponde a un par de baterías que se encuentran localizadas en la parte trasera superior de la misma plataforma móvil. El rangefinder se encuentra ubicado en la parte frontal superior del robot móvil contiguo con su electrónica de potencia. En la Fig. 6.17 se observa la integración del sistema en forma completa.

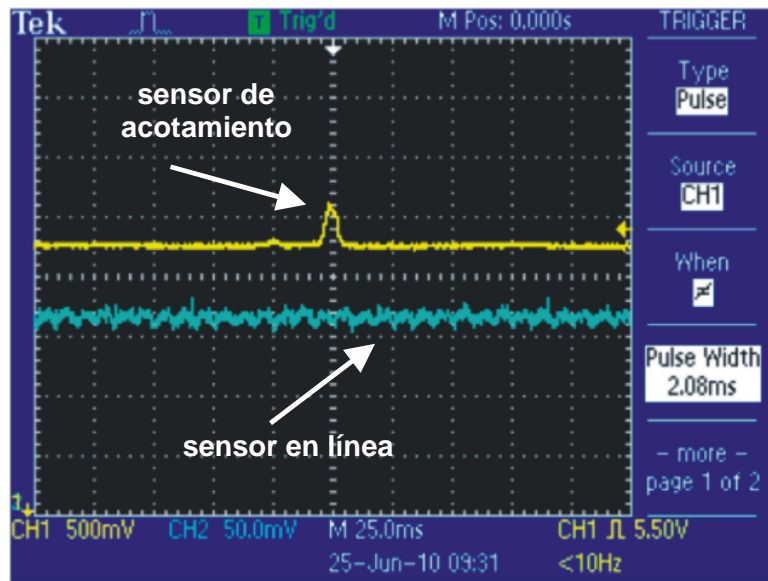


Figura 6.3: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 1 cm

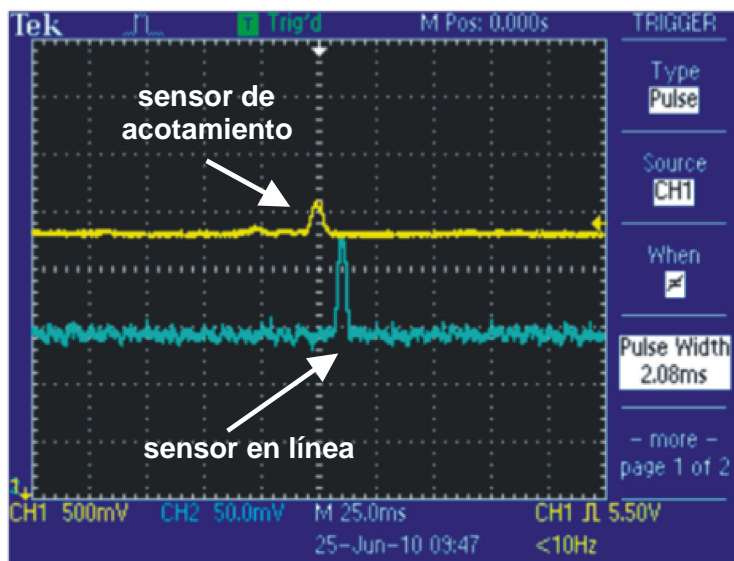


Figura 6.4: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 10 cm

