



*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación*

PROTOTIPO DE ROBOT ACUÁTICO EXPLORADOR

Tesis Profesional

*Que para obtener el Título de:
Ingeniero en Ciencias de la Computación*

Presenta:

C. Ana Cristina Palacios García

Asesor:

Dra. Angélica Muñoz Meléndez

Coasesor:

Dr. Manuel Rubín Falfán

Índice general

Dedicatorias	XI
Agradecimientos	XIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problemática	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodología	3
1.4.1. Descripción de técnicas y métodos a utilizar	3
1.4.2. Proceso de desarrollo del vehículo	4
1.5. Organización de la tesis	6
2. Marco teórico y estado del arte	7
2.1. Fundamentos	7
2.1.1. Conceptos	7
2.1.2. Principios de flotabilidad	15
2.1.2.1. Principio de Pascal	15
2.1.2.2. Principio de Arquímedes	16
2.2. Clasificación de vehículos submarinos modernos	18
2.3. Historia de la exploración submarina	25
2.4. Estado del arte	38
2.5. Recapitulativo	41
3. Prototipos de Robots Acuáticos	43
3.1. Introducción	43
3.2. Prototipo 1: Vehículo acuático básico	44
3.3. Prototipo 2 : Vehículo sumergible o submarino básico	47
3.3.1. Prototipo 2 v1.0: Vehículo sumergible básico	48
3.3.2. Prototipo 2 v1.1: Vehículo sumergible básico	51
3.3.3. Prototipo 2 v1.2: Vehículo sumergible básico	53
3.3.4. Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico	56
3.4. Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas	61
3.4.1. Control	67

3.4.2.	Capacidades y comportamientos del sistema	67
3.4.2.1.	Capacidades de percepción	67
3.4.2.2.	Capacidades de acción simples(Ca)	67
3.4.2.3.	Comportamientos (Co)	68
3.5.	Recapitulativo	73
4.	Experimentos y resultados	77
4.1.	Condiciones experimentales	78
4.1.1.	Ambiente	78
4.1.2.	Condiciones externas	78
4.2.	Comportamientos básicos	79
4.2.1.	Sumergirse	79
4.2.1.1.	Objetivo del experimento	79
4.2.1.2.	Criterios de éxito	79
4.2.1.3.	Experimentos	79
4.2.2.	Emerger	81
4.2.2.1.	Objetivo del experimento	81
4.2.2.2.	Criterios de éxito	81
4.2.2.3.	Experimentos	81
4.2.3.	Evadir obstáculos	83
4.2.3.1.	Objetivo del experimento	83
4.2.3.2.	Criterios de éxito	83
4.2.3.3.	Experimentos	83
4.2.4.	Cambiar de dirección	85
4.2.4.1.	Objetivo del experimento	85
4.2.4.2.	Criterios de éxito	86
4.2.4.3.	Experimentos	86
4.2.5.	Grabar color	88
4.2.5.1.	Objetivo del experimento	88
4.2.5.2.	Criterios de éxito	88
4.2.5.3.	Experimentos	88
4.2.6.	Muestrear imágenes	89
4.2.7.	Explorar balístico	90
4.2.7.1.	Objetivo del experimento	90
4.2.7.2.	Criterios de éxito	90
4.2.7.3.	Experimentos	90
4.3.	Comportamientos compuestos	92
4.3.1.	Dar resultado	92
4.3.1.1.	Objetivo del experimento no. 1. Caso en el que el robot detecta la marca estando inmerso	93
4.3.1.2.	Criterios de éxito	93
4.3.1.3.	Experimentos	93
4.3.1.4.	Objetivo del experimento no. 2. Caso en el que el robot no encuentra la marca.	95
4.3.1.5.	Criterios de éxito	95
4.3.1.6.	Experimentos	95

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
4.3.2. Explorar	98
4.3.2.1. Objetivos del experimento	98
4.3.2.2. Criterios de éxito	99
4.3.2.3. Experimentos	99
5. Conclusiones y perspectivas	109
5.1. Recapitulativo	109
5.2. Aportaciones y conclusiones	111
5.2.1. Aportaciones	111
5.2.2. Conclusiones	112
5.3. Perspectivas	113
Bibliografía	115
Referencias en línea	117
A. Glosario de definiciones	119
B. Handyboard©	123
C. Motores a prueba de agua	125
D. CMUcam2+	129
E. Dispositivos diversos	131

Índice de figuras

1.1. Emersión de un sumergible autónomo	3
1.2. Inmersión de un sumergible autónomo	4
1.3. Vehículo sumergible basado en un sistema hidrodinámico	4
2.1. Equilibrio de un submarino en función de su postura con respecto a sus ejes.	9
2.2. Equilibrio en el eje transversal de un submarino	9
2.3. Equilibrio en el eje de crujía	10
2.4. Ilustración del principio de Pascal	15
2.5. Suma vectorial de las presiones hidrostáticas y centro de flotabilidad.	16
2.6. Principio de Arquímedes aplicado a un submarino, cálculo del empuje.	17
2.7. Sumergibles tripulados	19
2.8. ROV - <i>Tethered free swimming</i>	21
2.9. ROV Argo - <i>Towed mid water</i>	21
2.10. ROV Comanche - <i>Towed bottom</i>	22
2.11. ROV tipo oruga - <i>Bottom crawling</i>	22
2.12. Componentes Generales de un Vehículo Autónomo Submarino	23
2.13. Vehículos híbridos	24
2.14. Vehículo que transporta o auxilia buzos	24
2.15. Esquema de la Tortuga de David Bushnell 1776	26
2.16. El submarino Nautilus 1800	27
2.17. Submarino Le Plongeur 1863	28
2.18. Submarino Resurgéam 1879	28
2.19. Submarino Argonaut Junior 1894	29
2.20. Submarino Argonaut I 1897	29
2.21. Submarino Holland 1 1895	30
2.22. Bathysphere 1930s	31
2.23. Bathyscaphe Trieste 1953	32
2.24. USS Nautilus 1955	33
2.25. Sumergible Alvin	34
2.26. HUGIN I UUV	35
2.27. HUGIN II UUV	36

2.28. Vehículo Operado Remotamente <i>Kaiko</i>	37
2.29. Sumergible Operado Remotamente <i>AC_ROV</i>	39
2.30. Vehículo sumergible <i>Oberon</i>	39
2.31. Vehículo sumergible <i>REMUS</i>	40
2.32. Vehículo operado remotamente <i>JHUROV</i>	41
2.33. Vehículo operado remotamente <i>Mongoose</i>	41
3.1. Prototipo 1: Vehículo acuático básico	47
3.2. Prototipo 2 v1.0: Vehículo acuático sumergible	51
3.3. Prototipo 2 v1.1: Vehículo acuático sumergible, con flotabilidad negativa	53
3.4. Componentes de la "campana"	55
3.5. Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico, vista lateral derecha	60
3.6. Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico, vista lateral izquierda	60
3.7. Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico, vista superior . . .	61
3.8. Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 1	62
3.9. Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 2	63
3.10. Prototipo 3: Descripción de componentes 3, sensores de contacto	63
3.11. Prototipo 3: Descripción de componentes 4, componentes emplea- dos para realizar las tareas de inmersión y emersión	64
3.12. Prototipo 3: Descripción de componentes 5, Extensiones de los botones de <i>start</i> , <i>stop</i> y del interruptor <i>on/off</i> de la Handyboard©	65
3.13. Posiciones del interruptor que habilitan la comunicación entre la Handyboard©-CMUcam2+© y Handyboard©-PC	65
3.14. Esquema completo del interruptor que habilita la comunicación entre la Handyboard©-CMUcam2+© y Handyboard©-PC.	66
3.15. Autómata del comportamiento básico <i>sumergirse</i>	69
3.16. Autómata del comportamiento básico <i>emerger</i>	70
3.17. Autómata del comportamiento básico <i>evadir obstáculos</i>	70
3.18. Autómata del comportamiento básico <i>cambiar de dirección</i> .	70
3.19. Autómata del comportamiento básico <i>grabar color</i>	71
3.20. Autómata del comportamiento básico <i>muestrear imágenes</i> . . .	71
3.21. Autómata del comportamiento básico <i>explorar balístico</i> . . .	72
3.22. Autómata del comportamiento compuesto <i>dar resultado</i>	73
3.23. Autómata del comportamiento compuesto <i>explorar</i>	74
4.1. Comportamiento básico <i>sumergirse</i>	80
4.2. Comportamiento básico <i>emerger</i>	82
4.3. Comportamiento básico <i>evadir obstáculos</i>	85
4.4. Comportamiento básico <i>cambiar de dirección</i>	87
4.5. Comportamiento básico <i>grabar color</i>	89
4.6. Comportamiento básico <i>explorar balístico</i>	92
4.7. Comportamiento compuesto <i>dar resultado</i> , caso en el que el robot detecta la marca estando inmerso.	94

4.8. Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento no. 1 del comportamiento compuesto dar resultado	95
4.9. Comportamiento básico dar resultado , caso en el que el robot no encuentra la marca estando en la superficie.	97
4.10. Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento no. 2	97
4.11. Comportamiento compuesto explorar , caso 1: búsqueda exitosa de marca, estado inicial del robot igual a <i>inmerso</i>	101
4.12. Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el caso 1: búsqueda exitosa de marca	101
4.13. Comportamiento compuesto explorar , caso 2: búsqueda exitosa de marca, estado inicial del robot igual a <i>en la superficie</i>	103
4.14. Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento del caso 2: búsqueda exitosa de marca	104
4.15. Comportamiento compuesto explorar , caso 3: búsqueda no exitosa de marca, estado inicial del robot igual a <i>en la superficie</i>	106
4.16. Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento caso 3: búsqueda no exitosa de marca	107
1. Tarjeta de control Handyboard©	124
2. Tarjeta de expansión de la Handyboard©	124
3. Tarjeta controladora Handyboard© y módulo de expansión	124
4. Motor DC a prueba de agua	127
5. Vistas frontal y lateral de la CMUcam2+©	130
6. Dimensiones aproximadas de la CMUcam2+©	130
7. Cable RJ11-TTL	131
8. Cable dual	132

Índice de cuadros

4.1. Resumen de resultados del comportamiento básico sumergirse .	80
4.2. Resumen de resultados del comportamiento básico emerger . . .	83
4.3. Resumen de resultados del comportamiento básico evadir obstáculos	84
4.4. Resumen de resultados del comportamiento básico cambiar de dirección	88
4.5. Resumen de resultados del comportamiento básico explorar balístico	91
4.6. Resumen de resultados del comportamiento compuesto dar resultado	98
4.7. Resumen de resultados del comportamiento compuesto explorar	105

Dedicatorias

A las personas que más quiero y respeto por todo lo que han hecho por mí, principalmente por su amor, apoyo y comprensión, mis padres Elcira y Sergio.

A mis tres hermanos: Rocío, Sergio y Octavio, por todos aquellos momentos y por ser buenos hermanos.

Agradecimientos

A la doctora Angélica Muñoz Meléndez por aceptar y apoyar la realización de la presente tesis bajo su dirección. Además del interés y la motivación mostrados durante el desarrollo de la tesis.

Al doctor Manuel Rubín Falfán por su confianza y dedicación, aún en tiempos difíciles.

A Alberto Polanco por los consejos y el apoyo brindados.

A las personas que han influido en mi vida sin siquiera quererlo, a esas personas especiales, a mis amigos: Ivette Valderrabano, Ixchel Rodríguez, David Rojas, David Melo, Alberto Polanco, Ernesto Uribe, Hipólito Guerrero, Virgilio Pérez y Nestor Aguirre.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En agosto de 2004, investigadores del INAOE, así como investigadores de la maestría en inteligencia artificial de la Universidad Veracruzana, organizaron el Primer Torneo Mexicano de Robots Limpadores. Estudiantes universitarios de todo el país fueron invitados a programar un robot móvil capaz de limpiar una habitación e inscribirlo en el concurso. La últimas dos ediciones de este evento se llevaron a cabo respectivamente, en septiembre de 2005 y julio de 2006.

El torneo tiene dos objetivos. En primer lugar se propone crear un foro para el intercambio de ideas entre estudiantes universitarios y de posgrado en computación, electrónica y áreas afines. En segundo lugar su busca sensibilizar a jóvenes estudiantes y al público en general sobre el impacto que los robots pueden tener en nuestras vidas diarias.

Las ediciones de 2005 y 2006 del torneo incluyeron una exhibición de robots limpiadores acuáticos. i.e. robots que se desplazan en la superficie del agua y son capaces de identificar ciertos residuos y recuperarlos. En agosto de 2007, se organiza la tercera exhibición de robots limpiadores acuáticos.

Esta propuesta de tesis tiene como objeto el diseño de un robot que cubra una parte de las especificaciones del 4to. Torneo Mexicano de Robots Limpadores Acuáticos en la liga Limpadores de Minas ([cmr2007-url](#)). Además, se espera que pueda participar en la exhibición de robots limpiadores acuáticos de 2007.

1.2. Problemática

En este trabajo se propone diseñar, construir y programar un vehículo submarino autónomo capaz de realizar tareas tales como sumergirse, emerger, evadir obstáculos, cambiar de dirección, explorar y detectar ciertas marcas localizadas

en el fondo de una pecera de 150 *cm* de largo \times 100 *cm* de ancho \times 50 *cm* de alto.

El vehículo submarino deberá desplazarse a lo largo de la superficie de la pecera en dos modalidades, i.e. sumergido o en la superficie del agua. El desplazamiento del robot permitirá localizar la ubicación de una marca situada en una posición aleatoria en el fondo de la pecera. Finalmente, el robot deberá indicar si detectó o no la marca después de varios intentos.

Uno de los retos principales durante la construcción del robot será lograr construir un robot equilibrado, cuyo interior sea totalmente a prueba de agua.

Este tipo de vehículos submarinos tiene un gran número de aplicaciones, principalmente, en la sustitución del hombre en tareas de inspección, exploración, búsqueda y recolección en ambientes peligrosos u hostiles, y en la realización de tareas de exploración inalcanzables para el hombre, e.g. cavernas estrechas, zonas contaminadas, o grandes profundidades, etc.

Otra de las aplicaciones de este tipo de vehículos son militares, pues son desarrollados específicamente para ejecutar una misión dada, e.g. reconocimiento, inserción y eliminación de minas.

Algunos otros vehículos submarinos, realizan operaciones de mantenimiento, inspección, exploración, e.g. de ductos submarinos, estructuras submarinas de torres petroleras, hábitats, etc.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implantar un prototipo de robot acuático explorador capaz de detectar marcas de forma autónoma.

Objetivos Específicos

1. Estudiar la morfología y equipamiento necesarios en sensores y actuadores, de un robot capaz de desplazarse de manera autónoma en la superficie y dentro del agua.
2. Diseñar y construir un prototipo de robot físico de acuerdo al estudio anterior.
3. Definir y programar un conjunto de comportamientos para controlar dicho prototipo, que le permita identificar marcas localizadas en el fondo del área de pruebas.
4. Diseñar e implementar una estrategia que garantice que el robot indicará si encontró o no la marca deseada.

1.4. Metodología

1.4.1. Descripción de técnicas y métodos a utilizar

Control del robot

Para el control de un robot móvil existen básicamente tres enfoques:

- **Deliberativo.** Las funciones del robot son divididas en tres funciones principales: sensar, planear y actuar. Cada una de estas funciones debe realizarse de manera secuencial e independiente, generalmente con lenguajes basados en lógica.
- **Situado.** El robot percibe el mundo y ejecuta en respuesta, la acción que le parezca más apropiada. El robot de esta propuesta empleará el enfoque situado, por tanto, el robot actuará de acuerdo a los datos obtenidos por los sensores para alcanzar los objetivos.
- **Híbrido.** Es una fusión de los enfoques deliberativo y situado.

Inmersión - Emersión

Algunos sumergibles o submarinos emplean un sistema de planos de inmersión: delanteros y traseros, tales que son ajustados de cierta forma para hacer que el sumergible sea capaz de emerger (figura 1.1) o de hundirse (figura 1.2), esto es posible mientras el sumergible se desplace a una velocidad considerable, ya que de lo contrario no existiría la fuerza hidrodinámica que actuará directamente sobre los planos de inmersión y por tanto el sumergible no podría hundirse o emerger.

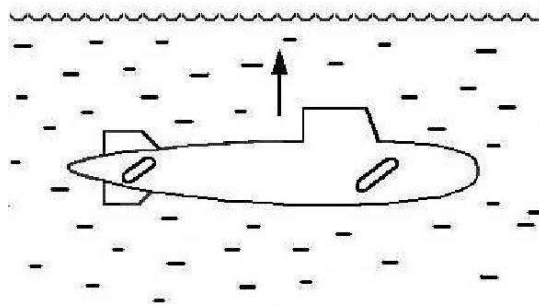


Figura 1.1: Emersión de un sumergible autónomo

Otros sumergibles emplean también un sistema hidrodinámico basado en el trabajo de un motor eléctrico que empuja hacia abajo o hacia arriba para lograr la inmersión (figura 1.3). Estos son por lo regular del tipo de vehículos científicos,

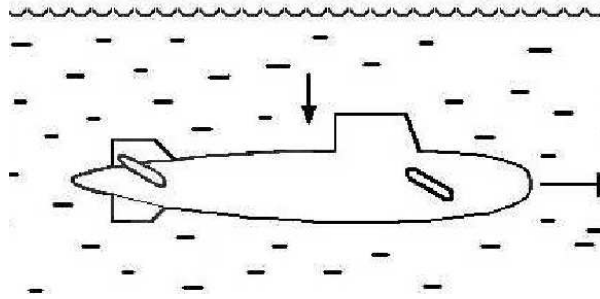


Figura 1.2: Inmersión de un sumergible autónomo

de rescate o experimentales como el ALVIN (Bohm et Jensen (2003)).

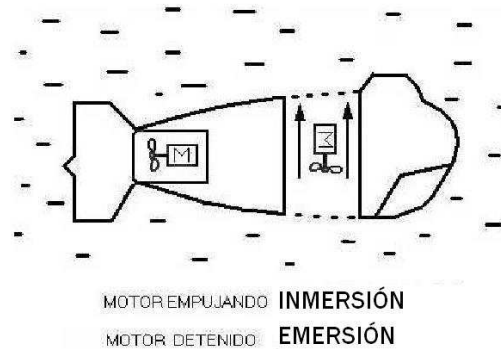


Figura 1.3: Vehículo sumergible basado en un sistema hidrodinámico. El motor que se ocupa de la inmersión y de la emersión está rodeado de flechas.

Otros vehículos, i.e. los vehículos submarinos, emplean por lo regular aire comprimido para realizar las tareas de inmersión y emersión, lo cual les permite conservar su profundidad y estabilidad.

1.4.2. Proceso de desarrollo del vehículo

1. Diseñar y construir un prototipo de vehículo autónomo submarino

Se diseñará y construirá un robot acuático explorador. Se equipará dicho robot con los dispositivos de percepción tradicionales, e.g. sensores de contacto, cámara, y actuadores, e.g. motores DC para las hélices y servomotores, todos necesarios para la navegación y exploración autónoma del

vehículo.

