

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

# Teleoperación Bilateral de un Submarino

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN  
MECATRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Mariela Serna Serna.

ASESORES

Dr. Luis Govinda García Valdovinos.

Dr. Tomás Salgado Jiménez.

Dr. Manuel Bandala Sánchez.

# Resumen

En esta tesis se presenta un sistema de teleoperación bilateral, donde el maestro es el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0, el canal de comunicación es el protocolo serial UART y el esclavo el submarino Neptune SB-1.

El esclavo es instrumentado con un sensor de humedad, una unidad de medición inercial, un sensor de presión y un sensor de fuerza. El sensor de humedad es empleado para detectar alguna fuga de agua dentro del submarino.

La unidad de medición inercial (IMU) provee información acerca de la aceleración lineal del vehículo y la velocidad angular. La IMU utilizada es la ADIS16400 de la marca Analog Devices, que se basa en tres giroscopios y tres acelerómetros que permiten hacer la medición del ángulo:  $\phi$ , para posteriormente transmitirlo al sistema embebido BeagleBone Black por medio del canal de comunicación SPI.

El sensor de fuerza nos permite medir la fuerza de contacto entre el vehículo submarino y el entorno. Esto con el fin, de que el operador humano tenga la sensación de telepresencia, al recibir la retroalimentación de fuerza producida por contactos sostenidos y colisiones frontales. Eliminando con ello, la necesidad de confiar únicamente en la teleoperación visual. El sensor de presión es utilizado para obtener el valor de profundidad a la que se encuentra el vehículo submarino, este sensor se comunica por medio del canal de comunicación I2C. Una de las partes principales del sistema de teleoperación es la recolección de los datos de los sensores, la ejecución del algoritmo de control y la comunicación, tareas que son realizadas por el sistema embebido de bajo costo BeagleBone Black.

Adicionalmente, con el fin de evaluar el tiempo de respuesta, el comportamiento del

algoritmo de control y la arquitectura electrónica, se llevaron a cabo la identificación del sistema y experimentos de control de profundidad.

La identificación del sistema, que describe la dinámica del vehículo en el plano vertical, se obtuvo a partir de datos experimentales del sensor de presión. La función de transferencia obtenida se utilizó para ajustar las ganancias del algoritmo de control de profundidad. El algoritmo de control empleado es un PD, el cual controla la velocidad de los motores laterales.

# Abstract

This thesis presents a bilateral teleoperation system, where the master is the Phantom Premium 1.0 haptic device, the communication channel is the serial protocol UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) and the slave is the underwater vehicle Neptune SB-1.

The slave is implemented with a humidity sensor, an inertial measurement unit, a pressure sensor and a force sensor. The humidity sensor is used to detect any leakage of water into the submarine.

The inertial measurement unit provides information about the vehicle linear acceleration and angular velocity. The IMU that is used (Analog Devices ADIS16400) is based on three gyroscopes that allow the measurement of angles:  $\phi$ ,  $\theta$  and  $\psi$ , and then transmit them to the BeagleBone Black through SPI communication channel.

The force sensor allows us to measure the force provoked by collisions between the underwater vehicle and the environment. This in order that the human operator receives feedback force caused by sustained contacts and frontal collisions, which is performed with a performance such that a human operator will have the feeling of telepresence. In order to demonstrate the effectiveness of implementing a force sensor. Furthermore eliminating the need to rely solely on visual teleoperations.

One of the main parts of the teleoperation system is collecting data from the sensors, the control algorithm execution and communication tasks. That are performed in the low-cost embedded system BeagleBone Black.

Additionally, in order to evaluate the response time, the behavior of the control method



and the electronic architecture, the system identification and depth control experiments were carried out.

The system model, that describe the dynamic of the underwater vehicle in the vertical plane, was obtained with experimental data of the pressure sensor. This models was used in the tuning of the depth control. The control algorithm employed is a PD, which controls the speed of the side thrusters.

# Dedicatoria

Con todo mi amor y cariño a mis sobrinos: Ximena, Adrián, Rubén, Fernanda, Natalia y Maximiliano por llenar de alegría mi vida y motivarme a superarme en la vida, para que vean en mi un ejemplo a seguir.

# Agradecimientos

Agradezco a CIDESI por haberme facilitado los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

A Conacyt, quien me otorgó una beca de maestría para mi manutención a lo largo del proyecto de investigación.

De manera especial y sincera al Dr. Luis Govinda García Valdovinos por creer en mi y haberme brindado la oportunidad de desarrollar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación profesional.

A mi co-asesor el Dr. Manuel Bandala Sánchez por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplios conocimientos. Su colaboración fue de gran ayuda durante mi estancia en el laboratorio. Le agradezco sus atentas y siempre rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo, lo cual se ha visto reflejado en los buenos resultados obtenidos.

A mi co-asesor el Dr. Tomas Salgado Jiménez por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis, por su disponibilidad y paciencia brindada. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Y, por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible llevar a cabo este proyecto. A mis padres J. Carmen y María por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Así como a

mis hermanas por ser ejemplo de desarrollo profesional y representar la unidad familiar ... por ellos y para ellos!

A César, por ser parte muy importante de mi vida, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, sobre todo por su paciencia y amor incondicional.

A Isabel, Iris, Fer Fonseca y Fer Espinoza quienes además de brindarme sus conocimientos y experiencias profesionales desde el primer momento, me han permitido considerarlos unos verdaderos amigos que, a pesar de algunas discusiones, siempre se puede contar. Así como a Hugo, Luis Carlos y David, quienes fueron compañeros siempre generosos y dispuesto como pocos, que compartieron sus conocimientos y experiencias de tipo profesional y personal que fueron de gran valor.

Todos y cada uno de ustedes aportó con un granito de arena e hizo de esta etapa un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

# Índice general

<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes y estado del arte . . . . .	4
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	10
1.3. Hipótesis . . . . .	10
1.4. Objetivos . . . . .	10
1.4.1. Objetivo general . . . . .	10
1.4.2. Objetivos particulares . . . . .	11
1.5. Justificación . . . . .	11
1.6. Alcances y limitaciones . . . . .	12
1.7. Contribuciones de la tesis . . . . .	12
1.8. Organización de la tesis . . . . .	12
<b>2. Arquitectura electrónica</b>	<b>14</b>
2.1. Introducción . . . . .	14
2.2. Descripción del submarino Neptumne SB-1 . . . . .	14
2.3. Instrumentación . . . . .	16
2.3.1. Sensor de humedad . . . . .	17
2.3.2. Sensor de fuerza . . . . .	17
2.3.3. Unidad de medición inercial . . . . .	18
2.3.4. Sensor de presión . . . . .	20
2.4. Elementos finales de control (actuadores) . . . . .	22

2.4.1. Servomotor . . . . .	22
2.4.2. Propulsores . . . . .	23
2.5. Adquisición y procesamiento de señales . . . . .	24
2.6. Tarjeta de expansión . . . . .	26
2.7. Comentarios . . . . .	27
<b>3. Sistema de teleoperación bilateral</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción . . . . .	29
3.2. Robot maestro . . . . .	30
3.3. Canal de comunicación . . . . .	30
3.4. Robot esclavo . . . . .	31
3.5. Comentarios . . . . .	32
<b>4. Identificación del sistema</b>	<b>33</b>
4.1. Introducción . . . . .	33
4.2. Adquisición de datos . . . . .	35
4.3. Identificación del sistema . . . . .	37
4.4. Cálculo y sintonización del control PD . . . . .	38
4.4.1. Control PD, conceptos y discretización . . . . .	39
4.4.2. Sintonización del Controlador . . . . .	41
4.5. Comentarios . . . . .	42
<b>5. Resultados experimentales</b>	<b>43</b>
5.1. Introducción . . . . .	43
5.2. Experimentación . . . . .	43
5.2.1. Caso 1: Control de profundidad . . . . .	44
5.2.2. Caso 2: Modo manual . . . . .	50
5.2.3. Caso 3: Modo semiautomático . . . . .	54
5.3. Comentarios . . . . .	57

<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>58</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	58
6.2. Trabajo futuro . . . . .	59
<b>A. Hojas de datos</b>	<b>61</b>
<b>B. Esquemáticos de las tarjetas de expansión</b>	<b>73</b>
<b>C. Diagramas de las abrazaderas para los motores laterales</b>	<b>76</b>

# Índice de figuras

1.1. Sistema básico de teleoperación. . . . .	2
1.2. Predactor. . . . .	7
1.3. ROV Jason. . . . .	8
1.4. Brazos manipuladores. . . . .	9
1.5. Interfaz háptica Omega 6. . . . .	9
1.6. Sistema de teleoperación bilateral a desarrollar. . . . .	11
2.1. Sistema hombre/ radio control. . . . .	15
2.2. Principales sistemas del submarino Neptune SB-1. . . . .	16
2.3. Diagrama general de arquitectura electrónica. . . . .	16
2.4. Sensor de fuerza modelo 31. . . . .	17
2.5. Esquema general de una Unidad de Medición Inercial de la marca Analog Devices. . . . .	19
2.6. Unidad de Medición Inercial ADIS16400. . . . .	20
2.7. Sensor de presión MS5803-14BA. . . . .	21
2.8. Servomotor/timón. . . . .	22
2.9. Motor de CD lateral. . . . .	23
2.10. Esquema general del driver modelo VNH5019. . . . .	23
2.11. Soporte mecánico para motores laterales. . . . .	24
2.12. Tarjeta de desarrollo BeagleBone Black . . . . .	25
2.13. Tarjeta de expansión principal. . . . .	26
2.14. Imagen de tarjeta de expansión para sensor de fuerza. . . . .	27



2.15. Diagrama a bloques de tarjeta de expansión para sensor de fuerza. . . . .	27
2.16. Vista superior submarino Neptune SB-1. . . . .	28
3.1. Sistema de teleoperación bilateral. . . . .	29
3.2. Canal de comunicación. . . . .	30
3.3. Posición de los actuadores. . . . .	31
3.4. Posición de sensor de presión e IMU, figura de la izquierda. Posición sensor de fuerza, figura de la derecha. . . . .	31
3.5. Diagrama general del sistema de teleoperación bilateral. . . . .	32
4.1. Descripción del marco inercial. . . . .	34
4.2. Entrada al sistema a identificar. . . . .	36
4.3. Salida del sistema a identificar. . . . .	36
4.4. Diagrama a bloques del proceso de adquisición y procesamiento de datos. . .	37
4.5. Salidas real y aproximada de la identificación del sistema. . . . .	38
4.6. Diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado. . . . .	39
5.1. Profundidad real contra la deseada. La referencia deseada es constante. . . .	44
5.2. Señal de error. . . . .	45
5.3. Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales. . . . .	45
5.4. Respuesta del ángulo $\phi$ . . . . .	46
5.5. Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada cambia de un valor a otro. . . . .	47
5.6. Señal de error. . . . .	47
5.7. Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales. . . . .	48
5.8. Respuesta del ángulo $\phi$ . . . . .	48
5.9. Profundidad deseada y profundidad obtenida con el controlador PD. . . . .	49
5.10. Señal de error. . . . .	49

5.11. Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales. . . . .	50
5.12. Respuesta del ángulo $\phi$ . . . . .	50
5.13. Fuerza del esclavo y fuerza del maestro. . . . .	51
5.14. Fuerza del esclavo y velocidad en en eje $x$ . . . . .	52
5.15. Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada es variable. . . . .	52
5.16. Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales. . . . .	53
5.17. Respuesta del ángulo $\phi$ . . . . .	53
5.18. Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada es constante. . . . .	54
5.19. Señal de error. . . . .	54
5.20. Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales. . . . .	55
5.21. Fuerza del esclavo y fuerza del maestro. . . . .	55
5.22. Fuerza del esclavo y velocidad en $x$ . . . . .	56
5.23. Respuesta del ángulo $\phi$ . . . . .	56
B.1. Diagrama esquemático de tarjeta de expansión de sensor de fuerza. . . . .	74
B.2. Diagrama esquemático de tarjeta de expansión principal. . . . .	75
C.1. Diagrama esquemático de abrazadera para motores laterales. . . . .	77
C.2. Diagrama 3D de abrazadera para motores laterales. . . . .	78

# Índice de tablas

- 2.1. Especificaciones del sensor de fuerza. . . . . 18
- 2.2. Características IMU. . . . . 20
- 2.3. Datos técnicos del sensor de presión. . . . . 21
- 2.4. Características del "driver-VNH5019. . . . . 24
- 2.5. Principales características de la BeagleBone Black mencionadas en el System Reference Manual [1]. . . . . 25
  
- 4.1. Notación de movimiento de vehículos submarinos de acuerdo a la SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers). . . . . 34
- 4.2. Ganancias del PD. . . . . 42

# Capítulo 1

## Introducción.

El desarrollo de sistemas robóticos teleoperados ha permitido diversos medios para llevar a cabo tareas en ambientes inhóspitos. Por ejemplo, en los ambientes subacuáticos sería casi imposible trabajar si no fuera por los avances tecnológicos en vehículos submarinos remotamente operados (ROV). No obstante, muchas veces, la intervención del operador humano es imprescindible, especialmente en entornos no estructurados y dinámicos en los cuales los problemas de percepción y planificación automática son muy complejos [2].

En muchos casos, el operador está físicamente separado del robot, existiendo un sistema de telecomunicaciones entre los dispositivos que utiliza directamente el operador y el sistema de control local del robot.

La intervención del operador puede realizarse de diferentes formas, desde la teleoperación directa de los actuadores de las articulaciones, hasta la simple especificación de movimientos, o incluso de tareas, que se realizan de manera automática en el entorno remoto.

La interacción entre el ambiente y el robot esclavo debe ser tomada en cuenta con el propósito de reflejar esta interacción correctamente hacia el operador humano. A través de información visual y auditiva el operador puede tener idea precisa de lo que sucede en el lugar remoto y, por ende, realizar la tarea. Sin embargo, reflejar la fuerza de contacto del robot esclavo con el ambiente hacia el operador es mucho más útil, ya que propicia el

acoplamiento cinestésico del operador con dicho ambiente e incrementa la sensación de telepresencia [3] [4]. De esta manera, para realizar la tarea, la fuerza de contacto entre el robot esclavo y el ambiente debe ser reflejada (enviada) al operador. En este caso se dice que el sistema de teleoperación está bilateralmente controlado. En la Figura 1.1 se muestra que cuando el robot maestro es manipulado se generan los comandos de posición, velocidad y fuerza que son enviados a través del canal de comunicación hacia la estación remota a fin de que sean reproducidos por el robot esclavo.

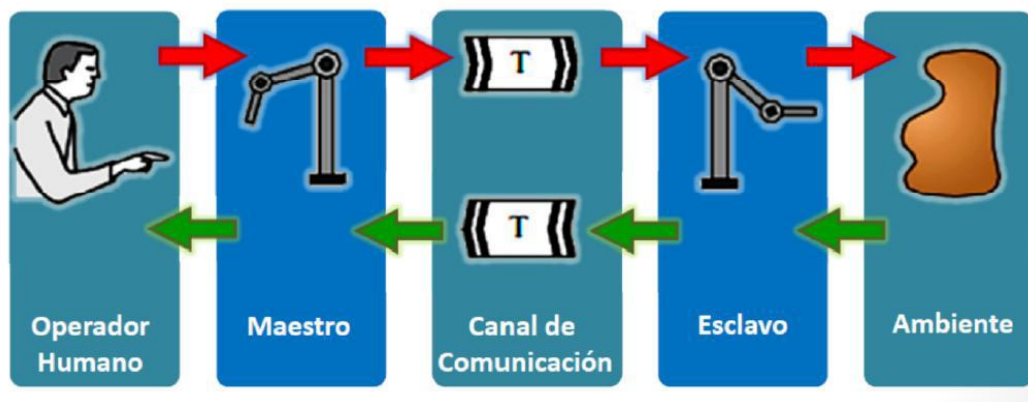


Figura 1.1: Sistema básico de teleoperación.

Básicamente, un sistema de teleoperación bilateral consta de 5 bloques: 1) Operador humano, 2) Robot maestro, 3) Medio de comunicación, 4) Robot esclavo y 5) Ambiente remoto. El Operador o teleoperador es un ser humano que realiza a distancia el control de la operación. Su acción puede ir desde un control continuo hasta una intervención intermitente, con la que únicamente se ocupa de monitorizar y de indicar objetivos y planes cada cierto tiempo. Además, es quien manipula al robot maestro para generar los comandos de posición, velocidad y fuerza que son enviados, a través del medio de comunicación, hacia el esclavo a fin de que sean ejecutados por éste. El control y el medio de comunicación son el conjunto de dispositivos que modulan, transmiten y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre la zona remota y la local. El robot esclavo es el dispositivo teleoperado que trabaja en el ambiente remoto y que está siendo controlado por el operador.

Como se mencionó, en el control bilateral existe reflexión de fuerza al operador, la forma

más habitual de realizarla es mediante la retroalimentación cinestésica en la que el sistema convierte la fuerza de contacto del esclavo en una fuerza aplicada sobre la mano del operador.

Existe un estudio [5] en el que se menciona que la reflexión de fuerza al operador permite disminuir las fuerzas de contacto y las colisiones con el ambiente, el tiempo de teleoperación y el número de errores del operador, la reflexión de esfuerzos a las articulaciones del manipulador maestro permite acoplar el operador cinestésicamente al entorno.

Sin embargo, uno de los principales problemas en el caso del control bilateral se reduce a que el esclavo debe seguir los movimientos realizados por el maestro, así como la retroalimentación cinestésica de las fuerzas del esclavo al maestro en un medio de comunicación que induce retardos que pueden llegar a desestabilizar al teleoperador en conjunto. Se han hecho muchos estudios en el caso de internet para disminuir los problemas ocasionados por dichos retardos [2], [6].

Desde los primeros desarrollos de la teleoperación, la industria nuclear ha sido el principal consumidor de sistemas de teleoperación [2], sin embargo, con el paso de los años se ha ido aplicando en otros sectores, como en el caso de vehículos submarinos, denominados R.O.V.

La utilidad de estos sistemas radica en poder acceder a ciertas zonas y profundidades donde le es imposible o peligroso a un buzo.

Para mejorar la exploración submarina estos vehículos han implementado dispositivos para obtener retroalimentación de imagen e incluso de sonido (teleoperación unilateral), pero pocos trabajos se han desarrollado en los cuales se tenga una reflexión de fuerza, (teleoperación bilateral). En la siguiente sección se mencionaran los trabajos más relevantes en esta área.

## 1.1. Antecedentes y estado del arte

El estudio de los sistemas de teleoperación bilateral data de la década de los 50's con los trabajos pioneros de Goertz [7]. Con el avance de la tecnología, en particular los sistemas de telecomunicación, las computadoras y el avance de la ciencia, en los 80's surgió un nuevo interés por los sistemas de teleoperación bilateral, los cuales plantean retos interesantes todavía por resolver.

Fue en 1954 cuando Goertz presentó el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores llamado E1.

En los años sesenta se extendieron las investigaciones hasta el campo de las aplicaciones submarinas, siendo los sistemas cada vez más sofisticados, especialmente por la inclusión de cámaras y demás dispositivos para aumentar la telepresencia del operador [2].

En las aplicaciones submarinas la mayoría de los manipuladores van sobre un vehículo submarino, denominado R.O.V. (Remote Operated Vehicle), que también es teleoperado. La utilidad de estos sistemas radica en poder acceder a ciertas zonas y profundidades donde le es imposible o peligroso a un buzo. Entre sus principales aplicaciones están: inspección, mantenimiento y construcción de instalaciones submarinas, minería submarina, e inspección de suelo marino.

En 1998, Craig P. Sayers, *et al.* [6] desarrollaron un manipulador submarino controlado de manera remota a través de enlaces de comunicación acústica. La aplicación específica es el control, por un operador humano situado en tierra, del manipulador remoto que se encuentra en un sumergible no tripulado, sin conexiones. La comunicación entre los dos es a través de una combinación de comunicación terrestre convencional y módems acústicos submarinos de control y transmisión de imágenes desde cámaras en el sitio remoto. El aporte de este proyecto es la implementación de comunicación acústica para el control de submarino, y la única retroalimentación que existe es de imágenes (teleoperación unilateral).

La mayor dificultad en la transmisión de datos acústicos es, como en el caso de la teleoperación espacial, el retardo, y el ancho de banda de la transmisión de datos que es de

apenas 10 Kbps.