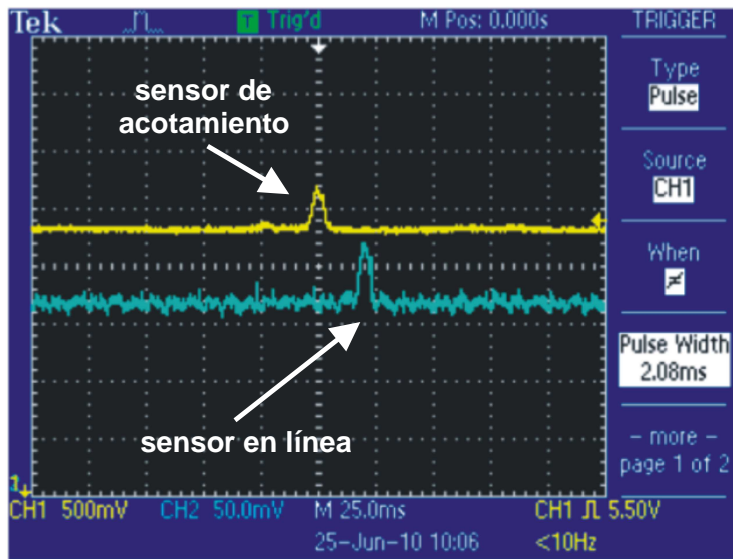


Figura 6.5: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 20 cm

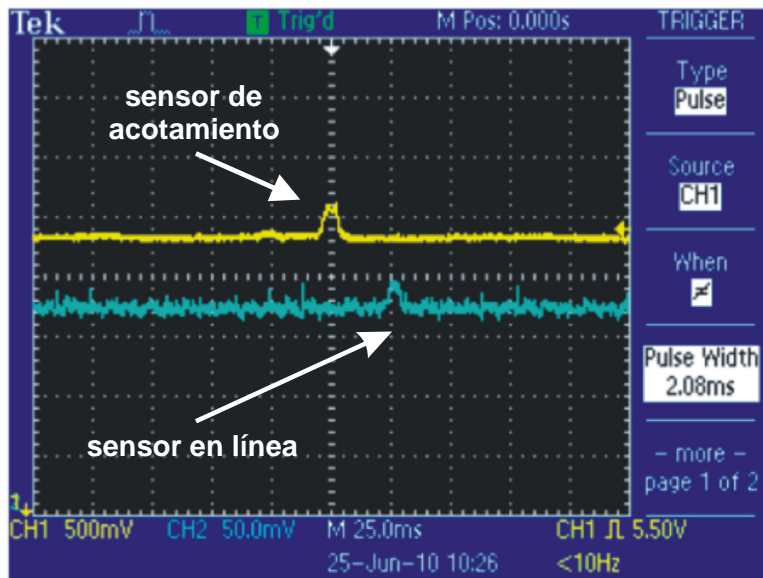


Figura 6.6: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 30 cm

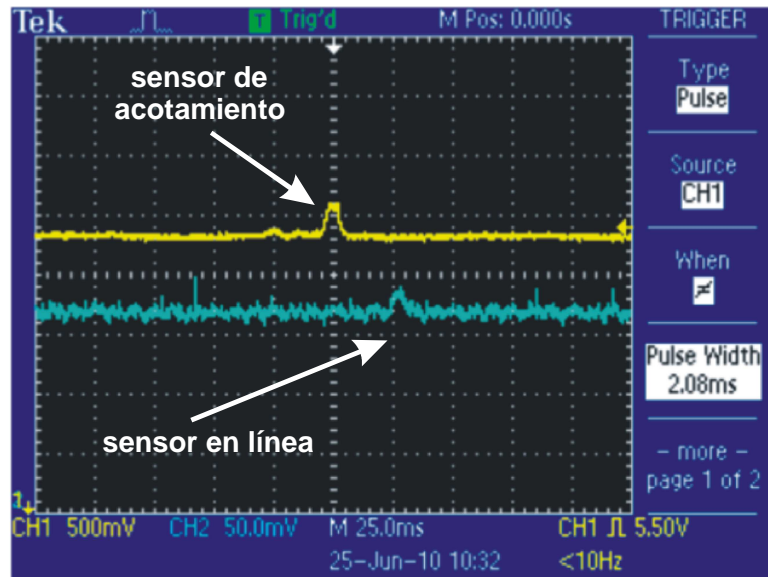


Figura 6.7: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 33 cm

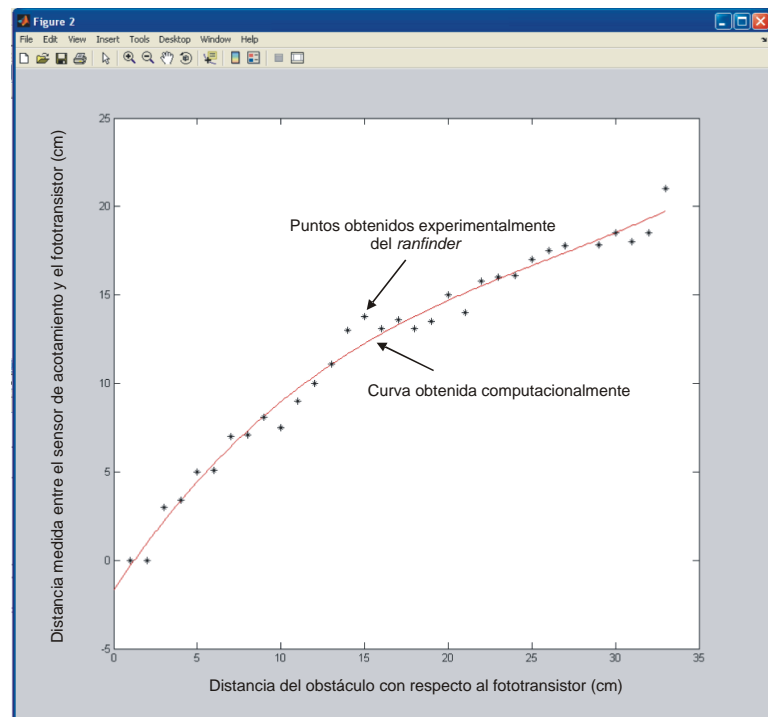


Figura 6.8: Curva que indica el comportamiento del *rangefinder* con respecto a la posición del obstáculo

