



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
Facultad de Ingeniería



Diseño de un sistema de percepción del entorno

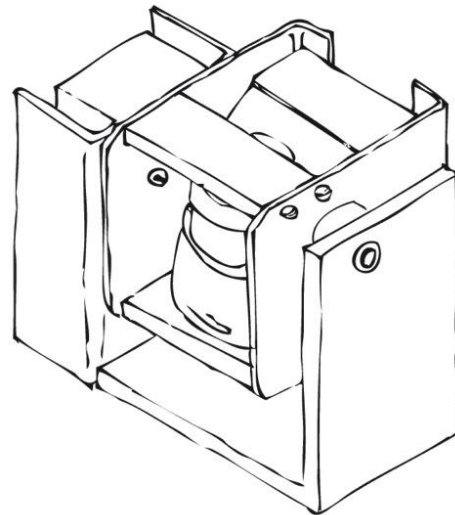
Tesis

que para obtener el título de:

Ingeniero Mecatrónico

Presenta:

Antonio Macel Díaz García



Director de tesis:

M.I. Ulises Martín Peñuelas Rivas

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis ha significado mucho para mí porque en él he puesto tiempo, dedicación y esfuerzo, y representa la culminación de una etapa muy importante de mi vida. Estoy muy agradecido con las personas e instituciones que estuvieron involucradas en mi formación universitaria. Doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por poner a mi alcance un mundo de conocimientos. A la Facultad de Ingeniería y sus profesores, por brindarme la oportunidad de aprender una profesión e inculcarme el gusto por resolver problemas nuevos. Y a mis amigos y compañeros por compartir éxitos y desvelos, y por aprender conmigo el trabajo en equipo.

También quiero agradecer al Proyecto PAPIIT IN115309 "Diseño y construcción de un robot móvil robusto como herramienta para investigación" y a su equipo de desarrollo, del cual formé parte. Sin su apoyo hubiera sido imposible realizar este trabajo.

A mis maestros, los ingenieros Ulises Peñuelas y Yukihiro Minami por ser un ejemplo durante mi formación académica. Por dedicarme su valioso tiempo y ofrecerme sus consejos. Por todo el esfuerzo que pusieron en que pudiera obtener mi título y especialmente por brindarme su amistad. Gracias de corazón.

Gracias a mi papá y mi mamá, por darme la vida. Por enseñarme la importancia del trabajo e inculcarme el gusto por aprender. Gracias por procurar que nada me faltara y por su apoyo incondicional. Gracias por creer en mí.

A mi hermano, mi amigo de toda la vida y una de las personas en quien más confío, gracias por compartir conmigo tu punto de vista, que suele ser diferente al mío y me ayuda a enriquecer mi forma de ver las cosas.

A mi Bere, gracias por acompañarme en este arduo camino, por el apoyo y la confianza. Por estar a mi lado y ser la luz de mis días, por hacerme sentir que lo que hago es importante y por ayudarme a mantener el ánimo y nunca rendirme, te estaré eternamente agradecido.

A mi familia, tanto la de sangre como la de espíritu, muchas gracias por su apoyo y confianza, y por hacer del mundo un buen lugar para vivir.

Y gracias a quien se tome el tiempo de leer este trabajo.

CONTENIDO

Introducción	3
1 Planteamiento del problema	5
1.1 Identificación de la necesidad	6
1.2 Características generales de los sensores de navegación de un robot móvil	6
1.3 Sistemas de medición para obtener información tridimensional del entorno	8
1.4 Propuesta inicial de solución	9
1.5 Objetivos y alcance	9
2 Análisis del problema	11
2.1 Dispositivos comerciales usados para obtener información tridimensional del entorno	12
2.2 Sistemas personalizados desarrollados para reunir información tridimensional del entorno	16
2.3 Obtención de información tridimensional con un telémetro láser de barrido	21
3 Búsqueda de soluciones	27
3.1 Descomposición en subfunciones	28
3.2 Exploración sistemática	30
4 Toma de decisiones	39
4.1 Método del despliegue de la función de la calidad, matriz QFD	40
4.2 Evaluación de conceptos	46
5 Descripción del sistema	55
5.1 Dimensionamiento del actuador	56
5.2 Descripción de las piezas diseñadas para el sistema de percepción del entorno	68
5.3 Control de movimiento del servomotor	79

5.4	Diseño de la fuente de alimentación y el regulador de voltaje para el sistema	83
5.5	Interfaz para controlar el sistema	88
6	Pruebas y resultados	91
6.1	Prueba de ensamble	92
6.2	Medición de la duración del periodo del movimiento armónico simple	93
6.3	Prueba de la amplitud de movimiento	96
6.4	Prueba del movimiento armónico	97
6.5	Pruebas de percepción del entorno	99
	Conclusiones y trabajo a futuro	109
	Referencias	113
	Apéndice	117

INTRODUCCIÓN

Diseñar es una actividad fundamental del ingeniero. Es concebir una idea y planear la forma de hacerla realidad. Es inventar algo para satisfacer una necesidad específica. El diseño es un proceso de toma de decisiones en el que el ingeniero busca la mejor solución a un problema.

En el presente trabajo de tesis se documenta el proceso de diseño de un sistema de percepción del entorno, con el que se quiere ayudar a satisfacer la necesidad de contar con sensores de navegación para un robot móvil que fue desarrollado por un equipo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM durante el desarrollo del proyecto IN115309 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT.

Durante este proyecto se siguió una metodología que ayudó a dirigir el proceso de diseño hacia la solución del problema. Las etapas de esta metodología se presentan a lo largo de seis capítulos. En el primero, se plantea el problema, se identifica la necesidad que se requiere resolver y se presentan los objetivos que se quieren alcanzar. En el Capítulo 2 se analizan algunas formas de obtener información tridimensional y se muestran algunos dispositivos que se usan para esto, agrupándolos en sistemas comerciales y sistemas personalizados. En el Capítulo 3 se aborda la etapa de generación de conceptos y se presentan algunas técnicas empleadas para favorecer la creación de propuestas de solución. En el cuarto capítulo se selecciona uno de los conceptos de solución para continuar con su desarrollo, los métodos de evaluación empleados procuran ser objetivos e imparciales. En el quinto capítulo se presenta la etapa de diseño a detalle en donde se muestran características específicas de los elementos del sistema. En el último capítulo, se presentan las pruebas que se realizaron para verificar el funcionamiento del sistema y se muestran los resultados obtenidos.

Finalmente se presentan las conclusiones que se generaron a partir de los resultados obtenidos y se dan a conocer algunas recomendaciones que pueden servir para perfeccionar las características del sistema de percepción del entorno cuando se continúe con su desarrollo.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del problema

Como parte del proyecto PAPIIT IN115309, se diseñó y construyó en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, un robot móvil robusto para ser usado como herramienta de investigación. Ahora, se requiere que este robot pueda navegar de forma autónoma, por lo que se ha tomado la decisión de desarrollar los sistemas que le permitan percibir su entorno de trabajo.

Al comenzar con el desarrollo de estos sistemas, han surgido preguntas como:

- ¿Qué características deben tener?
- ¿Qué se requiere para navegar de forma autónoma?
- ¿Qué dispositivos existen que puedan usarse para esto?

En el presente capítulo y el siguiente se responde a estas preguntas y se presenta el problema que se busca resolver a lo largo de este trabajo de tesis.

1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

Se ha identificado la necesidad de desarrollar sistemas de percepción del entorno adecuados para ser usados como sensores de navegación del robot móvil diseñado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a lo largo del proyecto PAPIIT IN115309. En la Figura 1.1 se muestra una fotografía de este robot, el que será llamado durante este trabajo, Robot IN115309.



Figura 1.1 Fotografía del Robot IN115309 diseñado y construido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El Robot IN115309, es un robot móvil mediano que cuenta con una computadora a bordo con la que se puede procesar y almacenar la información adquirida por los sensores de navegación. También cuenta con dos baterías de 12 V para proporcionar el voltaje a su sistema de locomoción. Estas baterías pueden usarse para energizar los sensores.

Es importante determinar las características que deben tener los sensores de navegación que se requiere desarrollar, para establecer las metas que se busca alcanzar. A continuación se hablará de algunas de estas características.

1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES DE NAVEGACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL

Es conveniente revisar lo que es un robot móvil autónomo para entender las características que deben tener los sistemas de percepción del entorno que se requiere instrumentar. La *Robotic Industries Association*, RIA, define robot como "...un manipulador programable, con múltiples funciones y control automático,

que puede estar fijo en un sitio o moverse; diseñado para mover piezas, herramientas o dispositivos especiales, por medio de movimientos variables programados para la realización de diversas tareas” [1].

Con base en esta definición, los robots pueden clasificarse, de forma general, en robots estacionarios y robots móviles. Como su nombre lo dice los robots móviles tienen la capacidad de desplazarse por un entorno de trabajo, y cambiar su posición y orientación, por lo que requieren sensores que les permitan conocer este entorno para poder interactuar con él.

Por otro lado, de acuerdo con su grado de autonomía, los robots se pueden clasificar en teleoperados, de funcionamiento repetitivo, y autónomos o inteligentes. Estos últimos son los más evolucionados desde el punto de vista del procesamiento de información. Los robots autónomos son máquinas capaces de percibir, modelar el entorno, planificar y actuar para alcanzar objetivos sin intervención, o con intervención muy pequeña, de supervisores humanos [2].

La navegación autónoma es una de las competencias más desafiantes requeridas para un robot móvil [3]. Para navegar de forma autónoma, el robot necesita tener éxito en la percepción del entorno y de su propio estado, en su localización, en la toma de decisiones y en la acción controlada de sus actuadores. Una de las primeras áreas a considerar en la evolución del diseño de robots móviles y la que se abordará en el presente trabajo de tesis, es la necesidad de contar con sistemas para percibir los elementos del entorno y poder respaldar movimientos inteligentes. Sin sensores, los robots no serían más que autómatas simples que realizan tareas repetitivas una y otra vez en entornos cuidadosamente controlados [4].

El sensado y la percepción son actividades estrechamente ligadas, mediante las cuales los robots interactúan con su entorno y con otros entes. En robótica, la percepción involucra la captación de información sensorial, su tratamiento e interpretación [2]. La habilidad de percibir el entorno es fundamental para los robots móviles autónomos; sin ella la información adquirida mediante sus sensores sería simplemente una colección de datos sin significado [5]. La selección de sensores adecuados es muy importante para lograr una percepción exitosa. En términos generales, los robots móviles autónomos deben navegar a través de ambientes dinámicos y desconocidos, y tener la capacidad de reaccionar ante situaciones imprevistas para garantizar el cumplimiento de la tarea que se les haya asignado. En un ambiente dinámico pueden ocurrir muchos cambios en unos cuantos segundos. Por esta razón, se requiere contar con sensores que recopilen información de varias imágenes del entorno cada segundo. También hay que considerar que los obstáculos que se presenten en la trayectoria del robot pueden tener formas diversas, por lo que es conveniente reunir información tridimensional para que no pase desapercibido algún objeto que sea importante detectar.

1.3 SISTEMAS DE MEDICIÓN PARA OBTENER INFORMACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL ENTORNO

Existen diferentes sistemas de medición diseñados para obtener información tridimensional del entorno. En el Capítulo 2, se revisarán algunos de estos dispositivos y se clasificarán en dos grupos: los dispositivos comerciales y los dispositivos personalizados.

Los dispositivos comerciales son usados en diferentes aplicaciones, entre las cuales están: Ingeniería inversa, exploración de túneles y minas, investigación forense, documentación de patrimonio cultural, digitalización de piezas para diseño asistido por computadora y diseño de productos, y digitalización para áreas de Arquitectura y Topografía.

Por otra parte se encuentran los dispositivos personalizados, que son diseñados y construidos por equipos de desarrollo de robots móviles. Como se verá en el Capítulo 2, los dispositivos personalizados son los que satisfacen de mejor forma los requerimientos de este proyecto, por lo que se ha propuesto el diseño de uno de estos dispositivos.

Una de las primeras situaciones que se debe considerar para el desarrollo de sistemas personalizados, es la necesidad de contar con algún dispositivo que pueda medir la distancia a objetos desde el punto de mira. Estos dispositivos se conocen como telémetros. Es común encontrar que se usen telémetros láser de barrido para desarrollar sistemas de percepción del entorno. Estos dispositivos emplean un rayo láser para medir la distancia a los objetos en un plano de medición. Para esto, emplean un espejo rotatorio que desvía el láser emitido. Al usar telémetros de barrido el problema de percibir el entorno se reduce a buscar la forma de generar información tridimensional a partir de la información 2D obtenida por el telémetro. Para lograr esto se puede provocar un movimiento que permita obtener diferentes planos de medición para conseguir un espacio de información tridimensional.



Figura 1.2 Telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo.

La alternativa de construir un sistema propio resulta interesante para el equipo encargado del desarrollo del Robot móvil IN115309, ya que cuenta con un telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo [6], que tiene características favorables para el desarrollo de un sistema de percepción del entorno como el que se necesita. Este dispositivo se muestra en la Figura 1.2.

1.4 PROPUESTA INICIAL DE SOLUCIÓN

El equipo de desarrollo del Robot IN115309 ha decidido usar el telémetro láser UBG-04LX-F01 con que cuenta para construir un sistema de percepción del entorno que ayude a su robot a navegar de forma autónoma. Esta condición se tomará como punto de partida para el presente trabajo de tesis.

El problema que se aborda es el de diseñar un sistema de percepción del entorno capaz de recopilar información útil para ser usada en la navegación de un robot móvil autónomo.

Dentro de este trabajo también se propone la construcción de un modelo funcional que permita evaluar el desempeño del sistema y demostrar la validez de las ideas planteadas.

1.5 OBJETIVOS Y ALCANCE

Se requiere diseñar un sistema de percepción del entorno que utilice un telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo, para ayudar a que el Robot IN115309 pueda navegar de forma autónoma. Con el desarrollo de este sistema se beneficiará al equipo de desarrollo de este robot, así como a la comunidad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que esté interesada en la investigación de robótica móvil. Durante el desarrollo del sistema se busca alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivo principal

Diseñar un sistema de percepción del entorno que obtenga información tridimensional a partir de las mediciones realizadas con un telémetro láser de barrido UBG-LX04-F01 de la marca Hokuyo.

Objetivos particulares

Diseñar un sistema que recopile información que pueda emplearse para la navegación autónoma del robot móvil en ambientes dinámicos.

Brindar al equipo de desarrollo del robot IN115309 la posibilidad de efectuar tareas como seguimiento de objetos, evasión de obstáculos y construcción de mapas y auto-localización, conocida como SLAM por las siglas en inglés de *Simultaneous Localization And Mapping*.

Seguir una metodología de diseño que facilite el desarrollo del sistema de percepción del entorno.

Los alcances del proyecto abarcan desde el desarrollo del concepto del sistema de percepción del entorno, hasta el diseño de detalle y la construcción de un modelo funcional que sea capaz de recopilar información tridimensional del entorno. El desarrollo de los algoritmos de navegación y la utilización de la información obtenida para aplicaciones posteriores está fuera de los alcances de este trabajo.

Los esfuerzos se dirigirán a buscar la mejor solución para el desarrollo de un sistema que cumpla con las necesidades de los usuarios. En los siguientes capítulos se avanzará a lo largo de una metodología de diseño que incluye las etapas de desarrollo de conceptos, evaluación y selección de alternativas, y diseño de detalle.

CAPÍTULO 2

Análisis del problema

En este capítulo se revisarán las características de algunos sistemas usados para reunir información tridimensional del entorno. Estos sistemas se clasificaron en dos categorías; la primera corresponde a los sistemas que se pueden adquirir en el mercado y que son fabricados por compañías especializadas, y la segunda corresponde a los sistemas personalizados diseñados por equipos de desarrollo de robótica móvil. Con esto se busca validar la decisión de diseñar un sistema personalizado que utilice el telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01.

Posteriormente se analizarán algunas de las opciones que existen para obtener información tridimensional con base en las mediciones realizadas con telémetros láser de barrido.

Finalmente se revisarán de forma breve algunas características del telémetro seleccionado para realizar las mediciones de distancia.

2.1 DISPOSITIVOS COMERCIALES USADOS PARA OBTENER INFORMACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL ENTORNO

En este apartado y en el siguiente, se revisarán algunos sistemas empleados para adquirir información tridimensional del entorno. Los sistemas que se muestran a continuación han sido desarrollados por diferentes empresas y pueden adquirirse en el mercado. Por esta razón, se les ha dado la clasificación de dispositivos comerciales.

En primer lugar se revisará el sistema para digitalizar objetos, mostrado en la Figura 2.1. Este sistema es un smartSCAN 3D-HE de la marca Breuckmann [7], emplea luz halógena para proyectar una serie de patrones de franjas sobre el objeto que se desea digitalizar. Esto provoca que la imagen de los patrones se distorsione. El sistema captura la imagen de los patrones distorsionados con cámaras digitales CCD (*Charge-coupled device*) de alta resolución, para conocer la forma del objeto [8]. Esta idea se ilustra en la Figura 2.2. El smartSCAN 3D-HE puede realizar mediciones en un rango de 100 a 1200 *mm* en menos de un segundo y tiene una masa de 4 *kg* [9].



Figura 2.1 Escáner tridimensional smartSCAN 3D-HE de la marca Breuckmann.



Figura 2.2 Patrones de franjas de luz halógena distorsionados al ser proyectados sobre el objeto que se desea digitalizar.

Otro sistema de medición es el MAXscan de la marca Creafom. Es un digitalizador tridimensional manual que usa la tecnología Handyscan 3D™ [10]. Está diseñado para digitalizar superficies grandes para aplicaciones de ingeniería inversa. Para realizar las mediciones, se requiere colocar marcas adhesivas de posicionamiento, una barra de escala, una cruz de referencia y capturar imágenes previas para realizar fotogrametría. Estos elementos se muestran en la Figura 2.3. Una vez que se han realizado estos preparativos, se desplaza el sistema manualmente. Durante la medición, el sensor debe apuntarse hacia el objeto que se desea medir, de modo que se recorra toda su superficie. Este dispositivo tiene una masa de 1.27 *kg* y sus dimensiones máximas son 172 x 260 x 216 *mm* [11]. El sistema se muestra en la Figura 2.4.

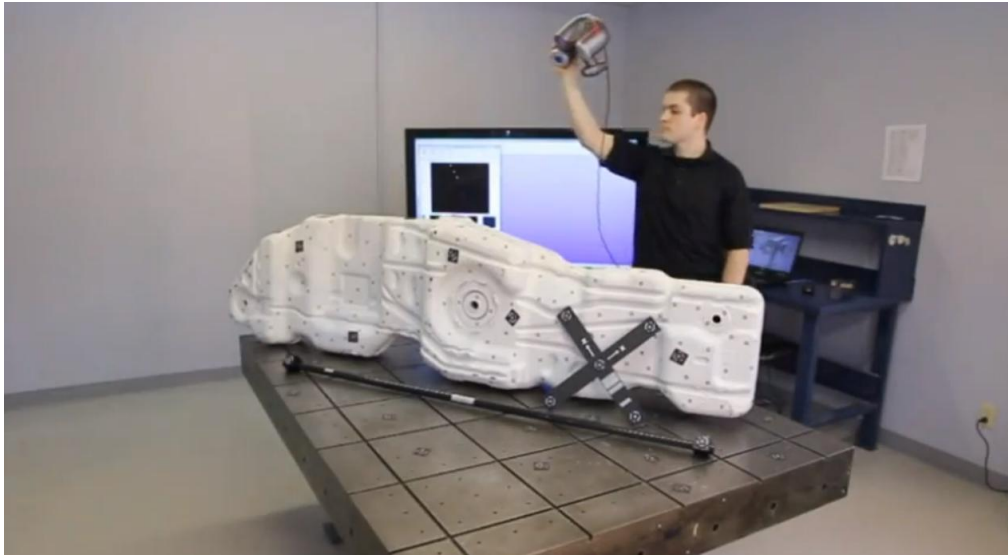


Figura 2.3 Objeto de interés con marcas de posicionamiento, barra de escala y cruz de referencia.



Figura 2.4 Digitalizador manual MAXscan de la marca Creafom.

También se pueden encontrar sistemas de escaneo láser tridimensional como el Focus 3D de la marca FARO, mismo que se muestra en la Figura 2.5. Este sistema utiliza un rayo láser para medir la distancia a la que se encuentran los objetos. El láser es desviado por un espejo rotatorio para realizar barridos y obtener información de planos de medición. Además, el sistema gira sobre un eje de rotación vertical para recopilar información de diferentes planos de medición [12]. Las mediciones realizadas por el láser junto con la información de la posición de las dos rotaciones, hacen posible generar imágenes tridimensionales. Las dimensiones de este dispositivo son 24 x 20 x 10 *cm* y tiene una masa de 5 *kg* [13]. Realizar las medidas le toma algunos minutos y depende de la configuración del sistema [12].



Figura 2.5 Escáner láser Focus 3D de la marca FARO.

Otro sistema interesante es el llamado Virtuoso, un escáner láser tridimensional fabricado por threeRivers y distribuido por Konica Minolta Sensing Americas Inc. Este sistema emplea el método de triangulación, para realizar mediciones tridimensionales del entorno y puede realizar un escaneo en 5 segundos. Tiene una masa de 2 *kg* y sus dimensiones son 248 x 108 x 144 *mm* [14]. En la Figura 2.6 se muestra una imagen de este dispositivo.



Figura 2.6 Escáner láser Virtuoso de la marca threeRivers.

A continuación se describe el sistema de escaneo VMX-450 de la marca RIEGL Laser Measurement Systems, mostrado en la Figura 2.7. Éste es un sistema de alta velocidad diseñado para usarse en plataformas móviles, como se puede ver en la Figura 2.8. Cuenta con un sistema IMU/GPS, que integra una unidad de medición inercial y un sistema de posicionamiento global [15]. El IMU/GPS mide la posición y la orientación de la plataforma móvil. El GPS cuenta con una estación base y un módulo que se coloca a bordo de la plataforma móvil. Este sistema de escaneo láser incluye también una plataforma rígida con sistema de suspensión, en donde pueden colocarse cámaras digitales sincronizadas para capturar imágenes. Sus dimensiones son 456 x 1038 x 860 *mm*, tiene una masa de 109 *kg* y tiene un consumo de 400 *W* [16].



Figura 2.7 VMX-450 de la marca RIEGL Laser Measurement Systems.



Figura 2.8 VMX-450 colocado en un automóvil.

Otro dispositivo empleado para realizar mediciones tridimensionales de distancia es la cámara con tecnología de medición de tiempo de vuelo SR4000 de Mesa Imaging. Este dispositivo emplea una fuente interna de iluminación infrarroja, que se proyecta sobre objetos del entorno. El tiempo que tarda la luz infrarroja en llegar al objeto y regresar es conocido como tiempo de vuelo. Este tiempo de vuelo es medido independientemente por cada uno de los píxeles del sensor, lo que permite obtener las mediciones de distancia de cada uno simultáneamente. La SR4000 se muestra en la Figura 2.9. Sus dimensiones son 65 x 65 x 68 mm, y puede capturar más de 30 imágenes por segundo con resoluciones superiores a 25 mil píxeles [17]. Este sensor tiene características interesantes, sin embargo, su costo es un inconveniente considerable. Es posible conseguirlo por 4295 dólares en tiendas de robótica en Estados Unidos [18].

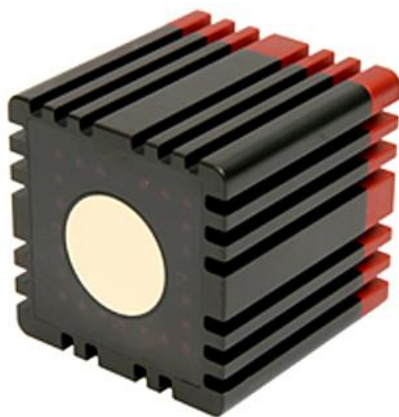


Figura 2.9 SR4000 de la marca Mesa Imaging.

Existen también sistemas construidos por equipos de desarrollo de robótica móvil. Estos dispositivos están diseñados para tener características que se ajusten a las necesidades particulares de cada equipo. En el siguiente apartado se hablará de estos dispositivos personalizados.

2.2 SISTEMAS PERSONALIZADOS DESARROLLADOS PARA REUNIR INFORMACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL ENTORNO

Otra posibilidad para obtener información tridimensional del entorno es construir sistemas propios. Algunos desarrolladores de robótica móvil han optado por esta alternativa porque les permite abatir costos y poner en funcionamiento sistemas que se adapten mejor a sus necesidades. Es común encontrar que se empleen telémetros láser de barrido para fabricar estos sistemas. Los telémetros se emplean para medir la distancia a la que se encuentran los objetos presentes en el entorno de trabajo.

El LMS-200 [19], de la marca SICK, y el URG-04LX [20], de la marca Hokuyo son dos telémetros de barrido populares para aplicaciones de robótica móvil [21]. En la Figura 2.10 y la Figura 2.11 se muestran imágenes del LMS 200 y del URG-04LX respectivamente.



Figura 2.10 Telémetro láser de barrido LMS-200 de la marca alemana Sick.



Figura 2.11 Telémetro láser de barrido URG-04LX de la marca japonesa Hokuyo.

Estos telémetros láser de barrido poseen características interesantes para aplicaciones de robótica móvil como son su poco peso, rapidez de medición, bajo consumo de energía, alta precisión y dimensiones reducidas. Algunas de las características del LMS 200 y el URG-04LX se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Comparación de algunas especificaciones de los telémetros láser de barrido LMS-200 y URG-04LX.

	Unidades	Sick LMS-200	Hokuyo URG-04LX
Rango máximo	<i>m</i>	80	4
Resolución	<i>mm</i>	10	1
Ángulo de escaneo	°	180	240
Resolución angular	°	1*	0.36
Rapidez de medición	<i>escaneo/s</i>	75	10
Interfaz con la PC		RS-232/RS-422	USB/RS-232C
Rapidez de transferencia de datos	<i>kbps</i>	9.6 – 500	12,000 (USB) 19.2-750 (RS-232C)
Dimensiones	<i>mm</i>	155x156x210	50x50x70
Masa	<i>kg</i>	4.5	0.16
Consumo de energía	<i>W</i>	30	4.0 (máximo)

*Nota: En modo de escaneo entrelazado, la resolución angular del sensor es 0.5° o 0.25

Se pueden encontrar artículos científicos que hablan de sistemas diseñados para obtener información tridimensional por medio de mediciones realizadas con telémetros láser de barrido. Es recomendable revisar la información disponible para conocer mejor esta alternativa. Más adelante se hablará de algunos sistemas personalizados de los que se ha encontrado información, pero antes se definirá un sistema de referencia para facilitar la explicación de algunas ideas.

En la Figura 2.12 se muestra un sistema de referencia que consiste en tres ejes, que se denominarán: transversal, longitudinal y vertical. Se le llamará eje transversal al que va de lado a lado del telémetro y eje longitudinal al que apunta hacia el frente del sensor. Ambos ejes están contenidos en el plano de medición del telémetro y son perpendiculares. Al eje que es normal al plano de medición se le llamará eje vertical. Se establecerá como origen del sistema de referencia el punto de intersección de los tres ejes, que es el punto en donde el espejo desvía el rayo láser.

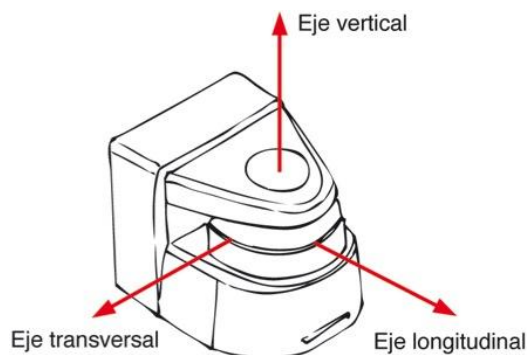


Figura 2.12 Sistema de referencia de tres ejes: vertical, longitudinal y transversal.

En Alemania, en el *Fraunhofer Institute for Intelligent Analysis and Information Systems* [22], se ha desarrollado el sistema de escaneo tridimensional que se muestra en la Figura 2.13. Este sistema está basado en un telémetro LMS291 de la marca SICK y emplea un servomotor para realizar una rotación alrededor del eje transversal del telémetro. Su campo de visión máximo es de 180° en sentido horizontal y 124° en sentido vertical, con resolución angular de 0.25° y precisión de $\pm 15 \text{ mm}$ [23]. La duración de un escaneo tridimensional completo va desde 3.2 s, con una resolución de 1° , hasta 26.64 s, para la resolución máxima de 0.25° . Las dimensiones del sistemas son $284 \times 286 \times 166 \text{ mm}$ y pesa 7.4 kg [24]. Tiene un rango máximo de medición de 80 m y funciona con una fuente de alimentación de 24 V de corriente directa.



Figura 2.13 Sistema de escaneo tridimensional desarrollado por la sociedad Fraunhofer, en Alemania.

En la Figura 2.14 se muestra otro sistema de escaneo tridimensional, éste está basado en un telémetro de barrido URG-04LX de la marca Hokuyo. El telémetro está montado directamente en una unidad *pan-tilt* que permite tener diferentes configuraciones para el barrido tridimensional [25]. Su campo de visión es de $270^\circ \times 248^\circ$ con una resolución de 0.36° . La precisión depende de la distancia medida y es cuando menos de $\pm 2\%$ de la distancia. Un barrido tridimensional completo, con la máxima resolución, tarda 50 s. Sus dimensiones son $80 \times 120 \times 75 \text{ mm}$ y tiene una masa de 350 g . Tiene un rango de medición de 4096 mm .



Figura 2.14 Sistema de medición tridimensional basado en un telémetro URG-04LX de la marca Hokuyo.

También se ha desarrollado un sistema basado en un telémetro de barrido URG-04LX de la marca Hokuyo en el *ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems*, en Sydney Australia [26], [27]. Este sistema está diseñado para usarse a bordo de un robot llamado Redback [28], y realizar escaneos tridimensionales de interiores. Este robot, junto con el sistema de escaneo tridimensional, se muestra en la Figura 2.15. El sistema genera un giro sobre el eje longitudinal del telémetro. El giro es provocado con un servomotor AX-12 de la marca Robotis. El propósito de generar el movimiento alrededor del eje longitudinal es que la zona de mayor densidad de medición se encuentre directamente frente al robot y que el mecanismo de movimiento quede fuera del campo de visión del telémetro, de modo que no lo obstruya. Esto permite aprovechar todas las mediciones. Su consumo de potencia es menor a los 5 W y realiza barridos tridimensionales completos en 20 s.

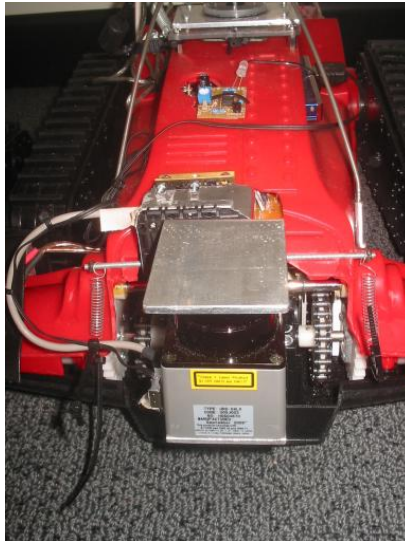


Figura 2.15 Sistema para realizar mediciones tridimensionales desarrollado en el *ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems*.

En el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, España, se ha construido un sistema de escaneo tridimensional [29], basado en un telémetro láser de barrido UTM-30LX de la marca Hokuyo [30]. El sistema emplea un riel circular para generar una rotación alrededor del eje transversal del sensor sin obstruir su campo de visión. Las dimensiones máximas de este sistema son 182 x 80 x 191 mm y pesa 850 g. Su rango de medición es el mismo que el del UTM-30LX, que es de 0.1 a 30 m. Funciona con una fuente de alimentación de 12 V, y tiene un consumo nominal de potencia de 14.4 W con picos de 33.6 W. La rotación sobre el eje vertical tiene una amplitud máxima de 270° y una resolución máxima de 0.25°. La rotación sobre el eje transversal tiene una amplitud máxima de 129° y una resolución configurable

desde 4.16129° hasta 0.067367° . La velocidad de escaneo tridimensional depende de la resolución de la rotación sobre el eje transversal, tarda 95.75 s con la resolución máxima y 1.55 s con la mínima. Este sistema es comercializado por la empresa Ingeniería Uno y está disponible para su compra por 10615€ [31]. Este sistema de escaneo se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Sistema de escaneo tridimensional comercializado por la empresa Ingeniería UNO

Los sistemas personalizados presentan características que son favorables para aplicaciones de robótica móvil. En general son más ligeros, compactos y tienen menor costo que los sistemas comerciales, por lo que se ha decidido diseñar un sistema personalizado para resolver el problema planteado. Para realizar las mediciones de distancia se usará el telémetro con que cuenta el equipo de desarrollo del Robot IN115309. Este dispositivo se muestra en la Figura 1.2.

Una vez que se ha tomado esta decisión, el siguiente paso es analizar las alternativas para obtener información tridimensional a partir de las mediciones realizadas con un telémetro láser de barrido.

2.3 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN TRIDIMENSIONAL CON UN TELÉMETRO LÁSER DE BARRIDO

Existen diferentes formas de obtener información tridimensional a partir de las mediciones realizadas con un telémetro láser de barrido. Una de ellas es causar un movimiento controlado al telémetro mediante algún actuador. Otra forma consiste en colocar el telémetro con cierta inclinación a bordo de una plataforma

móvil y aprovechar el movimiento de ésta para obtener la información de diferentes planos de medición. A continuación se analizará cuáles son los movimientos de rotación o traslación que podrían imprimirse al telémetro para obtener información tridimensional.

La Tabla 2.2 muestra una matriz de combinación de los ejes de referencia definidos en la Figura 2.12 y los movimientos simples que podrían aplicarse sobre estos ejes. Con ayuda de esta tabla se exploraron sistemáticamente las combinaciones con las que es posible obtener información tridimensional.

Tabla 2.2 Combinaciones de movimientos y ejes de rotación que generan información tridimensional.

Movimiento	Eje	Resultado
Rotación	Eje longitudinal	Información tridimensional
	Eje transversal	Información tridimensional
	Eje vertical	La información no es útil
Traslación	Eje longitudinal	La información no es útil
	Eje transversal	La información no es útil
	Eje vertical	Información tridimensional

Como se puede ver en la Tabla 2.2, la información tridimensional se puede obtener cuando se provocan rotaciones sobre el eje longitudinal o el eje transversal. Mientras que una rotación sobre el eje vertical no permitiría reunir información de diferentes planos de medición. Al provocar las rotaciones mencionadas, el telémetro láser puede encontrarse en su posición natural, acostado o apuntando hacia arriba. Al combinar estas rotaciones y posiciones del sensor se pueden obtener cuatro configuraciones para generar espacios de medición. En las Figuras 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 se muestran imágenes que ilustran estas combinaciones.

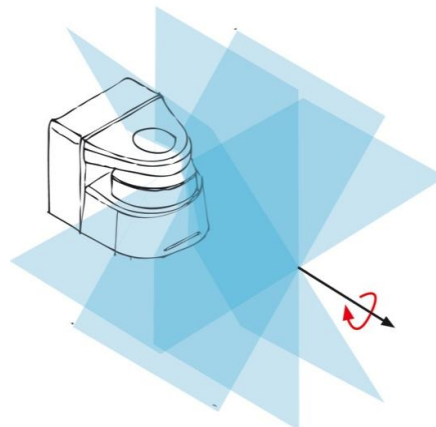


Figura 2.17 Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor en posición natural.

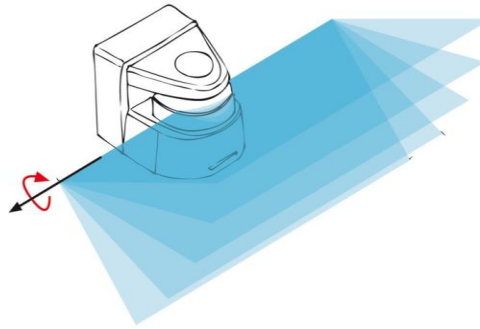


Figura 2.18 Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural.

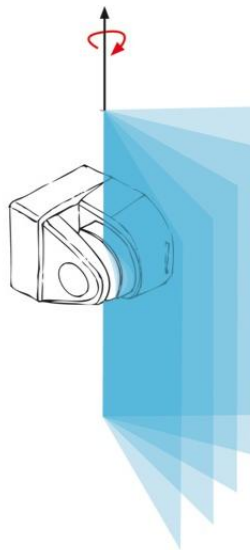


Figura 2.19 Rotación sobre el eje transversal con el sensor colocado sobre uno de sus costados.

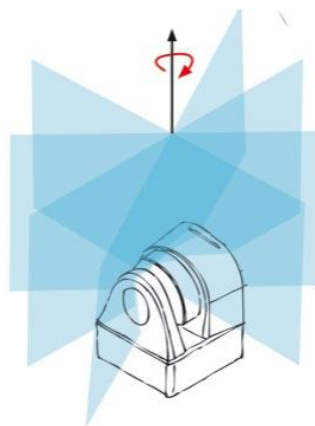


Figura 2.20 Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor apuntando hacia arriba.

Otra posibilidad para recopilar información de diferentes planos de medición consiste en provocar una traslación del sensor a lo largo del eje vertical para obtener planos de medición paralelos. Como en los casos anteriores, el telémetro se puede encontrar en su posición natural, acostado o apuntando hacia arriba. En la Figura 2.21 se muestra el ejemplo que corresponde al caso en el que el sensor se encuentra acostado.