En el 2000, J.Dennerlein *et al.*[8] describieron un sistema de retroalimentación vibrotáctil diseñado y probado en un sistema formado por un brazo hidráulico teleoperado, montado en un ROV. Se desarrolló como una alternativa a la retroalimentación de fuerza, para proporcionar información táctil, con el costo y la complejidad mínima. Las vibraciones se detectan con cuatro tiras de película piezoeléctrica embebidas en una capa de caucho de silicona dura colocada debajo de la superficie de la mandíbula. Una pantalla de vibración integrada se monta en el extremo de un controlador maestro modificado. El display de vibración, transmite las vibraciones detectadas en la superficie de la mandíbula al operador humano, a través de dos métodos. El primero sacudiendo una masa dentro del dispositivo que proporciona una respuesta de alta frecuencia. El segundo directamente excitando las pastillas de la yema por medio de una respuesta de baja frecuencia. El sistema fue probado bajo el agua en el Instituto de Investigación del Acuario de la Bahía de Monterrey (MBARI). Los operadores identificaron correctamente la dureza relativa de los tres bloques de diferentes materiales como madera, aluminio y cera. Por primera vez, los operadores de MBARI pudieron percibir táctilmente su entorno de aguas profundas, aunque se vieron limitadas por factores de confusión, ya que, se requieren dos pilotos para manipular el ROV. De manera simultánea, en abril del 2000, Dong-Soo Kwon, *et al.* [9], presentaron un controlador de teleoperación robusto basado en la arquitectura de posición-fuerza, en el cual, se propone un esquema de control adaptable basado en modos deslizantes para el control de seguimiento de posición de un manipulador bajo el agua. Se considera un entorno desconocido, con incertidumbres variable en el tiempo. Dong-Soo Kwon *et al.*[9], realizaron numerosas simulaciones mostrando un excelente rendimiento y seguimiento de posición, obteniendo la transparencia del sistema del manipulador bajo el agua. La medición de la fuerza se realizó con un sensor de fuerza/par, que se colocó en el efector final del manipulador.

En el 2001, Jee-Hwan Ryu *et al.* [10] consideraron un manipulador de dos eslabones montado en un ROV, donde el ROV se modela con 3 grados de libertad en el plano vertical



de movimiento. Con el modelo del sistema robótico bajo el agua, se realizaron simulaciones numéricas, para demostrar la mejora en la maniobrabilidad del controlador propuesto. En este documento, un observador de perturbación se aplica para estimar las fuerzas de interacción entre el ROV y el manipulador sin uso de sensores de F/T, y la eficacia del observador de perturbación se investiga para mejorar la maniobrabilidad de los manipuladores submarinos montados en el ROV.

En el 2009, Robert Mahony *et al.* [11] propusieron el uso de flujo óptico de un robot en movimiento para proporcionar reflexión de fuerza a las manos del operador, con el fin de obtener una teleoperación libre de colisiones. El flujo óptico se mide por las cámaras de gran ángulo, a bordo del vehículo y se utiliza para generar una fuerza ambiental virtual, que se refleja al usuario a través de la palanca de mando. El acoplamiento entre el flujo óptico (velocidad) y la fuerza se modela como una impedancia, en este caso una impedancia óptica. Este control evita que el vehículo colisione con el medio ambiente y proporciona al operador una sensación natural del medio ambiente a distancia. El documento se centra en las aplicaciones a vehículos de robótica aérea, sin embargo, las ideas se aplican directamente a vehículos sumergibles y vehículos espaciales, y los autores creen que el enfoque tiene potencial para el control de vehículos terrestres e incluso teleoperación de manipuladores. Los resultados experimentales se proporcionan para un robot aéreo simulado en un entorno virtual controlado por una palanca de mando háptica.

Una aplicación comercial de los sistemas manipuladores con aplicaciones submarinas, son las desarrolladas por la compañía Kraft, que cuenta con más de 25 años en el ramo. Hoy en día, los brazos manipuladores Kraft se utilizan en el fondo de los océanos en apoyo de la industria del petróleo y gas en alta mar, así como es las principales organizaciones de ciencias oceánicas del mundo.

La amplia aplicación de sistemas manipuladores Kraft dentro de la comunidad de las ciencias del océano, ha llevado a su uso en numerosas expediciones científicas. La tecnología de control de la fuerza de respuesta ha mejorado en gran medida el proceso de utilización de un brazo manipulador remoto para recuperar los tesoros arqueológicos, y para recoger

muestras de delicada vida marina de las profundidades de los océanos. Los brazos manipuladores Kraft con retroalimentación de fuerza, han sido utilizados en apoyo de una serie de grandes expediciones oceanográficas de todo el mundo, incluyendo la conocida expedición RMS Titanic de Bob Ballard en el 2004 [12].

Algunas implementaciones del manipulador con retroalimentación de fuerza de la empresa Kraft son:

- El ROV “Jason” de Woods Hole Oceanographic realiza exploraciones en profundidades de hasta 6500 metros. Además, es capaz de recoger muestras de rocas, sedimentos y realizar una variedad de otras tareas en el fondo marino.
- El Instituto para la exploración (IFE) en su vehículo teledirigido "Hércules", utiliza su manipulador con retroalimentación de fuerza Predator [12] durante experimentos científicos en el fondo del mar. Hércules, con su brazo Predator (ver Figura 1.2), es capaz de realizar una amplia variedad de tareas bajo el agua, y se utiliza para el trabajo científico, la arqueología del océano profundo, y la excavación de antiguas ruinas de las naves.



Figura 1.2: Predator.

Una aplicación similar, es la desarrollada bajo contrato del Woods Hole Oceanographic Institute (WHOI), en colaboración con el proyecto Jason (Figura 1.3), Novint [13] realizó un proyecto que integra la interacción háptica en los sistemas de exploración submarina (es decir, vehículos subacuáticos). Como parte de sus expediciones, los investigadores utilizan submarinos tripulados y vehículos dirigidos por control remoto con sensores de sonido y de imágenes de vídeo. Novint incorporó manipuladores con detección de fuerza en vehículos submarinos con el fin de ayudar en la excavación arqueológica de restos submarinos. Además, Novint desarrollo un entorno virtual táctil para el ensayo de la misión. En este entorno virtual, el usuario es capaz de controlar el movimiento de un modelo de vehículo operado a distancia bajo el agua, así como el control de los manipuladores (es decir, los brazos de robot) con el fin de interactuar con la simulación de objetos arqueológicos. De

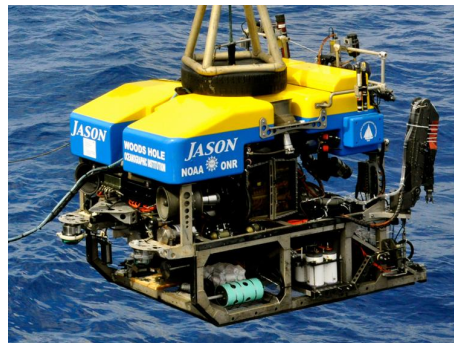


Figura 1.3: ROV Jason.

manera más reciente, como parte del Programa KAUST Global Collaborative Research, el Red Sea Robotics Research Exploratorium [14] fue creado en abril de 2012 por la Universidad de Stanford en colaboración con Meka Robotics (San Francisco CA.), quien proporcionó el hardware para el desarrollo de los brazos robóticos sumergibles en agua.

El Red Sea Robotics Exploratorium se diseñó con el fin de ayudar a los biólogos marinos a explorar, de manera segura, entornos subacuáticos en situaciones precarias y que antes eran inaccesibles en el Mar Rojo.

El vehículo explorará de manera visual el mar, tomará muestras, realizará tareas de manipulación con dedos flexibles y llevará a cabo diversas mediciones físicas en varios

ecosistemas marinos.

El robot estará formado de dos brazos ligeros controladores de fuerza (Figura 1.4), que serán operados de forma remota mediante una interfaz háptica Omega 6 (Figura 1.5), que retroalimentará fuerza al operador, mientras que la postura de la carrocería del vehículo se controlará de forma autónoma.

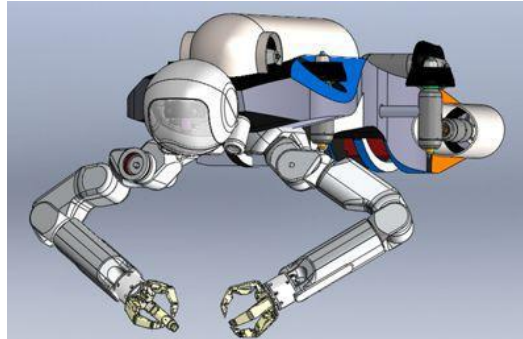


Figura 1.4: Brazos manipuladores.



Figura 1.5: Interfaz háptica Omega 6.

En los últimos años se ha presentado un gran avance en el desarrollo de la teleoperación bilateral en aplicaciones submarinas, usando principalmente sensores para la medición de fuerza. En este trabajo de tesis se propone un esquema de teleoperación bilateral con

aplicación submarina, implementando un sensor de fuerza para la medición de la fuerza provocada durante las colisiones frontales y contactos sostenidos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Sintetizar y validar experimentalmente una plataforma de teleoperación bilateral, en donde el esclavo es un robot submarino, debe ser instrumentado de tal manera que, su arquitectura electrónica pueda ser modificada en cualquier momento, además de la integración de una celda de carga para la medición de fuerza con el fin de detectar en una interfaz háptica contactos sostenidos y colisiones frontales del robot submarino con el ambiente.

## **1.3. Hipótesis**

Teniendo en cuenta los efectos hidrodinámicos inherentes a todo vehículo subacuático, es posible sintetizar un esquema de teleoperación bilateral para robots submarinos a partir de esquemas existentes para robots manipuladores, donde la fuerza es obtenida por medio de una celda de carga, cuyo desempeño sea suficiente para recrear en el operador humano la sensación de telepresencia.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar una plataforma de teleoperación bilateral como la mostrada en la Figura 1.6 en la que se integrara una celda de carga para tener la capacidad de ejercer una fuerza controlada sobre el ambiente y percibir colisiones.

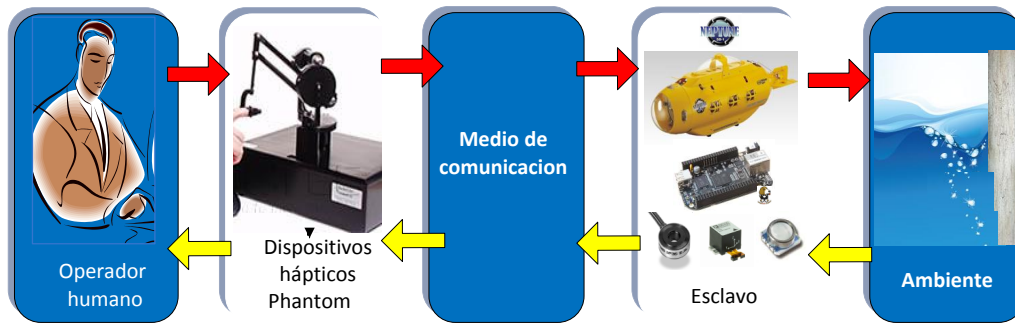


Figura 1.6: Sistema de teleoperación bilateral a desarrollar.

### 1.4.2. Objetivos particulares

- Instrumentar el submarino, implementando un sensor de presión, para la medición de la profundidad del submarino y de una unidad de medición inercia (IMU) con el fin de medir el ángulo roll del submarino.
- Implementar una celda de carga para la medición de fuerza de contacto.
- Integrar la plataforma de teleoperación bilateral entre la interfaz háptica Phantom Premium 1.0A y el submarino Neptune SB-1.
- Validar experimentalmente el sistema de teleoperación bilateral propuesto.

## 1.5. Justificación

- De acuerdo al estado del arte, poco trabajo se ha documentado acerca de la reflexión la fuerza de contacto del ROV hacia el operador humano, lo que presenta una área de oportunidad.
- Reflejar la fuerza de contacto tiene beneficios notables como evitar el daño del vehículo o de la herramienta, ya que si tenemos una idea mas clara de la magnitud de las fuerzas de contacto del submarino, entonces podemos llevar acabo tareas con mayor cuidado.
- Se ha demostrado que realizar una tarea en la cual se tiene reflexión de fuerza, reduce el tiempo en el cual se realiza.

## 1.6. Alcances y limitaciones

Dentro de los alcances y limitaciones de este proyecto se encuentran:

- El esquema de teleoperación bilateral propuesto se hará únicamente para el caso del submarino Neptune SB-1.
- No se considera retardo en el tiempo inducido por el canal de comunicación.

## 1.7. Contribuciones de la tesis

En la literatura existen muchos trabajos sobre teleoperación bilateral en manipuladores, pero pocos trabajos con aplicación en robot submarinos, por lo que la contribución principal de este trabajo es el desarrollo de un sistema de teleoperación bilateral con aplicaciones submarinas. Esto se logró mediante la integración de un sensor de fuerza a un vehículo submarino con el fin de obtener la fuerza de contacto sostenido y colisiones frontales y enviarlas a una interfaz háptica. A través de esta interfaz el operador es capaz de manipular al submarino y percibir fuerzas de contacto.

Además, se obtuvo un robot submarino instrumentado de arquitectura abierta, en el cual se puede programar diferentes leyes de control avanzadas.

## 1.8. Organización de la tesis

El documento se organiza de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se describe el funcionamiento y las características del submarino Neptune SB-1, además se presentan los componentes electrónicos utilizados para la integración de la arquitectura propuesta.

En el capítulo 3 se menciona el sistema de teleoperación bilateral y se describen las características del robot maestro (interfaces hápticas Phantom Premium 1.0A), el robot esclavo (submarino Neptune SB-1) y el canal de comunicación.

En este capítulo 4 se describe la implementación de un control PD en el submarino Neptune SB-1, además se muestra el proceso identificación del sistema utilizando datos experimentales para posteriormente calcular la función de transferencia mediante la ayuda del software MATLAB con el uso de la librería «Ident».

En el capítulo 5 se presenta el sistema experimental y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 6 se muestran las conclusiones de lo realizado, observaciones, trabajo a futuro y líneas de investigación que se desarrollan con la culminación de la tesis.



# Capítulo 2

## Arquitectura electrónica

### 2.1. Introducción

En esta sección se describe la apertura de la arquitectura electrónica del submarino de radio control comercial Neptumne SB-1, así como la instrumentación con el sensor de presión, el sistema de navegación inercial, el sensor de fuerza y el sensor de humedad y la adquisición y manipulación de los datos de estos sensores mediante la computadora *BeagleBone<sup>TM</sup>* para el control del propulsor, del timón y de los propulsores laterales.

### 2.2. Descripción del submarino Neptumne SB-1

En este trabajo se considera un sistema de radio control comercial, el cual será modificado mediante ingeniería inversa. El sistema original de radio control mostrado en la Figura 2.1 es sustituido por un sistema de teleoperación bilateral. El dispositivo utilizado es el submarino Neptune SB-1, de la compañía *ThunderTiger<sup>MR</sup>*, el cual está formado por un sistema de radio control que trabaja a una frecuencia de 75 MHz, con el cual se controlan los movimientos de ascenso/descenso, adelante/atrás, giro derecha/izquierda, nariz arriba/abajo[15].

En la Figura 2.2 se muestra de manera más específica las partes principales del submarino



Figura 2.1: Sistema hombre/ radio control.

Neptune SB-1. Basado en el principio de Arquímedes, que establece que los cuerpos sumergidos en un fluido son impulsados por una fuerza igual al peso del líquido desplazado, el submarino está equipado con una bomba de rodillos con un lastre como tanque en el interior, la bomba extrae o drena el agua del lastre para cambiar el peso del submarino, con lo que cambia la flotabilidad del mismo. Esta sección del submarino es llamada sistema de bomba con tanque tipo lastre y se muestra en el bloque 1 de la Figura 2.2. También se cuenta con un sistema de propulsión (bloque 3) regulado por un controlador de velocidad (bloque 2), este sistema controla el movimiento adelante/atrás. Cuenta con un sistema para la operación de la bomba y el propulsor (bloque 5) para los dos servomotores que controlan el movimiento a derecha e izquierda alimentando el sistema con una batería de plomo sellada de 12 volts (bloque 4).

Dentro de las limitaciones que presenta este sistema tenemos que la electrónica de potencia del motor de corriente directa que controla el lastre, funciona como un controlador de encendido/apagado, lo que limita la resolución y la precisión del sistema si queremos alcanzar una profundidad específica. Otra de las limitantes es que el operador desconoce la profundidad a la cual se encuentra el submarino y que si éste llegase a tener una colisión frontal el operador no lo podría percibir. Además, su arquitectura electrónica es cerrada, por lo que no es posible realizar modificaciones o controlar los actuadores para llevar a cabo operaciones que no están habilitadas actualmente por el fabricante, siendo esta una de las principales desventajas.

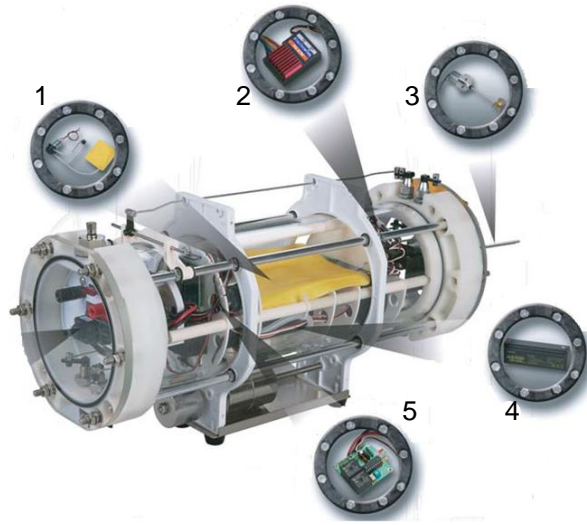


Figura 2.2: Principales sistemas del submarino Neptune SB-1.

Considerando estas limitaciones se desarrolló una nueva arquitectura electrónica (Figura 2.3), la cual consiste en tres subsistemas: la instrumentación, los elementos finales de control (actuadores) y el subsistema de adquisición y procesamiento de señales. Esos subsistemas son descritos en la siguiente sección.

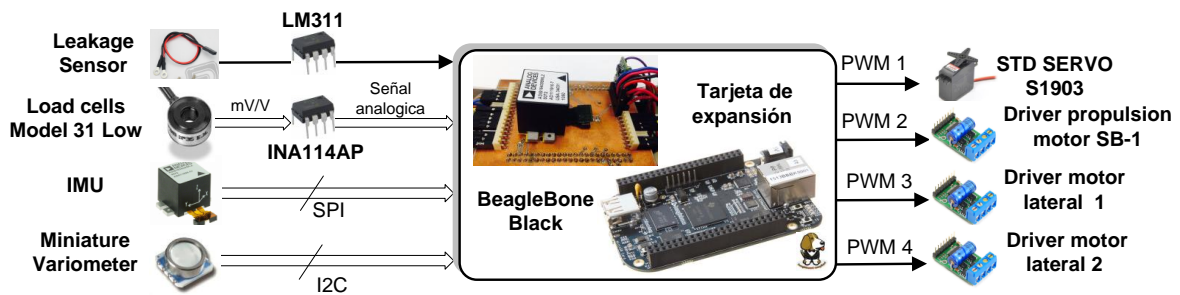


Figura 2.3: Diagrama general de arquitectura electrónica.

## 2.3. Instrumentación

El subsistema de instrumentación está integrado por: el sensor de humedad, el sensor de presión, el sensor de fuerza y la unidad de medición inercial (IMU). A continuación se describen las características principales de cada uno de los sensores.

### 2.3.1. Sensor de humedad

El sensor de humedad está formado por una resistencia, la cual se fija en la parte interior del vehículo. Cuando esta resistencia entra en contacto con el agua cierra un circuito, con el cual se activa la alarma de humedad y se desactiva el sistema de propulsión lateral con el fin de que el submarino emerja.

### 2.3.2. Sensor de fuerza

El sensor de fuerza utilizado es una celda de carga de precisión de bajo rango que mide tensión y fuerzas de carga de compresión de 50 a 500 gramos. Esta construida de acero inoxidable, diseñado para eliminar o reducir al mínimo los efectos de las cargas fuera de eje. Se utiliza el modelo 31 de la marca *Honeywell*<sup>MR</sup> (Figura 2.4) ya que nos asegura una excelente estabilidad a largo plazo para los rangos de 1 gramo, y principalmente que es para aplicaciones submarinas. Además, es un sensor de alta precisión de 0.15 % a 0.25 % en la escala completa.

El factor de calibración de este sensor es de 21.8648 mV/V. Dado que este sensor nos

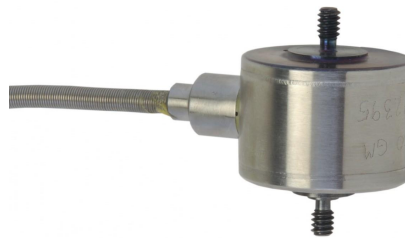


Figura 2.4: Sensor de fuerza modelo 31.

entrega valores del rango de mili volts, esta medición es enviada a un amplificador de instrumentación (INA114AP) , para elevarla en un rango de 0 a 1.8 volts y poder ser adquirida en la entrada analógica de la *BeagleBoneBlack*<sup>MR</sup> , donde es convertida a Newtons. En la Tabla 2.1 se muestran las especificaciones eléctricas, mecánicas y de rendimiento del sensor de fuerza modelo 31.