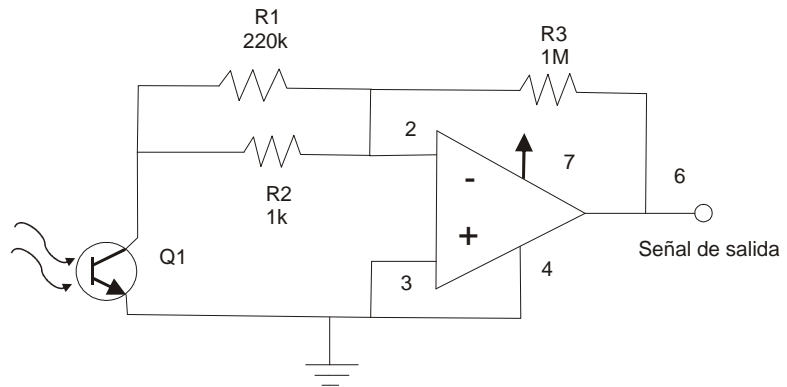


Figura 6.9: Amplificador de señal en el *rangefinder*

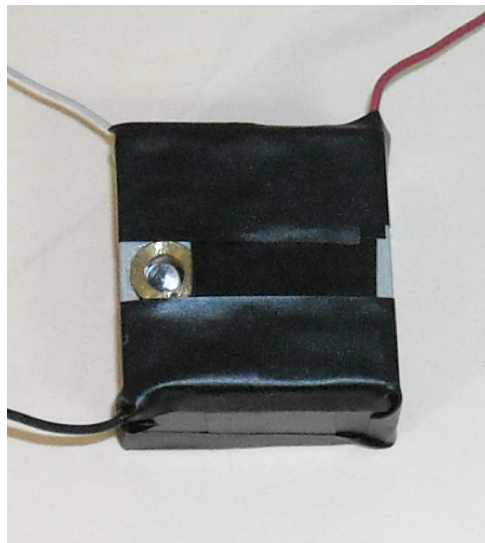


Figura 6.10: Amplificador real

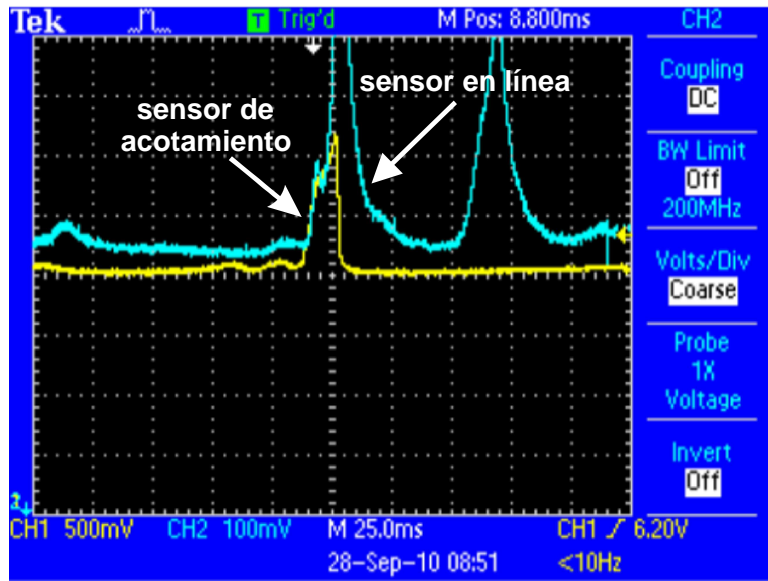


Figura 6.11: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 10 cm

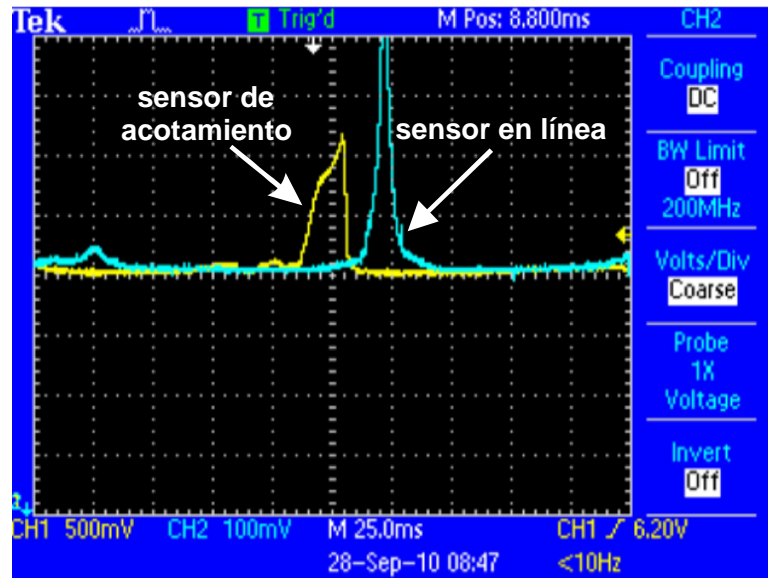


Figura 6.12: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 30 cm

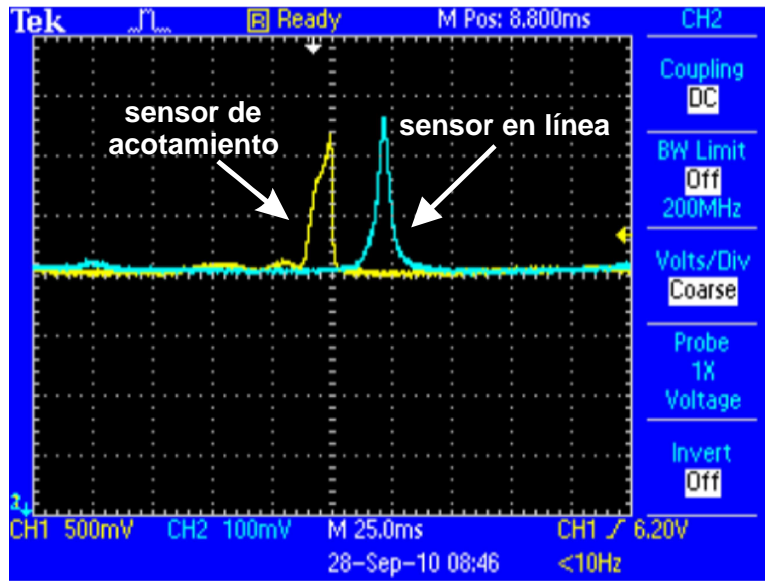


Figura 6.13: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 50 cm

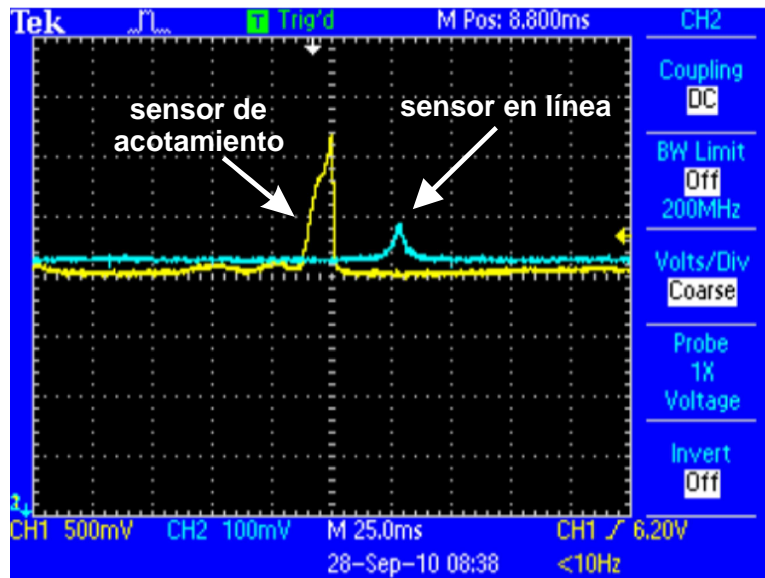


Figura 6.14: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 1 m

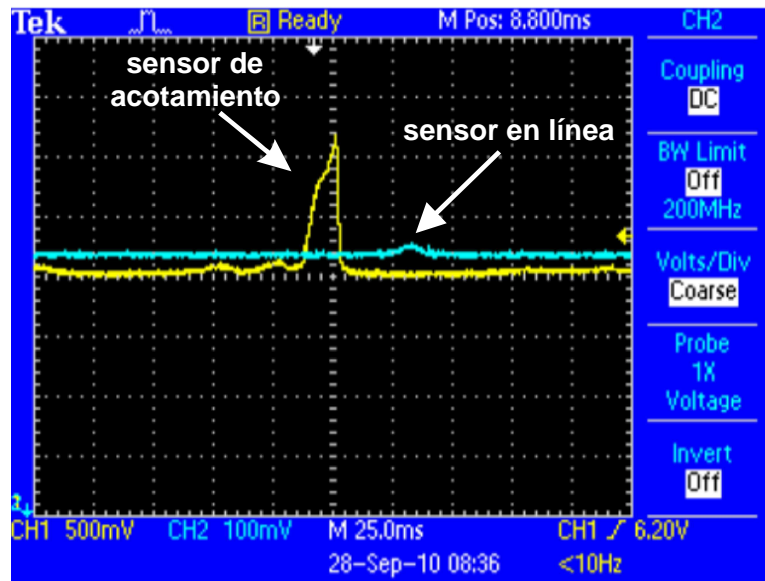


Figura 6.15: Respuesta del *rangefinder* a una distancia de 1.37 m



Figura 6.16: Acoplamiento de los motores a pasos de reluctancia variable en la plataforma móvil

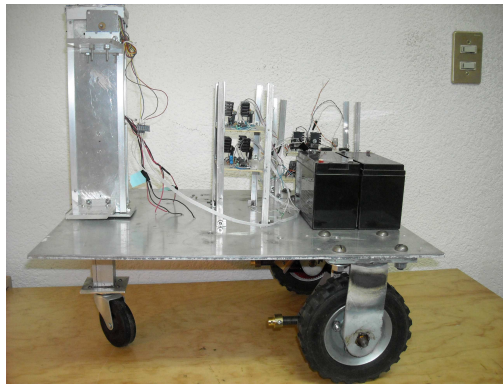


Figura 6.17: Integración del sistema en forma completa

Capítulo 7

Conclusiones, aportaciones y trabajos a futuro

