

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

Sistema automático de estabilización para un vehículo  
submarino operado remotamente utilizando visión por  
computadora

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR:

Franco Hidalgo Herencia

ASESOR:

Gustavo Kato Ishizawa

JURADO:

Ericka P. Madrid Ruiz  
Julio C. Tafur Sotelo

Lima – Perú  
2012



## RESUMEN

TÍTULO: : Sistema automático de estabilización para un vehículo submarino operado remotamente utilizando visión por computadora

MAESTRÍA : Maestría en Ingeniería Mecatrónica

ASESOR : Dr. Gustavo Kato Ishizawa

PRESENTADO POR : Franco Hidalgo Herencia

---

Se presenta el diseño e implementación de un vehículo submarino operado remotamente con un sistema de estabilización automático. El vehículo submarino o ROV, por sus siglas en inglés (Remotly Operated Vehicle), tiene tres grados de libertad que le permiten realizar el movimiento arriba-abajo, adelante-atrás y el giro izquierda-derecha. El sistema de estabilización permite que el ROV se mantenga enfocado a un objetivo predeterminado y pueda seguirlo gracias a técnicas de visión por computadora que determinan la distancia y orientación del objetivo y, a un controlador de lógica difusa que gobierna un sistema de propulsión a chorro direccionado por un sistema de transmisión.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO 1

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
---------------------------	----------

Estado del Arte .....	2
-----------------------	---

### CAPÍTULO 2

<b>DISEÑO DEL VEHÍCULO OPERADO REMOTAMENTE.....</b>	<b>8</b>
---	----------

Objetivos .....	8
-----------------	---

Consideraciones.....	8
----------------------	---

Diseño Mecánico del Robot.....	10
--------------------------------	----

Sensores y Actuadores del Robot.....	14
--------------------------------------	----

Diseño Electrónico del Robot.....	17
-----------------------------------	----

### CAPÍTULO 3:

<b>VISIÓN POR COMPUTADORA Y SISTEMA DE CONTROL.....</b>	<b>29</b>
---	-----------

Visión por Computadora .....	29
------------------------------	----

Pre-procesamiento -Segmentación .....	30
---------------------------------------	----

Extracción de Características.....	32
------------------------------------	----

Sistema de Control .....	36
--------------------------	----

### CAPÍTULO 4

<b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
----------------------------------	-----------

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>54</b>
---------------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>
---------------------------	-----------

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

Existe un gran interés en el desarrollo de robótica submarina en el mundo, tanto desde el punto de vista de la investigación como en el de la industria. Cada vez se hace más común el uso de robots acuáticos para misiones de inspección de tuberías y del fondo marino. Además, también son utilizados para el monitoreo y mantenimiento de estructuras alejadas de la costa y en estudios biológicos.

Se vienen desarrollando vehículos submarinos manejados y autónomos cada uno con propósitos distintos debido a sus alcances y limitaciones. Los Vehículos submarinos Operados Remotamente, ROVs, por sus siglas en inglés (*Remotly Operated Vehicle*); son robots que navegan bajo el mar a grandes profundidades enviando imágenes de video hacia una estación de control en la superficie, muchas veces poseen sensores para monitoreo y manipuladores para tareas específicas. Los Vehículos Submarinos Autónomos, AUVs, por sus siglas en inglés (*Autonomous Underwater Vehicle*), cuentan con un nivel de automatización mayor debido a que la comunicación con la estación de control es limitada por la imposibilidad de transmitir grandes volúmenes de información sin cables bajo el agua.

En la mayoría de las aplicaciones de los ROVs, el vehículo es utilizado para explorar toda un área de interés hasta que el operario encuentre su objetivo; luego, el operario busca que el vehículo permanezca enfocando un objetivo mientras el mismo móvil, u otro equipo, realiza una tarea en particular como la toma de muestras, el manipuleo de herramientas o cualquier otra, dependiendo de la aplicación predefinida.

Para que el ROV permanezca enfocando en el objetivo, el operario tiene que estar verificando si el vehículo se encuentra correctamente posicionado o no, y realizar las correcciones de posición y orientación del ROV para mantener el enfoque en el objetivo. Esta tarea puede resultar complicada para el operario debido a la inercia del vehículo bajo el agua en cada corrección y a las perturbaciones que sufre el ROV (corrientes marinas o turbulencias de las embarcaciones). Además, se puede requerir que el objetivo esté enfocado por largos periodos de tiempo.

Para la presente tesis se plantea el diseño e implementación de un vehículo submarino controlado remotamente que realice el seguimiento de un objeto de interés

de forma automática. El nuevo diseño de un sistema automático de estabilización por video permitirá mejorar el monitoreo de objetivos bajo el agua a pesar de las perturbaciones que afecten al vehículo. El ROV se ha diseñado para poder sumergirse hasta una profundidad de tres metros.

La presente tesis está organizada en 4 capítulos. En este primer capítulo se introduce al tema y se hace referencia al desarrollo de tecnologías utilizadas actualmente. En el segundo capítulo se presenta el diseño del ROV, el cual se caracteriza por tener una estructura hermética que pueda alojar a los componentes electrónicos y sea capaz de poder navegar con 3 grados de libertad. Además se detallan los sensores y actuadores utilizados para proporcionar la capacidad de adquirir imágenes y auto-propulsarse. Por último se detallan las tarjetas y dispositivos de conexión electrónica que controlan a los actuadores y permiten la comunicación con la estación de control. En el capítulo 3 se presenta el sistema de visión por computadora y el sistema de control utilizado para el ROV. El objetivo del sistema de visión es poder detectar un objeto predefinido (en este caso, una esfera de color negro) bajo el agua y determinar los parámetros de distancia y ángulo de desviación que serán enviados como parámetros de entrada al sistema de control. El sistema de control recibe éstos parámetros y genera las señales de control para el control de los motores una vez aplicado el proceso de control difuso. En el capítulo 4, se realizan pruebas de funcionamiento del ROV en una piscina de pruebas. Se realizan y documentan pruebas para evaluar el funcionamiento de los algoritmos de visión por computadora y, del sistema de control. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

### **Estado del Arte**

Actualmente existe una gran variedad de ROVs y AUVs comerciales y en desarrollo por empresas y universidades en todo el mundo. Nuevos sistemas de propulsión se están desarrollando utilizando como modelos a las especies marinas.

El Istituto di Analisi Numerica, Pavia (CNR-IAN) ha desarrollado el *ROV ROMEO*. El ROV cuenta con una arquitectura modular que le permite cambiar de accesorios para diferentes tipos de trabajo. Cuenta con 4 propulsores verticales de propela en cada esquina de forma simétrica y alineados horizontalmente; y 4 propulsores en el plano horizontal, también simétricamente colocados con un ángulo de 45° hacia el centro del equipo [1]. El ROV ROMEO (Figura 1) ha sido probado en ambientes hostiles como la

antártida tele-maniobrándose remotamente a través de internet. Aplicaciones de visión por computadora también han sido realizadas en este ROV. Se ha realizado un sistema de visión por computadora para el movimiento en línea recta del ROV. En el trabajo realizado por Caccia [2] se menciona el uso de dispositivos de acústica para determinar el movimiento del ROV como una alternativa para la generación de su trayectoria y se presenta el sistema de visión como una alternativa que puede reemplazar a otros sistemas de navegación.



Figura 1: ROV Romeo. Desarrollo de robótica marina por el CNR-IAN.

La cámara, posicionada en el medio enfoca hacia el fondo del mar junto a 4 láseres fijos ubicados en cada esquina del cuadrado que escribe la cámara (Figura 2). Los haces de luz de los láseres marcan puntos en el fondo que permiten al sistema de visión capturar los puntos y procesarlos mediante triangulación con la finalidad determinar la forma y orientación del fondo marino. Ésta información permite que el ROV pueda estabilizarse de manera horizontal a través de una estructura de control en cascada (Figura 3). En el que se controla la posición del móvil incluyendo un lazo de control velocidad.

El lazo interno del sistema de control realiza un control de velocidad. Recibe como entrada la consigna de velocidad ( $\xi^*$ ) la cual se compara con la velocidad estimada por el el sensor de correlación óptico (OTCS) y es filtrado po un filtro rechaza banda (BSF) para eliminar la perturbación  $\eta_{\theta,\phi}$  modelada como una onda senoidal. La señal de control ingresa al modelo de la planta (S).

El lazo externo del sistema de control realiza el control de posición del móvil, el error de posición se obtiene restando la consigna con el resultado de integrar la velocidad



linal ( $\xi_m$ ), a la salida del sensor OTCS, y multiplicado por la matriz de rotación (L). La posición final del móvil se obtiene de forma similar que para el lazo de posición, pero esta vez, es la velocidad lineal del móvil a la salida de la planta ( $\xi_G$ ) la que se integra y multiplica por la matriz de rotación (L).

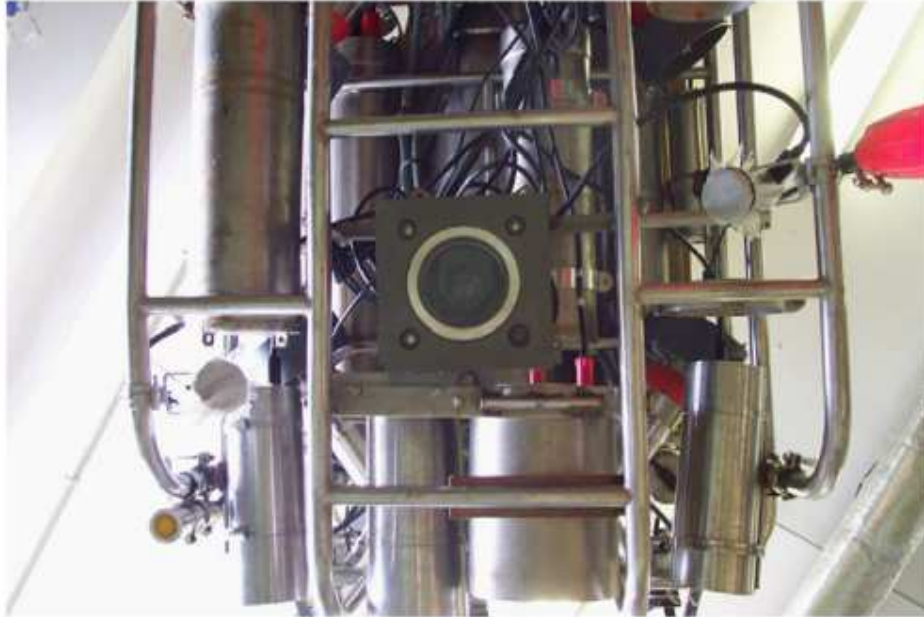


Figura 2: Cámara para control de navegación del ROMEO junto a 4 diodos láser

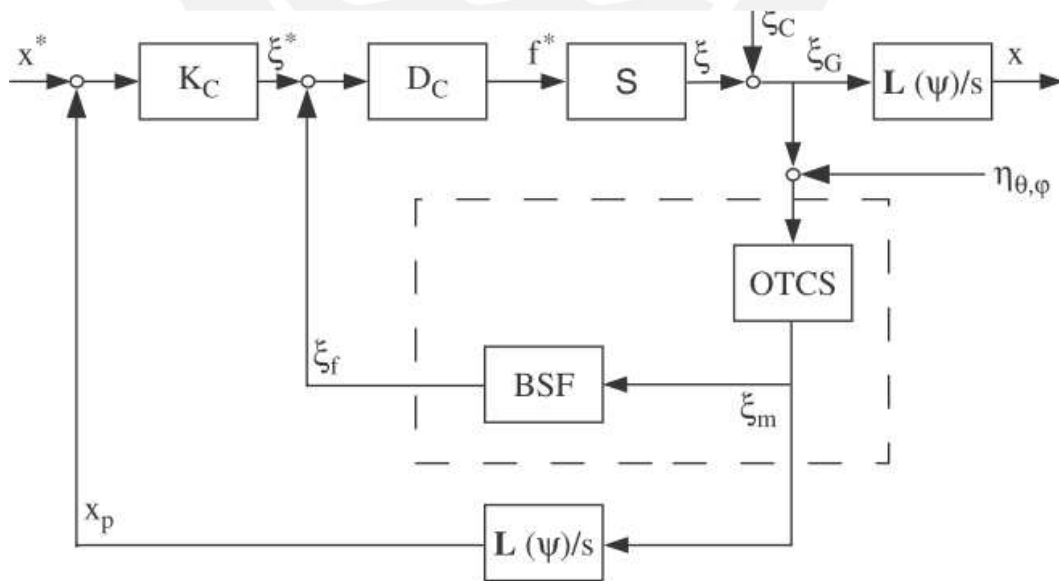


Figura 3: Lazo de control de navegación y dirección.

El sensor de correlación óptico es el componente que utiliza la cámara con los láseres para determinar la desviación del móvil. Se realizan tres procesos para este propósito: triangulación óptica láser – altímetro, estimación del movimiento a partir de regiones de interés y detección de regiones de interés y seguimiento (Figura 4).

En el proceso de triangulación se extrae la capa R de la imagen para detectar y realizar seguimiento de los puntos láser, debido a que los láseres son rojos. El sistema estima las coordenadas espaciales respecto al móvil con ayuda de un altímetro para mejorar la confiabilidad del resultado.

El detector y seguidor de regiones de interés filtra la imagen con un filtro 2D pasa altos para asentar los cambios bruscos de la imagen que representan grandes variaciones en la imagen y los toma como plantilla de la región de interés. Además, partiendo de la premisa que el movimiento del móvil es lento, se buscan las variaciones entre cuadros a partir de la correlación de la plantilla encontrada con la actual para realizar un seguimiento del patrón.

Estima el movimiento a partir del resultado de seguimiento de regiones de interés a partir del reconocimiento 3D de la profundidad de la imagen capturada en cuadros de imagen sucesivos.

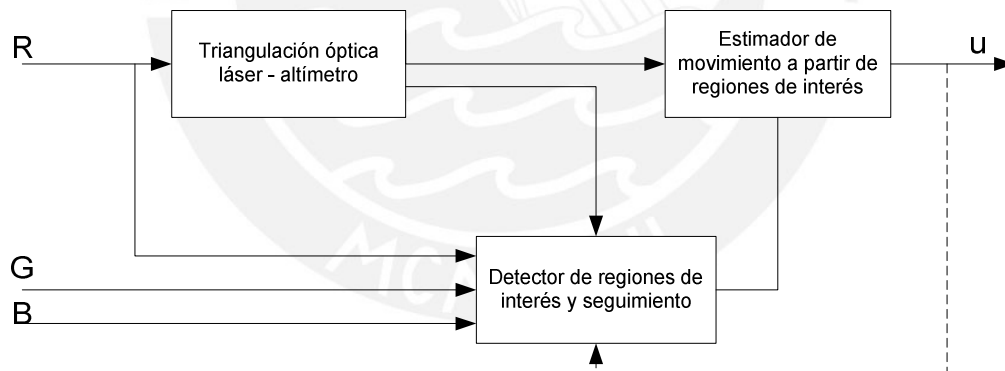


Figura 4: Diagrama de bloques simplificado de sensor de correlación óptico del ROMEO.

La compañía Festo en conjunto con *Evológic* está desarrollando ROVs y AUVs a partir del modelo funcional de la anatomía de especies marinas tales como pingüinos (AquaPenguin) y manta rayas (AquaRay). A través del desarrollo de músculos y tendones hidráulicos artificiales, permite imitar la propulsión de éstas especies casi perfectamente (Figura 5) [7].



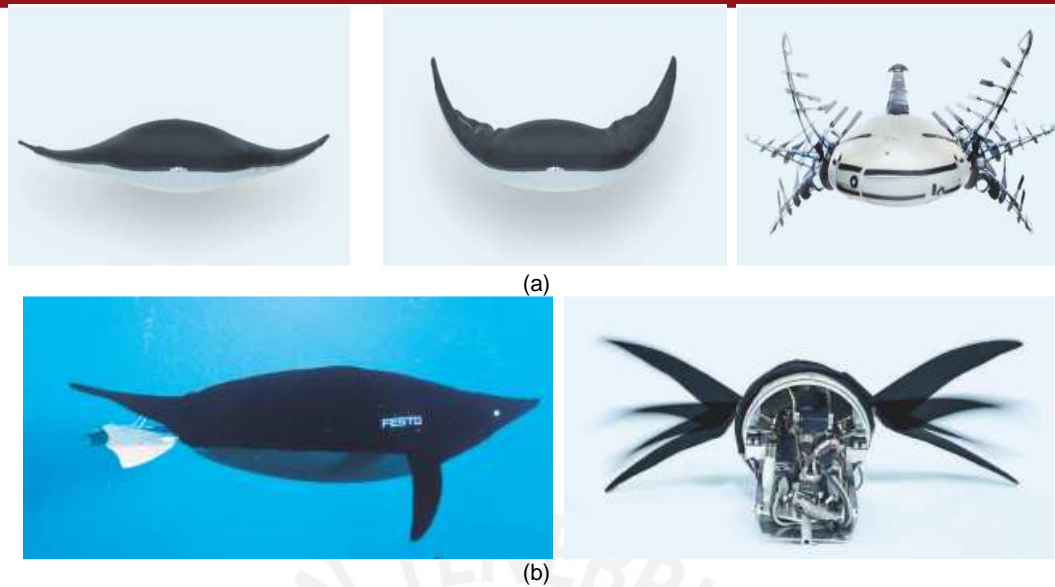


Figura 5: Desarrollo de robótica marina por Festo. (a) *AquaRay* (b) *AquaPenguin*

La mayoría de los ROVs utilizan como propulsores propelas manejadas por motores DC sin escobillas [1] [2]. En la Figura 6 se muestra el propulsor modelo 260 de la compañía Tecnydyne que produce gran variedad de propulsores desde propulsores pequeños como el de la Figura 6 que proporcionan un empuje de 5,4Kgf hasta propulsores que generan más de 200Kgf de empuje.