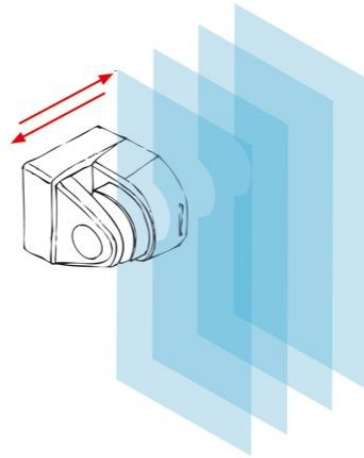


Figura 2.21 Planos de medición paralelos obtenidos al trasladar el telémetro a lo largo del eje vertical.

El mecanismo para obtener información de planos paralelos mediante una traslación del telémetro puede resultar muy voluminoso. Una alternativa para esto es colocar el telémetro con cierta inclinación sobre el robot móvil y aprovechar su desplazamiento. Esta idea se muestra en la Figura 2.22. En este caso no es posible obtener información tridimensional si el robot está inmóvil.

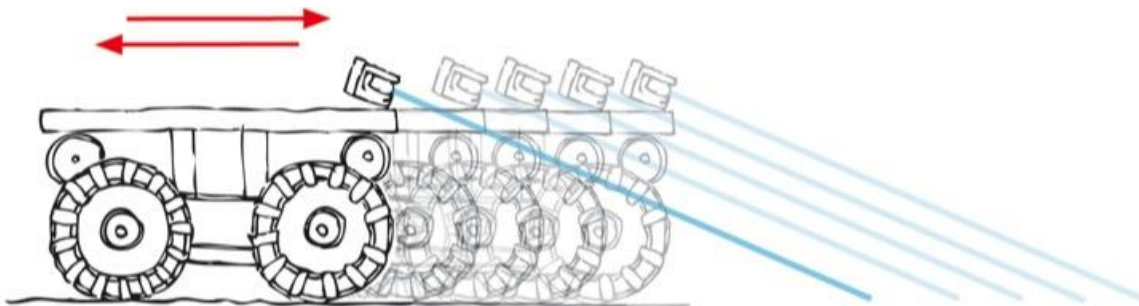


Figura 2.22 Planos paralelos obtenidos al colocar el telémetro con cierta inclinación y aprovechar el movimiento del robot.

Durante este análisis se observó que existen diferentes movimientos que pueden provocarse al telémetro para obtener información tridimensional. Para resolver el problema se ha decidido generar un movimiento al telémetro para obtener información de diferentes planos de medición, y posteriormente interpretar esta información para obtener una representación tridimensional del entorno. En capítulos posteriores se determinarán las características del movimiento con el que se generará la información tridimensional y la forma en que ésta puede ser interpretada.

Como parte final del análisis realizado en este capítulo, se revisarán algunas características del telémetro láser de barrido que fue seleccionado para desarrollar el sistema de percepción del entorno. Este dispositivo es un UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo. Ya que este telémetro será empleado para construir el sistema es conveniente conocer sus características.

Características del telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01

El UBG-04LX- F01 es un telemetro de la marca Hokuyo [6]. Este dispositivo puede realizar 35.7 barridos cada segundo con una resolución de 0.36° . La tecnología que se emplea para medir la distancia entre el sensor y los objetos consiste en emitir ondas de luz con amplitud modulada y detectar la diferencia de fase entre la onda emitida y la recibida después de reflejarse en algún objeto. Los telémetros de este tipo tienen dos espejos rotatorios. Uno de ellos desvía la luz emitida para hacer el barrido y el otro dirige la onda reflejada hacia el dispositivo receptor de luz [32]. El UBG-04LX-F01 se muestra en la Figura 1.2. Algunas de las características de este dispositivo se resumen en la Tabla 2.3 [33]. En la Figura 2.23 se muestran las dimensiones del dispositivo [34].

Tabla 2.3 Algunas especificaciones importantes del telémetro de barrido UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo.

Nombre del producto	Telémetro láser de barrido
Modelo	UBG-04LX-F01
Voltaje de alimentación	12 V CD $\pm 10\%$
Intensidad de corriente	$\leq 370 \text{ mA}$ (Pico de corriente de 700 mA)
Distancia de detección	60 - 4095 mm
Resolución	1 mm
Ángulo de barrido	240°
Resolución angular	0.36° ($360^\circ/1024$ pasos)
Velocidad de medición	28 ms/barrido
Interfaz	RS-232C (19.2, 57.6, 115.2, 500, 750 kbps) USB 2.0
Masa aproximada	185 g (260 g con 1 m de cable)
Dimensiones	60x60x75 mm (ver Figura 2.23)

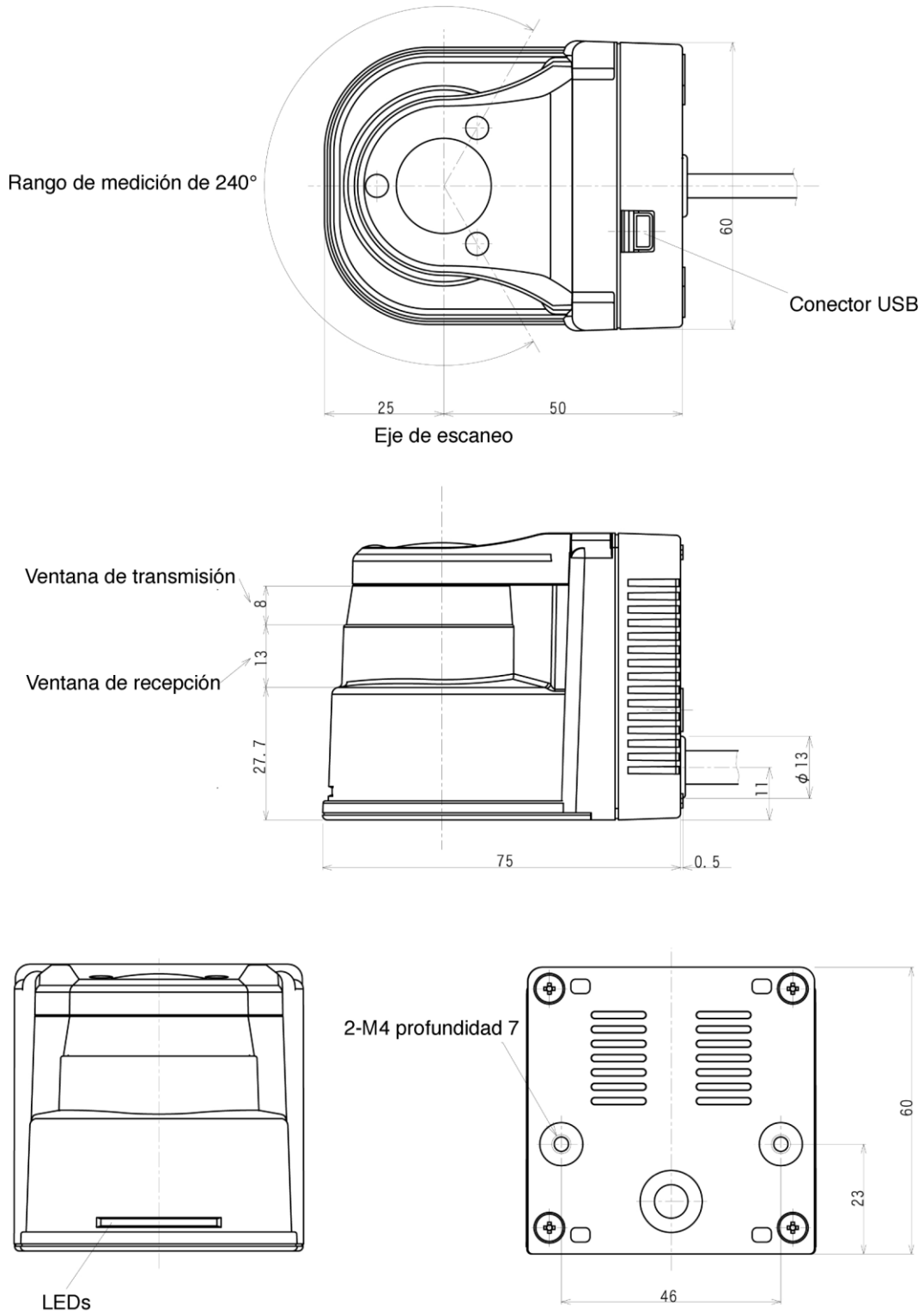


Figura 2.23 Dibujo técnico del UBG-04LX-F01.

CAPÍTULO 3

Búsqueda de soluciones

En los capítulos anteriores se ha definido y analizado el problema planteado, para entenderlo de forma correcta. Ahora se buscarán alternativas para resolverlo y satisfacer las necesidades del usuario. Estas alternativas suelen ser llamadas conceptos. La etapa de generación de conceptos es fundamental para el diseño, ya que es cuando se propone algo nuevo, alguna forma distinta de hacer algo o una mejora a algo que ya existe.

Un concepto es una idea lo suficientemente desarrollada para evaluar los principios físicos que gobiernan su comportamiento [35]. El concepto puede ser representado como un boceto, diagrama de flujo, nota, o cualquier forma de abstraer una idea que pueda convertirse en un producto o sistema.

En este capítulo se expondrán los métodos de generación de conceptos que se siguieron durante el desarrollo del sistema de percepción del entorno. El resultado de la aplicación de estos métodos fue un grupo de propuestas de diseño que serán evaluadas en el siguiente capítulo.

3.1 DESCOMPOSICIÓN EN SUBFUNCIONES

Una técnica ampliamente usada para fomentar la generación de conceptos es la descomposición en subfunciones. Con este método se divide un problema complejo en subproblemas más sencillos [35], [36], [37], [38]. Para esto se siguen dos pasos. El primero consiste en identificar la función general del sistema y representarla por medio de un modelo de caja negra que opera con flujos de energía, información y material. En el segundo paso se identifica el contenido de la caja negra para definir las subfunciones del sistema.

Modelo de caja negra

El objetivo, en este paso, es describir la función general del sistema con un solo enunciado que se coloca en un diagrama de caja negra. Este diagrama busca representar de la forma más sencilla lo que el sistema debe hacer. La caja negra convierte ciertas entradas en salidas deseadas mediante la función principal. Las entradas de la caja son la energía, información y material que fluyen dentro de los límites del sistema. Usualmente el flujo de energía se representa con una línea delgada, el flujo de información con una línea segmentada y el flujo de material con una línea gruesa.

En la Figura 3.1 se muestra un modelo de caja negra para el sistema de percepción del entorno. En este diagrama sólo se consideraron entradas de flujos de energía y de información. Las entradas mostradas en el diagrama son: energía eléctrica, las características del entorno de trabajo y los parámetros de configuración. Se asumió que el sistema emplea energía eléctrica, ya que todos los sistemas del robot funcionan con este tipo de energía. La entrada que corresponde a las características del entorno, se refiere a los objetos y elementos en el entorno de trabajo que serán percibidos por el sistema. Y los parámetros de configuración son la información que el usuario ingresará al sistema para modificar algunas características de su funcionamiento.

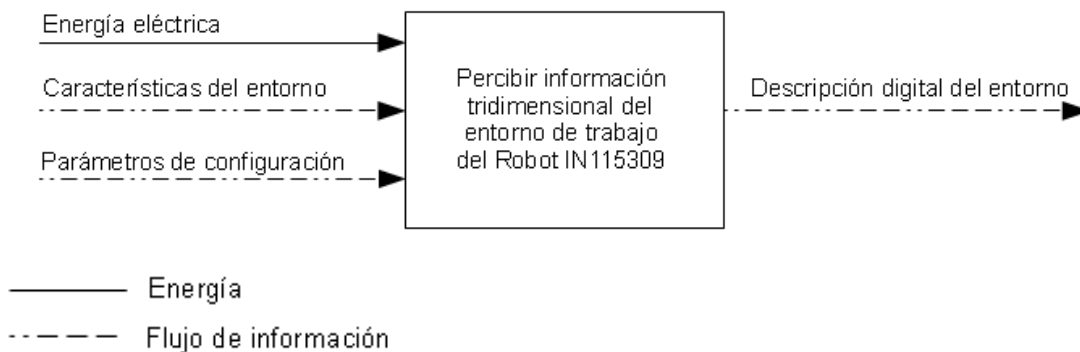


Figura 3.1 Modelo de caja negra para el sistema de percepción del entorno.

Una vez que se ha determinado la función general del sistema mediante el modelo de caja negra, el siguiente paso es la identificación y descripción de las funciones secundarias involucradas en la obtención de las salidas deseadas. En ocasiones a este otro modelo se le llama caja transparente.

Identificación de funciones secundarias

El siguiente paso en la técnica de descomposición en subfunciones es dividir la función general del sistema en funciones más elementales para crear una descripción más detallada de lo que los elementos del sistema deben hacer para desarrollar la función general.

Es conveniente descomponer la función general ya que el resultado dirige la búsqueda de las soluciones al problema de diseño. Ya que los conceptos son consecuencia de la función y el producto de los conceptos, se debe entender completamente la función antes de dedicar tiempo en generar productos que resuelvan problemas equivocados [35]. Detallar la función del sistema conduce a tener un mejor entendimiento de los problemas de diseño y comprender las necesidades funcionales del sistema. Y descomponer en subfunciones ayuda a visualizar cuándo algunos de los requerimientos funcionales se pueden satisfacer con componentes que ya existen.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama con la identificación de las funciones secundarias del sistema de percepción del entorno. Los flujos de energía y de información se indican de la misma forma que en el modelo de caja negra.

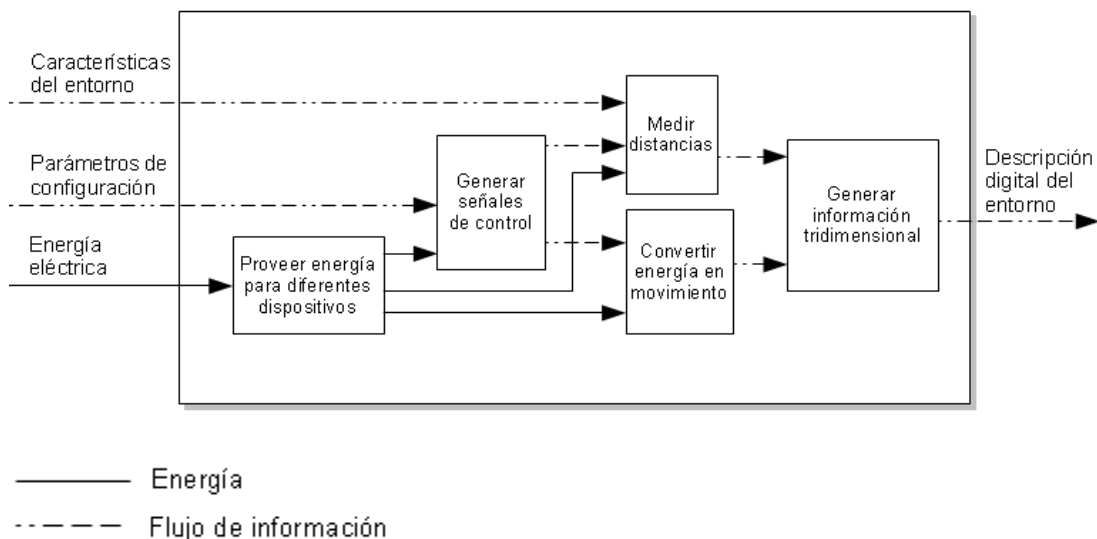


Figura 3.2 Identificación de las funciones secundarias del sistema de percepción del entorno en un modelo de caja transparente.

Las funciones secundarias se pueden refinar para descomponerse en funciones más elementales, cuando es necesario lograr un entendimiento más profundo de la función del sistema que se requiere diseñar.

Después de realizada la descomposición en subfunciones, se continúa con el desarrollo de conceptos para satisfacer las funciones identificadas. Para lograr esto, se realiza una exploración sistemática en la que se desarrollan conceptos individuales para cada subfunción y se combinan para desarrollar conceptos completos de solución.

3.2 EXPLORACIÓN SISTEMÁTICA

La técnica que se presenta en esta sección consiste en tres pasos. Primero se desarrollan conceptos para cada función secundaria. La meta de este paso es generar la mayor cantidad posible de conceptos de solución para cada subfunción. Se debe tratar de considerar todas las alternativas.

El siguiente paso es desarrollar un árbol de clasificación de conceptos que se usa para dividir el espacio de posibles soluciones en diferentes ramas, con el fin de eliminar las ramas menos prometedoras. El objetivo de esto es reducir la cantidad de posibles soluciones.

El tercer paso consiste en desarrollar una tabla de combinación de conceptos con la que se consideran, de forma sistemática, las combinaciones de los fragmentos de solución que corresponden a los conceptos desarrollados para cada subfunción. En ocasiones se obtienen diversas posibles soluciones al combinar ciertos fragmentos o se presentan combinaciones incompatibles.

Desarrollo de conceptos individuales

En esta etapa se definen las alternativas para realizar las funciones secundarias identificadas. Con este fin, se llena una tabla en donde se escriben tantos conceptos como sea posible para cada una de ellas. Los conceptos escritos serán las alternativas de solución para las subfunciones.

Durante la búsqueda de alternativas de solución para la función de "convertir en movimiento", se identificó la necesidad de agregar una función para efectuar la transmisión del movimiento. Existen diversos actuadores con los que se puede realizar la conversión de energía eléctrica en trabajo mecánico. Sin embargo, para poder mover el elemento encargado de medir las distancias, es necesario que el subsistema de conversión de energía en movimiento transmita el trabajo con las características de par o fuerza necesarias. Para este propósito se pueden utilizar mecanismos de transmisión como engranes, poleas y bandas, o coronas y tornillos sinfín.

En la Tabla 3.1 se muestra una lista con los conceptos desarrollados para cumplir con cada subfunción del sistema de percepción del entorno. Los conceptos para cumplir la función general se obtendrán a partir de esta lista.

Tabla 3.1 Desarrollo de conceptos alternativos para desempeñar las funciones secundarias identificadas para el sistema de percepción del entorno.

Funciones secundarias	Conceptos de solución
Proveer energía para diferentes dispositivos	Fuentes de voltaje independientes Reguladores de voltaje Seleccionar sólo dispositivos que funcionen con la misma diferencia de potencial
Generar señales de control	Interfaz programada en una computadora Construir hardware para la interfaz, con controles y despliegue de información
Convertir en movimiento	Tipo de movimiento Movimiento de rotación Movimiento de traslación Combinar rotación y traslación Aprovechar movimiento del robot
	Tipo de actuador Servomotor Solenóide Motor de rotación continua Motor de pulsos
Transmitir el movimiento	Acoplamiento directo Engranajes Banda y poleas Cadena y catarinas Biela-corredera-manivela Piñón-cremallera Sinfín-corona Mecanismo de cuatro barras
Medir distancias	Usar UBG-LX04-F01
Generar información tridimensional	Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor en posición natural Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural Rotación sobre el eje transversal con el sensor colocado sobre uno de sus costados Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor apuntando hacia arriba.

En la Tabla 3.1 solamente se muestra un concepto para la función "Medir distancias", debido a que desde un principio se definió el uso del telémetro UBG-04LX-F01 para cumplir con esta tarea. En esta tabla se incluye la subfunción de

"Transmitir el movimiento" que se identificó durante esta etapa y los conceptos que se definieron para realizarla.

Como se puede observar, la combinación de conceptos individuales para cada subfunción dará como resultado un número demasiado grande de alternativas para desarrollar la función general. Las herramientas descritas a continuación ayudan a resolver este problema

Árbol de clasificación de conceptos

Esta herramienta es de gran utilidad para reducir la cantidad de posibles soluciones a un problema de diseño. Se pueden realizar árboles de clasificación de conceptos para cualquier subfunción, pero generalmente se busca desarrollar aquéllos que permitan reducir en mayor grado el número de posibles soluciones [38]. Para elaborar un árbol de clasificación de conceptos se selecciona alguna de las subfunciones del sistema y se colocan, a manera de ramas, sus alternativas de solución. Estas alternativas pueden ramificarse varios niveles más. Posteriormente se analiza la factibilidad de cada rama y se analizan las complicaciones que pudieran involucrar. Con base en esto se decide si se continuará con el desarrollo de cada rama o se descartará.

Se detectó la posibilidad de reducir considerablemente la cantidad de posibles soluciones con un árbol de clasificación de conceptos para la función "convertir en movimiento". Las alternativas de solución para esta función secundaria se pueden clasificar como se muestra en la Figura 3.3.

La primer rama que se descartó, fue la de "Aprovechar el movimiento del robot". La principal razón para esto fue la desventaja que presenta ante la imposibilidad de generar información tridimensional cuando el robot está inmóvil.

Adicionalmente, se consideró que este concepto se puede poner en práctica como un caso particular en alguna de las otras ramas, al dejar fija la posición del sistema. De esta forma se podría analizar el desempeño de esta alternativa. Aunque esta rama resulta interesante porque simplifica notablemente el problema, se decidió eliminarla ya que reduce de forma importante la versatilidad del sistema.

Posteriormente se analizó la rama correspondiente a convertir la energía en movimiento de traslación. La complicación de esta rama, está relacionada primordialmente con las dimensiones que tendría el sistema. Existe una relación estrecha entre la amplitud de barrido tridimensional y el tamaño de un sistema con mecanismo de traslación. Por ejemplo, si se quiere hacer un barrido de 1 m , el sistema debe tener, por lo menos, 1 m de longitud en alguna de sus medidas. Por lo que se tomó la decisión de descartar esta rama.

Por otra parte, un sistema que realice un movimiento que combine rotación y traslación sería más complejo. Así que se decidió suspender el desarrollo de esta rama y enfocar los esfuerzos a los conceptos de rotación pura. En caso de encontrarse dificultades para cumplir con los requerimientos en los conceptos de rotación pura, podría abordarse nuevamente la rama que corresponde a una combinación de movimientos.

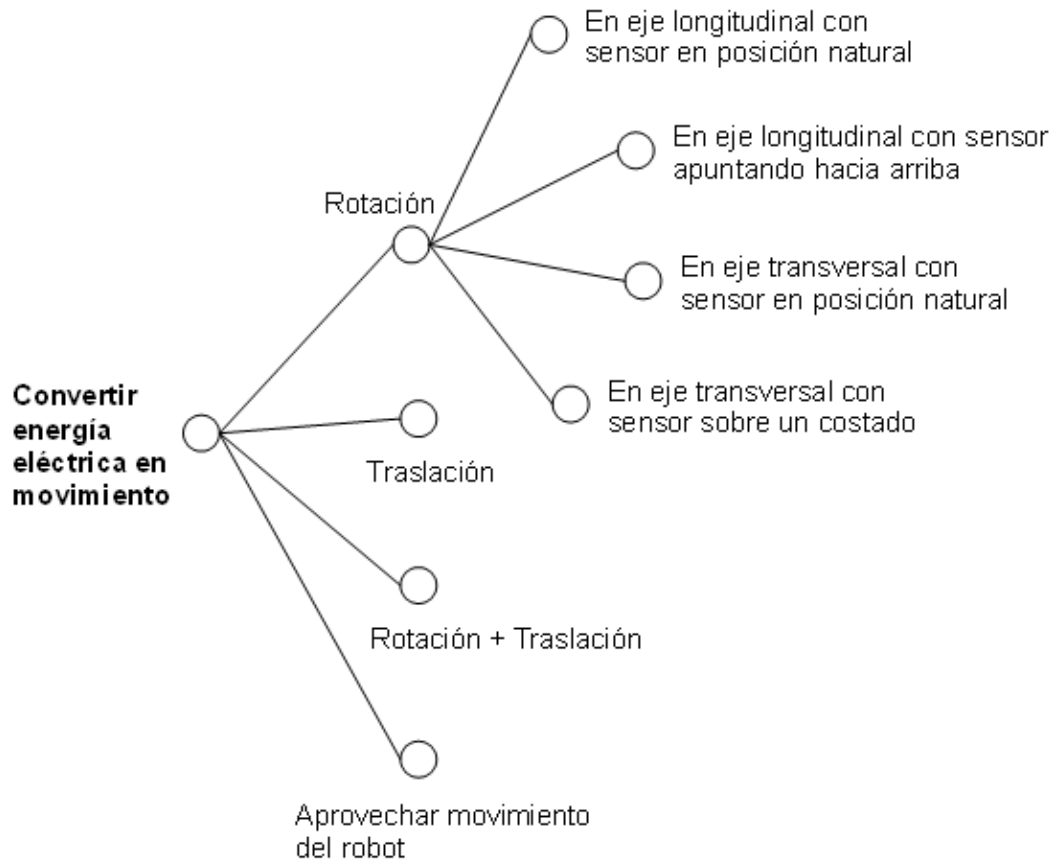


Figura 3.3 Árbol de clasificación de conceptos para la subfunción "Convertir energía eléctrica en movimiento". Solamente se conservó la rama de "Rotación".

Después de desarrollar el árbol de clasificación de conceptos para la subfunción "convertir energía eléctrica en movimiento" y analizar sus ramas, se logró reducir significativamente la cantidad de alternativas de solución a considerar en la tabla de combinación de conceptos. El procedimiento para obtener esta tabla se describirá a continuación.

Tabla de combinación de conceptos

En el siguiente paso se combinarán los conceptos generados para cada subfunción, para obtener diseños conceptuales completos [35], [37], [38]. Para realizar la combinación de estas propuestas de solución se usó una herramienta conocida como tabla de combinación de conceptos [38]. Esta herramienta es utilizada para impulsar la generación de ideas con el fin resolver la función principal del sistema. Las columnas de la tabla corresponden a las subfunciones identificadas y en ellas se colocan los conceptos de solución. Posteriormente se selecciona un concepto de cada columna y luego se combinan para desarrollar soluciones integrales.

Se hacen dos recomendaciones para facilitar el proceso de combinación de conceptos. La primera es eliminar aquellos conceptos que no se consideren factibles antes de combinarlos y así reducir el número de opciones a examinar. La segunda recomendación es enfocar el desarrollo de la tabla en subfunciones acopladas, que son aquellas que tienen una dependencia entre si.

En la Tabla 3.2 se muestra la combinación de conceptos desarrollada para el sistema de percepción. Las columnas de la tabla corresponden a las subfunciones mostradas en la Figura 3.4. En esta figura se muestra una descomposición que incluye la función de transmitir movimiento.



Figura 3.4 Una nueva descomposición del problema en la que se contempla la subfunción de Transmitir movimiento.

A continuación se muestran algunos de los conceptos integrales de solución obtenidos al combinar los conceptos de la Tabla 3.2. En la Figura 3.5 se muestra la combinación de los conceptos Motor de pulsos, Banda y poleas y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural. En la Figura 3.6 se muestra la combinación de los conceptos Servomotor, Acoplamiento directo y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural. En la Figura 3.7 se muestra la combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Engranajes y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural. En la Figura 3.8 se muestra la combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Mecanismo de cuatro barras y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural. En la Figura 3.9 se muestra la combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Sinfín-corona y Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor en posición natural.

Tabla 3.2 Tabla de combinación de conceptos desarrollada para el sistema de percepción del entorno.

Convertir en movimiento	Transmitir movimiento	Generar información tridimensional
Motor de pulsos	Acoplamiento directo	Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor en posición natural
Motor de rotación continua	Engranajes	Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural
Servomotor	Banda y poleas	Rotación sobre el eje transversal con el sensor colocado sobre uno de sus costados
	Cadena y estrellas	Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor apuntando hacia arriba
	Biela-corredera-manivela	
	Piñón-cremallera	
	Sinfín-corona	
	Mecanismo de cuatro barras	

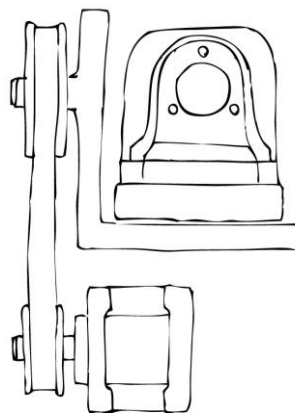


Figura 3.5 Combinación de los conceptos Motor de pulsos, Banda y poleas y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural.

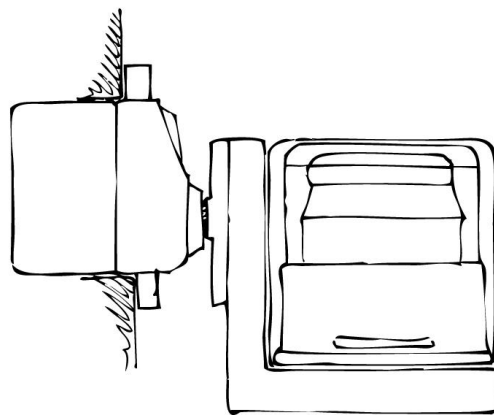


Figura 3.6 Combinación de los conceptos Servomotor, Acoplamiento directo y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural.

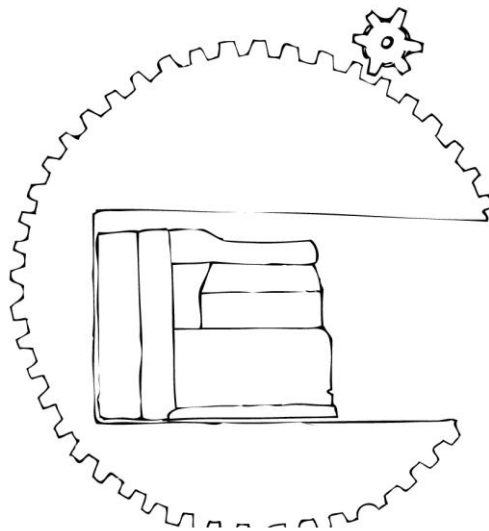


Figura 3.7 Combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Engranes y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural.

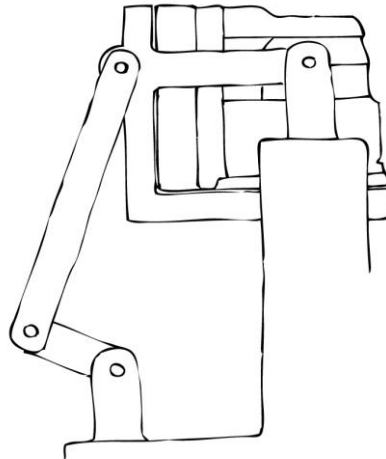


Figura 3.8 Combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Mecanismo de cuatro barras y Rotación sobre el eje transversal con el sensor en posición natural.

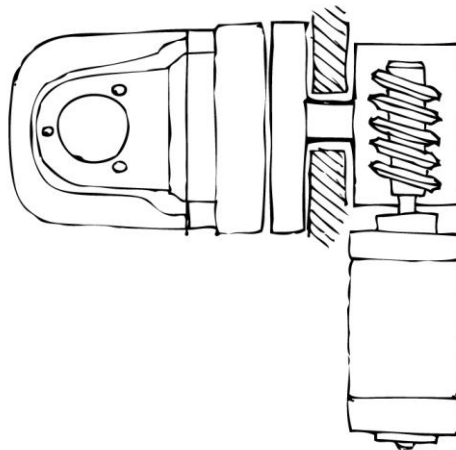


Figura 3.9 Combinación de los conceptos Motor de rotación continua, Sinfín-corona y Rotación sobre el eje longitudinal con el sensor en posición natural.

Al concluir la etapa de generación de conceptos, se tiene una gama de posibles soluciones para resolver el problema de diseño planteado. Algunos de estos conceptos conducirán el desarrollo del sistema a soluciones más adecuadas, con objetivo de seleccionar las alternativas más prometedoras. Es recomendable hacer esta selección con base en una evaluación lo más objetiva e imparcial posible. En el siguiente capítulo se expone la fase de toma de decisiones en donde se mostrarán los métodos de decisión que se emplearon para seleccionar el concepto que se decidió desarrollar.

CAPÍTULO 4

Toma de decisiones

Una vez que se han generado las alternativas de solución, llega el momento de buscar la mejor de ellas para continuar con su desarrollo. Una buena forma para hacer esto es mediante un proceso de evaluación lógico que sea lo más objetivo posible. Para evaluar los diferentes conceptos de solución se deben establecer criterios que permitan seleccionar el concepto que tenga el mejor desempeño. Los criterios de selección deben ser cuantificables y representar fielmente las necesidades del usuario.

Las necesidades del usuario proporcionan información cualitativa sobre los atributos que el sistema debe tener, pero ofrecen poca información para evaluar su desempeño de forma cuantitativa. Por esto es recomendable traducir estas necesidades a características cuantificables conocidas como especificaciones de ingeniería [35]. Una herramienta ampliamente usada para interpretar las necesidades y obtener una lista de especificaciones es el método del despliegue de la función de la calidad, también llamado matriz QFD, por las siglas en inglés de *Quality Function Deployment* [39].

En este capítulo se describirá el método que se empleó para seleccionar la alternativa de solución que se desarrolló. En primer lugar se mostrará la matriz QFD que se elaboró para obtener la lista de especificaciones para el sistema y posteriormente se describirá el método de selección de conceptos con el que se evaluaron las alternativas de solución.

4.1 MÉTODO DEL DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE LA CALIDAD, MATRIZ QFD

El método del despliegue de la función de la calidad reúne sistemáticamente los elementos que intervienen en la definición de un producto o sistema, en una matriz llamada QFD. Para construirla hay que reunir la información que se muestra en la Figura 4.1 [35], [36], [37], en donde se pueden ver las secciones de la matriz, indicadas con números que ayudarán a referirse a ellas más adelante.

El método comienza con la definición y jerarquización de las necesidades de las personas que utilizarán el sistema. Para obtener esta información se encuestó a posibles usuarios del sistema de percepción del entorno y se les solicitó que asignaran un valor porcentual a cada necesidad de la lista que se muestra en la Tabla 4.1. A las necesidades consideradas más importantes se les asignaron porcentajes mayores y a las menos importantes porcentajes menores. Para indicar que alguna necesidad no se considera trascendente se asignó un valor de 0%. En la Tabla 4.1 aparecen los valores obtenidos del promedio de los porcentajes asignados por los usuarios potenciales.

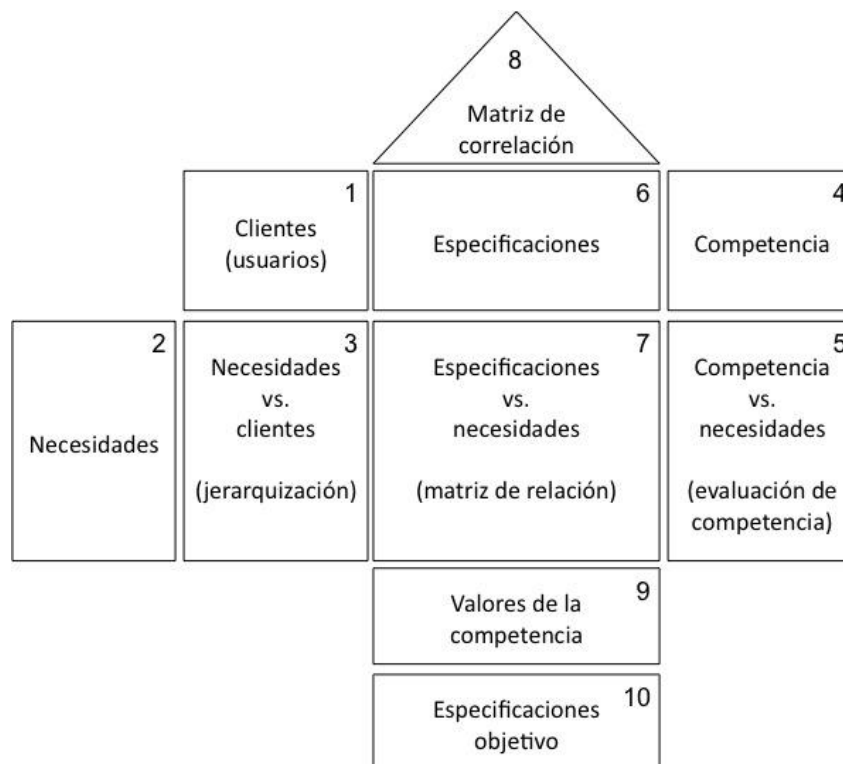


Figura 4.1 Diagrama de la matriz QFD con la descripción de la información que debe colocarse en cada sección. La numeración indica el orden en que se llenarán las secciones.

Tabla 4.1 Lista de necesidades para el sistema de percepción del entorno y su jerarquización mostrada de forma porcentual. La información se obtuvo del promedio de los valores asignados por posibles usuarios del sistema durante una encuesta.

No.	Necesidad	%
1	El sistema detecta adecuadamente obstáculos en ambientes dinámicos	17.22
2	El sistema detecta obstáculos de forma autónoma	14.22
3	El sistema es fácil de instalar/desinstalar	3.67
4	El sistema es fácil de usar	4.00
5	El sistema es ligero	2.22
6	El sistema es pequeño	1.11
7	El sistema es versátil	2.11
8	El sistema permite conocer la ubicación de los objetos detectados	13.44
9	El sistema recibe mantenimiento fácilmente	6.44
10	El sistema requiere poco mantenimiento	4.56
11	El sistema puede funcionar durante largo tiempo	2.67
12	El sistema tiene diseño mecánico sencillo	10.00
13	El sistema tiene funcionamiento interno sencillo	4.78
14	El sistema resiste pequeños impactos	2.22
15	El sistema está protegido contra malas conexiones	2.56
16	El sistema se puede alimentar de las baterías del robot	2.78
17	El sistema minimiza costos	1.22
18	El sistema reduce las vibraciones	1.56
19	El sistema no interfiere con otros sistemas del robot	3.22
		100

En la sección 5 de la matriz QFD que se muestra en la Figura 4.1 se reúne la información para evaluar a la competencia. En este caso, se puede considerar a los sistemas de percepción del entorno desarrollados por otros equipos de investigación como productos de la competencia. Sin embargo no se cuenta con la información suficiente para determinar el grado en que satisface las necesidades planteadas. Por esta razón, se omitieron los pasos en los que se requiere información de la competencia y se usó la matriz QFD de forma parcial. A pesar de esto, la matriz QFD fue de gran ayuda para definir correctamente las características del producto y organizar la información importante.