El estudio de los sensores detectores de obstáculos es un campo de investigación que ofrece problemáticas muy interesantes. Como parte de estos problemas se plantea la aplicación de técnicas de funcionamiento que además de ser robustos, permitan ser diseñados minimizando costos para su implementación, tomando en cuenta desarrollos de la teoría de su principio de funcionamiento, dispositivos digitales y la adquisición de datos en tiempo real. Todo esto se necesita para entender de una manera generalizada el estudio de la detección de obstáculos, los cuales son de actualidad y de gran interés académico por su complejidad y potencial aplicación a situaciones reales. Existen una variedad de sistemas que requieren de sensores como el *rangefinder* para la automatización de procesos industriales. Ejemplo de estas aplicaciones son, robots móviles para mantenimiento, celdas de manufactura, fabricas de micro ensamble y numerosas aplicaciones industriales.

En particular, el sensor de distancia diseñado y construído permite estudiar la respuesta del dispositivo para diferentes condiciones de operación, algunos de los cuales se estudiaron en este trabajo de desarrollo tecnológico. La experiencia adquirida ha sido muy interesante, debido principalmente a que se pueden realizar experimentos de identificación, validación de la respuesta del sensor y análisis con perturbaciones. La validación del sensor en aplicaciones reales es importante, ya que con ello se comprueba la efectividad del mismo. Parte esencial del trabajo realizado fue el diseño y la construcción del sensor, así como la determinación de los obstáculos en una aplicación real. En esta etapa fue necesario estudiar el efecto real de fenómenos físicos que no se alcanzaron incluir en el diseño final del protótipo de *rangefinder* como los filtros electronicos en la etapa de amplificación del fototransistor del sensor. La mayor contribución del trabajo realizado fue en la evaluación experimental del sensor que fue construído con una tecnología de bajo costo en diferentes condiciones de operación. La adquisición de los datos del *rangefinder* para la validación de su funcionamiento se realizó con un osciloscopio digital de la marca *Tektonix*[®]. Este instrumento de medición, utiliza un programa de cómputo que permite visualizar en tiempo real los datos medidos y almacenarlos en un formato gráfico.