Característica	Medida
Rango de carga	50 -500 g
Linealidad	$\pm 0.15$ % escala completa
Histeresis	$\pm 0.15$ % escala completa
No repetibilidad	$\pm 0.1$ % escala completa
Tolerancia en salida de 50 g a 150 g	0.1 mV/V max.
Operación	Tensión/Compresión
Resolución	Infinita
Tipo de galga extensiométrica	Semiconductor
Excitación (calibración)	5 Vcd
Máxima carga permisible	5 lb
Frecuencia natural	740 Hz

Tabla 2.1: Especificaciones del sensor de fuerza.

### 2.3.3. Unidad de medición inercial

La unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Unit) es un dispositivo electrónico que integra sensores como el acelerómetro y el giroscopio. Algunas IMUs cuentan con magnetómetro.

De forma general, los giroscopios son dispositivos que miden velocidad angular, que es proporcional al torque aplicado en el eje pertinente. Por su parte, los acelerómetros son dispositivos que se encargan de medir cierta fuerza gravitacional, teniendo como resultado el cálculo de aceleraciones en el eje concerniente y obteniendo la velocidad lineal y posteriormente la posición mediante la integración y doble integración, respectivamente [16].

Debido a que las señales de los giroscopios y acelerómetros tienen grandes fluctuaciones, se

vuelve indispensable el filtrado de estas señales. El Filtro de Kalman puede disminuir de manera importante el ruido de una señal siempre y cuando el proceso se pueda describir como un sistema lineal. Además de reducir el ruido de las señales, este filtro es una fuerte herramienta que puede estimar variables en un amplio rango del proceso. De acuerdo a Greg Welch en [17] , el filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones con las cuales se puede implementar un estimador cuando alguna de las condiciones o mediciones es conocida, minimizando el error cuadrático. El filtro puede llegar hacer estimaciones en tiempo pasado o futuro, siendo esta una de las razones por la que es ampliamente utilizado. La unidad de medición inercial utilizada en este proyecto es una ADIS16400 de la marca Analog Devices. En la Figura 2.5 se muestra un diagrama esquemático de la IMU y en la Figura 2.6 se muestra una imagen de la IMU ADIS16400. En la Tabla 2.2 se mencionan las

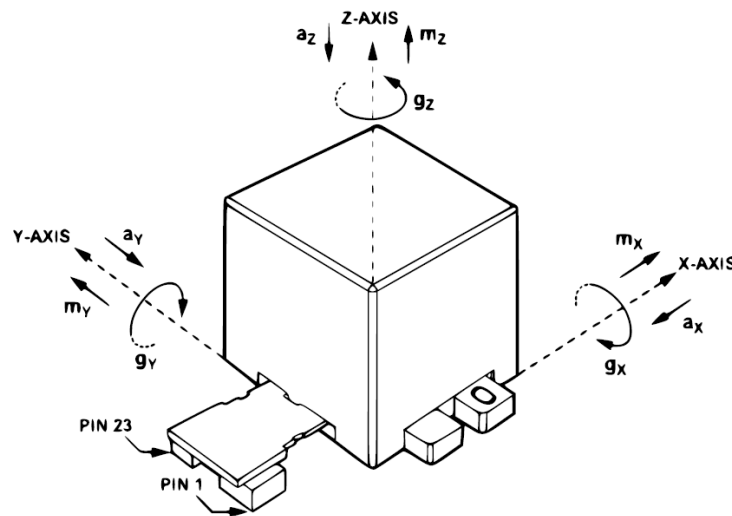


Figura 2.5: Esquema general de una Unidad de Medición Inercial de la marca Analog Devices.

características principales de la IMU ADIS16400.



Figura 2.6: Unidad de Medición Inercial ADIS16400.

Característica	Medida
Acelerómetro triaxial digital	$\pm 18$ g
Magnetómetro triaxial digital	$\pm 2.5$ gauss
Tiempo de inicio	220 ms
Interfaz compatibles	SPI
Frecuencia de activación la entrada de reloj de muestra externa	1,2 kHz
Voltaje de operación	4.75 V a 5.24 V

Tabla 2.2: Características IMU.

#### 2.3.4. Sensor de presión

El sensor de presión MS5803-14BA (Figura 2.7), es un sensor con una resolución de 2 pascales (Pa), que utiliza una interfaz I2C. Está optimizado para medición de profundidad con una resolución de 1 cm o menos. Proporciona una precisión de 24 bits digitales, valores precisos de temperatura y diferentes modos de funcionamiento que permiten al usuario optimizar la velocidad de conversión y el consumo actual. El principio de detección empleado conduce a muy baja histéresis y alta estabilidad de de la medición de presión y la señal de temperatura. Los principales motivos por los que se selecciono este sensor es su rápida respuesta de conversión, que está por debajo de 1 mili segundo y a que tiene

aplicaciones submarinas, operando en rangos de hasta 1400 pascales. En la Tabla 2.3 se muestran los datos técnicos de este sensor.

Presión	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Rango	0		14	bar
ADC	24			bit
Resolución (1)	1 / 0.6 / 0.4 / 0.3 / 0.2			mbar
Exactitud	-20		+20	mbar
Tiempo de respuesta	0.5 / 1.1 / 2.1 / 4.1 / 8.22			ms

Nota: (1) Relación de sobremuestreo: 256/512/1024/2048/4096

Tabla 2.3: Datos técnicos del sensor de presión.



Figura 2.7: Sensor de presión MS5803-14BA.

Después de obtener el valor de la presión hidrostática se aplica la formula 2.1 para determinar la profundidad a la que se encuentra el submarino, entendiendo por profundidad a la distancia (en metros) que hay de la superficie al sensor colocado en el submarino.

$$h = \frac{P - P_0}{\rho g} \quad (2.1)$$

Donde:

- h=altura(m)



- $P$  = Presión Hidrostática (Pa)
- $P_0$  = Presión atmosférica (Pa)
- $\rho$  = Densidad del agua ( $kg/m^3$ )
- $g$  = Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )

Se considera una aceleración gravitacional de  $9.81 m/s^2$ , la densidad del agua de  $1000 kg/m^3$ , la presión atmosférica se adquiere del sensor de presión y esta alrededor de 810 Pa, y el valor de presión hidrostática se mide a través del sensor de presión.

## 2.4. Elementos finales de control (actuadores)

Los elementos finales de control son el servomotor, y los tres motores de CD, los cuales son controlados por señales PWM proporcionadas por la *BeagleBoneBlack<sup>MR</sup>* que garantiza mayor precisión en las señal ( Figura 2.3).

### 2.4.1. Servomotor

El servomotor que controla el timón ubicado en la parte posterior del submarino, se muestra en la Figura 2.8. El timón proporciona al submarino el poder de desplazarse a la derecha y a la izquierda.

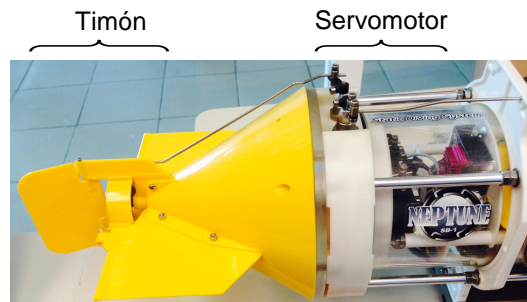


Figura 2.8: Servomotor/timón.

## 2.4.2. Propulsores

### *Propulsores laterales*

Para el control de profundidad el sistema de bomba con tanque tipo lastre descrito en la sección 2.2 es sustituido por un sistema de propulsión, ya que el sistema original tenía un tiempo de respuesta grande. Este nuevo sistema está formado por dos motores de CD (Figura 2.9), los cuales originalmente funcionaban como bombas de gasolina y fueron adecuados mecánicamente, mediante un conector, para colocar una aspa. Las aspas están formadas por 3 palas de latón de 40 centímetros de diámetro, se cuenta con la aspa de giro a derecha y de giro a izquierda. La velocidad y giro de los propulsores laterales es controlada por el



Figura 2.9: Motor de CD lateral.

"driver" modelo VNH5019 de la marca Pololu (Figura 2.10), cuyas características se describen en la Tabla 2.4.

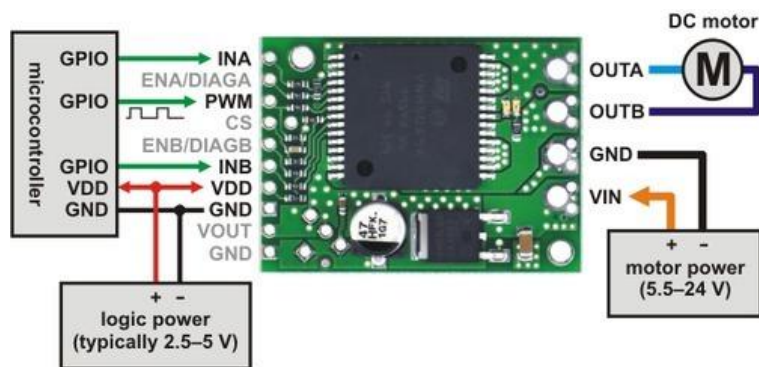


Figura 2.10: Esquema general del driver modelo VNH5019.

Característica	Medida
Voltaje de operación	5.5 – 24 V
Corriente de salida	12 A continuos (30 máximos)
Operación de PWM	hasta 20 kHz
Detección de corriente	0.14 V/A.20.00
Voltaje de alimentación lógica	2.5–5 V

Tabla 2.4: Características del "driver-VNH5019.

Para la instalación de los propulsores laterales se diseñó un soporte mecánico como se muestra en la Figura 2.11 (los diagramas mecánicos de este sistema se muestran en el apéndice C).

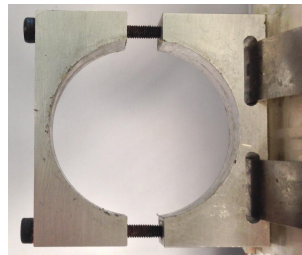


Figura 2.11: Soporte mecánico para motores laterales.

### *Propulsor posterior*

El movimiento adelante/atrás es realizado por un motor de CD con aspa, colocado en la parte trasera del submarino. Este motor está conectado al "driver" modelo VNH5019 para regular su velocidad y controlar el sentido de giro.

## 2.5. Adquisición y procesamiento de señales

La adquisición y procesamiento de señales se realiza en la *BeagleBoneBlack<sup>MR</sup>*, que es un sistema embebido, de bajo costo con las características mencionadas en la Tabla 2.5.

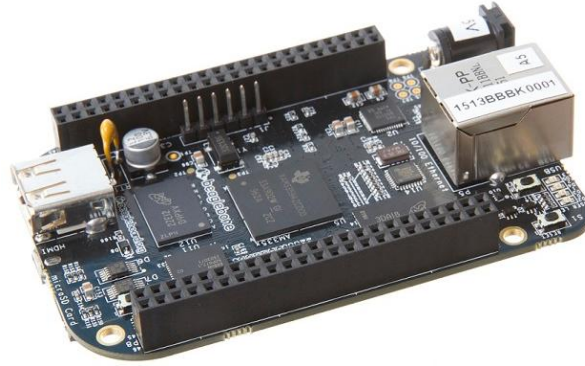


Figura 2.12: Tarjeta de desarrollo BeagleBone Black

	Característica
procesador	Sirata AM3359AZCZ100 1GHz, 2000 MIPS
Memoria SDRAM	512MB DDR3L 800MHZ
Memoria Flash	2GB, 8 bit Embedded MMC
PMIC	Reculador TPS65217C PMIC y LDo adicional
Fuente de alimentación	miniUSB, USB, Entrada DE de 5 VCD
Indicadores	4 LEDs de control de uso, 1-alimentación, 2-Ethernet
HS USB 2.0 Client Port	Acceso a USB0, Client mode via miniUSB
HS USB 2.0 Host Port	Acceso a USB1, Type A Socket, 500mA LS/FS/HS
SD/MMC	Conector microSD , 3.3V
Entrada de usuario	Botón Reset, Boot y Power.
Conectores de expansión	Salidas de 5V, 3.3V , VDD-ADC(1.8V), 3.3V En todas las señales digitales, McASP0, SPI1, I2C, GPIO(69 max),LCD, GPMC, MMC1, MMC2, 7 AIN(1.8V MAX), 4 Timers, 4 Puertos serial, CAN0, EHRPWM(0,2),XDMA Interrupt

Tabla 2.5: Principales características de la BeagleBone Black mencionadas en el System Reference Manual [1].

La selección de esta computadora fue en gran parte a la diversidad de puertos que maneja, ya que a ella llegan todas las señales de los sensores.

El sensor de humedad está formado por una resistencia, por lo que genera una señal analógica que varía al estar en contacto con agua. Este sensor se conecta a la entrada de un circuito comparador, diseñado usando el amplificador operacional LM311, para obtener una señal digital que es adquirida y procesada por la *BeagleBoneBlack*<sup>MR</sup>.

El sensor de fuerza proporciona una señal analógica que es enviada a un amplificador de instrumento cuya salida es de 0 a 1.8 volts, que es el límite de voltaje permitido en la entrada analógica.

El sensor de presión transmite la señal por medio del protocolo de comunicación I2C y la unidad de medición inercial (IMU) transfiere los datos por medio del protocolo SPI . Estas señales son procesadas en un programa que se realizó en lenguaje de alto nivel C, donde, además de manejar los datos recibidos, el programa genera las señales para activar las salidas y PWM de los actuadores.

## 2.6. Tarjeta de expansión

Una de las ventajas de utilizar una placa de desarrollo como la *BeagleBoneBlack*<sup>MR</sup> es que se le puede adecuar una tarjeta de expansión, con el fin de agregar conectores.

La Figura 2.13 muestra la tarjeta de expansión que se coloca sobre la *BeagleBoneBlack*<sup>MR</sup> con la IMU, reguladores de voltaje y conectores para los sensores y actuadores. Además, se

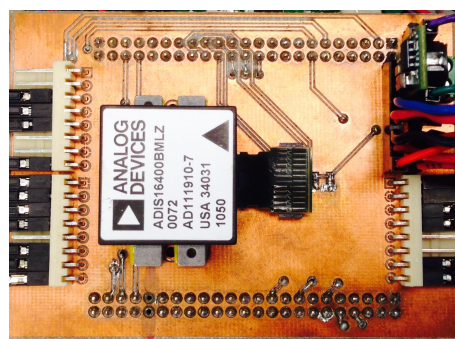


Figura 2.13: Tarjeta de expansión principal.

diseño una tarjeta de expansión para el acondicionamiento de la señal del sensor de fuerza. En la Figura 2.14 se muestra la imagen y en la Figura 2.15 se muestra el diagrama a bloques de la tarjeta. Los esquemáticos de las tarjetas de expansión se encuentran en el Apéndice B.

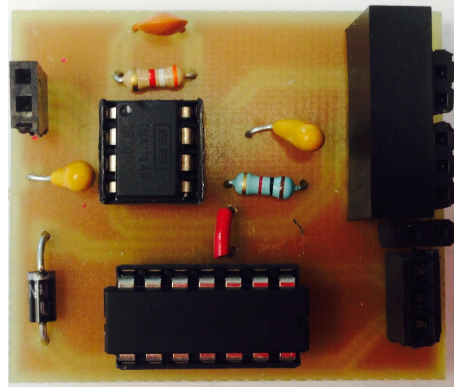


Figura 2.14: Imagen de tarjeta de expansión para sensor de fuerza.

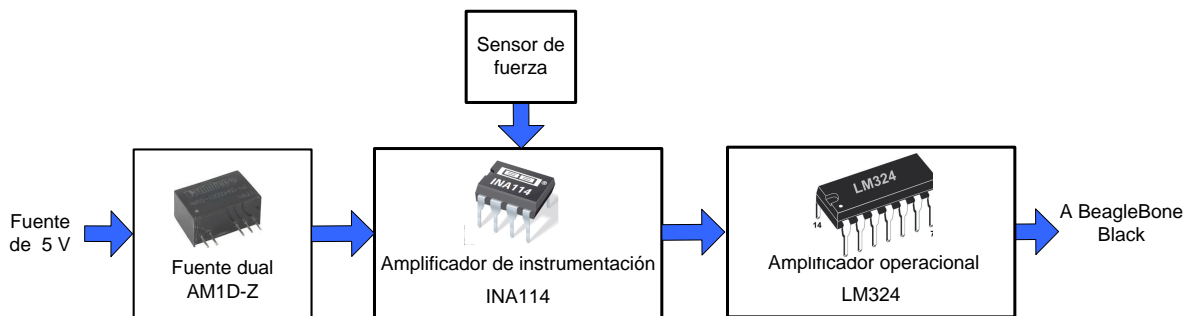


Figura 2.15: Diagrama a bloques de tarjeta de expansión para sensor de fuerza.

## 2.7. Comentarios

Es importante mencionar que de la arquitectura electrónica original del submarino Neptune SB-1 solo se conservó el motor de C.D. que funciona como propulsor trasero y el servomotor que direcciona el timón, todo lo demás fue retirado y remplazado por la nueva arquitectura descrita en este capítulo.

Al agregar nuevos componentes se incrementó el peso del submarino. Para compensar esto se retiraron unas piezas de metal que funcionaban como pesos extra, los cuales estaban colocados

en la parte de abajo del submarino. Esto con el fin de no modificar su centro de flotabilidad. La Figura 2.16 muestra una vista superior del el submarino con todos los sensores y actuadores integrados, después de las modificaciones descritas en este capítulo.

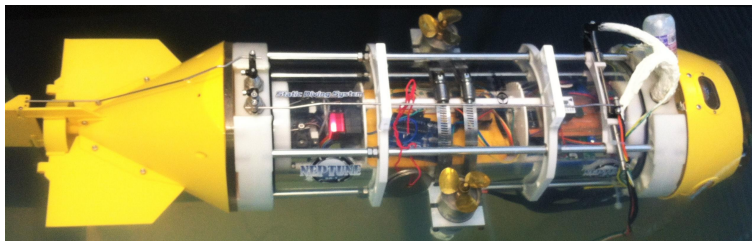


Figura 2.16: Vista superior submarino Neptune SB-1.

# Capítulo 3

## Sistema de teleoperación bilateral

### 3.1. Introducción

En este capítulo se describen las partes principales del sistema de teleoperación bilateral: robot maestro, robot esclavo y canal de comunicación. Como robot maestro se utilizó el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0A y como robot esclavo el submarino Neptune SB-1. En la Figura 3.1 se muestra el sistema maestro/esclavo para la manipulación del submarino. Donde  $\dot{x}_s$  y  $\dot{x}_m$  representan la velocidad del esclavo y la velocidad del maestro, respectivamente.  $z_s$  y  $z_m$  representan el desplazamiento en el eje z y  $\psi_s$  y  $\psi_m$  representan el movimiento de guiñado (yaw).  $f_m$  denota la fuerza que el operador aplica al robot maestro y  $f_s$  la fuerza percibida por el robot esclavo.

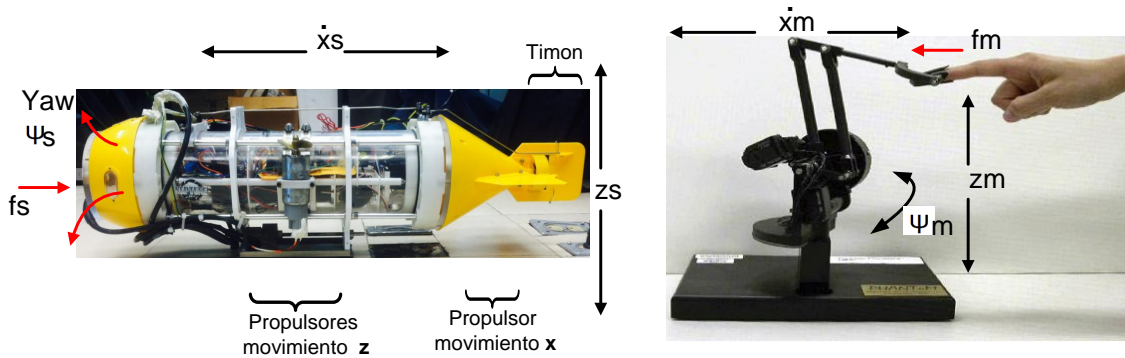


Figura 3.1: Sistema de teleoperación bilateral.



## 3.2. Robot maestro

El robot maestro es el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 de tres grados de libertad. Este dispositivo tiene una alta fidelidad en la retroalimentación de fuerza, proporcionando una mayor sensación de realidad 3D para cualquier aplicación.

Phantom Premium 1.0 adquiere los datos de posición en  $\psi_m$  y  $z_m$  del operador humano y los envía al submarino para controlar guiñada (yaw) y profundidad, respectivamente. Además, adquiere la posición en el eje x que es convertida en comando de velocidad y enviados al submarino para controlar el movimiento de adelante /atrás.