Un buen diseño debe buscar satisfacer las necesidades del usuario. Para poder medir el grado en que esto se logra, es preciso determinar un grupo de especificaciones que reflejen correctamente el grado en que se satisfacen las necesidades del usuario. Las especificaciones deben ser cuantificables y expresar de forma concisa lo que el sistema debe hacer. En la Tabla 4.2 se muestra la lista de especificaciones identificadas para el sistema.

Tabla 4.2 Lista de especificaciones identificadas para el sistema de percepción del entorno y sus respectivas métricas.

No.	Especificación	Métrica
1	Amplitud horizontal del volumen de medición	°
2	Amplitud vertical del volumen de medición	°
3	Consumo de corriente del sistema funcionando	A/h
4	Detección autónoma de obstáculos	Si o No
5	Dimensiones	mm x mm x mm
6	Herramientas requeridas para instalar/desinstalar	lista
7	Interfaz intuitiva	Si o No
8	Masa total	g
9	Número de actuadores	#
10	Número de elementos que sufren desgaste	#
11	Número de mediciones en un barrido	#
12	Número de pasos para dar mantenimiento	#
13	Número de pasos para instalar	#
14	Número de piezas	#
15	Número de sensores internos	#
16	Número de señales para controlar el sistema	#
17	Parámetros que se pueden configurar	lista
18	Rango de detección	mm
19	Rapidez de medición	mediciones/s
20	Resolución del barrido vertical	°
21	Sistema de suspensión	Si o No
22	Tiempo de instalación/desinstalación	s
23	Tiempo que toma dar mantenimiento	min

Después de haber identificado un grupo apropiado de especificaciones, se debe determinar la relación que tienen con las necesidades de los usuarios. Para hacer esto se emplea la matriz de relación, que se encuentra en la sección 7 de la matriz QFD de la Figura 4.1. En esta matriz se asigna a cada celda un valor que representa el nivel de relación que existe entre las necesidades del usuario y las especificaciones del sistema. Los valores de las celdas se asignaron con base en el siguiente criterio:

- 9: para una relación fuerte
 - 3: para una relación media
 - 1: para una relación débil
- cuando no existe relación, la celda se deja en blanco.

En la Tabla 4.3 se muestra la matriz de relación para las necesidades del usuario y las especificaciones del sistema. Los renglones de la matriz corresponden a las necesidades y las columnas a las especificaciones.

Tabla 4.3 Matriz de relación para el sistema de percepción del entorno.

Especificación																				
Tiempo que toma dar mantenimiento																9				
Tiempo de instalación/desinstalación								9												
Sistema de suspensión			9																	
Resolución del barrido vertical	1					1	9													
Rapidez de medición	9					1	1													
Rango de detección	1					1	1													
Parámetros que se pueden configurar				9								1								
Número de señales para controlar el sistema				9								3								
Número de sensores internos						1	1	1	1	1		9				3				
Número de piezas					1			1	1		9					9				
Número de pasos para instalar			9																	
Número de pasos para dar mantenimiento								9												
Número de mediciones en un barrido	3					1	1													
Número de elementos que sufren desgaste									9	1						1				
Número de actuadores				1	1			1	1	1	3	3			3	9				
Masa total			1		9	1		1												
Interfaz intuitiva				3									3							
Herramientas requeridas para instalar/desinstalar			3																	
Dimensiones			1			1	9			1						3				
Detección autónoma de obstáculos		9						1												
Consumo de corriente del sistema funcionando										9					3					
Amplitud vertical del volumen de medición	1						1	1												
Amplitud horizontal del volumen de medición	1						1	1												
	%	17.22	14.22	3.67	4	2.22	1.11	2.11	13.44	6.44	4.56	2.67	10	4.78	2.22	2.56	2.78	1.22	1.56	3.22

Necesidad
detecta adecuadamente obstáculos en ambientes dinámicos
detecta obstáculos de forma autónoma
es fácil de instalar/desinstalar
es fácil de usar
es ligero
es pequeño
es versátil
permite conocer la ubicación de los objetos detectados
recibe mantenimiento fácilmente
requiere poco mantenimiento
puede funcionar durante largo tiempo
tiene diseño mecánico sencillo
tiene funcionamiento interno sencillo
resiste pequeños impactos
está protegido contra malas conexiones
se puede alimentar de las baterías del robot
minimiza costos
reduce las vibraciones
no interfiere con otros sistemas del robot

Tabla 4.4 Matriz de correlación para el sistema de percepción del entorno.

Especificaciones		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	Amplitud horizontal del volumen de medición	■																					
2	Amplitud vertical del volumen de medición		■																				
3	Consumo de corriente del sistema funcionando			■																			
4	Detección autónoma de obstáculos				■																		
5	Dimensiones					■																	
6	Herramientas requeridas para instalar/desinstalar						■																
7	Interfaz intuitiva							■															
8	Masa total								○														
9	Número de actuadores									○													
10	Número de elementos que sufren desgaste										○												
11	Número de mediciones en un barrido		○																				
12	Número de pasos para dar mantenimiento										x												
13	Número de pasos para instalar																						
14	Número de piezas									○	○	○		○									
15	Número de sensores internos									○	○									○			
16	Número de señales para controlar el sistema										○												
17	Parámetros que se pueden configurar										x								x				
18	Rango de detección		○																				
19	Rapidez de medición		x										x										
20	Resolución del barrido vertical												○										
21	Sistema de suspensión											○											
22	Tiempo de instalación/desinstalación						○							○									
23	Tiempo que toma dar mantenimiento											○	○	○									

Para completar la información de la sección 8 de la matriz QFD que corresponde a la matriz de correlación, se emplea un criterio semejante. En este caso si al mejorar una especificación otra empeora se considera que las especificaciones tienen una relación negativa. Por el contrario, si al mejorar una especificación, otra mejora también, se considera que tienen una relación positiva. Los valores de las celdas de la sección 8 se asignaron de acuerdo con la siguiente consideración:

- O: para una relación positiva fuerte
 - o: para una relación positiva débil
 - x: para una relación negativa débil
 - X: para una relación negativa fuerte
- Cuando no existe relación, la celda se deja en blanco

En la Tabla 4.4 se muestra la matriz de correlación de las especificaciones de ingeniería del sistema de percepción del entorno.

La matriz QFD también es una herramienta útil para determinar cuáles son las especificaciones que tienen un mayor impacto para la satisfacción de las necesidades del usuario. Para determinar esto se obtiene una calificación de importancia para cada especificación. En la Tabla 4.5 se muestra un ejemplo del procedimiento que se siguió para determinar esta calificación. El proceso consiste en multiplicar cada celda de la matriz de relación por el valor de jerarquización de la necesidad correspondiente, y sumar los valores de cada columna de especificación para obtener un valor numérico que representa el impacto de cada especificación.

Tabla 4.5 Procedimiento para obtener la calificación de importancia de las especificaciones de ingeniería.

	Especificación	∴	Masa total	∴	
Necesidad	%				
...	∴	∴		∴	
es fácil de instalar/desinstalar	3.67	∴	1	∴	3.67
...	∴	∴		∴	
es ligero	2.22	∴	9	∴	19.98
es pequeño	1.11	∴	1	∴	1.11
...	∴	∴	∴	∴	
recibe mantenimiento fácilmente	6.44	∴	1	∴	6.44
...	∴	∴	∴	∴	
Calificación:					31.2

En la Tabla 4.6 se muestran las calificaciones de importancia obtenidas para cada una de las especificaciones de ingeniería identificadas durante el desarrollo del método de despliegue de la función de la calidad. En esta tabla se pueden observar las especificaciones que obtuvieron las puntuaciones más altas. Con estas calificaciones se refleja el grado de relación que tienen las especificaciones con el cumplimiento de los atributos expresados a través de las necesidades del usuario.

Esta información permite visualizar cuáles son las especificaciones que tienen mayor prioridad, ya que tienen un mayor impacto para satisfacer las necesidades del usuario consideradas más importantes. Si se obtienen valores adecuados para el desempeño de estas especificaciones, las necesidades del usuario más importantes quedarán satisfechas. Esta información es de gran utilidad para poder evaluar el desempeño de los conceptos de solución y decidir cuál es el mejor de ellos.

Tabla 4.6 Resultado de la calificación de importancia de las especificaciones del sistema de percepción del entorno.

Especificación	Calificación
Tiempo que toma dar mantenimiento	14
Tiempo de instalación/desinstalación	58
Sistema de suspensión	33
Resolución del barrido vertical	140
Rapidez de medición	171
Rango de detección	33
Parámetros que se pueden configurar	47
Número de señales para controlar el sistema	50
Número de sensores internos	76
Número de piezas	114
Número de pasos para instalar	33
Número de pasos para dar mantenimiento	58
Número de mediciones en un barrido	67
Número de elementos que sufren desgaste	45
Número de actuadores	84
Masa total	31
Interfaz intuitiva	20
Herramientas requeridas para instalar/desinstalar	11
Dimensiones	32
Detección autónoma de obstáculos	141
Consumo de corriente del sistema funcionando	32
Amplitud vertical del volumen de medición	33
Amplitud horizontal del volumen de medición	33

4.2 EVALUACIÓN DE CONCEPTOS

Los métodos de evaluación involucran comparación y toma de decisiones. Pueden existir dos tipos de comparación. Uno de ellos es la comparación absoluta, en donde cada concepto es comparado directamente con un grupo de criterios de decisión. El otro es la comparación relativa, en donde las alternativas

de solución son comparadas entre sí. Cuando los conceptos no están suficientemente desarrollados es preferible emplear métodos de comparación relativa. Al utilizar este tipo de comparación se debe procurar que los conceptos evaluados tengan el mismo nivel de abstracción.

Para evaluar los conceptos se emplearon dos métodos de comparación relativa y posteriormente se compararon los resultados obtenidos con cada una para tomar una decisión final. El primer método fue una matriz de decisión y el segundo una matriz de valoración.

Matriz de decisión

La matriz de decisión es un método sencillo y efectivo para comparar alternativas de solución que no están suficientemente desarrolladas para realizar una comparación directa con las especificaciones de ingeniería [35], [37], [38]. En este método se selecciona un concepto de referencia para comparar su desempeño con los demás conceptos. Se usa un código de evaluación para calificar si cada concepto es mejor que, igual a, o peor que el concepto de referencia.

El primer paso es seleccionar los criterios de comparación. La información obtenida a partir de la matriz QFD es de gran utilidad para esto. Para establecer los criterios, se tomaron cuatro de las especificaciones con mayor calificación en la matriz QFD. No se incluyó la especificación "Detección autónoma de obstáculos" porque se consideró que esta característica es necesaria para que el sistema funcione correctamente, de modo que cualquier concepto que se evalúe debe cumplir con esta condición de desempeño. Esta especificación podría haberse omitido también de la matriz QFD, sin embargo se decidió incluirla para resaltar su importancia.

Los cuatro criterios de comparación seleccionados fueron los siguientes:

- Resolución del barrido vertical
- Rapidez de medición
- Número de piezas
- Número de actuadores.

A continuación se deben asignar ponderaciones relativas a cada criterio de evaluación. La ponderación de las especificaciones se obtuvo a partir de la información mostrada en la Tabla 4.6. Se convirtió cada calificación a un valor entre 1 y 20. La especificación con calificación más baja fue ponderada con 1 y la especificación con calificación más alta con 20. La ponderación para cada especificación se obtuvo por medio de la siguiente función:

$$Ponderación = 0.1188 \cdot (Calificación) - 0.3068$$

Esta función corresponde a una recta y se obtuvo a partir de dos puntos contenidos en ella como se describe a continuación. Estos puntos se obtuvieron de las especificaciones con mayor y menor calificación:

$$\text{Punto 1: } x_1 = 11, y_1 = 1$$

$$\text{Punto 2: } x_2 = 171, y_2 = 20$$

La pendiente se calcula a partir de los dos puntos contenidos en la recta:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{20 - 1}{171 - 11} = 0.1188$$

La ordenada al origen se obtiene de la ecuación general de la recta evaluada en alguno de los puntos contenidos en la recta:

$$y_1 = m \cdot x_1 + b$$

$$b = y_1 - m \cdot x_1$$

$$b = 1 - 0.1188 \cdot 11$$

$$b = -0.3068$$

Al emplear la función para ponderar se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Ponderación de los criterios para evaluar los conceptos de solución para sistema de percepción del entorno.

Especificación	Ponderación
Resolución del barrido vertical	16
Rapidez de medición	20
Número de piezas	13
Número de actuadores	10
Detección autónoma de obstáculos	17

El siguiente paso es definir el código de evaluación con el que se compararán los conceptos de solución. Para realizar la comparación de los conceptos se empleó el siguiente código de evaluación:

mejor que: 1
igual que: 0
peor que: -1

Una vez que se han definido los criterios de comparación, se ha asignado la ponderación de cada uno y se ha definido el código de evaluación, se debe seleccionar el concepto de referencia y completar la información de la matriz de decisión. Los conceptos seleccionados para ser evaluados se muestran en las Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6; a estos conceptos se les llamarán respectivamente Concepto 1, 2, 3, 4 y 5. La matriz de decisión para evaluar estos conceptos de solución se muestra en la Tabla 4.8. El concepto de referencia seleccionado fue el Concepto 4, mostrado en la Figura 4.5.

Antes de mostrar los resultados de las herramientas de decisión, se hará una breve descripción de cada concepto, para aclarar las características que se tomaron en cuenta para completar la información de las matrices.

En la propuesta de solución denominada Concepto 1, que se muestra en la Figura 4.2, se emplea un motor de corriente directa como actuador con una transmisión de banda dentada y poleas. El actuador se encuentra alojado entre las placas que sirven de soporte al telémetro, por lo que el tamaño del motor no es una restricción crítica, ya que se tiene suficiente espacio. El movimiento oscilatorio se logra por medio del control del actuador empleado.

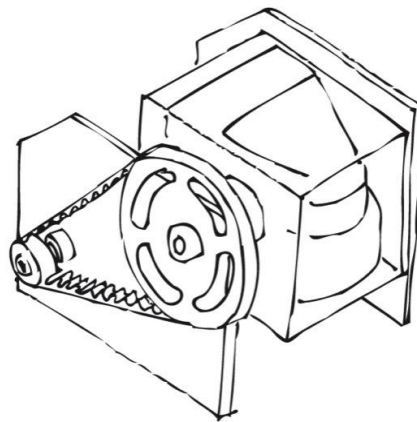


Figura 4.2 Concepto 1: esta propuesta de solución emplea una transmisión de banda dentada y poleas.

En la Figura 4.3 se ilustra el Concepto 2, el actuador se encuentra acoplado de forma directa al telémetro, por lo que se decidió emplear un servomotor de modelismo estándar. En general, estos actuadores son pequeños y tienen buenas características de velocidad y par. Esto es favorable ya que el actuador no tendrá sistema de transmisión adicional. Además, por la posición en la que se encuentra, es preferible que sea lo más pequeño posible. El movimiento oscilatorio se obtiene al colocar el eje del servomotor en las posiciones adecuadas cada cierto tiempo.

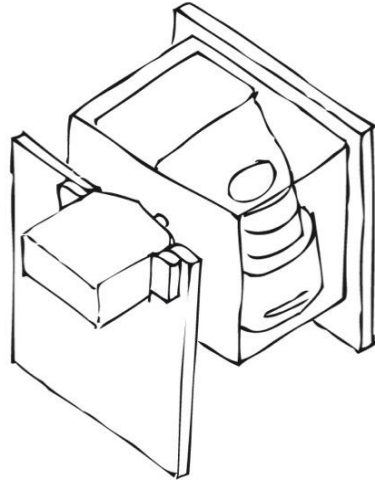


Figura 4.3 Concepto 2: en esta propuesta se emplea un servomotor de modelismo estándar, acoplado directamente al elemento que se desea mover.

La idea central del Concepto 3, que se muestra en la Figura 4.4, es evitar que se obstruya el campo de medición del telémetro. Esto se logra al emplear un soporte circular, cuyo centro se encuentra en la intersección de la zona de emisión y recepción del láser del telémetro. Dada la considerable diferencia de tamaños entre el soporte circular y el elemento acoplado al eje del motor, se tendrá un factor de reducción de velocidad grande. La transmisión del movimiento puede lograrse con elementos de alta fricción o con engranes. En este caso el movimiento oscilatorio también se logra por medio del control del actuador empleado.

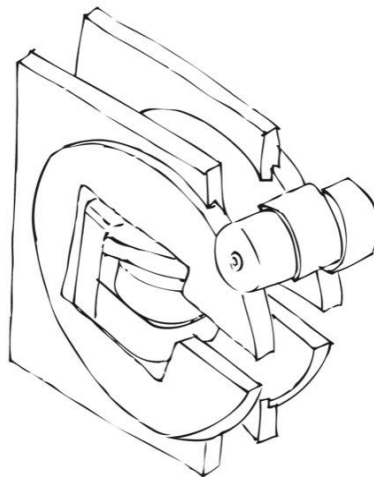


Figura 4.4 Concepto 3: en este concepto se emplea un soporte circular que es movido por un motor mediante elementos de alta fricción o engranes.

En el caso del Concepto 4, se emplea un mecanismo de cuatro barras para convertir la rotación continua del eje del actuador en un movimiento oscilatorio. En este caso la amplitud del movimiento del telémetro dependerá del tamaño de los eslabones, y sólo podrá modificarse si se cambia algún eslabón. La frecuencia del barrido dependerá de la velocidad de rotación del eje del motor, y no será necesario controlar cambios de dirección o perfiles de movimiento. En la Figura 4.5 se ilustra este concepto.

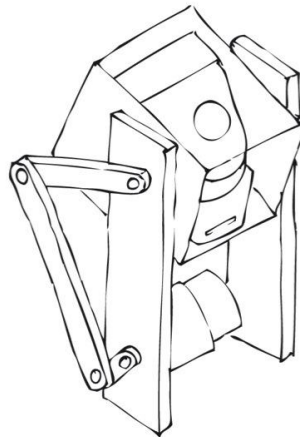


Figura 4.5 Concepto 4: en este concepto se provoca un movimiento oscilatorio empleando un mecanismo de cuatro barras.

El Concepto 5 es similar al 4, ya que emplea un mecanismo de cuatro barras para convertir rotación continua en movimiento oscilatorio. La diferencia es que, en este caso, se incluye un actuador adicional encargado de modificar el tamaño de uno de los eslabones, lo que permite variar la amplitud del movimiento. En la Figura 4.6 se ilustra el Concepto 5.

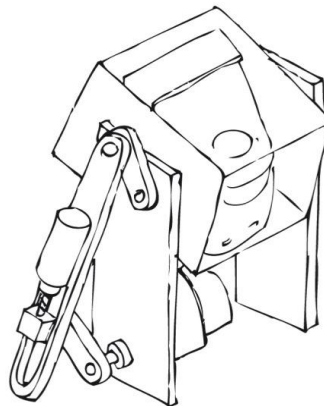


Figura 4.6 Concepto 5: esta idea es semejante a la que se presenta en el Concepto 4. En este caso se incluye un motor adicional para modificar la longitud de uno de los eslabones.

Tabla 4.8 Matriz de decisión para seleccionar el mejor concepto de solución para el sistema de percepción del entorno.

Criterios de selección	Ponderación	Conceptos				
		1	2	3	4	5
Resolución del barrido vertical	16	-1	-1	1	0	0
Rapidez de medición	20	1	1	-1	0	0
Número de piezas	13	1	1	0	0	0
Número de actuadores	10	0	0	0	0	-1
Suma de +		2	2	1	0	0
Suma de -		1	1	1	0	1
Total		1	1	0	0	-1
Total ponderado		17	17	-4	0	-10

La matriz de decisión mostrada en la Tabla 4.8 indica que existe un empate entre los conceptos 1 y 2. De acuerdo con este resultado, se podría decidir trabajar simultáneamente en ambos conceptos para reducir el grado de abstracción que tienen y posteriormente volver a evaluarlos. Sin embargo, existen otras herramientas de evaluación que pueden ayudar a tomar la decisión. A continuación se describirá la otra herramienta de decisión que fue empleada para seleccionar el concepto a desarrollar.

Matriz de valoración

Esta herramienta de evaluación consiste en calificar el desempeño relativo de cada concepto para satisfacer cada especificación. Para esto se asigna a cada concepto cierto valor dentro de una escala del 1 al 5. Cuanto mejor sea el desempeño más alto será el valor. En el caso de rapidez de medición, un mejor desempeño será una rapidez más alta, y en el caso del número de piezas, un mejor desempeño será un menor número de piezas.

Para el desarrollo de la matriz de valoración con la que se evaluaron los conceptos del sistema, se emplearon los mismos criterios de selección y las mismas ponderaciones que para la matriz de decisión descrita anteriormente.

De acuerdo con la matriz de valoración de la Tabla 4.9, el mejor concepto es el número 2 mostrado en la Figura 4.3, en donde el actuador es un servomotor estándar de modelismo que está acoplado directamente al soporte del telémetro láser, y el movimiento oscilatorio se consigue al colocar el eje del servomotor en las posiciones oportunas.

Tabla 4.9 Matriz de valoración para seleccionar el mejor concepto de solución para el sistema de percepción del entorno.

Criterio de selección	Resolución del barrido vertical	Rapidez de medición	Número de piezas	Número de actuadores	
Ponderación	16	20	13	10	
Concepto					Total
Concepto 1	3	5	4	5	250
Concepto 2	3	5	5	5	263
Concepto 3	5	1	3	5	189
Concepto 4	4	3	2	5	200
Concepto 5	4	3	1	2	157

Como se ha dicho a lo largo de los capítulos anteriores, los conceptos de solución son ideas que guían el proceso de diseño hacia la resolución de un problema. Los conceptos tienen cierto nivel de abstracción y es necesario detallarlos para poder construir el sistema que resolverá el problema planteado. Para lograr esto, se abordará la etapa del diseño a detalle, en donde se describirán los elementos del sistema con suficiente precisión para poder construirlos y hacerlos funcionar. En el próximo capítulo se expondrá la etapa de diseño a detalle del sistema de percepción del entorno.

CAPÍTULO 5

Descripción del sistema

Una vez que se han evaluado los conceptos de solución y se ha seleccionado el que se consideró que cumple de mejor manera con los criterios establecidos, se requiere diseñar de forma detallada los elementos que harán posible que el sistema cumpla con su función. Esta etapa se conoce como diseño a detalle y se abordará en este capítulo. En esta fase del proceso de diseño, se busca especificar las características de cada uno de los elementos con suficiente precisión para poder construirlos.

En primer lugar se mostrarán los cálculos y consideraciones tomadas en cuenta para realizar el dimensionamiento del actuador. Después, se describirán las piezas diseñadas para construir el sistema, y se presentará el diagrama de flujo del programa empleado para controlar el movimiento del eje del actuador. También se explicará la forma en que se diseñaron los circuitos para acondicionar el voltaje suministrado por las baterías del robot, para poder energizar el resto de los elementos eléctricos. Finalmente, se mostrará la interfaz que se programó para comunicar al usuario con el programa de control y desplegar la información de las mediciones realizadas.

5.1 DIMENSIONAMIENTO DEL ACTUADOR

A lo largo de los capítulos anteriores se han desarrollado conceptos de solución para el sistema de percepción del entorno. En estos conceptos, un telémetro láser de barrido es movido para obtener información tridimensional del espacio de trabajo. En el concepto seleccionado, el movimiento es generado por un servomotor de modelismo estándar.

En esta sección se muestran los cálculos que se realizaron para elegir el servomotor empleado. Para seleccionar el actuador adecuado, es conveniente estimar la potencia que será requerida para efectuar el movimiento deseado, de modo que el actuador tenga las características suficientes. Si el actuador no tiene la potencia suficiente, no será capaz de entregar los niveles de aceleración o velocidad requeridos.

La potencia necesaria para hacer rotar una carga con momento de inercia constante, se relaciona con el par y la velocidad angular requeridos. La potencia es la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. En un cuerpo que rota, el trabajo realizado es igual a la variación de energía cinética de rotación, por lo que la potencia desarrollada por el actuador puede calcularse como se muestra a continuación:

$$P_{rot} = \frac{dW_{rot}}{dt}$$

$$P_{rot} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \omega^2 \right)$$

$$P_{rot} = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} I \omega \right) \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$P_{rot} = I \cdot \omega \cdot \alpha$$

$$P_{rot} = \tau \cdot \omega$$

donde:

P_{rot} : es la potencia rotacional

W_{rot} : es el trabajo realizado

I : es el momento de inercia

ω : es la velocidad angular

α : es la aceleración angular

τ : es el par requerido para producir la aceleración angular.

El servomotor se seleccionó con base en el par nominal, que es uno de los datos frecuentemente proporcionados por los fabricantes. El valor del par nominal debe ser igual o mayor al par requerido. El par requerido se estimó a partir de la siguiente expresión, que relaciona el momento de inercia de la carga y la aceleración angular:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

donde:

- τ : es el par requerido
- I : es el momento de inercia de la carga
- α : es la aceleración angular.

A continuación se muestran los cálculos realizados para estimar el momento de inercia de la carga y la aceleración angular. Para obtener el valor del momento de inercia, se consideró que la carga es un prisma rectangular uniforme con las dimensiones del telémetro láser UBG-04LX-F01. La aceleración angular se obtuvo de la curva que describe el movimiento deseado.

Cálculo del momento de inercia de la carga

En el concepto de solución seleccionado, el sistema de percepción del entorno hace que el telémetro UBG-04LX-F01 realice un movimiento de cabeceo sobre un eje de rotación que pasa por el punto de intersección de la zona de emisión y recepción del láser. Por esta razón se consideró que la carga se moverá alrededor de un eje de rotación paralelo al eje que pasa por su centro de masa, por lo que el momento de inercia se calculó empleando el teorema de Steiner, que dice lo siguiente:

El momento de inercia con respecto a cualquier eje paralelo a un eje que pasa por el centro de masa, es igual al momento de inercia con respecto al eje que pasa por el centro de masa más el producto de la masa por el cuadrado de la distancia entre los dos ejes.

Lo anterior puede resumirse con la expresión:

$$I_{eje} = I_{cm} + m \cdot d^2$$

donde:

- I_{eje} : es el momento de inercia respecto al eje paralelo
- I_{cm} : es el momento de inercia respecto al eje que pasa por el centro de masa
- m : es la masa de la carga
- d : es la distancia entre los dos ejes.

La carga se consideró como un prisma rectangular uniforme del tamaño del telémetro láser, con una masa equivalente a la masa del telémetro más la masa del soporte en donde estará sujeto.

Para calcular el momento de inercia de la carga respecto al eje que pasa por su centro de masa, se empleó la expresión correspondiente para un prisma rectangular uniforme, que es la siguiente:

$$I = \frac{1}{12} m \cdot (h^2 + l^2)$$

donde:

- I : es el momento de inercia respecto al eje que pasa por el centro de masa
- m : es la masa de la carga
- h : es la medida de la altura de la carga
- l : es la medida de la longitud de la carga.

Al considerar la carga como un prisma uniforme, se hace la suposición de que el centro de masa se encuentra en el centro geométrico de dicho cuerpo. De acuerdo con la información del dibujo técnico mostrado en la Figura 2.23, las dimensiones de la altura y la longitud del UBG-04LX-F01 son 60 mm y 75 mm respectivamente. Por otra parte, en esta figura también se puede observar que el eje de rotación alrededor del que se moverá la carga se encuentra a 25 mm del frente del telémetro y 40.7 mm de su base. Como primera aproximación se consideró que la masa de la carga será el doble de la masa del telémetro, es decir 520 g . Considerando lo anterior, el momento de inercia de la carga se calculó como se muestra:

$$I_{eje} = \frac{1}{12} m \cdot (h^2 + l^2) + m \cdot d^2$$

$$I_{eje} = \frac{1}{12} m \cdot (h^2 + l^2) + m \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{h}{2} - 40.7\right)^2 + \left(\frac{l}{2} - 25\right)^2} \right)^2$$

$$I_{eje} = \frac{1}{12} 520 \cdot (60^2 + 75^2) + 520 \cdot \left(\left(\frac{60}{2} - 40.7\right)^2 + \left(\frac{75}{2} - 25\right)^2 \right)$$

$$I_{eje} = 540534.8 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$$

$$I_{eje} = 5.4053 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2.$$

En el siguiente apartado se definirán las características del movimiento deseado para determinar las curvas de velocidad y aceleración. De la curva de aceleración se puede obtener el valor promedio, que es necesario para calcular el par requerido. Y de la curva de velocidad se puede obtener el valor máximo, con el que es posible verificar que el servomotor seleccionado pueda entregar la velocidad suficiente.

Definición del perfil de movimiento deseado

Para obtener la información tridimensional, el servomotor seleccionado realizará un movimiento oscilatorio. Para definir la frecuencia de este movimiento, se estableció que el sistema debe realizar 10 barridos completos con el telémetro por cada barrido tridimensional. Según la información presentada en la Tabla 2.23, el periodo de escaneo del UBG-04LX-F01 es de 28 ms. Por lo tanto, si el telémetro se mantiene funcionando de forma continua, cada barrido tridimensional puede realizarse en 280 ms. Con esta rapidez de medición es posible realizar más de 3.5 mediciones tridimensionales cada segundo.

Cada barrido realizado con el servomotor está compuesto por dos barridos tridimensionales, el que se hace de abajo hacia arriba y el que se hace de arriba hacia abajo. Esto significa que el periodo del movimiento será de 560 ms, lo que equivale a una frecuencia de 1.78 Hz.

Para definir la amplitud del movimiento realizado por el servomotor, se consideró el rango de detección deseado y la altura a la que se colocará el sistema. Se propuso un rango de detección de 1 a 2 m y se consideró que el sistema estará colocado a 0.44 m del suelo, que es la medida de la altura del robot IN15309. En la Figura 5.1 se muestra un esquema del ángulo de barrido del sistema de percepción del entorno. Con esta información se puede estimar la amplitud del barrido tridimensional y por lo tanto la amplitud del movimiento deseado por medio de los siguientes cálculos:

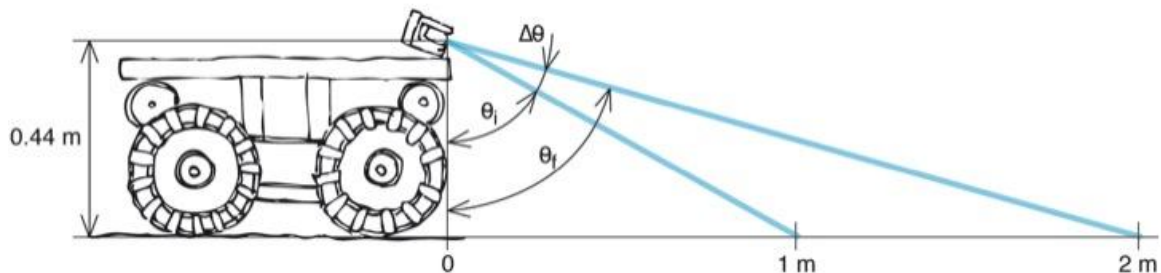


Figura 5.1 Esquema que muestra el ángulo de barrido que debe de realizar el sistema para lograr un rango de medición de 1 a 2 m. Se muestra el ángulo inicial θ_i y el ángulo final θ_f .

El ángulo inicial del barrido θ_i es:

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{1}{0.44}\right)$$

$$\theta_i = 66.25^\circ$$

el ángulo final del barrido es θ_f :

$$\theta_f = \arctan\left(\frac{2}{0.44}\right)$$

$$\theta_f = 77.59^\circ$$

y el valor de la amplitud del barrido vertical $\Delta\theta$ es:

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$$

$$\Delta\theta = 77.59 - 66.25$$

$$\Delta\theta = 11.34^\circ$$

Este resultado fue tomado como punto de partida para decidir establecer una amplitud de 15° para el ángulo de barrido, de modo que el rango de medición sea ligeramente superior al propuesto inicialmente. Con base en este valor de amplitud, se eligió el ángulo inicial de barrido en 64° y el final en 79° .

Se quiere que la velocidad con que se mueve el telémetro disminuya gradualmente conforme se acerca a los límites del barrido tridimensional, de modo que se eviten cambios bruscos de velocidad que puedan dañar los componentes internos del telémetro. Por esta razón, se decidió que el movimiento desarrollado por el servomotor sea un movimiento armónico simple. El movimiento armónico simple es un movimiento oscilatorio periódico descrito por una función sinusoidal, ya sea una función seno o una función coseno. La posición, velocidad y aceleración en un movimiento armónico simple se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

$$v(t) = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

$$a(t) = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

$$a(t) = -\omega^2 \cdot x(t)$$

donde:

- $x(t)$: es la posición en función del tiempo
- $v(t)$: es la velocidad en función del tiempo
- $a(t)$: es la aceleración en función del tiempo
- A : es la amplitud del movimiento
- ω : es la frecuencia angular
- ϕ : es el ángulo de desfase.

En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran, respectivamente, las gráficas de las curvas de posición, velocidad y aceleración correspondientes al movimiento armónico deseado. Estas gráficas se obtuvieron al evaluar las ecuaciones mostradas anteriormente y de los valores de las constantes que se muestran en la Tabla 5.1.



Figura 5.2 Gráfica de la posición en función del tiempo, del movimiento que se desea que el sistema desarrolle.



Figura 5.3 Gráfica de la velocidad en función del tiempo, del movimiento que se desea que el sistema desarrolle.



Figura 5.4 Gráfica de la aceleración en función del tiempo, del movimiento que se desea que el sistema desarrolle.

Tabla 5.1 Valores de las constantes del movimiento armónico simple deseado.

Amplitud del movimiento, en °		Frecuencia angular, en Hz		Ángulo de desfase, en rad
en rad		en rad/s		
15	$\frac{\pi}{12}$	$f = \frac{1}{0.56}$	$\omega = \frac{\pi}{0.28}$	0

Una vez que se ha estimado el momento de inercia de la carga y se ha especificado el perfil de movimiento deseado en función del tiempo, es posible calcular el par nominal requerido por el actuador.

En la siguiente sección se mostrarán los cálculos realizados para obtener el par nominal requerido y se mostrará el servomotor seleccionado para realizar el movimiento deseado.

Cálculo del par requerido y selección del servomotor

Tres de los puntos importantes a considerar para el dimensionamiento de un actuador rotacional son los siguientes [40]:

- 1 Par de torsión máximo requerido
- 2 Par de torsión nominal requerido, ya sea continuo o su valor efectivo
- 3 Velocidad máxima requerida.

Como se mencionó anteriormente, el servomotor se seleccionó con base en el par nominal. Este dato se puede obtener a partir del par de torsión máximo requerido por el actuador.

El par de torsión máximo puede obtenerse al multiplicar la aceleración máxima por el momento de inercia:

$$\tau_{\max} = I \cdot \alpha_{\max}$$

El valor de tiempo en el cual ocurre la aceleración máxima, puede obtenerse al igualar a cero la derivada respecto al tiempo de la ecuación de aceleración:

$$\frac{da(t)}{dt} = \omega^3 \cdot A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$$

$$\omega^3 \cdot A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi) = 0$$

$$\omega t + \phi = \text{arcsen}(0)$$

$$\omega t + \phi = 0$$

$$t = -\frac{\phi}{\omega}$$

$$t = 0.$$

Al evaluar la función de aceleración en este instante, se puede obtener el valor de la aceleración máxima. A continuación se muestra este procedimiento.

$$a(t) = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \phi); t = 0$$

$$a_{\max} = -\left(\frac{\pi}{0.28}\right)^2 \cdot 7.5 \cdot \cos(0)$$

$$a_{\max} = -\left(\frac{\pi}{0.28}\right)^2 \cdot 7.5 \cdot \cos(0)$$

$$a_{\max} = -944.1586 \text{ rad/s}^2$$

El signo negativo obtenido en el resultado está en relación con la dirección en que se realiza el movimiento. En la gráfica que se muestra en la Figura 5.4, se puede ver que cada 280 ms, se presenta la aceleración máxima, primero en un sentido del movimiento y luego en el otro. Para los cálculos del par de torsión, se utilizará el valor absoluto de la aceleración máxima y valor del momento de inercia que se obtuvo anteriormente en este capítulo.

El par de torsión máximo se obtiene al sustituir los valores de momento de inercia y aceleración máxima calculados.

$$\tau_{\max} = 5.4053 \cdot 944.1586 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{5103.4605}{10000} \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

$$\tau_{\max} = 0.5103 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\tau_{\max} = 5.2024 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

El par de torsión es una función periódica que depende de la aceleración, la cual está en función del tiempo. Para obtener el valor nominal del par de torsión, se calculó el valor efectivo de dicha función periódica. El valor efectivo de una función, también conocido como valor raíz medio cuadrático, se puede calcular de la siguiente forma [40]:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \tau(t)^2 dt}$$

donde:

τ_{rms} : es el valor raíz medio cuadrático del par de torsión

T : es el periodo de la función del par de torsión

$\tau(t)$: es el par de torsión en función del tiempo.