Figura 6: Propulsor modelo 260 de la compañía Tecnydyne

Estos propulsores acoplan de manera magnética la propela al sistema eliminando el eje rotatorio de un motor acoplado mecánicamente a la propela y, con esto, eliminando también los sellos de eje los que tienden a desgastarse con el tiempo [9].

Estos propulsores son capaces de generar empuje hacia adelante o hacia atrás. En la mayoría de modelos el empuje hacia adelante es mayor que el empuje generado en reversa. Las propelas mayormente están hechas de nylon para minimizar el peso del propulsor pero, también pueden ser de bronce con la finalidad de mejorar el desempeño del propulsor en reversa.

El propulsor mostrado necesita de 325Watts de potencia eléctrica para su funcionamiento, funciona con suministro de energía en DC entre 24VDC y 150VDC.

Adicionalmente, necesita un suministro aislado de 12VDC – 200mA para energizar la instrumentación del propulsor, y la velocidad de giro es comandado por señales entre  $\pm 5$ VDC.

El concepto de utilizar visión por computadora como se plantea en [2] abre las posibilidades de también utilizar la visión artificial para realizar seguimiento a objetivos de interés, no sólo para estabilidad horizontal cuando se está cerca al fondo marino, sino, cuando se quiere realizar seguimiento de un objetivo específico.

El sistema de control que se plantea en [2] es un sistema de complejidad media basado en el modelo del móvil, como se documenta en [1] y en [3] el modelamiento de un ROV es bastante complejo y siempre existen comportamientos erráticos que dificultan el control basado en modelos. Se plantea entonces un sistema de control basado en el comportamiento real del ROV.

Los propulsores utilizados en los ROVs son costosos, demandan gran cantidad de potencia eléctrica y generan distintos empujes para avance directo e inverso. Para el prototipo funcional no será necesaria gran cantidad de potencia por lo que se plantea generar el empuje a través de chorros creados por bombas sumergibles y un sistema de transmisión que hace que las bombas giren por lo que se genera el mismo empuje tanto como en directa o inversa del ROV.



## CAPÍTULO 2

### DISEÑO DEL VEHÍCULO OPERADO REMOTAMENTE.

Se diseña un robot móvil sumergible con la capacidad de navegar bajo el agua a profundidades bajas (máximo 3m). El robot se puede controlar de forma remota a través de una PC y tiene un modo automático de seguimiento de un objeto a través de visión por computadora gracias a una cámara de video incorporada. El concepto de solución del móvil desarrollado en el ANEXO I: “Diseño del ROV a partir de la ‘Metodología de Diseño Mecatrónico’” se diseña para satisfacer los objetivos de la tesis los que se presentan a continuación:

#### **OBJETIVOS:**

##### **Objetivo General:**

Diseñar e implementar un sistema automático de estabilización para un vehículo submarino operado remotamente utilizando visión por computadora.

##### **Objetivos Secundarios:**

- Implementar un prototipo de vehículo submarino operado remotamente para profundidades menores a tres metros controlado por un mando de control desde la superficie y que posea una cámara integrada.
- Implementar un algoritmo que identifique en una imagen de video una forma geométrica predeterminada.
- Implementar un algoritmo que determine la dirección y la profundidad del movimiento de la forma geométrica en la imagen de video a partir de un fotograma seleccionado.
- Implementar un algoritmo de control basado en el movimiento registrado de la forma geométrica para estabilizar el vehículo submarino a partir de un fotograma seleccionado.
- Realizar pruebas controladas del vehículo para medir su performance.

#### **Consideraciones:**

Se determinan una serie de consideraciones previas para el diseño del robot, las cuales se detallan a continuación.

#### Generales:

- Fuente de suministro eléctrico: la energía eléctrica se obtiene de la estación de control mediante cables unidos a dos fuentes de voltaje eléctrico.
- Medio de trabajo: Acuático – Piscina de pruebas

#### Sistema de navegación: permite que el móvil se desplace bajo el agua.

- Entrada: Instrucción de mando
- Cinemática: tres grados de libertad:
  - Desplazamiento hacia adelante y atrás
  - Desplazamiento hacia arriba y abajo
  - Giro hacia la izquierda y derecha
- Empuje: el empuje se obtendrá mediante propulsores sumergibles
- Control: control manual y automático del móvil

#### Control automático - Seguimiento: determina el movimiento del objeto a seguir y envía datos de las variables de interés al sistema de control.

- Entrada: imágenes de video y señal de referencia (consigna).
- Pre-procesamiento: segmentación de la imagen
- Extracción de características: cálculo del ángulo y la distancia
- Salida: instrucciones - estado de las variables de control

#### Estación de control: Controla la navegación del robot móvil

- Función específica: interfaz de usuario que permite el cambio entre navegación manual / navegación automática.
- Entrada: comandos del operador.
- Salida: instrucciones de mando e interfaz usuario

#### El diseño del móvil se presenta en tres partes interrelacionadas en el proceso de diseño:

- Diseño mecánico del robot
- Sensores y actuadores del robot
- Diseño electrónico del robot

## Diseño Mecánico

Se diseñó el ROV para que pueda sumergirse hasta tres metros de profundidad en agua (29,42KPa o 0.29bars de presión hidrostática) y mantenga aislado a los equipos electrónicos del medio acuático. Además, se diseñó para que brinde soporte a los sensores, actuadores, tarjetas electrónicas y dispositivos accesorios. Los planos completos se encuentran en el ANEXO II: Planos del ROV.

El diseño propuesto, según el desarrollo de la metodología de diseño mecatrónico (ANEXO I), se basa en tubos redondos y bridas que crean una cámara hermética y aíslan a los dispositivos electrónicos del agua. Además de una estructura externa de tubos cuadrados y redondos para dar soporte a unas boyas de flotación que compensan el peso del equipo para mantener una flotabilidad positiva.

El ROV se diseñó en acero inoxidable 304 por presentar una alta resistencia a la corrosión. El acero en base a Ni-Cr con bajo contenido de carbono es recomendado para el prototipo. Los tubos poseen un espesor de 1/16" (15.875mm), un diámetro interno de 104.78mm, y las bridas, de 1/8" de espesor, son de un diámetro de 3/4" mayor al diámetro interior del tubo. Las propiedades del acero inoxidable 304 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades del acero inoxidable 304

<b>Propiedades mecánicas</b>	Resistencia a la fluencia 310MPa Resistencia máxima 620MPa Módulo de elasticidad 200MPa
<b>Propiedades físicas</b>	Densidad 7,8 g/cm <sup>3</sup>

La presión hidrostática máxima que puede soportar el tubo se halla con la fórmula de Barlow [10]:

$$P = 2 \cdot S \cdot \frac{t}{D} \quad (2-1)$$

Donde: *P*: Presión Hidrostática (Pa)  
*S*: Tensión en la Pared del Tubo (Pa)  
*t*: Espesor (m)  
*D*: Diámetro exterior (m)

Reemplazando el valor de la tensión en la pared del tubo por la mitad del límite de elasticidad del acero 304 se calcula la presión hidrostática máxima que soporta el tubo como sigue:

$$P = 2 \cdot \frac{200}{2} \text{ e6 } x \frac{15.875e-3}{104.78e-3} = 3,102 \text{ MPa}$$

Realizando el cálculo se obtiene que la presión hidrostática máxima que soporta el tubo es de 3,102MPa, valor que supera por más de 100 veces el valor requerido.

Se propuso el uso de dos propulsores para generar el empuje necesario para la navegación del móvil de acuerdo al concepto propuesto (ANEXO I). Para usar los mismos propulsores para el avance y el hundimiento del ROV, se planteó también que los propulsores puedan girar por un actuador conectado a un sistema de transmisión (Figura 7.a -1). Bajo esta idea, se decidió dividir el cuerpo hermético en dos tubos conectados mediante bridas: uno de los tubos para el sistema de transmisión de los propulsores y, el otro, para los dispositivos electrónicos.

El tubo que lleva la transmisión de los propulsores (Figura 7.a -2) contendrá también la cámara de video y será sellado por un visor que posee un vidrio templado que permite la visibilidad de la cámara. El otro tubo (Figura 7.a -3), tendrá en la tapa una prensa-estopa, por donde irán los cables de alimentación eléctrica y de comunicación entre el ROV y la estación de control.

Se utilizan retenes de goma natural para la unión entre las bridas. Además de cordones de amianto grafitado para la prensa-estopa y los sellos del eje de transmisión del giro de los propulsores.

El equipo en seco tiene un peso total de 10,5Kg y tiene un volumen de 0,00024m<sup>3</sup> lo que genera un empuje de 2,4Kg fuerza el cual no es suficiente para mantener a flote el ROV, por lo que se le agregan 4 bollas que brindan un empuje aproximado de 2.5Kg fuerza, con lo que el ROV siempre estará a flote. Para que se regular la profundidad se sumersión se tendría que modificar las bollas para lograr una flotabilidad casi neutra controlable por los propulsores. Para los casos documentados, el ROV se sumerge hasta llegar a un equilibrio de flotación debido a la poca profundidad del campo de pruebas. En la figura 7 se muestra el ensamble completo del ROV y en las figuras 8, 9 y 10 se detalla la construcción de los sellos en vistas de explosión.



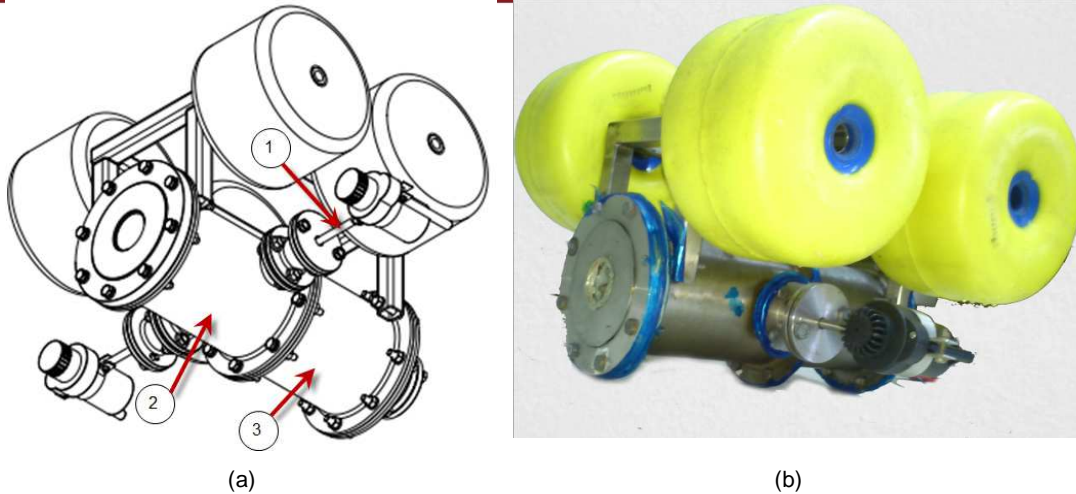


Figura 7: ROV completo. (a) Diseño con detalle interior: 1- Sistema de transmisión, 2- Estructura principal, 3- Estructura posterior (b) Foto de ROV real.

En la Figura 8 se observa el detalle de explosión del eje que sostiene a los propulsores, mostrando los elementos que se acoplan al eje y los que conforman el sello que hermetiza al equipo. Los elementos se detallan a continuación:

- 1) Eje de transmisión
- 2) Soporte para rodamiento
- 3) Rodamiento de bolas
- 4) Arandela Seeger para sujetar rodamiento
- 5) Arandela Seeger para fijar eje
- 6) Retén de goma natural
- 7) Contracara de sello de retén y alojamiento de sello de amianto.
- 8) Sello de amianto
- 9) Prensador para sello de amianto
- 10) Abrazadera para propulsor
- 11) Propulsor

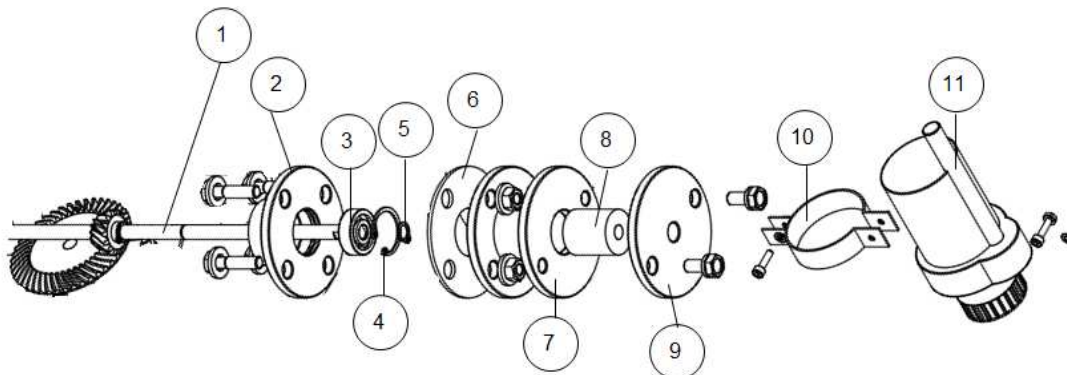


Figura 8: Detalle de explosión de eje de transmisión.

Otro punto a detallar es la tapa posterior del ROV (figura 9) que presenta una prensa-estopa para los cables. El detalle de los elementos se presenta en la vista de explosión de la figura 9. Los elementos se detallan a continuación:

- 1) Prensador para sello de amianto
- 2) Sello de amianto
- 3) Tapa con varillas para tarjeta y alojamiento para sello de amianto
- 4) Retén de goma natural
- 5) Tubo cilíndrico con brida

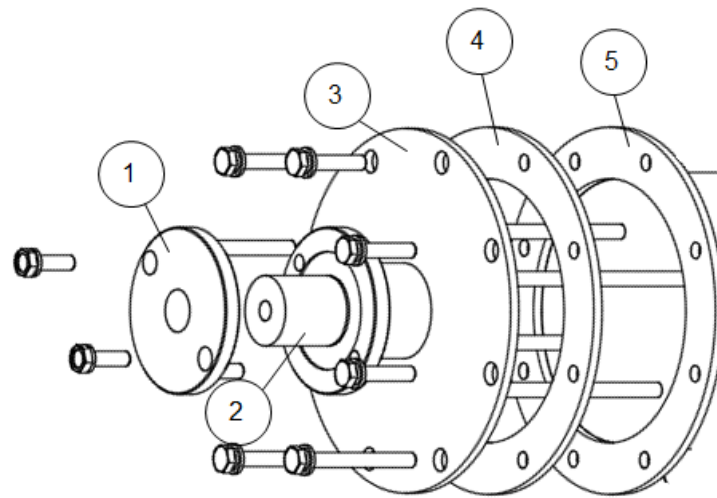


Figura 9: Detalle de explosión de tapa posterior.

La parte frontal del ROV cuenta con un visor que se detalla en la figura 10 y cuenta con los elementos siguientes:

- 1) Tubo cilíndrico
- 2) Retén de goma natural
- 3) Base de visor
- 4) Retén de goma natural
- 5) Vidrio templado
- 6) Retén de goma natural
- 7) Tapa de visor

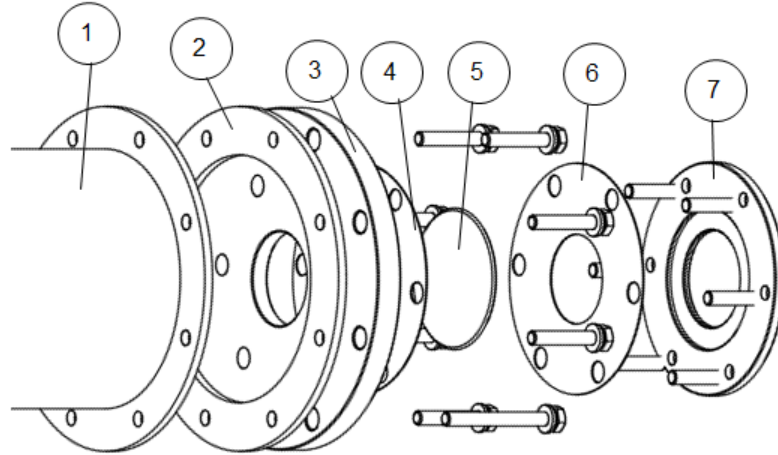


Figura 10: Detalle de explosión de visor – tapa frontal.