Los resultados obtenidos en este trabajo de desarrollo tecnológico a nivel experimental fueron muy satisfactorios. Lo cual de alguna manera permitió visualizar que efectivamente que el dis-

ño propuesto en cuanto a la técnica para la detección de obstáculos funciona y es aplicable para un sistema real. Con el trabajo realizado en esta tesis se pretende continuar realizando investigaciones con el prototipo desarrollado que permitan validar teórica y experimentalmente su funcionamiento. En este aspecto se pretende aumentar el número de fototransistores con la finalidad de aumentar la eficiencia del sensor. Cabe mencionar que los resultados obtenidos de este trabajo de investigación no incluyen la adquisición de los datos obtenidos del *rangefinder* y ser utilizados en un programa de computo para determinar computacionalmente la distancia del obstáculo. Así mismo se propone como trabajos futuros el diseño del controlador neuronal para el seguimiento de trayectorias del robot móvil diseñado con la información obtenida del *rangefinder* para implementarlo en una planta solar y realizar la detección de los heliostatos para realizar su mantenimiento.

Las aportaciones obtenidas de esta tesis doctoral de desarrollo tecnológico se mencionan en el siguiente orden:

- El principio de funcionamiento del *rangefinder* presentado es innovador y permite minimizar costos en su diseño y construcción con respecto a los modelos que se utilizan en la mayoría de los trabajos de investigación que se revisaron y que algunos se describen en el capítulo cuatro. La mayoría de los *rangefinder* en su configuración solo utilizan una lente y un espejo rotatorio. En lo particular la ventaja del espejo oscilante permite que el ángulo de escaneo del sensor para determinar obstáculos, pueda aumentar a un valor aproximado de 180°.
- Con respecto al diseño y a su construcción es importante mencionar el aspecto de los costos. En lo particular la mayoría de los *rangefinder* sino es que todos, utilizan en su diseño una fuente de luz como es el láser. Las ventajas que ofrece el láser en este tipo de aplicaciones es bastante conocida, más sin embargo aún en la actualidad los costos en el mercado aún no permiten que sea muy accesibles. Esto repercute en un aumento en los costos del *rangefinder*. Por otro lado la electrónica para controlar el funcionamiento del láser es compleja y así mismo aumenta el costo del mismo. El *rangefinder* presentado utiliza una fuente de luz de halógeno de baja potencia. Lo que reduce el costo en su construcción incluyendo el diseño electrónico para su control. Por otro lado como un agregado se puede mencionar la facilidad de conseguir cada uno de sus componentes.
- El desempeño del *rangefinder* presentado con respecto a otros analizados ciertamente tiene algunas limitaciones como es la distancia máxima medida. En este sentido hay que valorar los siguientes aspectos: Todos estos *rangefinders* utilizan una fuente de luz como es el láser. En este sentido las propiedades de un láser con respecto a una fuente de luz de halógeno es mucho mejor y no es posible compararlas. Otro aspecto a considerar es la dimensión de las lentes. Es importante mencionar que el diametro de las lentes repercute directamente con la medición de la distancia del *rangefinder*. Aumentar el diametro de la lente repercute directamente con la dimensión del espejo, es decir, si se aumentan estos componentes en el diseño del *rangefinder* es posible aumentar la distancia máxima de medición del sensor, pero esto implicaría en un aumento en el tamaño de las dimensiones físicas del *rangefinder* en su diseño.

- En lo particular el diseño de amplificadores de señales requiere por consecuencia un diseño de filtrado en las señales medidas, es decir, que si bien es cierto que un amplificador aumenta el valor del parámetro de la distancia máxima medida en diversos ambientes, también se ve afectado este aumento por la presencia de señales exógenas que afectan el desempeño de una medición máxima del *rangefinder*. En los resultados presentados en este trabajo no fue posible implementar una etapa de filtrado que permitiera obtener una distancia mayor en la medición del sensor. En este aspecto todos los *rangefinder* analizados presentan una etapa de filtrado que mejoran aún más su respuesta.
- En lo particular la implementación de una fuente de luz como un láser en el principio de funcionamiento del *rangefinder* diseñado y construido en esta tesis, permitirá en cierta forma obtener una mayor distancia de los obstáculos medidos y con un mayor rango de escaneo. Esto permitirá que tanto las distancias como la cantidad de obstáculos por parte del sensor en un período de tiempo sea mucho mayor en ambos aspectos. Si a esto se agrega la etapa de filtrado es posible mejorar y aumentar la respuesta del *rangefinder* diseñado.