Para la programación del robot se empleará una tarjeta comercial Handy Board © basada en el controlador MC68HC11 de Motorola.

2. Experimentar

- a) **Preparar un ambiente acuático.** El ambiente en donde se realizará la tarea de exploración es una pecera de policarbonato transparente de 100 *cm* de largo × 150 *cm* de ancho × 50 *cm* de alto.
- b) **Asegurar estabilidad y flotabilidad.** Para asegurar la estabilidad del robot, se ordenarán adecuadamente los elementos del mismo, i.e. motores, tanque de aire comprimido, tarjeta controladora, cámara, etc.
Para asegurar la flotabilidad del robot, i.e. negativa o positiva (c.f. sección 2.1.1), se empleará un mecanismo que le permita ganar o perder peso, e.g. lastres (c.f. sección 2.1.1).
- c) **Obtener el color de la marca a buscar.** Se colocará la marca del color a identificar al frente de la cámara del robot para que este obtenga el color de la marca. Posteriormente, la cámara deberá guardar dicho color en memoria.
- d) **Buscar marcas colocadas en el fondo de la pecera.** Con la ayuda de una cámara colocada en la parte inferior del robot, viendo hacia el fondo de la pecera, el robot podrá detectar si encontró o no la marca.
- e) **Dar el resultado de la búsqueda.** Hay dos posibles resultados, i.e. el robot encontró la marca, o bien el robot no encontró la marca. Para dar cualquiera de los dos resultados antes mencionados, el robot deberá encontrarse en la superficie del agua.

3. Evaluar el desempeño del vehículo

El robot submarino desarrollado en esta tesis se evaluará de acuerdo a algunos parámetros que miden su desempeño, tales como:

- a) Tiempo necesario para completar las tareas, i.e. tiempo necesario para sumergirse, emerger, evadir obstáculos, cambiar de dirección, explorar balístico, explorar y dar resultado.
- b) Número de objetivos alcanzados durante los experimentos generales, i.e. los objetivos de los comportamientos básicos que componen el comportamiento compuesto **explorar**.
 - Esto refleja qué tan bien se ejecutaron los comportamientos individuales del robot.
 - Por último, esto indicará si el robot logró detectar la marca en el experimento.

1.5. Organización de la tesis

En esta tesis se presenta el diseño, la construcción y el control de un robot acuático explorador capaz de sumergirse, emerger, evadir obstáculos, etc. También se describen los experimentos realizados y los resultados obtenidos por el robot durante la ejecución de sus comportamientos tanto básicos como compuestos.

La tesis se encuentra organizada en 5 capítulos. En el capítulo 1 se presenta una breve introducción. En el capítulo 2 se presentan los principales conceptos relacionados con la tesis, así como una clasificación de vehículos submarinos modernos. La historia y el estado del arte sobre robots submarinos son presentados también en este capítulo. En el capítulo 3 se describe el diseño, la construcción y el desempeño de diversos prototipos que permitieron obtener un prototipo final, con desempeño aceptable para cubrir los requerimientos de la tesis. Las acciones simples, los comportamientos básicos y los comportamientos compuestos del robot, también son presentados en este capítulo. En el capítulo 4 se describen los experimentos realizados para probar cada uno de los comportamientos, así como los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las aportaciones, conclusiones y perspectivas de este trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

En este capítulo se presentan los principales conceptos que serán utilizados a lo largo de la presente tesis. Éstos conceptos van desde las definiciones de AUV, ROVs, sumergibles y submarinos, hasta aquellos conceptos clave que hacen posible la inmersión y la emersión de un submarino, tales como el centro de gravedad, la densidad, el desplazamiento, el equilibrio, la fuerza de empuje, y los principios de Pascal y Arquímedes.

2.1. Fundamentos

2.1.1. Conceptos

AUV: Los Vehículos Autónomos Submarinos (AUVs - por sus siglas en inglés) son vehículos robóticos no tripulados, que generalmente poseen su propio suministro de energía. Estos vehículos no tienen ningún tipo de liga con la superficie, usan una computadora o algún circuito electrónico para su control, poseen sensores que les proporcionan la información necesaria del exterior, e.g. medidores de profundidad, de velocidad, etc., también usan sonares que les permiten percibir y evitar obstáculos, así como mapear el fondo del mar; y cámaras de video para la recuperación de imágenes submarinas.

Algunos de los inconvenientes de usar AUVs son:

1. La cantidad de energía disponible es limitada.
2. La información que proporcionan los sensores no es lo suficientemente confiable.
3. La falta de computadoras y programas capaces de manejar en tiempo real las grandes cantidades de datos capturados por los sensores.

Centro de gravedad: Es el punto de un vehículo acuático, donde se considera se encuentra aplicada la fuerza de gravedad resultante de los distintos puntos del mismo. Su posición depende sólo de los pesos existentes a bordo y de su distribución.

Densidad: La densidad es una propiedad física de la materia que describe cuán unidos están los átomos de un elemento o las moléculas de un compuesto. Mientras más unidas están las partículas individuales de una sustancia, más densa es la sustancia.

Si un objeto es menos denso que el fluido donde está sumergido, el primero flotará en el fluido. Pero si es más denso que el fluido, entonces se hundirá. Este concepto explica por qué algunos objetos flotan en el agua y otros se hunden.

La temperatura es uno de los factores que afectan la densidad de la materia. Muchos materiales se expanden cuando son calentados, y como los materiales que se expanden ocupan un volumen mayor, entonces su densidad disminuye.

La densidad es usada comúnmente para categorizar e identificar diferentes materiales.

La densidad se obtiene con la fórmula siguiente:

$$Densidad = Masa/Volumen$$

y se expresa en g/cm^3 .

La densidad es un concepto fácil de confundir, por ejemplo, muchas cosas que comúnmente creemos que son "livianas" o "pesadas" no tienen masas diferentes, pero sí tienen densidades diferentes.

Desplazamiento: Es el peso del volumen del agua desplazada o desalojada por la parte sumergida de un submarino o vehículo submarino, generalmente el casco; por tanto, si el peso del casco es menor que el desplazamiento, obtenemos flotabilidad positiva, i.e. el vehículo flotará en la superficie. En el caso opuesto, i.e. si el peso del casco es mayor que el del agua desplazada, el vehículo se hundirá.

Emersión: Es el brote o salida de un submarino a la superficie del agua.

Equilibrio de un submarino: Para mantener el equilibrio de un vehículo submarino, es necesario que éste mantenga una postura horizontal, en el sentido del eje transversal, para garantizar una trayectoria a igual profundidad; y una postura vertical en el eje de crujía para evitar que el submarino dé una vuelta de campana al actuar el torque del motor. Por el contrario, el equilibrio en el eje vertical sólo afecta el rumbo a seguir y generalmente se controla con los timones verticales (figura 2.1).

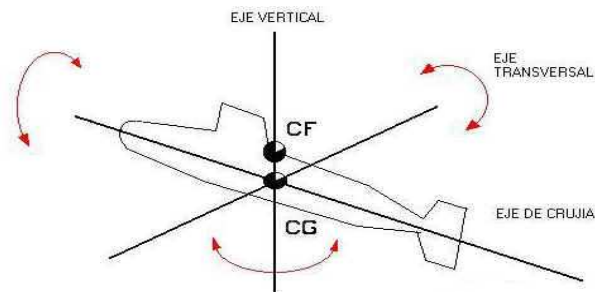


Figura 2.1: Equilibrio de un submarino en función de su postura con respecto a sus ejes. CF y CG significan, respectivamente, Centro de Flotabilidad y Centro de Gravedad (Introducción-url).

El equilibrio en el eje transversal se logra haciendo que coincidan en una misma línea vertical el centro de gravedad CG del submarino y el centro de flotabilidad CF , dos fuerzas opuestas y equilibradas (figura 2.2).

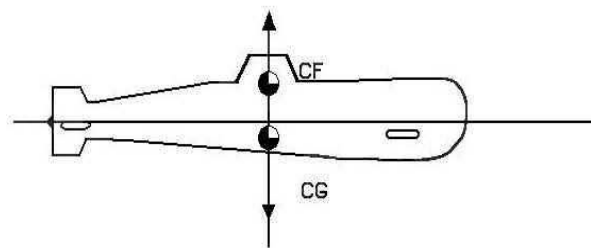


Figura 2.2: Equilibrio en el eje transversal de un submarino. CF y CG significan, respectivamente, Centro de Flotabilidad y Centro de Gravedad (Introducción-url).

Es importante que estas dos fuerzas CF y CG coincidan verticalmente tanto en flotación (cuando los lastres están vacíos) como en inmersión (cuando los lastres están llenos), ya que así el vehículo mantendrá una perfecta postura horizontal en todo momento. Para lograr que ambas fuerzas coincidan en la misma línea vertical, es posible desplazar elementos pesados, e.g. plomos, baterías, etc., lo más abajo posible, con lo cual se recorre el CG a una nueva posición hacia abajo, y colocar elementos con flotabilidad positiva, e.g. cámaras estancas y objetos que tienden a flotar o están huecos, lo más arriba posible, lo cual recorre el CF hacia arriba.

Por el contrario, el equilibrio en el eje longitudinal o de crujía es más sencillo de alcanzar, ya que para que éste sea mayor, sólo basta con aumentar la distancia en sentido vertical entre el centro de flotabilidad CF y el centro de gravedad CG (figura 2.3).

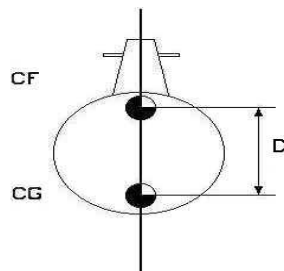


Figura 2.3: El equilibrio en el eje de crujía depende de la distancia en sentido vertical entre el centro de flotabilidad CF y el centro de gravedad CG (Introducción-url).

Si la distancia (D) entre centros es pequeña, el submarino puede dar vueltas sobre sí mismo ante la torsión del motor, especialmente si está en ángulo de inmersión o emersión. Para aumentar la distancia D se colocan los elementos más pesados del vehículo lo más abajo posible, mientras que aquellos que le otorgan flotabilidad positiva se colocan lo más arriba posible.

Es importante señalar que en flotación, todos los elementos que se encuentren por encima de la línea de flotación (aún aquellos que en inmersión tengan flotabilidad positiva) actuarán como generadores de peso. Por ello, para facilitar el equilibrio es deseable que todo aquello que se halle por encima de la línea de flotación sea lo más liviano posible y de flotación casi neutra.

Estabilidad: Es la facultad de un submarino de recobrar su posición de equilibrio.

Estanqueidad: Es la propiedad de un casco o compartimiento del mismo de no permitir el ingreso de líquidos.

Flotabilidad: Es la cualidad de mantenerse en la superficie del agua sin hundirse.

Fuerza de empuje: El empuje es la fuerza que todo fluido ejerce sobre un cuerpo cuando éste se sumerge en él. Su valor es el peso del fluido desalojado.

Si se tomara el volumen del agua desplazada por la parte sumergida del submarino y se llenara de agua, se podría obtener el centro de gravedad de este nuevo cuerpo, y es en ese punto, donde actúa la fuerza de empuje. Nótese que este centro de gravedad imaginario no tiene por qué coincidir con el centro de gravedad real del cuerpo.

Esto es importante al construir vehículos acuáticos, pues si el centro de gravedad del vehículo se encontrara por encima del centro de empuje (o centro de flotabilidad CF), cualquier ola haría volcar al vehículo. Si por el contrario, el CG está por debajo del centro de empuje, ambas fuerzas, empuje y peso, crearían un par de fuerzas restauradoras que enderezarían al vehículo. Por esta razón se ha de procurar que los motores, la carga y todas las partes pesadas del vehículo acuático estén lo más bajo posible.

Inmersión: Es la entrada o fase durante la cual el submarino se sumerge dentro del agua.

Lastre: Peso agregado a un vehículo submarino, e.g. piedras, plomos, arena, agua u otra cosa, con la finalidad de que el vehículo se sumerja en el agua hasta donde convenga.

Como los submarinos están destinados a descender a grandes profundidades, deben ser capaces de sumergirse, de emerger y de flotar en la superficie. Todo esto lo consiguen alterando su peso gracias a los tanques de lastre.

Para emerger utilizan aire comprimido, que expulsa el agua de los tanques de lastre a través de unas válvulas. Cuando el submarino llega a la superficie, los tanques de lastre se vacían por completo. Para la inmersión, el agua entra por las válvulas inferiores del vehículo y el aire va saliendo por las superiores.

Masa: Es la cantidad de materia contenida en un objeto. La masa es una magnitud invariante que no depende de ningún modo de la situación física en la que se encuentra el objeto, i.e. no importa si el objeto está en la tierra, en la luna, o flotando en el espacio, por que la cantidad de materia del objeto es siempre la misma. Comúnmente se le mide en unidades de gramos (gr), se puede expresar mediante la expresión $m = P/g$, donde P es el peso y g es la gravedad.

Peso: Es la fuerza con la que la Tierra atrae a un cuerpo. Dado que la intensidad de la gravedad varía según la posición, e.g. en los polos es igual a $9,83m/s^2$, en la línea ecuatorial es igual a $9,79m/s^2$ y en latitud de 45° es igual a $9,8m/s^2$. Si no se especifica lo contrario, se entiende que se trata del peso provocado por una intensidad de la gravedad definida como normal de valor $9,81m/s^2$.

La fuerza gravitatoria que actúa sobre un cuerpo de masa m se puede expresar matemáticamente por la expresión: $P = m \times g$, donde m es la masa y g es la gravedad (Peso-url).

Presión: Es una propiedad que relaciona una fuerza con la superficie sobre la que actúa, se mide por el cociente entre la fuerza y la superficie. La unidad de presión en el Sistema Internacional (SI) es el pascal (Pa). La presión dentro de un fluido actúa en forma perpendicular en las superficies de los cuerpos en él sumergidos.

- ROV:** Los Vehículos Operados Remotamente (ROVs por sus siglas en inglés) son vehículos modernos que juegan un papel importante en la exploración submarina. Pueden ser vehículos robóticos submarinos no tripulados o plataformas de trabajo, ambos controlados desde la superficie por un piloto. Un ROV se conecta a su piloto a través de un cable. El cable es básicamente un cable eléctrico protegido por el cuál la energía de los motores y otros sistemas son transmitidos. Este cable transmite las señales de control y comandos desde el piloto hasta el vehículo submarino. El usar un cable es una gran ventaja para los ROVs, ya que disponen gracias al cable de energía suficiente para realizar cualquier tipo de operación. Sin embargo, el cable limita el rango y la velocidad del mismo.
- Los ROVs pueden llevar cámaras y luces para extender su visibilidad, motores para moverse, sonares para navegar o para detectar objetos, manipuladores, etc.
- Submarino:** Es un vehículo capaz de navegar tanto por la superficie como en las profundidades del mar mediante un sistema de desplazamiento variable, i.e. para hacer que el submarino se sumerja o emerja es necesario variar el peso del mismo, y esto se hace llenando o vaciando los tanques de lastre del vehículo. Con un incremento del peso se logra la inmersión y a la inversa se logra la maniobra de emersión, es por esto que los submarinos emplean el concepto de densidad que cambia, ya que los submarinos tienen un volumen constante pero pueden variar su masa cuando retienen agua en sus tanques de lastre. Cuando se llenan los tanques de lastre, la masa y por consiguiente la densidad del submarino aumenta, provocando en el submarino una flotabilidad o ligereza negativa, lo cual le permite sumergirse en las profundidades.
- Los submarinos son grandes tanto en tamaño como en tripulación y sus principales usos son militares y de turismo.
- Sumergible:** Los sumergibles son submarinos pequeños. A diferencia de los AUVs, estos están tripulados por una o dos personas que los operan. Se sumergen más profundamente que los submarinos y se usan para el trabajo comercial, e.g. el mantenimiento de plantas petroleras submarinas, etc., y para la exploración científica. Son de desplazamiento fijo, i.e. su peso no varía durante la inmersión, y su estado natural es la flotabilidad positiva, i.e. tienden a flotar.

UUV:

Los vehículos submarinos no tripulados (UUV - por sus siglas en inglés), también conocidos como vehículos autónomos submarinos (AUVs), han estado en desarrollo por décadas dentro del ejército naval de Estados Unidos. Las plataformas de operación de los UUVs van desde submarinos hasta barcos y vehículos inflables, e.g. balsas, etc.

Aunque los primeros UUVs desarrollados son grandes y de costos relativamente elevados, del orden de millones de pesos, el futuro para los UUVs es prometedor debido a que se están desarrollando nuevos modelos de dimensiones menores, del orden de 8,5 *m* de largo por 0,965 *m* de diámetro, e.g. Lazarus AUV (Wernli (2000)). La reducción de las dimensiones influye de cierta forma en la reducción de sus costos, pero no de forma significativa. Los desarrollos recientes de UUV en el ejército naval de Estados Unidos se han enfocado hacia la investigación submarina, y su misión inicial es la búsqueda de minas, realizada desde un submarino.

Volumen:

Es la cantidad de espacio ocupado por una cantidad de la materia y es comúnmente expresado en centímetros cúbicos (cm^3) o en mililitros (*ml*, $1cm^3$ es igual a $1ml$). Para medirlo, se debe ver cuantas veces entra en él una unidad de volumen utilizada como unidad de medida. Esta unidad se llama metro cúbico, y corresponde a un cubo de un metro de lado. Para medir volúmenes mayores y menores que el metro cúbico, se utilizan sus múltiplos y submúltiplos, e.g. decámetro cúbico, hectómetro cúbico, etc. (múltiplos del metro cúbico), decímetro cúbico, centímetro cúbico, etc. (submúltiplos del metro cúbico). El procedimiento a seguir para medir el volumen de un cuerpo dependerá del estado en que se encuentre dicho cuerpo: gaseoso, líquido o sólido.

En el caso de los gases, el volumen varía considerablemente según la temperatura y presión; también depende de si está contenido en un recipiente y, si lo está, entonces adoptará la forma y el tamaño de dicho recipiente. Para medir el volumen de un líquido se emplean diversos recipientes graduados, dependiendo de la exactitud con la que se desee conocer dicho volumen.

Como algunos sólidos tienen formas sencillas, su volumen puede calcularse con base en la geometría clásica.

2.1.2. Principios de flotabilidad

El hecho de que un vehículo pueda flotar, tanto en la superficie, como en inmersión, se debe a dos fenómenos físicos que se enuncian bajo los nombres de "Principio de Pascal" y "Principio de Arquímedes", los cuales se introducen brevemente a continuación (flota-url).

2.1.2.1. Principio de Pascal

*"Si una presión actúa sobre un cuerpo sin forma propia, e.g. un fluido, éste intenta eludir la presión, con lo que provoca que la presión se transmita íntegramente a todos sus puntos y en todas direcciones. Al ejercer una presión sobre un fluido contenido en un recipiente, ésta actúa íntegramente sobre cada punto de las paredes del recipiente, por lo que la fuerza que recibe una cierta superficie será proporcional a ésta"*¹.