**Sensores y Actuadores**

**Propulsor:**

Para seleccionar un propulsor es necesario conocer el empuje mínimo necesario que debe proporcionar. Para este cálculo parte de la premisa de que la fuerza más importante que actuará en contra del movimiento del ROV será la fuerza de fricción [1]. Para el cálculo preliminar de esta fuerza se aproxima el ROV como una sucesión de 3 esferas de 10cm de diámetro (lo cual representa el cuerpo principal) y se calcula la fuerza de rozamiento de forma independiente para una de ellas (Figura 11) mediante la fórmula de Stokes de la ecuación (2-2) [10]

$$F_r = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho_f \cdot A \cdot v^2 \tag{2-2}$$

Donde:  $C_d$ : Coeficiente de arrastre  
 $\rho_f$ : Densidad del fluido  
 $A$ : Área del objeto  
 $v$ : Velocidad del objeto

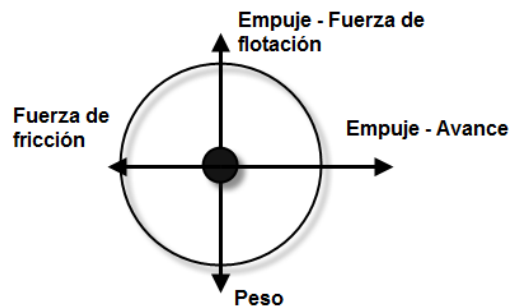


Figura 11: Diagrama de cuerpo libre simplificado

Para definir el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) es necesario saber el número de Reynolds ( $Re$ ) el cual se define en la ecuación (2-3) [10]:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot l \cdot v}{n} \quad (2-3)$$

Para el agua a 22°C la densidad es de 1000Kg/m<sup>3</sup> y su viscosidad dinámica ( $n$ ), es de 0,000955Kg/(m.s). Calculando para una velocidad de 0.1m/s se obtiene que el número de Reynolds es de 10471,204. Para valores de Reynolds entre 1000 y 200000, el coeficiente de arrastre se puede aproximar a 0,4 [10]. Entonces, según el cálculo la fuerza de rozamiento para una esfera es de 0,015707963N.

$$F_r = 0,2 * 1000 * \pi * 0,05^2 * 0,1^2 N = 0,0015707963N$$

Por lo cual, para 3 esferas sería

$$F_r \text{ total} = 3 \cdot 0,0015707963N \cong 0,05N$$

Finalmente, se buscó un propulsor que entregue un empuje mayor a 0,05N como la bomba modelo 38-11 de la marca “Dongguan Zhonglong Motor & Electric Appliance Manufactor CO” compañía que ofrece gran variedad de modelos compactos de bombas sumergibles que se energizan con voltaje DC. Esta es una bomba sumergible de motor DC sin escobillas y sus características se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Características del propulsor

<b>Propulsor</b>	
	
Característica	Descripción
Modelo	38-11
Dimensiones	110*49*57 mm
Diámetro de entrada exterior	33mm
Diámetro de salida exterior	11mm
Diámetro de salida interior	6,5mm
Elevación estática	6m
Flujo estático	6 L/min
Adicional	La salida cuenta con banda antideslizante
Corriente	1A @ 24VDC

### Cálculo de empuje del propulsor:

Se calcula el empuje que puede proporcionar la bomba con las especificaciones técnicas anteriormente mencionadas. El empuje se calcula según la ecuación (2-4) [10].

$$E = \rho_{agua} \left( \frac{Kg}{m^3} \right) \cdot A(m^2) \cdot V^2 \left( \frac{m^2}{s^2} \right) \quad (2-4)$$

Donde:

*E*: Empuje

$\rho_{agua}$ : Densidad del agua

*A*: Área de salida de propulsor

*V*: Velocidad de flujo de salida de la bomba

La velocidad del flujo de salida se calcula con la ecuación (2-5) [10]:

$$V \left( \frac{m}{s} \right) = \frac{Q \left( \frac{m^3}{s} \right)}{A(m^2)} \quad (2-5)$$

Donde:

*V*: Velocidad de flujo de salida de la bomba

*Q*: Caudal de flujo de salida de la bomba

*A*: Área de salida de propulsor

Con las ecuaciones (2-4) y (2-5) obtenemos que el empuje de una bomba es de 0.301N. Este valor supera en 6 veces el valor estimado lo que asegurara un correcto funcionamiento.

### Servomotor

El servomotor se encarga del giro de los propulsores para cambiar la dirección del movimiento del ROV. Se realizaron experimentaciones preliminares para determinar el torque necesario para el giro del eje con los sellos de amianto debido a que se prefirió obtener el valor real de torque necesario en la práctica, a estimarlo mediante cálculos ya que la presión ejercida por los sellos de amianto utilizados es relativa al ajuste de los pernos del sello. El experimento se realizó con un dinamómetro para medir la fuerza necesaria para hacer girar el eje a 3 cm del centro de éste. La fuerza promedio necesaria para girar el eje fue de aproximadamente 1Kgf (9,807N). De esta manera se determina que el torque necesario es de 3Kgf.cm (0.294N.m).

Se seleccionó el servomotor modelo MG996R por cumplir con los requisitos, ser de bajo costo y se presentar un eje de metal, comúnmente son de plástico, sus características se presentan en la Tabla 3. Considerando además que el servomotor está conectado al eje mediante unos engranajes helicoidales con una relación de 1 a 3.5 que permite que los propulsores giren 270° sin problemas, lo que hace que el torque necesario sea de 10,5Kgf-cm (1,03N.m).



Tabla 3: Características del servomotor MG996R

Servomotor MG996R	
	
Característica	Descripción
Peso	80g
Torque en estado estable	10Kgf/cm (0,981N.m) @4,8V 10,7Kgf/cm (1,049N.m)
Voltaje de operación	4,8 – 7,2 V
Corriente	1A

### Cámara de video

Según el concepto de solución (ANEXO I) Se propone el uso de una cámara web de bajo costo, tamaño pequeño. Además que la superficie de la cámara sea plana, para poder adosarla al visor del ROV. La resolución no es un factor crítico para el desarrollo del ROV ya que se trabaja en un campo de pruebas limitado a 2 metros en los que el objeto de interés siempre ocupa una porción significativa de la imagen. Se utilizó entonces la webcam Logitech C510 cuyas características se presentan en la tabla 4.

Tabla 4: Características de la cámara Logitech C510

Cámara Logitech C510	
	
Característica	Descripción
Resolución de video	HD 1280 x 720 píxeles
Resolución de fotos	8 Mega píxeles

Las pruebas se realizan al aire libre para simular las condiciones del ambiente de trabajo de un ROV. Bajo estas circunstancias la mayor fuente de luz es el sol, adicionar lámparas de luz artificial en este contexto es irrelevante pues prevalece la iluminación generada por el sol. A pesar de esto, se hicieron pruebas iluminando al objetivo desde fuera del ambiente de pruebas con 2 reflectores de 500W sin obtener ninguna mejora considerable en la calidad de las imágenes. Para trabajos del ROV a profundidades en las que no llega la iluminación del sol se debe considerar iluminación artificial generando escenas controladas para el procesamiento de imágenes.



## Diseño Electrónico

Se diseñó un sistema de comunicación que permita la comunicación entre el ROV y la PC de la estación de control de acuerdo al concepto diseñado en el ANEXO I. Se diseñaron dos circuitos electrónicos como controladores para los propulsores del ROV. De esta manera el operador o el sistema de control en la PC, pueden comandar al ROV a distancia controlando cada uno de los propulsores y el servomotor independientemente. El diagrama de bloques de la figura 12 muestra las partes del sistema diseñado.

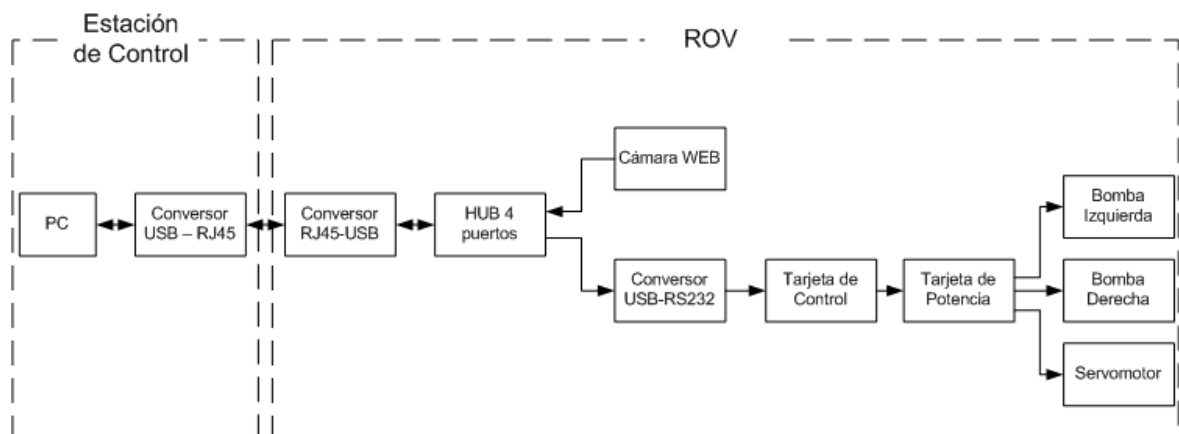


Figura 12: Diagrama de bloques diseño electrónico

### Dispositivos de comunicación

Del concepto de solución seleccionado (ANEXO I) se determina que la cámara a utilizar utiliza comunicación USB, además, la comunicación entre la estación de control y el ROV será de forma serial RS232. Se seleccionaron dispositivos accesorios para la correcta comunicación entre el ROV y la estación de control remota. El uso del dispositivo de conversión USB-RJ45 permite extender la distancia de operación de los dispositivos USB permitiendo tener un cable de hasta 45m de longitud. En el diseño del circuito de control se describen los requerimientos mínimos para la comunicación serial los cuales son cubiertos por una comunicación serial estándar, más aún, sobre USB. Las características de los dispositivos se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5: Detalle de dispositivos accesorios

Dispositivo	Características
Dispositivo de conversión USB – RJ45	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite localizar un dispositivo USB o HUB hasta 45 metros de la computadora con un cable CAT5/5E/6.</li> <li>• No necesita drivers adicionales</li> <li>• Consiste en 2 piezas: un terminal maestro y un terminal remoto.</li> <li>• Cumple con estándares de transmisión USB 1.1.</li> </ul>
Cable de conversión USB-RS232	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumple con estándares de transmisión USB 2.0 y USB 1.1.</li> <li>• Tasa de transferencia de hasta 1MBps</li> <li>• Se utilizó para la comunicación con el microcontrolador, debido a que éste permite comunicación serial RS-232 y no directamente por USB.</li> </ul>
HUB 4 puertos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumple con estándares de transmisión USB2.0/USB1.1/USB1.0</li> <li>• Soporta velocidades de 12Mbps y 1.5Mbps.</li> <li>• Se utilizó para establecer la comunicación con el microcontrolador y con la cámara WEB a través de un solo cable.</li> </ul>

### **Circuitos electrónicos**

Se diseñaron dos tarjetas electrónicas para el ROV, una tarjeta de control gobernada por un microcontrolador para la comunicación con la PC y la tarjeta de potencia. La tarjeta de potencia recibe las señales de control y comanda a los actuadores. Ambas tarjetas se encuentran aisladas eléctricamente por lo que se requieren dos fuentes de alimentación independientes para el correcto funcionamiento del equipo. El aislar eléctricamente ambas etapas evita que el ruido eléctrico y los posibles picos de voltaje y de corriente de la tarjeta de potencia afecten la comunicación de la tarjeta de control con la PC.

#### a) Circuito de Control:

El circuito de control permite la comunicación entre el ROV y la estación de control por medio de comunicación serial. Este circuito recibe los parámetros de potencia de cada motor y del servomotor por esta comunicación y envía las señales de control correspondientes al circuito de potencia.

La comunicación serial puede controlar 3 actuadores distintos debido a que se establece el siguiente protocolo de comunicación: Si el dato numérico enviado se encuentra entre 1 y 3, indica que el dato siguiente va a modificar un parámetro determinado según la relación que se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Detalle de funcionamiento de interfaz de tarjeta de control

Dato	Parámetro a modificar	Rango de entrada y salida	Pin de salida - Microcontrolador
1	Servomotor	Entrada: Dato entre 10 – 255 Salida: Onda de 50Hz con ciclo de trabajo entre 1 y 2ms	PB1
2	Potencia de propulsor izquierdo	Entrada: Dato entre 10 – 110 Salida: Onda de 402Hz con ciclo de trabajo entre 0 y 100%	PB2
3	Potencia de propulsor derecho	Entrada: Dato entre 10 – 110 Salida: Onda de 402Hz con ciclo de trabajo entre 0 y 100%	PC2

Según el diseño de los sensores y actuadores la cámara opera a 15 cuadros por segundo. Además, según el protocolo anteriormente descrito se necesitan 2 bytes para mandar una instrucción a determinado actuador. Para poder enviar señales de control cada vez que se procese un cuadro será necesario enviar 90 Bytes por segundo (15 cuadros/s x 2 Bytes/actuador x 3 actuadores). Si se establece un bit de paridad y un bit de inicio para la trama de datos se tiene que es necesaria una velocidad mínima de transmisión de 900bps. Se elige una velocidad estándar de comunicación superior a 10 veces lo requerido equivalente a 9600 Baudios por segundo.

El circuito es manejado por un microcontrolador el cual debe cumplir con los requerimientos mínimos de la tabla 7:

Tabla 7: Detalle de funcionamiento de interfaz de tarjeta de control

ENTRADAS		SALIDAS	
Cant.	Descripción	Cant.	Descripción
1	Rx Comunicación serial – PC	1	Tx Comunicación serial - PC
1	Reset	1	LED indicador
		6	Propulsores (1bit Habilitador y 2bits Control de giro por cada propulsor)
		1	PWM por hardware para servomotor
		1	Lámpara de atención
<b>TOTAL</b>			
2		10	
<b>TOTAL E/S</b>			
12			

Los componentes principales de la tarjeta de control y las características más relevantes para el proyecto se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Justificación de componentes principales – Tarjeta de Control

Componente	Característica
Microcontrolador ATMEGA-8	Reloj de trabajo de 8MHz 32 entradas/salidas programables Comunicación serial acepta 9600 baudios por segundo. Interrupciones de comunicación serial (Transmisión y Recepción) mejoran la performance del sistema. Generación de PWM por hardware lo que permite tener una señal de alta frecuencia de gran precisión. Temporizador que permite distribuir la ejecución del programa de forma programada gracias a las interrupciones que presenta: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interrupción de temporizador comparación exitosa.</li> <li>• Interrupción de temporizador desborde de cuenta.</li> </ul>
MAX232 - Acondicionador de señales. Comunicación serial.	Permite el acondicionamiento de señales del microcontrolador para la comunicación serial con la PC.

El microcontrolador se programa en el entorno de programación VMLAB el cual permite simular el programa mientras se ejecuta instrucción por instrucción, lo que facilita la depuración del programa.

Para mejorar la eficiencia del uso de los recursos se aprovecha de las interrupciones del temporizador y de la comunicación serial. De esta forma el programa principal sólo configura las interfaces y los módulos internos, y la ejecución del programa se realiza en las interrupciones. En la Figura 13 se muestra el diagrama de bloques del programa principal en el que se configura la comunicación serial a 9600 baudios por segundo, el temporizador 2 (*Timer 2*) de modo que se tengan interrupciones cíclicas y el temporizador 1 (*Timer 1*) para generar ondas PWM para controlar al servomotor.

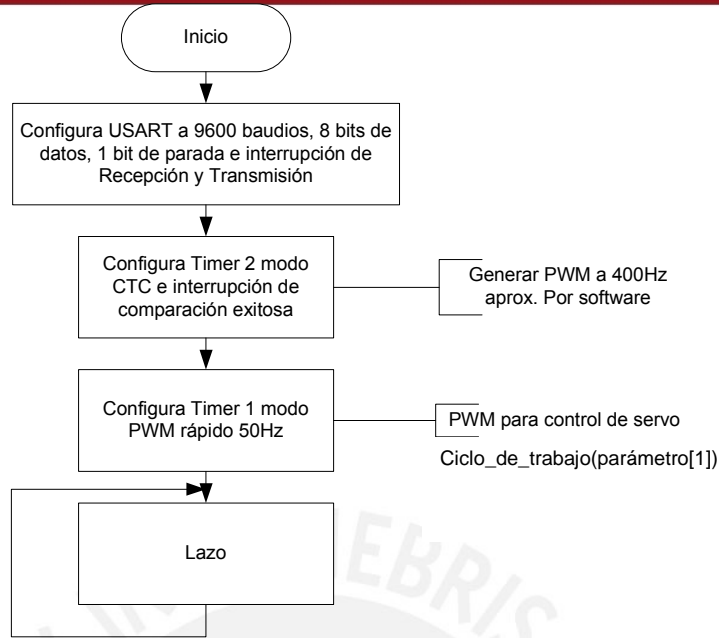


Figura 13: Diagrama de flujo programa principal

En la figura 14 se desarrollan los diagramas de bloque de las interrupciones de recepción de datos y del temporizador 2. En la rutina de interrupción de recepción de datos se direcciona al parámetro correspondiente si el dato que llega es menor que 10, en caso contrario se descuenta 10 y se actualiza el parámetro de respectivo. En la interrupción del temporizador 2 se generan ondas PWM según los parámetros recibidos en la comunicación serial.