Al sustituir la ecuación del par de torsión que involucra el momento de inercia y la aceleración en función del tiempo y resolver, se obtiene lo siguiente:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(I \cdot (-\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \phi)) \right)^2 \cdot dt}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(I \cdot (a_{\max} \cdot \cos(\omega t + \phi)) \right)^2 \cdot dt}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\tau_{\max} \cdot (\cos(\omega t + \phi)) \right)^2 \cdot dt}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \tau_{\max}^2 \cdot \cos^2(\omega t + \phi) \cdot dt}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{\max}^2}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t + \phi) \cdot dt}$$

se realiza el siguiente cambio de variable:

$$u = \omega t + \phi$$

$$du = \omega \cdot dt$$

y se sustituye en la ecuación:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{\max}^2}{T \cdot \omega} \int_0^T \cos^2(u) \cdot du}$$

se utiliza la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1}{2} (1 + \cos(2\alpha))$$

y se obtiene:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \int_0^T 1 + \cos(2u) \cdot du}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \left(\int_0^T du + \int_0^T \cos(2u) \cdot du \right)}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \left([u]_0^T + [\text{sen}(u)]_0^T \right)}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \left([\omega t + \phi]_0^T + [\text{sen}(\omega t + \phi)]_0^T \right)}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \left((\omega T + \phi) - (\omega \cdot 0 + \phi) + 0 \right)}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2 \cdot T \cdot \omega} \omega \cdot T}$$

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\tau_{max}^2}{2}}$$

$$\tau_{rms} = \frac{\tau_{max}}{\sqrt{2}}$$

Al sustituir el valor del par de torsión máximo se obtiene el valor efectivo del par de torsión, que corresponde al par nominal del actuador requerido.

$$\tau_{rms} = \frac{5.2024}{\sqrt{2}}$$

$$\tau_{rms} = 3.6786 \text{ kgf}\cdot\text{cm}.$$

Como en el caso de la aceleración, se puede determinar el instante en el que ocurre el valor máximo de la velocidad al igualar a cero la derivada con respecto al tiempo de la función correspondiente, como se muestra a continuación.

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

$$-\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + \phi) = 0$$

$$\omega t + \phi = \arccos(0)$$

$$\omega t + \phi = \frac{\pi}{2}$$

$$t = \frac{\pi - 2\phi}{2\omega}$$

al sustituir los valores de ϕ y ω que aparecen en la Tabla 5.1, se obtiene

$$t = 0.14 \text{ s.}$$

Finalmente, se evaluó la función de la velocidad en el tiempo en que ocurre su valor máximo para obtener el siguiente resultado.

$$v(t) = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi); \quad t = 0.14 \text{ s}$$

$$v(t) = -\left(\frac{\pi}{0.28}\right) \cdot 7.5 \cdot \text{sen}\left(\left(\frac{\pi}{0.28}\right) \cdot 0.14 + 0\right)$$

$$v(t) = -\left(\frac{\pi}{0.28}\right) \cdot 7.5 \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$v(t) = -\left(\frac{\pi}{0.28}\right) \cdot 7.5 \cdot 1$$

$$v(t) = 84.1498 \text{ %/s.}$$

El actuador seleccionado fue un servomotor estándar de alto torque modelo S3305 de la marca Futaba [41], con el que el equipo de trabajo cuenta. El par nominal de este actuador es de $8.9 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$. Su velocidad angular es de $0.2 \text{ s}/60^\circ$, que significa que gira 60° en la quinta parte de un segundo. Por lo tanto su velocidad máxima es de 300/s . En la Figura 5.5 se muestra una imagen del servomotor seleccionado para imprimir el movimiento al telémetro láser.

Ahora, es oportuno continuar con el diseño del resto de los elementos del sistema de percepción del entorno. Las piezas restantes se dimensionarán de acuerdo con el tamaño y la forma del servomotor y del telémetro. En el siguiente

apartado se presentará una descripción de las piezas que se diseñaron para construir el sistema de percepción del entorno.



Figura 5.5 Servomotor S3305 de la marca Futaba. Este actuador fue seleccionado para desarrollar el movimiento deseado.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS DISEÑADAS PARA EL SISTEMA DE PERCEPCIÓN DEL ENTORNO

Para diseñar las piezas del sistema, se tomó como punto de partida las dimensiones de los dispositivos seleccionados previamente. Conocer la forma y tamaño del telémetro y el servomotor, es de gran ayuda para definir las características del resto de las piezas.

Se comenzó por restringir la posición relativa del telémetro y el servomotor, como se ilustra en la Figura 5.6. Como ya se había mencionado, se quiere que el eje del servomotor coincida con el punto que se encuentra entre la zona de emisión y recepción del láser del telémetro.

Otra situación que es conveniente considerar, es que el sistema de percepción del entorno será colocado en la parte superior del robot IN115309. Por esta razón, es recomendable que la base del sistema ofrezca una superficie que facilite la sujeción con la plataforma del robot.

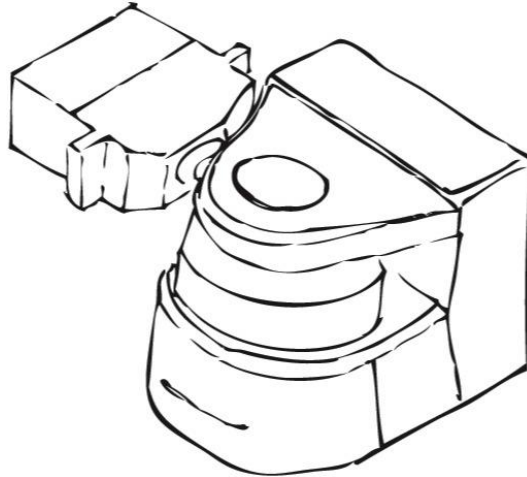


Figura 5.6 Disposición del telémetro y el servomotor.

Se pensó que la base del sistema fuera una estructura en forma de U, como la que se muestra en la Figura 5.7. Se propuso esto con objeto de aprovechar su parte inferior para sujetar el sistema a la plataforma del robot, y sus partes laterales para proporcionar superficies en las que se puedan colocar los apoyos para el telémetro láser, uno de cada lado. Se consideró colocar en uno de los lados al servomotor de modelismo, y en el otro, un rodamiento.

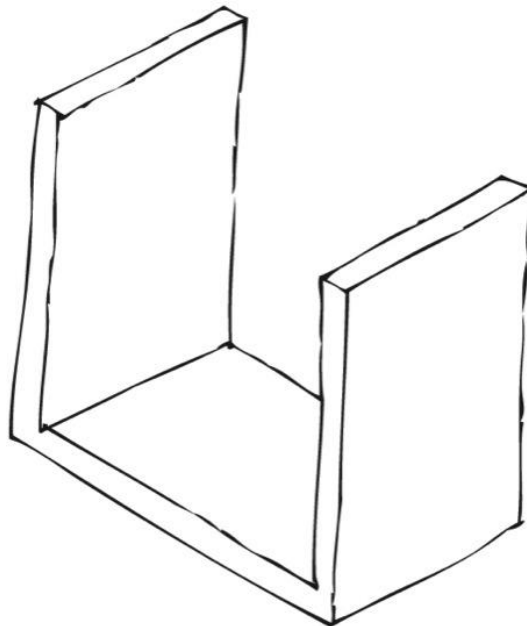


Figura 5.7 Boceto de la base en donde se colocará el servomotor y el telémetro láser de barrido.

Los dos apoyos deben estar a una altura suficiente que permita que el telémetro realice los movimientos de cabeceo libremente. A pesar de que se definió una amplitud del movimiento de 15° , se decidió considerar, como medida de seguridad, que el telémetro pudiera girar 360° . Para definir la altura mínima a la que podrían colocarse los apoyos, se calculó la distancia del eje de rotación al punto más alejado del telémetro, que en este caso es la esquina posterior inferior. En la Figura 5.8 se muestra un esquema en el que se indica la distancia que se desea calcular. Esta distancia puede ser calculada empleando el teorema de Pitágoras, como se muestra a continuación:

$$r = \sqrt{40.7^2 + 50^2}$$

$$r = 64.4708 \text{ mm.}$$

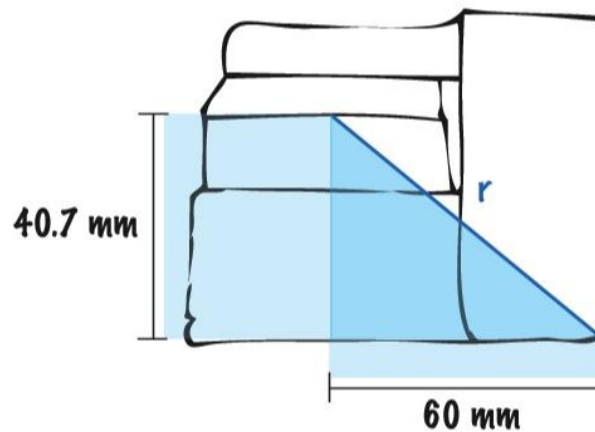


Figura 5.8 Distancia entre el eje de rotación alrededor del cual se realizará el movimiento de cabeceo y el punto más alejado del telémetro.

Se decidió que los apoyos estuvieran a una altura de 75 mm, para dejar un espacio de sobra y evitar que el cable del telémetro cause alguna interferencia mecánica, en caso de que se realizara un movimiento de cabeceo más amplio de lo previsto.

Una vez que se estimaron las medidas necesarias para la base, se buscó alguna pieza comercial con la forma propuesta, para que la base estuviera formada por una sola parte. Se encontraron perfiles de aluminio con la forma buscada, sin embargo ninguno con el tamaño necesario. Posteriormente, se estudió la posibilidad de construir la base con dos piezas, una pieza vertical y otra en forma de L, como se muestra en la Figura 5.9.

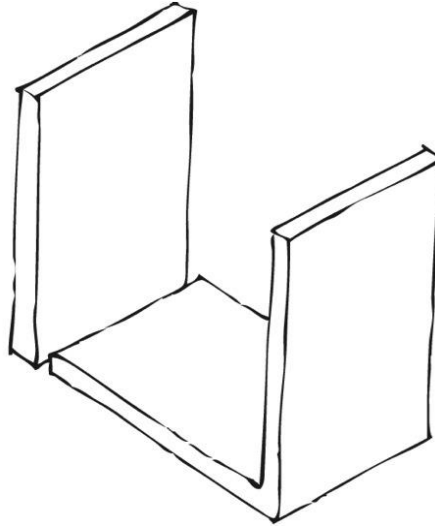


Figura 5.9 Propuesta para armar la base requerida usando una pieza vertical y una pieza en forma de "L".

Nuevamente, se buscaron componentes comerciales con los cuales se pudieran fabricar las piezas de la base. En el caso de la pieza vertical, puede ser fabricada con placa o solera de algún material. Y en el caso de la pieza en forma de "L", se encontró un ángulo de aluminio de 1/4" de espesor por 4" de lado, que son medidas suficientes para fabricar la pieza requerida. En la Figura 5.10 se muestra un boceto con las medidas de esta pieza. Como se puede observar en esta figura, la pieza permite colocar al telémetro láser de forma holgada entre los dos apoyos.

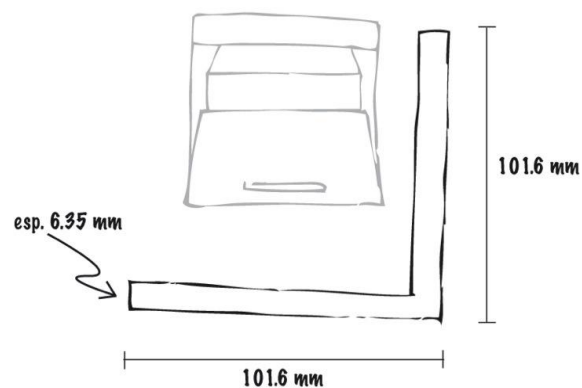


Figura 5.10 Medidas del ángulo de aluminio seleccionado para fabricar la pieza en forma de "L" de la base del sistema.

Antes de continuar con la selección del elemento para construir la pieza vertical, se exploró la posibilidad de colocar el rodamiento en una caja circular maquinada en el mismo ángulo de aluminio. Se encontró un rodamiento suficientemente pequeño para aprovechar el espesor del material. El elemento seleccionado es un rodamiento miniatura modelo 605Z de la marca NSK con las características que se muestran en la Tabla 5.2 [42]. En la Figura 5.11 se muestra un dibujo del rodamiento seleccionado.

Tabla 5.2 Características principales del rodamiento modelo 605Z de la marca NSK.

Dimensiones principales, en mm				Capacidades de carga, en N				Velocidades límite, en rpm
d	D	B ₁	r ₁	C _r	C _{0r}	C _r	C _{0r}	
5	14	5	0.2	1330	505	135	52	40000

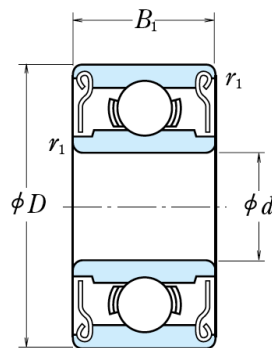


Figura 5.11 Rodamiento miniatura modelo 605Z de la marca NSK.

Ya que se encontró un rodamiento suficientemente pequeño para poder ser colocado en la pieza en forma de "L", se tiene mayor libertad para diseñar el soporte donde el servomotor será colocado.

Para colocar el servomotor en la posición deseada, se pensó en fabricar una pieza vertical con un orificio rectangular, como la que se muestra en la Figura 5.12. De este modo se pueden aprovechar los agujeros de las cejas laterales del servomotor para sujetarlo con tornillos. La pieza vertical se puede fabricar con placa, solera o incluso con una lámina suficientemente robusta para no pandearse. Si la pieza se fabrica con placa o solera, tenderá a ser más rígida pero será más pesada. Por otra parte, si se fabrica con lámina, será más ligera pero tendrá la posibilidad de pandearse. En busca de obtener una pieza que sea ligera y no se pandee, se pensó en emplear lámina y agregar un par de dobleces para hacerla más rígida. Se pensó en doblar la lámina en forma de canal, como se muestra en la Figura 5.13. Al doblar la lámina de esta forma, además de aumentar la rigidez, se protege al servomotor.

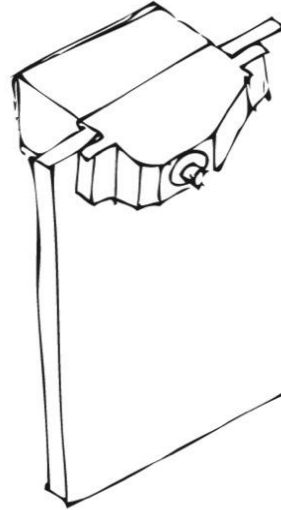


Figura 5.12 El actuador del sistema y la pieza para sujetarlo. Esta pieza tiene un agujero rectangular para colocar el servomotor.

Al unir la pieza en forma de L y la pieza vertical, se forma la base del sistema de percepción del entorno. En los lados de esta base se colocarán el servomotor y el rodamiento, y en medio de estos puntos de apoyo se colocará el telémetro láser. En la Figura 5.14 se muestra un dibujo de la base diseñada. En esta figura se muestra la disposición del servomotor y el telémetro.

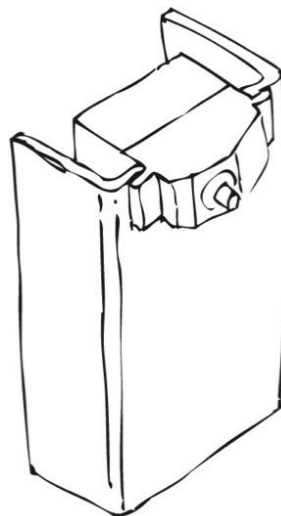


Figura 5.13 Pieza vertical de la base del sistema de percepción del entorno construida con lámina doblada. Los dobleces tienen la finalidad de aumentar la rigidez de la pieza y proteger al servomotor.

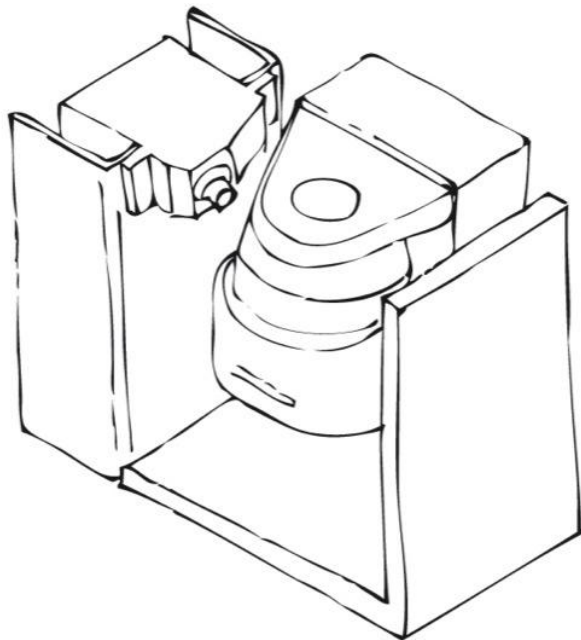


Figura 5.14 Propuesta de diseño para la base del sistema de percepción del entorno. La base está formada por dos piezas. Una de las piezas tiene forma de L y esta fabricada a partir de ángulo de aluminio. La otra está fabricada con lámina doblada. En la figura se muestra la disposición deseada para el telémetro láser de barrido y el servomotor

Para sujetar el telémetro a los dos puntos de apoyo, será necesario incluir un soporte que sirva de conexión entre estos elementos. Este soporte debe ofrecer una superficie en la parte posterior adecuada para sujetar el telémetro, y otras dos superficies a los lados para sujetarse al servomotor y al rodamiento.

Para comenzar con el diseño del soporte, se visualizó una caja que contuviera al telémetro, como la que se muestra en la Figura 5.15. Esta caja debe estar destapada por la parte que está frente a la zona de medición del telémetro, de modo que permita el paso del láser. La parte posterior del soporte no debe de interferir con el cable del telémetro ni con las rejillas destinadas para su ventilación. Estas rejillas se encuentran en la parte posterior del telémetro y pueden verse en la Figura 2.23. En cuanto a las caras superior e inferior del soporte, se consideró aprovecharlas como apoyo para mantener la estructura del soporte.

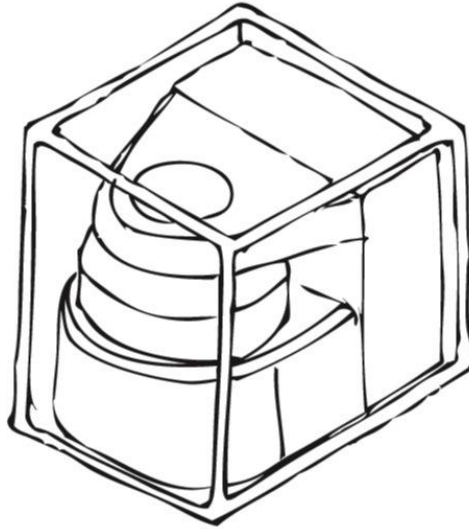


Figura 5.15 Esquema de la forma del soporte para el telémetro láser.

El primer paso para detallar el diseño del soporte del telémetro, fue definir cómo se sujetarían las tapas laterales a los apoyos de la base.

Para sujetar la tapa correspondiente al eje del servomotor, se decidió utilizar uno de los accesorios incluidos con el servomotor. El accesorio seleccionado fue un disco, como el que se muestra en la Figura 5.16, al que se le realizó un arreglo circular de barrenos cuyos centros están ubicados en una circunferencia de 20 *mm* de diámetro y separación de 90° entre cada barreno. Se maquinó un arreglo de barrenos en la tapa lateral igual al del accesorio del servomotor, para poder unir las dos piezas por medio de tornillos y tuercas. En la Figura 5.17 se ilustra esta idea.

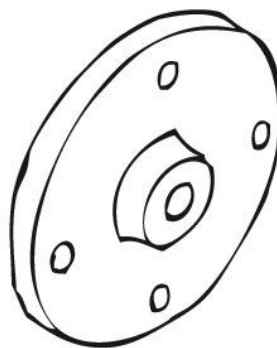


Figura 5.16 Accesorio en forma de disco para el eje del servomotor.

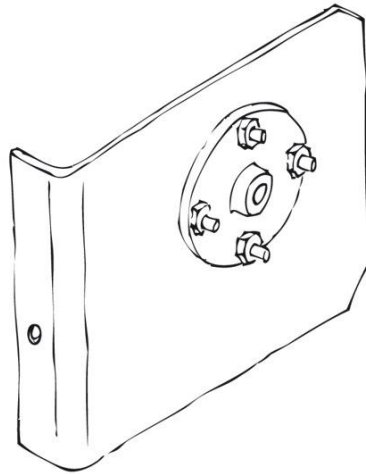


Figura 5.17 Accesorio para el servomotor y tapa lateral unido con tornillos y tuercas.

Para vincular la tapa del otro lado del soporte con el rodamiento, se pensó en una pieza de acoplamiento y un eje pequeño. La pieza de acoplamiento diseñada tiene forma cilíndrica y estará sujeta a la tapa correspondiente del soporte del telémetro por medio de tornillos como se muestra en la Figura 5.18. En esta figura se puede ver que la pieza de acoplamiento tiene dos orificios para sujetar el eje pequeño por medio de opresores.

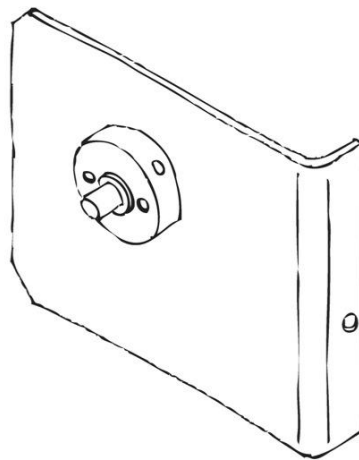


Figura 5.18 Accesorio para el servomotor y tapa lateral unido con tornillos y tuercas.

El método que se empleó para montar el rodamiento y el eje se muestra en la Figura 5.19. Ninguno de los dos elementos está colocado a presión para que sea fácil separarlos con objeto de remplazarlos o darles mantenimiento. Como se puede ver en la Figura 5.19, cuando se unen las piezas, la tapa del soporte empuja al eje contra el rodamiento y el escalón de la caja circular en la base empuja al rodamiento contra el eje. El eje tiene un escalón que presiona al rodamiento hacia la caja donde está contenido.

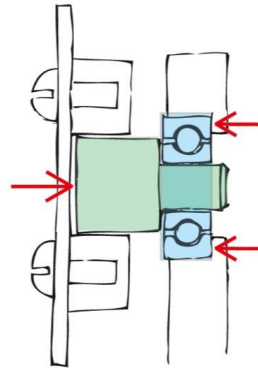


Figura 5.19 Montaje del eje y el rodamiento.

Para unir las tapas del soporte, se pensó en emplear dos espaciadores, uno colocado en la parte superior del soporte y el otro en la inferior. Para resolver la parte de la tapa posterior del soporte, se incluyeron dos pestañas, una en cada tapa lateral. Esto permite sujetar el telémetro con tornillos y dejar libre el espacio para el cable y las rejillas de ventilación. Estas ideas se muestran en la Figura 5.20, en donde se puede ver un boceto del soporte. Se decidió fabricar las piezas del soporte con aluminio, las dos tapas laterales con lámina y los espaciadores con solera.

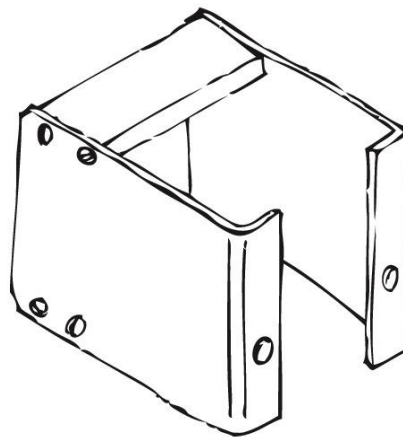


Figura 5.20 Soporte para el telémetro láser.

Se colocó un sistema de acoplamiento flexible entre el accesorio del servomotor y la tapa del soporte correspondiente para absorber los problemas con el alineamiento del eje del actuador y el rodamiento que se encuentra en el soporte contrario. El sistema de acoplamiento consiste en cilindros de hule colocados entre los tornillos y la tapa lateral del soporte correspondiente, como se ilustra en la Figura 5.21.

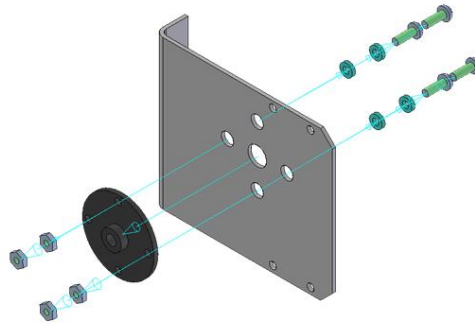


Figura 5.21 Sistema de acoplamiento flexible para absorber los problemas de alineamiento entre las piezas del sistema de percepción.

En la Figura 5.22 se muestra un boceto del sistema de percepción del entorno completo. En el Apéndice 1 del presente documento se pueden consultar los planos de las piezas del sistema, y en el Apéndice 2 se encuentra un breve instructivo de cómo colocar las piezas para armar el sistema.

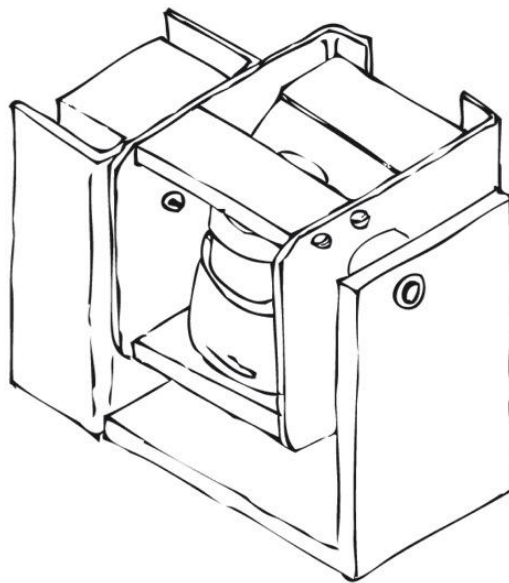


Figura 5.22 Sistema de percepción del entorno.

5.3 CONTROL DE MOVIMIENTO DEL SERVOMOTOR

En esta sección se describe la forma en que se generó la señal de control para que el servomotor pudiera realizar el movimiento deseado. Estos dispositivos se controlan mediante la técnica conocida como modulación por ancho de pulso. En los servomotores de modelismo, la posición del eje de salida está relacionada con el ancho de pulso de la señal de control, por lo que es posible calcular el ancho de pulso necesario para hacer que el eje del servomotor se coloque en cualquier posición dentro de su rango de movimiento.

Los servomotores de modelismo son motores de corriente directa que incluyen un controlador de lazo cerrado para la posición de su eje de salida. Estos dispositivos tienen tres terminales, una para el voltaje de alimentación, otra para el voltaje de referencia y otra para la señal de control.

El eje adopta una posición específica para un determinado tren de pulsos enviado por la terminal de control. Los pulsos de control deben tener ciertas características, las cuales pueden variar para cada modelo de servomotor. Generalmente el periodo de estos trenes de pulsos es de 20 ms y el ancho de pulso que corresponde a la posición neutra es 1.5 ms aproximadamente. Para anchos de pulso menores el eje gira en sentido horario y viceversa. En la Figura 5.23 se ilustra esto.

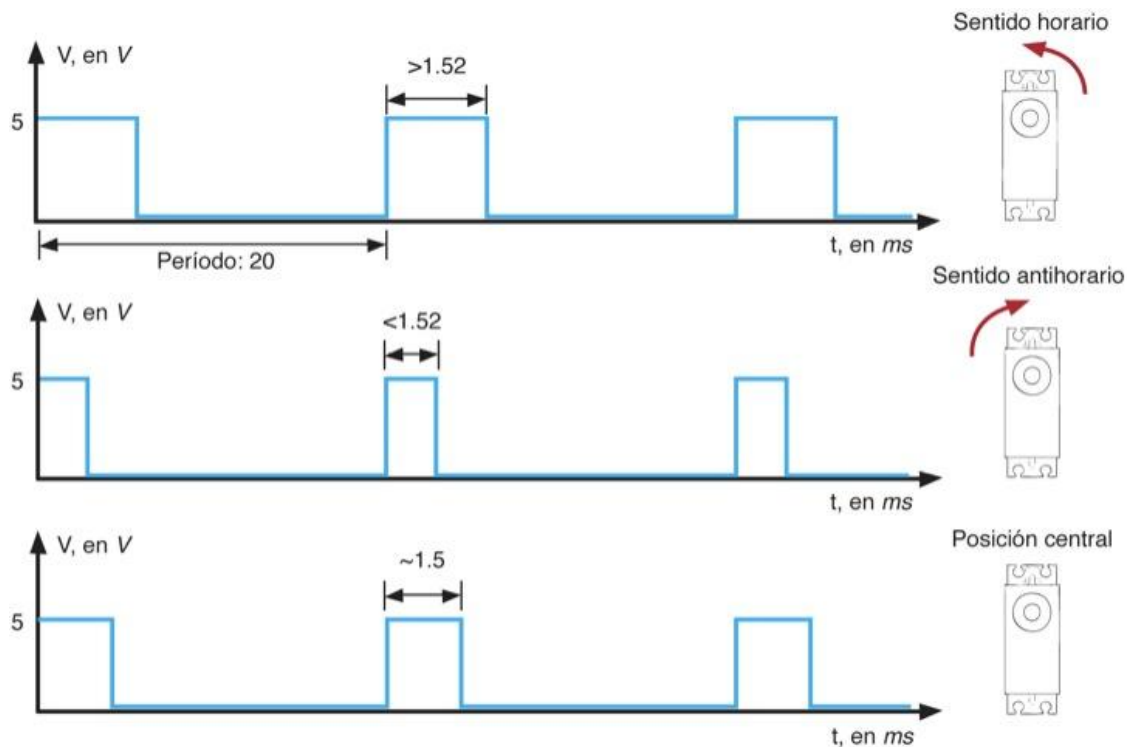


Figura 5.23 Diagrama donde se muestra la forma de controlar un servomotor.

El servomotor S3305 de la marca Futaba tiene una frecuencia de operación de 50 Hz. Esto significa que el periodo de la señal de control es de 20 ms, por lo que los pulsos de la señal de control deben enviarse cada que ocurre este lapso de tiempo. En la Figura 5.24 se muestra un esquema de la señal de control que debe enviarse al servomotor. El tiempo t_1 corresponde al lapso en el que la señal de control se mantiene en 5 V, y el tiempo t_2 al lapso en que se mantiene en 0 V. La suma de los tiempos t_1 y t_2 debe ser igual al periodo de la señal de control, que es de 20 ms.

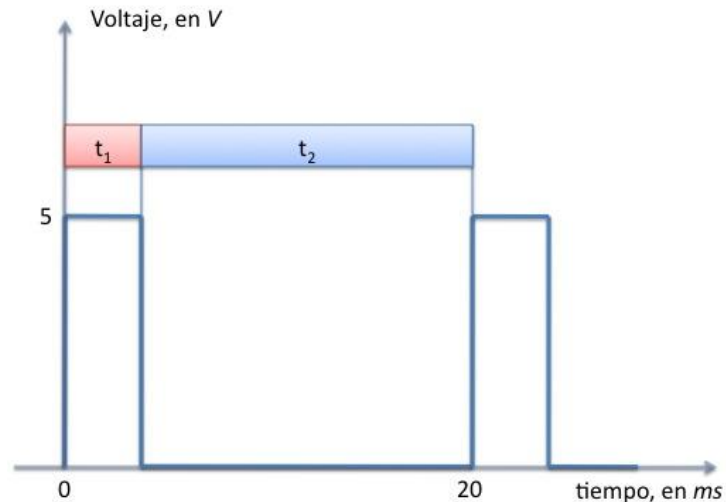


Figura 5.24 Esquema de la señal de control de posición para el servomotor. El ancho de pulso está directamente relacionado con la posición que toma el eje del servomotor.

En el caso particular del servomotor seleccionado, los anchos de pulso deben durar de 0.52 ms a 2.52 ms. Estos valores fueron determinados de forma experimental y corresponden a posiciones de 0° y 180° respectivamente.

En la Tabla 5.3 se muestran algunas posiciones del eje del servomotor y sus respectivos anchos de pulso. Como se puede observar en esta tabla, la relación entre el ancho de pulso y la posición del eje del servomotor es lineal.

Tabla 5.3 Valores experimentales de posiciones y anchos de pulso correspondientes para controlar al servomotor S3305 de la marca Futaba.

Posición	0°	45°	90°	135°	180°
Duración	0.52 ms	1.02 ms	1.52 ms	2.02 ms	2.52 ms

Para que el servomotor desarrolle el perfil de movimiento deseado, se debe conocer el ancho de los pulsos de la señal de control. Para calcular la duración de estos anchos de pulso se empleó la ecuación que se muestra a continuación, que se obtuvo de la información mostrada en la Tabla 5.3.

$$t_{pulso} = 0.52 + P \cdot \frac{2.52 - 0.52}{180 - 0}$$

$$t_{pulso} = 0.52 + \frac{P}{90}$$

donde:

t_{pulso} : es la duración del pulso de control

P : es la posición angular del eje del servomotor.

Debido a que el período deseado es de 560 ms, como se mencionó anteriormente al definir el perfil del movimiento, deben enviarse 28 pulsos de control al servomotor a lo largo de todo el movimiento. Ya que el perfil es simétrico, sólo se requiere calcular los anchos de pulso correspondientes para colocar el eje del servomotor en 14 posiciones diferentes más la posición inicial.

Se evaluó la función de posición angular contra tiempo cada 20 ms, que es el periodo de la señal de control, para obtener las 15 posiciones en las que debe colocarse el eje del servomotor. Posteriormente se calculó la duración del pulso correspondiente a cada posición empleando la ecuación que se obtuvo de la información de la Tabla 5.3. Las 15 posiciones junto con su respectiva duración de ancho de pulso se muestran en la Tabla 5.4. Como se puede observar en esta tabla, a cada posición calculada se le agregó el valor de la posición inicial, que es de 64°.

Se desarrolló un programa para generar la señal de control. Este programa envía sucesivamente los pulsos de control. El contador de la posición aumenta cada iteración hasta llegar a la última posición. Cuando esto ocurre la bandera que indica el sentido de giro cambia y el contador de posición comienza a disminuir en cada iteración. Al llegar a la primera posición, la bandera que indica el sentido de giro vuelve a cambiar, y así ocurre sucesivamente. En la Figura 5.25 se muestra el diagrama de flujo del programa de control, y en el Apéndice 3 se puede consultar el código de programación para el microcontrolador.

Para enviar el pulso que corresponde a cada posición, se enciende una salida digital durante cierto tiempo y luego se apaga durante el resto del periodo de la señal de control. Para mantener el estado de la salida, ya sea en encendido o en apagado, se llama a una rutina de retardo que provoca una espera durante el tiempo necesario. La duración de cada espera se obtiene de una tabla que contiene los valores de las constantes para la función de retardo. Esta información aparece en Tabla 5.4. En esta tabla se muestran las duraciones de los pulsos correspondientes a cada una de las 15 posiciones que componen el barrido vertical.

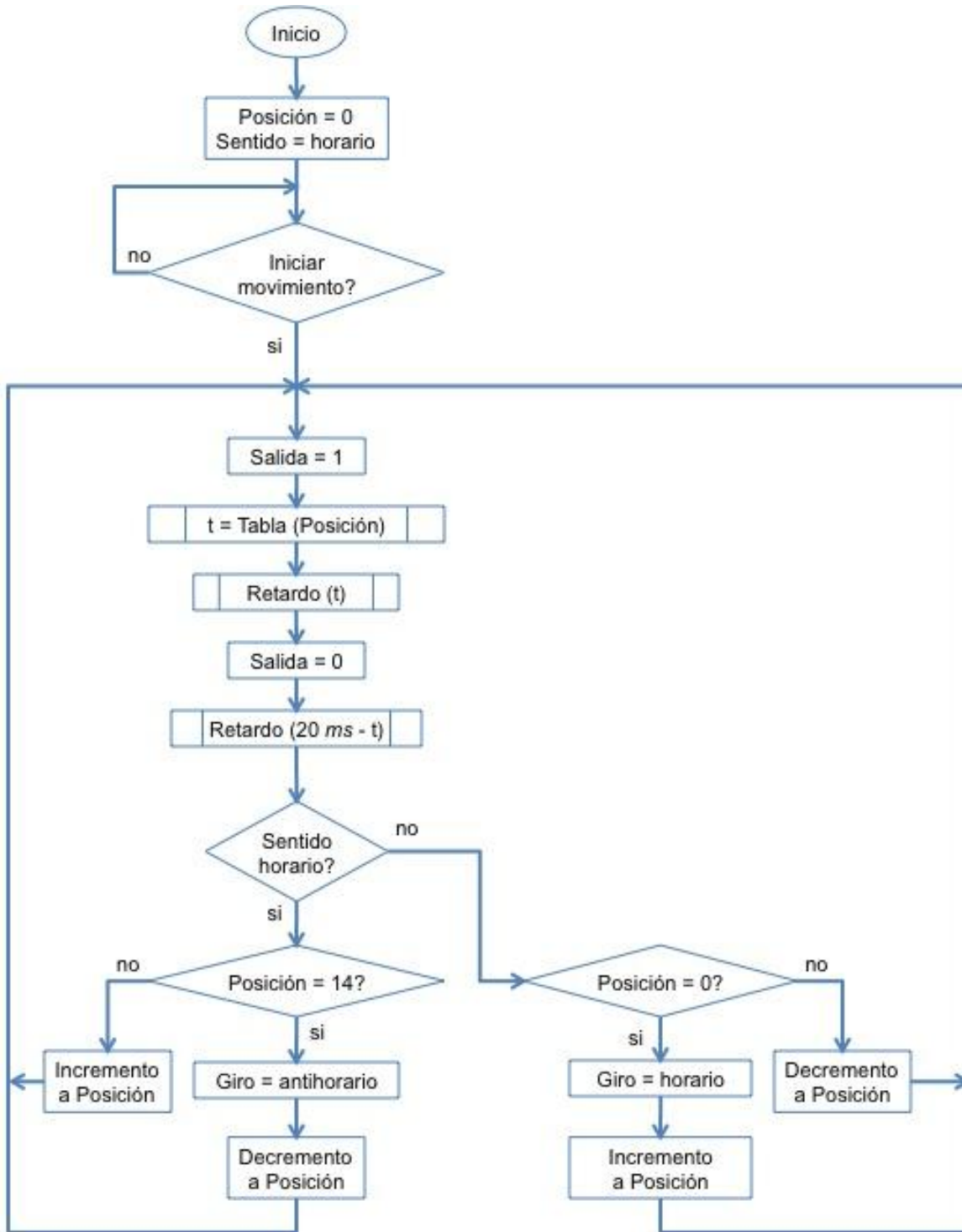


Figura 5.25 Diagrama de flujo para generar la señal de control para que el servomotor desarrolle el movimiento armónico simple deseado.