Por último es importante mencionar que se tiene propuesto realizar un proyecto de investigación en desarrollo tecnológico utilizando el principio del *rangefinder* presentado. Este prototipo consiste en diseñar un cinturón que contenga un *rangefinder* para personas invidentes. Se pretende que el sensor permita detectar obstáculos a diferentes distancias y que utilicen un sistema en base a vibraciones acoplado a los dedos de una mano con diferentes valores de vibraciones a partir de la distancia del obstáculo detectado por parte del *rangefinder*. En cierta forma esto permitirá que el invidente pueda separarse del "bastón clásico que utiliza para detectar los obstáculos y la distancia de los mismo.

Bibliografía

- [1] Energía Solar. (Información-Instalación-Ventajas). 2006.
<http://www.instalacionenergiasolar.com/placas-solares/plantas-de-energia-solar.html>
- [2] John J. Leonard, Hugh F. Durrant-Whyte. "*Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation*". Sea Grant College Program, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, and Department of Engineering Science University of Oxford. January 1992.
- [3] Ari Kilpelä. "*Pulsed Time-of-Flight Laser Range Finder Techniques For Fast, High Precision Measurement Applications*". Department of Electrical and Information Engineering. University of Oulu. January 2004
- [4] Charles K. Kao, Willard S. Boyle, George E. Smith. "*For groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication*", "For the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor". The Nobel Prize in Physics 2009.
- [5] M. Ardaiz, A. Astigarraga, E. Lazkano, B. Sierra, J. M. Martínez-Otzeta. "*Dynamic pan, tilt and zoom adjustment for perception triggered response*". Department of Computer Science and Artificial Intelligence, University of the Basque Country, 2004
- [6] Arras, K. O.; Siegwart, R. Y. "*Feature extraction and scene interpretation for map-based navigation and map building*". Proceedings of the Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing. October 1997
- [7] Carlos Fernández Caramés. "*Técnicas de Navegación de Robots Basados en Sistemas de Medición por Láser*". Departamento de Informática y Automática. Universidad de Salamanca. Septiembre 2007
- [8] J. Enríquez Zárate, Ernst Kussul, Tetyana Baydyk. "*Protótipo de un Rangefinder de bajo costo para un Robot Móvil*". Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico CCADET-UNAM. SOMI XXIII Congreso de Instrumentación. Octubre 2008
- [9] Ollero A. "*Robótica manipuladores y robots móviles*". Marcombo, Barcelona, 2001
- [10] Krzysztof A. Nowakowski. "*Laser beam interaction with materials for microscale applications*". Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Worcester Polytechnic Institute. November 2005.
- [11] Society of Robots. http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/files/TSOP2.pdf

- [12] Peter Hiscocks. "*Modulated Beam Photodetector For Mobile Robots*". Department of Electrical and Computer Engineering Ryerson University. November 2002.
- [13] Hewlett Packard. "*Contrast Enhancement Techniques*". Application Note 964. 1975
- [14] Don Lancaster. "*Active Filter Cookbook*". Howard W. Sams. 1975
- [15] John Bliss. "*Applications of Phototransistors in Electro-Optic Systems*". Motorola Application Note AN-508. 1970
- [16] Mark Stitt and Wally Meinel. "*OPT201 Photodiode-Amplifier Rejects Ambient Light*". Burr-Brown Application Bulletin AB061. 1993
- [17] Michele Frantisek. "*Wideband Photodiode Amplifier*". Wireless World Magazine, Date unknown.
- [18] E. Kussul, T. Baidyk, D. C. Wunsch. "*Neural Networks and Micromechanics*". Springer. August 2010
- [19] Jaime Martínez Castillo, Alejandro Díaz Sánchez, Alfonso Torres Jácome. "*Amplificador de Transimpedancia BiCMOS para Sistemas Ópticos para Altas Frecuencias*". Segundo Congreso Nacional de Electrónica. Septiembre 2002
- [20] Lorena Alvarez Osorio. "*Acondicionamiento de señales bioeléctricas*". Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista. Facultad de Ingenierías. Universidad Tecnológica de Pereira. Abril 2007
- [21] Mark W. Spong, M. Vidyasagar. "*Robot Dynamics and Control*". Primera edición, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [22] B.C. Kuo. "*Sistemas de Control Automático*". Séptima edición, Prentice Hall, 1996.
- [23] Nassim Bahari, Marcelo Becker, Hadi Firouzi. "*Feature Based Localization in an Indoor Environment for a Mobile Robot Based on Odometry, Laser, and Panoramic Vision Data*". ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 3 - pp.266-275. 2008
- [24] Geoffrey Hollinger, Dave Ferguson, Siddhartha Srinivasa, and Sanjiv Singh. "*Combining Search and Action for Mobile Robots*".
- [25] Vitor Sequeira, Joá G. M. G, M. Isabel Ribeiro. "*3D Modelling of in-door scenes using laser range sensing*". MVA'94 IAPR Workshop on Machine Vision Applications Dec. 13-15. pp. 315-318. Kawasaki. 1994
- [26] Héctor C. Vargas. "*Design and Fabrication of Active Tilt-Stage for Laser Rangefinder*". Thesis for the Degree of Bachelors of Science in Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology. June 2009
- [27] Charles F. Bergh, Brett A. Kennedy, Larry H. Matthies, Andrew E. Johnson. "*A Compact, Low Power Two-Axis Scannig Laser Rangefinder for Mobile Robots*". Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology.