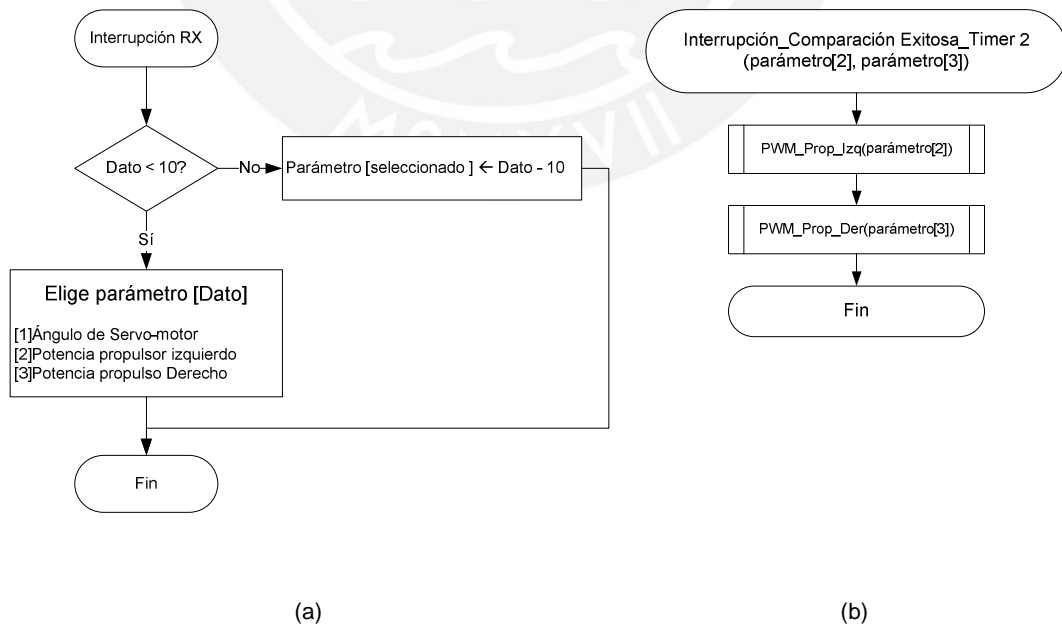


Figura 14: Diagrama de flujo de subrutinas de interrupción de recepción de transmisión serial (a) y comparación exitosa (b)

En la figura 15 se muestran las señales de control simuladas en el programa VMLAB.

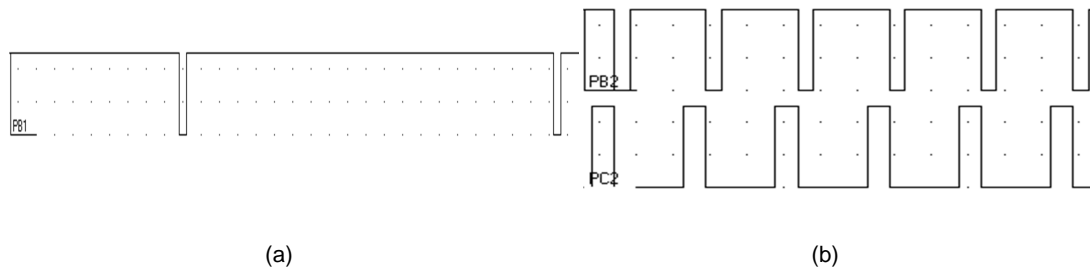


Figura 15: Simulación de señales de control generadas. (a) PB1 - señal de control de servomotor (50us por división) (b) PB2 y PC2 – señales de control de propulsores (1ms por división)

En la tabla 9 se muestra el detalle de los componentes de la tarjeta de control y en la figura 16 se muestra el diagrama esquemático de la tarjeta.

Tabla 9: Detalle de componentes – Tarjeta de Control

Cant.	Valor	Dispositivo	Nombre en Diagrama
1	F09HPS	Conector DB9 hembra	X1
2	W237-102	Pulsador	X5-12V
1	0.1uF	Capacitor Electrolítico	C11
1	0.33uF	Capacitor Electrolítico	C10
1	1N4004	Diodo	D2
2	1k	Resistencia 1/4W	R2,R13
6	1u	Capacitor Electrolítico	C1,C12,C13,C14,C15,C16
1	8MHz	Cristal resonador	Q2
3	22-23-2021	Molex de 2 pines	X2,X3,X8
3	22-23-2031	Molex de 3 pines	X4,X6,X7
2	22p	Capacitor cerámico	C7,C8
1	7805TV	Regulador de voltaje 5V	IC6
1	MAX232	Acondicionador de señales. Comunicación serial.	IC7
1	MEGA8-P	Microcontrolador ATMEGA-8	IC5
1	USB	LED 5mm	LED4



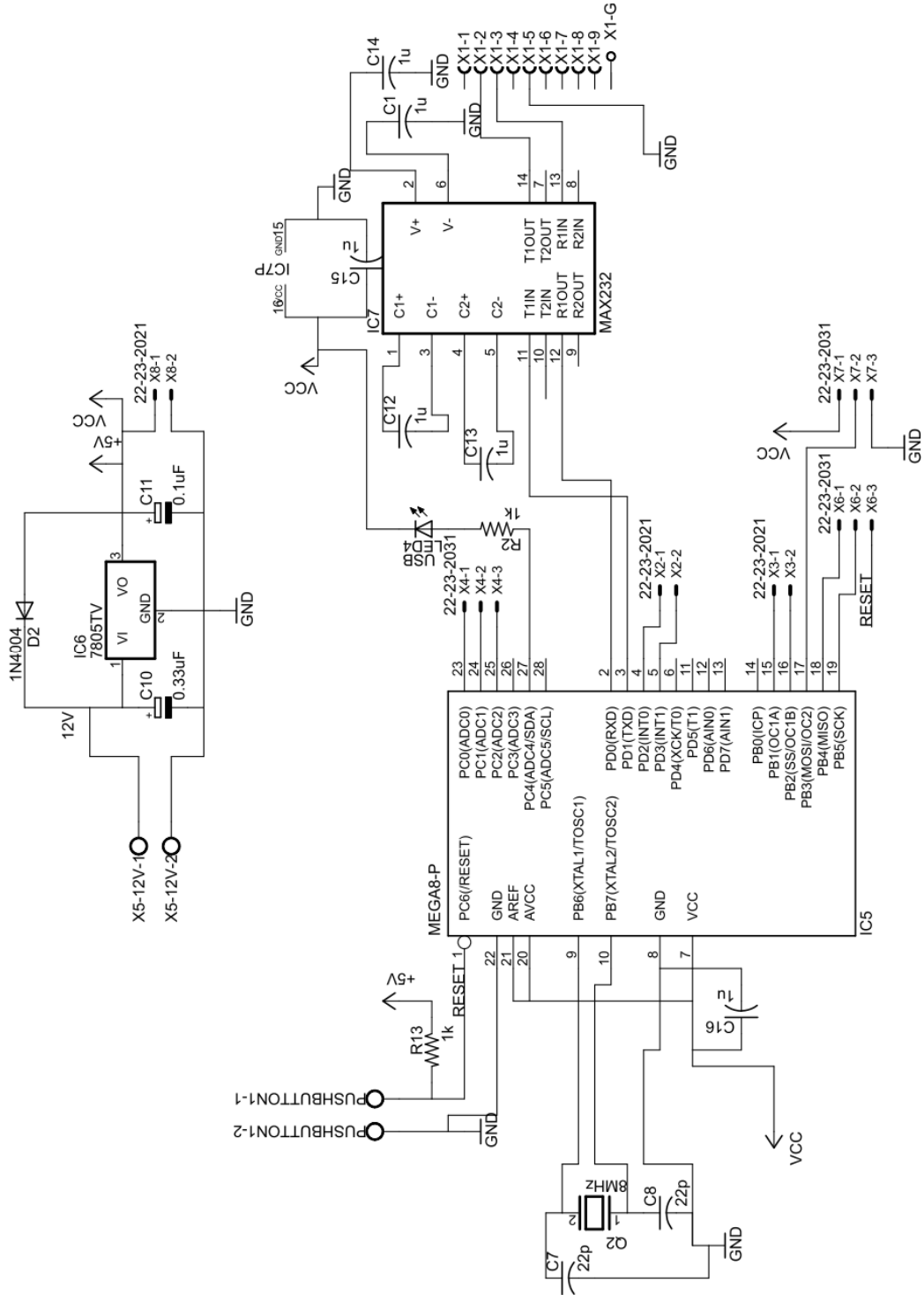


Figura 16: Diagrama esquemático de tarjeta de control

b) Circuito de Potencia:

Del concepto de solución determinado en el ANEXO I, la tarjeta de potencia recibe las señales de control de la tarjeta de control aisladas eléctricamente por opto-acopladores. Son 7 las señales que puede recibir:

- 2 señales habilitadoras – una para cada propulsor
- 4 señales de control de giro – dos para cada propulsor
- 1 señal de control del servomotor

La función del circuito de potencia es manejar los propulsores y el servomotor, para su diseño es necesario establecer los requerimientos que estos actuadores necesitan para su correcto funcionamiento con la finalidad de que el diseño de la tarjeta cumpla con ellos.

De la Tabla 2 se obtienen los requerimientos de potencia de los propulsores, los que necesitan un voltaje de 24VDC, una corriente de 1A y se manejan con una onda de 400Hz (Tabla 6) según las salidas del microcontrolador. Del concepto de diseño (ANEXO I) se elige un controlador de motores o puente H integrado. El circuito integrado L298 puede controlar dos propulsores con inversión de giro. Maneja corrientes de hasta 2A y soporta una frecuencia de conmutación de hasta 40KHZ con lo que supera notablemente lo requerido.

De la Tabla 3 se tiene que el servomotor a controlar requiere una corriente de 1A, la cual se suministra directamente de la fuente de alimentación, y es controlado directamente por una señal de control digital.

Los propulsores se controlan directamente por las salidas del puente H (L298). Las señales de entrada que controlan los habilitadores del integrado son aisladas eléctricamente por opto-acopladores rápidos (6N137), los cuales tienen una frecuencia de conmutación de 10MHz (superior a los 400Hz requeridos). Y las señales de control de giro se aíslan con opto-acopladores de propósito general (4N25M), los que tienen una frecuencia de conmutación de 10KHz.

La señal de control del servomotor se aísla también con un opto-acoplador rápido ya que la frecuencia de conmutación está en el orden de las décimas de milisegundo poder variar la señal entre 1 y 2ms. El diagrama esquemático con la configuración de estos componentes se presenta en la figura 17 y la tabla 10 muestra el detalle de los componentes.

Tabla 10: Detalle de componentes – Tarjeta de Potencia

Cant.	Valor	Dispositivo	Nombre en Diagrama
1	KK-156-3	Molex de 3 pines	
5	MPT2	Molex de 2 pines	24V_POT1,24V_POT2,MO TOR1,MOTOR2
4	0.1uF	Capacitor Electrolítico	C1,C6,C7,C8
1	0.33uF	Capacitor Electrolítico	C5
3	1K	Resistencia 1/4W	R2,R10,R21
8	FR107	Diodo de recuperación rápida	D1,D10,D11,D12,D13,D14, D15,D16
4	4N25M	Opto-acoplador	OK3,OK4,OK5,OK6
3	6N137	Opto-acoplador rápido	OK1,OK2,OK7
4	10K	Resistencia 1/4W	R15,R16,R17,R18
3	15p	Capacitor cerámico	C2,C11,C12
5	22-27- 2021-02	Molex de 2 pines	J1,J2,J3,J5,J6
1	22-27- 2031-03	Molex de 3 pines	J4
7	330	Resistencia 1/4W	R1,R7,R8,R11,R12,R13,R14
1	7805TV	Regulador de Voltaje 5V	IC2
1	7812T	Regulador de Voltaje 12V	IC4
1	7818T	Regulador de Voltaje 18V	IC1
1	L298	Puente H	IC3

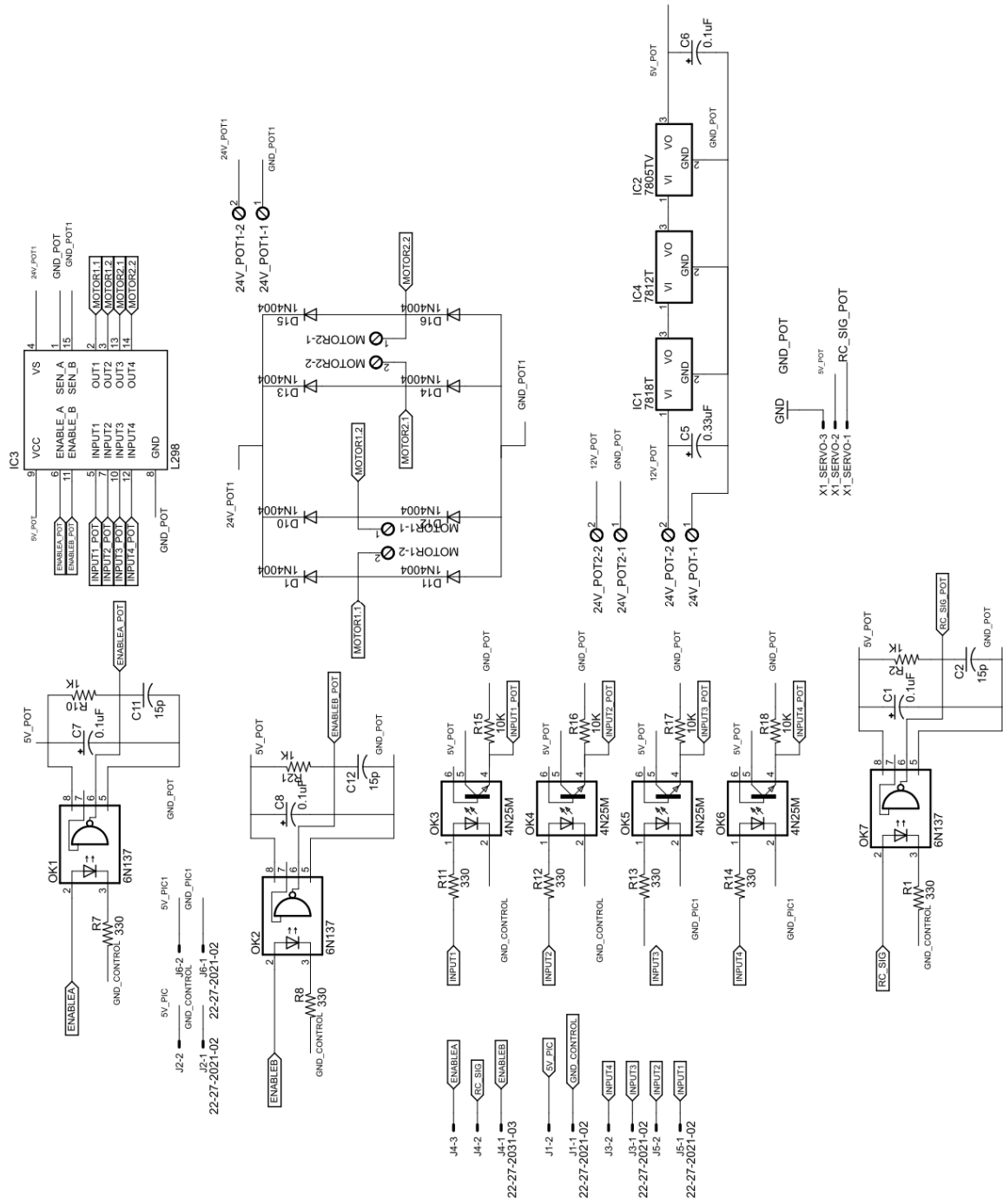


Figura 17: Diagrama esquemático de tarjeta de potencia

Finalmente se implementan las tarjetas y se acoplan con la parte mecánica como se muestra en las figuras 18 y 19.

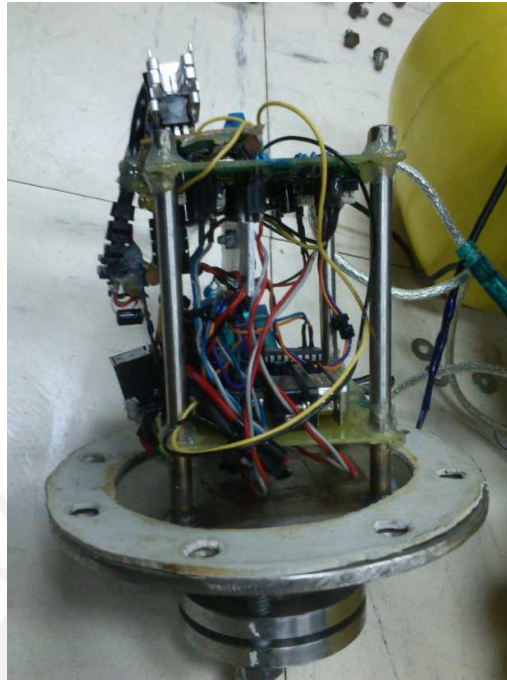


Figura 18: Montaje de las tarjetas electrónicas

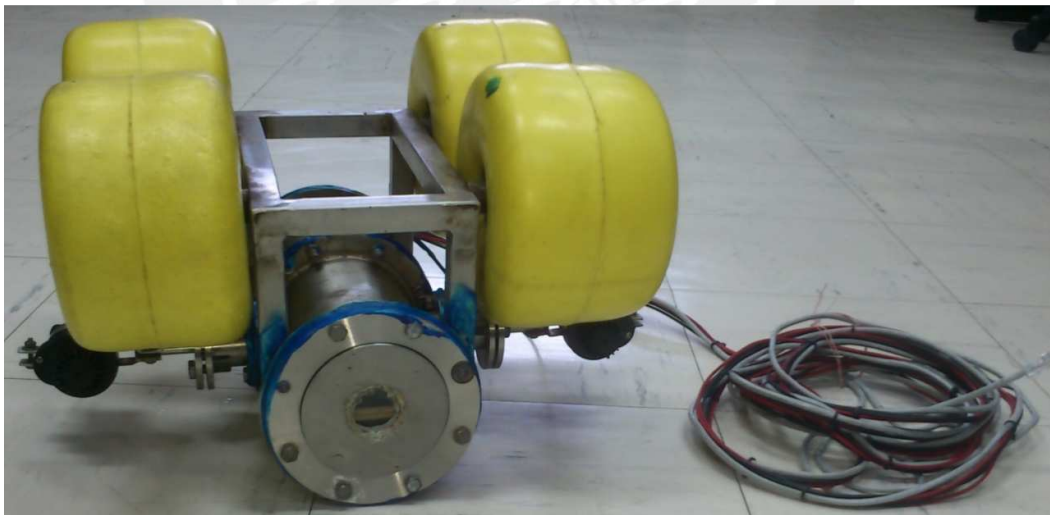


Figura 19: ROV ensamblado

## CAPÍTULO 3:

### VISIÓN POR COMPUTADORA Y SISTEMA DE CONTROL

Se desarrolla un sistema de control basado en lógica difusa con la finalidad de controlar al ROV para que realice el seguimiento del objeto contemplando los parámetros de distancia y ángulo del objeto respecto al ROV. Los datos se obtienen a través de una cámara de video, la misma que se utilizaría para monitorear el objeto que está enfocando el ROV. Los datos se procesan para obtener los parámetros de control a través de un sistema de visión por computadora. Estos parámetros se comparan con la señal de referencia (consigna) y se envían las diferencias al sistema de control difuso, el cual finalmente, determina los valores de potencia que se aplicarán sobre los actuadores del ROV. La figura 20 muestra el diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control.