Tabla 5.4 Posiciones del eje del servomotor y duración del pulso de control correspondiente para desarrollar un movimiento armónico simple con semiperiodo de 280 ms, amplitud de 15° y posición inicial de 64°.

Posición	Tiempo, en s	Posición angular, en °	Duración del pulso, en ms
1	0	64	1.2311
2	20	64.188	1.2332
3	40	64.7427	1.2394
4	60	65.6363	1.2493
5	80	66.8238	1.2625
6	100	68.2459	1.2783
7	120	69.8311	1.2959
8	140	71.5	1.3144
9	160	73.1689	1.3330
10	180	74.7541	1.3506
11	200	76.1762	1.3664
12	220	77.3637	1.3796
13	240	78.2573	1.3895
14	260	78.812	1.3957
15	280	79	1.3978

Para hacer esto, se envía un tren de pulsos. El tren de pulsos se forma al mantener encendida la salida digital durante cierto tiempo y posteriormente apagarla durante el tiempo restante para completar los 20 ms que dura cada periodo de instrucción del servomotor.

5.4 DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y EL REGULADOR DE VOLTAJE PARA EL SISTEMA

Los elementos del sistema de percepción requieren de tres voltajes diferentes. En primer lugar se necesita una fuente de 12 V para energizar al telémetro. Por otra parte se requiere de 6 V para alimentar al servomotor. Y finalmente se requiere de 5 V para polarizar el circuito de control y para generar la señal de control.

Se decidió que todos los dispositivos se energizaran con las baterías del robot IN115309 por lo que es necesario implementar dos etapas de regulación de voltaje, una para regular de 12 a 6 V, y la otra para regular de 6 a 5 V.

El voltaje requerido para energizar el telémetro puede obtenerse directamente de las baterías del robot IN113509, que son de 12 V, por lo que no es necesario hacer uso de algún regulador de voltaje. Así que solamente se construyó un

circuito de protección para prevenir alguna conexión errónea que pudiera dañar al telémetro. En la Figura 5.26 se muestra el diagrama de este circuito.

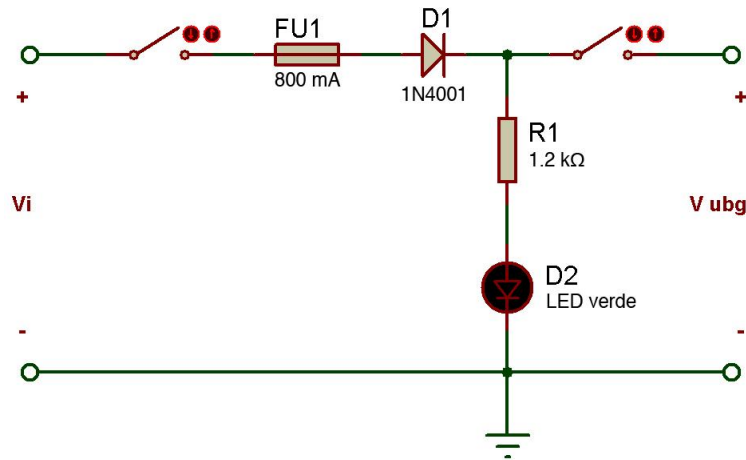


Figura 5.26 Diagrama electrónico del circuito de protección para prevenir malas conexiones que puedan dañar al telémetro.

El circuito de protección cuenta con dos interruptores, el primero permite que el voltaje llegue a un LED indicador que enciende cuando se ha polarizado de forma correcta. Cuando el LED está encendido indica que se puede activar el segundo interruptor para hacer llegar el voltaje a las terminales del telémetro. Se agregó al circuito un diodo que protege al telémetro en caso de que se encienda el segundo interruptor a pesar de que el LED indicador esté apagado. Por último se colocó un fusible que evita que la corriente exceda los niveles normales de operación del UBG-04LX-F01.

En cuanto al servomotor, se requiere un voltaje de 6 V. Para poder suministrar la potencia necesaria, se decidió implementar un regulador electrónico de voltaje empleando un transistor, un diodo zener y un resistor. En la Figura 5.27 se muestra la disposición de los elementos de este regulador. Este tipo de circuitos se puede diseñar considerando los siguientes puntos.

- 1 Selección del transistor
- 2 Definir el voltaje de salida
- 3 Determinar el voltaje del diodo zener
- 4 Calcular el valor del resistor y la potencia del diodo zener.

Durante el diseño del circuito se deben considerar los peores casos, que son:

- 1 Cuando la carga demanda la corriente máxima y el voltaje de entrada es el mínimo
- 2 Cuando no hay carga y el voltaje de entrada es el máximo.

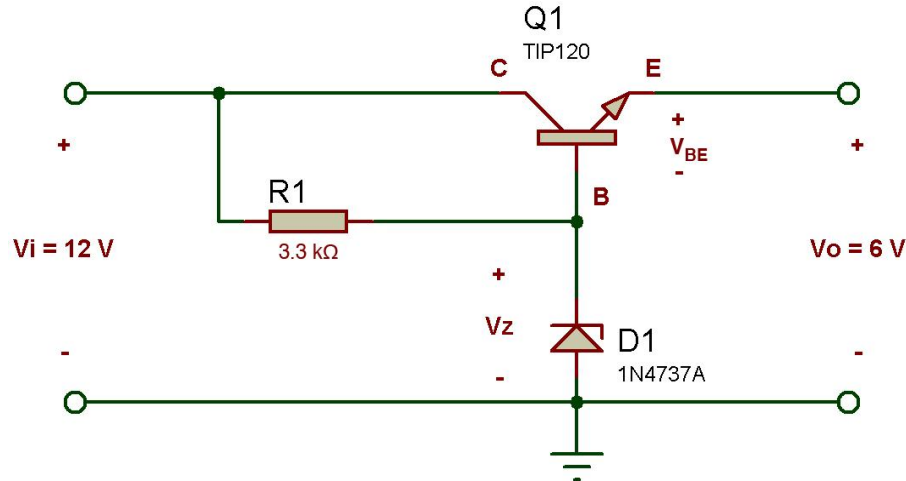


Figura 5.27 Diagrama electrónico del regulador implementado para obtener el voltaje y corriente necesarios para el funcionamiento del servomotor.

Para seleccionar un transistor adecuado, debe considerarse la corriente máxima que demandará la carga. Esta corriente circulará por el transistor, del colector al emisor, por lo que el transistor debe ser capaz de soportar esta corriente.

Se estima que el servomotor tendrá un consumo de corriente del orden de 1 A, por lo que se seleccionó un transistor bipolar de juntura Darlington TIP120, con las siguientes características:

$$\begin{aligned} I_{CE} &= 5 \text{ A} \\ V_{BE} &= 1.5 \text{ V} \\ \beta &= 1000 \end{aligned}$$

El voltaje de salida debe ser de 6 V, que es lo que requiere el servomotor para su funcionamiento. Con este valor junto con el voltaje de base a emisor del transistor se puede determinar el voltaje del diodo zener por medio de una ecuación de voltajes de malla como se muestra a continuación:

$$V_Z = V_o + V_{BE}$$

$$V_Z = 6 + 1.5$$

$$V_Z = 7.5 \text{ V}$$

Para calcular el valor de la resistencia se emplea la ecuación de la ley de Ohm. La corriente que pasa por el resistor es la corriente de base del transistor. Y la caída de potencial entre sus terminales puede calcularse como la diferencia entre el voltaje de entrada y el voltaje del diodo zener. Para realizar estos

cálculos se considera el caso en que la corriente de salida es máxima y voltaje de entrada es mínimo. Se contempló para el valor mínimo del voltaje de entrada el valor mínimo con que puede funcionar el telémetro que es de 10.8 V, ya que su voltaje de operación es de $12 V \pm 10\%$.

$$R = \frac{V_R}{i_R}$$

$$R = \frac{V_{i,min} - V_Z}{i_B}$$

$$R = \frac{V_{i,min} - V_Z}{\frac{I_C}{\beta}}$$

$$R = \frac{10.8 - 7.5}{1 \times 10^{-3}}$$

$$R = 3.3 \text{ k}\Omega$$

Finalmente se calcula la potencia del diodo zener considerando el caso en que no hay carga conectada a la salida del circuito regulador y el voltaje de entrada es máximo. En este caso el voltaje de entrada se consideró como el valor máximo de operación del telémetro, que es de 13.2 V.

La potencia requerida para el diodo zener se calculó como el producto del voltaje entre sus terminales y la corriente que circula a través de él. El considerar que no existe carga en la salida del circuito implica que no circula corriente del colector al emisor del transistor y por lo tanto no hay corriente de base. Por lo que toda la corriente circulará por el resistor y por el diodo zener. Esta corriente puede calcularse empleando la ley de Ohm de la siguiente forma:

$$i_Z = i_R$$

$$i_Z = \frac{V_R}{R}$$

$$i_Z = \frac{V_i - V_Z}{R}$$

$$i_Z = \frac{13.2 - 7.5}{3.3 \times 10^3}$$

$$i_z = 1.7273 \text{ mA.}$$

Por lo que la potencia mínima que debe soportar el diodo zener es:

$$W_z = V_z \cdot i_z$$

$$W_z = 7.5 \cdot 1.7273 \times 10^{-3}$$

$$W_z = 12.9548 \text{ mW.}$$

Con los dispositivos que se han calculado es posible implementar el circuito regulador de voltaje capaz de entregar el voltaje y corriente necesarios para que el servomotor funcione correctamente.

Hasta ahora se ha resuelto el problema de proporcionar el voltaje al telémetro y al servomotor. Hace falta obtener el voltaje para alimentar el circuito de control y poder generar la señal de modulación de ancho de pulso para el servomotor. Para esto se decidió emplear un regulador a 5 V de baja caída KA78R05.

En la Figura 5.28 se muestra la conexión del regulador KA78R05. El voltaje de entrada se obtiene del circuito regulador que se muestra en la Figura 5.27.

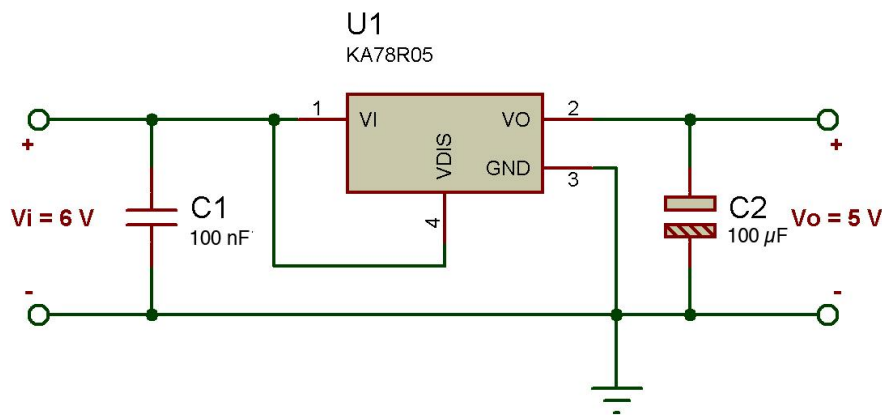


Figura 5.28 Diagrama electrónico de conexión para el regulador a 5 V de baja caída KA78R05

Al implementar las dos etapas de regulación de voltaje, la de 12 a 6 V y la de 6 a 5 V, se tienen los voltajes necesarios para hacer que el sistema de percepción del entorno funcione correctamente. Sin embargo para poder interactuar con el sistema es necesario contar con alguna interfaz entre el usuario y el sistema. En el siguiente apartado se hace la descripción de la interfaz desarrollada para cumplir con esta función.

5.5 INTERFAZ PARA CONTROLAR EL SISTEMA

Una vez que el sistema de percepción del entorno cuenta con todos los elementos necesarios para su funcionamiento, es posible continuar con el desarrollo de una interfaz que facilite la interacción entre el usuario y el sistema.

Para esto se realizó un programa para computadora que despliega una ventana en donde se pueden configurar algunas características del sistema, iniciar el proceso de medición y visualizar la información recopilada. En la Figura 5.29 se muestra una imagen de esta ventana, y se indican las secciones que contiene. En el Apéndice 4 se da una explicación de cada una de estas secciones.

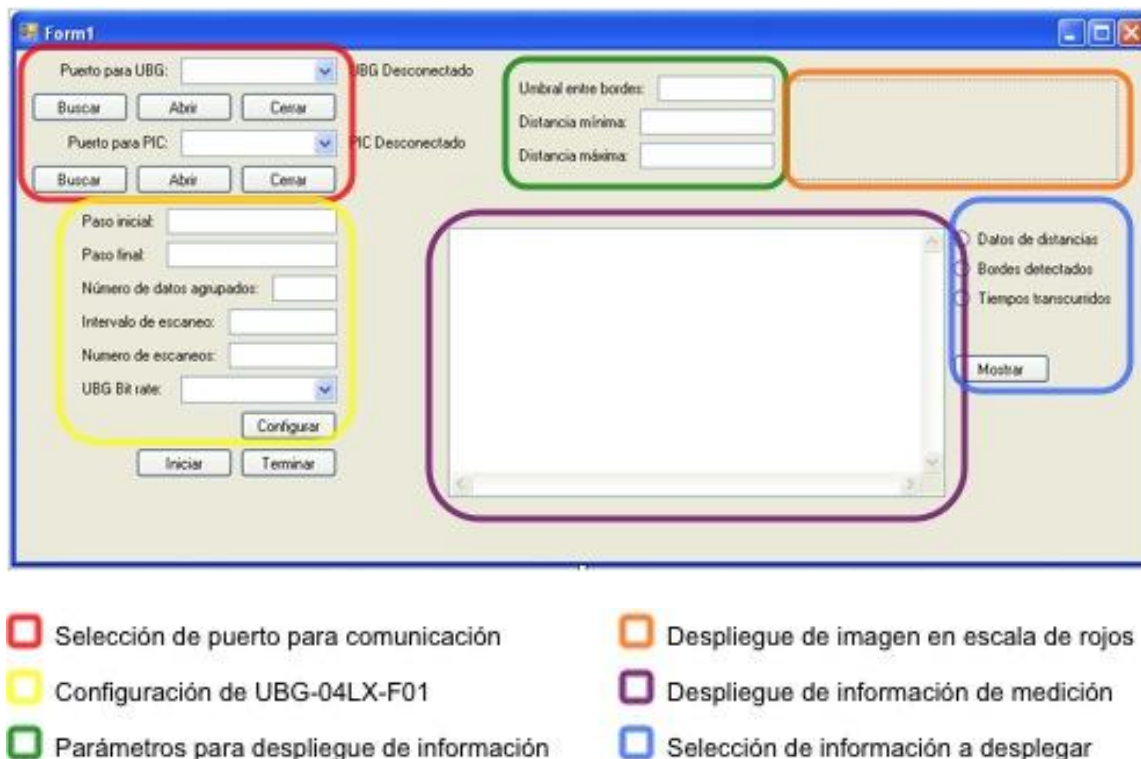


Figura 5.29 Interfaz para facilitar la interacción entre el usuario y el sistema de percepción del entorno. Se indican las funciones de cada sección de la venta.

En la interfaz se incluyeron dos formas para visualizar la información, la primera se denominó matriz de detección de bordes y la segunda imagen tridimensional dibujada con escala de rojos.

En la matriz de detección de bordes se representa la existencia de bordes en el espacio de medición por medio de unos y ceros. Los renglones de la matriz corresponden a las diferentes posiciones del servomotor, es decir, al barrido vertical, y las columnas corresponden a los distintos pasos de las exploraciones

del telémetro, es decir, al barrido horizontal. En cada celda se coloca un uno cuando se detecta un borde, o un cero en caso de que no. Para detectar los bordes se compara cada dato de distancia con los datos adyacentes. Si existe una diferencia superior al umbral definido se considera que existe un borde. Este umbral puede configurarse en la ventana de la interfaz.

Para desplegar la información con escala de rojos se divide el espacio de medición en una cuadrícula. Cada cuadro es coloreado con un tono de rojo de acuerdo con la distancia correspondiente. Mientras más grande sea la distancia el tono será más oscuro, para representar una mayor profundidad y viceversa. Para asignar los tonos se define el rango de medición y se divide entre el número de tonos disponibles. El rango de medición se puede configurar por medio de los parámetros de distancia mínima y distancia máxima, en esta sección de la ventana.

Una vez que se ha detallado el diseño de los elementos del sistema, es posible construir un modelo funcional que permita verificar el desempeño logrado en la obtención de información tridimensional del entorno. En el siguiente capítulo se expondrán las pruebas que se realizaron al modelo funcional y los resultados que se obtuvieron.

CAPÍTULO 6

Pruebas y resultados

Una vez concluida la etapa de diseño a detalle, se obtuvo la información suficiente para armar el modelo funcional del sistema de percepción del entorno, con el que se probó la efectividad en el cumplimiento de su función. En este capítulo se describen las pruebas que se realizaron al sistema y se muestran los resultados que se obtuvieron.

Se realizaron pruebas para medir el periodo y la amplitud del movimiento, y se obtuvo una gráfica experimental de posición contra tiempo para verificar si el movimiento obtenido coincide con las características de diseño. También se realizaron pruebas de medición y se desplegó la información tridimensional, empleando los métodos de detección de bordes y de imágenes con diferentes tonos de rojo.

6.1 Prueba de ensamble

El objetivo de esta prueba fue verificar que el ensamble pudiera ser realizado de forma correcta. En esta prueba se buscó detectar problemas de manufactura que pudieran ocasionar dificultades en el ensamble, para tener la oportunidad de realizar los ajustes necesarios a las piezas. También se verificó que los espacios para colocar los tornillos y tuercas fueran suficientemente amplios para que cupieran desarmador y pinzas, en caso de requerir usarlos.

La prueba consistió en seguir los pasos que se describen en el Apéndice 2, para unir las piezas y armar el sistema de percepción del entorno. Fue posible realizar el ensamble de forma satisfactoria sin necesidad de modificar las piezas. En la Figura 6.1 se muestra una imagen del sistema armado con las piezas manufacturadas. Los planos de estas piezas se encuentran en el Apéndice 1 del presente trabajo de tesis.

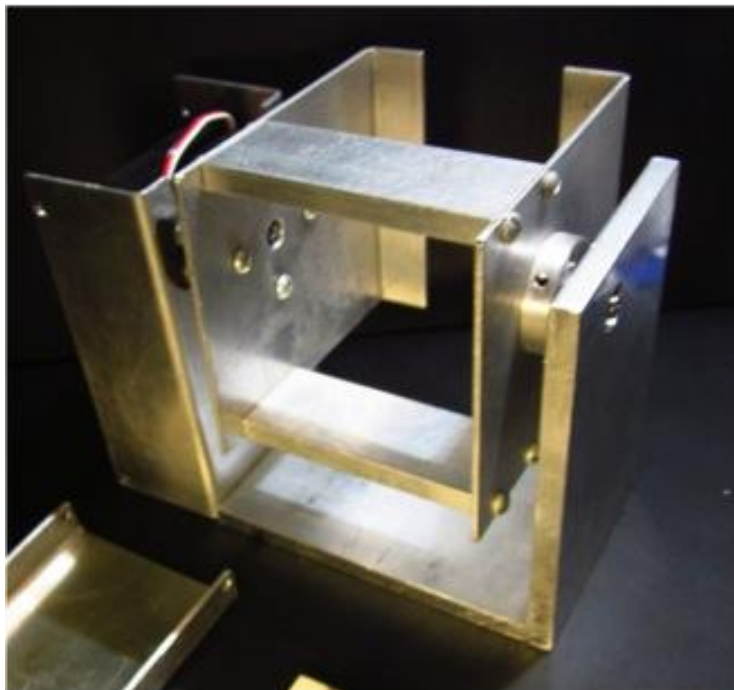


Figura 6.1 Sistema de percepción del entorno que se ensambló con las piezas fabricadas.

Una vez que se ensambló el sistema de percepción del entorno, fue posible realizar pruebas para verificar su desempeño. Las primeras pruebas tuvieron como objetivo comprobar que el movimiento desarrollado con el servomotor cumpla con las características que fue diseñado. Posteriormente, se llevaron a cabo otras pruebas enfocadas a obtener y analizar los resultados de mediciones tridimensionales realizadas a diferentes objetos.

6.2 Medición de la duración del periodo del movimiento armónico simple

En esta prueba se realizaron dos experimentos. El primero consistió en hacer una simulación del programa para controlar al servomotor. En esta simulación se midió el tiempo que dura cada pulso de la señal de control. En el segundo experimento se midió el tiempo que tardan en realizarse los barridos verticales. Para esto se usó un cronómetro manual. A continuación se hará la descripción de estos dos experimentos.

Simulación del programa de control en el entorno de desarrollo integrado MPLAB de Microchip

El objetivo de este experimento fue comprobar que cada pulso de control enviado al servomotor tuviera una duración de 20 ms y que el tiempo que tardan en enviarse las 14 posiciones que componen un barrido vertical completo fuera de 280 ms. Para realizar el experimento se simuló el programa de control en el entorno de desarrollo integrado MPLAB de Microchip y se efectuaron las mediciones de tiempo necesarias.

En la Figura 6.2 se muestra la imagen de dos ventanas del entorno de desarrollo obtenidas durante la simulación. En una de las ventanas se puede ver, señalado con un rectángulo azul, el tiempo que tardaron en enviarse las 14 posiciones. En la otra ventana se indica con un rectángulo rojo el valor de la variable CONTEO. En esta variable se almacena el número de la posición del barrido. El valor 0x0E está en hexadecimal y corresponde al número 14 en decimal.

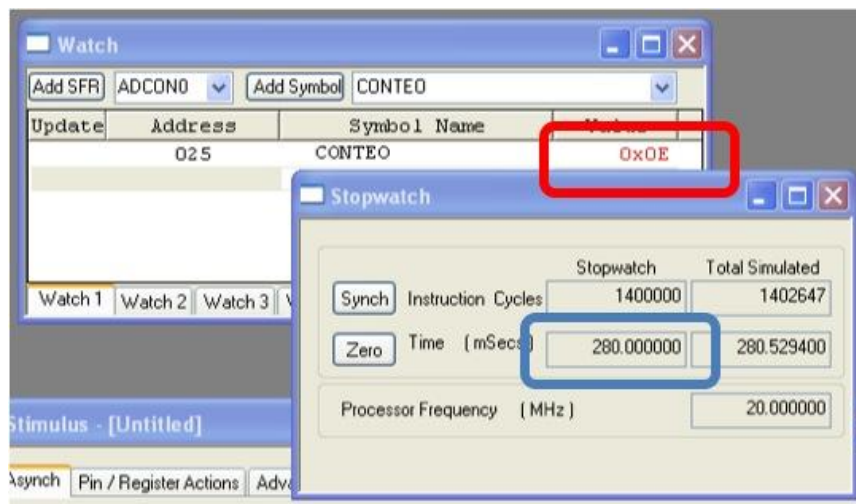


Figura 6.2 Resultado del experimento para verificar la duración de los pulsos de control. En las ventanas mostradas se puede observar que el barrido de 14 posiciones se realiza en 280 ms.

Al realizar este experimento, se pudo constatar que la duración de cada uno de los 15 diferentes pulsos de la señal de control tiene una duración de 20 *ms*.

Durante la simulación, también se comprobó que el ciclo de retardo para generar los pulsos de control permitiera provocar demoras con resolución de 200 *ns*. Con base en este resultado, se pudo conocer la resolución angular con la que se puede controlar el servomotor. Para esto se realizaron los cálculos que se muestran en el siguiente apartado.

Cálculo de la resolución angular lograda con el servomotor

Como se vio en capítulos anteriores, los servomotores de modelismo como el que se empleó, son controlados por medio de modulación de ancho de pulso. La resolución de la posición angular del eje del servomotor está estrechamente relacionada con la resolución que se tenga para controlar la duración del ancho de pulso. Mientras más pequeña sea la variación que se puede obtener en la duración del ancho de pulso, mayor será la resolución angular.

En el programa desarrollado para controlar al servomotor, la duración del ancho de pulso se varía por medio de una rutina de retardo, como se puede ver en el diagrama de flujo de la Figura 5.16. La resolución con la que se pudieron generar estos retardos es de 200 *ns*, que corresponde a un ciclo de instrucción del microcontrolador empleado, cuando se usa un oscilador de 20 *MHz*.

La resolución angular del barrido vertical del sistema de percepción del entorno se puede calcular de la siguiente forma:

$$R_{angular} = \frac{A}{\# \text{ posiciones}}$$

donde:

$R_{angular}$: Es la resolución angular

A : Es la amplitud de movimiento del eje del servomotor

$\# \text{ posiciones}$: Es el número de posibles posiciones.

El número de posibles posiciones se puede obtener al dividir la diferencia entre la duración del ancho de pulso que corresponde a la posición de 0° y 180°, y dividirla entre la resolución que se tiene para causar los retardos en el programa de control, como se muestra a continuación. En la Tabla 5.3 se puede consultar la duración del ancho de pulso para la posición de 0° y 180°.

$$\# \text{ posiciones} = \frac{(2.52 - 0.52) \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-9}}$$

$$\# \text{ posiciones} = \frac{2}{200 \times 10^{-6}}$$

$$\# \text{ posiciones} = 1 \times 10^4.$$

Este resultado permite ver que es posible generar 10 mil posiciones diferentes con ayuda del programa de control que se desarrolló. Por lo tanto, la resolución angular del barrido vertical del sistema es:

$$R_{\text{angular}} = \frac{180}{1 \times 10^4}$$

$$R_{\text{angular}} = 0.018^\circ.$$

Ahora se describirá el segundo experimento que se realizó durante la prueba de medición de la duración del periodo del movimiento armónico simple.

Medición de la duración de los barridos verticales

Con este experimento se buscó confirmar que el periodo del movimiento armónico simple sea de 560 ms, y por lo tanto, que cada barrido vertical se realice en 280 ms. Hay que recordar que se realizan dos barridos verticales en cada periodo del movimiento, uno ascendente y otro descendente. Este experimento ayuda a verificar que el movimiento obtenido cumpla con las características de diseño y que efectivamente se realicen más de 3.5 barridos verticales cada segundo.

Para realizar esta prueba se decidió utilizar un cronómetro manual. Debido a que cada barrido vertical dura menos de una tercera parte de segundo, es complicado medir el tiempo que tarda en realizarse uno solo de ellos. Por esta razón, se midió el tiempo transcurrido a lo largo de cierta cantidad de movimientos, y posteriormente se dividió entre el número de barridos realizados. Se siguió este procedimiento para diferentes cantidades de barridos.

En la Tabla 6.1 se pueden observar los resultados del experimento de medición de la duración de los barridos verticales. La duración del barrido calculada en los diferentes casos es considerablemente cercana a los 280 ms.

El resultado obtenido durante el experimento fue satisfactorio y permite validar que el periodo del movimiento armónico simple es de 280 ms, que es acorde con lo que se diseñó.

Tabla 6.1 Resultados obtenidos en la prueba de medición de la duración de los barridos verticales.

# de barridos	tiempo medido, en s	duración de cada barrido, en s
10	2.81	0.281
20	5.62	0.281
40	11.31	0.2828
80	22.37	0.2796
100	28.03	0.2803

Ahora, se continuará con la descripción de las pruebas para analizar el desempeño del movimiento desarrollado con el servomotor. La siguiente prueba que se describe es la que consiste en medir la amplitud del movimiento.

6.3 Prueba de la amplitud de movimiento

Esta prueba se realizó con el propósito de comparar la amplitud del movimiento que se generó con el servomotor con la del movimiento armónico simple que se diseñó. Durante la prueba se hizo funcionar al servomotor para observar el movimiento efectuado y se detuvo al llegar a los puntos extremos para verificar que los límites del movimiento fueran los correctos.

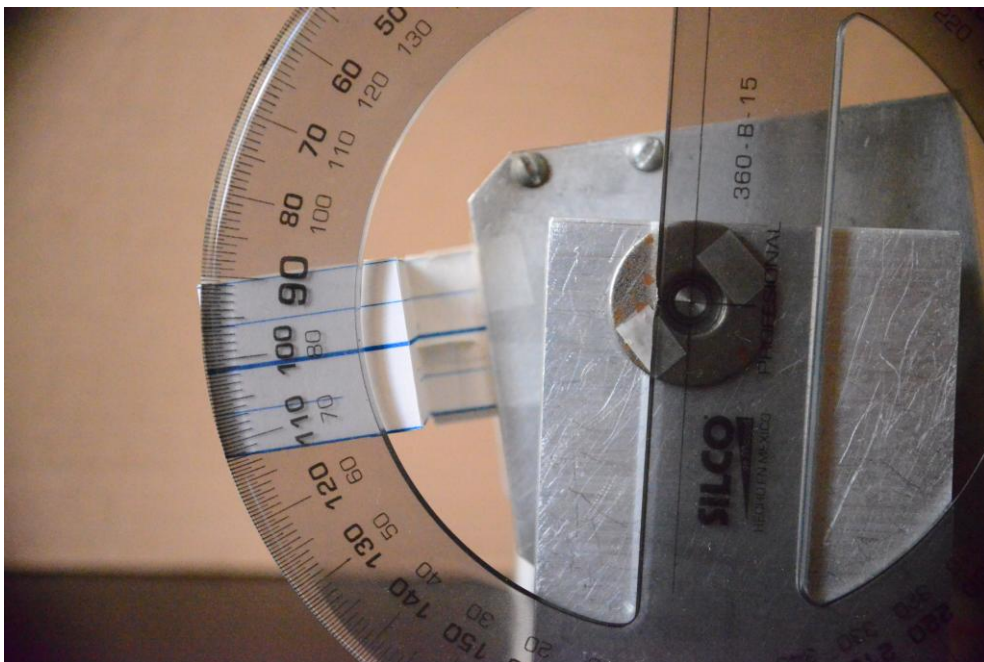


Figura 6.3 Experimento para verificar la amplitud del barrido vertical. Se colocó un transportador y un apuntador para visualizar la posición angular del soporte del telémetro.

Para realizar esta prueba, se colocó un transportador en una de las partes laterales de la base del para poder observar la posición angular del soporte del telémetro. También se agregó un apuntador al soporte del telémetro para facilitar la visualización de la posición angular. En la Figura 6.3 se puede ver una foto del sistema de percepción con el transportador y el apuntador colocados.

Al realizar esta prueba, se pudo verificar que la amplitud del movimiento es de 15° y que los puntos extremos del movimiento fueron 64° y 79° , de acuerdo con la escala interna del transportador que se colocó.

Adicionalmente, durante esta prueba se pudo observar de forma cualitativa que el movimiento desarrollado por el servomotor sí presenta una curva de velocidad en la que la magnitud disminuye al llegar a los puntos extremos del movimiento.

6.4 Prueba del movimiento armónico

Esta prueba se realizó para comparar el perfil de movimiento desarrollado por el servomotor con el movimiento armónico simple diseñado. Para efectuar la prueba se empleó el sistema equipado con el transportador y el apuntador, como se puede ver en la Figura 6.3.

La prueba consistió en grabar un vídeo del sistema en funcionamiento para analizarlo y obtener la gráfica del movimiento observado. El archivo de vídeo se descompuso en fotogramas y se recuperó la información del tiempo en que se registró cada uno. Posteriormente, se observó la posición angular con ayuda del apuntador y el transportador. En la Tabla 6.2 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 6.2 Relación de posición angular y tiempo obtenida de los fotogramas en que se descompuso el video de la prueba del movimiento armónico.

# Fotograma	Tiempo, en s	Posición, en $^\circ$	Posición relativa, en $^\circ$
1	0	70	-1.5
2	0.02	67	-4.5
3	0.04	65	-6.5
4	0.07	64.5	-7
5	0.09	65	-6.5
6	0.11	66	-5.5
7	0.14	70	-1.5
8	0.16	72.5	1
9	0.19	76	4.5
10	0.21	77.5	6
11	0.23	78.5	7
12	0.26	78	6.5
13	0.28	77	5.5

Con los datos de tiempo y posición angular fue posible dibujar la gráfica del movimiento que se muestra en la Figura 6.4. En la Figura 6.5 se presenta otra gráfica del movimiento en la que se toma como referencia la línea de equilibrio.

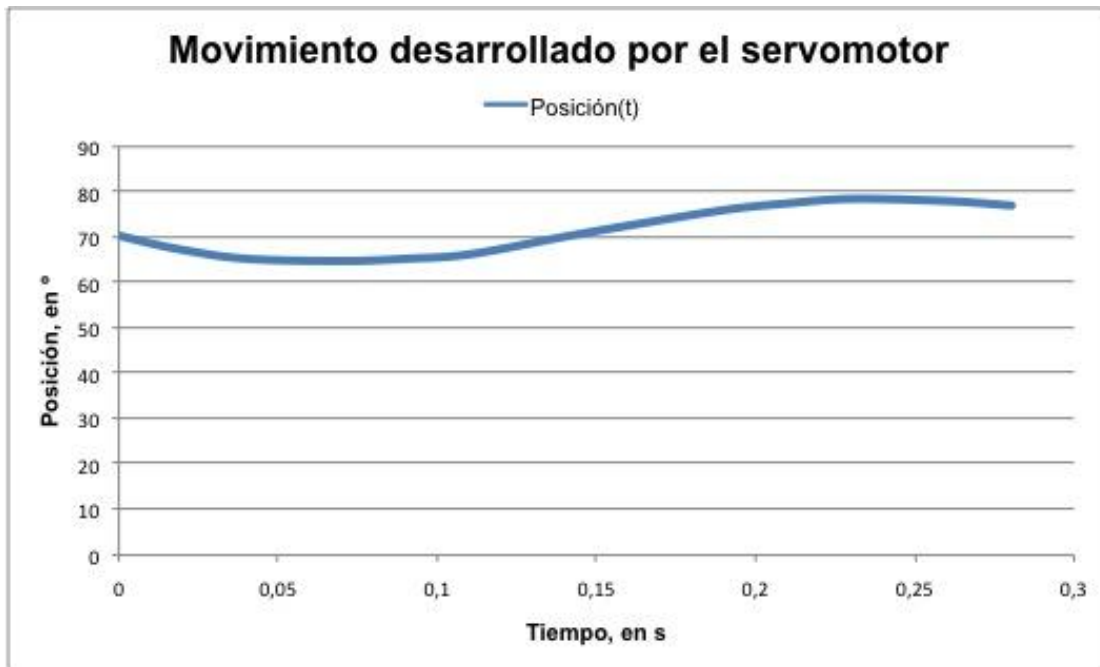


Figura 6.4 Gráfica experimental del movimiento desarrollado por el servomotor



Figura 6.5 Gráfica experimental del movimiento desarrollado por el servomotor con la referencia en la línea de equilibrio.

En las Figuras 6.4 y 6.5 se puede ver que el movimiento registrado de forma experimental se aproxima de forma satisfactoria al movimiento armónico que se diseñó. Ahora se continuará con la descripción de las pruebas efectuadas para analizar los resultados de las mediciones tridimensionales.

6.5 Pruebas de percepción del entorno

Durante esta prueba se realizaron tres experimentos. El primero fue enfocado a revisar el desempeño del sistema de percepción, para detectar objetos con diferentes características. El segundo y tercer experimento se realizaron para analizar el funcionamiento de los métodos de despliegue de información. A continuación se describirán los experimentos realizados y se mostrarán los resultados que se obtuvieron.

Detección de objetos con diferentes características: material, color y forma

El objetivo de este experimento fue probar el desempeño del sistema para detectar cinco objetos con diferentes características. Los objetos seleccionados para el experimento fueron un juguete de peluche, una barra de acero, una caja de cartón, una manzana y una botella de plástico.