Si se aplica el principio de Pascal a un submarino, entonces sobre cada punto del casco del submarino sumergido, el agua ejerce una presión perpendicular a la superficie del casco en dicho punto, cuyo valor es expresado en kg/cm^2 . Así, en la figura 2.4 las flechas indican las direcciones y los valores de la presión del agua, también conocida como presión hidrostática, en distintos puntos del casco. Cuánto más profundo esté un punto del casco, mayor será el valor de la

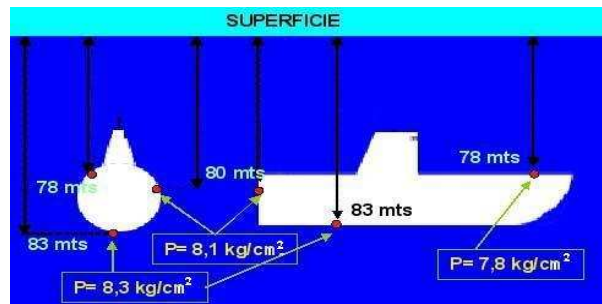


Figura 2.4: Principio de Pascal. Las flechas negras indican cómo actúa la presión perpendicularmente sobre cada uno de los puntos del casco del submarino, se indican también las profundidades, en metros lineales, y las presiones correspondientes, en Kg/cm^2 , para cada uno de los puntos. Tomado de (flota-url).

presión hidrostática en él. Si se suman vectorialmente las presiones hidrostáticas en todos y cada uno de los puntos de la superficie del casco, se obtendrá una resultante denominada F , que es aplicada a un punto interior del submarino llamado "Centro de Carena" o "Centro de flotabilidad", dicha resultante es dirigida hacia la superficie del agua y es perpendicular a ella (figura 2.5). Esto indica que en virtud del Principio de Pascal, el submarino tiende a subir hacia

¹De acuerdo a Gispert (1999), Atlas Visuales Océano de Física (Gispert (1999)).

la superficie y en dirección perpendicular a ella.

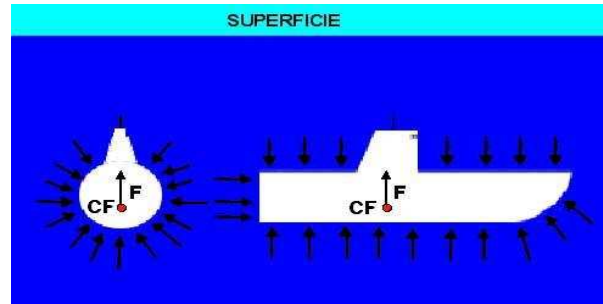


Figura 2.5: Resultante F obtenida de la suma vectorial de las presiones hidrostáticas de todos y cada uno de los puntos del casco del submarino, dicha resultante es aplicada al Centro de Carena (C) también conocido como Centro de Flotabilidad (CF). Tomado de (flota-url).

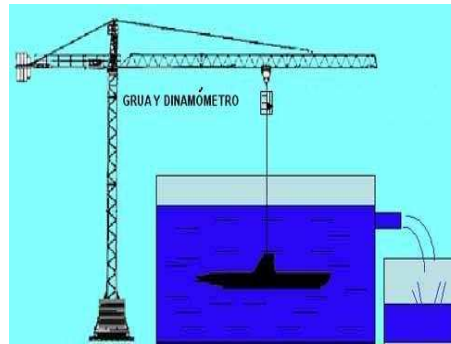
2.1.2.2. Principio de Arquímedes

”Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical de abajo hacia arriba, igual al peso del volumen del líquido desalojado” (arquímedes-url).

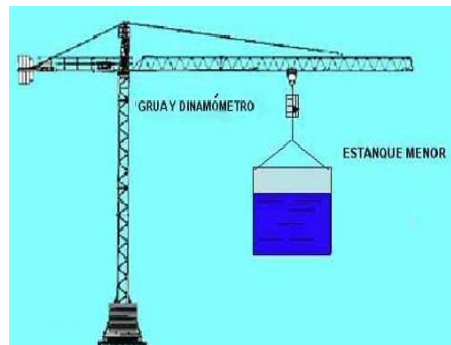
El principio de Arquímedes se aplica a cualquier fluido, aunque para la presente tesis sólo es necesario trabajar con agua.

Para calcular la **fuerza de empuje** de la que habla el principio de Arquímedes aplicado a un submarino, es necesario introducir el submarino en el agua como se muestra en la figura 2.6 (a); posteriormente, el submarino va desalojando o desplazando paulatinamente un volumen de agua igual al volumen del submarino. El agua desplazada por el submarino es almacenada en un segundo estanque, i.e. el estanque menor. La cantidad de agua desplazada por el submarino no depende de la cantidad de agua en la que se están haciendo las pruebas ya que dicha agua equivale al volumen del submarino, por tanto, el submarino desplaza la misma cantidad de agua tanto en un estanque como en el mar. Una vez que el submarino se ha sumergido totalmente en el agua, el estanque menor contiene el total del agua desplazada por el submarino, y para encontrar el **empuje**, es necesario pesar el agua almacenada en el estanque menor (que es el agua desplazada por el submarino). Dicho valor se calcula empleando la fórmula siguiente: $P_L = m_L \times g$, donde P_L es el empuje, m_L es la masa del líquido desalojado, y g es la gravedad (figura 2.6 (b)).

Otra ecuación útil para encontrar el empuje es calculando la masa del líquido desalojado, m_L : $m_L = V_L \times d_L$, donde V_L es el volumen del líquido desalojado,



(a) Desplazamiento de agua provocado por la inmersión del submarino en el estanque mayor, dicha agua desplazada es almacenada en el estanque menor.



(b) Cálculo del peso y por consecuencia del empuje del agua desplazada por el submarino.

Figura 2.6: Principio de Arquímedes aplicado a un submarino, cálculo del empuje.

que es igual al volumen del submarino sumergido, y d_L es la densidad del líquido.

Haciendo uso del nuevo valor encontrado (empuje) gracias al principio de Arquímedes se puede saber cuándo se encuentra en equilibrio el submarino, ya que el **equilibrio** se produce cuando el **peso del submarino en el vacío es igual al empuje**.

2.2. Clasificación de vehículos submarinos modernos

Existe una gran variedad de vehículos submarinos modernos, puesto que cada uno de ellos es generalmente diseñado para un propósito en particular. El trabajo o la tarea que se espera realice un vehículo submarino es llamado *misión*. La *misión* determina si será diseñado y construido para ser un vehículo tripulado o no, también determina las herramientas a utilizar, así como la carga útil necesaria para que el vehículo submarino pueda realizar su *misión* submarina.

La extensa variedad de vehículos submarinos puede parecer confusa, pero si se engloban todos los tipos en las siguientes cuatro categorías (Bohm et Jensen (2003)), se notará que en realidad son pocos los tipos de vehículos acuáticos submarinos que realizan tareas diferentes:

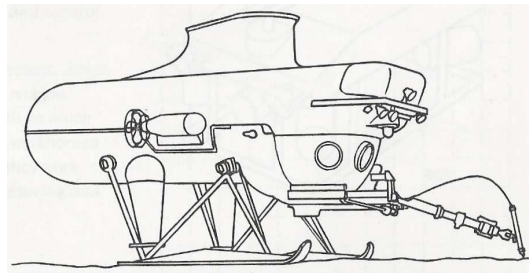
1. Sumergibles tripulados
 - Sumergibles
 - Submarinos
2. Robots que pueden ser tanto Vehículos Operados Remotamente (ROVs) como Vehículos Autónomos Submarinos (AUVs)
 - 2.1 ROVs
 - ROVs de desplazamiento libre (*tethered free swimming*)
 - ROVs remolcados para aguas poco profundas (*towed mid water*)
 - ROVs remolcados para aguas profundas (*towed bottom*)
 - ROVs tipo oruga (*bottom crawling*)
 - ROVs dependientes de estructuras externas (*structurally reliant*)
 - 2.2 AUVs
3. Vehículos híbridos
4. Vehículos que transportan buzos

Estos tipos de vehículos se describen brevemente a continuación.

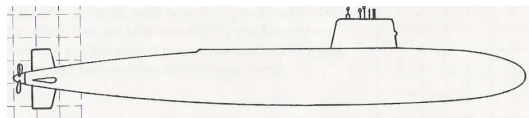
1. **Sumergibles tripulados.** Un sumergible tripulado, como su nombre lo indica, es el que lleva algún pasajero a bordo

Comúnmente, se usa el término *sumergible* para referirse a cualquier vehículo submarino (tripulado o no tripulado). Pero técnicamente, hay diferencias entre un *submarino* y un *sumergible*.

- **Sumergibles:** Los sumergibles se hunden más profundamente que un submarino, son generalmente pequeños tanto en tamaño como en tripulación (tres personas como máximo). Se usan principalmente para trabajos comerciales, como el mantenimiento de ductos submarinos, y para la exploración científica (figura 2.7 (a)).
- **Submarinos:** Los submarinos se consideran generalmente grandes tanto en tamaño como en tripulación. Se usan principalmente para realizar tareas militares y de turismo (figura 2.7 (b)).



(a) Pisces



(b) Submarino nuclear

Figura 2.7: Sumergibles tripulados. Tomadas de Bohm et Jensen (2003).

2. **Robots que pueden ser tanto Vehículos Operados Remotamente (ROVs) como Vehículos Autónomos Submarinos (AUVs).** Hay dos tipos básicos de vehículos submarinos no tripulados: los ROVs se encuentran conectados a la superficie a través de un cable, y los AUVs, como su nombre lo indica, son vehículos que operan de manera autónoma y no cuentan con un cable como en el caso de los ROVs.

2.1 ROVs

Utilizan corriente eléctrica para funcionar, dicha corriente es transmitida a través de un cable llamado *tether* o *umbilical*, ese cable conecta el ROV con su fuente de poder situada en la superficie.

Los ROVs son controlados directamente por un piloto que por lo regular se encuentra en la superficie, e.g. en un barco, mientras el vehículo realiza alguna clase de trabajo submarino. El sistema de control del piloto se comunica con el ROV a través del mismo *tether*. La comunicación entre el ROV y el piloto consta generalmente

del intercambio de señales de control y de señales de video, ya que es posible que el ROV posea una cámara de video con la cual el piloto podrá ver lo que se encuentra alrededor del robot, y con esto podrá navegar y controlar mejor los movimientos del mismo.

La ventaja de los ROVs es que a través del *tether* se proporciona la energía que alimentará al vehículo durante el periodo de tiempo que dure su tarea submarina, además de que también se le proporcionan de manera casi instantánea, los comandos de control de acuerdo a las imágenes que éste envía a la superficie.

Algunas de las desventajas de los ROVs son: 1) resulta muy costosa la adquisición del cable, ya que se necesitan varias decenas de metros de cable para que el ROV alcance la profundidad deseada, y además debe ser de muy buena calidad y resistente para asegurar que será útil por más tiempo, 2) el almacenamiento del cable, requiere demasiado espacio en cubierta, 3) es necesario revisar constantemente el estado del cable, ya que puede romperse y con eso provocar la pérdida del vehículo durante alguna de las pruebas, 4) hay un límite máximo de profundidad a la cual el ROV puede descender, igual a la longitud del cable, y 5) el cable opone resistencia impidiendo que el ROV se mueva libremente.

Los ROVs se clasifican de acuerdo a cómo y a dónde trabajan bajo el agua:

- **ROVs de desplazamiento libre (*tethered free swimming*):**

Esta categoría incluye a la mayor cantidad de ROVs existentes. Muchos de ellos están equipados con cámaras y realizan ciertas maniobras, e.g. moverse hacia arriba, abajo, al frente, a la derecha, a la izquierda y hacia atrás. Pueden operar tanto en el fondo como a un nivel intermedio, i.e. entre la superficie y el fondo. Aunque algunos llevan sus baterías a bordo, la mayoría de ellos reciben tanto la energía eléctrica como las señales de control desde la superficie a través del cable. Se utilizan lastres para hacer que los ROVs tengan muy poca flotabilidad positiva y así poder empujarlos fácilmente hacia el fondo con ayuda de un motor vertical (figura 2.8).

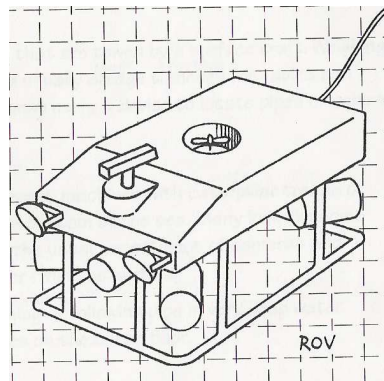


Figura 2.8: ROV que usa un motor vertical para sumergirse a la profundidad deseada (*Tethered free swimming*). Tomada de Bohm et Jensen (2003)

- **ROVs remolcados para aguas poco profundas (*towed mid water*):** Estos ROVs son remolcados generalmente por un barco desde la superficie. Su profundidad es controlada tanto por sus planos de inmersión como por la longitud del cable que lo sostiene. Tienen generalmente flotabilidad negativa, i.e. tienden a hundirse, y operan generalmente a un nivel de profundidad intermedio, i.e. entre la superficie y el fondo. Debido a su flotabilidad negativa, también pueden viajar muy cerca del fondo para hacer búsquedas o para grabar videos. En 1986 usando un ROV de ésta clase, ARGO (figura 2.9), fue posible localizar los restos del Titanic.

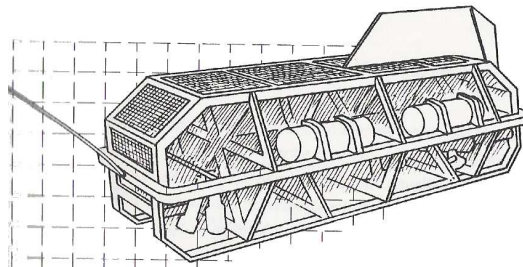


Figura 2.9: El ROV Argo localizó los restos del Titanic en 1986 (*Towed mid water*). Tomada de Bohm et Jensen (2003).

- **ROVs remolcados para aguas profundas (*towed bottom*):** Estos sumergibles son generalmente estructuras enormes que son arrastradas por un barco desde la superficie. Pueden llegar a pesar muchas toneladas, y se usan principalmente para cavar trincheras y colocar en ellas cables o tuberías. La mayoría de ellos

poseen cámaras y sonares, y deben también poseer un dispositivo que les permita localizar cables y tuberías. Un ejemplo de este tipo es el ROV subatlántico Comanche (figura 2.10), que alcanza profundidades mayores a los 2,000 m, pesa 240 kg; sus dimensiones son 2 m de largo \times 1,29 m de ancho \times 1,20 m de alto. Este ROV fue diseñado para portar dos manipuladores, siete motores eléctricos que le dan propulsión, dos sistemas hidráulicos que proporcionan potencia a los manipuladores, herramientas, etc. Para mayor información acerca del ROV Comanche ver (Comanche-url).



Figura 2.10: ROV Comanche (*Towed bottom*). Tomada de (Comanche-url).

- **ROVs tipo oruga (*bottom crawling*):** Estos vehículos son grandes, tienen flotabilidad negativa y usan una banda metálica para avanzar a lo largo del fondo del océano, e.g. usan orugas (figura 2.11). Llevan cámaras e instrumentos científicos y se les suministra energía desde la superficie. Se usan para desenterrar o seguir tuberías en aguas muy profundas, arriba de los 2,000 m, y algunos otros se utilizan para sembrar minas en el fondo del océano.

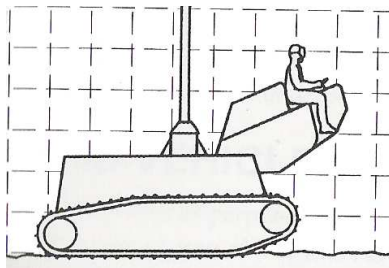


Figura 2.11: ROV tipo oruga (*Bottom crawling*). Tomada de Bohm et Jensen (2003).

- **ROVs dependientes de estructuras externas (*structurally reliant*):** Esta clase de ROV es diseñada para operar únicamente como parte de una estructura submarina, e.g. taladros o torres submarinas. Se usan principalmente para limpiar y probar las estructuras de acero y de concreto. Usualmente se mueven a lo largo de las torres, vigas o tuberías a través de poleas, cables o mecanismos hidráulicos. También usan cámaras y lámparas y están conectados a la superficie a través de un cable (*tether*).

2.2 AUVs

Los Vehículos Autónomos Submarinos (AUVs - por sus siglas en inglés), forman una nueva generación de vehículos robóticos para la exploración. Poseen su propio suministro de energía y no tienen ningún tipo de liga física con la superficie (figura 2.12).

Utilizan una computadora o alguna clase de controlador o procesador electrónico para controlar el vehículo durante su misión. Poseen sensores conectados a la computadora, los cuales obtienen información de la navegación, e.g. profundidad, velocidad y tiempo del viaje, etc. Los sonares permiten a estos vehículos evitar obstáculos y mapear el fondo. Pueden también utilizar cámaras de video para capturar y almacenar imágenes del viaje.

Finalmente, cuando el AUV ha terminado de realizar su misión, descarga toda la información recolectada, si así se desea, en una computadora que se encuentra en la superficie, e.g. en un barco.

Existen tres desventajas en los AUVs: 1) la cantidad de energía disponible es limitada, 2) los sensores no proporcionan información lo suficientemente confiable, 3) la falta de computadoras y programas capaces de procesar las grandes cantidades de datos generados en tiempo real por los sensores.

Las mejoras futuras tanto en baterías como en sensores, podrán ayudar a que los AUVs sean la herramienta principal de los exploradores y de los científicos.

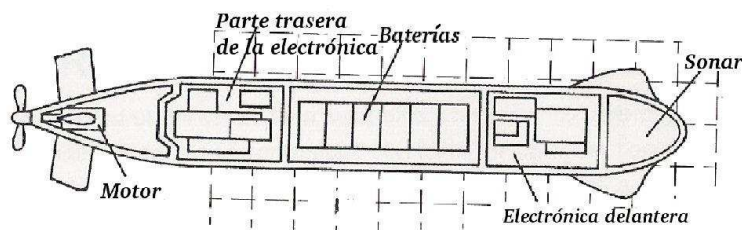


Figura 2.12: Componentes generales de un Vehículo Autónomo Submarino. Tomada de Bohm et Jensen (2003).

3. **Vehículos híbridos.** Los vehículos híbridos son sistemas de propósito especial, combinan características de diferentes tipos de ROVs y AUVs, e.g. PURL, es un AUV construido por el *Underwater Research Lab* de la universidad *Simon Fraser in British Columbia*. Los PURL I y II (figura 2.13) pueden operar como AUVs, pero también tienen la opción de ser controlados desde la superficie como ROVs, usando un cable de fibra de vidrio. Ambos llevan sus baterías a bordo. Otro ejemplo de vehículos híbridos es Duplus, una combinación única entre un ROV y un sumergible tripulado. Puede operar como un ROV, pero además puede llevar a un operador a bordo para realizar su misión. Usa un manipulador y cámaras.