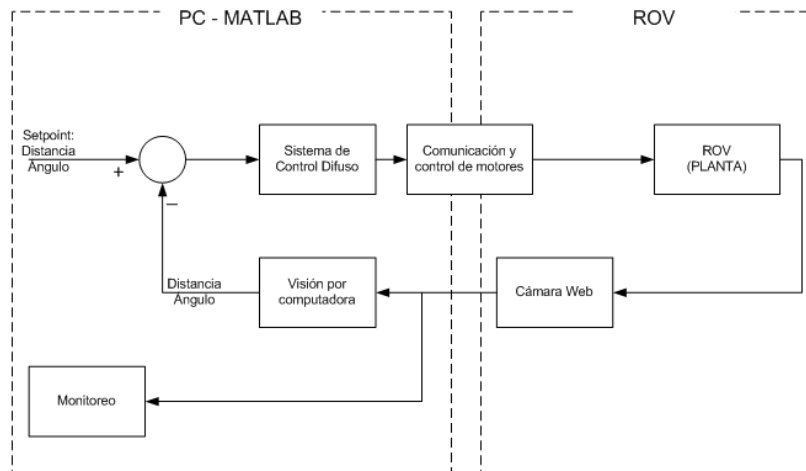


Figura 20: Diagrama de bloques de sistema de control

#### Visión por computadora:

El sistema de visión por computadora se diseñó para realizar el seguimiento de un objeto predeterminado. El sistema en una primera etapa de pre-procesamiento debe reconocer al objeto sumergido en el agua (Pre-procesamiento). Luego, determinar la distancia entre su centroide y el centro de la imagen, en el eje de coordenadas. Y finalmente determinar el ángulo con respecto al plano vertical que pasa por el centro de la cámara (Extracción de características). La figura 21 muestra el diagrama de flujo del proceso de visión por computadora.



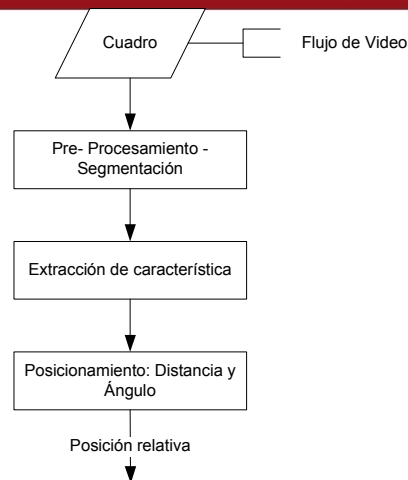


Figura 21: Diagrama de flujo del proceso de visión por computadora

El proceso se divide en dos partes:

- Pre-procesamiento - Segmentación: extrae el objeto de interés de toda la imagen.
- Extracción de características: calcula la distancia y ángulo.

### **Pre-procesamiento - Segmentación:**

Este proceso tiene como finalidad determinar el objeto de interés dentro de la imagen, aislando todos los elementos ajenos a éste. Para ello, es necesario tener imágenes de referencia que representen las situaciones en las que se encontrará el objeto. Para las pruebas el objeto a seguir es una esfera de color negro de 4" de diámetro. La figura 22 muestra una imagen típica de la esfera adquirida a través de la webcam en modo RGB con una resolución de 640x480. Esta configuración permite una correcta visualización de la esfera a lo largo del lugar de pruebas.

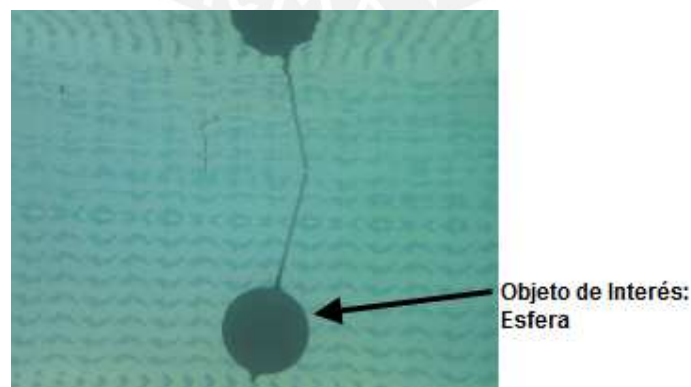


Figura 22: Imagen de esfera adquirida a través de la webcam

Se puede apreciar que existe un buen contraste entre el fondo y la esfera, además, no se detecta distorsión de la forma en el medio acuático. Por otro lado, se observa que aparece una imagen reflejada en la superficie de la piscina, la cual debe ser filtrada en el procesamiento ya que no representa al objeto de interés.

Se tomaron como características a reconocer: el contraste de la esfera frente al fondo de la piscina, la forma esférica y el tamaño. La figura 23 muestra el proceso que se lleva a cabo que se realiza para segmentar la imagen [4]:

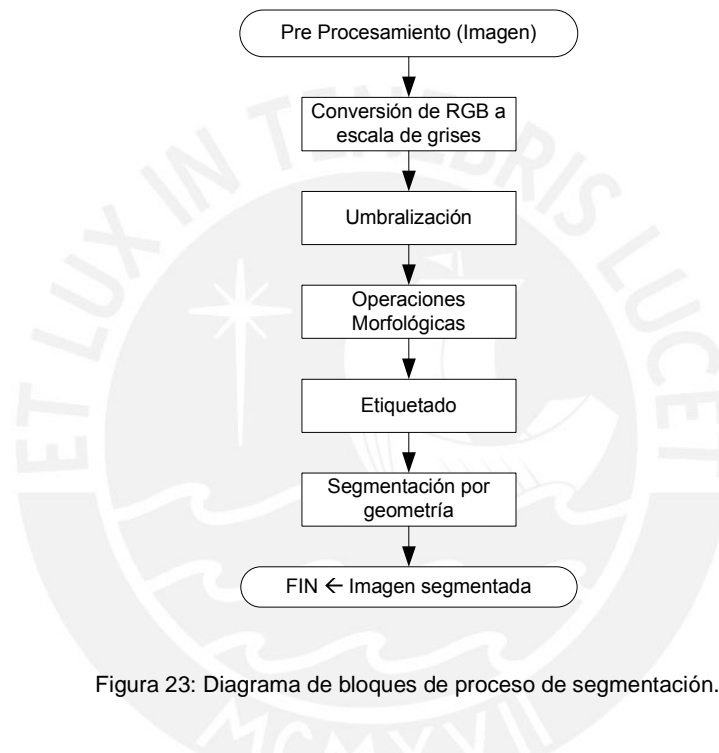


Figura 23: Diagrama de bloques de proceso de segmentación.

El proceso se inicia con la conversión de RGB a escala de grises realizando un promedio aritmético de los valores de las 3 capas R, G, B. (Figura 24(a)). Luego, se umbraliza la imagen por el método Otsu [4]. A partir de un nivel de intensidad luminosa umbral se vuelve la imagen a binario con el valor “0” todos los píxeles con luminosidad inferior al valor umbral y “1” para el resto. El método de Otsu determina el valor umbral minimizando la varianza entre clases de píxeles blancos y negros. (Figura 24(b)). A continuación se realiza el proceso morfológico de “cerrado” de imagen. Para esto se crea una estructura de un disco de diámetro de 10 píxeles el cual recorre todos los píxeles de valor uno (el fondo), de éste modo se eliminan todos los objetos pequeños y se redondean los objetos. (Figura 24(c)). Seguidamente, se etiquetan las regiones de la imagen que mantengan una conectividad de por lo menos 4 píxeles. (Figura 24(d)). Y finalmente, se determina la excentricidad de las regiones etiquetadas. La

excentricidad relaciona la distancia entre el eje mayor y menor de una elipse, teniéndose así el caso extremo de una circunferencia cuyo valor calculado de excentricidad es cercano a cero, de ésta manera se elige al objeto que tenga excentricidad más baja y que sea menor que 0.4, con lo que finalmente se segmenta el objeto. (Figura 24(e))

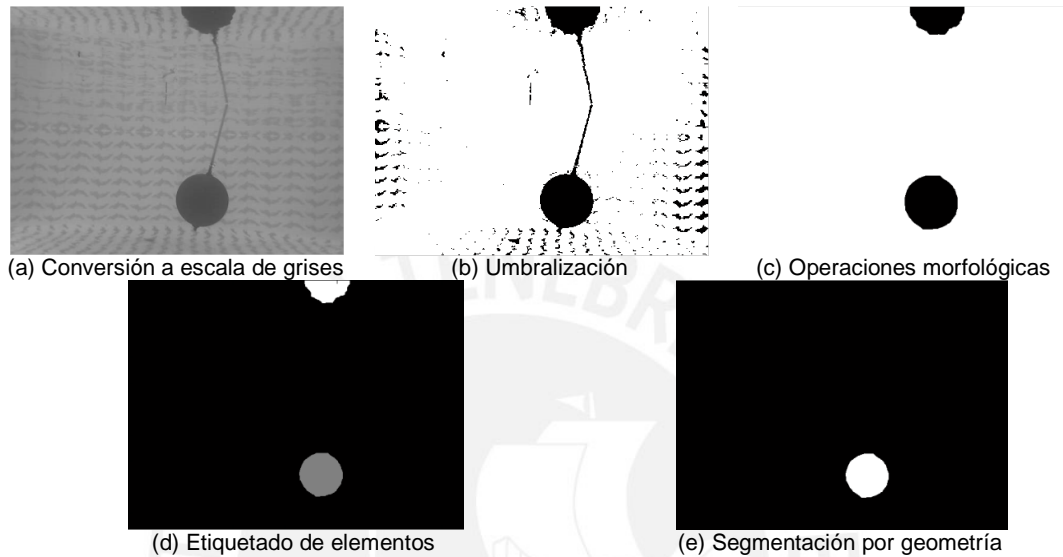


Figura 24: Resultados parciales durante proceso de segmentación

### **Extracción de características**

El propósito final del sistema de visión por computadora es determinar la distancia y ángulo con respecto a la cámara del objeto de interés. Para determinar la distancia de forma automática se realizaron pruebas de campo con la finalidad de determinar el tamaño en píxeles de la bola negra para diferentes distancias de la cámara. Por otro lado, el ángulo se calcula tomando como referencia la distancia axial del centroide del objeto y el centro de la imagen (Figura 25).

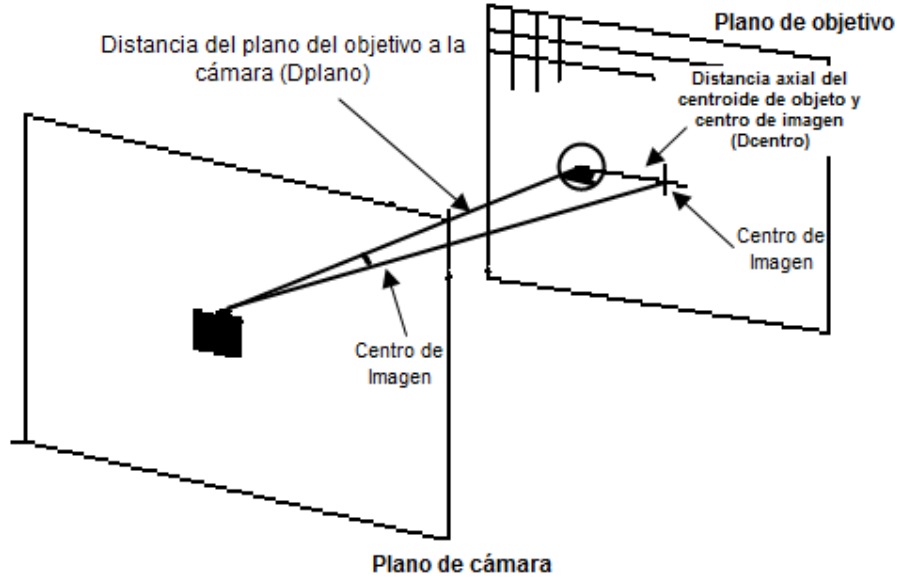


Figura 25: Determinación de ángulo de desviación

Para cada distancia se tomó la medida del diámetro de la bola en píxeles, parámetro que permanece invariable independientemente del ángulo con el que se realiza la toma. La tabla 11 muestra los datos medidos.

Tabla 11: Características de objeto predeterminado

Distancia del objeto a la cámara (cm)	Diámetro (píxeles)
60	183
70	158
80	124
90	101
100	91
110	83
120	76
130	71
140	66
150	64
160	62
170	58

Se realiza un gráfico de los datos obtenidos y se determina una ecuación para determinar la distancia entre el objeto y la cámara a partir del diámetro de éste, medido en píxeles. La ecuación se determina utilizando el método de ajuste por mínimos cuadrados obteniendo un coeficiente de determinación de 99.78%. La figura 26 muestra el diámetro del objeto vs la distancia.

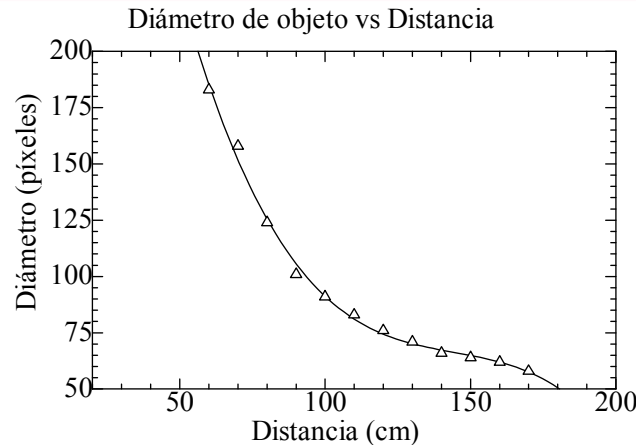


Figura 26: Diámetro de objeto Vs. Distancia

De esta manera, se tiene la siguiente ecuación con la que se calcula la distancia del objeto a la cámara ( $D(x)$ ) a partir del diámetro en píxeles del objeto capturado ( $x$ ).

$$D(x) = -0,0002 \cdot x^3 + 0,0641 \cdot x^2 - 9,0678 \cdot x + 507,8946 \quad (3-1)$$

Donde:  $D(x)$ : Distancia del objeto a la cámara  
 $X$ : Diámetro del objeto

El ángulo se calcula asumiendo que todas las dimensiones representadas en píxeles que se encuentran en un plano paralelo a la cámara (a una distancia constante a esta), mantienen la misma relación entre número de píxeles y su longitud real (modelo idealizado de cámara [5] (Figura 27).

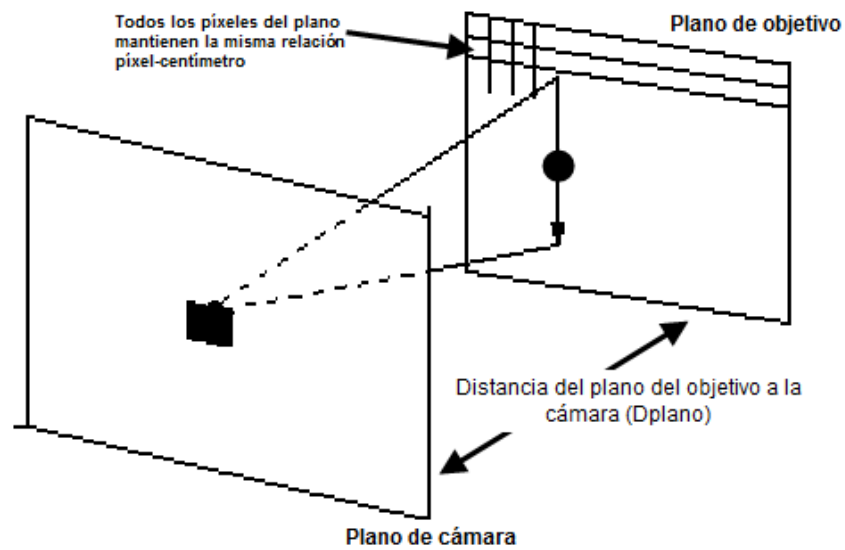


Figura 27: Relación de píxeles en un plano paralelo al plano de la cámara.

De esta forma, obteniendo el diámetro en píxeles de la bola, se determina una relación entre la distancia en píxeles y la distancia real. Con este valor se determina la distancia entre el centroide del objeto y el centro de la cámara. La figura 28 muestra el proceso de obtención de la distancia del centroide del objeto al centro de la imagen en centímetros.