El experimento consistió en realizar mediciones tridimensionales de los objetos por separado para revisar si se detectaban correctamente. Los resultados obtenidos durante este experimento se muestran en la Tabla 6.3. En esta tabla se presentan las características de los objetos empleados en el experimento.

Tabla 6.3 Resultados de la prueba de detección de objetos con diferente tamaño, forma, material y color.

Objeto	Dimensiones, en mm			Material	Color	Resultado de la prueba
	Largo	Ancho	Alto			
juguete	130	100	160	peluche	blanco	bordes detectados
barra	25	25	55	acero	metálico	bordes detectados
caja	110	55	55	cartón	naranja	bordes detectados
manzana	70	70	65	manzana	rojo	bordes detectados
botella	80	80	330	plástico	transparente	bordes no detectados

Como se puede observar en la Tabla 6.3 la botella de plástico transparente no fue detectada. Se realizaron otras pruebas con objetos transparentes y se encontró que el telémetro no puede detectar objetos con esta característica.

El segundo experimento que se desarrolló durante las pruebas de percepción del entorno fue realizado para verificar el funcionamiento del método para desplegar la información, que se denominó detección de bordes. En el siguiente apartado se mostrarán los resultados que se obtuvieron.

Pruebas y resultados del método de detección de bordes

En este experimento se puso a prueba el método de detección de bordes que se describió en el Capítulo 5. Como se mencionó, el método consiste en almacenar la información de los bordes detectados al realizar una medición tridimensional, en un arreglo de ceros y unos denominado matriz de bordes. Cada que se detecta un borde, se coloca un uno en la celda correspondiente de la matriz.

El experimento consistió en observar la información de los bordes detectados al realizar mediciones tridimensionales, por separado, de tres objetos con diferente forma. Los objetos seleccionados fueron una pieza cilíndrica colocada en posición vertical, un prisma rectangular colocado en posición inclinada y una pelota esférica. Para realizar las mediciones, se colocó el sistema sobre una mesa despejada para procurar que los únicos bordes presentes en el espacio de medición fueran los del objeto, y así facilitar la visualización del contorno del objeto correspondiente en la matriz de detección de bordes. Los objetos fueron colocados en frente del sistema, aproximadamente a 10 cm de distancia.

El primer objeto que se midió fue la pieza cilíndrica. En la Figura 6.6 se muestra la matriz de bordes que se obtuvo al realizar la medición de este objeto. El resultado que se obtuvo al desplegar los datos fue satisfactorio. Al mostrar la matriz se ve claramente la silueta del objeto medido.

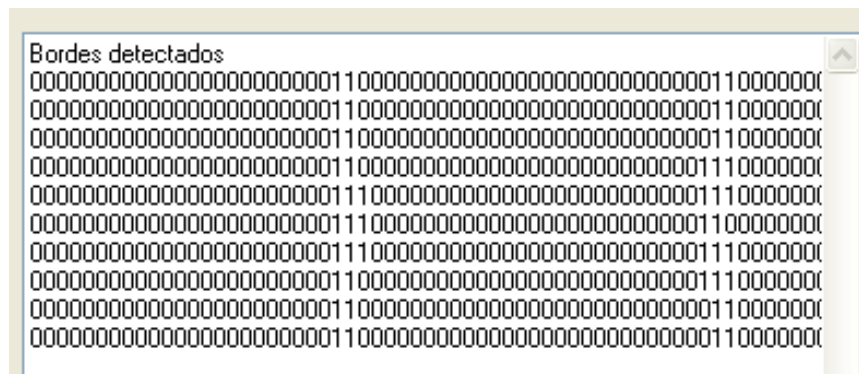


Figura 6.6 Despliegue de datos de una prueba de medición realizada a una pieza cilíndrica por medio del método de detección de bordes.

El siguiente objeto que se midió fue el prisma rectangular en posición inclinada. Se realizó esta medición para comprobar la efectividad del método para detectar bordes que no sean completamente verticales. En la Figura 6.7 se muestra el resultado obtenido al desplegar la información con el método de detección de bordes. Se puede observar la silueta del objeto en posición inclinada, pero se muestra una discontinuidad en su contorno.

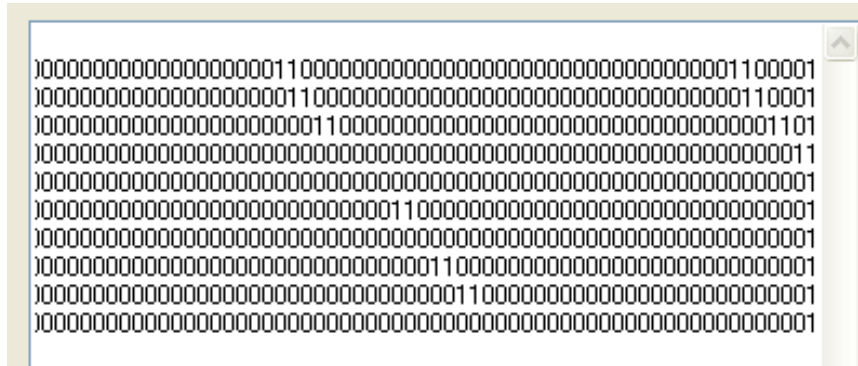


Figura 6.7 Despliegue de datos de una prueba de medición realizada a un prisma colocado en posición inclinada por medio del método de detección de bordes.

Para identificar la causa de la discontinuidad encontrada en el dibujo del contorno del objeto, se analizaron los datos de distancias recopilados durante la medición. En la Figura 6.8 se muestra la parte de los datos que corresponde a la zona en donde se detectó la discontinuidad. Se indican con rectángulos los lugares en dónde se detectaron bordes y se destacan con fondo gris los datos en donde se deduce que se presentan bordes, a pesar de que no fueron identificados por el método.

...	184	129	129	128	121	121	119	109	108	102	102	99	97	97	97	101	...
...	219	191	129	127	127	121	121	116	109	109	107	105	99	99	99	100	...
...	212	207	202	173	117	117	117	116	114	109	109	109	106	102	102	100	...
...	211	211	211	213	201	181	137	130	127	119	117	110	104	103	100	99	...
...	209	210	210	210	211	210	205	200	164	126	123	116	116	116	110	105	...
...	207	207	212	211	211	211	211	209	208	201	127	127	128	124	122	116	...
...	211	208	211	212	212	212	212	212	214	211	190	175	132	132	126	120	...
...	211	213	213	212	210	209	214	214	212	210	212	207	212	155	120	117	...
...	215	211	211	210	211	211	211	210	211	211	213	209	209	202	174	123	...
...	216	217	218	216	209	209	209	210	213	215	216	210	203	197	161	123	...

Figura 6.8 Datos de distancia de la zona en donde se detectó la discontinuidad en la prueba de medición mostrada en la Figura 6.7. Los rectángulos indican los bordes detectados y las partes con fondo gris las discontinuidades que se presentaron.

A pesar de que los bordes en los renglones 4, 5, 7 y 10 no fueron detectados con el método de detección debido a que la diferencia es menor que el umbral de 50 mm que se seleccionó durante la medición, se presentan diferencias

significativas entre las distancias medidas cerca de la diagonal que corresponde a la silueta del objeto, lo que permite suponer la presencia de un borde.

El último objeto que se midió durante este experimento fue una pelota. A diferencia de los otros dos objetos, esta pelota cabe dentro del espacio de medición, por lo que se puede observar su silueta casi completa. El resultado que se obtuvo se muestra en la Figura 6.9. Se puede ver que las partes laterales de la silueta de la pelota fueron registradas de forma clara pero las partes superior e inferior no aparecen registradas.

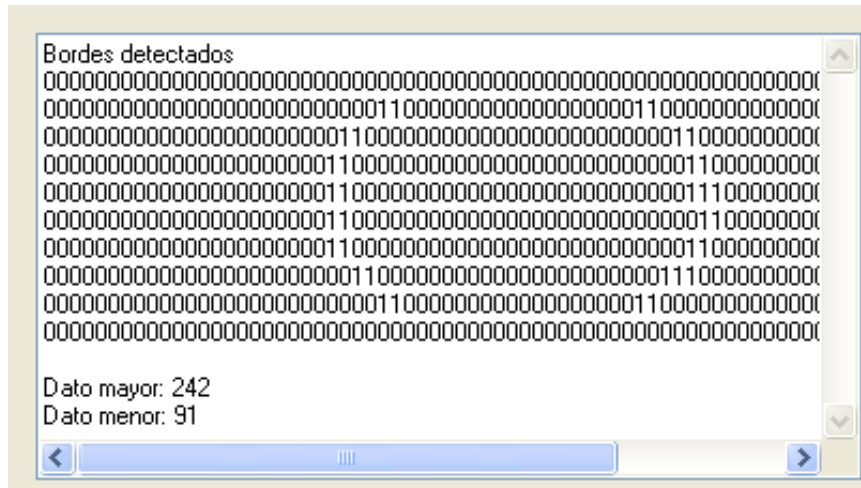


Figura 6.9 Despliegue de datos de una prueba de medición realizada a una pelota por medio del método de detección de bordes.

El hecho de que no aparezcan las partes superior e inferior de la silueta se atribuyó a que el método de detección de bordes se programó para comparar los datos que se encuentran en un mismo renglón del arreglo. Por lo que el método no funciona para detectar bordes horizontales.

Para poder detectar los bordes horizontales, se requiere comparar los datos de una misma columna para encontrar diferencias que superen el umbral de detección de bordes. Para esto hay que comparar cada dato con los datos adyacentes, superior e inferior, en el arreglo.

Para comprobar que esta suposición es correcta se analizaron los datos de distancias almacenados. En la Figura 6.10 se muestran algunos datos de distancia obtenidos durante la medición tridimensional realizada a la pelota.

Se indican con rectángulos los datos entre los que se detectó algún borde y resaltados con color gris aquéllos en donde existen bordes horizontales. Se puede observar, en los renglones tres y cuatro, que existe una discontinuidad en la silueta cuando se emplea únicamente el criterio de detección de bordes verticales, sin embargo, al agregar el criterio de detección de bordes

horizontales la discontinuidad desaparece, incluso sin necesidad de ajustar el umbral de detección de bordes.

...	216	216	214	211	210	209	209	209	213	213	213	212	211	210	209	209	...
...	216	216	211	211	211	215	216	215	210	210	212	212	209	209	209	207	...
...	211	211	208	195	195	192	125	117	101	98	97	95	94	94	95	95	...
...	206	204	186	137	120	104	101	99	98	97	97	97	97	98	95	93	...
...	196	196	133	106	101	97	97	100	99	97	95	95	99	101	102	98	...
...	210	182	117	100	98	97	97	99	99	99	97	97	97	97	95	98	...
...	201	172	114	99	99	100	100	100	102	98	98	99	99	96	95	95	...
...	202	182	131	108	97	97	97	98	98	98	99	96	95	96	97	97	...
...	204	200	191	191	127	107	95	95	95	98	95	94	94	100	99	98	...
...	208	209	209	192	181	165	126	111	99	97	97	99	98	93	95	92	...
...	210	210	208	208	209	211	211	210	202	197	189	180	167	157	153	153	...

Figura 6.10 Datos de distancia de la zona en donde se detectó la discontinuidad en la prueba de medición mostrada en la Figura 6.9. Los rectángulos indican los bordes detectados y las partes con fondo gris las discontinuidades que se presentaron.

Al observar el resultado que se obtiene empleando el criterio de detección de bordes horizontales, surge el interés por volver a analizar los datos que se obtuvieron durante la medición del prisma en posición inclinada, en busca de bordes horizontales. Se puede notar que la mayoría de las discontinuidades desaparecen al incluir el criterio de detección de bordes horizontales.

En el siguiente apartado se mostrarán los resultados que se obtuvieron con el método de despliegue de información de imagen con diferentes tonos de rojo.

Pruebas y resultados del método de despliegue de imagen con diferentes tonos de rojo

Como se describió en el Capítulo 5, el método de despliegue de información mediante imágenes con diferentes tonos de rojo consiste en representar por medio de una cuadrícula la imagen de los objetos que se encuentran en el espacio de medición. Cada espacio de la cuadrícula corresponde a una celda del arreglo de datos de medición. Los espacios de la cuadrícula son coloreados con diferentes tonos de rojo para representar diferentes profundidades. El tono de rojo que se asigna a cada espacio de la cuadrícula depende de la magnitud de la distancia mediada. Mientras mayor sea la distancia, más oscuro será el tono de rojo y viceversa.

Durante la prueba, se tomaron mediciones de una pelota, una caja, una pieza cilíndrica, un prisma rectangular en posición inclinada, y un segmento de ángulo de aluminio. El primer objeto que se colocó en la zona de medición fue la pelota. A continuación se describen los resultados que se obtuvieron al desplegar la imagen correspondiente.

En las Figuras 6.11 y 6.12 se muestran dos imágenes de las mediciones realizadas a la pelota. Se puede notar que la forma de la pelota aparece distorsionada. Esta distorsión se atribuyó a que no se compensó el efecto de la proyección cilíndrica que se origina por el funcionamiento del telémetro.

El método descrito en este apartado tiene dos parámetros por medio de los cuales se puede ajustar el brillo de la imagen obtenida. Estos parámetros son la distancia mínima y la distancia máxima. A todos los datos que sean menores que la distancia mínima se les asignará el rojo más brillante, y a todos los que sean mayores que la distancia máxima se les asignará el tono más oscuro. El efecto de estos parámetros puede notarse al comparar la Figura 6.11 y la Figura 6.12. En ambas figuras se indica el valor de los parámetros de distancia mínima y máxima correspondientes.

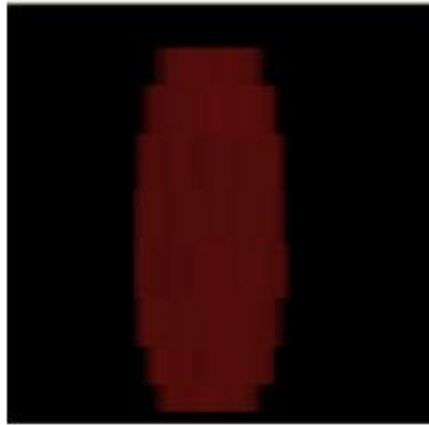


Figura 6.11 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a una pelota. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 50 y 150 respectivamente.

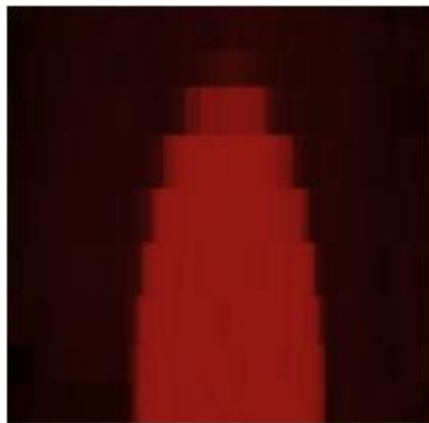


Figura 6.12 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a una pelota. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 30 y 250 respectivamente.

El siguiente objeto del que se realizaron mediciones fue una caja de cartón. La caja fue colocada de tal modo que una de sus aristas quedara enfrente del sistema de percepción del entorno. En los resultados obtenidos, la forma de la caja no se aprecia muy claramente, esto posiblemente esté relacionado con los efectos de la distorsión de la proyección cilíndrica y con una selección poco apropiada de los parámetros de distancia mínima y máxima. Sin embargo, es posible apreciar un gradiente en los tonos de rojo, que va de oscuro en las zonas laterales de la imagen a claro en la parte central. La imagen que corresponde a las mediciones realizadas a la caja de cartón se puede ver en la Figura 6.13

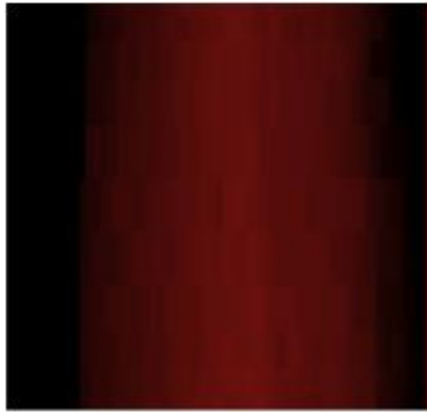


Figura 6.13 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a una caja. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 70 y 150 respectivamente.

El siguiente objeto que se midió fue el objeto con forma cilíndrica. En la Figura 6.14 se muestra la imagen en tonos de rojo correspondiente.



Figura 6.14 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a una pieza cilíndrica. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 70 y 200 respectivamente.

Los resultados que se obtuvieron durante las mediciones realizadas al prisma rectangular en posición inclinada, fueron buenos. Se puede ver claramente que la pieza está inclinada e incluso se pueden apreciar dos de las caras del prisma. Por otra parte las diagonales de los bordes del prisma no se muestran como líneas rectas, sino como líneas en zigzag debido a que la imagen está formada por una cuadrícula. La imagen que corresponde a las mediciones realizadas al prisma en posición inclinada se muestra en la Figura 6.15.



Figura 6.15 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a un prisma en posición inclinada. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 70 y 200 respectivamente.

Posteriormente se realizaron mediciones a un segmento de ángulo de aluminio colocado con la arista que forma el ángulo de 90° hacia arriba. La imagen correspondiente se muestra en la Figura 6.16. Los resultados obtenidos fueron interesantes ya que se puede distinguir claramente la cara frontal de la pieza y uno de sus lados. Nuevamente las diagonales aparecen como líneas en zigzag.

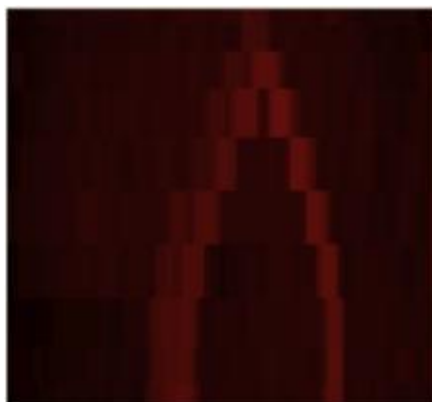


Figura 6.16 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales a un segmento de ángulo de aluminio. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 30 y 250 respectivamente..

Por último se realizaron mediciones de dos objetos colocados en el espacio de medición. Los objetos colocados fueron la pelota y la pieza cilíndrica. En la Figura 6.17 se pueden ver los resultados obtenidos. En esta figura se pueden distinguir claramente los dos objetos, incluso se aprecia una parte del fondo detrás de la pelota.



Figura 6.17 Imagen en tonos de rojo obtenida al realizar mediciones tridimensionales de la pelota y la pieza cilíndrica simultáneamente. Los parámetros de Distancia mínima y Distancia máxima son 30 y 250 respectivamente.

Con base en los resultados presentados en este capítulo, es posible evaluar el desempeño del sistema y analizar en que medida fueron alcanzados los objetivos planteados. En los siguientes apartados se presentan las conclusiones de este trabajo y se propone el trabajo a futuro que se puede realizar para complementar los logros alcanzados.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Se diseñó un sistema capaz de reunir información tridimensional del entorno con base en las mediciones realizadas con un telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01 de la marca Hokuyo, por lo que se puede considerar que el objetivo principal fue alcanzado.

Durante la solución del problema, se siguió una metodología de diseño en la que se generaron conceptos de solución, se evaluaron las alternativas propuestas y se seleccionó una de ellas para ser diseñada a detalle. Las etapas de desarrollo de la metodología se llevaron a cabo de forma apropiada y los resultados obtenidos fueron satisfactorios, lo que permitió realizar la documentación del proceso de diseño del sistema.

Se construyó un modelo funcional del sistema, basándose en los planos desarrollados durante la etapa de diseño a detalle, con el que se realizaron algunas pruebas para evaluar el desempeño de la solución propuesta.

El concepto de solución seleccionado consiste en generar un movimiento de cabeceo al telémetro láser con ayuda de un servomotor de modelismo. Por medio de este movimiento se logró obtener un conjunto de coordenadas esféricas, con el que fue posible conocer características tridimensionales del entorno. Durante el desarrollo de este concepto, se identificó la necesidad de hacer que la velocidad disminuyera gradualmente al llegar a los puntos extremos del cabeceo, para evitar causar movimientos bruscos que pudieran dañar los componentes internos del telémetro. Para resolver lo anterior se decidió imprimir un movimiento armónico simple al telémetro.

Se logró imitar de forma satisfactoria el movimiento armónico simple con las características que se diseñaron, y se consiguió controlar la posición del eje del servomotor con una resolución de 0.018° .

Para desarrollar el movimiento requerido se decidió emplear un servomotor de modelismo estándar de alto torque que, de acuerdo con los cálculos realizados, posee las características de velocidad y par suficientes.

El modelo funcional que se construyó puede realizar más de 3.5 barridos tridimensionales por segundo. Esta rapidez de medición es apropiada para desarrollar aplicaciones que involucren ambientes dinámicos.

Se desarrollaron y probaron dos métodos para desplegar la información de las mediciones tridimensionales. Estos métodos fueron llamados detección de bordes y despliegue de imágenes en tonos de rojo.

El método de detección de bordes permite visualizar una representación de la silueta de los objetos que se encuentran en el espacio de medición, con base en los bordes detectados. Se empleó un criterio para detectar los bordes verticales que permitió obtener buenos resultados, pero se encontró que estos se pueden mejorar al agregar un criterio de detección de bordes horizontales. También se observó que al seleccionar un umbral de detección de bordes demasiado grande, se pueden presentar discontinuidades en la representación de la silueta de algunos objetos.

El segundo método que se desarrolló fue el despliegue de imágenes en tonos de rojo. Durante las pruebas, se obtuvieron imágenes de diferentes objetos. En este caso se observó una distorsión en las imágenes obtenidas, a causa del efecto de la proyección esférica.

Durante las pruebas realizadas, se encontró que el sistema tiene problemas para detectar objetos transparentes, por lo que será necesario apoyarse en la información de algún otro sensor, si se requiere usarlo en aplicaciones de navegación autónoma de robots móviles.

El modelo funcional que se construyó puede emplearse como punto de partida para desarrollar otras funciones como evasión de obstáculos, auto-localización y construcción de mapas. Es posible modificar la amplitud del movimiento al modificar los datos de las tablas en el programa de control del servomotor, y la ventana de la interfaz permite modificar los parámetros de funcionamiento del telémetro.

Se recomienda continuar con el desarrollo del sistema de percepción del entorno para perfeccionar sus características. Para esto, se propone complementar el funcionamiento de los métodos de despliegue de información y aumentar la versatilidad del sistema, lo que facilitará el desarrollo de nuevas funciones.

Para mejorar el método de detección de bordes, se propone trabajar en las siguientes actividades:

- Agregar el criterio de detección de bordes horizontales.
- Almacenar las matrices de detección de bordes en archivos, para poder analizar una serie de mediciones consecutivas.
- Ofrecer la posibilidad de modificar el umbral de detección de bordes durante las mediciones, sin tener que detener al sistema.

Para favorecer el funcionamiento del método de despliegue de imágenes en tonos de rojo, se sugiere lo siguiente:

- Emplear más colores para desplegar las imágenes. Por el momento, sólo se cuenta con 256 tonos diferentes, lo que provoca que algunos detalles de los objetos se pierdan al desplegar las imágenes.
- Agregar una opción para abrir archivos de mediciones anteriores y mostrar la imagen correspondiente.
- Incluir la posibilidad de modificar los parámetros de forma dinámica.

Para aumentar la versatilidad del sistema se recomienda:

- Incluir en la interfaz la posibilidad de configurar las características del movimiento armónico simple, como la amplitud y frecuencia.
- Complementar el programa de la interfaz para que calculen los valores de las tablas del programa de control del servomotor, y los cargue de forma automática en el microcontrolador.
- Modificar el sistema para que pueda colocarse en diferentes posiciones, de modo que el telémetro pueda realizar los barridos verticales y el servomotor los horizontales.

REFERENCIAS

- 1 Webster's online dictionary. *Definitions*. <http://www.websters-online-dictionary.org/definition/robot>. 1 de marzo del 2012.
- 2 Ollero Baturone, Aníbal. *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Alfaomega. México, 2007.
- 3 Siegwart, Roland, *Introduction to autonomous mobile robots*. A Bradford book. The MIT Press. EUA, 2004
- 4 Everett, H. R. *Sensors for mobile robots: theory and applications*. A K Peters. EUA, 1995
- 5 Sa, Shuzhi, *Autonomous mobile robots: sensing, control, decision-making, and applications*. CRC Press. Taylor & Francis Group. EUA, 2006
- 6 Hokuyo Automatic Co., Ltd. *UBG-04LX-F01*. http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/ubg_04lx_f01.html. 3 de marzo del 2012

- 7 Breuckmann GmbH. *The flexible smartSCAN^{3D} Series*. <http://www.breuckmann.com/en/industry-technology/products/smartsan.html>. 2 de marzo de 2012
- 8 Accurex Dimensional Measurement Systems. *SmartSCAN - Providing precise 3D metrology technology to a variety of users*. <http://www.accurexmeasure.com/smartsan.htm>. 2 de marzo de 2012
- 9 Accurex Dimensional Measurement Systems. *SmartSCAN^{3D-HE} The Highend 3d Measuring And Digitisation System*. <http://www.accurexmeasure.com/scanners/smartsan%20overview%20accurex.pdf>. 2 de marzo del 2012
- 10 Creaform Soluciones de medición 3D portátiles. *Escáneres 3d Portátiles: Handyscan 3D*. <http://www.creaform3d.com/es/handyscan3d/products/maxscan.aspx>. 2 de marzo del 2012
- 11 Creaform Soluciones de medición 3D portátiles. *Especificaciones Técnicas: Escáner 3d De Mano Handyscan 3D*. <http://www.creaform3d.com/es/soluciones-de-metrologia/productos/escaneres-3d-portatiles/especificaciones-tecnicas-handyscan-3d>. 2 de marzo del 2012
- 12 Faro Technologies. *Vídeo del producto Faro Laser Scanner Focus3D*. <http://www.faro.com/focus/es/videos>. 2 de marzo del 2012
- 13 Faro Technologies. *Características del Laser Scanner Focus3D*. <http://www.faro.com/focus/es/caracteristicas>. 2 de marzo del 2012
- 14 Konica Minolta Sensing Americas Inc. *Threerivers Virtuoso 3d Laser Scanner*. <http://sensing.konicaminolta.us/products/virtuoso-laser-scanner/>. 2 de marzo del 2012
- 15 Riegl Laser Measurement Systems. *Riegl VMX-450*. <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scannersystem/10/>. 2 de marzo del 2012
- 16 Riegl Laser Measurement Systems. *Hoja de especificaciones del Riegl VMX-450*. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_Data_Sheet_VMX-450_20-09-2012.pdf. 6 noviembre 2012
- 17 Mesa Imaging. *Hoja de especificaciones del SR4000*. http://www.mesa-imaging.ch/dlm.php?fname=pdf/SR4000_Data_Sheet.pdf. 3 de marzo del 2012

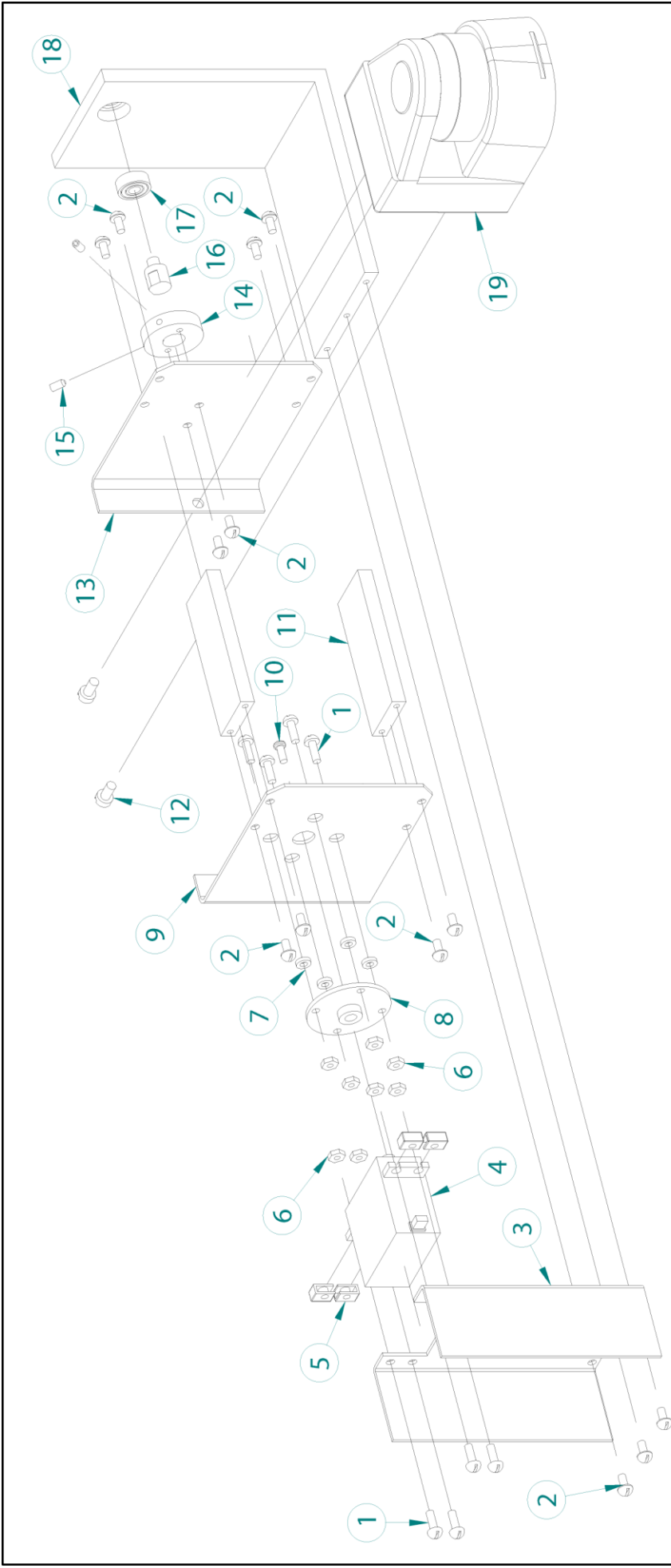
- 18 Acroname Robotics. *Sensors*. http://www.acroname.com/robotics/parts/c_Sensors.html. 4 de marzo de 2012
- 19 Sick Sensor Intelligence. *LMS-200*. <https://www.mysick.com/partnerPortal/ProductCatalog/DataSheet.aspx?ProductID=33755>. 3 de marzo del 2012
- 20 Hokuyo Automatic Co., Ltd. *URG-04LX*. http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx.html. 3 de marzo del 2012
- 21 Yoichi, O., Cang, Y., y Johann, B. "Characterization of the Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder for Mobile Robot Obstacle Negotiation". SPIE Defense, Security + Sensing, Unmanned Systems Technology XI, Conference 7332: Unmanned, Robotic, and Layered Systems. Orlando, Florida, 2009.
- 22 Fraunhofer Institute for Intelligent Analysis and Information Systems. *Página principal*. <http://www.iais.fraunhofer.de/>. 3 de marzo del 2012
- 23 Holz, D., Droeschel, D. y Behnke, S. "Fast 3D Perception for Collision Avoidance and SLAM in Domestic Environments". *Mobile Robots Navigation*. In-Tech. Vukovar, Croacia, 2010
- 24 3DLS Fraunhofer Institute for Intelligent Analysis and Information Systems. *Hoja de especificaciones del 3DLS*. http://www.3d-scanner.net/datasheet/3DLS_Flyer_eng.pdf. 3 de marzo del 2012
- 25 May, S., Pervoelz, K. y Surmann, H. "3D Cameras: 3D Computer Vision of wide Scope". *Vision Systems: Applications*. I-Tech Education and Publishing. Viena, Austria, 2007
- 26 Sheh, R., Jamali, N., Kadous, M. W. y Sammut, C. *A Low-Cost, Compact, Lightweight 3D Range Sensor*. ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems. School of Computer Science & Engineering. The University of New South Wales. Sydney, Australia, 2006
- 27 ARC Centre of Excellence for Autonomous Systems. *Página principal*. <http://www.cas.edu.au/home.html>. 3 de marzo del 2012
- 28 Sheh, R. "The redback: A low-cost advanced mobility robot for education and research". *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*. Gaithersburg, Maryland. EUA, 2006.
- 29 Morales, J., Martínez, J.L., Mandow, A., Pequeño-Boyer, A., García-Cerezo, A. "Design and Development of a Fast and Precise Low-Cost 3D

- Laser Rangefinder". *IEEE International Conference on Mechatronics*. Estambul, Turquía, 2011
- 30 Hokuyo Automatic Co., Ltd. *UTM-30LX*. http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/utm_30lx.html. 4 de marzo del 2012
- 31 Ingeniería Uno. *Escáner Láser 3D de Precisión. La Mejor Opción Para Robots Móviles. UnoLaser 30M135Y*. http://www.ingenieriauno.com/index_files/productos_unolaser30m135y.html. 4 de marzo del 2012
- 32 H. Kawata, W. Santosh, T. Mori, A. Ohya and S. Yuta, "Development of ultra-small lightweight optical range sensor system". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Alberta. Canadá, 2005
- 33 HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD. Hoja de especificaciones del UBG-04LX-F01. http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/data/UBG-04LX-F01_spec2.pdf. 12 de marzo del 2012
- 34 HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD. Dibujo técnico del UBG-04LX-F01. http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/data/UBG-04LX-F01_ed.pdf. 12 de marzo del 2012
- 35 ULLMAN, David G. *The mechanical design process*. McGraw-Hill. EUA, 1997
- 36 CROSS, Nigel. *Métodos de diseño. Estrategias para el diseño de productos*. Limusa Wiley. México, 2010
- 37 DIETER, George E. *Engineering Design. A Materials and Processing Approach*. McGraw-Hill. EUA, 2000
- 38 ULRICH, K. T. y Eppinger, S. D. *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill. México, 2009
- 39 HAUSER, J. R. y CLAUSING, D. "The House of Quality". *Harvard Business Review*. Presidents and Fellows of Harvard College. EUA, 1988
- 40 CETINKUNT, Sabri. *Mecatrónica. Patria*. México, 2011
- 41 Futaba Radio Control Systems and accesories. *Futaba S3305 High-Torque Standard Servo w/Metal Gears*. <http://www.gpdealera.com/cgi-bin/wgainf100p.pgm?I=FUTM0045>. 4 de marzo del 2012
- 42 NSK Motion and Control. *Rolling Bearings Catalog*. <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctr/index.cgi?inpGroup=bearings>. 4 de marzo del 2012

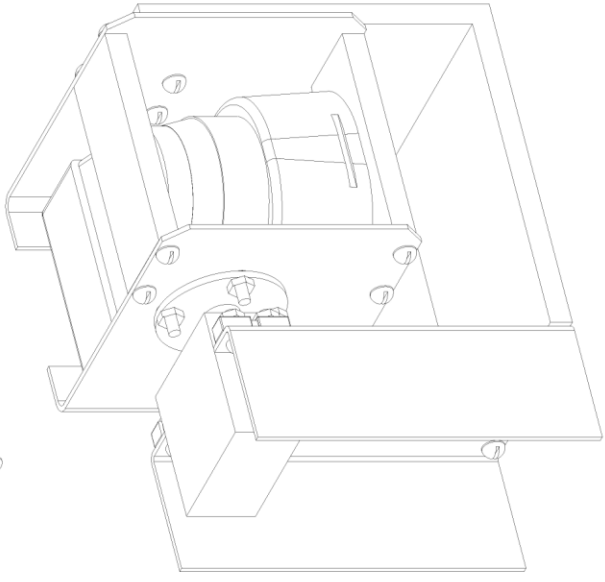
APÉNDICE

A. PLANOS

A continuación se presentan los planos del sistema de percepción del entorno. El primero de ellos contiene el dibujo en explosión del modelo funcional que se construyó, y en él se puede ver la lista de materiales empleados. El resto de los planos corresponden a las piezas que se fabricaron para construir el sistema.