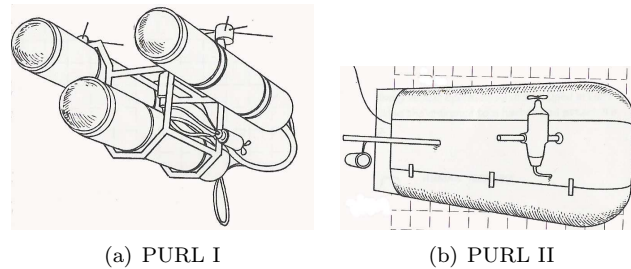


Figura 2.13: Vehículos híbridos. Tomadas de Bohm et Jensen (2003).

4. **Vehículos que transportan buzos.** A menudo los buzos necesitan ser transportados rápidamente a un sitio de trabajo específico. Este tipo de vehículos proporcionan una plataforma segura y conveniente para acarrear herramientas y aire. Los últimos avances en vehículos de este tipo los hacen ser los más seguros en su ramo, ya que algunos proporcionan un espacio cálido y seco para la descompresión mientras los buzos llegan a la superficie (figura 2.14).

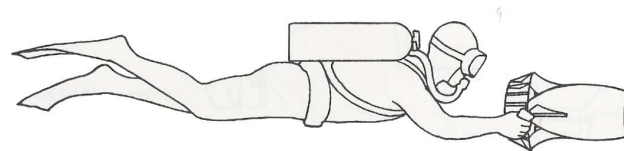


Figura 2.14: Vehículo que transporta o auxilia buzos. Tomada de Bohm et Jensen (2003).

2.3. Historia de la exploración submarina

En esta sección se resume brevemente la historia de la exploración submarina. Cabe mencionar que las etapas identificadas fueron establecidas por nosotros mismos, después de revisión y análisis del material respectivo.

Prehistoria (1700 – 1800)

En esta etapa se ubican artefactos articulados o maniobrados por hombres, a través de cuerdas, válvulas, bombas y hélices. Estos artefactos consistían en cápsulas rudimentarias sin energía, control ni motores, e.g. la "Tortuga" y el "Nautilus". Estos primeros artefactos permitieron a los seres humanos comenzar a explorar los mares, como se describe en esta sección.

- La Tortuga Americana

Bushnell fabricó la "Tortuga" (figura 2.18), un pequeño navío sumergible de 2,30 m de largo y 1,80 m de ancho. Estaba compuesto por dos piezas idénticas de madera de roble de forma cóncava, semejantes a dos caparazones de tortuga (de allí su nombre), unidos y reforzados por barras de hierro. El casco estaba cuidadosamente trabajado y los empalmes eran cubiertos con estopa y brea para evitar que el agua entrara, posteriormente, dichos empalmes eran cubiertos con goma. La estabilidad estaba garantizada por un lastre de plomo. Un tanque de lastre permitía controlar la flotabilidad, ya que éste se llenaba de agua abriendo una válvula, y además se podía vaciar con dos bombas manuales de latón.

La máquina estaba prevista para ser maniobrada por un solo piloto sentado en el centro. Disponía al frente del piloto de dos manivelas de propulsión: horizontal y vertical para mover unas hélices primitivas, así como de un timón.

Bushnell, a pesar de sus limitados medios, llegó a solucionar la mayoría de los problemas técnicos encontrados: estanqueidad y resistencia a la presión del agua, propulsión, estabilización y dirección. La autonomía en la inmersión era de cerca de treinta minutos. A causa de su baja velocidad, la unidad debía remolcarse lo más cerca posible del objetivo (NOVAone-url).

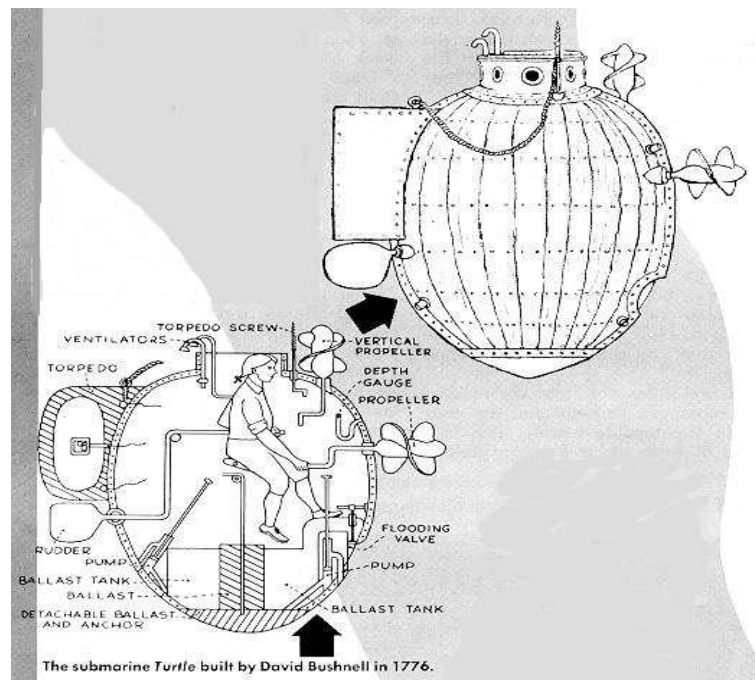


Figura 2.15: Esquema de la Tortuga de David Bushnell 1776. Tomada de (NOVAone-url).

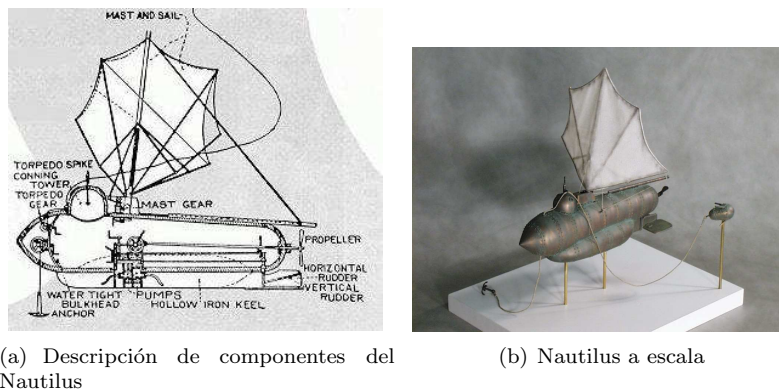
- El Nautilus

El "Nautilus" (figura 2.16) fue el primer submarino práctico, encargado por el primer cónsul Napoleon Bonaparte y diseñado por el inventor americano Robert Fulton. Se inauguró en 1800 en Francia.

El "Nautilus" estaba hecho de láminas de cobre montadas sobre un armazón de hierro, de 6,5 m de largo y contaba con una torre de observación. Usaba timones para el control vertical y horizontal (de ahí los orígenes de los planos de inmersión de los submarinos modernos), y utilizaba aire comprimido para mantenerse sumergido durante seis horas; su tripulación era de cuatro personas; su velocidad máxima era de 4 nudos.

El submarino "Nautilus" era impulsado por cuatro propelas que se hacían girar manualmente. Una vez que el submarino se encontraba flotando en la superficie del agua, se levantaba un mástil que desdoblaba una vela, para impulsar la nave con la vela.

El "Nautilus" fue probado en Francia entre 1800 – 1801, y logró descender a una profundidad de 8 m usando los tanques de lastre (Nautilus_(1800)-url), (NOVAone-url).



(a) Descripción de componentes del Nautilus

(b) Nautilus a escala

Figura 2.16: El submarino Nautilus 1800. Tomadas de (Nautilus_(1800)-url).

1ra. Etapa (1863 – 1912) Surgen artefactos articulados por vapor, electricidad, gasolina y diesel.

Se desarrollan técnicas para mejorar los mecanismos de inmersión y emersión, e.g. aire comprimido. Como ejemplos de esta etapa tenemos: Le Plongeur, Resurgum, Argonaut Junior, Argonaut I y Holland 1.

- Le Plongeur

En 1863 dos inventores franceses, el almirante Simeon Borgeois y el ingeniero naval Charles Marie Brun, hicieron para la marina francesa el más formidable submarino de la época, el "Plongeur" (figura 2.17). Desplazaba 400 toneladas, tenía un casco totalmente de hierro de 10 cm de espesor, el cuál media 46 m de largo por 6,6 m de ancho.

La forma en la que operaba era usando aire comprimido para sacar el agua de sus tanques de lastre. El motor usaba un compuesto químico de magnesio, peróxido, cinc y clorato potásico que generaba vapor con qué mover la hélice y oxígeno para los tripulantes. Desde el punto de vista militar resultó un fracaso, ya que las burbujas de aire del escape de la máquina lo hacían visible desde muy larga distancia, y además tenía muy poca estabilidad, el movimiento de los miembros de la tripulación podía por ejemplo, hacerlo girar radicalmente. Sin embargo, la marina francesa los conservó hasta 1935 (NOVAone-url).

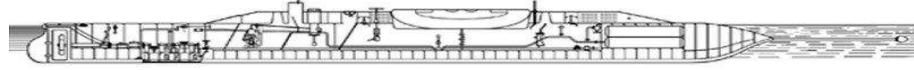


Figura 2.17: Submarino Le Plongeur 1863.

- Resurgeam II

En 1879, el reverendo George Garret construyó el "Resurgeam II". Aplicó a su nave una nueva propulsión a base de vapor. En la superficie almacenaba vapor en un depósito para luego dejarlo salir cuando se sumergía, la nave se desplazaba a dos o tres nudos en inmersión(Resurgeam-url).



Figura 2.18: Submarino Resurgeam 1879. Tomada de (Resurgeam-url)

- Argonaut Junior

Al cabo de un año, Simon Lake construyó un prototipo de madera al cuál llamó "Argonaut Junior" (figura 2.19). Este prototipo de forma triangular podía ser sumergido haciendo uso de lastres hasta llegar al fondo, y ahí podía moverse lentamente por medio de unas ruedas que eran giradas por hombres desde el interior. Usaba aire comprimido tanto para llenar los tanques de lastre y así emerger, como para presurizar el interior del submarino, para mantener el agua afuera ya que contaba con una especie de escotilla que permitía tener acceso al fondo, e.g. para bucear o recolectar muestras. Lake probó con éxito su diseño en diciembre de 1894 en New Jersey (simonlake-url).

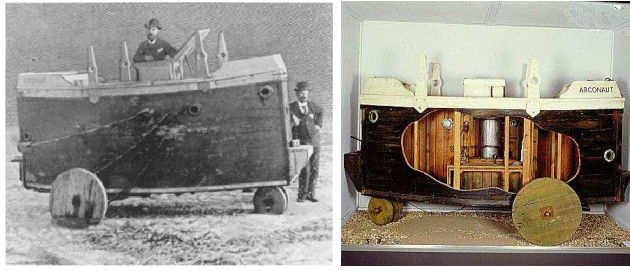


Figura 2.19: Submarino Argonaut Junior 1894. Tomadas de (simonlake-url).

- Argonaut I

"Argonaut I" (figura 2.20) tenía 11 m de largo por 2,74 m de diámetro y poseía la mayoría de las características con las que contaba el diseño de 1893 ("Argonaut Junior"), i.e. incluía las ruedas para moverse en el fondo y la escotilla que permitía al buzo salir y entrar del submarino. El submarino tenía un motor a base de gasolina de 30 caballos de fuerza y cuando se encontraba sumergido, usaba una manguera que era sostenida por una boya en la superficie para proporcionarle el aire suficiente para la combustión en el motor. Aunque el uso de la manguera limitaba la profundidad a la que el "Argonaut I" podía operar, también contaba con una provisión de aire comprimido para excursiones más profundas y para permanecer en el fondo hasta por 24 horas. El "Argonaut I" transitaba normalmente sobre la superficie de sitios de interés. Podía descender verticalmente mediante lastres o usando anclas que se ponían en la quilla (simonlake-url).



Figura 2.20: Submarino Argonaut I 1897. Tomada de (simonlake-url)

- Holland 1

En 1895, el inventor irlandés John Philip Holland diseñó un submarino que, por primera vez, utilizaba un sistema de propulsión dual, i.e. estaba equipado con un motor de combustión interna, para moverse en la superficie, y un motor eléctrico alimentado por baterías, para navegar bajo el agua.

Fue el primer submarino realmente práctico, con una fuente de energía eficiente. El submarino "Holland 1" (figura 2.21) de unos 16.2 m, fue comprado por el gobierno estadounidense en 1900 y fue bautizada como "USS Holland" (Holland-URL).

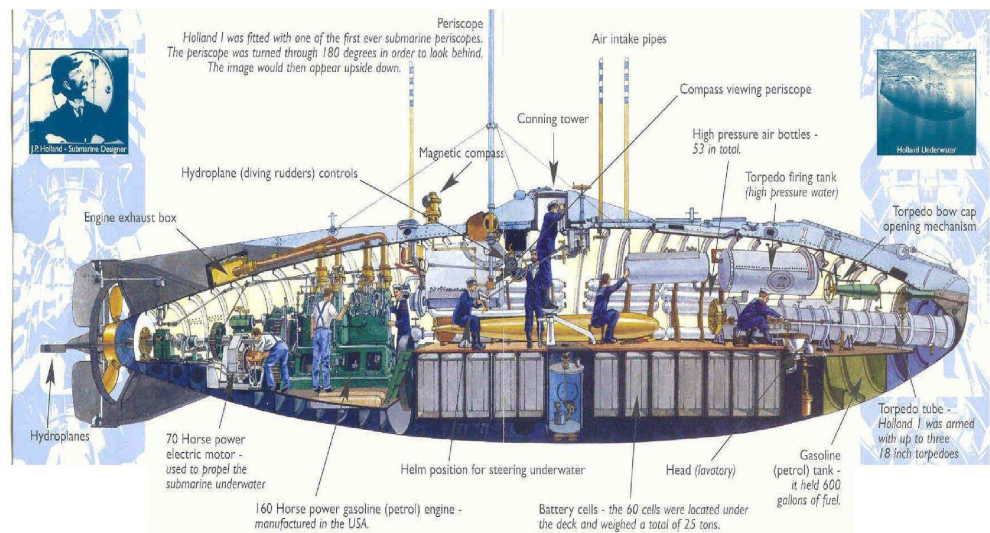


Figura 2.21: Submarino Holland 1 1895.

2da. Etapa (1914 - 1954) Se desarrollan dispositivos de sonido submarinos para la comunicación y para la detección del enemigo como teléfonos, hidrófonos y sonares.

Se alcanzan grandes profundidades haciendo uso de un diseño basado en un globo de acero que permitió a los investigadores no sólo descender a grandes profundidades, sino también recolectar información oceanográfica, e.g. el bathysphere y el bathyscaphe.

- Bathysphere

El "Bathysphere" (figura 2.24) fue desarrollado a principios de los años 1930s por William Beebe y Otis Barton. Era una bola de acero hueca de 1,5 m de diámetro aproximadamente, que pesaba 2,3 toneladas. Era totalmente dependiente del barco que la llevaba pues éste tenía que soltarla (porque se encontraba atada al barco) y por gravedad el Bathysphere descendía hasta llegar al fondo para realizar tareas de exploración o recolección de objetos. Posteriormente, tenía que ser jalada desde la superficie por el barco para hacerla emerger. El aire que usaba provenía de tanques de oxígeno que se llevaban en el interior. En 1934, Beebe y Barton descendieron hasta 1 km de profundidad, y transmitieron sus descubrimientos por medio de un cable de telefono a un barco que se encontraba en la superficie. Así mismo, grabaron a todos los animales que pasaban cerca de alguna de sus ventanillas, incluyendo peces e invertebrados nunca antes vistos. Una de las desventajas de este invento fué que como se encontraba atado a un cable metálico, no era posible maniobrar, así que únicamente podía ir en línea recta hacia abajo y hacia arriba (deepsea-url).



Figura 2.22: Bathysphere 1930s. Tomada de (deepsea-url)

- Bathyscaphe

El FNRS-2 fue el primer bathyscaphe diseñado por el científico Auguste Piccard (1884 – 1962). Este diseño no era sostenido desde la superficie por un navío, pero sí estaba atado a un tanque que flotaba libremente en la superficie, el tanque estaba lleno de petróleo líquido debido a que éste es menos denso que el agua y por tanto flota. El FNRS-2, también llamado "el globo submarino", usaba metales muy pesados como lastres, los cuales se mantenían sujetos al globo por medio de electroimanes, los cuales le permitían hundirse a una profundidad deseada cuando se mantenían sujetos al globo, y emerger cuando los liberaba. A diferencia del Bathysphere, este modelo tenía una mejor maniobrabilidad (deepsea-url). En 1953 Piccard y su hijo Jacques diseñaron otro Bathyscaphe llamado Trieste (figura 2.23) con el cuál lograron descender a $3,2 \text{ km}$ en el mar Mediterráneo.

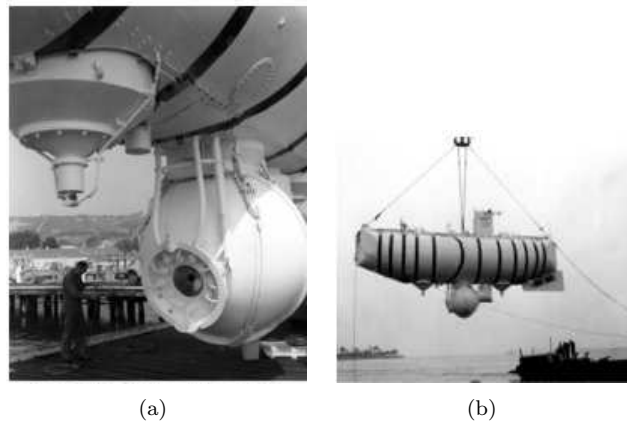


Figura 2.23: Bathyscaphe Trieste 1953. En (a) se observa el tamaño del bathyscaphe Trieste respecto al tamaño de una persona, (b) muestra el tanque al que se encuentra atado el bathyscaphe. Tomadas de (deepsea-url).

Se aplicó también en esta etapa la energía nuclear para mejorar la propulsión de los submarinos. Los submarinos atómicos ahora alcanzan velocidades arriba de los 30 *nudos* estando sumergidos, y pueden permanecer en inmersión por periodos ilimitados de tiempo, actualmente éstos submarinos han navegado alrededor del mundo sin emerger ni una sola vez. El primer submarino nuclear fue el USS Nautilus y se desarrolló en 1954.

- USS Nautilus 1954

El USS Nautilus (SSN-571) fue el primer submarino nuclear y el primer navío en recorrer el Polo Norte completamente sumergido. En julio de 1951 se autorizó su construcción y se anunció que se llamaría Nautilus SSN-571 (el sexto Nautilus de la naval de EEUU). De 98 *m* de largo y 3.674 toneladas, con una velocidad en la superficie de 18 nudos, y de 23 nudos sumergido (USS_Nautilus_(SSN-571)-url).