En la posición “home” del dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 envía una velocidad de cero (PWM=0), conforme el dispositivo háptico se desplaza hacia al frente la velocidad aumenta (PWM aumenta). Para cambiar el sentido de giro de los motores y desplazarse hacia atrás es necesario regresar a "home" desplazar el dispositivo háptico hacia atrás.

Adicionalmente, Phantom nos permite recrear la fuerza de contacto ( $f_s$ ) del robot esclavo. El operador humano percibe a través de la interfaz háptica, la fuerza de contacto del esclavo. Entonces, el humano percibe y el esclavo ejerce fuerza de contacto.

## 3.3. Canal de comunicación

La comunicación entre el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 y la PC es por medio de puerto paralelo. El programa de adquisición y manipulación de datos en la PC se realiza en Visual Studio 2010. Para el intercambio de datos entre la PC y la *BeagleBoneBlack*<sup>MR</sup>, la cual está localizada dentro del submarino, se implementa el protocolo de comunicación serial UART. Esto se muestra de manera gráfica en la figura 3.2.

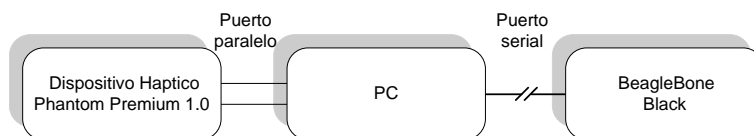


Figura 3.2: Canal de comunicación.

### 3.4. Robot esclavo

La arquitectura electrónica del robot esclavo, el submarino Neptune SB-1 fue descrita en el capítulo 2, por lo que en esta sección se describe físicamente la ubicación de los componentes. Se cuenta con 4 actuadores, dos motores de CD colocados en los laterales del submarino, un motor de CD y un servomotor en la parte trasera, como se muestra en la Figura 3.3.

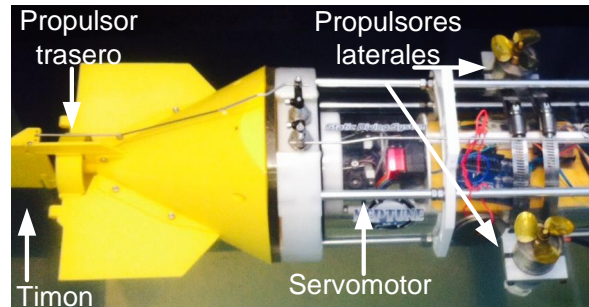


Figura 3.3: Posición de los actuadores.

Los sensores son colocados de manera estratégica para obtener sus mediciones de manera adecuada. El sensor de fuerza se coloca en la nariz del submarino (Figura 3.4 izquierda), ya que requerimos la medición de fuerzas frontales. El sensor de presión se coloca en la parte superior del submarino (Figura 3.4 derecha) y lejos de los motores, para que el movimiento generado por los propulsores laterales no afecte la medición. La IMU está colocada sobre la tarjeta de expansión principal.

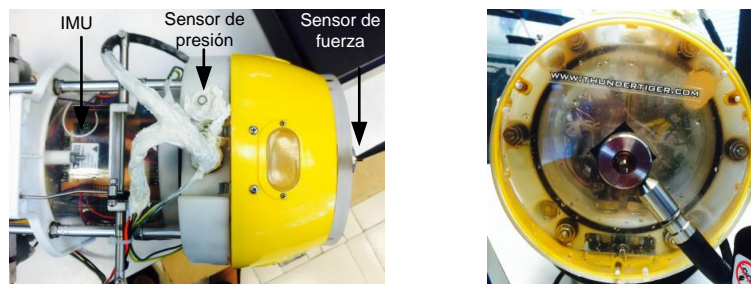


Figura 3.4: Posición de sensor de presión e IMU, figura de la izquierda. Posición sensor de fuerza, figura de la derecha.

### 3.5. Comentarios

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama general del sistema de teleoperación, en el cual se desglosa de manera más específica los sensores y actuadores del robot esclavo.

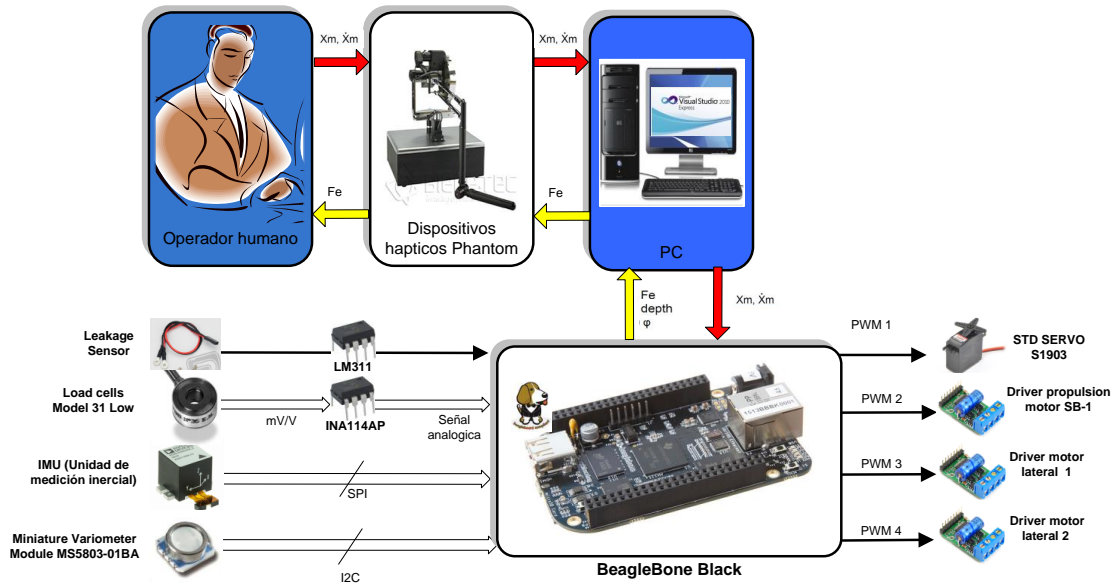


Figura 3.5: Diagrama general del sistema de teleoperación bilateral.

# Capítulo 4

## Identificación del sistema

### 4.1. Introducción

Existen diferentes tipos de sistemas a controlar de acuerdo a sus respuestas cuando se les aplica una señal de entrada. Un sistema se puede clasificar de acuerdo a sus características en sistemas lineales o no lineales, a los grados de libertad subactuados, sistemas estables o no estables y de acuerdo a la disipación de energía que estos tengan. Cuando se requiere controlar un grado de libertad de algún sistema es necesario tomar en cuenta las características anteriores ya que de acuerdo a la respuesta de un sistema se puede determinar qué técnica de control aplicar. Un robot submarino tipo ROV cuenta con seis grados de libertad relativos al marco inercial, tres de posición ( $x, y, z$ ) y 3 de orientación ( $\psi, \theta, \phi$ ). Es decir  $x, y, z$  es la posición del marco móvil respecto del marco inercial. Del mismo modo  $\psi, \theta, \phi$  es la orientación del marco móvil con respecto del marco inercial (ver Tabla 4.1). En la Figura 4.1 se puede visualizar esta notación.

Movimiento	Nombre	Marco inercial	Marco móvil	Fuerza
Traslación en x	Surge	$x$	$u$	X
Traslación en y	Sway	$y$	$v$	Y
Traslación en z	Heave	$z$	$w$	Z
Rotación en x	Roll	$\phi$	$p$	K
Rotación en y	Pitch	$\theta$	$q$	M
Rotación en z	Yaw	$\psi$	$r$	N

Tabla 4.1: Notación de movimiento de vehículos submarinos de acuerdo a la SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers).

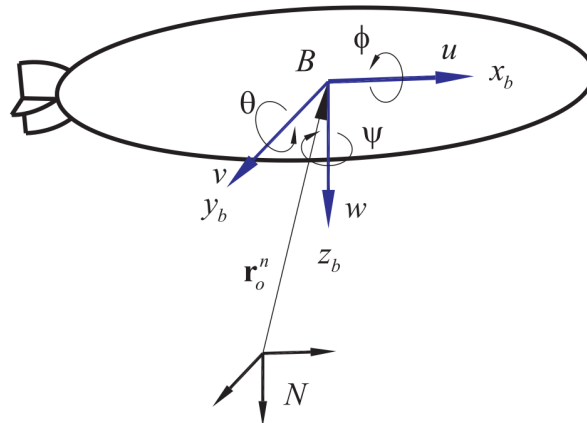


Figura 4.1: Descripción del marco inercial.

Si el submarino a controlar tiene una posición estable en algún grado de libertad, en este caso  $z$  (heave), se puede realizar el modelado para posteriormente controlar ese grado de libertad en forma lineal, con un control de tipo Proporcional Derivativo.

## 4.2. Adquisición de datos

Para poder controlar la profundidad de un vehículo submarino mediante una técnica de control lineal es necesario conocer el modelo matemático del mismo. Esto se puede realizar aplicando la técnica de identificación de sistemas llamada Identificación Experimental mediante Señales Especiales, esta técnica resulta generalmente la más directa y la que puede producir resultados a más corto plazo, solo es necesario tener datos reales de la variable a controlar, por lo que la arquitectura descrita en el capítulo 2 resulta idónea para implementar esta técnica.

Un aspecto importante para la Identificación Experimental de un vehículo submarino es su diseño mecánico, el cual, debe tender a flotar y quedar estable en la superficie. Para garantizar estas características la arquitectura del submarino utilizado está estratégicamente ubicada para mantener al vehículo en una posición estable en cuanto a los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$  se refiere. Mantener estable  $\phi$  se puede lograr de manera simple, haciendo que el centro de gravedad del vehículo se encuentre por debajo (con respecto a  $z_b$ ) del centro de flotabilidad del vehículo. Por otro lado, para lograr que  $\theta$  se mantenga estable se realizaron ajustes con pesos (lastre) a lo largo del cuerpo del submarino, hasta obtener el ángulo adecuado.

Las consideraciones anteriores son importantes ya que es preciso recordar que un submarino es un sistema acoplado, lo que quiere decir que al alterar un grado de libertad esta alteración puede llegar a afectar otros que no se encuentren actuados y por lo tanto no controlados.

Después de tener el vehículo submarino con las características mecánicas adecuadas se realizaron los experimentos, los cuales consistieron en aplicar una velocidad constante a los propulsores verticales durante cierto tiempo con una señal PWM constante (Figura 4.2 ). Con esto, el submarino se sumerge a cierta profundidad y se mantiene allí hasta que la velocidad de los motores cambia. A partir de este experimento, se obtienen los datos de profundidad con un tiempo de muestreo de 1.3038 ms. (Figura 4.3), para posteriormente generar la respuesta característica del sistema.

En el diagrama a bloques de la Figura 4.4 se muestra el proceso de adquisición y procesamiento de datos para la identificación de sistema.

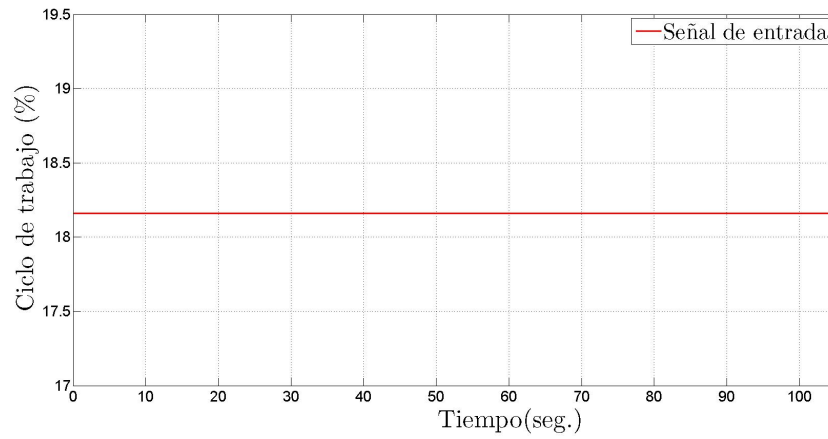


Figura 4.2: Entrada al sistema a identificar.

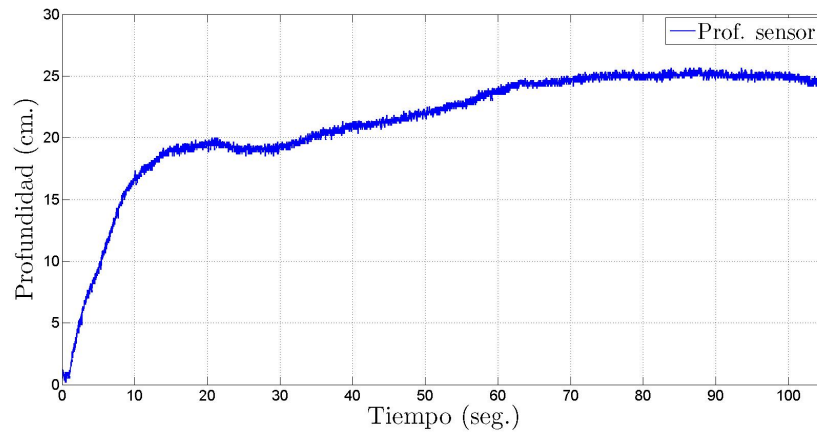


Figura 4.3: Salida del sistema a identificar.

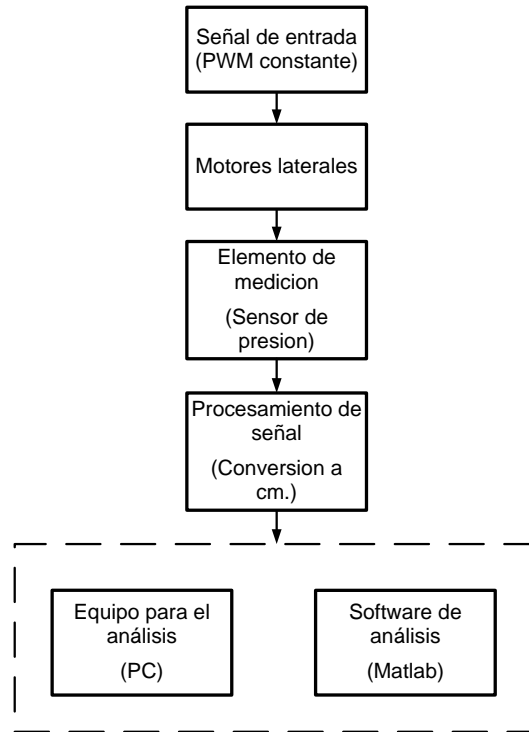


Figura 4.4: Diagrama a bloques del proceso de adquisición y procesamiento de datos.

### 4.3. Identificación del sistema

Después de obtener los datos de salida del sistema, se implementó la herramienta *Ident* incluida en la paquetería de MATLAB. Se aplica esta herramienta ya que nos permite la identificación o estimación de un modelo matemático de una planta sin necesidad de conocer los parámetros de la planta.

En la gráfica de la figura 4.3 se puede apreciar que la respuesta del sistema es similar a la respuesta al escalón unitario de un sistema del tipo  $F(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$  de primer orden; por lo que en la librería *Ident* se selecciona la opción de estimación de un proceso de primer orden. El resultado es el que muestra la Figura 4.5 con una aproximación a la señal real obtenida de 69.44 %. Esta función transferencia también puede ser representada como:

$$G(s) = \frac{1.3066}{11.373s + 1} \quad (4.1)$$



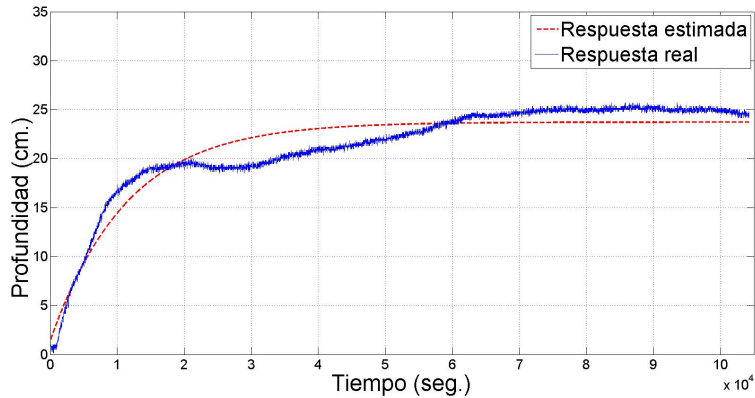


Figura 4.5: Salidas real y aproximada de la identificación del sistema.

Teniendo ahora la expresión matemática de la ecuación 4.1 se puede proceder a calcular y sintonizar el control del sistema que en este caso será un PD.

#### 4.4. Cálculo y sintonización del control PD

En algunos documentos tales como [18], [19] se habla de los sistemas de control de vehículos marinos, se recomienda el uso del controlador PD si el error de estado estacionario no es un criterio dominante, ya que en general, el componente integrador ( $I$ ) del controlador hace mas lenta la dinámica del sistema y puede llegar a desestabilizarlo, por lo que no es la mejor opción para nuestro sistema. Por otro lado, la componente derivativa ( $D$ ) acelerará el sistema y lo estabiliza. Sin embargo, cuando la influencia del controlador es muy grande, tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta. En el caso de tener como entrada una función tipo escalón, es decir, un cambio rápido desde cero hasta el valor de profundidad deseada, (incluso para pequeños valor de profundidad) el componente  $D$  va a reaccionar “demasiado” rápido a este cambio, lo que causará el efecto llamado “*derivative kick*”, donde hay un notable aumento en la respuesta del sistema [20].

La mejor opción para nuestro sistema es un controlador PD ya que nos da una respuesta satisfactoria: Un sobreimpulso relativamente grande, poco tiempo de establecimiento, así como un error despreciable de estado estacionario.

#### 4.4.1. Control PD, conceptos y discretización

Un control PD esta formado por una parte Proporcional y una Derivativa, donde la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  de la parte proporcional  $P$  tienen una relación de:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.2)$$

o dicho con otras palabras "la acción de control es proporcional a la señal de error" la función de transferencia es por consiguiente, una constante [21]:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (4.3)$$

donde  $K_p$  se denomina ganancia proporcional.

Para una mejor ilustración de lo descrito anteriormente, en la Figura 4.6 se muestra el diagrama a bloques del sistema a lazo cerrado empleado, considerando que la planta es el submarino donde se encuentra el sensor de presión. Cualquiera que sea el mecanismo real y

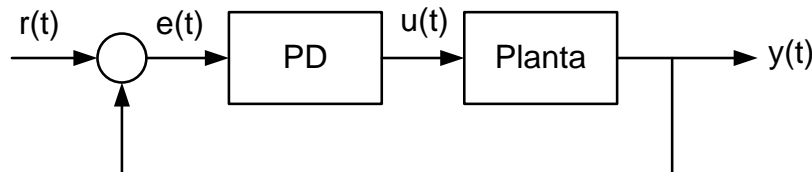


Figura 4.6: Diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado.

la forma de aplicar la potencia a los actuadores, el controlador proporcional es en esencia un amplificador de ganancia ajustable, ya que existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control.

Por otra parte la acción de control derivativa genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.4)$$

Una de las características más importantes y a la vez peligrosas de la acción derivativa es su efecto de anticipación.

En el lado positivo aparece la acción anticipativa, consistente en producir una corrección antes de que la señal de error sea excesiva. La derivada del error permite conocer la tendencia (crecimiento o decrecimiento).

En el lado negativo, supongamos que un sistema se encuentra en estado estacionario, de modo que la entrada  $r(t)$  y la salida  $y(t)$  son iguales, y que el error en un determinado instante sea cero. Si repentinamente se presenta una señal de error que varía rápidamente aunque con amplitud moderada (por ejemplo ruido), la acción derivativa actuará tan severamente como rápido sea el cambio en la señal de error, tratando de eliminar al mismo. Si la constante de acción derivativa  $K_d$  no se calcula adecuadamente, la magnitud de la señal de control será de tal amplitud que puede llevar a la saturación a alguno de los elementos integrantes del control e incluso dañarlo. Además, en la ecuación se hace evidente que si la señal de error tiene un valor constante (por tanto la derivada del error será cero), el control adoptará una actitud pasiva aún cuando el error sea diferente de cero, y en esta situación el sistema nunca alcanzaría el estado estacionario.

Por estas razones, cuando se usa, la acción derivativa siempre se acompaña por la acción de control proporcional, integral o ambas [21].

Al combinar el efecto de la acción de control proporcional con la derivativa se dice que se tiene una acción de control proporcional derivativa (PD) cuyo comportamiento está gobernado por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} = K_p \left[ e(t) + \frac{K_d}{K_p} \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p \left[ e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.5)$$

la función de transferencia del controlador será:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + sT_d) \quad (4.6)$$

donde  $T_d$  es el tiempo derivativo, habitualmente medido en minutos.