No	Nombre	Material	#	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
19	UBG-04LX-F01	-	1	Tornillo 3mm x 7 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	Soporte izquierdo	Aluminio	1	Tapa derecha	Aluminio	1	1	1	1	1	1	1	1
17	Rodamiento NSK 605Z	-	1	Accesorio p/servomotor	Aluminio	1	1	1	1	1	1	1	1
16	Eje	Acero	1	Cilindro de hule	-	1	1	1	1	1	1	1	1
15	Opresor de 1/8" x 1/4"	-	2	Tuerca 1/8"	Acero	1	1	1	1	1	1	1	1
14	Pieza de acoplamiento	Aluminio	1	Grommet p/servomotor	-	2	2	2	2	2	2	2	2
13	Tapa izquierda	Aluminio	1	S3305 marca Futaba	Aluminio	1	1	1	1	1	1	1	1
12	Tornillo 4 mm x 8 mm	-	2	Soporte derecho	Aluminio	1	1	1	1	1	1	1	1
11	Espaciador	Aluminio	2	Tornillo 1/8" x 1/4"	-	2	2	2	2	2	2	2	2
				Tornillo 1/8" x 3/8"	Aluminio	2	2	2	2	2	2	2	2



Acot: mm



Proyecto:

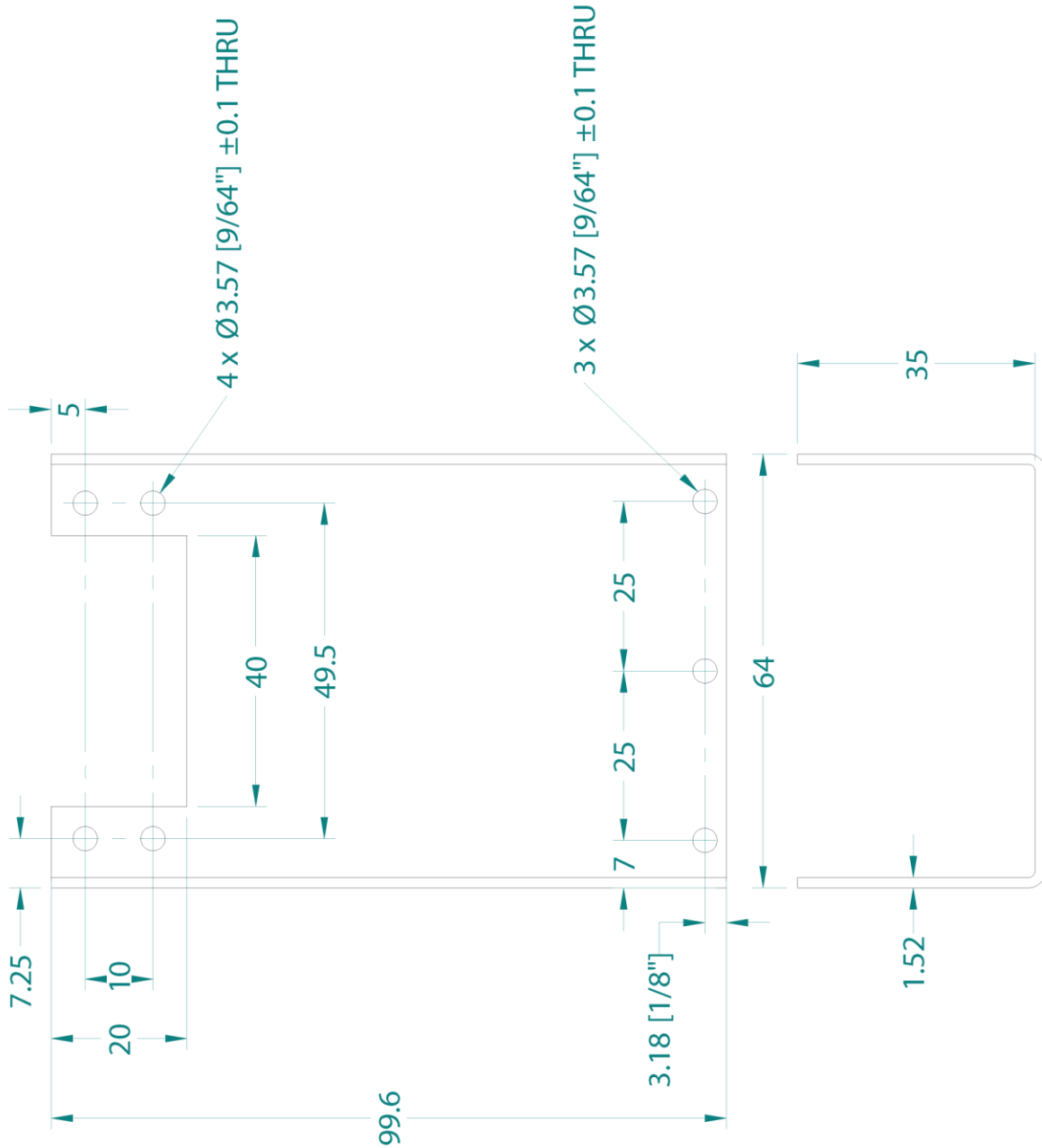
Sistema de percepción del entorno

Dibujo en explosión y lista de materiales

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

Número de plano: 1 Total de planos: 8



Acot: mm Esc: 1:1

Tolerancia lineal: ± 0.05
(a menos que se indiquen)

Material:
Aluminio

Lámina
Calibre 16

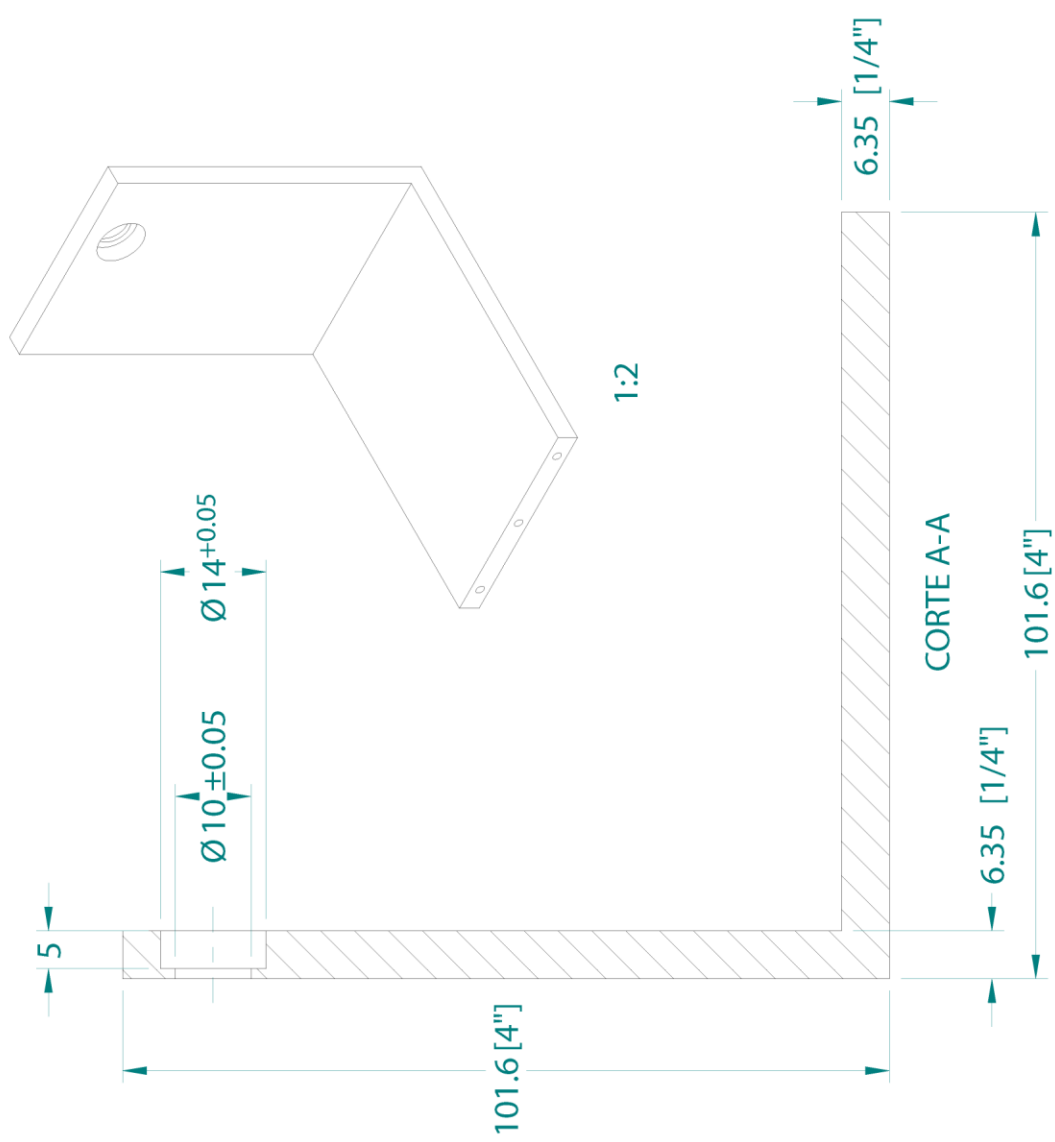
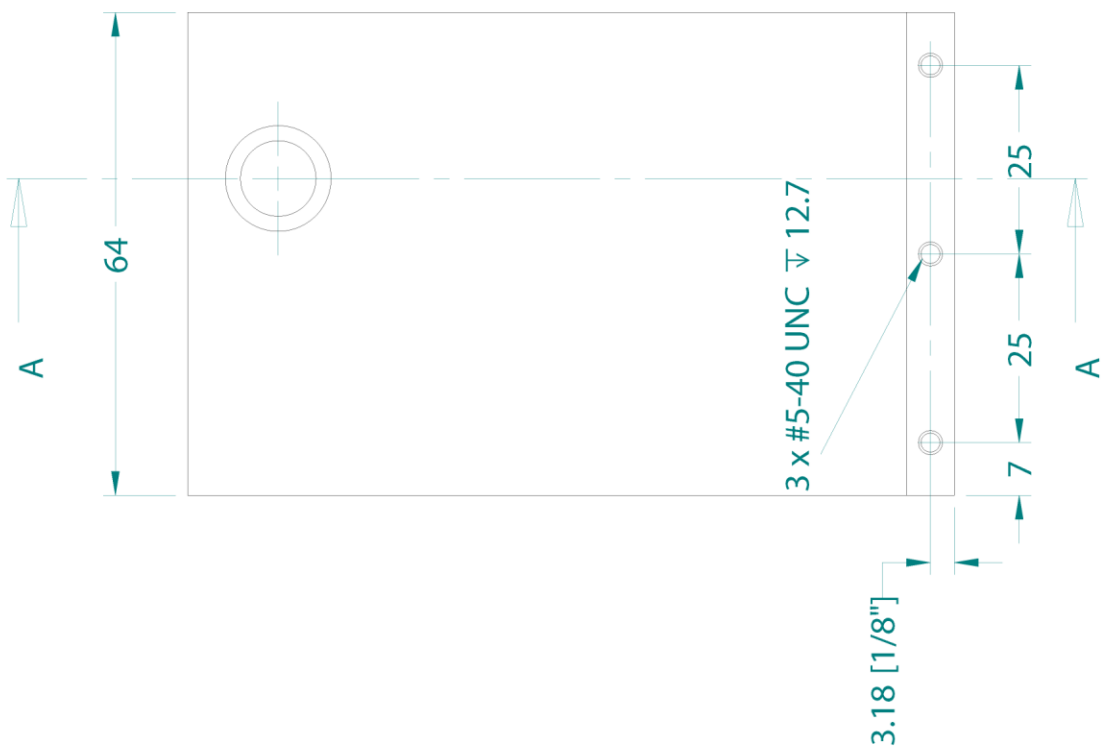
Proyecto: Sistema de percepción del entorno

Parte: Soporte derecho

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

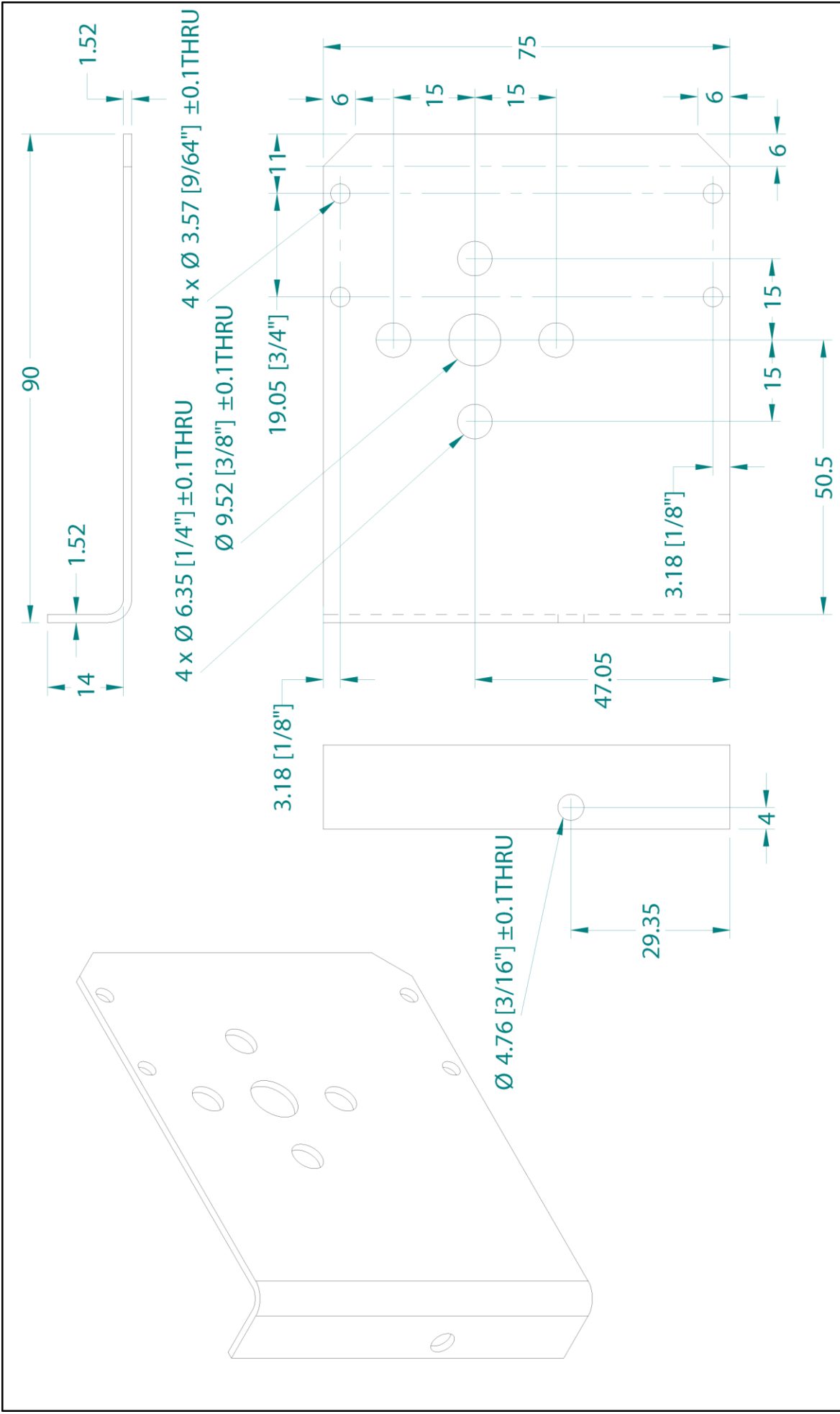
Número de plano: 2 Total de planos: 8



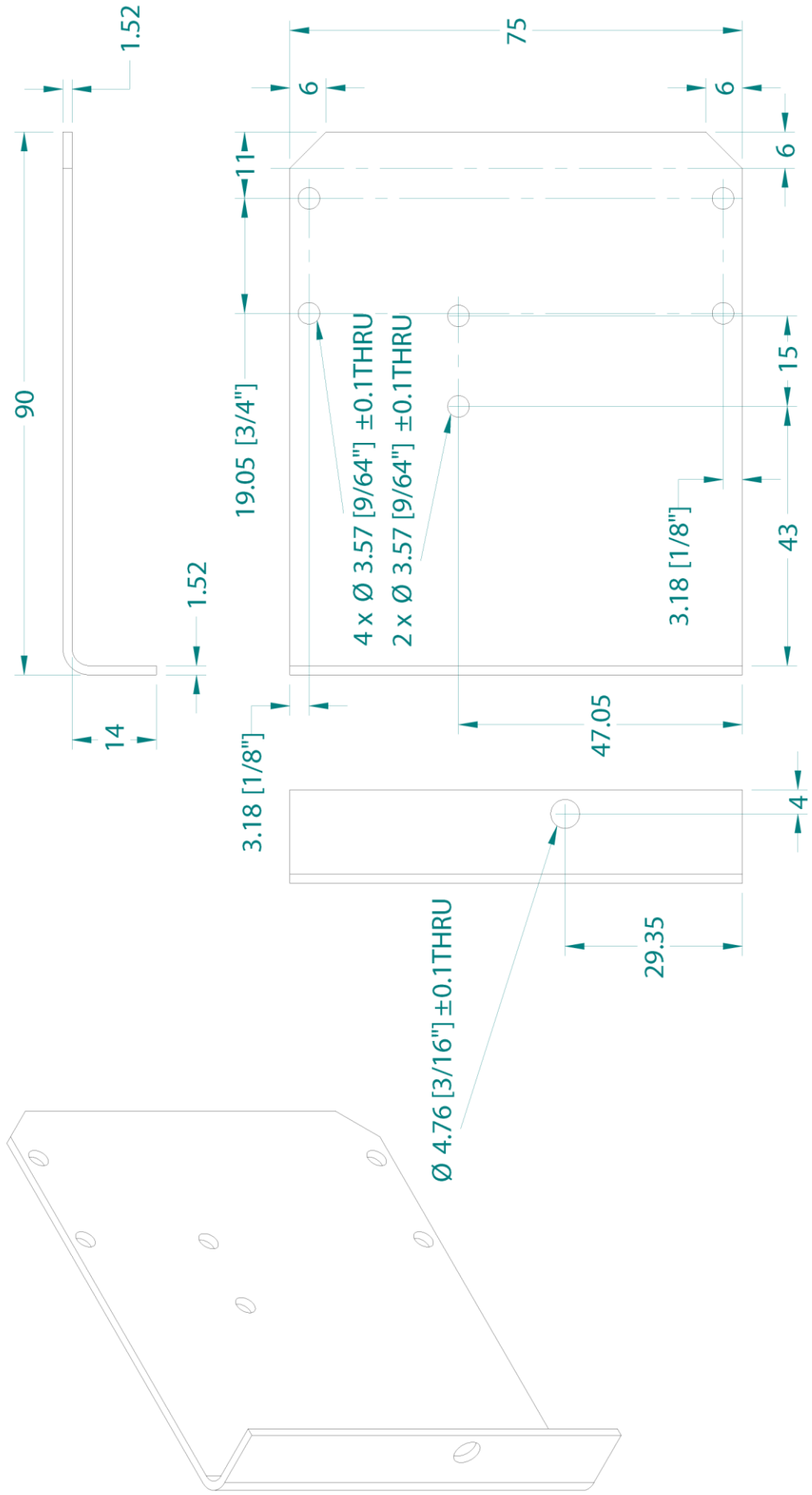
Acot: mm Esc: 1:1
 Tolerancia lineal: \pm 0.05
 (a menos que se indiquen)

Material:
 Aluminio
 Ángulo
 4 x 4" t=1/4"

Proyecto: Sistema de percepción del entorno
 Parte: Soporte izquierdo
 Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30
 Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30
 Número de plano: 3 Total de planos: 8

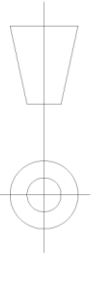


 FI, UNAM.	Acot: mm	Esc: 1:1	Material: Aluminio	Proyecto: Sistema de percepción del entorno
	Tolerancia lineal: ± 0.05 (a menos que se indiquen)		Lámina Calibre 16	Parte: Tapa derecha
			Dibujado por: AMDG	Fecha: 2013.01.30
			Revisado por: UPR	Fecha: 2013.01.30
			Número de plano: 4	Total de planos: 8



FI, UNAM.

Acot: mm Esc: 1:1



Tolerancia lineal: ± 0.05
(a menos que se indiquen)

Material:
Aluminio

Lámina
Calibre 16

Proyecto:

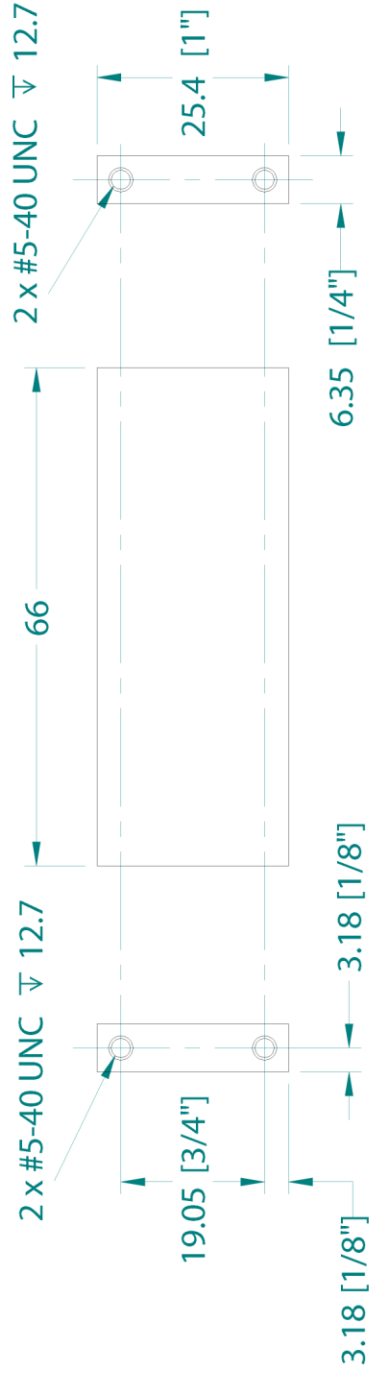
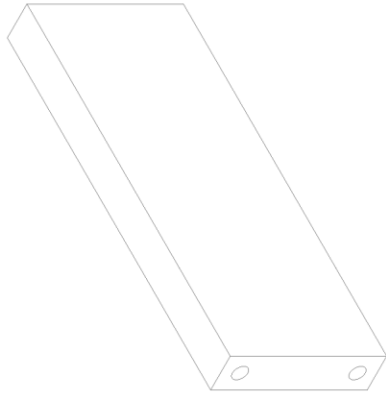
Sistema de percepción del entorno

Parte: Tapa izquierda

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

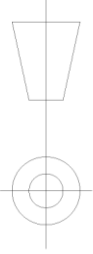
Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

Número de plano: 5 Total de planos: 8



FI, UNAM.

Acot: mm Esc: 1:1



Tolerancia lineal: ± 0.05
(a menos que se indiquen)

Proyecto:

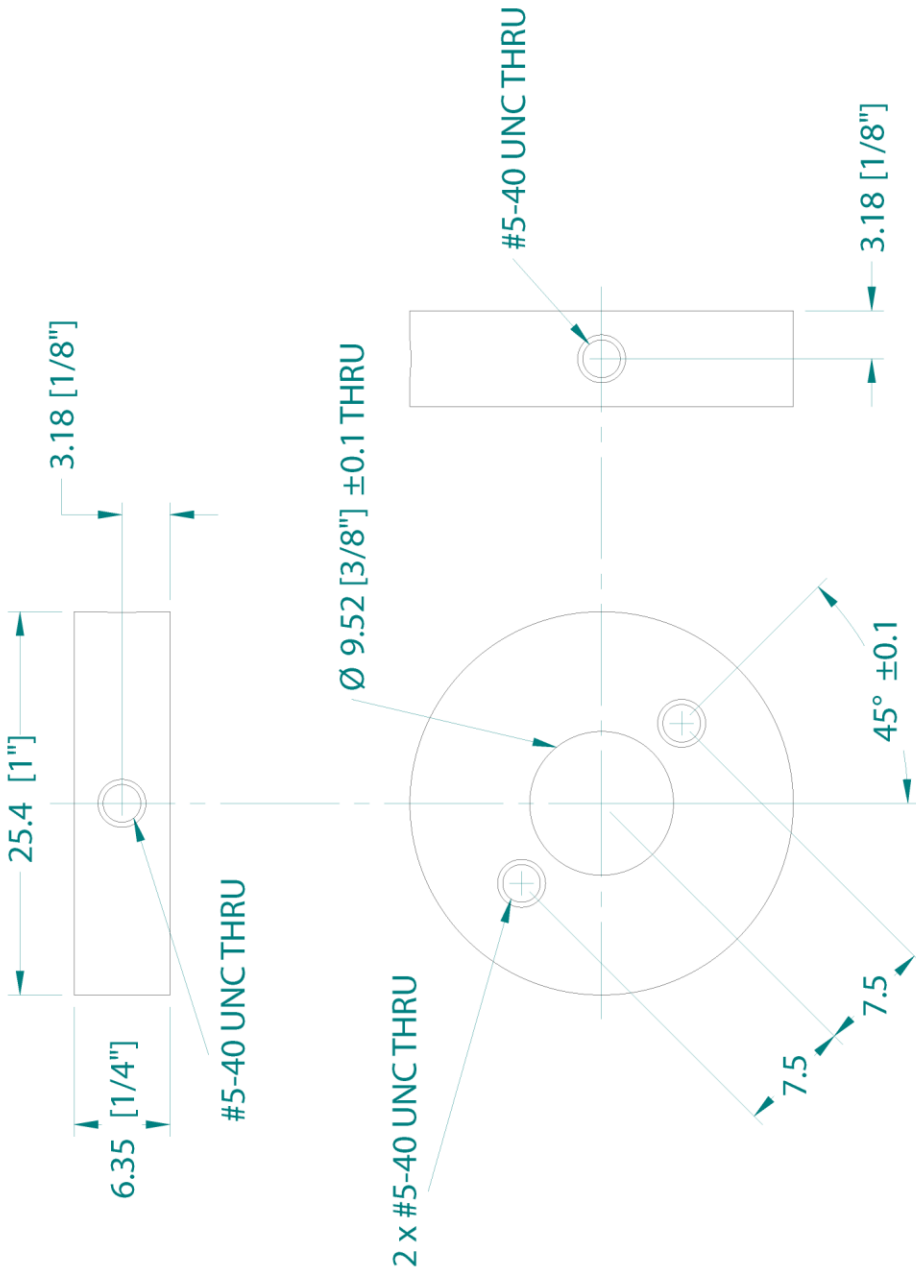
Sistema de percepción del entorno

Parte: Espaciador

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

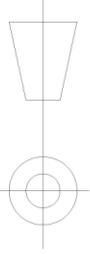
Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

Número de plano: 6 Total de planos: 8



FI, UNAM.

Acot: mm Esc: 2:1



Tolerancia lineal: ± 0.05
(a menos que se indiquen)

Material:
Aluminio

Barra circular
Diámetro 1"

Proyecto:

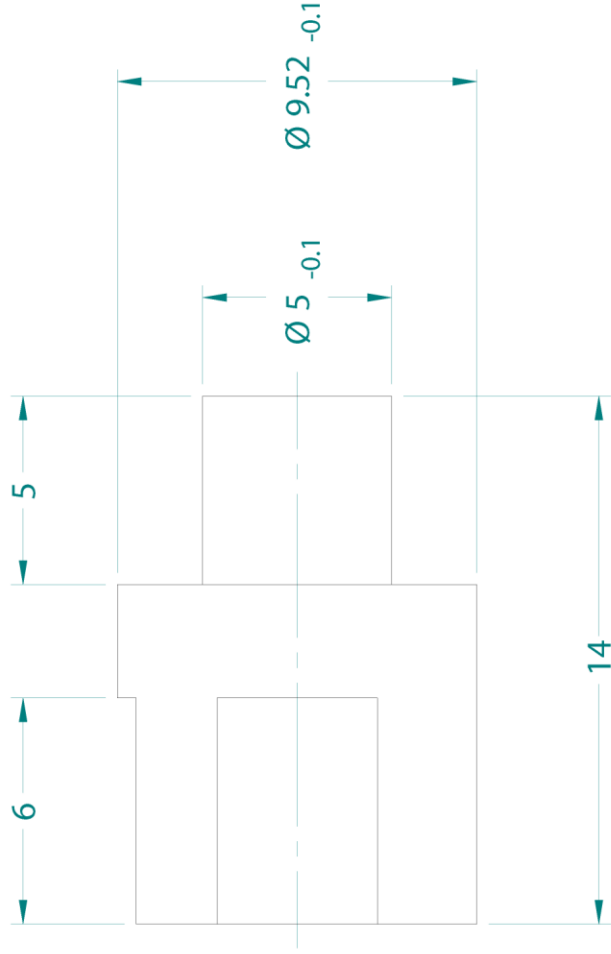
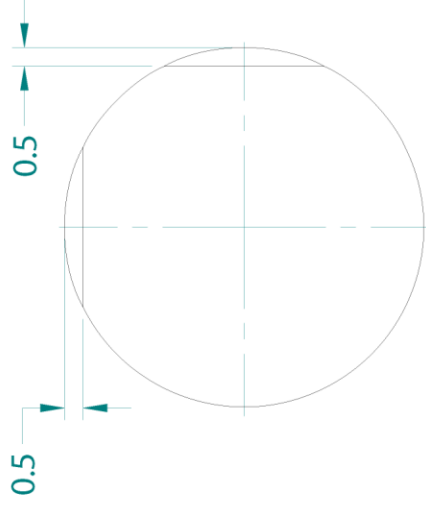
Sistema de percepción del entorno

Parte: Pieza de acoplamiento

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

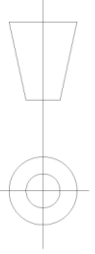
Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

Número de plano: 7 Total de planos: 8



FI, UNAM.

Acot: mm Esc: 5:1



Tolerancia lineal: ± 0.05
(a menos que se indiquen)

Proyecto:
Sistema de percepción del entorno
Parte: Eje

Dibujado por: AMDG Fecha: 2013.01.30

Revisado por: UPR Fecha: 2013.01.30

Número de plano: 8 Total de planos: 8

Material:
Aluminio

Barra circular
Diámetro 3/8"

B. INSTRUCCIONES PARA ARMAR EL SISTEMA DE PERCEPCIÓN DEL ENTORNO

A continuación se describe de forma breve cómo colocar las piezas que se diseñaron para armar el sistema de percepción del entorno. Para comenzar, se formaron dos conjuntos de piezas, uno de ellos corresponde a las piezas que se unen a la tapa derecha de la caja del telémetro y el otro a las piezas que se unen a la tapa izquierda. Después se muestra cómo ensamblar estos conjuntos con el resto de las piezas diseñadas para armar el sistema como se ilustra en la Figura B.1.

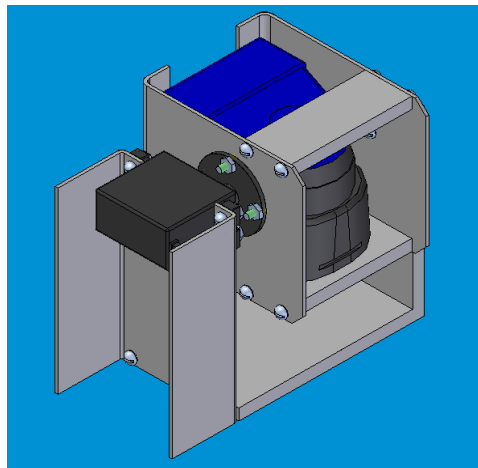


Figura B.1 Modelado geométrico del sistema de percepción del entorno.

Para comenzar, se unen el accesorio en forma de disco del servomotor con la tapa derecha de la caja del telémetro. La sujeción se hace por medio de cuatro tornillos y tuercas como se muestra en la Figura B.2. Cada tornillo se coloca dentro de un pequeño cilindro de hule que funciona como acoplamiento flexible.

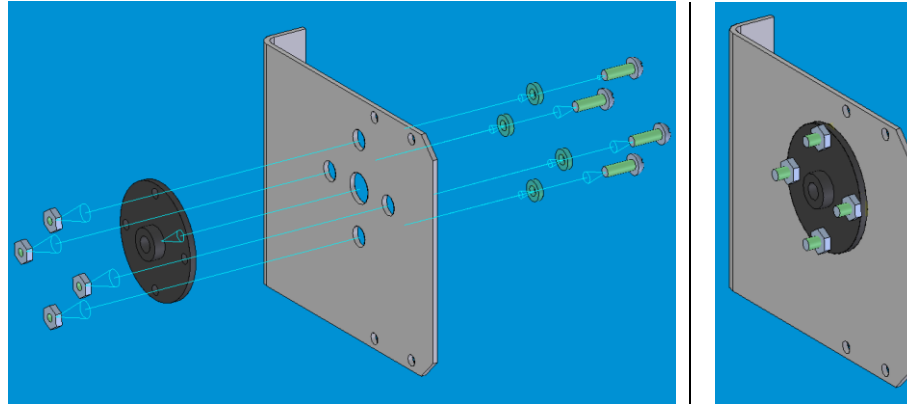


Figura B.2 Unión del accesorio en forma de disco del servomotor con la tapa del lado derecho de la caja del telémetro.

Después de esto, se agregan los dos espaciadores de la caja del telémetro como se muestra en la Figura B.3. Cada espaciador tiene cuatro barrenos roscados para sujetarse con las tapas de la caja por medio de tornillos.

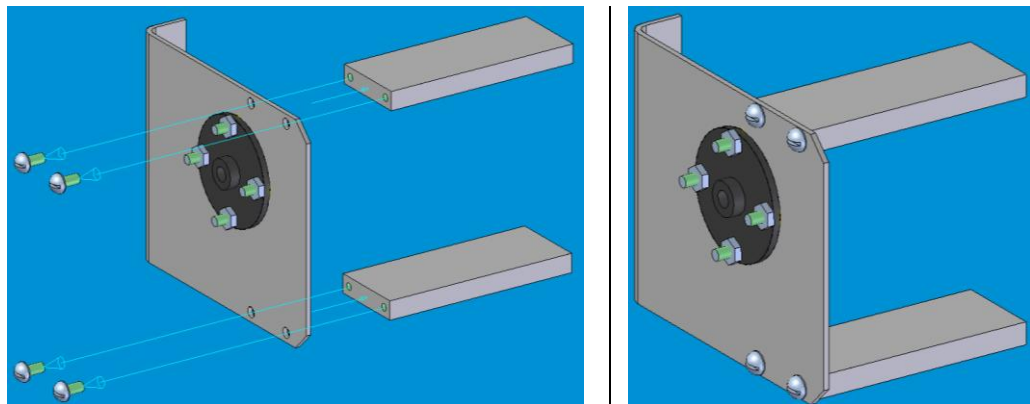


Figura B.3 Conjunto de piezas unidas a la tapa del lado derecho de la caja del telémetro.

En la Figura B.4 se muestra la forma de unir el eje a la tapa izquierda de la caja del telémetro. Para hacer esto, se emplea una pieza de acoplamiento que sirve de enlace entre estos dos elementos. La pieza de acoplamiento se une con la tapa por medio de dos tornillos colocados en dirección longitudinal. El eje se coloca dentro de la pieza de acoplamiento y se sujeta con ayuda de dos opresores que asientan en los planos del eje.

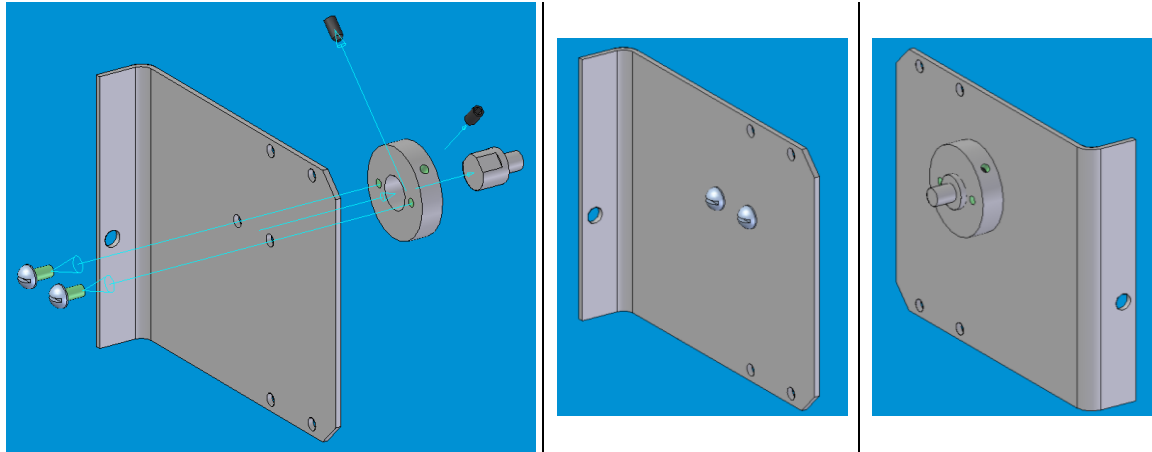


Figura B.4 Conjunto de piezas unidas a la tapa del lado izquierdo de la caja del telémetro.

Posteriormente, se coloca el servomotor en la pieza derecha de la base, que es la que tiene el orificio rectangular. A los lados de este orificio se encuentran cuatro barrenos para sujetar el servomotor empleando tornillos. Antes de esto, se deben colocar las arandelas de hule que vienen incluidas entre los accesorios del servomotor. En la Figura B.5 se muestra la forma en que se debe colocar el servomotor y los tornillos empleados para sujetarlo.

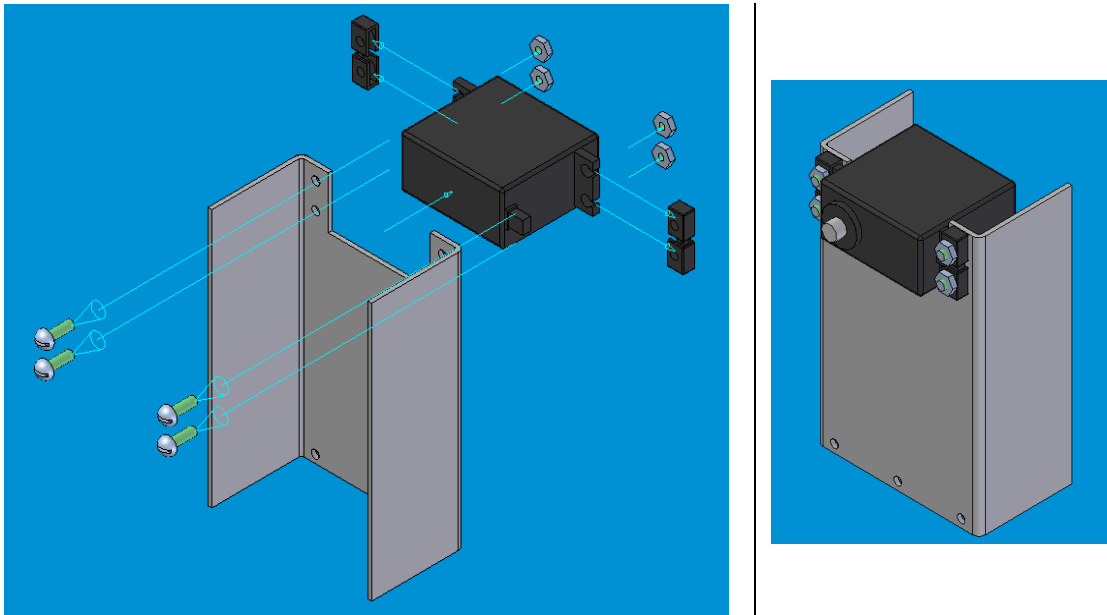


Figura B.5 Servomotor colocado en al pieza derecha de la base del sistema. Se puede ver la forma en que se debe colocar el servomotor.