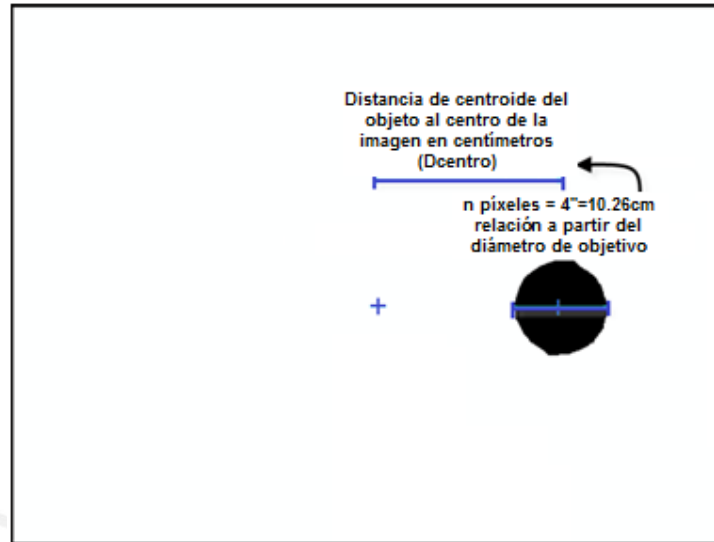


Figura 28: Obtención de distancia entre el centro de la imagen y el centroide del objeto.

Obtenidas la distancia del objeto a la cámara y la distancia del centroide del objeto al centro de la imagen se puede determinar el ángulo a través de la siguiente expresión:

$$\text{Atan}\left(\frac{D_{centro}}{D_{plano}}\right) \quad (3-2)$$

De esta manera, se obtienen los parámetros de distancia del objeto a la cámara y el ángulo entre la orientación de la cámara y el objeto (ángulo de desviación).



## Sistema de Control

La complejidad del desarrollo de un sistema de control para este tipo de sistema se debe a que el móvil trabaja en lugares sin puntos de referencia, no está fijo a ninguna superficie y existen perturbaciones externas significativas [3]. Además, la estimación de los parámetros de la dinámica es complicada y existe una alta no-linealidad en los componentes [1].

Se diseñó un sistema de control basado en lógica difusa de inferencia tipo Mamdani, en la que a la salida de la función de pertenencia se tiene un juego difuso [8], que tiene como parámetros de entrada la distancia del móvil al objeto y el ángulo de desviación. La salida del sistema de control será el porcentaje de potencia de cada motor que controla el movimiento del móvil.

El diseño de una lógica difusa se basa en el conocimiento de un experto del proceso a controlar, y la utilización de reglas verbales para su conformación. Las reglas se basan en deducciones lógicas en base a funciones de pertenencia conformadas por frases como: “cercano y un poco desviado a la derecha” y obteniendo como resultados de las reglas frases como: “propulsor izquierdo a potencia baja” y “propulsor derecho a potencia muy baja”, el proceso de transformar la información numérica a reglas verbales se llama ‘fuzzificación’. Luego se obtiene un resultado verbal, juego difuso, que pasa a ser numérico mediante el proceso de ‘defuzzificación’ para el cual se utiliza el método de cálculo del centroide, o centro de masa, del resultado verbal [6]. La figura 29 muestra el diagrama de bloques del controlador difuso.



Figura 29: Diagrama de bloques de controlador difuso

El proceso para el desarrollo del controlador es el siguiente:

- Determinación de variables y términos lingüísticos.
- Determinación de funciones de pertenencia para los términos lingüísticos.
- Diseño de reglas difusas.

Determinación de variables y términos lingüísticos

Se desarrolla un sistema simple de lógica difusa, para lo cual, se trabaja con un número pequeño de particiones. Se eligen funciones de pertenencia triangular para las zonas intermedias y trapezoidales para los extremos.

**Distancia:**

La distancia máxima que puede alcanzar el objetivo en el área de pruebas es de 200cm. Se divide el rango en tres términos lingüísticos:

- Cero (Z)
- Cercano (N)
- Lejos (F)

**Ángulo:**

El ángulo se escala entre -1 y 1 según el rango total de la aplicación y la cámara. Para calcular el rango de la cámara se realizan pruebas experimentales cuyos resultados se representan en la figura 30.

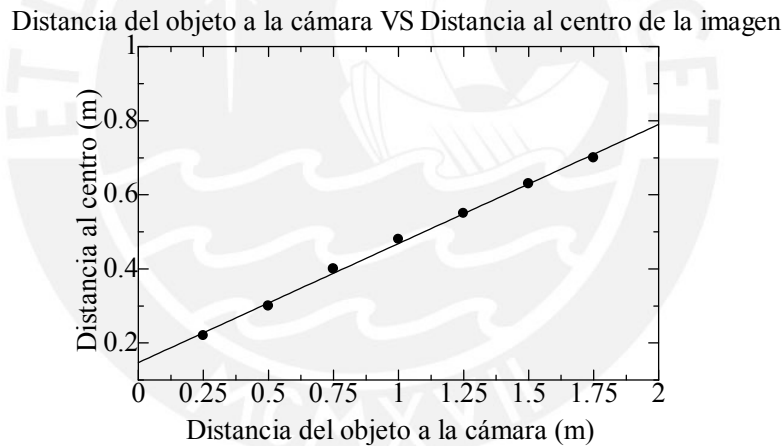


Figura 30: Distancia del objeto a la cámara VS Distancia al centro de la imagen

Se observa una tendencia lineal con lo que se puede determinar un rango del ángulo de visión de la cámara evaluando la siguiente expresión:

$$\text{Ángulo de visión} = \text{atan} \left( \frac{\text{Distancia al centro}}{\text{Distancia a la cámara}} \right) \tag{3-3}$$

El ángulo de visión de la cámara es adecuado para ubicar al objeto en cualquier lado de la piscina (figura 31), el ángulo de visión de la cámara se halla de forma experimental midiendo el ángulo con objetos reales. El punto de partida para el factor

de escalamiento para este parámetro será de  $40^\circ$ , según la ecuación (3-3) y se ajustará cuando se realicen las pruebas de campo.

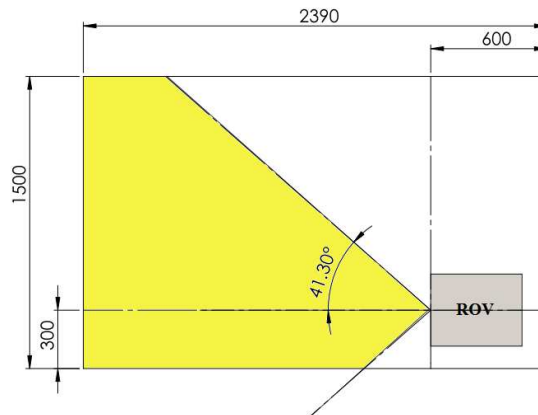


Figura 31: Determinación del rango útil de visión

Una vez determinados los rangos de visión se determinan los valores lingüísticos siguientes:

- Izquierda (L)
- Izquierda – Centro (LC)
- Centro (C)
- Derecha – Centro (RC)
- Derecha (R)

#### **Potencia de motores:**

Ambos motores presentan características de funcionamiento similares por lo que se estiman los mismos valores lingüísticos para 4 regiones:

- Cero (Z)
- Potencia muy baja (SS)
- Potencia baja (S)
- Potencia alta (F)

#### Funciones de pertenencia

Una vez determinadas las variables y los valores lingüísticos de los rangos el sistema de control difuso presenta la estructura de la figura 32, en donde se representan las variables de entrada: distancia ( $Dif_{dist}$ ) y ángulo. Además, se presentan las variables de salida motor izquierdo ( $w_l$ ) y motor derecho ( $w_r$ ).

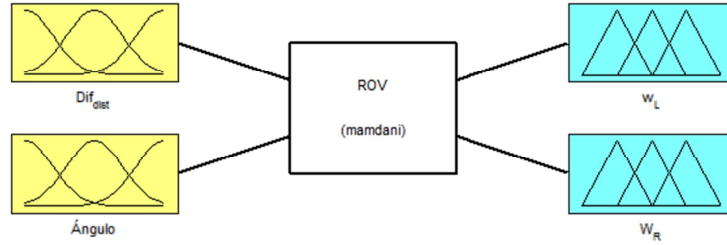


Figura 32: Estructura de sistema de control difuso - variables de entrada y salida

Se determinan las funciones de pertenencia asignando funciones triangulares y trapezoidales. De esta manera se asocian rangos de valores numéricos a las expresiones lingüísticas para las variables. En las figuras 33, 34 y 35 se observan dichas funciones:

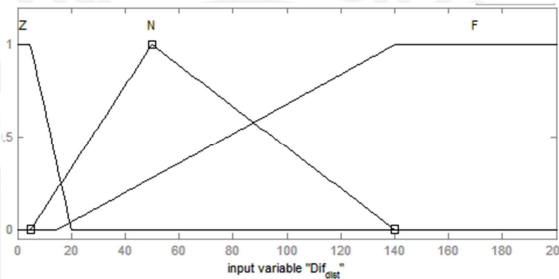


Figura 33: Función de membrecía para variable de entrada: Distancia

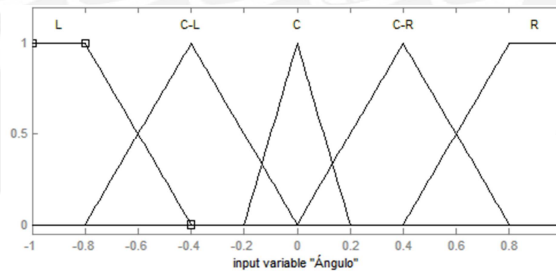


Figura 34: Función de membrecía para variable de entrada: Ángulo

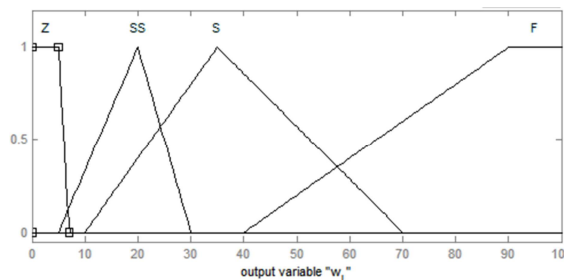


Figura 35: Función de membrecía para variables de salida: Motor izquierdo y derecho

Reglas difusas:

Se determina el juego de reglas difusas que comandarán el control sobre los propulsores del ROV bajo la consigna de primero alinearse con el objeto para luego avanzar en línea recta. Adicionalmente a cada regla se le puede dar un peso para ponderar el resultado final, para este caso se le otorga el mismo peso para todas las reglas igual a uno.

Las reglas difusas se basan en la operación lógica 'y' para combinar las entradas. El cual equivale a elegir el mínimo valor a la hora de resolver la regla difusa para defuzzificar el juego difuso y obtener un valor numérico para la salida.

El método de inferencia del tipo Mamdani sigue los siguientes pasos [8]:

1. Fuzzificar los valores numéricos de las entradas, en la Figura 36,  $x_0$  y  $y_0$ , usando las funciones de pertenencia.
2. Combinar las entradas fuzzificadas de acuerdo las reglas difusas establecidas y con la ponderación asignada. En este paso la operación lógica 'y' equivale a seleccionar el mínimo valor de las combinaciones.
3. Combinar los resultados para obtener un juego difuso a la salida.
4. Defuzzificar la distribución de salida para obtener valores numéricos. Para la configuración utilizada en el control del ROV, se utiliza el método del centroide.

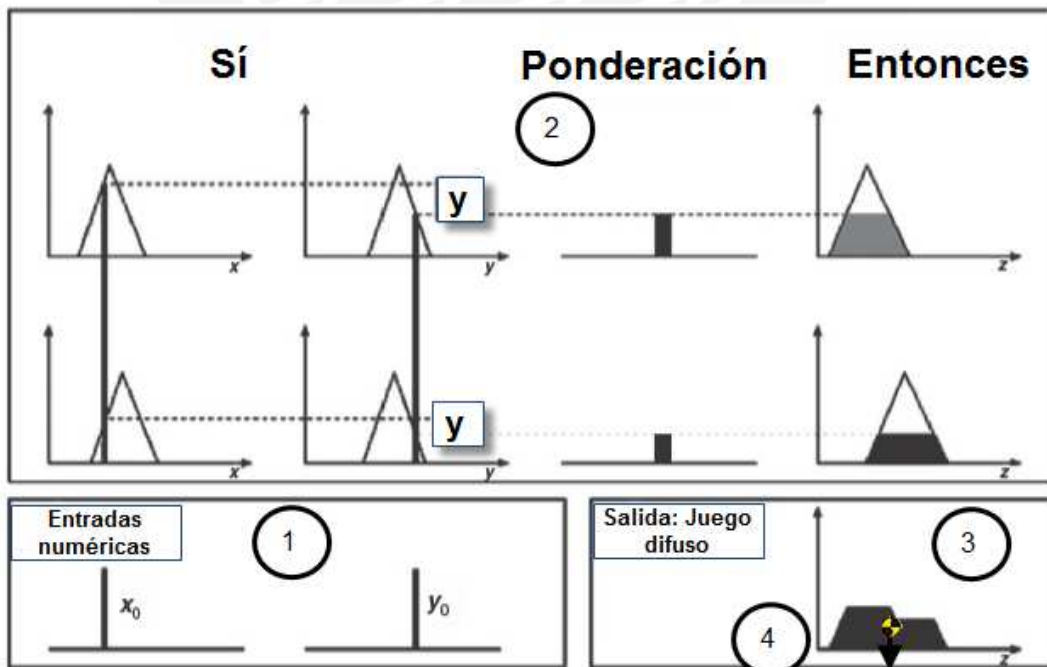


Figura 36: Proceso de inferencia de controlador difuso y defuzzificación

La tabla 12 muestra las reglas del controlador difuso aplicados para el control del ROV.

Tabla 12: Tabla de reglas de controlador difuso

Entradas (lógica 'y')		Salidas	
Distancia	Ángulo	Potencia motor izquierdo	Potencia motor derecho
Cero	Cualquiera	Cero	Cero
Cercana	Centro	Baja	Baja
Lejana	Centro	Potencia Alta	Potencia Alta
Cualquiera	Izquierda	Cero	Potencia Baja
Cualquiera	Izquierda – Centro	Cero	Potencia muy baja
Cualquiera	Derecha	Potencia Baja	Cero
Cualquiera	Derecha – Centro	Potencia muy baja	Cero

La figura 37 muestra las superficies de reglas difusas para cada propulsor. Se puede observar que ambas superficies son complementarias, una es la inversa de la otra. En ambos casos, cuando la orientación es cercana a cero, es decir, el ROV centrado al objetivo, ambos propulsores se encuentran a la misma potencia generando un empuje para avanzar en línea recta de potencia inversamente proporcional a la distancia. Mientras más cerca se encuentre de la consigna la velocidad será menor. Por otro lado, cuando el ángulo de desviación del objetivo respecto al centro del ROV sea considerable, el ROV varía la potencia de sus propulsores con la finalidad de corregir el error de orientación.

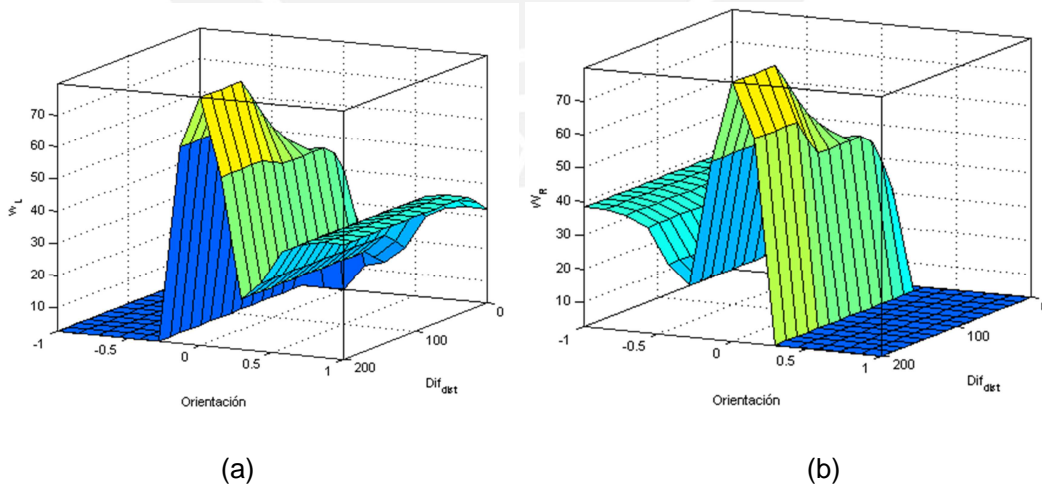


Figura 37: Superficie de reglas difusas. (a) Salida: Potencia de propulsor izquierdo.  
(b) Salida: Potencia de propulsor derecho



Finalmente se obtiene el valor numérico de la potencia a la que deben operar los dos propulsores. Éste valor se redondea a un valor entero entre 0 y 100 equivalente al porcentaje de potencia de los propulsores.

La comunicación con el ROV se realiza de forma serial asíncrona. Según se detalló en el “Diseño Electrónico” del capítulo 2 del documento, se estableció el siguiente protocolo de comunicación: si el dato numérico enviado se encuentra entre 1 y 3, significa que el dato siguiente va a modificar el parámetro asociado según la relación que se muestra en la tabla 6. De esta forma se puede enviar la señal de control de forma serial para los actuadores.



## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez diseñado e implementado el ROV se realizaron pruebas del algoritmo de reconocimiento de imágenes, pruebas experimentales del reconocimiento del objeto en la piscina en el campo de pruebas con diferentes condiciones climáticas y, finalmente, pruebas del funcionamiento completo del ROV. Las pruebas se realizan con el ROV sumergido a nivel superficial, sin giro de los propulsores, éstos permanecen fijos para generar empuje únicamente hacia adelante.

El objeto predeterminado para todas las pruebas es una esfera de color negro, cuyas características se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Características de objeto predeterminado

Característica	Descripción
Forma	Esférica
Color	Negro
Dimensiones	4" Ø
Sujetador	Varilla de metal

El campo de pruebas es una piscina estructural cuyas características se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Características de objeto piscina de pruebas

Característica	Descripción
Largo	239cm
Ancho	150cm
Profundidad	58cm
Ambiente de prueba	Aire Libre

#### **Prueba de reconocimiento del objeto patrón:**

Objetivo: Probar el funcionamiento del algoritmo de reconocimiento del objeto patrón.

Montaje de la prueba: sobre una imagen real en donde se aprecia el objeto a reconocer y su reflejo, se insertan una figura triangular y otra, rectangular. Ambas de color negro, lo que hace que el contraste entre la figura y el fondo sea alto. Se procede a ejecutar el algoritmo de visión por computadora. La figura 38 muestra el montaje

para la prueba de reconocimiento del objeto patrón. En donde se muestran los siguientes elementos:

- 1) Forma triangular
- 2) Objeto esférico (real)
- 3) Forma rectangular
- 4) Reflejo de objeto esférico en superficie

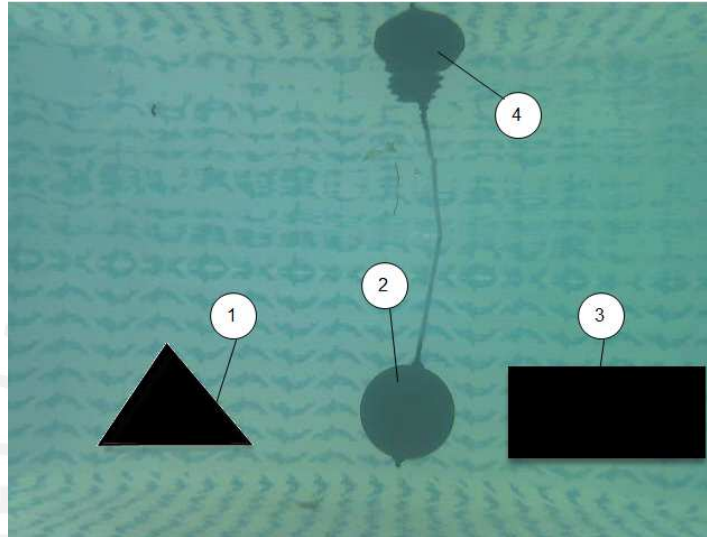
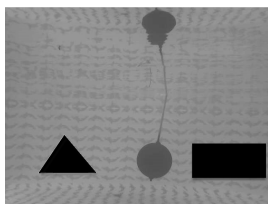
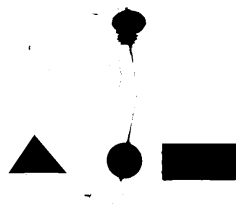


Figura 38: Montaje para prueba de reconocimiento del objeto patrón

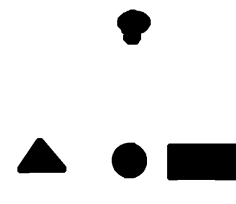
La figura 39 muestra el resultado de ejecutar los pasos para el reconocimiento del objeto patrón. En la figura 39(d) se observa el resultado de segmentar los objetos por contraste con el fondo y de haber realizado operaciones morfológicas, los objetos de diferentes colores indican que son reconocidos como elementos independientes. Finalmente, en la figura 39(e) se muestra el resultado de la segmentación por geometría, en donde se discriminan los elementos por forma quedando como elemento de interés la esfera.



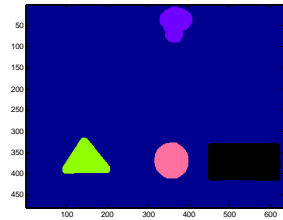
(a) Conversión a escala de grises



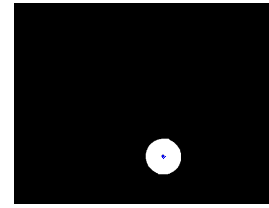
(b) Umbralización



(c) Operaciones morfológicas



(d) Etiquetado de elementos



(e) Segmentación por geometría

Figura 39: Prueba de reconocimiento del objeto patrón paso a paso.

**Prueba de reconocimiento del objeto en diferentes condiciones climáticas:**

Objetivo: examinar el funcionamiento del ROV en distintas condiciones climáticas.

Montaje de la prueba: se realizan pruebas en días, horas y climas diferentes para observar la capacidad del sistema de visión por computadora y se registraron las distancias mínimas y máximas en las que el sistema es capaz de reconocer el objeto. La tabla 15 muestra los resultados que se obtuvieron:

Tabla 15: Reconocimiento del objeto para diferentes condiciones climáticas

Fecha y hora	Condición climática	Distancia mínima de reconocimiento	Distancia máxima de reconocimiento
Lunes 07//05/12 – 11:30:00	Día claro, la piscina se encuentra en sombra por un edificio	20cm	90cm
Lunes 07//05/12 – 16:40:00	Tarde soleada, el sol da a la piscina.	20cm	200cm
Jueves 10/05/12 – 16:50:00	Tarde nublada	20cm	30cm
Viernes 11/05/12 - 14:10:00	Tarde soleada, el sol da a la piscina, agua turbia	20cm	100cm

El mejor rango de reconocimiento del objetivo se obtuvo cuando se tuvo iluminación directa del sol en una tarde soleada en donde el equipo reconocía al objeto entre 20cm y 200cm de distancia.

### Pruebas de seguimiento

Objetivo: observar el funcionamiento del ROV en pruebas de seguimiento del objeto predeterminado dentro del rango de reconocimiento permisible.

Montaje de la prueba: el ROV se coloca en un extremo de la piscina y se posiciona el objeto patrón dentro del campo de visión del ROV mediante una varilla de metal adosada al objeto. Una vez que el ROV comienza a hacer el seguimiento, la bola es desplazada para observar el comportamiento del ROV. La figura 40 muestra el montaje de la prueba de seguimiento del objeto y la figura 41 muestra una imagen captada por el ROV, la cual también es registrada en las pruebas.

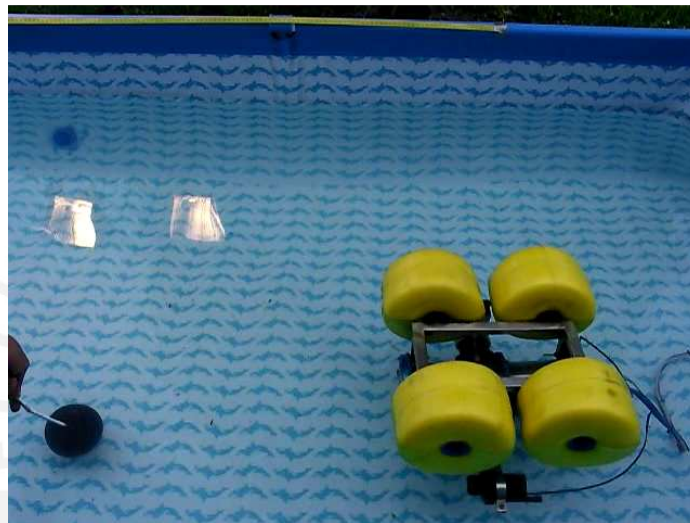


Figura 40: Montaje de prueba de seguimiento del objeto

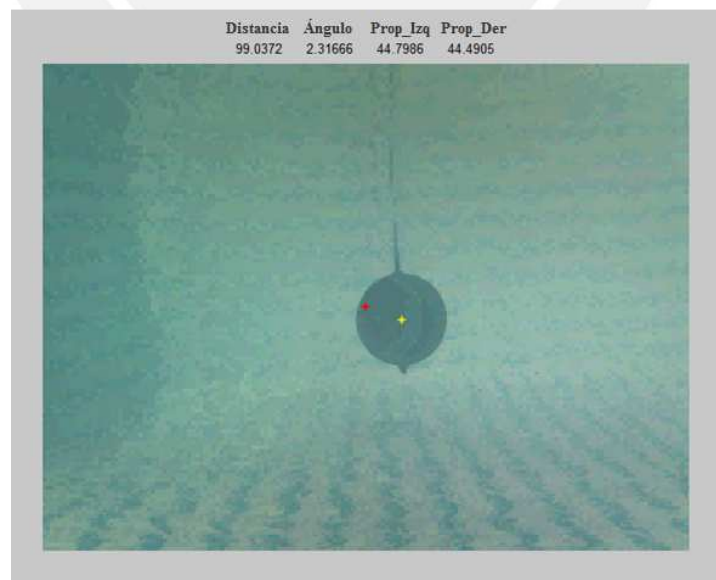


Figura 41: Imagen del sistema de seguimiento en donde muestran los parámetros de distancia, ángulo y la potencia de los propulsores.

Las figuras 43, 44 y 45 muestran las gráficas correspondientes a la distancia, ángulo y porcentaje de potencia de propulsión de los motores registrados cada 0.5s obtenidos de las grabaciones del sistema de seguimiento automático a partir de la cámara incorporada.

Las pruebas de seguimiento 1, 2 y 3 se realizaron el día lunes 07//05/12 por presentar buenas condiciones climáticas (cielo despejado). El factor de escalamiento para el ángulo en la lógica de control difuso se estableció en 25 con una consigna de 60cm para el parámetro de distancia.

La prueba 4 se realizó el día viernes 11/05/2012 día que también presentó buenas condiciones climáticas. Se procedió a realizar una prueba con el objeto patrón fijo. La figura 42 muestra una imagen de la prueba y la figura 46 muestra sus gráficas. La resolución de éstas gráficas en el tiempo es de 66ms. Para esta prueba se colocó una consigna de distancia de 20cm y un ángulo de 0.

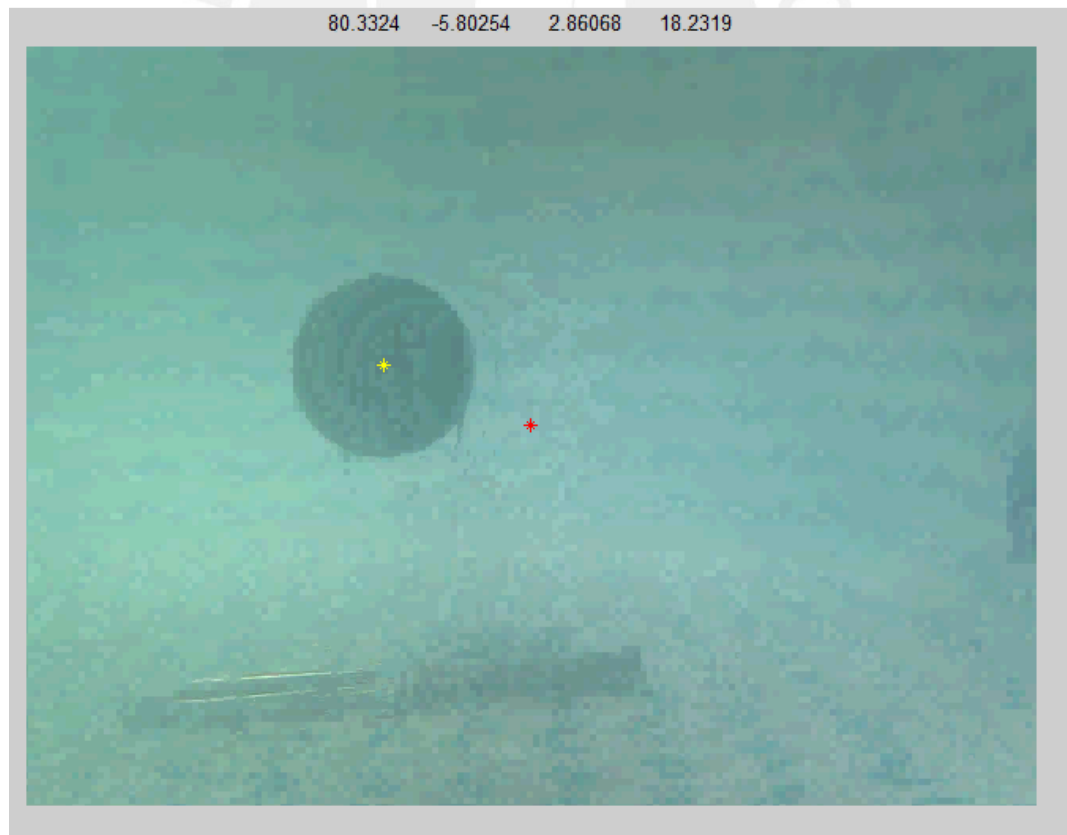


Figura 42: Imagen de sistema de seguimiento en donde muestran los parámetros de Distancia, ángulo y la potencia de los propulsores para objeto fijo.



#### Prueba 1:

De la figura 43: el objetivo se detecta a una distancia de 180cm con un ángulo de desviación de 1° horario del ROV. El equipo enciende los propulsores para avanzar en línea recta. El equipo avanza con ambos propulsores a la misma potencia hasta el segundo 8 en que el ángulo comienza a crecer en el sentido horario, para contrarrestar el efecto se disminuye la potencia del propulsor derecho casi a cero y también se disminuye la potencia del propulsor izquierdo a un 20%. Luego el ángulo se comienza a disminuir hasta llegar a 2°(segundo 15), luego el ángulo comienza a crecer nuevamente en sentido horario y el ROV realiza nuevamente el proceso de corrección anterior para corrigiendo nuevamente el ángulo. Luego se encienden los propulsores a la misma potencia para avanzar.

#### Prueba 2:

De la figura 44: al inicio (segundo 40) el objetivo se encuentra a una distancia de 140cm centrado respecto al ROV. El equipo enciende los propulsores a la misma potencia con la finalidad de avanzar en línea recta. En el segundo 43 el ángulo comienza a aumentar de forma horaria por lo que el ROV apaga el propulsor derecho y disminuye la potencia del propulsor izquierdo con la finalidad de realizar la corrección de forma fina. El ángulo se corrige para el segundo 44 y el ROV vuelve a encender los propulsores para avanzar en línea recta. En el segundo 49 el ángulo se incrementa en sentido anti-horario para lo que el ROV apaga el propulsor izquierdo y disminuye la velocidad del derecho. Para el segundo 50 el ROV enciende ambos propulsores y conforme se acerca a la consigna va disminuyendo la velocidad realizando correcciones pequeñas a velocidades bajas hasta el segundo 55 en que el ángulo comienza a incrementarse de forma horaria y el ROV trata de corregir el error aumentando la potencia del propulsor izquierdo y manteniendo el derecho a baja velocidad.

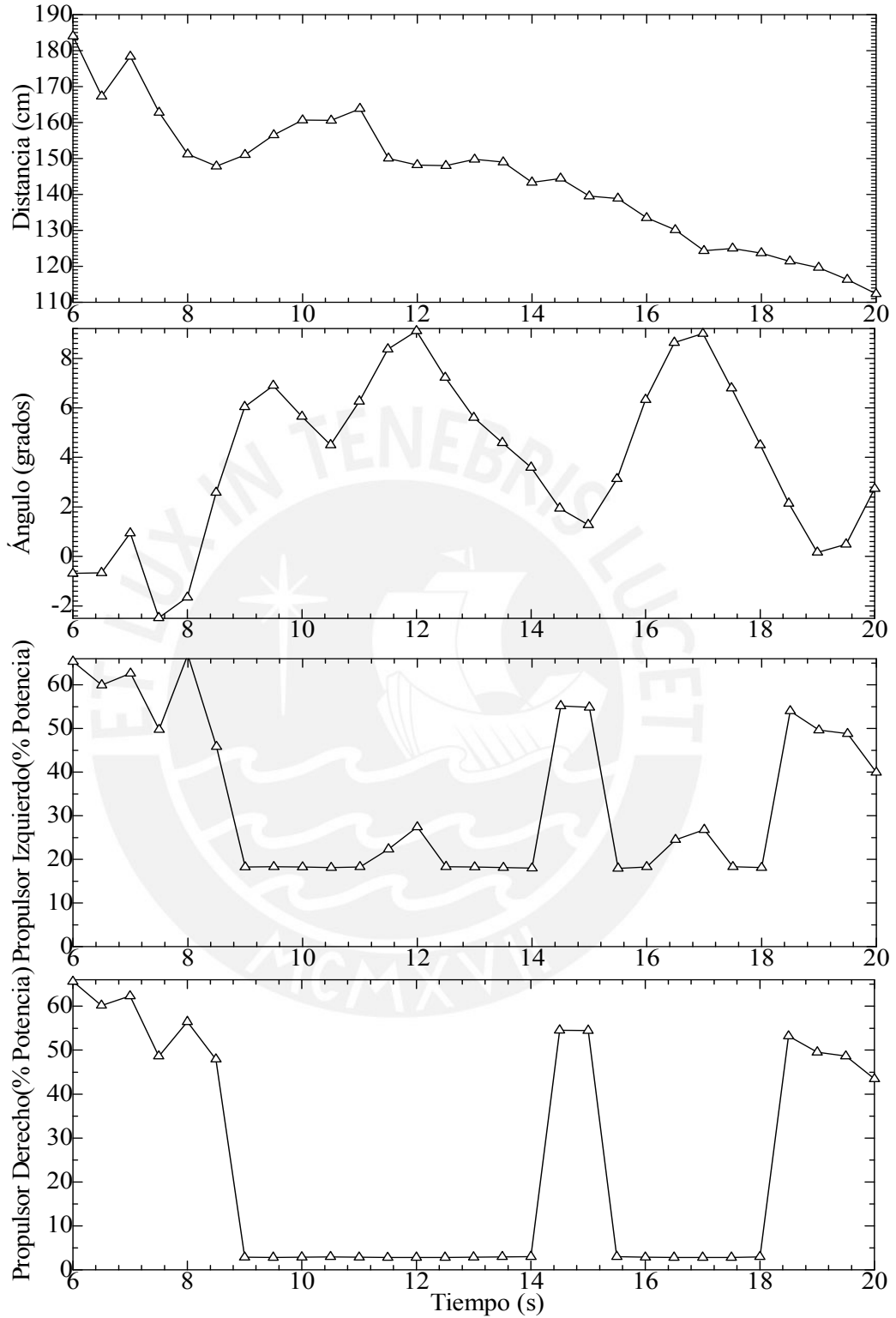


Figura 43: Prueba N°1 de seguimiento de objeto.