Figura 2.24: USS Nautilus durante sus pruebas iniciales en el mar. Enero 20 de 1955. Tomada de (USS_Nautilus_(SSN-571)-url).

3ra. Etapa (1960 - 1969)

Se desarrollan los primeros experimentos con ROVs y con AUVs, así como también se experimenta con diversos "hábitats" y sumergibles tripulados.

El 23 de enero de 1960, se rediseña el bathyscaphe Trieste, el cual impuso un nuevo record mundial descendiendo a 11,033 m en la Fosa de las Marianas (Fosa_de_las_Marianas-url) considerada como la fosa marina más profunda del planeta con una profundidad de 11,033 m descubierta por el bathyscaphe.

Otro ejemplo de esta etapa es el sumergible Alvin.

- Alvin

El sumergible "Alvin" (figura 2.25) es operado por la Institución Oceanográfica *Woods Hole* de Massachusetts y pertenece a la naval de Estados Unidos. Es considerado el sumergible más productivo del mundo, ya que en promedio realiza más de 150 inmersiones al año. Alvin ha sido rediseñado muchas veces desde su creación en 1964. Su rango de profundidad se ha incrementado de 3.65 km a 4,5 km (deepsea-url). Fue diseñado específicamente por los científicos para explorar el suelo oceánico, incluyendo las profundas fosas marinas. Las características del sumergible Alvin modelo 1964 son: longitud de 7 m de largo, tipulación máxima de 3 personas, profundidad de máxima de 4.5 km, y fue el primer sumergible oceánico tripulado (alvin2.sp-url).

En 1966, Alvin localizó una bomba de hidrógeno que había caído en la costa de España en el mar Mediterráneo .



(a)



(b)

Figura 2.25: Sumergible Alvin. (a) Sumergible Alvin operando en inmersión, (b) Sumergible Alvin siendo recuperado.

4ta. Etapa (1970 - actualidad) Hay un gran desarrollo de ROVs y AUVs debido al gran interés comercial que suscita su investigación y a la reducción de costos en las tareas a realizar, i.e. exploración, recolección, etc. Como ejemplos tenemos: HUGIN (AUV), Kaiko (ROV).

- HUGIN (AUV)

"HUGIN" (*High-precision Underwater Geosurvey and Inspection system*) es un primer ejemplo de la evolución de vehículos submarinos no tripulados UUV (*Unattended Underwater Vehicles*) de 1990s. Se construyeron dos prototipos de vehículos HUGIN que operaban de forma totalmente autónoma, "HUGIN I" (figura 2.26) y "HUGIN II" (figura 2.27) de 1995 a 1996.

Los HUGIN se caracterizan por su óptima forma de ojiva, lo que les da resistencia y una alta estabilidad en la orientación. La longitud de los vehículos es de 4,8 m, con un diámetro máximo de 80 cm, su volumen es de 1,2 m³, su velocidad es de 4 nudos, y su peso aproximado es de 700 kg. Ambos vehículos realizan operaciones submarinas a profundidades arriba de los 600 m.

La diferencia entre el vehículo HUGIN I y el HUGIN II es la batería. HUGIN I usa una batería de NiCd a 3 kWh, que es suficiente para 6 u 8 horas de operación, mientras que el HUGIN II usa un arreglo de celdas híbridas (*semi fuel cell battery*) que entrega 18 kWh, lo que le permite operar arriba de 36 horas continuas. Para mayor información acerca de los vehículos HUGIN ver Hagen et al. (1999).



Figura 2.26: HUGIN I en el contenedor abordo del *M/V Seaway Commander* en junio de 1997. Tomada de Hagen et al. (1999).

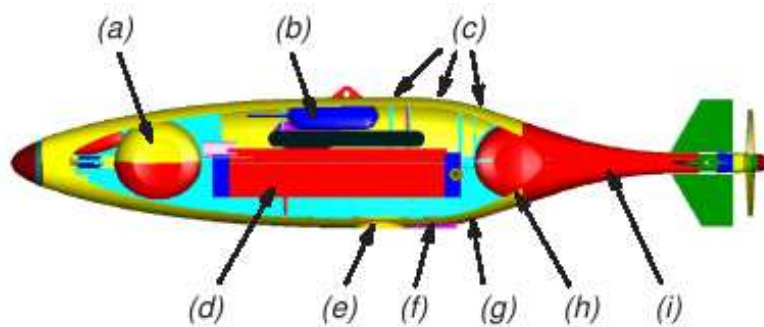


Figura 2.27: HUGIN II UUV: (a) contenedor de la carga útil, (b) tanque de lastre, (c) sensores acústicos, (d) contenedor de batería, (e) y (f) sensores MBE (*MultiBeam Echosounder*), (g) liberador de peso de emergencia, (h) sección de control, (i) sección de propulsión. Tomada de Hagen et al. (1999).

- Kaiko (ROV)

”Kaiko 7000” (figura 2.28) fue diseñado para la investigación científica de las zonas marinas más profundas. Era un vehículo no tripulado operado remotamente (ROV) y se componía de dos partes: el *launcher* y el vehículo. La plataforma auxiliar (*launcher*) medía 5,2 m de largo \times 2,6 m de ancho \times 3,2 m de alto, su peso era de 5.3 toneladas y su profundidad máxima de operación era de 11 km. Se componía de sonares laterales, 1 radar, 1 cámara de televisión en blanco y negro empleada para monitorear el cable secundario, etc. El **vehículo** medía 2,8 m de largo \times 1,8 m de ancho \times 2 m de alto, pesaba 2,7 toneladas, profundidad máxima de operación 7 km, carga útil menos de 30 kg; equipamiento: 2 cámaras a color, 1 cámara blanco y negro, 1 altímetro, profundímetros, 1 compás, sonares, manipuladores de 6 DOF, etc. (kaiko-url). Utilizaba un cable de fibra óptica electromecánico, un cable principal y un cable secundario.

El 29 de mayo de 2003, después de haber completado su inmersión número 296, a una profundidad de 4.675 km, en Nankai Trough, el submarino se perdió durante la recuperación. Desde entonces Kaiko se encuentra desaparecido (kaiko2-url).

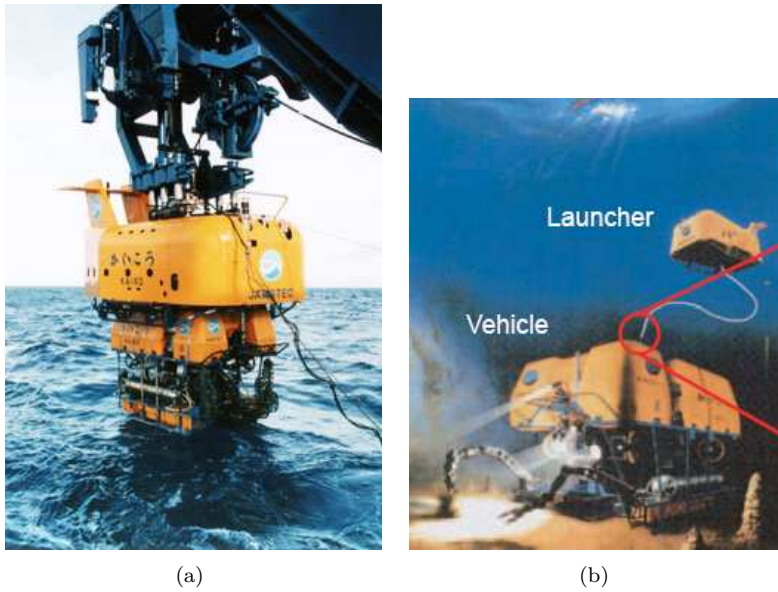


Figura 2.28: Vehículo Operado Remotamente Kaiko. (a) Recuperación del ROV Kaiko, (b) Vehículo Kaiko y *Launcher* en operación. Tomadas de (kaiko2-url).

Uno de los trabajos en desarrollo de esta etapa es el "Hybrid ROV", el cual intenta brindar a la comunidad oceanográfica de Estados Unidos una tecnología calificada y poco costosa, pensada para descender hasta los 11 *km*. El vehículo podrá operar de forma autónoma y también como un ROV. Este vehículo también es llamado Vehículo Híbrido Operado Remotamente (HROV - por sus siglas en inglés). En Bowen et al. (2003) se propone un HROV que podrá funcionar como un AUV y un ROV.

2.4. Estado del arte

En esta sección se presentan trabajos recientes de vehículos submarinos, los cuales pertenecen a la cuarta etapa de la clasificación mencionada en la sección 2.3, i.e. desarrollo de ROVs y de AUVs. En esta sección también puede observarse la variedad de aplicaciones en las que se desarrollan vehículos submarinos tipo ROVs y AUVs, así como las características requeridas por cada uno de ellos para realizar la misión deseada, pues dependiendo de la misión o tarea que deban desarrollar, será el equipamiento necesario para ejecutar dicha tarea.

La mayoría de los vehículos submarinos no tripulados entran necesariamente en alguna de las cuatro siguientes clasificaciones de vehículos submarinos, la cual se hace de acuerdo a la misión que deben realizar.

Misiones Comerciales: Estos vehículos son regularmente desarrollados por la industria para realizar una enorme variedad de tareas submarinas, e.g. exploración, inspección, búsqueda y recuperación de objetos, reparación y mantenimiento. El sumergible remotamente operado AC-ROV (access-ur1) es utilizado para exploraciones tanto en mar abierto como en aguas poco profundas, es una herramienta segura y rápida para inspecciones submarinas. Las características principales del sumergible AC-ROV (figura 2.29) son:

- 5 DOF
- Dimensiones: $20,3 \text{ cm} \times 15,2 \text{ cm} \times 14,6 \text{ cm}$
- Peso: 3 kg
- Profundidad máxima promedio: 75 m
- Cámara a color
- Propelas: 6, 4 horizontales y 2 verticales
- Sensores: Temperatura, humedad y de ingreso de agua
- Un manipulador con 2 funciones: rotar el brazo, y abrir y cerrar sus pinzas.

Misiones de investigación oceanográfica: Vehículos operacionales regularmente desarrollados por institutos de investigación para la investigación y la exploración científica, e.g. el vehículo sumergible Oberon (Rosenblatt et al. (2002)).

El sumergible remotamente operado Oberon (figura 2.30) fue construido como una plataforma de trabajo para experimentar con la navegación autónoma submarina. Su aplicación principal es la exploración de arrecifes de coral. Sus características son las siguientes:

- Posee 5 propelas, de las cuales 3 están orientadas en dirección vertical y 2 en dirección horizontal

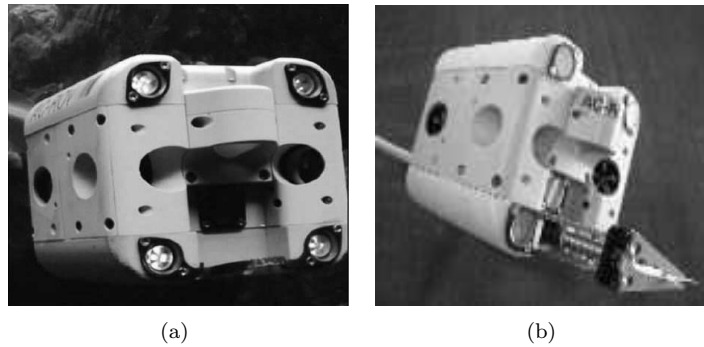


Figura 2.29: Sumergible Operado Remotamente *AC-ROV*. (a) Frente del vehículo, (b) Manipulador del vehículo *AC-ROV*. Tomadas de ([ac-cess - url](#)).

- Posee una computadora a bordo, que se encarga de controlar el movimiento del robot y de adquirir datos de los sensores
- Posee un circuito detector de "fugas de agua"
- Sensores: Giroscopio, sirve para determinar la orientación del robot; compas, sirve para estimar el promedio del movimiento en el eje Z; de presión, mide la presión externa experimentada por el vehículo y es usada para estimar la profundidad; sonares y una cámara a color CCD.

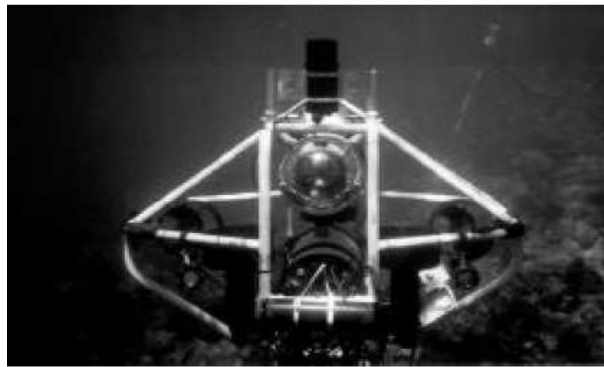


Figura 2.30: Vehículo sumergible *Oberon*. Tomada de Rosenblatt et al. (2002).

Misiones militares: Vehículos para misiones de defensa, e.g. reconocimiento, inserción y eliminación de minas; así como operaciones de mantenimiento, inspección, exploración, búsqueda y operaciones de recuperación, e.g. REMUS ([Marineopsremus-url](#)).

El sumergible autónomo REMUS (figura 2.31) fue desarrollado originalmente para dirigir exploraciones de costas, después fue mejorado para su uso militar con soporte de la oficina de Investigación Naval y del comando de operaciones especiales de U.S. Actualmente REMUS no sólo ejecuta exploraciones rápidas del medio ambiente acuático, sino que también funciona como una herramienta submarina para localizar minas bajo el agua y opera efectivamente en aguas poco profundas. Sus características son las siguientes:

- Peso: 36.32 *kg*
- Velocidad: entre 3 y 5 nudos (1 nudo = 1.852 *km/h*)
- Profundidad: arriba de los 900 *m*
- Posee una computadora portátil a bordo, en la cual se programa el vehículo.



Figura 2.31: Vehículo sumergible *REMUS*. Tomada de (Marineopsremus-url).

Investigación de ingeniería: Son prototipos de vehículos avanzados desarrollados para la investigación y el desarrollo de la ingeniería, e.g. JHUROV (Small et al. (1999)), Mongoose (Cataldo et al. (2005)).

El vehículo operado remotamente JHUROV (figuras 2.33 (a) y 2.33 (b)) sirve como una plataforma experimental de pruebas para investigación en las áreas de la dinámica, el control y la navegación de vehículos submarinos. Es controlado completamente por un piloto. Las características de este vehículo son las siguientes:

- Dimensiones: 1,5 *m* de largo \times 1,0 *m* de ancho \times 0,6 *m* de alto
- Masa: en tierra 200 *kg* y 2,5 *kg* en el agua
- Propelas: 6
- Cámara de video a color
- 2 lámparas de 100 *W*

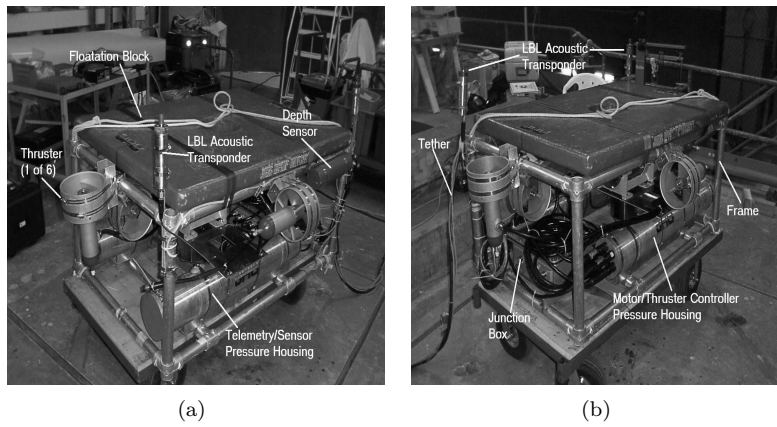


Figura 2.32: Vehículo operado remotamente *JHUROV*. (a) y (b) Descripción de componentes de *JHUROV*. Tomadas de Small et al. (1999).

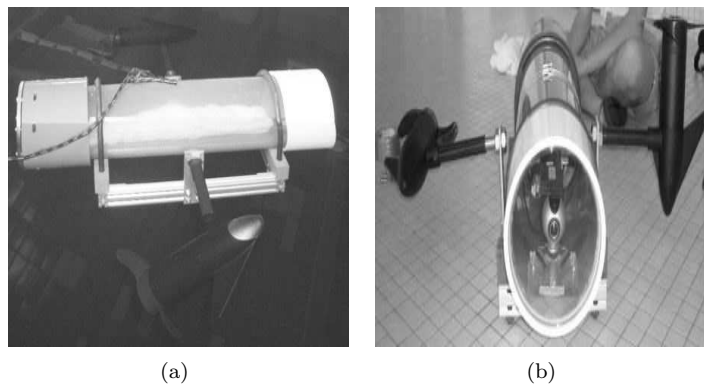


Figura 2.33: Vehículo operado remotamente *Mongoose*. (a) Vehículo sumergible *Mongoose* construido por estudiantes del Instituto *Georgia Tech*, (b) Parte trasera del vehículo operado remotamente *Mongoose*. Tomadas de Cataldo et al. (2005).

2.5. Recapitulativo

En este capítulo se presentaron los conceptos más relevantes respecto a los tipos de vehículos submarinos, e.g. AUVs, ROVs, sumergibles, submarinos, etc. Además, fueron incluidos otros conceptos que permiten entender la terminología empleada en la presente tesis, i.e. se proporcionó una descripción de cada uno de los conceptos para entender su importancia y su uso, e.g. centro de gravedad, densidad, equilibrio, fuerza de empuje, etc.

Posteriormente, se presentaron los dos conceptos o principios más importantes que explican la flotabilidad de un vehículo submarino, i.e. el principio de Pascal y el principio de Arquímedes.

A continuación, se presentó una clasificación general de los vehículos submarinos modernos, dicha clasificación fue realizada con base en la tarea o misión para la que los vehículos submarinos fueron diseñados, y en general, se obtuvieron cuatro tipos de misiones o tareas diferentes en las que se puede englobar la extensa variedad de vehículos submarinos modernos, i.e. sumergibles tripulados, robots que pueden ser tanto ROVs como AUVs, vehículos híbridos y vehículos que transportan buzos.

En la sección 2.3 se presentó una breve descripción histórica de acuerdo al desarrollo de los vehículos submarinos, para esto, se hizo una clasificación con base en los avances más significativos respecto al desarrollo de los vehículos submarinos, y se encontraron cuatro etapas importantes en dicha clasificación, i.e. prehistoria (1700 – 1800), 1ra. etapa (1863 – 1912), 2da. etapa (1914 – 1954), 3ra. etapa (1960 – 1969), y 4ta. etapa (1970 – *actualidad*).

Finalmente, en la sección 2.4, se presentaron algunos de los trabajos más recientes en cuanto a vehículos no tripulados se refiere, i.e. ROVs y AUVs. Además, fue posible presentar dichos trabajos de acuerdo a las tareas o misiones que realizan, lo cual permitió observar la inmensa variedad de aplicaciones en las que se desarrollan estos vehículos.