Ahora se agrega la tapa derecha y las piezas que se unieron a ella. Para hacer esto, se sujeta el accesorio en forma de disco en el eje del servomotor con ayuda de un tornillo, como se indica en la Figura B.6. Hay que cerciorarse de que el eje del servomotor esté colocado en la posición angular de 0° , para que el telémetro apunte a la dirección correcta durante el movimiento.

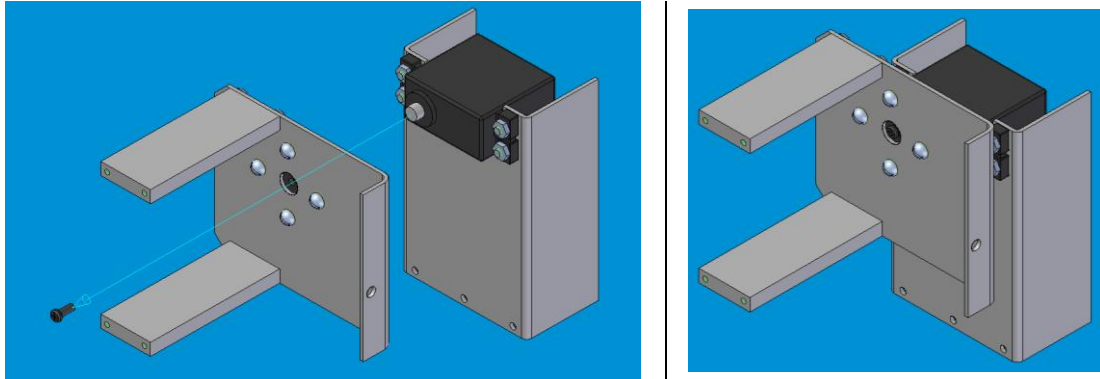


Figura B.6 Tapa derecha de la caja del telémetro y pieza de la base con el servomotor. Esta unión se hace por medio del accesorio en forma de disco.

Después, se anexa el conjunto de piezas unidas a la tapa izquierda de la caja del telémetro, como se muestra en la Figura B.7. Los dos conjuntos de piezas se unen por medio de los espaciadores de la caja del telémetro.

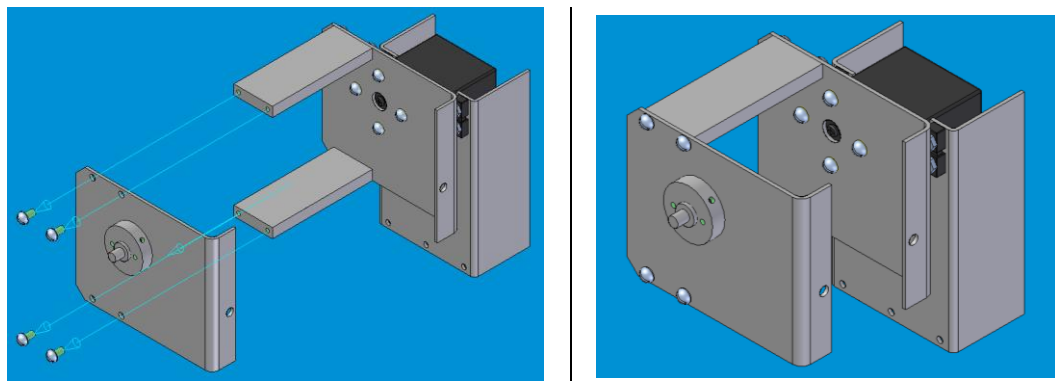


Figura B.7 Unión de las dos tapas de la caja del telémetro con la pieza derecha de la base del sistema.

El rodamiento se coloca en el eje y luego se cubre con la pieza izquierda de la base del sistema, como se muestra en la Figura B.8. Para unir las dos piezas de la base, se emplean tres tornillos.

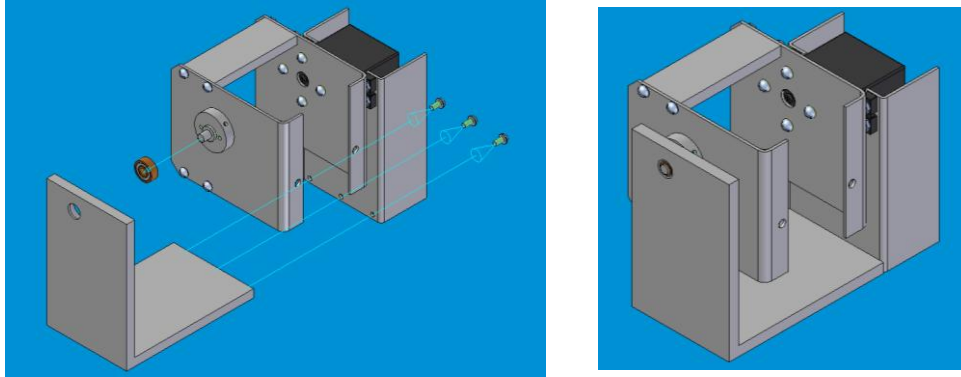


Figura B.8 Unión de las dos piezas de la base del sistema. El rodamiento se coloca entre el eje y la pieza izquierda de la base.

Finalmente, se coloca el telémetro dentro de la caja como se muestra en la Figura B.9. Para hacer la sujeción, se colocan dos tornillos entre las tapas de la caja y la parte posterior del telémetro.

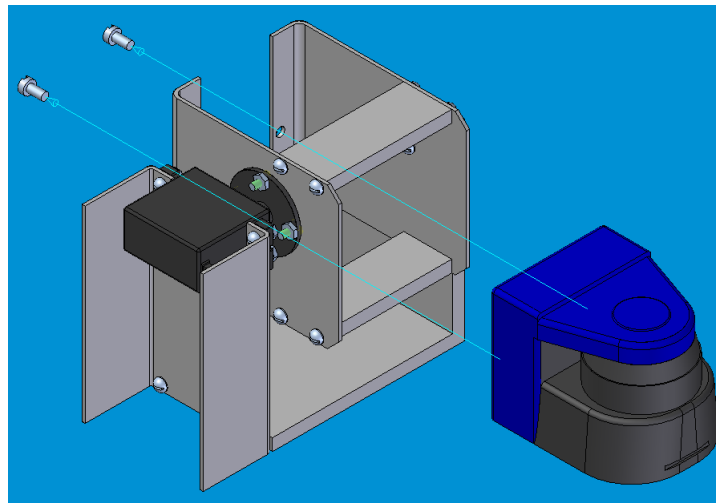


Figura B.8 Colocación del telémetro láser de barrido UBG-04LX-F01. El telémetro se sujeta con dos tornillos colocados en su parte posterior.

C. PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SERVOMOTOR

Este programa permite controlar el eje de un servomotor estándar de modelismo, para imitar un movimiento armónico simple. Los pulsos de la señal de control se envían cada 20 *ms*, por lo que se debe emplear un servomotor que tenga frecuencia de trabajo de 50 *Hz*. El programa está diseñado para funcionar con un oscilador externo de 20 *MHz*.

El movimiento que se desarrolla tiene semiperiodo de 280 *ms*, de acuerdo con lo que se diseñó en el Capítulo 5 de la tesis "Diseño de un sistema de percepción del entorno".

La señal de control para el servomotor se genera con ayuda de un ciclo de retardo, que emplea tres constantes para obtener retardos entre 7.4 μ s y hasta 3.1184 *ms*, con resolución de un ciclo de instrucción, es decir 200 *ns*.

El microcontrolador se comunica con una computadora por el puerto serial mediante el protocolo RS-232, para recibir un dato que indica cuando iniciar o terminar el movimiento.

Se emplean dos de las terminales del microcontrolador, para cumplir los siguientes propósitos:

Terminal	Descripción
PB.0	Salida digital para controlar al servomotor. Conectar la terminal de control del servomotor.
PB.1	Salida digital para indicar cuándo el eje del servomotor está en movimiento. Conectar un LED para visualizar lo que está ocurriendo.

A continuación se muestra el código en lenguaje ensamblador que se programó en el microcontrolador.

```

;CONFIGURACIÓN DEL MICROCONTROLADOR
INCLUDE P16F887.INC
__CONFIG _CONFIG1,0X30F2 ;Bits de configuración
;Oscilador: HS, alta velocidad
;Temporizador "watchdog": apagado
;Temporizador de encendido: apagado
;Habilitación de "master clear": /MCLR es externo
;Protección de código: apagada
;Protección de lectura de dato EE: apagado
;Detección de caída de voltaje: BOD y SBORN deshabilitados
;Modo de "switch over" interno y externo: deshabilitado
;Monitor de reloj "fail-safe": deshabilitado
;Programación de bajo voltaje: habilitada

__CONFIG _CONFIG2,0X3FFF ;Bits de configuración
;Bit de selección de reinicio por baja de voltaje: baja de voltaje a 4.0v
;Habilitación de auto escritura: sin protección

;RESERVACIÓN DE DIRECCIONES DE MEMORIA
CBLOCK 0X20
TMPX ;PARA ALMACENAR LA CONSTANTE X DEL RETARDO "DELAY"
TMPY ;PARA ALMACENAR LA CONSTANTE Y DEL RETARDO "DELAY"
CX ;PARA ALMACENAR LA CONSTANTE X DE LOS RETARDOS "DELAY_S" Y "DELAY_C"
CY ;PARA ALMACENAR LA CONSTANTE Y DE LOS RETARDOS "DELAY_S" Y "DELAY_C"
CA ;PARA ALMACENAR LA CONSTANTE A DE LOS RETARDOS "DELAY_S" Y "DELAY_C"
CONTEO ;PARA ALMACENAR EL CONTADOR DE POSICIONES
BANDERAS ;PARA EL REGISTRO DE BANDERAS
DATO ;PARA ALMACENAR EL DATO RECIBIDO DE LA COMPUTADORA
ENDC

```



```

#DEFINE SERVO_ON BANDERAS,0 ;0: MOVER SERVOMOTOR
;1: DETENER SERVOMOTOR
#DEFINE C_UP BANDERAS,1 ;0: HACER INCREMENTO DE CONTEO
;1: HACER DECREMENTO DE CONTEO

ORG 0X00 ;VECTOR DE REINICIO
GOTO INICIO ;VE A "INICIO"
ORG 0X04 ;VECTOR DE INTERRUPCIONES

#DEFINE BAUD .64 ;VALOR DE SPBRGH:SPBRG PARA:
;VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 19200 BAUDIOS
;CON UN ERROR DE 0.16%
;BITS DE CONFIGURACIÓN:
;SYNC = 0 (TXSTA.4)
;BRG16 = 0 (BAUDCTL.3)
;BRGH = 1 (TXSTA.2)

INICIO
;***CAMBIO AL BANCO 1
; BCF STATUS,RP1 ;RP1 = 0
; BSF STATUS,RP0 ;RP0 = 1

REGISTRO DE ESTADO Y CONTROL DE TRANSMISIÓN
MOVLW 0X24 ;W = B'0010 0100'
MOVWF TXSTA ;TXSTA = W = B'0010 0100'
;BIT 7 X (EN MODO ASINCRONO)
;BIT 6 0 = TRANSMISIÓN DE 8 BITS
;BIT 5 1 = TRANSMISIÓN HABILITADA
;BIT 4 0 = MODO ASINCRONO, SYNC
;BIT 3 0 = TRANSMISIÓN DE "SYNC BREAK" COMPLETADA
;BIT 2 1 = ALTA VELOCIDAD, BRGH
;BIT 1 0 = REGISTRO "TRANSMIT SHIFT" VACÍO
;BIT 0 0 = NOVENO BIT DEL DATO DE TRANSMISIÓN

```

```

;VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN
MOVW HIGH BAUD ;W = BYTE MÁS SIGNIFICATIVO DE BAUD
MOVWF SPBRGH ;SPBRGH = W
MOVW LOW BAUD ;W = BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE BAUD
MOVWF SPBRG ;SPBRG = W

;CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS
BCF TRISC,6 ;TRANSMISIÓN
BSF TRISC,7 ;RECEPCIÓN
CLRF TRISB ;CONFIGURACIÓN DE PB COMO SALIDA

;PERMISOS DE INTERRUPCIÓN
; BSF INTCON,GIE ;PERMISO GLOBAL DE INTERRUPCIÓN
; BSF INTCON,PEIE ;PERMISO DE INTERRUPCIÓN POR PERIFERICOS
; BSF PIEL,RCIE ;PERMISO DE INTERRUPCIÓN POR RECEPCIÓN RS232

;***CAMBIO AL BANCO 3
BSF STATUS,RP1 ;RP1 = 1
BSF STATUS,RP0 ;RP1 = 1

;CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS COMO DIGITALES O ANALÓGICAS
CLRF ANSELH ;CONFIGURACIÓN DE PB COMO SALIDA DIGITAL

;BAUD RATE CONTROL REGISTER
MOVW 0X00 ;W = B'0000 0000'
MOVWF BAUDCTL ;BAUDCTL = W = B'0000 1000'
;BIT 7 0 = EL TIMER DE AUTO-BAUD NO SE DESBORDÓ
;BIT 6 0 = BIT DE INICIO RECIBIDO Y SE CONTINÚA RECIBIENDO
;BIT 5 NO IMPLEMENTADO
;BIT 4 0 = Transmisión de datos no-invertida para RB7/TX/CK
;BIT 3 0 = SE ESTÁ USANDO EL GENERADOR DE BAUDIOS DE 16-BITS
;BIT 2 NO IMPLEMENTADO
;BIT 1 0 = EL RECEPTOR ESTÁ OPERANDO NORMALMENTE
;BIT 0 0 = MODO DE DETECCIÓN DE AUTO-BAUD DESHABILITADO

;***CAMBIO AL BANCO 2
; BSF STATUS,RP1 ;RP1 = 1
; BCF STATUS,RP0 ;RP1 = 0

```

```

;***CAMBIO AL BANCO 0
BCF STATUS,RP1 ;RP1 = 0
; BCF STATUS,RP0 ;RP1 = 0

;RECEIVE STATUS AND CONTROL REGISTER
MOVLW 0X90 ;W = B'1001 0000'
MOVWF RCSTA ;RCSTA = W = B'1001 0000'
;BIT 7 1 = PUERTO SERIAL HABILITADO
;BIT 6 0 = RECEPCIÓN DE 8 BITS
;BIT 5 X (EN MODO ASINCRONO)
;BIT 4 1 = RECEPTOR HABILITADO
;BIT 3 0 = DESHABILITA DETECCIÓN DE DIRECCIONES
;BIT 2 0 = SIN ERROR POR "FRAMING"
;BIT 1 0 = SIN ERROR POR DESBORDAMIENTO
;BIT 0 0 = NOVENO BIT DEL DATO RECIBIDO

; INICIALIZACIÓN
BCF PORTB,1 ;PB.1 = 0
CLRF CONTEO ;CONTEO = 0
CLRF BANDERAS ;BANDERAS = 0

;En el siguiente bloque se recibe el dato de la computadora.
;Si se recibe '1': se enciende la bandera "servo_on" y se inicia el movimiento
;Si se recibe '0': se apaga la bandera "servo_on" y se finaliza el movimiento
;Si se recibe otro dato: se continúa en el estado actual

OTRA
MOVF RCREG,W ;W = RCREG
MOVWF DATO ;DATO = W = RCREG
MOVF DATO,W ;W = DATO
XORLW '1' ;W XOR '1'
BTFSS STATUS,Z ;Z == 1?, W == '1'?
GOTO CHECK_C ;NO, VE A "CHECK_C"
BSF PORTB,1 ;SI, PB.1 = 1
BSF SERVO_ON ;SI, SERVO_ON = 1
NOP ;INSTRUCCIÓN "NO OPERATION" PARA COMPENSAR LA DIFERENCIA DE TIEMPO
NOP ;"

```

```

GOTO          CONTINUAR ;VE A "CONTINUAR"
CHECK_C
  MOVF        DATO,W      ;W = DATO
  XORLW      '0'         ;W XOR '0'
  BTFSS      STATUS,Z    ;Z == 1?, W == '0'?
  GOTO       CONTINUAR  ;NO, VE A "CONTINUAR"
  BCF        PORTB,1     ;SI, PB.1 = 0
  BCF        SERVO_ON    ;SI, SERVO_ON = 0
  CLRF      CONTEO      ;CONTEO = 0

;En la siguiente parte del código se usan tres rutinas de retardo llamadas: delay_s, delay_c y delay.
;Estas rutinas se emplean para formar la señal de control que se envía al servomotor. Cada retardo
;se utiliza para la siguiente función:
;DELAY_S:
;Permite mantener el pulso de control en estado lógico alto durante cierto tiempo.
;DELAY_C:
;Sirve para mantener el pulso en estado lógico bajo a lo largo de la parte variable del pulso.
;DELAY:
;Mantiene el pulso en estado bajo durante el tiempo restante para llegar a los 20 ms.

CONTINUAR
  BTFSS      SERVO_ON    ;SERVO_ON == 1?
  GOTO       OTRA       ;NO, VE A "OTRA"
  BSF        PORTB,0    ;PB.0 = 1
  CALL      DELAY_S     ;VE A DELAY_S
  BCF        PORTB,0    ;PB.0 = 0
  CALL      DELAY_C     ;VE A DELAY_C
  CALL      DELAY       ;VE A DELAY

;Durante este fragmento de código aparecen las siguientes etiquetas:
;"DESCEN":
;Este fragmento de código se ejecuta cuando el conteo debe cambiar de forma descendente.

```

```

; "INCRE_A":
; Este fragmento de código se ejecuta cuando se va a incrementar el valor de "conteo" y hay
; que hacer un ajuste de tiempo debido a que no se realizaron instrucciones de salto.

; "INCRE":
; Este fragmento de código se ejecuta cuando se va a incrementar el valor de "conteo" y no
; hay que hacer un ajuste de tiempo.

; "DECRE_A":
; Este fragmento de código se ejecuta cuando se va a realizar un decremento el valor de "con-
; teo" y hay que hacer un ajuste debido a que no se realizaron instrucciones de salto.

; "DECRE":
; Este fragmento de código se ejecuta cuando se va a realizar un decremento el valor de "con-
; teo" y no hay que hacer un ajuste de tiempo.

MOVW 0X01 ;W = 1
ANDWF C_UP ;W = C_UP AND B'0000 0001'
BTFSC STATUS,Z ;C_UP == 1?
GOTO DESCEN ;NO, VE A "DESCEN"
NOP
MOVF CONTEO,W ;SI, W = CONTEO
SUBLW .14 ;W - 14
BTFSS STATUS,Z ;CONTEO == 14?
GOTO INCRE_A ;NO, VE A "INCRE_A"
MOVLW .0 ;SI, W = 0
MOVWF C_UP ;C_UP = W = 0
GOTO DECRE ;VE A "DECRE"

DESCEN
MOVF CONTEO,W ;SI, W = CONTEO
SUBLW .0 ;W - 0
BTFSS STATUS,Z ;CONTEO == 0?
GOTO DECRE_A ;NO, VE A "DECRE_A"
MOVLW .1 ;SI, W = 1
MOVWF C_UP ;C_UP = W = 1
GOTO INCRE ;VE A "INCRE"

INCRE_A

```

```

NOP
NOP
NOP
INCF      CONTEO      ;CONTEO = CONTEO + 1
GOTO     OTRA        ;VE A "OTRA"
DECRE_A
NOP
NOP
NOP
DECF     CONTEO      ;CONTEO = CONTEO - 1
GOTO     OTRA        ;VE A "OTRA"
DECRE
;Las rutinas "delay_s" y "delay_c" emplean tres constantes para generar los retardos. Estos
;valores están almacenados en las siguientes tablas. La variable "CONTEO" indica que valor
;de la tabla se leerá.
;Los valores de las tablas se calculan de la siguiente forma:
;x = ((t / 200) - 189) / 58 + 1; redondear el valor hacia abajo
;y = ((t / 200) - x) / 3 + 1; redondear el valor hacia arriba
;z = (t / 200) - x - y
;Donde:
;t: Es el tiempo de retardo en ms
;x, y, z: Son los valores de las constantes para la rutina de retardo. Estos valores se
;almacenan en las tablas
;correspondientes
;Tabla de valores para la constante x de la rutina de retardo "DELAY_S"
TABLA_XS
MOVF    CONTEO,W      ;W = CONTEO
ADDWF   PCL,F         ;PCL = PCL + W
RETLW  .128
RETLW  .128
RETLW  .129
RETLW  .130

```

```

RETLW .131
RETLW .132
RETLW .134
RETLW .135
RETLW .137
RETLW .139
RETLW .140
RETLW .141
RETLW .142
RETLW .142
RETLW .143

```

;Tabla de valores para la constante y de la rutina de retardo "DELAY_S"

```

TABLA_Y_S
MOVF   CONTEO,W      ;W = CONTEO
ADDWF  PCL,F        ;PCL = PCL + W
RETLW .66
RETLW .70
RETLW .61
RETLW .58
RETLW .61
RETLW .68
RETLW .58
RETLW .70
RETLW .62
RETLW .53
RETLW .60
RETLW .62
RETLW .60
RETLW .70
RETLW .54

```

;Tabla de valores para la constante z de la rutina de retardo "DELAY_S"

```

TABLA_Z_S
MOVF   CONTEO,W      ;W = CONTEO
ADDWF  PCL,F        ;PCL = PCL + W

```

```
RETLW .0
RETLW .2
RETLW .2
RETLW .1
RETLW .2
RETLW .2
RETLW .0
RETLW .1
RETLW .1
RETLW .2
RETLW .2
RETLW .0
RETLW .1
RETLW .1
RETLW .2
RETLW .2
RETLW .0
RETLW .2
RETLW .1
RETLW .1
```

;Tabla de valores para la constante x de la rutina de retardo "DELAY_C"

TABLA_XC

```
MOVWF CONTEO,W ;W = CONTEO
ADDWF PCL,F ;PCL = PCL + W
RETLW .83
RETLW .83
RETLW .83
RETLW .82
RETLW .81
RETLW .79
RETLW .78
RETLW .76
RETLW .74
RETLW .73
RETLW .72
RETLW .70
RETLW .70
RETLW .69
RETLW .69
```


;Tabla de valores para la constante y de la rutina de retardo "DELAY_C"

```
TABLA_YC
MOVF  CONTEO,W      ;W = CONTEO
ADDWF PCL,F        ;PCL = PCL + W
RETLW .65
RETLW .62
RETLW .51
RETLW .54
RETLW .51
RETLW .64
RETLW .54
RETLW .61
RETLW .69
RETLW .59
RETLW .52
RETLW .69
RETLW .52
RETLW .61
RETLW .58
```

;Tabla de valores para la constante z de la rutina de retardo "DELAY_C"

```
TABLA_ZC
MOVF  CONTEO,W      ;W = CONTEO
ADDWF PCL,F        ;PCL = PCL + W
RETLW .1
RETLW .2
RETLW .0
RETLW .1
RETLW .0
RETLW .2
RETLW .2
RETLW .0
RETLW .0
RETLW .0
RETLW .0
RETLW .0
RETLW .0
RETLW .1
```

```

RETLW .0
RETLW .0
RETLW .1

```

;La rutina de retardo "DELAY" emplea dos ciclos anidados de decremento de contadores. El ciclo interno utiliza el contador "TMPY" y el ciclo externo el contador "TMPX".

```

DELAY
    MOVLW .131    ;W = 131
    MOVWF TMPX   ;TMPX = W = 131
DEL_0
    MOVLW .221    ;W = 221
    MOVWF TMPY   ;TMPY = W = 221
DEL_1
    DECFSZ      TMPY      ;TMPY = TMPY + 1, TMPY == 0?
    GOTO        DEL_1     ;NO, VE A "DEL_1"
    DECFSZ      TMPX,F     ;SI, TMPX = TMPX - 1, TMPX == 0?
    GOTO        DEL_0     ;NO, VE A "DEL_0"
    NOP
    NOP
    RETURN      ;SI, REGRESA

;RUTINA DE RETARDO "DELAY_S"
DELAY_S
    CALL        TABLA_XS  ;VE A "TABLA_XS"
    MOVWF      CX         ;CX = W; W ES IGUAL AL VALOR DE "TABLA_XS"
DECX_S
    DECFSZ    CX         ;CX = CX - 1, CX == 0?
    GOTO      $+.2      ;NO, SALTA 2 INSTRUCCIONES ADELANTE
    GOTO      AJUSTE_S  ;SI, VE A "AJUSTE_S"
    MOVLW    .17        ;W = 17
    MOVWF    CA         ;CA = W = 17
    DECFSZ  CA         ;CA = CA - 1, CA == 0?
    GOTO      $--.1     ;NO, SALTA 1 INSTRUCCIÓN ATRÁS
    NOP
    GOTO      DECX_S    ;SI, "NO OPERATION"
                    ;VE A "DECX_S"

```

```

AJUSTE_S
CALL TABLA_YS ;VE A "TABLA_YS"
MOVWF CY ;CY = W; W ES IGUAL AL VALOR DE "TABLA_YS"
DECFSZ CY ;CY = CY - 1, CY == 0?
GOTO $-.1 ;NO, SALTA 1 INSTRUCCIÓN ATRÁS
NOP ;SI, "NO OPERATION"
CALL TABLA_ZS ;VE A "TABLA_ZS"
ADDFW PCL,F ;PCL = PCL + W
NOP
NOP
RETURN

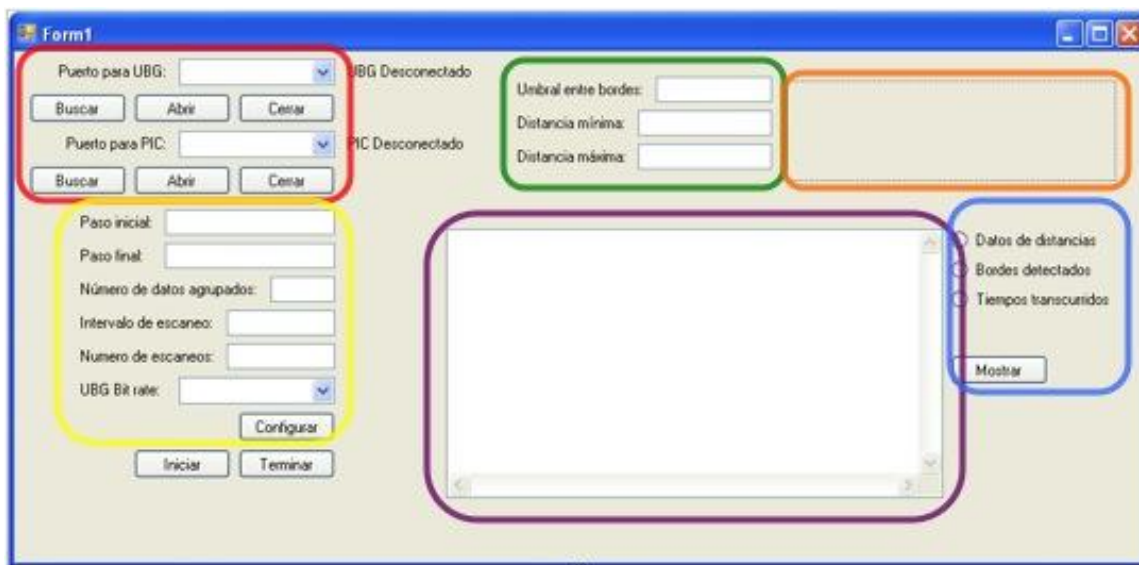
;RUTINA DE RETARDO "DELAY_C".
DELAY_C
CALL TABLA_XC ;VE A "TABLA_XC"
MOVWF CX ;CX = W; W ES IGUAL AL VALOR DE "TABLA_XS"
DECX_C
CX ;CX = CX - 1, CX == 0?
GOTO $+.2 ;NO, SALTA 2 INSTRUCCIONES ADELANTE
GOTO AJUSTE_C ;SI, VE A "AJUSTE_C"
MOVLW .17 ;W = 17
MOVWF CA ;CA = W = 17
DECFSZ CA ;CA = CA - 1, CA == 0?
GOTO $-.1 ;NO, SALTA 1 INSTRUCCIÓN ATRÁS
NOP ;SI, "NO OPERATION"
GOTO DECC_C ;VE A "DECC_C"

AJUSTE_C
CALL TABLA_YC ;VE A "TABLA_YC"
MOVWF CY ;CY = W; W ES IGUAL AL VALOR DE "TABLA_YS"
DECFSZ CY ;CY = CY - 1, CY == 0?
GOTO $-.1 ;NO, SALTA 1 INSTRUCCIÓN ATRÁS
NOP ;SI, "NO OPERATION"
CALL TABLA_ZC ;VE A "TABLA_ZC"
ADDFW PCL,F ;PCL = PCL + W
NOP
NOP
RETURN
END ;FIN

```

D. Descripción de la interfaz de comunicación con el usuario

En la Figura D.1 se muestra nuevamente la imagen de la ventana de la interfaz, y se indican las secciones que contiene para poder describirlas a continuación.



- | | |
|---|--|
| Selección de puerto para comunicación | Despliegue de imagen en escala de rojos |
| Configuración de UBG-04LX-F01 | Despliegue de información de medición |
| Parámetros para despliegue de información | Selección de información a desplegar |

Figura D.1 Interfaz para facilitar la interacción entre el usuario y el sistema de percepción del entorno. Se indican las funciones de cada sección de la venta.

Selección de puertos para comunicación

En esta sección de la ventana se pueden seleccionar los puertos, por medio de los cuales se intercambiará la información con el telémetro láser de barrido y con el controlador del servomotor. La comunicación con estos dispositivos se hace por medio del protocolo de transmisión serial asíncrona RS-232.

Para poder seleccionar los puertos, se colocaron dos listas desplegables en las que se muestran los puertos COM disponibles en la computadora. La primera de las listas corresponde al puerto COM para el UBG-04LX-F01, y la segunda al puerto para el controlador del servomotor. Para cada lista desplegable se colocaron tres botones, uno para abrir el puerto seleccionado, otro para cerrarlo y otro más para volver a buscar puertos, en caso de que se haya habilitado alguno después de iniciado el programa de la interfaz.

Configuración de UBG-04LX-F01

En esta sección se pueden configurar los parámetros de medición del UBG-04LX-F01. Se colocaron cinco cajas de texto y una lista desplegable, por medio de las cuales el usuario puede ingresar la información necesaria para hacer la configuración.

Los dos primeros parámetros que aparecen en esta sección son el paso inicial y el paso final. Estos parámetros permiten configurar la amplitud de la medición que se quiere realizar. Se llama pasos a los puntos de medición. El UBG-04LX-F01 tiene 1024 pasos en los que se divide la circunferencia de medición. El primer paso dentro del rango de medición es el paso 44, y el último es el 725. El paso que se encuentra en la parte frontal del telémetro es el paso 384 [49]. El paso inicial corresponde al paso en el que se comenzará a medir y el paso final al paso en que se terminará de medir. El paso final debe ser mayor que el paso inicial. En la Figura D.2 se ilustran estas ideas.

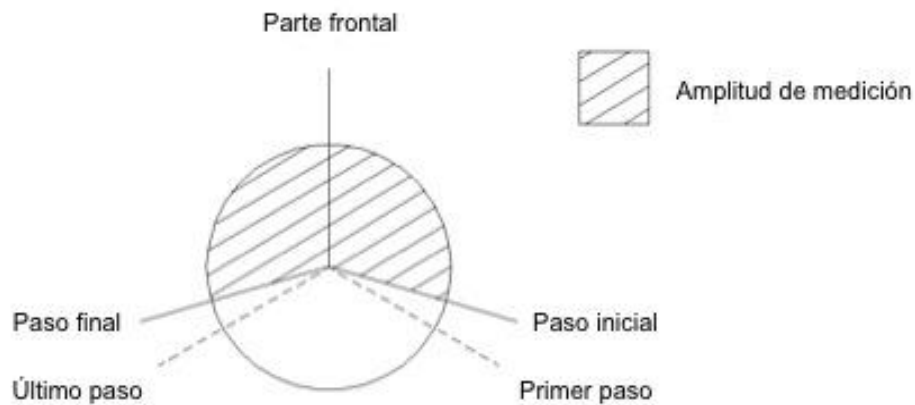


Figura D.2 Diagrama que muestra algunos puntos de medición importantes en el rango de medición del telémetro láser.

El siguiente parámetro que se puede configurar con la interfaz es el número de datos agrupados. Esto se refiere al número de pasos adyacentes que pueden agruparse en un solo dato. El rango de este parámetro es de 0 a 99. Cuando el número de datos agrupados es mayor a 1, el dato enviado por el telémetro es el que corresponde a la distancia más corta dentro de las mediciones agrupadas.

También se agregó en esta sección de la ventana de la interfaz una caja de texto para configurar el intervalo de escaneo. Este parámetro se refiere al número de mediciones que se saltan entre cada exploración.

Posteriormente, se encuentra la caja de texto para configurar el número de escaneos. Este parámetro permite al usuario solicitar el número de mediciones que requiere realizar. Cuando se configura un número de escaneos de 0, se realizan mediciones indefinidamente hasta que se presiona el botón terminar.

También se colocó una lista desplegable para poder configurar la velocidad de comunicación entre el telémetro y la computadora, en la que se ejecuta el programa de la interfaz. En la Tabla D.1 se muestran las opciones para configurar la velocidad de comunicación. En esta tabla también muestran los rangos en los cuales se pueden configurar los otros parámetros del telémetro.

Tabla D.1 *Parámetros que pueden configurarse por medio de la interfaz desarrollada y sus rangos correspondientes.*

Parámetro	Rango	Unidades
Paso inicial	44 - 275	<i>paso</i>
Paso final	44 - 275	<i>paso</i>
Número de datos agrupados	0 - 99	<i>datos</i>
Intervalo de escaneo	0 - 9	<i>escaneos</i>
Numero de escaneos	0 - 99	<i>escaneos</i>
Velocidad de comunicación	19.2, 38.4, 57.6, 115.2	<i>kbps</i>

Parámetros para el despliegue de la información de las mediciones

En esta parte de la ventana de la interfaz, se pueden configurar los parámetros para desplegar la información tridimensional recopilada durante las mediciones por el sistema de percepción del entorno. En la interfaz se incluyeron dos formas para visualizar la información, las cuales se explicarán a continuación. La primera se denominó matriz de detección de bordes y la segunda imagen tridimensional dibujada con escala de rojos.

La matriz de detección de bordes representa, por medio de unos y ceros, la existencia de bordes en el espacio de medición. Esta representación se hace mediante una matriz. Los renglones de la matriz corresponden a las diferentes posiciones del servomotor, es decir, al barrido vertical. Por otra parte, las columnas corresponden a los distintos pasos de las exploraciones del telémetro,

es decir, al barrido horizontal. En cada celda se coloca un uno, en caso de que se haya detectado un borde, o un cero en caso de que no. Para detectar los bordes, se compara cada dato de distancia con los datos adyacentes. Si existe una diferencia superior al umbral definido, se considera que existe un borde. Este umbral puede configurarse en esta sección de la ventana de la interfaz.

La otra forma de visualizar la información de las mediciones que se incluyó en la interfaz, fue la denominada imagen tridimensional con escala de rojos. Para hacer esta representación, se divide el espacio de medición en una cuadrícula. Cada cuadro es coloreado con un tono de rojo de acuerdo con la distancia correspondiente. Mientras más grande sea la distancia el tono será más oscuro para representar una mayor profundidad y viceversa. Para asignar los tonos, se define el rango de medición y se divide entre el número de tonos disponibles. El rango de medición se puede configurar por medio de los parámetros de distancia mínima y distancia máxima, en esta sección de la ventana.

Despliegue de la imagen en escala de rojos

En esta sección, se despliega la imagen en escala de rojos que corresponde a la información del barrido tridimensional más reciente. La imagen es desplegada una vez que se presiona el botón terminar, que se encuentra en la parte inferior izquierda de la ventana.

Despliegue de información de las mediciones

En esta parte de la ventana, se despliega información de las mediciones en forma de matriz de dos dimensiones. Al igual que en la matriz de detección de bordes, la información desplegada en esta caja de texto esta ordenada, de tal forma que los renglones corresponden al barrido vertical y las columnas al barrido horizontal.

En esta sección de la ventana, se pueden desplegar los datos de cada medición de distancia, registrados durante el ultimo barrido tridimensional, la matriz de detección de bordes, o los tiempos transcurridos entre cada punto de medición de distancia.

Selección de información a desplegar

En esta parte de la ventana, se puede seleccionar la información que se mostrará en la zona de despliegue de información de las mediciones. Una vez que se ha indicado la información que se desea visualizar, se debe presionar el botón mostrar para que la información aparezca en el cuadro de texto correspondiente.