Se requiere aplicar este control a nuestro sistema; representado matemáticamente en la ecuación 4.1; de forma digital por lo que es necesario convertirlo a forma discreta, para esto

existe una forma de discretizar la derivada en la cual se aplica el concepto de discretización de la derivada del error con respecto al tiempo como:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T_m} \quad (4.7)$$

donde  $e_k$ ,  $e_{k-1}$  son los errores actuales y del tiempo anterior del sistema con respecto a la frecuencia, respectivamente, y  $T_m$  es el tiempo de muestreo.

Con lo anterior se obtiene la ecuación 4.4, que representa el PD discreto.

$$u(k) = K_p \left[ e_k + \frac{T_d}{T_m} (e_k - e_{k-1}) \right] \quad (4.8)$$

#### 4.4.2. Sintonización del Controlador

De acuerdo a la aproximación de la figura 4.5, es posible obtener los parámetros para el controlador expresado en la ecuación 4.8; esto se realiza de forma heurística como se describe a continuación.

Se requiere saber los valores de  $K_p$  y  $T_d$  para nuestro controlador ya que los demás parámetros ( $e_k$ ,  $e_{k-1}$ ) se pueden conocer; entonces siguiendo la sintonización de Ziegler y Nichols sabemos que estos valores se obtienen con la ecuación 4.9

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad (4.9)$$

El valor de L y de T se calcula con las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$\begin{aligned} T &= 1.5(t_6 - t_2) \\ L &= t_6 - T \end{aligned} \quad (4.10)$$

donde  $t_6$  y  $t_2$  son los valores de tiempo al 68.2% y 28.3% de la curva de respuesta del sistema. En base a los valores anteriores y la ecuación 4.1 se obtiene el valor de  $K_p$  para el controlador del sistema que es de:  $K_p = 11.373$ .

Para determinar el valor de  $T_d$  es necesario tomar en cuenta que la sintonización de un controlador PD es laborioso, sin embargo el procedimiento más simple para ajustar este parámetro es ponerlo en cero y revisar la respuesta del sistema (en simulación o físicamente).

Con  $T_d$  igual a cero  $K_p$  originara una señal de salida con oscilación cercana a la señal de referencia (*setpoint*). A continuación se realiza un ajuste fino del valor de  $T_d$  hasta reducir la oscilación y obtener una la señal de salida satisfactoria.

En la Tabla 4.2 se muestran las ganancias finales del control PD aplicado.

Ganancia	Valor
$K_p$	11.373
$T_d$	0.002542

Tabla 4.2: Ganancias del PD.

## 4.5. Comentarios

El modelado matemático de un robot submarino no es un trabajo trivial, además que puede ser costoso y laborioso, es una de las razones por las que en este trabajo se realizó la identificación del sistema en base a los datos de entrada y salida obtenidos mediante pruebas experimentales, sin entrar en detalle al modelado matemático y lo que ello involucra. Dentro de las ventajas de la identificación del sistema implementado es que el modelo obtenido es en tiempo real, por lo tanto incluye perturbaciones ambientales, ya sea en banco de pruebas del laboratorio o en la piscina. Además nos permite trabajar con un sistema no lineal como si fuese un sistema lineal.

Por otro lado, una desventaja importante es que si la planta, en nuestro caso el submarino, tiene algún cambio en su masa, será necesario reajustar las ganancias del controlador.

Los experimentos realizados tanto para la identificación del sistema como para la prueba de la implementación del control, se realizaron en el Laboratorio de Robótica Submarina de CIDESI; en un acuario con dimensiones de 65 x 60 x 100 centímetros.

# Capítulo 5

## Resultados experimentales

### 5.1. Introducción

Con el objetivo de probar el desempeño del sistema de teleoperación bilateral fueron obtenidas las principales variables que definen el estado del submarino. Esto se realizó mediante el canal de comunicación UART, para posteriormente graficar en Matlab.

### 5.2. Experimentación

Para observar el funcionamiento del sistema de teleoperación bilateral se llevaron a cabo experimentos bajo distintas condiciones como: enviar comandos de posición constantes en  $z$  desde la PC y variables en  $z$  desde el dispositivo hápticos Phantom Premium 1.0 para probar el buen funcionamiento del control de profundidad, además se aplicaron comandos de velocidad en  $x$  para desplazar el submarino y tener colisiones frontales y contactos sostenidos, con lo cual, se prueba el buen desempeño del sensor de fuerza.

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados.

### 5.2.1. Caso 1: Control de profundidad

Para verificar que el control de profundidad del robot submarino funcione de manera adecuada, se realizaron tres diferentes experimentos. A continuación se describen estos experimentos y se presentan los resultados.

En el primer experimento la referencia deseada (*setpoint*) es una profundidad constante de 25 centímetros, la cual se muestra en la Figura 5.1. En esta figura, también se muestra la señal obtenida al aplicar un control PD, que es la profundidad real proporcionada por el sensor de presión (línea punteada).

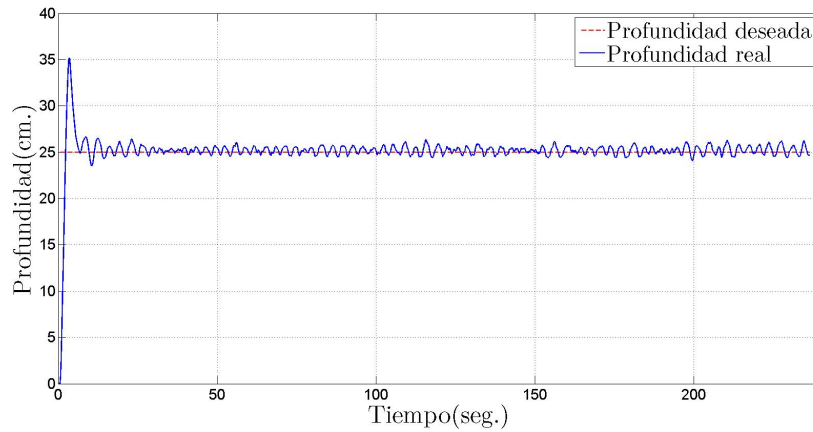


Figura 5.1: Profundidad real contra la deseada. La referencia deseada es constante.

En la Figura 5.2 se muestra la señal de error, que es igual a la diferencia entre el valor de profundidad deseada y el valor de profundidad real  $e = Z_d - Z$ .

Con el fin de comprobar el buen desempeño del control PD aplicado, se obtuvo el error cuadrático medio que es de 1.7997 centímetros.

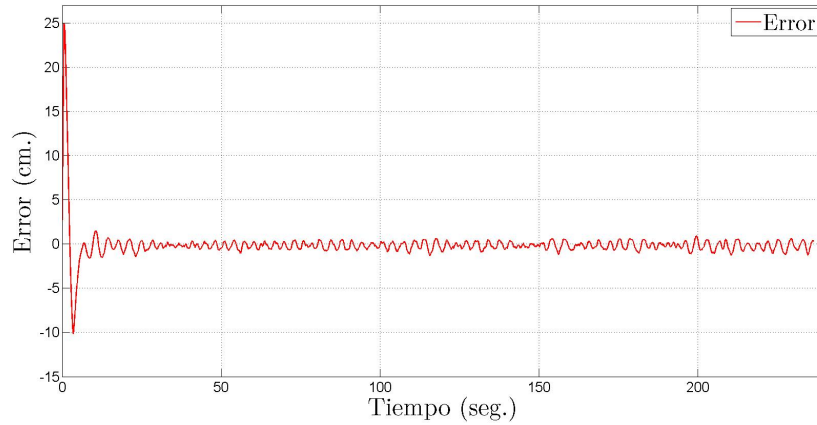


Figura 5.2: Señal de error.

Por su parte, en la Figura 5.3 se muestra el porcentaje de PWM producido por el controlador y aplicado a los motores para generar la respuesta de profundidad mostrada en la Figura 5.1. En la figura 5.3, también se observa que al inicio del experimento se demanda un porcentaje de ciclo de trabajo mayor, para que el submarino llegue a la profundidad deseada.

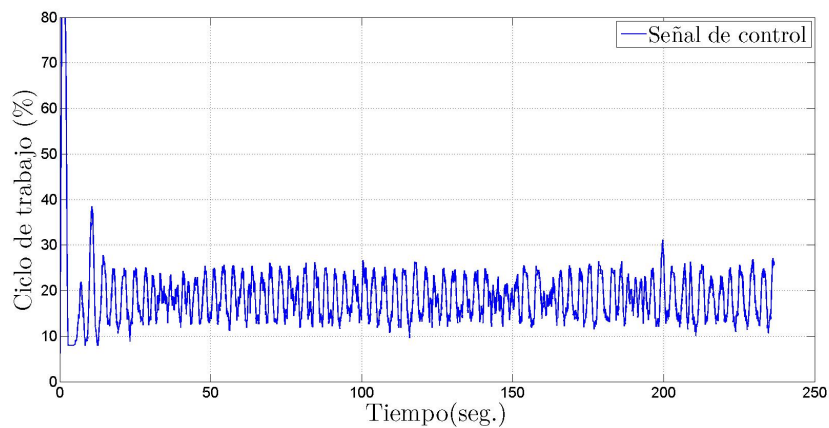


Figura 5.3: Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales.

El comportamiento del ángulo  $\phi$  se muestran en la Figura 5.4, si bien, el ángulo  $\phi$  no es una variable sobre la cual tengamos control, se monitorea con el fin de verificar que los motores



laterales no provoquen un ángulo  $\phi$  tal, que pueda interferir en las pruebas de control de profundidad.

De acuerdo a los datos mostrados en la Figura 5.4 se observa que el ángulo  $\phi$  del submarino se encuentra en un rango de  $\pm 4$  grados, el cual se puede considerar despreciable, si se toma en cuenta que el error propio de la IMU es del orden de  $\pm 1$  grado.

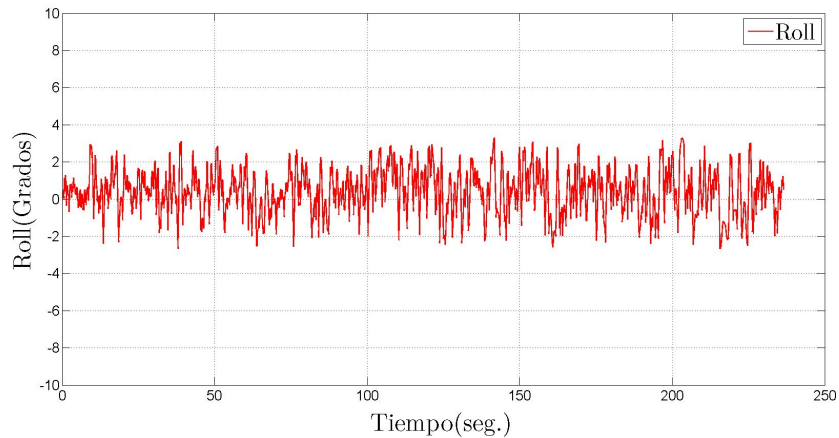


Figura 5.4: Respuesta del ángulo  $\phi$ .

El segundo experimento, para probar el control de profundidad, la señal deseada (*setpoint*) fue de escalones que varía de 10 a 25 centímetros de profundidad, cual se muestra en la figura 5.5. Esta prueba se realizó con el fin de verificar el comportamiento del control PD al tener cambios en la señal de profundidad deseada.

En la Figura 5.5 se muestra que la señal de profundidad real es mayor al inicio del cambio de escalón. Esto se observa mejor en la señal de error mostrada en la figura 5.6, donde podemos verificar que en cada cambio de la señal de profundidad deseada, la señal de error aumenta.

Para comprobar el funcionamiento del control PD en esta prueba, el error cuadrático medio, fue obtenido. En este experimento es igual a 1.8328 centímetros.

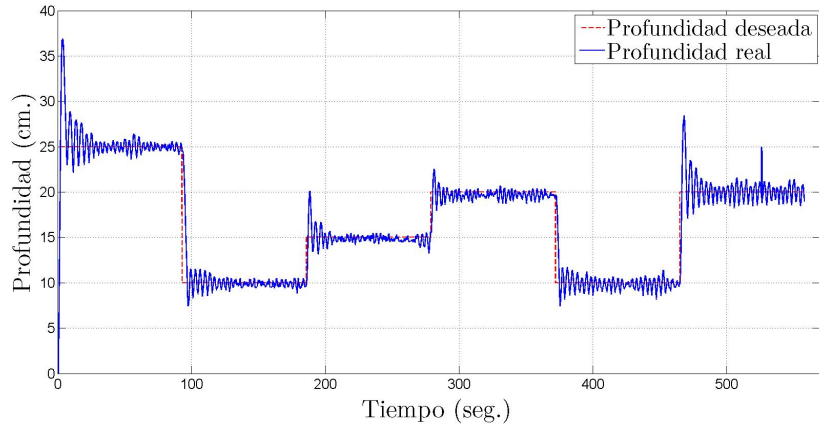


Figura 5.5: Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada cambia de un valor a otro.

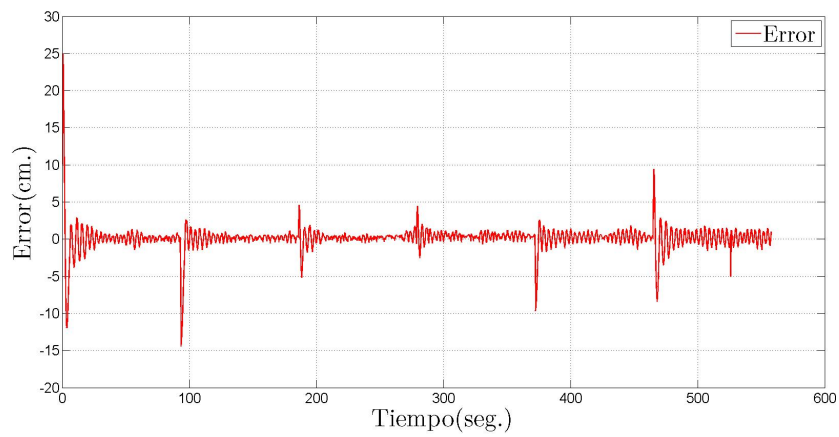


Figura 5.6: Señal de error.

En la Figura 5.7 se muestra el porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los motores laterales para obtener la profundidad deseada. Cuando hay un cambio en la referencia deseada, la señal de control aumenta para llegar a la profundidad deseada.

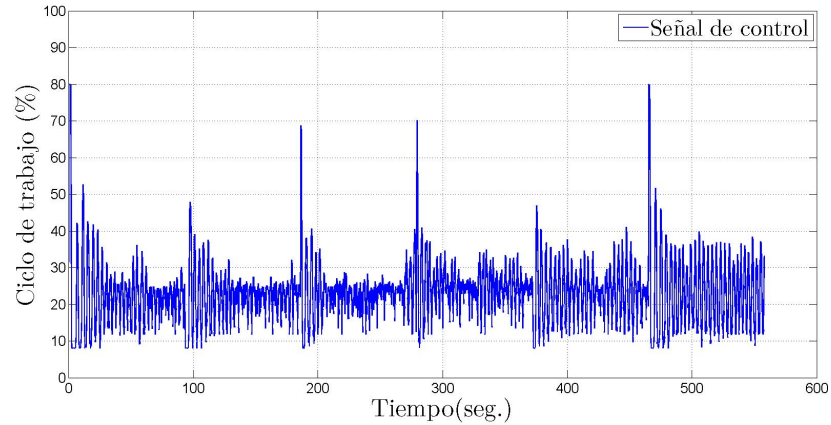


Figura 5.7: Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales.

En la Figura 5.8 se observa que aun con los cambios de la señal de profundidad deseada, el valor del ángulo  $\phi$  permanece en un rango de  $\pm 5$  grados.

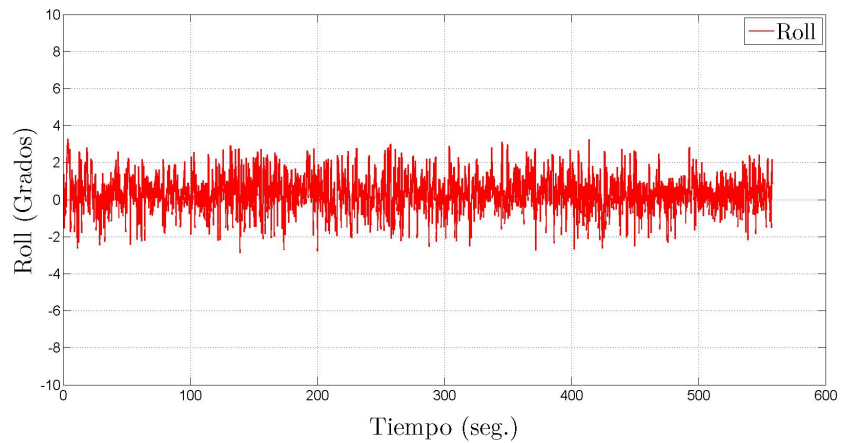


Figura 5.8: Respuesta del ángulo  $\phi$ .

En las pruebas anteriores el valor de profundidad deseado se enviaba directamente de la PC a la BeagleBone Black, ya que solo se pretendía comprobar el comportamiento del control de profundidad. En este tercer experimento se agrega el dispositivo hápticos Phantom Premium 1.0, del cual se envían los datos de profundidad deseados a la PC y de la PC a la *BeagleBoneBlack<sub>MR</sub>* se envían los valores de profundidad obtenidos por el sensor de presión.

En la Figura 5.9 se muestra la señal de profundidad deseada (línea punteada) y la profundidad real (línea continua) que es obtenida con el controlador PD.

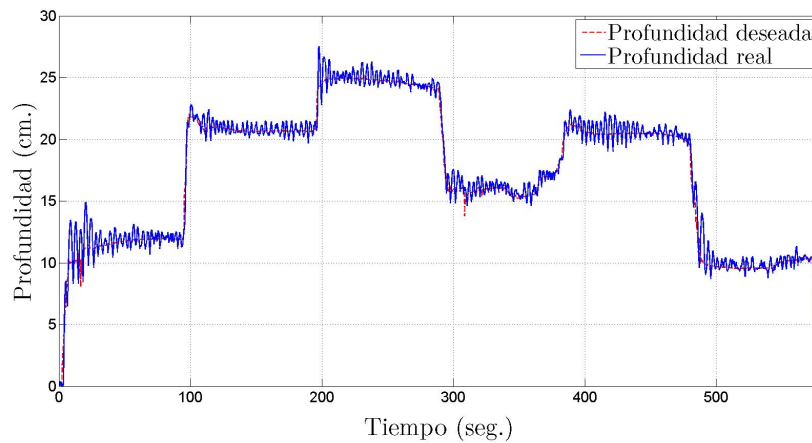


Figura 5.9: Profundidad deseada y profundidad obtenida con el controlador PD.

En la Figura 5.10 se observa que la señal de error aumenta cuando hay un cambio en la señal de profundidad deseado. El error cuadrático medio obtenido en este experimento es igual a 0.7142.

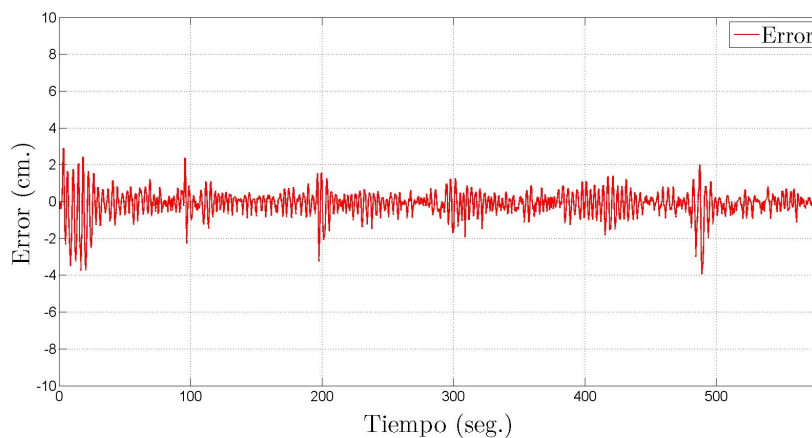


Figura 5.10: Señal de error.

El porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los motores laterales se muestra en la Figura 5.11. En la figura 5.12 se observa la respuesta del ángulo  $\phi$ .

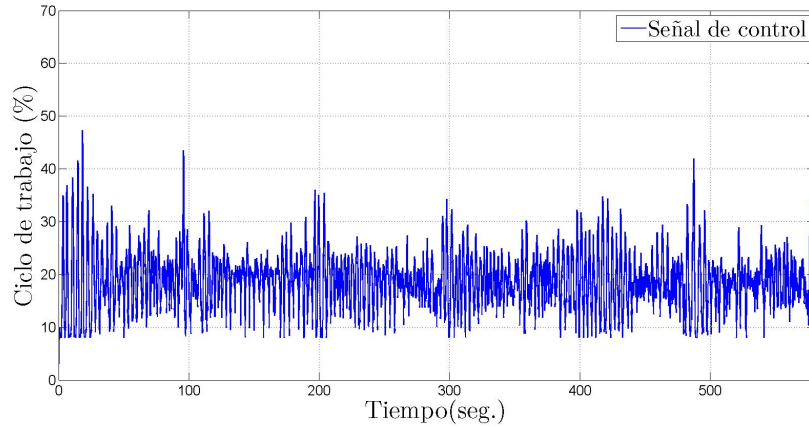


Figura 5.11: Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales.