Capítulo 3

Prototipos de Robots Acuáticos

3.1. Introducción

Se espera que el prototipo final del robot acuático desarrollado en la presente tesis, cumpla ciertas restricciones de tamaño de acuerdo al 4to. Torneo Mexicano de Robots Limpiadores en la categoría Limpiadores Acuáticos de Minas. Para efectos de la tesis se abarcará una parte de la tarea a realizar en dicho concurso en un contexto diferente. Se desea construir y programar un prototipo de robot acuático explorador, y su misión será la búsqueda de marcas. Las tareas que el robot deberá realizar, se describirán más adelante.

Antes de empezar con el diseño de dicho prototipo, fue necesario tener una idea del tipo de vehículo que se deseaba construir, i.e. submarino, sumergible u otro. Para esto se realizó un análisis de la tarea a realizar, que en este caso era "construir un vehículo acuático capaz de realizar las tareas de inmersión, emersión, desplazamiento, evasión de obstáculos y búsqueda de una marca situada en el fondo del recipiente de pruebas". Del análisis previó se concluyeron dos tipos de vehículos de acuerdo a la forma en la que podrían realizar la misma tarea:

- a) Vehículo tipo sumergible, i.e. vehículo que se desplaza a cierta profundidad. Este vehículo podría ser capaz de navegar en la superficie y dentro del agua, i.e. debería realizar la inmersión y la emersión. Para realizar la tarea, primero tendría que hundirse pero sin llegar al fondo del recipiente de pruebas, i.e. mantenerse flotando dentro del agua. Una vez inmerso, haciendo uso de dos hélices y de una cámara colocada en la parte inferior del vehículo cuya lente se direccionaría hacia el fondo, se podría encontrar la marca u objeto de interés. Dicho objeto deberá distinguirse de cualquier otro por tener un color característico.

- b) Vehículo tipo oruga, i.e. vehículo que se arrastra por el fondo. Este vehículo funciona como el vehículo anterior, la única diferencia entre ambos radica en que este vehículo se hundiría hasta el fondo del recipiente de pruebas durante el proceso de inmersión. En este caso, para que el vehículo fuera capaz de desplazarse, tendría que arrastrarse por el fondo con ayuda de sus hélices, tales que deberían producir la propulsión necesaria para empujar el cuerpo del vehículo sobre el fondo. La cámara situada en la parte inferior del vehículo podría identificar si el vehículo se encuentra o no sobre el objeto o marca de interés gracias a su color característico.

A continuación se presentan las fases llevadas a cabo durante el diseño de prototipos de robots acuáticos basados en los dos tipos anteriores. Puesto que aunque el prototipo que se deseaba construir originalmente era del tipo sumergible, la versión final del prototipo de robot acuático se basó en el diseño de un vehículo tipo oruga. En cada una de las fases se realizaron una serie de experimentos para comprobar que se satisfacían los requerimientos necesarios y con base en ello finalmente construir el prototipo final.

Las fases llevadas a cabo se describen brevemente a continuación:

- **Prototipo 1:** *Vehículo acuático básico.* Esta fase pretende incursionar en el mundo de los vehículos acuáticos, proporciona ideas básicas así como también genera dudas respecto al cómo lograr la estanqueidad del prototipo, al igual que se interesa en el cómo construir motores a prueba de agua, etc.
- **Prototipo 2:** *Vehículo sumergible o submarino básico.* En esta fase se pretende construir un vehículo sumergible o submarino capaz de realizar tareas básicas como la inmersión, emersión, desplazamiento, detección y evasión de obstáculos.
- **Prototipo final:** *Vehículo submarino orientado a tareas.* En esta fase se pretende especializar el funcionamiento del prototipo alcanzado durante la fase 2. Dicho prototipo deberá además de realizar las tareas básicas de inmersión, emersión, desplazamiento, detección y evasión de obstáculos, ser capaz de buscar objetos específicos, i.e. marcas colocadas en el fondo del ambiente, las cuales se reconocerán por su color característico.

3.2. Prototipo 1: Vehículo acuático básico

Debido a que no se tenía experiencia en el diseño y control de vehículos acuáticos, fue necesario construir el Prototipo 1 para obtener una idea de lo que implica trabajar en un medio como el agua y también para empezar a establecer los materiales necesarios para diseños posteriores.

- **Hipótesis:** Se puede construir un prototipo de vehículo acuático capaz de desplazarse en la superficie del agua, así como también detectar obstáculos y evadirlos, empleando una tarjeta controladora Handyboard© (ver apéndice B), dos motores DC y tres sensores de contacto.
- **Objetivos:** Diseñar e implementar un vehículo acuático autónomo con capacidad de desplazamiento, detección y evasión de obstáculos en la superficie del agua.
- **Construcción:** Para la construcción de el Prototipo 1 (figura 3.1), se utilizó un recipiente circular de plástico, dos motores DC, dos hélices, tres sensores de contacto y una tarjeta controladora Handyboard©. Los sensores de contacto se colocaron al frente del vehículo (figura 3.1 (a)) para hacerlo capaz de detectar si había o no un obstáculo. Cuando alguno de los sensores de contacto era activado, significaba que el vehículo había chocado con algún obstáculo. La reacción del prototipo 1 al detectar un obstáculo dependía únicamente del sensor activado, i.e. cambiaba de trayectoria hacia la derecha, hacia la izquierda o giraba 180° de acuerdo al sensor de contacto que se había activado primero. Si se activaban dos o los tres sensores de contacto al mismo tiempo, el prototipo 1 realizaba el cambio de trayectoria de acuerdo a un nivel jerárquico de sensores, donde el valor mayor correspondía al sensor derecho, el valor medio al sensor central y el valor menor al sensor izquierdo, e.g. si dos sensores de contacto se activaban simultáneamente y uno de ellos era el sensor derecho, por jerarquía el vehículo cambiaba de trayectoria evadiendo el obstáculo que se encontraba a su derecha girando sobre su eje hacia la izquierda.

Para navegar en la superficie del agua, se utilizaron dos hélices que tenían que ser activadas por dos motores DC. Dichas hélices se encontraban atadas a unos cables como los que usan las bicicletas para frenar, conocidos como chicotes, contenidos en una manguera llena de vaselina de medio centímetro de diámetro, con la finalidad de transmitir a través del cable el movimiento del eje del motor para activar las hélices y al mismo tiempo evitar que el agua llegara al interior del vehículo gracias a la vaselina contenida en las mangueras (figura 3.1 (c)).

Cabe mencionar que se implementó el mecanismo de la manguera y el cable antes mencionado debido a que las hélices tenían que estar total o parcialmente sumergidas en el agua. El problema principal fue que los motores DC con los que se contaba no estaban hechos para funcionar bajo el agua, por lo que se tuvo que utilizar el mecanismo de la manguera y el cable antes mencionado, para comunicar el interior del vehículo, i.e. donde se encuentran los motores y la tarjeta controladora Handyboard©, con el exterior, i.e. las hélices.

- **Desempeño:** El sistema de detección de obstáculos del prototipo 1, aunque limitado fue eficiente, debido a que al detectar de frente o de lado algún obstáculo, el prototipo cambiaba correctamente de dirección para evitar seguir chocando.

La idea propuesta para activar las hélices fue buena y funcionó muy bien, le permitió al prototipo girar y avanzar tal y como se esperaba. El único inconveniente fue que los cables que hacían girar las hélices provocaban mucha vibración en el prototipo debido a que dichos cables golpeaban el interior de la manguera al girar a la misma velocidad que el eje del motor.

- **Conclusiones:** Se logró diseñar y construir un prototipo simple, estable y funcional capaz de realizar de manera autónoma el desplazamiento, la detección y la evasión de obstáculos. Se diseñó un mecanismo para activar las hélices del prototipo con la finalidad de evitar que entrara el agua al interior del mismo. Dicho mecanismo constó del uso de cables para frenos de bicicleta o chicotes, mangueras de medio centímetro de diámetro, vaselina, dos hélices y dos motores DC. La forma en la que quedó implementado el mecanismo se muestra en las figuras 3.1 (c) y 3.1 (d).

Este prototipo tiene como principal desventaja la vibración producida por el cable, i.e. al girar el motor DC el cable también gira provocando que la unión entre la manguera y el cuerpo del prototipo pueda aflojarse y con esto inundarse. Además, el mecanismo implementado para activar las hélices necesitaba mucho espacio, i.e. el cable necesitaba estar colocado casi en línea recta (tanto la parte externa - la que va a las hélices, como la interna - la que va a los motores), ya que de lo contrario, el cable oponía más resistencia y con eso provocaba más vibración en el vehículo.

Después de mantener el vehículo funcionando durante un periodo de tiempo del orden de 6 minutos, la vaselina insertada en las mangueras tiende a salirse debido a la fricción producida por el cable al rotar dentro de la manguera.

Como se observó que no se podía usar el prototipo por periodos prolongados de tiempo, del orden de 10 o 15 minutos aproximadamente, debido a la vibración y a posibles inundaciones, se desechó la idea de continuar usando este mecanismo para versiones posteriores.

La lección aprendida de este prototipo se resume a continuación:

1. Es importante sacar los motores DC del interior del vehículo, puesto que si siguen en el interior pueden ocasionar inundaciones debido a que no pueden protegerse totalmente, ya que su eje giratorio está conectado directamente a la hélice situada en el exterior del vehículo. Por tanto, lo que se necesita son motores a prueba de agua, i.e. motores DC que funcionan bajo el agua.

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO⁴⁷

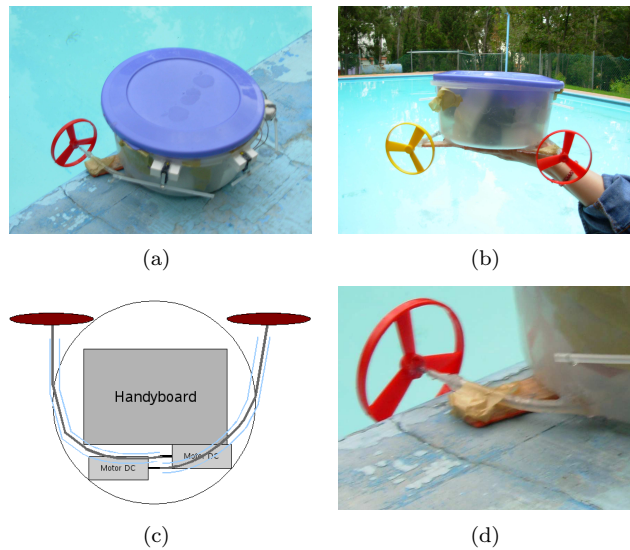


Figura 3.1: Prototipo 1: Vehículo acuático básico. (a) Vista lateral del prototipo, (b) vista desde la parte trasera del prototipo, (c) esquema del mecanismo para mover hélices, indicadas por discos oscuros en la parte superior, (d) mecanismo implementado para conectar las hélices.

3.3. Prototipo 2 : Vehículo sumergible o submarino básico

Durante el diseño del prototipo 2 en sus versiones v1.0, v1.1, v1.2 y v2.0, se probaron diferentes ideas con el objetivo en común de lograr que el prototipo final fuera capaz de hundirse, de emerger, de desplazarse tanto en la superficie como inmerso, y de mantenerse sumergido a una profundidad de 20 *cm* de la superficie aproximadamente.

En esta fase del diseño, se convirtieron motores DC estándares a motores a prueba de agua (ver apéndice C), los cuales fueron utilizados y probados en este segundo prototipo. Dichos motores tuvieron un desempeño exitoso.

Durante el periodo de pruebas se determinaron los requerimientos necesarios para alcanzar los objetivos, i.e. inmersión, emersión y desplazamiento, aunque el objetivo de mantener sumergido el prototipo a una profundidad de 20 *cm* de la superficie no tuvo éxito.

3.3.1. Prototipo 2 v1.0: Vehículo sumergible básico

- **Hipótesis:** Se puede construir un vehículo sumergible con flotabilidad negativa, tal que no se hunda por completo, i.e. una vez colocado sobre el agua se hundirá, pero se quedará flotando a 20 *cm* de profundidad (aproximadamente). Para lograr la flotabilidad negativa del prototipo se emplearán lastres. Una vez que el prototipo se encuentre sumergido, será capaz de desplazarse bajo el agua conservando su profundidad utilizando únicamente sus hélices.
- **Objetivos:** Diseñar y construir un vehículo acuático que tenga flotabilidad negativa, y que la profundidad máxima a la que deberá hundirse a razón de su flotabilidad negativa será de 20 *cm*. Una vez inmerso, deberá desplazarse bajo el agua horizontalmente.
- **Construcción:** Para la construcción del prototipo 2 v1.0, se utilizó un recipiente de plástico transparente, el cual permitía ser cerrado a presión, dos motores a prueba de agua (ver apéndice C), dos hélices y una tarjeta controladora Handyboard®.

Una de las finalidades de este prototipo era mantener la circuitería totalmente aislada del exterior. Para lograr lo antes mencionado, fue necesario usar los motores a prueba de agua, y de esta forma, la unión entre los motores, el recipiente y la tarjeta controladora podía ser sellada totalmente. Los motores se colocaron a los lados del recipiente de plástico, la tarjeta controladora Handyboard® se colocó en el interior del recipiente y se hizo una perforación en la parte trasera del mismo, para sacar el cableado. Se utilizó silicón caliente para sellar el orificio y así evitar que el agua entrara al interior.

Para realizar los objetivos antes mencionados, fue necesario dividir el diseño del vehículo en dos etapas descritas a continuación:

1. Estabilidad en inmersión: Como primer paso era necesario mantener sumergido el prototipo a una profundidad de 20 *cm*, para lo cual se recurrió a utilizar lastres como se describe a continuación:

- **Lastres externos**

La primer prueba fue determinar la cantidad de lastre necesario para hacer que el prototipo tuviera flotabilidad negativa, ya que en un principio tenía flotabilidad positiva. Para realizar lo antes mencionado se sujetaron piedras, fierros, etc. al cuerpo del prototipo, cuidando la estabilidad del mismo. El peso del lastre añadido fue de aproximadamente 700 *gr*, debido a que en el interior del vehículo había mucho espacio libre, y por tanto era necesario más peso para hundirlo. Los 700 *gr* de lastre antes

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO 49

mencionados hacían que el prototipo se hundiera a la profundidad deseada, pero no lograban mantenerlo ahí, i.e. no lograban satisfacer el requerimiento de que el prototipo se mantuviera flotando a 20 *cm* de profundidad (aproximadamente).

Debido a que el lastre añadido en el exterior del cuerpo del prototipo ocupaba mucho espacio alrededor del mismo, y debido también a que se tenían restricciones de dimensiones para la versión final del prototipo, se optó por otra estrategia para hacer que el prototipo tuviera flotabilidad negativa.

• Lastres internos y externos

En esta estrategia se rellenó con arena la mayor cantidad de espacio libre dentro del cuerpo del prototipo hasta lograr que el prototipo tuviera una flotabilidad positiva mínima, i.e. que la mayor parte del cuerpo del mismo se encontrara sumergido. Una vez alcanzado dicho nivel de flotabilidad, se selló y se probó agregar lastres externos hasta tratar de hundirlo a aproximadamente 20 *cm* de la superficie. Fue posible hacer que el vehículo descendiera hasta la profundidad deseada, estando totalmente estático y sin la necesidad de usar mucho lastre (máximo 5 *gr*), pero se observó que si se aplicaba sobre el cuerpo del prototipo una fuerza pequeña de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba, éste se hundía o emergía respectivamente y no regresaba a su posición inicial, i.e. a los 20 *cm* de profundidad.

Debido a que la diferencia en el peso de lastre necesario para hacer que el prototipo se hundiera hasta el fondo, o flotara en la superficie era muy pequeña, en el rango de ± 3 *gr* aproximadamente, fue muy complicado calcular el lastre suficiente para mantener sumergido el prototipo a una profundidad de 20 *cm*.

El problema de usar lastres en aguas poco profundas para un vehículo estático, no es que pueda hundirse, sino que se mantenga sumergido a la profundidad deseada, i.e. debido a que cualquier fuerza o cualquier corriente por muy mínima que sea, hace que el vehículo se vaya al fondo o emerja aún teniendo el lastre adecuado para mantenerse a la profundidad deseada.

2. Desplazamiento en inmersión: El segundo paso fue hacer que el prototipo se desplazará bajo el agua.

Al hacer pruebas para desplazar el prototipo 2 v1.0, se notó que debido al peso del mismo del orden de 0,5 *kg* aproximadamente, y al peso del lastre añadido (en los casos antes descritos: 1) al añadir lastre exterior y 2) al rellenar con arena el interior del cuerpo del

prototipo y después agregar el lastre exterior), las hélices utilizadas (c.f. sección 3.2, figura 3.1) no tenían la forma adecuada para generar la propulsión necesaria y así mover el prototipo a través del agua, por lo cual se recurrió al uso de hélices más grandes, i.e. hélices tomadas de ventiladores de fuentes de poder de computadoras de escritorio. Una vez acopladas dichas hélices a los ejes de los motores a prueba de agua, se probaron y se demostró que funcionaban adecuadamente, ya que generaban la propulsión necesaria para desplazar el prototipo a través del agua sin necesidad de activar los motores a su potencia máxima, con lo cual se ganó un ahorro de energía significativo, del orden del 30 % del total de la batería disponible de la Handyboard© (figura 3.2).

- **Desempeño:** El prototipo 2 v1.0 logró hundirse y se logró encontrar el lastre necesario para mantener el prototipo a 20 *cm* de profundidad. La desventaja es que el prototipo no logró conservar dicha profundidad, aún teniendo el lastre necesario.

El desplazamiento bajo el agua resultó como se esperaba, ya que el prototipo fue capaz de desplazarse y cambiar de dirección a un bajo costo, i.e. los motores que activaban las hélices se utilizaron a una baja potencia.

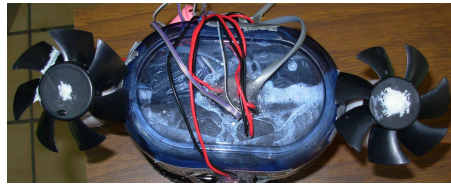
- **Conclusiones:** El usar lastres internos y externos, no fue una solución adecuada para mantener el prototipo a una profundidad deseada, puesto que fue muy inestable y la más mínima cantidad de peso extra de lastre (± 3 *gr*) hacía que el prototipo se hundiera o flotara respectivamente.

Durante las pruebas de desplazamiento se reafirmó que el uso de lastres no era una solución adecuada para mantener el prototipo a una profundidad de 20 *cm*, debido a que una vez que se activaban las hélices, el vehículo tendía a hundirse o a flotar indistintamente, i.e. con la misma cantidad de lastre, en algunas ocasiones el prototipo flotaba lentamente hasta llegar a la superficie, y en otras se hundía de igual forma hasta llegar al fondo. A lo que se concluyó después de hacer diferentes pruebas estando el prototipo estático y en movimiento, que la más mínima fuerza o corriente sobre el cuerpo del prototipo, lo hacía hundirse o flotar irremediamente.