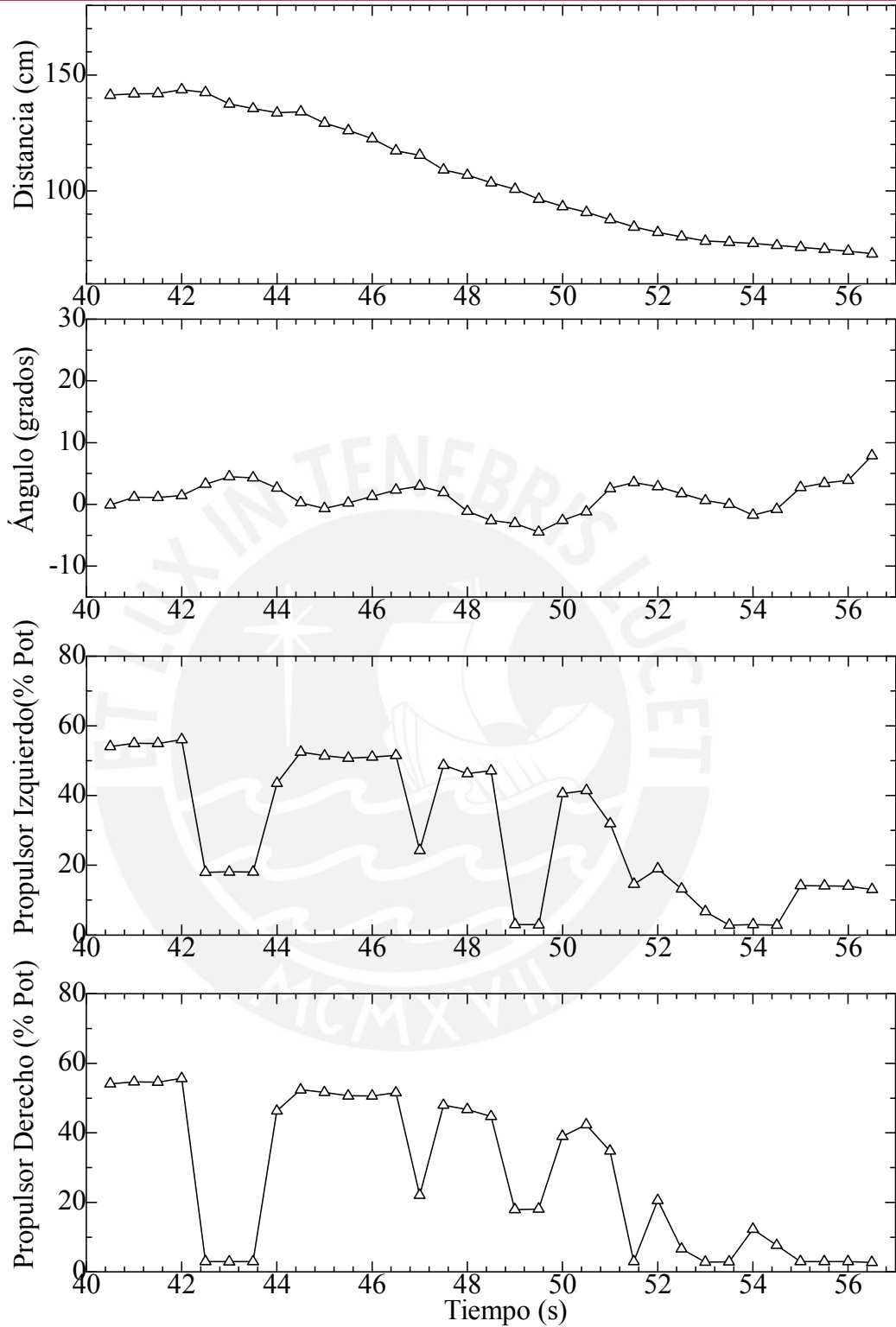


Figura 44: Prueba N°2 de seguimiento de objeto.

### Prueba 3:

De la figura 45: al inicio (segundo 17) el objetivo se encuentra a 125cm y a un ángulo de 10° horario del ROV. El equipo trata de corregir el error con el propulsor izquierdo y lo logra para el segundo 19. Luego enciende ambos propulsores con la finalidad de avanzar en línea recta hasta el segundo 22 cuando el objetivo se pierde. El objetivo no es reconocido: la distancia que se muestra es igual a la consigna, de esta forma el error que ingresa al controlador es de cero; y, el ángulo es cero. Como resultado el ROV no se mueve. En el segundo 26 el ROV vuelve a reconocer al objetivo a una distancia de 100 y un ángulo cercano a cero por lo que inicia su desplazamiento. Luego la distancia sigue disminuyendo pero el ángulo aumenta por lo que el ROV trata de corregirlo manteniendo el propulsor izquierdo a una propulsión moderada y el derecho apagado. La distancia y el ángulo disminuyen lentamente hasta que el ángulo se acerca a cero y comienza a avanzar. Luego el ángulo se eleva drásticamente a 40° horario y la distancia comienza a hacerse negativa por lecturas erróneas del procesamiento de imágenes que ocurren cuando el objeto está muy cerca al ROV.

### Prueba 4:

De la figura 46: se observan dos ensayos de seguimiento. El primero se inicia en el segundo 8 y el siguiente, en el segundo 24. Las zonas de distancia en 20 y ángulo en cero ocurren cuando el ROV no detecta al objetivo. Las zonas en distancia negativa ocurren cuando el objetivo se encuentra muy cercano al ROV y los resultados del procesamiento son erróneos.

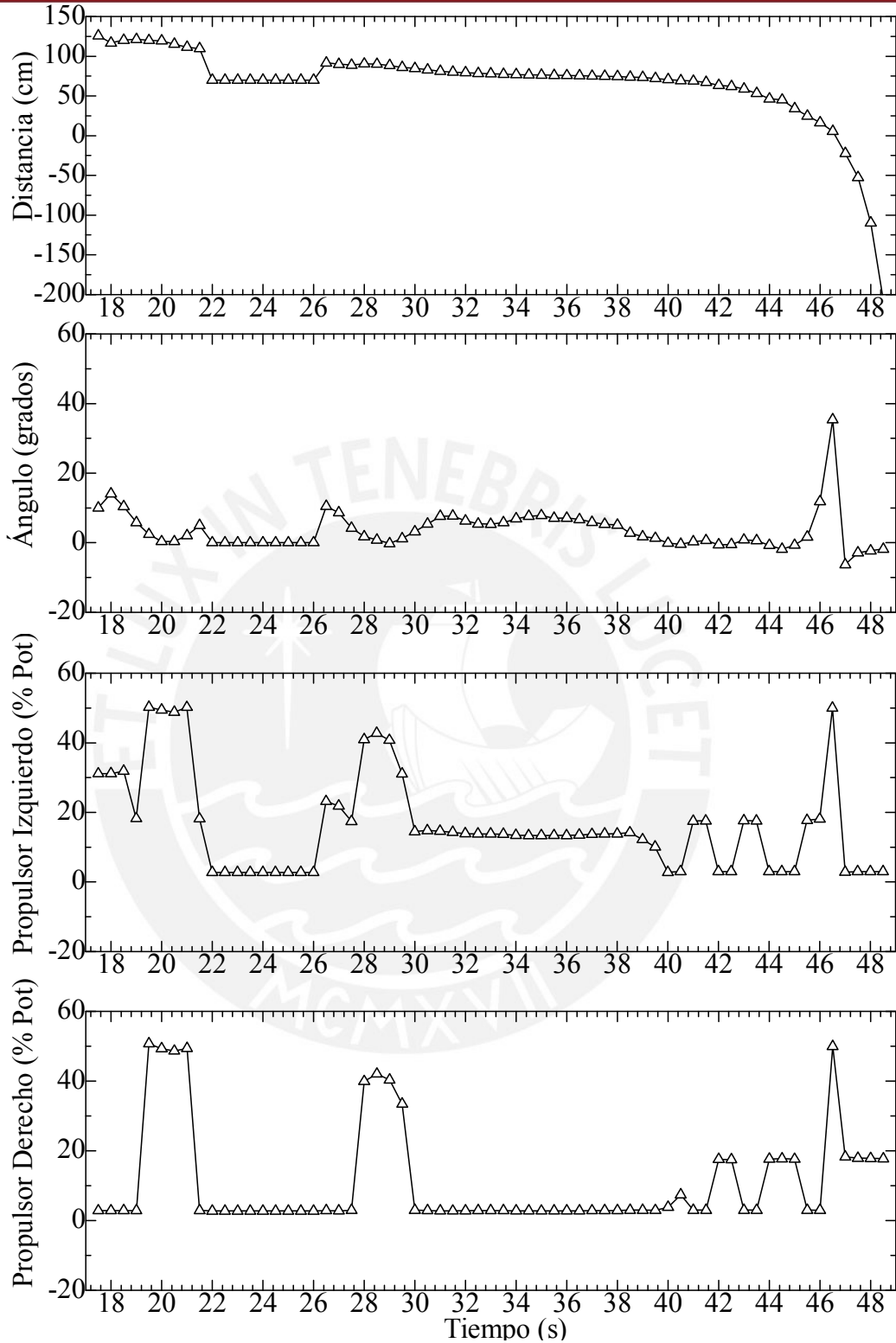


Figura 45: Prueba N°3 de seguimiento de objeto.

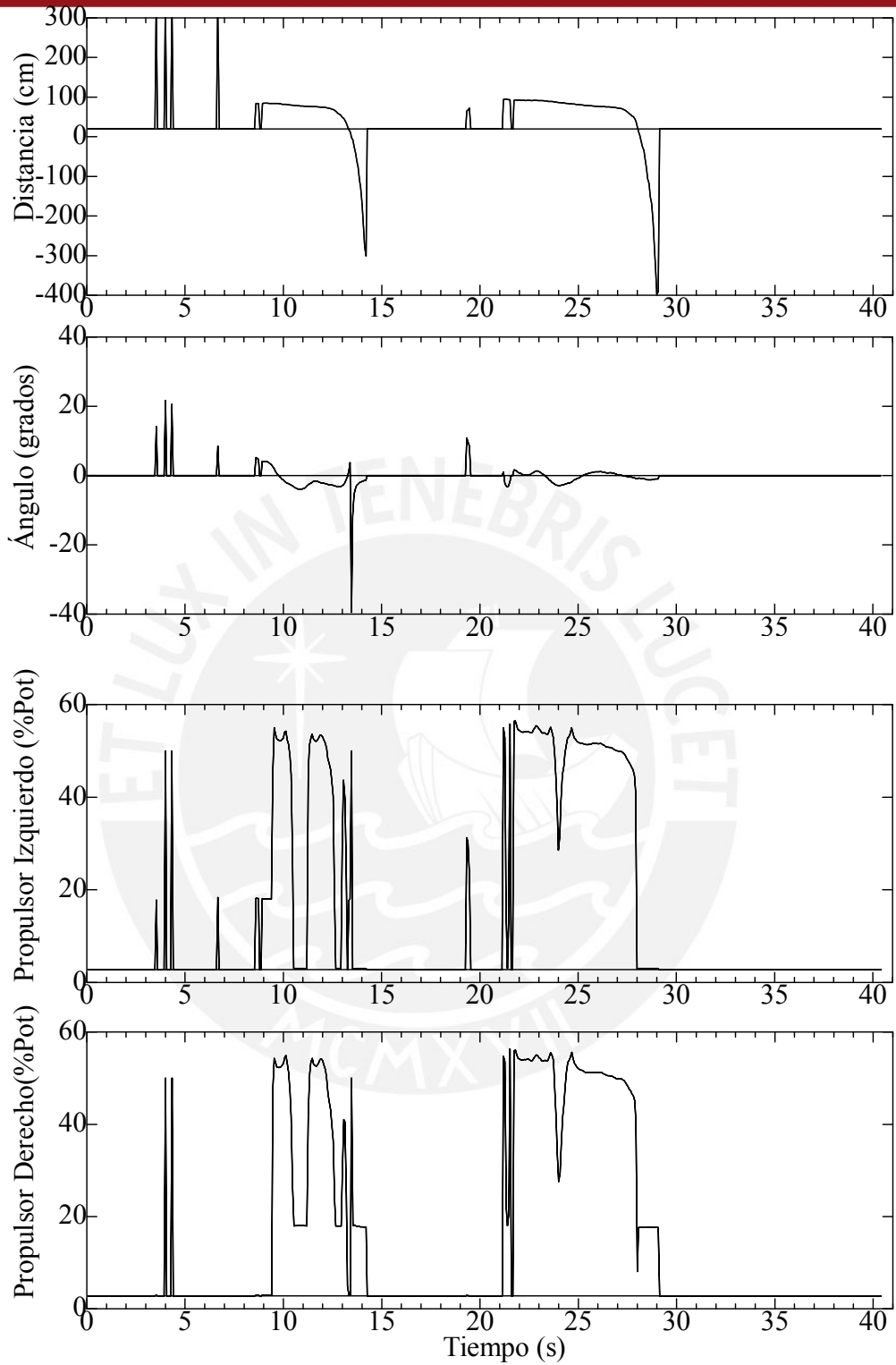


Figura 46: Prueba N°4 de estabilización



## CONCLUSIONES

- El sistema implementado fue capaz de realizar satisfactoriamente las pruebas de seguimiento del objeto patrón como se demuestra en las figuras 43, 44, 45 y 46 en las el ROV busca minimizar el error del ángulo y se acerca al objetivo.
- El sistema de control basado en lógica difusa generó las señales de control necesarias para que el ROV siga al objeto patrón como se observa en las figuras de la 43 – 46 en el porcentaje de potencia del propulsor izquierdo y derecho.
- En la prueba de reconocimiento del objeto patrón, el sistema de visión por computadora logra identificar al objeto patrón en una imagen con varios objetos que contrastan con el fondo de la imagen. En condiciones óptimas de iluminación, el objeto pudo ser identificado hasta una distancia de 200cm.
- El ROV no puede mantener una distancia establecida con el objeto patrón como se observa en los segundos finales de la figura 45 y, en los segundos 14 y 27 de la figura 46. Esto debido a las perturbaciones en el agua, viento y a las características propias del ROV (con la funcionalidad con la que se realizan las pruebas no tiene la capacidad de retroceder). Las perturbaciones se comprueban en los resultados experimentales, por ejemplo entre los segundos 30 y 40 de la prueba se observa que el ROV mantiene el propulsor izquierdo encendido mientras apaga el derecho con la finalidad de disminuir un ángulo positivo pero, éste en vez de disminuir aumenta, luego baja, seguidamente vuelve a aumentar y luego de unos segundo comienza a disminuir. Por tanto el ROV trata de corregir el error de ángulo constantemente mientras avanza ya que no puede girar sobre su propio eje.
- Se implementó un sistema automático de estabilización para un ROV con modo manual y automático de navegación. El modo automático se desarrolló a través de la detección de un objeto de interés del cual se extrajeron las propiedades de ángulo y distancia. Los cambios de ángulo y distancia con referencia a una posición deseada generaron las señales de error que el sistema de control utilizaba para corregir dicho error a través de un controlador basado en lógica difusa. El comportamiento del sistema completo y el sistema de visión por computadora fueron analizados a través de ensayos reales documentados.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] ANTONELLI, Gianluca  
2006 *Underwater Robots. Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator System*. Segunda Edición. Springer.
- [2] CACCIA, M  
2007 *Vision – based ROV horizontal motion control: Near – seafloor experimental results*. *Science Direct*.
- [3] FOSSEN, Thor I.  
2002 *Marine Control Systems – Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*.
- [4] GONZALES, R., WOODS, R.  
2002 *Digital Image Processing*. Segunda Edición. *Prentice Hall*
- [5] HARTLEY, Richard, ZISSERMAN, Andrew  
2003 *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Segunda Edición. Cambridge University Press. New York
- [6] NGUYEN, Hung T. et al.  
2003 *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. Editorial Chapman & Hall.
- [7] SANGBAE, Kim.  
*Sangbae kim's biometric world*. Stanford's Mechanical Engineering Department.
- [8] SIVANANDAM, S. et al  
2007 *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer
- [9] Tecnydyne a Tecnova Inc. Company  
*DC Brushless Thruster*. Fecha de consulta: 02/07/12  
<[www.tecnadyne.com](http://www.tecnadyne.com)>
- [10] WHITE, Frank.  
2011 *Fluid mechanics*. McGraw Hill. 7<sup>ma</sup> edición. New York, N.Y.