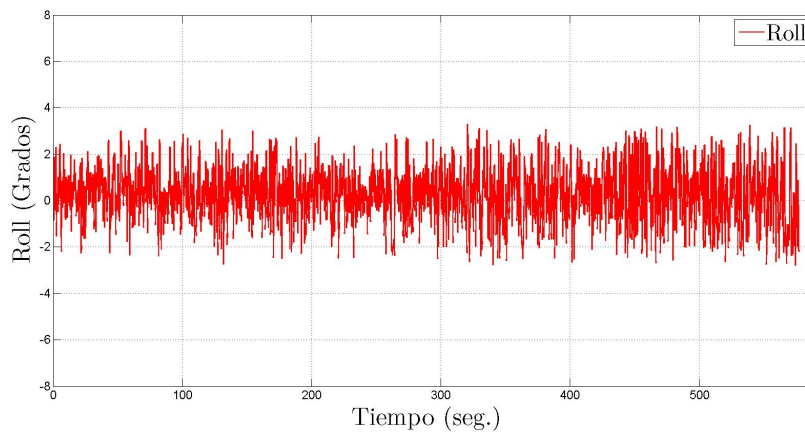


Figura 5.12: Respuesta del ángulo  $\phi$ .

### 5.2.2. Caso 2: Modo manual

Este experimento tiene como fin el probar el funcionamiento del sistema de teleoperación bilateral al enviar datos de profundidad (desplazamiento en  $z$ ), velocidad para desplazamiento en  $x$  y para desplazamiento en el ángulo  $\psi$ , desde el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 hacia el submarino Neptumne SB-1. A su vez, del submarino al dispositivo hápticos Phantom Premium 1.0 se envían los datos de profundidad adquiridos por el sensor de presión y los datos de fuerza son adquiridos por el sensor de fuerza

colocado en la nariz del submarino.

En la Figura 5.13 se presenta la fuerza que ejerce el submarino al tener una colisión frontal. Se observa que la fuerza de impacto del submarino es mayor que la fuerza de contacto sostenido. Además, se muestra la fuerza que se envía al robot maestro, que es la fuerza percibida por el operador humano, ya que el valor adquirido por el sensor de fuerza fue el valor recreado en el maestro.



Figura 5.13: Fuerza del esclavo y fuerza del maestro.

En la Figura 5.14 se observa como al aumentar la velocidad de desplazamiento en el eje  $x$  aumenta la fuerza ejercida por el submarino.

En la Figura 5.15 se muestra la profundidad deseada, la cual es enviada por el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 (línea punteada) y la profundidad obtenida con el controlador PD (línea continua). En esta prueba el error cuadrático medio es de 1.673 centímetros.

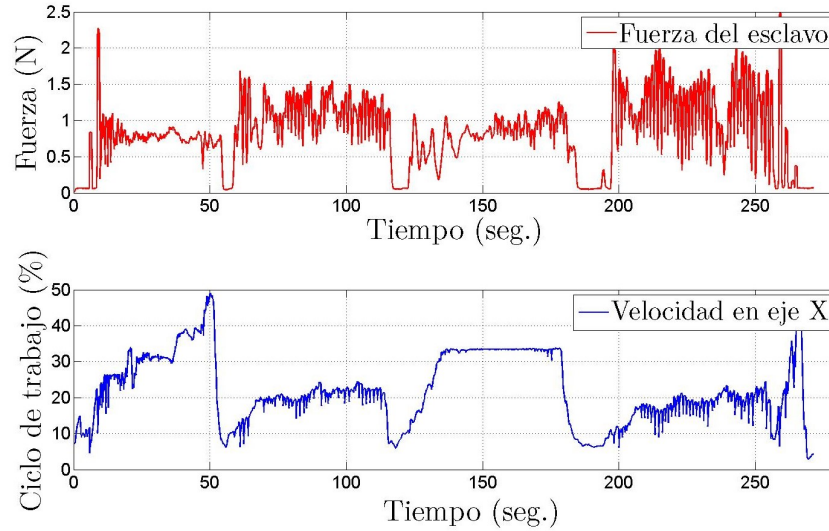


Figura 5.14: Fuerza del esclavo y velocidad en en eje  $x$ .

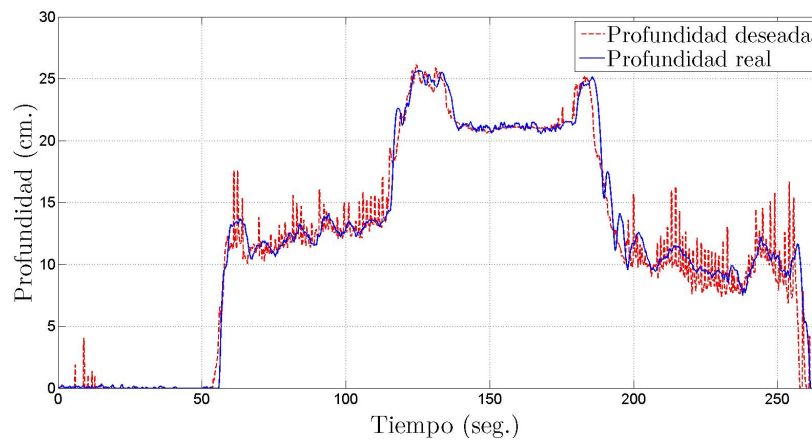


Figura 5.15: Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada es variable.

Como se observa en la Figura 5.16 el porcentaje de ciclo de trabajo que requiere el sistema para llegar a la profundidad deseada tiene muchos picos, esto se debe a los cambios bruscos de la señal de profundidad deseada que genera el operador humano al manipular la interfaz háptica Phantom Premium 1.0. Recuérdese que la interfaz es un dispositivo de muy alta fidelidad en cuanto al posicionamiento por lo que pequeños cambios de posición en el efector final se redundan en cambios grandes en la profundidad. Lo anterior, también esta en función del factor de escalamiento.

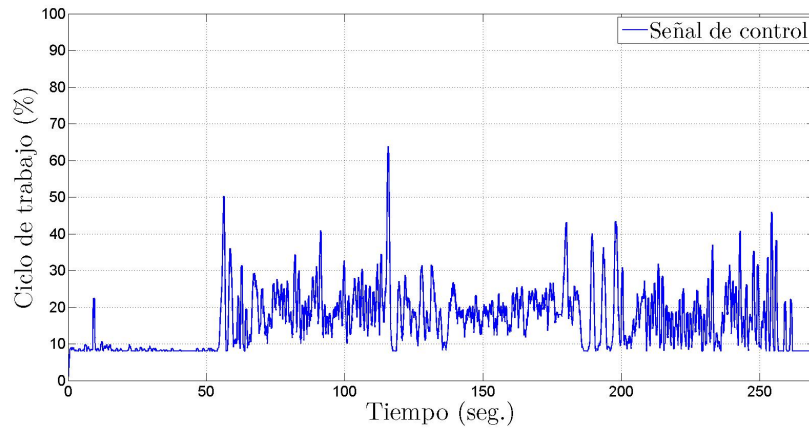


Figura 5.16: Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales.

En la Figura 5.17 se muestra el valor de respuesta del ángulo  $\phi$ , el cual se encuentra dentro de un rango de  $\pm 4$  grados, lo que significa que a pesar de los cambios abruptos en la profundidad el submarino es bastante estable en  $\phi$ . Adicionalmente, se aprecia que los propulsores laterales responden al unisono sin generar un par adicional sustancial.

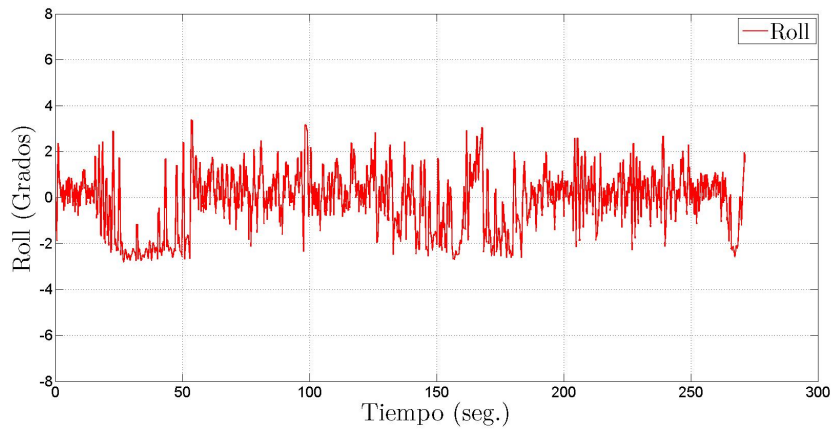


Figura 5.17: Respuesta del ángulo  $\phi$ .



### 5.2.3. Caso 3: Modo semiautomático

El ultimo experimento tiene como fin probar el funcionamiento del sistema de teleoperación bilateral considerando un valor de profundidad constante, mientras el submarino se puede mover libremente hacia adelante o hacia atrás a voluntad del operador humano, para hacer contacto con la pared de acuario. En la Figura 5.18 se muestra la profundidad deseada y la profundidad obtenida con el controlador PD.

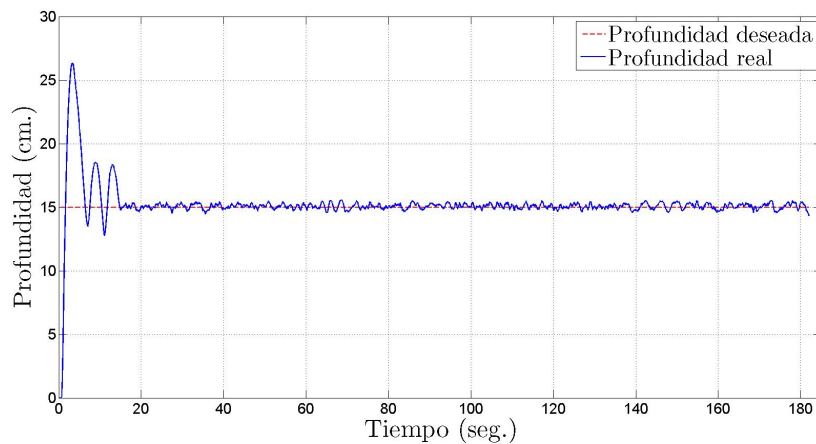


Figura 5.18: Profundidad deseada contra la real. La referencia deseada es constante.

En la Figura 5.19 se observa la señal de error de este experimento, con estos datos se determina el error cuadrático medio, que es igual a 1.6414 centímetros.

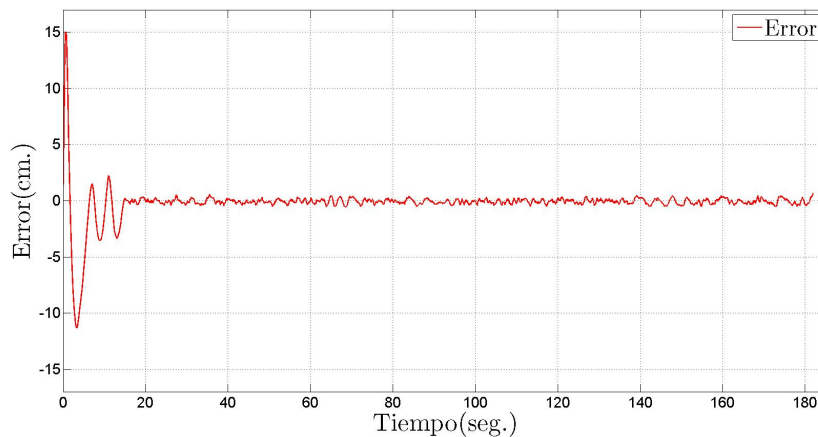


Figura 5.19: Señal de error.

En la Figura 5.20 se observa el porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD para tener la respuesta de la figura 5.18.

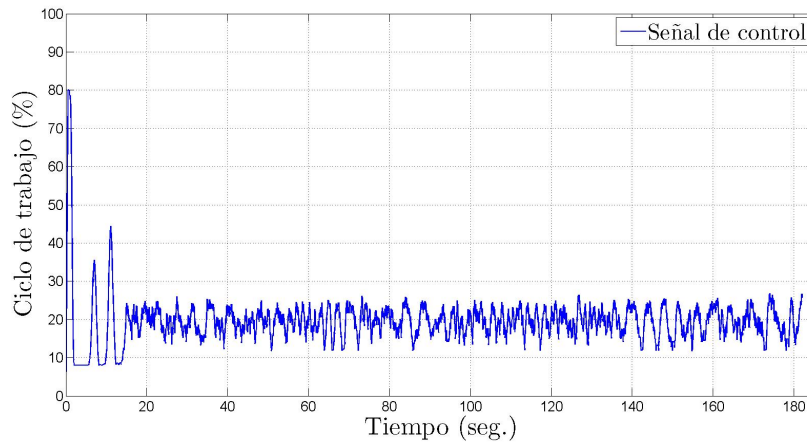


Figura 5.20: Porcentaje de ciclo de trabajo proporcionado por el controlador PD a los propulsores laterales.

Cuando se tiene una profundidad constante, se tiene un mejor control sobre el desplazamiento en el eje  $x$ . En la Figura 5.21 se observa la fuerza frontal ejercida por el submarino y la fuerza percibida por el operador humano.

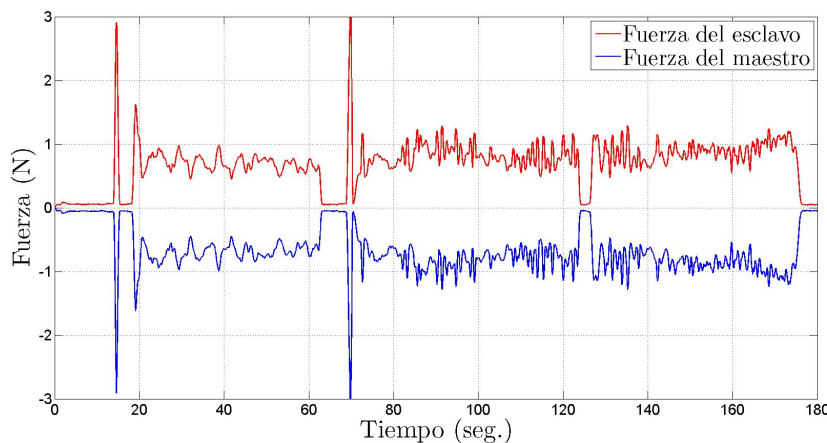


Figura 5.21: Fuerza del esclavo y fuerza del maestro.

En la Figura 5.22 se muestra como al aumentar la velocidad en el eje  $x$  aumenta la fuerza que ejerce el submarino con el ambiente. Es importante mencionar que hay un punto en el cual

al aumentar el valor de velocidad en el eje  $x$  ya no aumenta la fuerza de contacto sostenido, ya que el propulsor posterior no tiene la suficiente potencia para ejercer una mayor fuerza en la superficie del acuario.

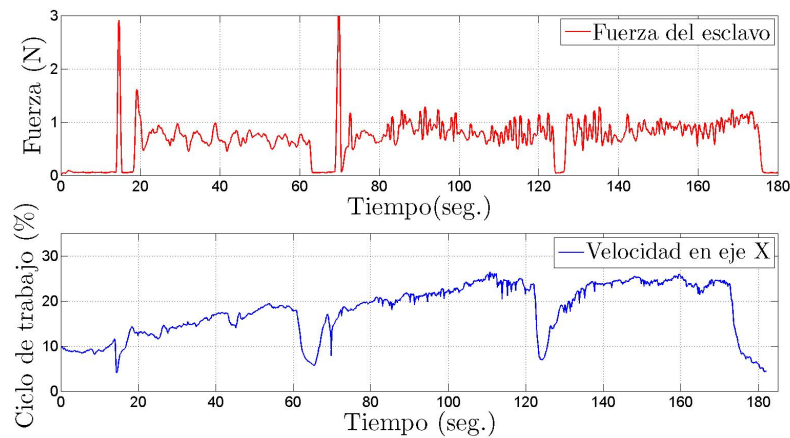


Figura 5.22: Fuerza del esclavo y velocidad en  $x$ .

Por ultimo, se muestra la respuesta del angulo  $\phi$ , que si bien como se mencionó anteriormente, no es una variable a controlar, se monitorea en todas los experimentos con el fin de observar como influyen los motores laterales en la respuesta del angulo de  $\phi$ .

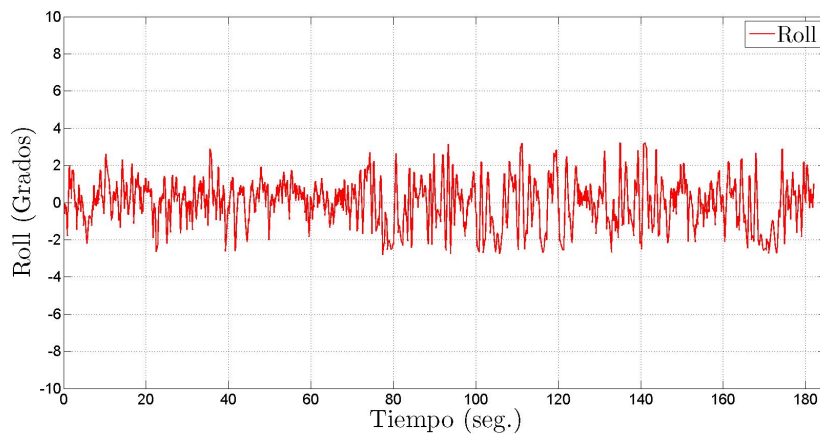


Figura 5.23: Respuesta del angulo  $\phi$ .

### 5.3. Comentarios

Un área de oportunidad de este proyecto es la integración de uno o dos propulsores posteriores con una mayor potencia que el actual, ya que la integración realizada no nos permitía aplicar una fuerza sostenida constante. Es importante mencionar que el agregar un nuevo sistema de propulsión posterior implica varios cambios mecánicos, que fue uno de los motivos por los que no se realizó esta adecuación.

En cuanto a los experimentos de control de profundidad, el submarino puede soportar profundidades de hasta 5 metros. No fue posible realizar experimentos a dicha profundidad ya que no se contaba con las instalaciones de tales características..

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

### 6.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una plataforma de teleoperación bilateral para vehículos submarinos. Los experimentos fueron realizados utilizando como maestro el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 y como esclavo el submarino Neptune SB-1.

Dado que el esclavo interactúa con el ambiente, se le integró un sensor de fuerza para tener la capacidad de ejercer una fuerza controlada sobre el ambiente y percibir colisiones.

Una de las ventajas de colocar un sensor de fuerza es que nos permite medir la fuerza de contacto entre el vehículo submarino y el ambiente, con lo que el operador humano recibe la retroalimentación de fuerza producida por contactos sostenidos y colisiones frontales, proporcionando al operador humano la sensación de telepresencia, demostrando con ello la efectividad de implementar un sensor de fuerza y la compatibilidad de tecnologías.

Al validar de manera experimental el sistema de teleoperación bilateral propuesto nos da la pauta para, posteriormente, sintetizar e implementar leyes de control avanzadas en el sistema.

Adicionalmente, la instrumentación del submarino permitió obtener mediciones de variables que hicieron posible la identificación del sistema. La función de transferencia obtenida describe la dinámica del vehículo en el plano vertical y fue empleada en el ajuste de las

ganancias del algoritmo para el control PD de profundidad, con del fin de disminuir la probabilidad de daño al hardware durante la puesta a punto del sistema.

Para la selección de dicho algoritmo se considera un sistema lineal, valores relativamente pequeños en la entrada, es decir, pequeños cambios en profundidad y condiciones de agua controlada, esto es sin alteraciones: olas, vientos o corrientes marinas.

Basado en este análisis, la mejor opción para nuestro sistema fue un control PD ya que nos da una respuesta satisfactoria, con un sobre impulso relativamente pequeño, poco tiempo de establecimiento así como despreciable error en estado estacionario.

El algoritmo fue probado bajo distintas condiciones, con valor de profundidad deseado constante y valor de profundidad deseado variable, valor que es enviado desde el dispositivo háptico Phantom Premium 1.0. Con los resultados experimentales obtenidos se verifica estadísticamente que el control PD de profundidad implementado logra el desempeño esperado concluyendo que este tipo de control satisface los requerimientos establecidos para el sistema, además que el algoritmo de control funciona sin afectar significativamente el ángulo  $\phi$ .