Las lecciones aprendidas de este prototipo se resumen a continuación:

1. No se debe utilizar lastre para mantener el prototipo a una profundidad deseada, al menos no en aguas poco profundas. Es necesario utilizar otro medio para lograr mantener el prototipo a 20 *cm* de profundidad aproximadamente.
2. El uso de las hélices de las fuentes de poder utilizadas para hacer que el vehículo se desplazara, resultó ser una buena idea por el tamaño de las hélices y porque impulsan mejor el agua hacia atrás del prototipo, por lo que se decidió utilizarlas para diseños posteriores.

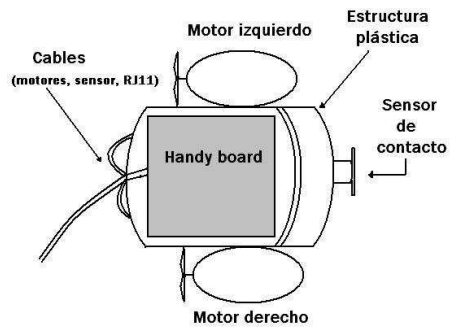
3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO⁵¹



(a) Parte trasera del prototipo



(b) Distribución de componentes 1



(c) Distribución de componentes 2, el frente del prototipo se distingue por el sensor de contacto. Vista superior.

Figura 3.2: Prototipo 2 v1.0: Vehículo acuático sumergible, utiliza arena y lastres para lograr la inmersión. Los cables que salen del cuerpo del prototipo corresponden a los cables de 2 motores DC a prueba de agua, 1 sensor de contacto y del cable RJ11 que sirve para programar a la Handyboard[©].

3.3.2. Prototipo 2 v1.1: Vehículo sumergible básico

Debido a que se observó en el prototipo 2 v1.0 que la más mínima fuerza o corriente sobre el cuerpo del prototipo, lo hacía hundirse o flotar, se decidió agregar un tercer motor que le permitiera realizar dichas tareas.

- **Hipótesis:** Se puede construir un vehículo sumergible que inicialmente tenga flotabilidad negativa, y que usando una hélice colocada en la parte inferior del prototipo, logre emerger a la superficie y mantenerse inmerso a una profundidad de 20 *cm*.

- **Objetivos:** Diseñar y construir un vehículo acuático autónomo con flotabilidad negativa, con capacidades de inmersión, emersión y además, capaz de mantenerse sumergido a una profundidad de 20 *cm*.
- **Construcción:** Para la construcción del prototipo 2 v1.1, se utilizó un recipiente de plástico transparente, el cual permitía ser cerrado a presión (c.f. figura 3.2), tres motores a prueba de agua (ver apéndice C), tres hélices y una tarjeta controladora Handyboard©.

Como lo que se deseaba era tener un prototipo con flotabilidad negativa, se recurrió al uso de arena para rellenar los espacios en el interior del prototipo (como en el prototipo 2 v1.0). La cantidad de arena tenía que ser suficiente para hundir el prototipo hasta el fondo, pero también tenía que ser la cantidad justa para no oponer demasiada resistencia con su peso al tercer motor que haría emerger y mantener el prototipo a la profundidad deseada.

Los motores laterales se conservaron como en el prototipo 2 v1.0, el tercer motor se colocó en la parte inferior del prototipo, además de que fue necesario centrarlo para darle estabilidad al prototipo al momento de activar el tercer motor (figura 3.3).

- **Desempeño:** Una vez que el prototipo 2 v1.1 era colocado en el agua, éste se hundía debido a su flotabilidad negativa. Al activarse el tercer motor, i.e. el motor que lo haría emerger o flotar a la profundidad deseada, se observó que para lograr hacer emerger el prototipo, era necesario activar el motor a su máxima potencia, con lo cual se notó que la batería de la tarjeta controladora se descargaba muy rápido.

Para lograr que el tercer motor mantuviera el prototipo a una profundidad deseada, se calculó la velocidad a la que dicho motor tenía que funcionar, pero a medida en que se iban descargando las baterías, la potencia del motor disminuía, con lo cuál el prototipo comenzaba a hundirse y a quedarse sin energía.

Como el desplazamiento bajo el agua ya estaba resuelto desde la versión 1.0, se utilizaron los mismos motores y las mismas secuencias para hacer las pruebas.

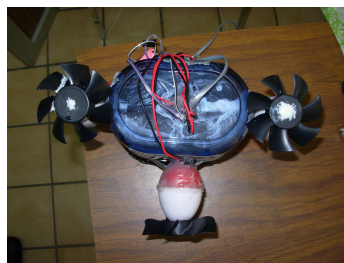
- **Conclusiones:** En general, se lograron los objetivos de inmersión y emersión, con deficiencias en el control de la profundidad del prototipo. Las baterías que alimentan a la tarjeta controladora Handyboard© se descargan muy rápido, puesto que el tercer motor consume demasiada energía, y además es necesario mantenerlo activo durante el periodo de tiempo completo que dure la tarea a realizar. A causa del desgaste de energía antes mencionado, es imposible saber al

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO53

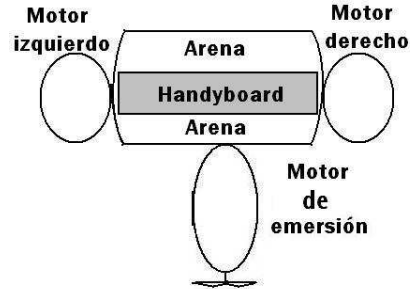
menos con las herramientas empleadas, si en efecto el prototipo se encuentra a los 20 *cm* de profundidad deseados o si en verdad está en la superficie del agua. Lo anterior se observó debido a que al activar dicho motor a su potencia máxima para hacer emerger el vehículo, éste sostuvo al prototipo en la superficie por un periodo de tiempo corto, del orden de cuatro minutos, y posteriormente la potencia del motor fue disminuyendo a causa del desgaste de las baterías y por tanto comenzó a hundirse, aunque la tarjeta controladora seguía mandando la señal de potencia máxima a dicho motor, lo cual indicaba que la tarea de emersión no se había completado todavía.

Las lecciones aprendidas de este prototipo se resumen a continuación:

1. Aunque el uso del tercer motor logra hacer emerger el prototipo, es muy inestable, debido a que no se sabe a ciencia cierta si en realidad el prototipo se encuentra en la superficie o a la profundidad deseada, a causa del desgaste de energía en las baterías provocado por el uso del mismo. Debido a lo antes mencionado se decidió eliminar el tercer motor del diseño.
2. Debe proponerse otro mecanismo para hacer que el vehículo logre la inmersión, la emersión y el mantenerse sumergido a la profundidad deseada sin gastar tanta energía.



(a) Parte trasera del prototipo



(b) Distribución de componentes, vista frontal

Figura 3.3: Prototipo 2 v1.1: Vehículo acuático sumergible con flotabilidad negativa, utiliza un motor DC a prueba de agua para lograr la emersión.

3.3.3. Prototipo 2 v1.2: Vehículo sumergible básico

Hasta la versión 1.1 del prototipo 2 se pensó en trabajar con vehículos sumergibles, i.e. vehículos capaces de lograr la inmersión y la emersión sin variar

su peso, pero durante el diseño de la presente versión, se optó por construir un vehículo submarino, capaz de variar su peso a un bajo costo para lograr las tareas de inmersión y emersión.

- **Hipótesis:** Se puede diseñar y construir un vehículo acuático autónomo capaz de realizar las tareas de inmersión y emersión empleando aire comprimido. Además, podrá mantenerse flotando a una profundidad aproximada de 20 *cm*, i.e. deberá almacenar cierta cantidad de aire comprimido en algún contenedor. También, será capaz de desplazarse tanto en la superficie como inmerso en el agua, empleando dos motores DC a prueba de agua.
- **Objetivos:** Diseñar e implementar un vehículo submarino con capacidades de inmersión, emersión y desplazamiento tanto en la superficie como bajo el agua. Además, deberá ser capaz de flotar a una profundidad de 20 *cm* aproximadamente y de mantener dicha profundidad.
- **Construcción:** Para la construcción del prototipo 2 v1.2, se utilizó un recipiente de plástico transparente, el cual permitía ser cerrado a presión (c.f. figura 3.2), dos motores a prueba de agua, dos hélices, dos servomotores, una "campana" para almacenar aire comprimido o agua, que va a lograr la inmersión y la emersión del prototipo, y una tarjeta controladora Handyboard©.

La idea de la "campana" surgió por la necesidad de hacer que el prototipo se hundiera y emergiera a un bajo costo, i.e. que gastara la menor cantidad de energía posible. Para su construcción se utilizó un bote mediano de plástico transparente empleado para almacenar gel para cabello con capacidad de 250 *gr* sin tapadera. Posteriormente a través de calor, se deformó la base del bote dándole una forma convexa (viendo dicha forma desde el interior del mismo). Después, fue necesario perforar la base del bote para utilizar dicho orificio como una válvula, para lo cual fue necesario colocar en él un tapón. Dicho tapón podía ser abierto por un servo-motor para permitir que el aire que se encuentra dentro de la "campana" escape y con eso el nivel de agua dentro de la campana aumente, provocando que el prototipo se hunda al ganar peso. Una vez que el servo-motor es desactivado, i.e. deja de mantener abierto el tapón de la campana, el tapón se cierra a causa de unos resortes que se encuentran colocados en el interior de la "campana" (figura 3.4).

Es importante hacer notar que no cualquier "campana" funciona para el prototipo, debido a que el aire comprimido que logre almacenar dicha "campana" cuando el prototipo está inmerso en el agua, debe ser suficiente para hacer emerger el prototipo, y además al llenar la "campana" con agua, debe de poder hundirse totalmente.

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO55

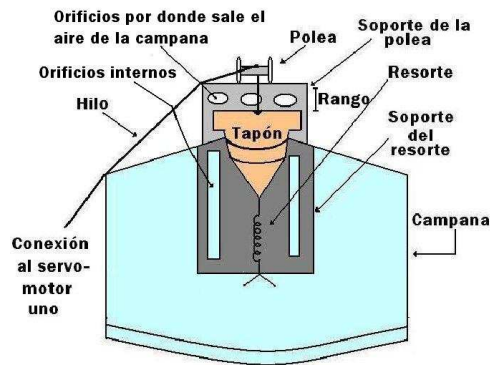


Figura 3.4: Componentes de la "campana" empleada para lograr la inmersión y emersión del prototipo (Muestra el rango de movimientos de la válvula, igual a 1 cm). Vista lateral.

Uno de los problemas al implementar la idea de la "campana" y del aire comprimido, fue la dificultad para estabilizar el prototipo debido a que no se podían acomodar todos los elementos sobre el cuerpo del mismo, e.g. servo-motores, campana, aire comprimido, etc., además de que se sobrepasaban las dimensiones máximas requeridas para el vehículo (20 cm × 20 cm × 20 cm). Para efectos de experimentación, se trató únicamente de acomodar la "campana" y el servo-motor que abre la válvula de la misma, junto con los dos motores a prueba de agua que se tenían en los diseños previos.

- **Desempeño:** Una vez que el prototipo 2 v1.2 era colocado sobre el agua, éste se mantenía "flotando" hasta que se hundía, debido a que el servo-motor había abierto la válvula de la "campana" y con esto permitía que el aire que la campana contenía inicialmente, escapara a través de la válvula, permitiendo así que el nivel del agua en el interior de la "campana" aumentara. Para la emersión, se inyectó aire en la "campana" manualmente, pues no fue posible acomodar sobre el cuerpo del prototipo el tanque de aire comprimido y el servo-motor para dispararlo, como se esperaba, el prototipo comenzó a emerger. Durante la inmersión y la emersión el prototipo se desestabilizó y en ocasiones se volteó perdiendo totalmente el equilibrio.
- **Conclusiones:** El utilizar la "campana" para lograr la inmersión y la emersión resultó ser buena idea, debido a que hubo un ahorro considerable de energía respecto al diseño anterior, pues para lograr la inmersión y emersión, es necesario activar únicamente dos servo-motores por periodos cortos de tiempo, del orden de segundos. La desventaja fue que por la misma estructura física del prototipo empleado en esta versión, no fue posible

lograr la estabilidad del mismo ni colocar el resto de componentes, como el tanque de aire comprimido y un servo-motor que permitiera disparar dicho tanque.

No fue posible conseguir que el prototipo se mantuviera sumergido a una profundidad de 20 *cm* aproximadamente, aún cuando las pruebas se hicieron manualmente, i.e. las pruebas se hicieron inyectando cantidades pequeñas de aire comprimido en el interior de la campana o dejando escapar aire por la válvula, tratando de obtener el nivel de agua adecuado para que el prototipo mantuviera su profundidad.

Las lecciones aprendidas de este prototipo se resumen a continuación:

1. El uso de la "campana" permite ahorrar energía durante la inmersión y la emersión, aunque al hacerce las pruebas correspondientes para mantener el prototipo a una profundidad de 20 *cm*, se llegó al mismo problema encontrado al utilizar lastres, i.e. que la más mínima cantidad de agua y/o aire dentro de la "campana" hacía que el prototipo se hundiera o flotara.
2. Es necesario rediseñar la estructura física del prototipo para darle equilibrio, i.e. es necesario tratar de acomodar los elementos más pesados, e.g. motores, lastres, etc., lo más abajo posible, y los elementos más ligeros, e.g. el aire comprimido, lo más arriba posible (c.f. equilibrio de un submarino, sección 2.1.1).

3.3.4. Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico

El prototipo 2 v1.2 fue la base para construir el prototipo 2 v2.0, ya que en él se definieron los requerimientos necesarios para lograr la inmersión y la emersión a un bajo costo, en términos de energía utilizada. El diseño del prototipo 2 v1.2 también proporcionó algunas ideas para resolver el problema del equilibrio, así como también ayudó a definir que al menos para aguas poco profundas, como el medio en el que va a trabajar nuestro prototipo, del orden de 25 *cm* de profundidad, no es posible encontrar el nivel de agua necesario que actúe como lastre empleando únicamente la "campana", para mantener sumergido el prototipo a una profundidad diferente a la del fondo de la pecera. Es por ello que se optó por seguir avanzando con el diseño del prototipo y dejar atrás el problema de mantener sumergido el prototipo a una profundidad deseada.

- **Hipótesis:** Se puede construir un vehículo acuático autónomo submarino capaz de realizar las tareas de inmersión, emersión y desplazamiento. La inmersión será total, i.e. el prototipo se hundirá hasta el fondo al hacer que la "campana" se llene de agua. La emersión se llevara a cabo llenando la "campana" con aire comprimido, provocando que el vehículo flote al perder peso. El desplazamiento será tanto en la superficie como en inmersión, y se refiere al avanzar y al evadir obstáculos, empleando motores a

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO57

prueba de agua y sensores de contacto.

- **Objetivos:** Diseñar e implementar un prototipo de vehículo acuático submarino que realice las tareas de inmersión, emersión, desplazamiento y evasión de obstáculos. Además, se deberán organizar los elementos para permitir el equilibrio del prototipo.

- **Construcción:** Para la construcción del prototipo 2 v2.0, se utilizaron dos recipientes rectangulares de plástico transparente (de 15 *cm* de largo \times 10 *cm* de alto \times 5 *cm* de ancho), los cuales se utilizaron para separar las baterías que alimentan al prototipo de la tarjeta controladora Handyboard©, ya que si se seguían manteniendo como una sola entidad (baterías - Handyboard), causaban demasiada inestabilidad en el vehículo (ver prototipo 2 v1.2); dos motores DC a prueba de agua (ver apéndice C), dos hélices, una "campana" (ver prototipo 2 v1.2), un tanque de aire comprimido (de 25 *cm* de largo \times 6,5 *cm* de diámetro), dos servo-motores a prueba de agua (ver apéndice C), dos sensores de contacto y una tarjeta controladora Handyboard©.

La manera en la que se construyó el prototipo se describe a continuación:

1. Se separaron las baterías de la circuitería de la Handyboard© y se colocaron ambas partes en los recipientes rectangulares correspondientes. Posteriormente, se rellenó de arena la mayor cantidad de espacio libre dentro de la caja que contenía a las baterías (*caja B*), con la finalidad de hacer que el prototipo obtuviera una flotabilidad positiva mínima y con eso facilitar la inmersión. No se repitió el mismo procedimiento de rellenar con arena la *caja A*, puesto que la tarjeta controladora ocupaba casi todo ese espacio. Como además era indispensable equilibrar el prototipo, se agregó la diferencia de pesos entre la *caja A* (que contiene a la tarjeta controladora Handyboard©) y la *caja B* (que contiene las baterías y la arena) en forma de lastres externos colocados bajo la *caja A*. Al agregar dichos lastres se logró el equilibrio del prototipo en su eje transversal (c.f. equilibrio de un submarino, sección 2.1.1, figura 3.5).

2. Se hicieron las conexiones correspondientes entre la tarjeta controladora Handyboard© y los actuadores, e.g. motores DC, servo-motores, así como también con los sensores de contacto y las baterías.

3. Se colocó la "campana" entre las cajas *A* y *B* que contienen a la tarjeta controladora Handyboard© y a las baterías, respectivamente, como se muestra en la figura 3.5. Se decidió acomodar la campana en esa posición para dar estabilidad al prototipo, ya que la campana

realiza dos funciones diferentes, i.e. funciona como lastre cuando se llena de agua, y como un elemento ligero o con flotabilidad positiva cuando se llena de aire. Se sabe que para equilibrar el prototipo, deben colocarse los elementos más pesados lo más abajo posible, y los elementos más ligeros lo más arriba posible, pero debido a que la campana realiza ambas funciones, se observó experimentalmente que al colocarla abajo, y al ser llenada de aire comprimido se desestabilizaba el prototipo, provocando que su centro de flotabilidad estuviera debajo de su centro de gravedad, lo cual provocó que el prototipo girara 180° y se volteara totalmente.

4. Se hizo una conexión entre el servo-motor uno y el tapón de la "campana" (figura 3.5), con la finalidad de que al activar la secuencia de movimientos del servo-motor, éste jale el tapón ó válvula permitiendo que el aire que se encuentra dentro de la "campana" escape.
5. Se colocó el tanque de aire comprimido lo más arriba posible del prototipo para darle más estabilidad, y se colocaron los dos servo-motores de uno y otro lado del prototipo, así como también los motores DC a prueba de agua, para conservar el equilibrio del vehículo (figuras 3.5 y 3.6). Además, los servo-motores se pusieron lo más abajo posible cuidando no exceder la altura máxima de 20 *cm*. Para disparar el tanque de aire comprimido se usó el servo-motor dos, el cual se conectó a través de un hilo grueso al disparador del tanque de aire comprimido. El hilo que los conecta se hizo pasar por una polea para evitar que dicho servo-motor requiriera de gran torque para disparar el tanque (figura 3.7).