- [28] Alireza Saberhari, Shahriar Baradaran Shokouhi. "A Fully Integrated Range-Finder Based on the Line-Stripe Method". College of Electrical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.
- [29] Je-Goon Ryu, Hyeon-Min Shim, Jae-Ho Shin, Eung-Hyuk Lee, Seung-Hong Hong, Pyung-Soo Kim. "A Study on the Correction of Non-Linear Bias Error of an Infrared Range Finder Sensor for a Mobile Robot using Neural Network". GESTS Int'l Trans. Computer Science and Engr., Vol.20, No.1. 2005
- [30] Yoichi Okubo, Cang Ye, and Johann Borenstein. "Characterization of the Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder for Mobile Robot Obstacle Negotiation". Presented at the SPIE Defense, Security + Sensing, Unmanned Systems Technology XI, Conference 7332: Unmanned, Robotic, and Layered Systems. Orlando, FL. April 2009
- [31] M. Bualat, C. Kunz, J. Lavelle, L. Pedersen, S. Schuet. "*Scanning Laser Rangefinder for Accurate Arm Placement and Inspection*". Proc. of 'The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space - iSAIRAS', Munich, Germany. September 2005
- [32] Robert A. MacLachlan, Christoph Mertz. "*Tracking of Moving Objects from a Moving Vehicle Using a Scanning Laser Rangefinder*". Proceedings of the IEEE ITSC. pp. 301-306. September 2006
- [33] R. Orghidan, E.M. Mouaddib, J. Salvi and J.J. Serrano. "Catadioptric single-shot rangefinder for textured map building in robot navigation". The Institution of Engineering and Technology 2007. doi:10.1049/iet-cvi:20065003
- [34] CSP libre de vapor: tecnología seca para ubicaciones áridas. Junio 2010. <http://es.csptoday.com/qa/csp-libre-de-vapor-tecnolog%C3%AD-seca-para-ubicaciones-%C3%A1ridas>
- [35] ECILIMP. <http://www.ecilimp.com/?I%2BD>
- [36] Cleaning Solar Panels with a Robotic Gecko. Enero 2010. <http://www.designworldonline.com/articles/5190/313/Cleaning-Solar-Panels-with-a-Robotic-Gecko.aspx>
- [37] Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado. "*Introducción al estudio de la termoconversión de la energía solar: Generación Eléctrica vía Termosolar*". Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Septiembre 2009.

Apéndice A

Artículos publicados *en extenso*

1. Kussul E. Baidyk T., Enriquez Zárata J., Vásquez R. David. Robot Móvil Guiado Visualmente para Plantas Solares". Memorias del XXII Congreso de Instrumentación SOMI, Monterrey, Nuevo León, México, 1-4, Octubre, 2007.
2. J. Enríquez Zárata, Ernst Kussul, Tatyana Baydyk. "Prototipo de un Rangefinder de Bajo Costo para un Robot Móvil". Memorias del XXIII Congreso de Instrumentación SOMI, Xalapa, Veracruz, México, 1-3, Octubre, 2008.
3. J. Enríquez., E. Kussul., T. Baydyk. "Development of Optical Rangefinder for Mobile Robot". 1st International Congress on instrumentation and Applied Sciences, Cancún, Q.R., México, 26-29, Octubre, 2010.
4. J. Enríquez. "Design and Manufacturing of a Stepper Motor for the Low Cost of Locomotion of Mobile robot". 1st International Congress on instrumentation and Applied Sciences, Cancún, Q.R., México, 26-29, Octubre, 2010.

Así mismo al momento de terminar este trabajo, una publicación internacional está en proceso de revisión.