## 6.2. Trabajo futuro

Los resultados de esta tesis dejan la base para trabajos futuros para enriquecer y robustecer el sistema de teleoperación propuesto, algunas oportunidades de mejora son:

- La sustitución del motor de CD del sistema de propulsión posterior por uno con mayor potencia, que nos permita ejercer una fuerza de contacto sostenida suficientemente grande que sea percibida por el operador humano.
- La retroalimentación de la posición del esclavo en el eje  $x$ . De esta forma se podrá cerrar el lazo de control en este eje.
- La sustitución del dispositivo háptico Phantom Premium 1.0 por el Novint Falcon. Con

el fin de probar resultados considerando que el Novint Falcon es mecánicamente mas robusto que el Phantom.

- La exploración de las propiedades de otros esquemas de teleoperación un maestro un esclavo existentes en la literatura que resulten de interés para ser extendidos al caso de tener como esclavo un robot submarino.
- La implementación de un esquema de control para la variable del angulo  $\phi$ .

# Apéndice A

## Hojas de datos



## Model 31 Low

### Low Range Precision Miniature Load Cell



#### DESCRIPTION

Model 31 low range precision miniature load cells measure both tension and compression load forces of 50 grams to 500 g. These models are our highest accuracy, rugged miniature load cells. Model 31's welded, stainless steel construction is designed to eliminate or reduce to a minimum, the effects of off-axis loads. (The internal construction assures excellent long-

term stability for ranges 1000 grams and above.) A modification permits this model to be completely welded for underwater applications. The Model 31 tension/compression load cell has male threads attachments. High accuracies of 0.15 % to 0.25 % full scale are achieved. Each bonded strain gage unit is built of welded 17-4 PH stainless steel for additional ruggedness.

#### FEATURES

- 50 g to 500 g
- mV/V output
- Stainless steel
- Miniature design
- Double diaphragm construction

# Model 31 Low

## PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Load ranges <sup>2</sup>	50 g, 150 g, 250 g, 500 g
Linearity	±0.15 % full scale
Hysteresis	±0.15 % full scale
Non-repeatability	±0.1 % full scale
Tolerance on output 50 g to 150 g	0,1 mV/V max.
Tolerance on output 250 g to 500 g	20 mV/V
Operation	Tension/compression <sup>3</sup>
Resolution	Infinite

## ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Temperature, operating	-53 °C to 121 °C [-65 °F to 250 °F]
Temperature, compensated	15 °C to 71 °C [60 °F to 160 °F]
Storage temperature	-73 °C to 148 °C [-100 °F to 300 °F]
Temperature effect, zero	0.015 % full scale/°F
Temperature effect, span	0.015 % full scale/°F

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Strain gage type	Semiconductor
Excitation (calibration)	5 Vdc
Insulation resistance	5000 Mohm @ 50 Vdc
Bridge resistance	500 ohm
Zero balance	1 % max.
Electrical termination (std)	Teflon cable (5 ft)

## MECHANICAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Maximum allowable load	5 lb <sup>1</sup>
Weight	90 g
Material	17-4 PH stainless steel
Deflection full scale	0,020 mm [0.0008 in]
Natural frequency	740 Hz

## WIRING CODES

Cable	
Red	(+) excitation
Black	(-) excitation
Green	(-) output
White	(+) output

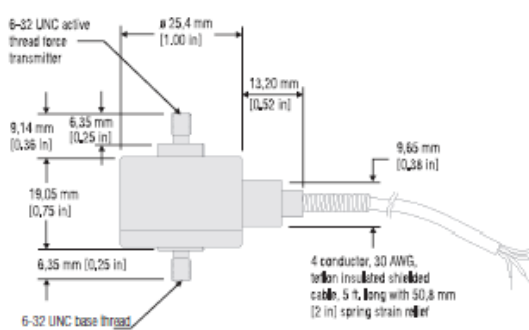
## RANGE CODES

Range Codes	Range
AJ	50 g
AL	150 g
AN	250 g
AP	500 g

## OPTION CODES

	<b>Many range/option combinations are available in our quick-ship and fast-track manufacture programs. Please see <a href="http://sensing.honeywell.com/TMSensor-ship">http://sensing.honeywell.com/TMSensor-ship</a> for updated listings.</b>	
<b>Load range</b>	50, 150, 250, 500 g	
<b>Temperature compensation</b>	1a. 60 °F to 160 °F 1b. 30 °F to 130 °F 1c. 0 °F to 185 °F 1d. -20 °F to 130 °F	1e. -20 °F to 200 °F 1j. 0 °F to 50 °C 1k. -20 °C to 85 °C 1m. -25 °C to 110 °C
<b>Internal amplifiers</b>	2u. Unamplified, mV/V output	
<b>Overload stops</b>	4a. Overload stop	
<b>Electrical termination</b>	6d. Microtec DR-4S-4H 4-pin 6e. Integral cable: Teflon 6f. Integral cable: PVC 6h. Integral cable: Silicone	6i. Integral underwater cable (max. 82 °C [180 °F]) 6v. Phoenix connector on end of cable 15d. Connector on end of cable
<b>Special calibration</b>	30a. Compression only calibration, positive in compression 30b. Tension and compression calibration, positive in tension 30c. Compression only calibration, negative in compression	
<b>Shock and vibration</b>	44a. Shock and vibration resistance	
<b>Interfaces <sup>4</sup></b>	53e. Signature calibration <sup>f</sup> 53t. TEDS IEEE 1451.4 module	

## MOUNTING DIMENSIONS

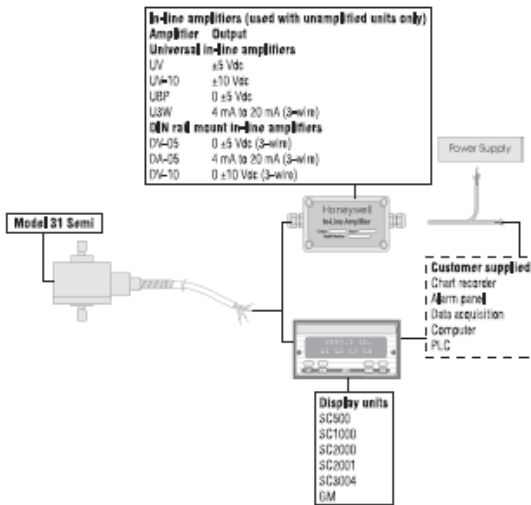


# Model 31 Low

## NOTES

1. Allowable maximum loads - maximum load to be applied without damage.<sup>2</sup>
2. Without damage - loading to this level will not cause excessive zero shift or performance degradation. The user must consider fatigue life or long term use and structural integrity. All structurally critical applications (overhead loading, etc.) should always be designed with safety redundant load paths.
3. Standard calibration for tension/compression load cells is in tension only.
4. TEDS available with integral cable units only.
5. This unit calibrated to Imperial (non-Metric) units.
6. Signature calibration only available as inline module.

## TYPICAL SYSTEM DIAGRAM



# Low Range Precision Miniature Load Cell

**Warranty.** Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship. Honeywell's standard product warranty applies unless agreed to otherwise by Honeywell in writing; please refer to your order acknowledgement or consult your local sales office for specific warranty details. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace, at its option, without charge those items it finds defective. **The foregoing is buyer's sole remedy and is in lieu of all warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. In no event shall Honeywell be liable for consequential, special, or indirect damages.**

While we provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is up to the customer to determine the suitability of the product in the application.

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this printing. However, we assume no responsibility for its use.

For more information about Sensing and Control products, visit [www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing) or call +1-815-235-6847. Email inquiries to [info.sc@honeywell.com](mailto:info.sc@honeywell.com)

### WARNING

#### PERSONAL INJURY

- DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

### WARNING

#### MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this catalogue is for reference only. DO NOT USE this document as product installation information.
- Complete installation, operation and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

Sensing and Control  
Automation and Control Solutions  
Honeywell  
1985 Douglas Drive North  
Golden Valley, MN 55422 USA  
+1-815-235-6847  
[www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing)

008629-1-EN IL50 GLO  
May 2008  
Copyright © 2008 Honeywell International Inc. All rights reserved.

# Honeywell

## MS5803-14BA Miniature 14 bar Module



- High resolution module, 0.2 mbar
- Fast conversion down to 1 ms
- Low power, 1  $\mu$ A (standby < 0.15  $\mu$ A)
- Integrated digital pressure sensor (24 bit  $\Delta\Sigma$  ADC)
- Supply voltage 1.8 to 3.6 V
- Operating range: 0 to 14 bar, -40 to +85 °C
- I<sup>2</sup>C and SPI interface (Mode 0,3)
- No external components (Internal oscillator)
- Excellent long term stability
- Hermetically sealable for outdoor devices

### DESCRIPTION

The MS5803-14BA is a new generation of high resolution pressure sensors with SPI and I2C bus interface. It is optimized for depth measurement systems with a water depth resolution of 1cm and below. The sensor module includes a high linear pressure sensor and an ultra low power 24 bit  $\Delta\Sigma$  ADC with internal factory calibrated coefficients. It provides a precise digital 24 Bit pressure and temperature value and different operation modes that allow the user to optimize for conversion speed and current consumption. A high resolution temperature output allows the implementation of a depth measurement systems and thermometer function without any additional sensor. The MS5803-14BA can be interfaced to any microcontroller. The communication protocol is simple, without the need to programming internal registers in the device. The gel protection and antimagnetic stainless steel cap protects against 30 bar overpressure water resistant. This new sensor module generation is based on leading MEMS technology and latest benefits from the Intersema's proven experience and know-how in high volume manufacturing of pressure modules have been widely used for over a decade. This sensing principle employed leads to very low hysteresis and high stability of both pressure and temperature signal.

### FEATURES

#### FIELD OF APPLICATION

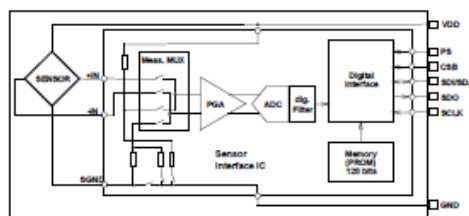
- Mobile water depth measurements systems
- Diving computers
- Adventure or multi-mode watches

#### TECHNICAL DATA

##### Sensor Performances (V<sub>DD</sub> = 3 V)

Pressure	Min	Typ	Max	Unit
Range	0		14	bar
ADC	24			bit
Resolution (1)	1 / 0.6 / 0.4 / 0.3 / 0.2			mbar
Accuracy 0°C to +40°C, 0 to 6 bar (2)	-20		+20	mbar
Accuracy -40°C to +85°C 0 to 6 bar (2)	-40		+40	mbar
Response time	0.5 / 1.1 / 2.1 / 4.1 / 8.22			ms
Long term stability		-20		mbar/yr
Temperature	Min	Typ	Max	Unit
Range	-40		+85	°C
Resolution		<0.01		°C
Accuracy	-0.8		+0.8	°C
Notes: (1) Oversampling Ratio: 256 / 512 / 1024 / 2048 / 4096				
(2) With autozero at one pressure point				

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



## MS5803-14BA Miniature 14 bar Module

### PERFORMANCE SPECIFICATIONS

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Supply voltage	$V_{DD}$		-0.3		+4.0	V
Storage temperature	$T_S$		-40		+125	°C
Overpressure	$P_{max}$	ISO 6425			30	bar
Maximum Soldering Temperature	$T_{max}$	40 sec max			250	°C
ESD rating		Human Body Model	-4		+4	kV
Latch up		JEDEC standard No 78	-100		+100	mA

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Operating Supply voltage	$V_{DD}$		1.8	3.0	3.6	V
Operating Temperature	T		-40	+25	+85	°C
Supply current (1 sample per sec.)	$I_{DD}$	OSR 4096 2048 1024 512 256		12.5 6.3 3.2 1.7 0.9		$\mu$ A
Peak supply current		during conversion		1.4		mA
Standby supply current		at 25°C		0.02	0.14	$\mu$ A
VDD Capacitor		From VDD to GND	100			nF

#### ANALOG DIGITAL CONVERTER (ADC)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Output Word				24		bit
Conversion time	$t_c$	OSR 4096 2048 1024 512 256	7.40 3.72 1.88 0.95 0.48	8.22 4.13 2.08 1.06 0.54	9.04 4.54 2.28 1.17 0.60	ms

## MS5803-14BA Miniature 14 bar Module



### PERFORMANCE SPECIFICATIONS (CONTINUED)

#### PRESSURE OUTPUT CHARACTERISTICS ( $V_{DD} = 3\text{ V}$ , $T = 25^\circ\text{C}$ UNLESS OTHERWISE NOTED)

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Operating Pressure Range	$P_{\text{range}}$ Full Accuracy	0		14	bar
Absolute Accuracy, Temperature range 0 ... 40 °C	0 ... 6 bar	-20		+20	mbar
	0 ... 10 bar	-60		+20	
	0 ... 14 bar	-150		+20	
Absolute Accuracy, Temperature range -40 ... 85 °C	0 ... 6 bar	-40		+40	mbar
	0 ... 10 bar	-120		+80	
	0 ... 14 bar	-200		+100	
Maximum error with supply voltage (1)	$V_{DD} = 1.8\text{ V} \dots 3.6\text{ V}$		+/-20		mbar
Long-term stability			-20		mbar/yr
Resolution RMS	OSR	4096	0.2		mbar
		2048	0.3		
		1024	0.4		
		512	0.6		
		256	1.0		

(1) With autozero at 3V point

#### TEMPERATURE OUTPUT CHARACTERISTICS ( $V_{DD} = 3\text{ V}$ , $T = 25^\circ\text{C}$ UNLESS OTHERWISE NOTED)

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Absolute Accuracy	0 ... 10 bar	-0.8		+0.8	°C
	-20...85°C	-2.0		+2.0	
	-40...85°C	-4.0		+4.0	
Maximum error with supply voltage (1)	$V_{DD} = 1.8\text{ V} \dots 3.6\text{ V}$		+/-0.5		°C
Resolution RMS	OSR	4096	0.002		°C
		2048	0.003		
		1024	0.005		
		512	0.008		
		256	0.012		

(1) With autozero at 3V point

## MS5803-14BA Miniature 14 bar Module



### PERFORMANCE SPECIFICATIONS (CONTINUED)

#### DIGITAL INPUTS (PS, CSB, DIN, SCLK, SDA, SCL)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Serial data clock	SCLK	SPI protocol			20	MHz
Serial data clock	SCL	I2C protocol			400	kHz
Input high voltage	V <sub>IH</sub>	Pins CSB	80% V <sub>DD</sub>		100% V <sub>DD</sub>	V
Input low voltage	V <sub>IL</sub>		0% V <sub>DD</sub>		20% V <sub>DD</sub>	V
Input leakage current	I <sub>leak25°C</sub>	at 25°C			0.15	µA
CS low to first SCLK rising	tCSL		21			ns
CS low from last SCLK falling	tCSH		21			ns

#### PRESSURE OUTPUTS (DOUT, SDA, SCL)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
Output high voltage	V <sub>OH</sub>	I <sub>source</sub> = 0.6 mA	80% V <sub>DD</sub>		100% V <sub>DD</sub>	V
Output low voltage	V <sub>OL</sub>	I <sub>sink</sub> = 0.6 mA	0% V <sub>DD</sub>		20% V <sub>DD</sub>	V
Load capacitance	C <sub>LOAD</sub>			16		pF





# Triaxial Inertial Sensor with Magnetometer ADIS16400/ADIS16405

## FEATURES

- Triaxial, digital gyroscope with digital range scaling  
 $\pm 75^\circ/\text{sec}$ ,  $\pm 150^\circ/\text{sec}$ ,  $\pm 300^\circ/\text{sec}$  settings
- Tight orthogonal alignment,  $< 0.05^\circ$
- Triaxial, digital accelerometer,  $\pm 18 g$
- Triaxial, digital magnetometer,  $\pm 2.5$  gauss
- Autonomous operation and data collection
  - No external configuration commands required
  - 220 ms start-up time
  - 4 ms sleep mode recovery time
- Factory-calibrated sensitivity, bias, and axial alignment
  - ADIS16400 calibration temperature:  $+25^\circ\text{C}$
  - ADIS16405 calibration temperature range:  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$
- SPI-compatible serial interface
- Embedded temperature sensor
- Programmable operation and control
  - Automatic and manual bias correction controls
  - Bartlett-window FIR length, number of taps
  - Digital I/O: data-ready, alarm indicator, general-purpose
  - Alarms for condition monitoring
  - Sleep mode for power management
  - DAC output voltage
  - Enable external sample clock input up to 1.2 kHz
  - Single-command self-test
- Single-supply operation: 4.75 V to 5.25 V
- 2000 g shock survivability
- Operating temperature range:  $-40^\circ\text{C}$  to  $+105^\circ\text{C}$

## APPLICATIONS

- Unmanned aerial vehicles
- Platform control
- Digital compassing
- Navigation

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

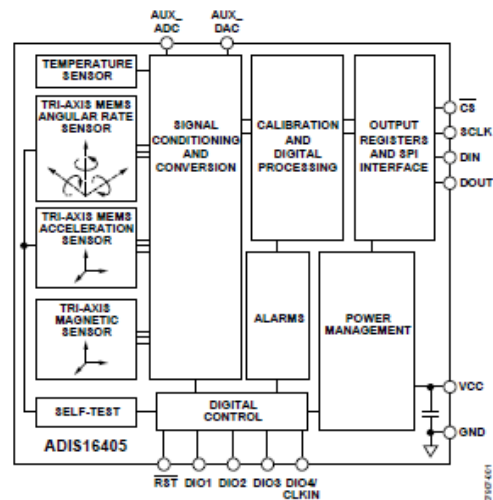


Figure 1.

## GENERAL DESCRIPTION

The ADIS16400/ADIS16405 iSensor<sup>®</sup> products are complete inertial systems that include a triaxial gyroscope, a triaxial accelerometer, and a triaxial magnetometer. The ADIS16400/ADIS16405 combine industry-leading iMEMS<sup>®</sup> technology with signal conditioning that optimizes dynamic performance. The factory calibration characterizes each sensor for sensitivity, bias, alignment, and linear acceleration (gyroscope bias). As a result, each sensor has its own dynamic compensation for correction formulas that provide accurate sensor measurements over a temperature range of  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ . The magnetometers employ a self-correction function to provide accurate bias performance over temperature, as well.

The ADIS16400/ADIS16405 provide a simple, cost-effective method for integrating accurate, multi-axis inertial sensing into industrial systems, especially when compared with the

complexity and investment associated with discrete designs. All necessary motion testing and calibration are part of the production process at the factory, greatly reducing system integration time. Tight orthogonal alignment simplifies inertial frame alignment in navigation systems. An improved serial peripheral interface (SPI) and register structure provide faster data collection and configuration control. By using a compatible pinout and the same package as the ADIS1635x and ADIS1636x families, upgrading to the ADIS16400/ADIS16405 requires only firmware changes to accommodate additional sensors and register map updates.

These compact modules are approximately 23 mm x 23 mm x 23 mm and provide a flexible connector interface that enables multiple mounting orientation options.

REV. B  
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 ©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



**SPECIFICATIONS**

T<sub>A</sub> = -40°C to +85°C, VCC = 5.0 V, angular rate = 0°/sec, dynamic range = ±300°/sec, ±1 g, unless otherwise noted.

**Table 1.**

Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>GYROSCOPES</b>					
Dynamic Range		±300	±350		°/sec
Initial Sensitivity	Dynamic range = ±300°/sec	0.0495	0.05	0.0505	°/sec/LSB
	Dynamic range = ±150°/sec		0.025		°/sec/LSB
	Dynamic range = ±75°/sec		0.0125		°/sec/LSB
Sensitivity Temperature Coefficient	ADIS16400: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±250		ppm/°C
	ADIS16405: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±40		ppm/°C
Misalignment	Axis-to-axis, Δ = 90° ideal		±0.05		Degrees
	Axis-to-frame (package)		±0.5		Degrees
Nonlinearity	Best fit straight line		0.1		% of FS
Initial Bias Error	1 σ		±3		°/sec
In-Run Bias Stability	1 σ, SMPL_PRD = 0x01		0.007		°/sec
Angular Random Walk	1 σ, SMPL_PRD = 0x01		2.0		°/√hr
Bias Temperature Coefficient	ADIS16400: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±0.025		°/sec/°C
	ADIS16405: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±0.01		°/sec/°C
Linear Acceleration Effect on Bias	Any axis, 1 σ (MSC_CTRL, Bit 7 = 1)		0.05		°/sec/g
Bias Voltage Sensitivity	VCC = 4.75 V to 5.25 V		0.32		°/sec/V
Output Noise	±300°/sec range, no filtering		0.9		°/sec rms
Rate Noise Density	f = 25 Hz, ±300°/sec, no filtering		0.05		°/sec/√Hz rms
3 dB Bandwidth			330		Hz
<b>ACCELEROMETERS</b>					
Dynamic Range		±18			g
Initial Sensitivity		3.285	3.33	3.38	mg/LSB
Sensitivity Temperature Coefficient	ADIS16400: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±120		ppm/°C
	ADIS16405: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±50		ppm/°C
Misalignment	Axis-to-axis, Δ = 90° ideal		0.2		Degrees
	Axis-to-frame (package)		±0.5		Degrees
Nonlinearity	Best fit straight line, ±17 g		0.1		% of FS
Initial Bias Error	1 σ		±50		mg
In-Run Bias Stability	1 σ		0.2		mg
Velocity Random Walk	1 σ		0.2		m/sec/√hr
Bias Temperature Coefficient	ADIS16400: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±1.35		mg/°C
	ADIS16405: -40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +85°C		±0.3		mg/°C
Bias Voltage Sensitivity	VCC = 4.75 V to 5.25 V		2.5		mg/V
Output Noise	No filtering		9		mg rms
Noise Density	No filtering		0.5		mg/√Hz rms
3 dB Bandwidth			330		Hz
<b>MAGNETOMETER</b>					
Dynamic Range		±2.5	±3.5		gauss
Initial Sensitivity	25°C	0.49	0.5	0.51	mgauss/LSB
Sensitivity Temperature Coefficient	25°C, 1 σ		600		ppm/°C
Axis Nonorthogonality	25°C, axis-to-axis		0.25		Degrees
Axis Misalignment	25°C, axis-to-base plate and guide pins		0.5		Degrees
Nonlinearity	Best fit straight line		0.5		% of FS
Initial Bias Error	25°C, 0 gauss stimulus		±4		mgauss
Bias Temperature Coefficient			0.5		mgauss/°C
Output Noise	25°C, no filtering		1.25		mgauss rms
Noise Density	25°C, no filtering, rms		0.066		mgauss/√Hz
3 dB Bandwidth			1540		Hz

## ADIS16400/ADIS16405

Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
TEMPERATURE SENSOR Scale Factor	25°C, output = 0x0000		0.14		°C/LSB
ADC INPUT					
Resolution			12		Bits
Integral Nonlinearity			±2		LSB
Differential Nonlinearity			±1		LSB
Offset Error			±4		LSB
Gain Error			±2		LSB
Input Range		0		3.3	V
Input Capacitance	During acquisition		20		pF
DAC OUTPUT					
Resolution			12		Bits
Relative Accuracy			±4		LSB
Differential Nonlinearity			±1		LSB
Offset Error			±5		mV
Gain Error			±0.5		%
Output Range		0		3.3	V
Output Impedance			2		Ω
Output Settling Time	5 kΩ/100 pF to GND		10		μs
LOGIC INPUTS <sup>1</sup>					
Input High Voltage, V <sub>IH</sub>		2.0			V
Input Low Voltage, V <sub>IL</sub>				0.8	V
$\overline{CS}$ Wake-Up Pulse Width	$\overline{CS}$ signal to wake up from sleep mode			0.55	V
Logic 1 Input Current, I <sub>IN1</sub>	V <sub>IN</sub> = 3.3 V	20	±0.2	±10	μA
Logic 0 Input Current, I <sub>INL</sub>	V <sub>IL</sub> = 0 V				μA
All Pins Except $\overline{RST}$			-40	-60	μA
$\overline{RST}$ Pin			-1		mA
Input Capacitance, C <sub>IN</sub>			10		pF
DIGITAL OUTPUTS <sup>1</sup>					
Output High Voltage, V <sub>OH</sub>	I <sub>SOURCE</sub> = 1.6 mA	2.4			V
Output Low Voltage, V <sub>OL</sub>	I <sub>SINK</sub> = 1.6 mA			0.4	V
FLASH MEMORY					
Data Retention <sup>3</sup>	Endurance <sup>2</sup>	10,000			Cycles
	T <sub>J</sub> = 85°C	20			Years
FUNCTIONAL TIMES <sup>4</sup>	Time until data is available				
Power-On Start-Up Time	Normal mode, SMPL_PRD ≤ 0x09		220		ms
	Low power mode, SMPL_PRD ≥ 0x0A		290		ms
Reset Recovery Time	Normal mode, SMPL_PRD ≤ 0x09		100		ms
	Low power mode, SMPL_PRD ≥ 0x0A		170		ms
Sleep Mode Recovery Time	Normal mode, SMPL_PRD ≤ 0x09		4		ms
	Low power mode, SMPL_PRD ≥ 0x0A		15		ms
Flash Memory Test Time	Normal mode, SMPL_PRD ≤ 0x09		17		ms
	Low power mode, SMPL_PRD ≥ 0x0A		90		ms
Automatic Self-Test Time	SMPL_PRD = 0x01		12		ms
CONVERSION RATE					
Clock Accuracy	SMPL_PRD = 0x01 to 0xFF	0.413		819.2	SPS
Sync Input Clock				±3	%
				1.2	kHz

## ADIS16400/ADIS16405

Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range, VCC		4.75	5.0	5.25	V
Power Supply Current	Low power mode at 25°C		45		mA
	Normal mode at 25°C		70		mA
	Sleep mode at 25°C		600		μA

<sup>1</sup> The digital I/O signals are driven by an internal 3.3 V supply, and the inputs are 5 V tolerant.

<sup>2</sup> Endurance is qualified as per JEDEC Standard 22, Method A117, and measured at -40°C, +25°C, +85°C, and +125°C.

<sup>3</sup> The data retention lifetime equivalent is at a junction temperature (T<sub>j</sub>) of 85°C as per JEDEC Standard 22, Method A117. Data retention lifetime decreases with junction temperature.

<sup>4</sup> These times do not include thermal settling and internal filter response times (330 Hz bandwidth), which may affect overall accuracy.

## Apéndice B

### Esquemáticos de las tarjetas de expansión

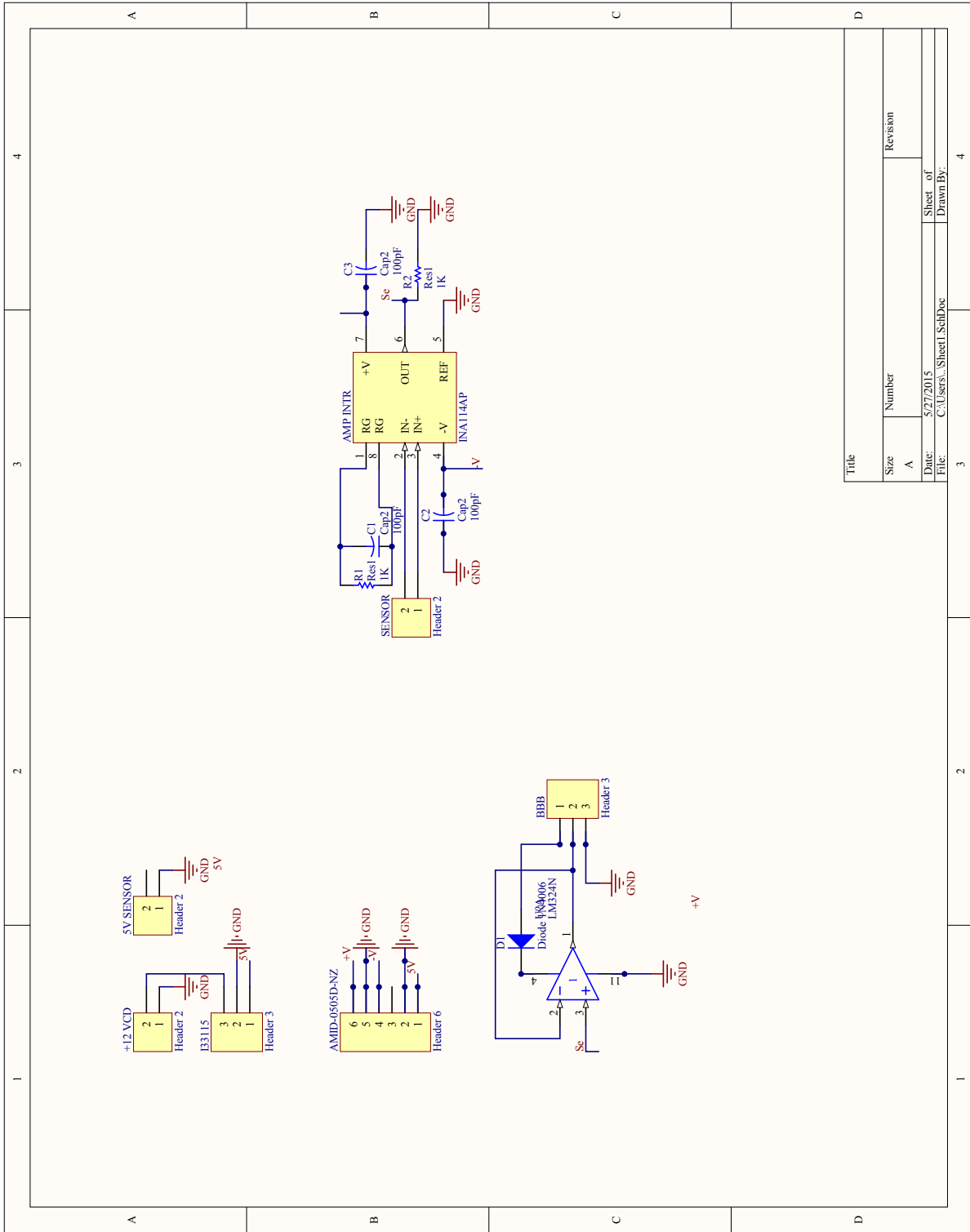


Figura B.1: Diagrama esquemático de tarjeta de expansión de sensor de fuerza.

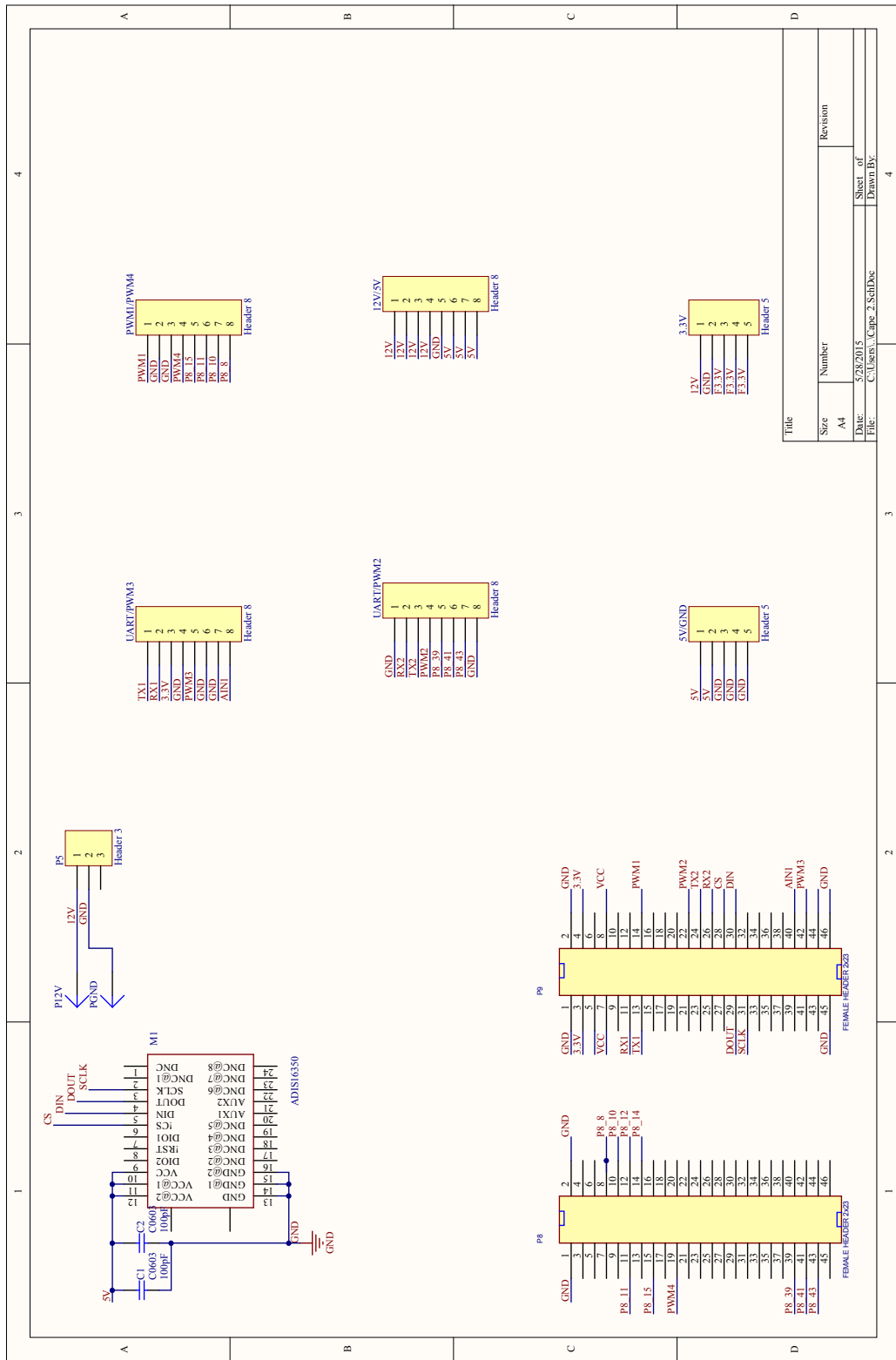


Figura B.2: Diagrama esquemático de tarjeta de expansión principal.

## Apéndice C

Diagramas de las abrazaderas para los  
motores laterales





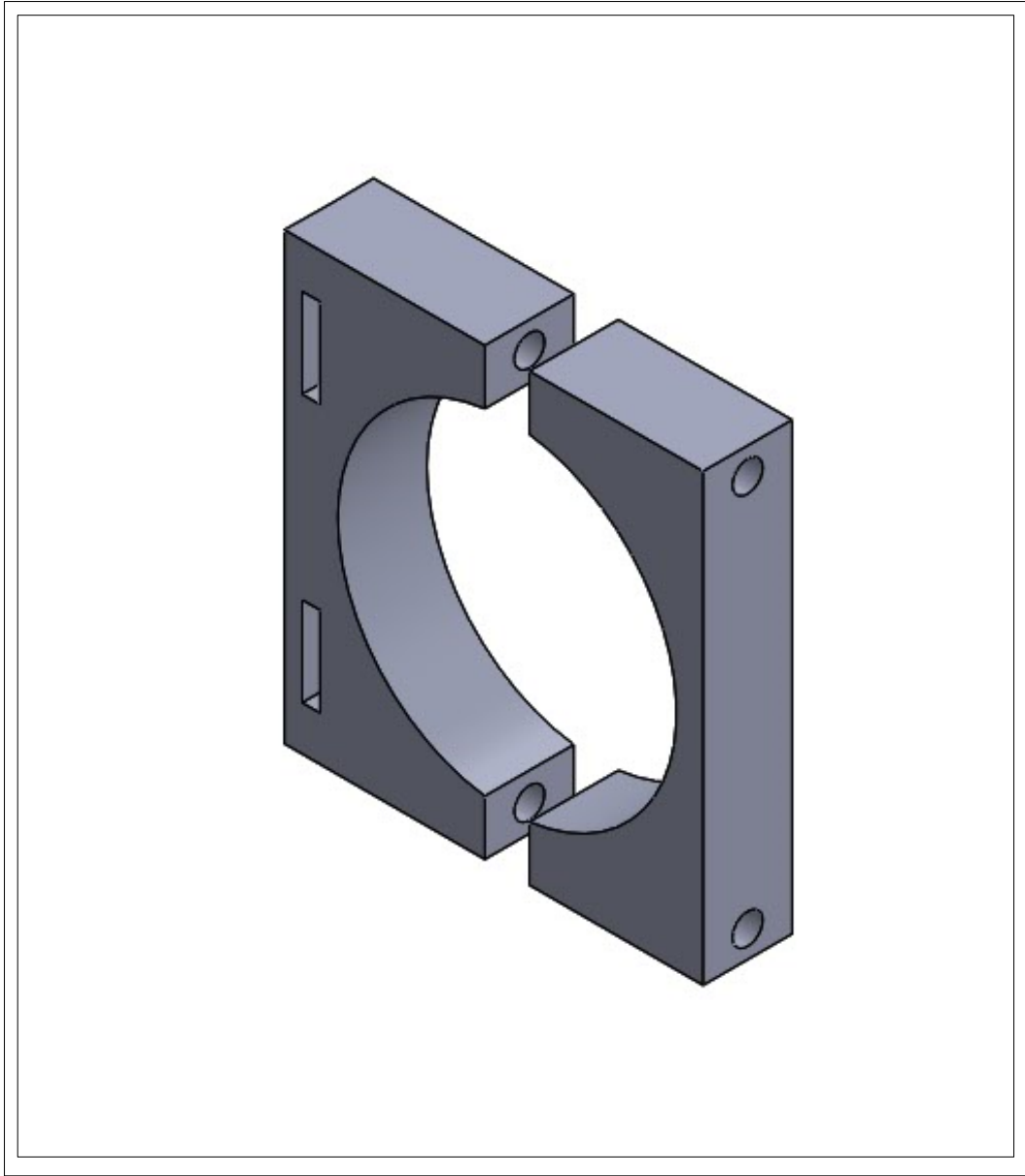


Figura C.2: Diagrama 3D de abrazadera para motores laterales.

# Bibliografía

- [1] G. Coley., *BeagleBone Black System Reference Manual*, Octubre 2013.
- [2] E. Nuño Ortega and L. Basañez Villaluenga, “Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente,” tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Abril 2004.
- [3] O. Domínguez Ramírez, “Diseño e integración de una interfase háptica realista,” memoria de examen predoctoral, Depto. Ing. Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México D. F., Febrero 2003.
- [4] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, pp. 494–501, 1989.
- [5] G. Niemeyer and J. J. Slotine, “Towards force-reflecting teleoperation over the internet,” *International Conference on Robotics and Automation*, 1988.
- [6] C. P. Sayers, R. P. Paul, and L. L. Whitcomb, “Teleprogramming for subsea teleoperation,” *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 23, Enero 1998.
- [7] R. C. Goertz and R. C. Thompson, “Electronically controlled manipulator,” *Nucleonics*, pp. 46–47, 1954.
- [8] J. T. Dennerlein, R. Howe, E. Shahoian, and C. Olroyd, “Vibrotactile feedback for an underwater telerobot,” *Robotics and applications*, pp. 244–249, 2000.

- [9] D.-S. Kwon, J.-H. Ryu, P.-M. Lee, and S.-W. , “Design of a teleoperation controller for an underwater manipulator,” in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, vol. 4, (San Francisco, CA), pp. 3114–3119, IEEE, Abril 2000.
- [10] J.-H. Ryu, D.-S. Kwon, and P.-M. Lee, “Control of underwater manipulators mounted on an rov using base force information,” in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 4, (Seoul, Korea), pp. 3238–3243, IEEE, Mayo 2001.
- [11] R. Mahony, F. Schill, P. Corke, and Y. Siang Oh, “A new framework for force feedback teleoperation of robotic vehicles based on optical flow,” in *In Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009 ICRA 09, IEEE, Kobe International conference center*, (Kobe, Japan), pp. 1079–1085, IEEE, Febrero 2009.
- [12] “Kraft robotic science and technology.” <http://krafttelerobotics.com>. Accessed: Enero 6, 2014.
- [13] “Novit technologies inc..” <http://www.novintcustom.com/index.php/underwater>. Accessed: Enero 7, 2014.
- [14] “The red sea robotis exploratorium.” <http://www.redsearobotics.net>. Accessed: Enero 9, 2014.
- [15] Thunder Tiger Corp., *Neptune Submarine KIT & SC*, 2013.
- [16] D. Cruz Mandujano, “Estrategia de control basada en una red neuronal artificial para un sistema autobalanceable,” Tesis de Maestria, Centro de Ingenieria y Desarrollo Industrial (CIDESI), Querétaro, Qro., Febrero 2014.
- [17] L. F. Zhijun Li and C. Yang, “Advanced control of wheeled inverted pendulum systems,” *Springer*, 2011.
- [18] T. I. Fossen, “Guidance and cotrol of ocean vehicle,” *Jonh Wiley*, 1999.

- [19] A. D. Hausen, *Predictive control and Identification Applications to steering dynamics*. PhD thesis, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, DTU, Richard Petersens Plads, Building 321, DK-2800 Kgs. Lyngby, 1996.
- [20] N. Popovich, S. Lele, and N. Garimella, “Submarine depth control,” in *In Proceedings of the 3rd WSEAS/IASME Int. Conf. on Electroscience & Technology For Naval Engineering*, (Greece), pp. 1–5, July 14-16 2009.
- [21] G. Ronquillo Lomeli, *Manual del participante ingenieria de control automático*, Marzo 2015.