■ **Desempeño:** Las maniobras de inmersión y emersión se realizaron exitosamente, aunque el servo-motor dos (el que dispara el tanque de aire comprimido, figura 3.5) se forzó mucho. Se adaptó un sistema de poleas para reducir la fuerza que el servo-motor dos debe realizar sobre el disparador del tanque de aire comprimido, pero aún así dicho motor continuó forzándose un poco. El equilibrio tanto en inmersión como en la superficie se logró como se esperaba, debido a la forma en la que se acomodaron los componentes del prototipo. El desplazamiento tanto en la superficie como en el fondo se ejecutó satisfactoriamente.

■ **Conclusiones:** Este prototipo ha sido el más completo gracias a las lecciones aprendidas en versiones anteriores, debido a que realiza la inmersión, la emersión y el desplazamiento satisfactoriamente. Uno de los mayores inconvenientes fue que no se pudo lograr la estanqueidad total de los compartimientos del prototipo (cajas *A* y *B*), puesto que aunque se utilizaron diferentes tipos de adhesivos epóxicos que pegan y curan bajo el agua (pa-

3.3. PROTOTIPO 2 : VEHÍCULO SUMERGIBLE O SUBMARINO BÁSICO59

ra pegar las tapaderas de las cajas *A* y *B*), se seguían detectando fugas.

Otro de los inconvenientes fue que los botones de *start*, *stop* y *on/off* se encontraban en el interior de la caja *A* (en la tarjeta controladora Handyboard©), por lo cual fue necesario hacer una perforación en uno de los lados de la caja *A* para iniciar y/o terminar la ejecución de un programa, así como también para encender, apagar y descargar tanto el programa como el *firmware* de la tarjeta controladora. Esta perforación hecha en uno de los costados de la caja *A*, se cerraba para las pruebas con silicón caliente, pero como era abierto y cerrado constantemente, se convirtió en uno de los posibles puntos generadores de fugas.

Las lecciones aprendidas de este prototipo se resumen a continuación:

1. Se comprobó experimentalmente la utilidad de la regla de colocar los elementos más pesados lo más abajo posible y viceversa, para lograr el equilibrio del vehículo (c.f. equilibrio de un submarino, sección 2.1.1).
2. Como aún faltan algunos elementos por incorporar al vehículo como la cámara, y en un futuro tal vez los brazos o brazo para jalar o arrastrar los objetos de interés, se desea reducir el tamaño del tanque de aire comprimido, aunque al hacer dicha modificación, es posible que sea necesario cambiar la campana actual por una más grande, i.e. porque puede ser que la campana actual no logre hacer emerger al prototipo aún estando totalmente llena de aire comprimido.
3. Se comprobó experimentalmente que por el material del cual estaban hechas las cajas *A* y *B* del prototipo, i.e. plástico flexible, fue prácticamente imposible sellar por completo dichas cajas para evitar fugas. El problema principal radica en que todos los elementos del robot fueron pegados a ambas cajas, por lo cual, el servo-motor dos, i.e. el que dispara el tanque de aire comprimido, genera una fuerza equivalente a la empleada para disparar el tanque de aire comprimido sobre la caja *A*, ocasionando la ruptura del pegamento colocado para sellar dicha caja, pues el pegamento, i.e. pegamento epóxico, al secar se cristaliza, por lo cual se ocasionaron fugas.

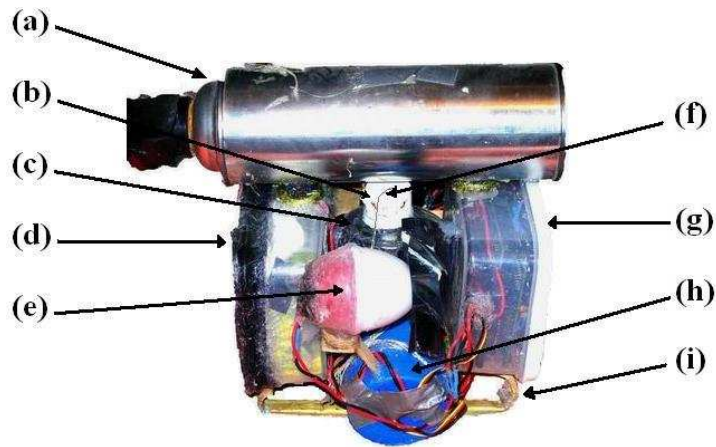


Figura 3.5: Prototipo 2 v2.0: Vista lateral derecha del vehículo submarino básico. (a) Tanque de aire comprimido, (b) Posición de la válvula, la válvula se encuentra protegida para limitar su rango, (c) Campana, (d) Caja B (contiene las baterías y arena), (e) Motor DC a prueba de agua, (f) Hilo que conecta al servo-motor uno con la válvula, sirve para abrir la válvula, (g) Caja A (contiene a la Handyboard©), (h) Servo-motor uno a prueba de agua y (i) Base del prototipo.

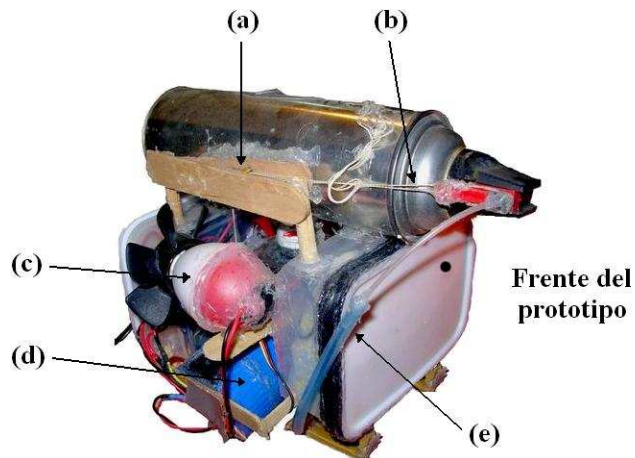


Figura 3.6: Prototipo 2 v2.0: Vista lateral izquierda del vehículo submarino básico. (a) Base que sostiene la polea, (b) Hilo que conecta al servo-motor dos con el disparador de aire comprimido, (c) Motor DC derecho a prueba de agua, (d) Servo-motor dos a prueba de agua y (e) Manguera que lleva el aire comprimido desde el tanque hacia el interior de la campana.

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS61

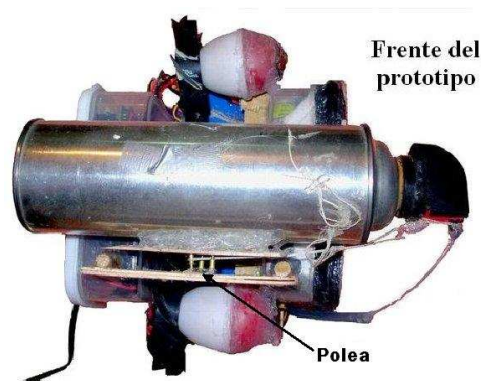


Figura 3.7: Prototipo 2 v2.0: Vehículo submarino básico, vista superior.

3.4. Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas

Este prototipo está basado en el prototipo 2 v2.0, su estructura física es prácticamente la misma, la diferencia radica principalmente en que para éste vehículo se utilizó acrílico en lugar del plástico flexible del cual estaban hechas las cajas *A* y *B* del prototipo anterior. El acrílico le dió fuerza al cuerpo del vehículo, lo hizo mucho más estable y le permitió evitar fugas.

- **Hipótesis:** Se puede construir un vehículo submarino autónomo con capacidades de inmersión, emersión, desplazamiento, detección y evasión de obstáculos, empleando una campana, un tanque de aire comprimido, sensores de contacto, y motores a prueba de agua, e.g. servo-motores y motores DC. Además, el prototipo deberá ser totalmente a prueba de agua, utilizando acrílico y pegamentos resistentes al agua.
- **Objetivos:** Diseñar y construir un vehículo acuático autónomo submarino capaz de realizar las tareas básicas de inmersión, emersión, detección y evasión de obstáculos. Además, deberá buscar objetos específicos (estando inmerso y en la superficie) usando la información obtenida de una cámara CMUcam2+© (ver apéndice D). Una vez detectado el objeto de interés, deberá asegurarse de estar posicionado sobre él. Posteriormente, deberá emerger para indicar con su cuerpo la posición del objeto, en otro caso deberá emerger e indicar que no se encontró el objeto a buscar girando siete veces hacia la derecha sobre su eje.
- **Construcción:** Para la construcción del prototipo 3, se utilizaron los mismos elementos que en la versión 2.0 del prototipo 2, i.e. dos motores a prueba de agua, dos servo-motores a prueba de agua, un tanque

de aire comprimido, dos sensores de contacto a prueba de agua, una tarjeta controladora Handyboard©, una campana; y se agregó una cámara CMUcam2+© (ver apéndice D).

La construcción del prototipo se describe a continuación:

1. Se hicieron dos cajas de acrílico transparente, una para la Handyboard© junto con sus baterías, y la otra de menores dimensiones para la cámara. Para hacer las cajas se recortaron rectángulos de diferentes medidas de una tira de acrílico comercial. Para pegar las cajas se utilizaron tres pegamentos diferentes: 1) silicón especial para acrílicos, el cual se distribuyó generosamente en las uniones internas de las cajas, 2) pegamento epóxico transparente que seca en 5 minutos, el cual se distribuyó homogéneamente en las uniones externas de las cajas. Este pegamento fué el más importante, ya que además de proporcionar la fuerza suficiente para evitar que los lados de las cajas se desprendan, consiguió eliminar por completo las fugas de agua, y 3) silicón caliente, éste último sólo funcionó como un refuerzo para proteger al pegamento epóxico antes mencionado, ya que éste último se cristaliza al secar y puede desprenderse fácilmente.

Cada una de las nuevas cajas de acrílico (figura 3.8) corresponden a una de las cajas *A* y *B* del prototipo 2 v2.0 (figura 3.5). Como puede observarse, se reagruparon las baterías y la tarjeta controladora en una misma caja, pues era necesario agregar un nuevo elemento, la cámara, y además era necesario respetar la distribución alcanzada en el prototipo 2 v2.0, ya que se demostró que era muy estable.



Figura 3.8: Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 1, lado izquierdo del prototipo.

2. Se colocaron los motores a prueba de agua, así como los servo-motores a los lados de la "campana" (figura 3.9).

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS63

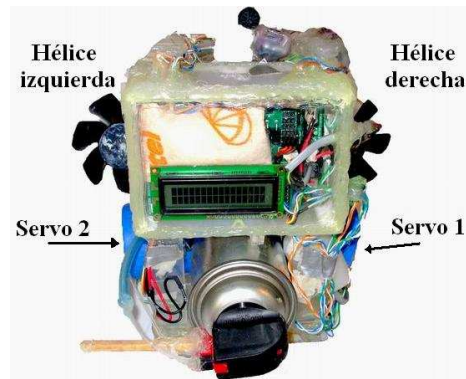


Figura 3.9: Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 2, parte trasera del prototipo

3. Los sensores de contacto se situaron al frente del prototipo (figura 3.10).

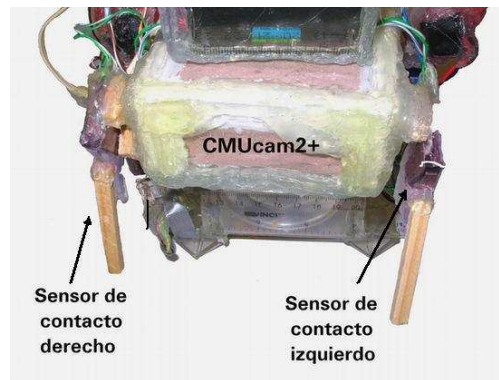


Figura 3.10: Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 3. Los sensores de contacto están situados al frente del prototipo, sobre la caja B de la cámara.

4. El tanque de aire comprimido (de las mismas dimensiones que el usado en la versión 2.0), se acomodó al centro del prototipo, como se muestra en la figura 3.11 (b). Para evitar que el centro de flotabilidad del prototipo quedará por debajo de su centro de gravedad, se agregó el lastre necesario en el área para agregar lastre situada bajo el tanque de aire comprimido (figura 3.11 (b)), de modo que dicho peso agregado evitó que el prototipo diera una vuelta de carro sobre su eje, i.e. hace que el centro de gravedad del prototipo quede por debajo de su centro de flotabilidad,

logrando así el equilibrio del vehículo en todo momento.

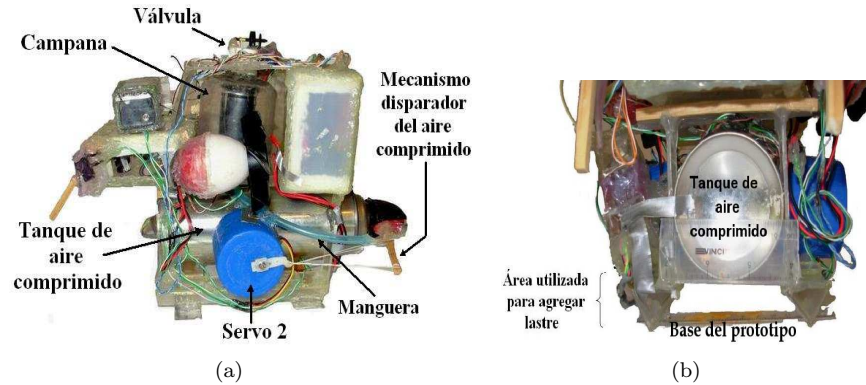
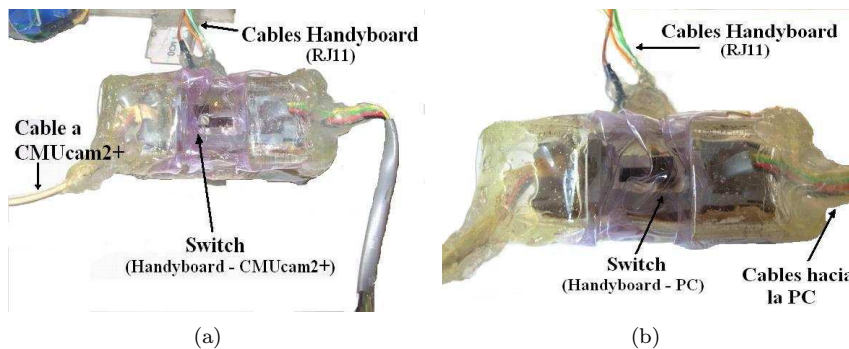


Figura 3.11: Prototipo 3: Vehículo submarino orientado a tareas, descripción de componentes 4. En (a) se nombran los componentes empleados para realizar las tareas de inmersión y emersión (el servo-motor uno no se aprecia, se encuentra del otro lado del prototipo), en (b) se muestra la posición centrada del tanque de aire comprimido, así como también el área usada para agregar lastre al prototipo (en la figura (b) el prototipo no tiene lastres).

5. La forma en la que el servo-motor uno abre la válvula, es la misma que en la versión 2.0, pero la forma en la que el servo-motor dos dispara el tanque de aire comprimido varía. En este caso, por la forma en la que se acomodó el tanque de aire comprimido, el servo-motor dos hace menos esfuerzo para disparar el tanque (figura 3.11 (a)).
 6. Se hicieron extensiones de los botones de *start*, *stop* y del interruptor *on/off* de la Handyboard© para colocarlos en el exterior de la caja A. Posteriormente, fue necesario hacerlos a prueba de agua, i.e fueron cubiertos con plástico grueso, e.g. plástico empleado para forrar libretas, y sellados con el pegamento epóxico transparente usado para pegar las cajas (figura 3.12).
 7. Se agregó un cable dual (ver apéndice E) que permitió conectar de manera sencilla a la Handyboard© con la cámara y con la PC (figura 3.13). Este cable permitió eliminar uno de los puntos posibles de fugas y por tanto de fallas en la comunicación, puesto que el cable RJ11 que va a la Handyboard© se utiliza principalmente para tres cosas, 1) descargar programas desde la PC, 2) cargar las baterías de la tarjeta controladora a través de un módulo de interfaz, y 3) comunicar a la Handyboard© con la cámara (figura 3.14).
- **Desempeño:** Este prototipo es muy estable y práctico, ya que al haberse colocado los botones de *start*, *stop* y *on/off* en la parte exterior de la caja A del prototipo, se logró mantener totalmente aislada a la tarjeta

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS65



controladora, evitando así posibles fugas.

El prototipo realizó las tareas de inmersión, emersión, desplazamiento tanto en la superficie como en el fondo, detección y evasión de obstáculos, y la búsqueda del objeto de interés de forma satisfactoria.

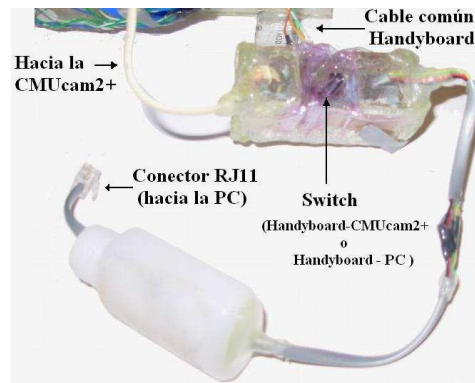


Figura 3.14: Esquema completo del interruptor que habilita la comunicación entre la Handyboard©-CMUcam2+© y Handyboard©-PC. El bote blanco evita que el conector RJ11 del cable se moje, pues es el que se conecta directamente en la interfaz. El cable se introduce en el bote y se cierra con su tapadera quedando totalmente aislado. El interruptor se protegió con plástico sellado con el pegamento epóxico empleado para pegar las cajas *A* y *B*, ya que era necesario un material flexible que permitiera abrir y cerrar el switch en cualquier dirección.

- **Conclusiones:** En este diseño se resolvieron los principales problemas encontrados durante el diseño de los prototipos previos, las fugas y el paso de humedad al interior del control del prototipo.

La forma en la que se acomodaron los elementos, e.g. el aire comprimido, los motores, etc., conservó la estabilidad del prototipo.

El prototipo fue capaz de realizar las tareas de inmersión, emersión, desplazamiento (tanto en la superficie como en inmersión), detección y evasión de obstáculos, y la búsqueda de una marca u objeto de interés.

El tamaño del prototipo excedió las dimensiones requeridas para el Torneo Mexicano de Robots Limpiadores Acuáticos en la categoría Limpiadores de Minas (cmr2007-url), especialmente en lo largo, puesto que desde un principio el tanque de aire comprimido empleado medía 25 cm de largo. Las dimensiones finales del prototipo son: 21 cm de ancho \times 21 cm de alto \times 30 cm largo. En un futuro podría cambiarse el tanque de aire comprimido actual por uno de menores dimensiones, de ser necesario.

Aunque el diseño del prototipo excedió las dimensiones antes establecidas, este prototipo fue seleccionado para ser el prototipo final del robot acuático, debido a que presenta capacidades de inmersión, emersión, desplazamiento tanto en la superficie como en el fondo de la pecera, evasión de obstáculos y búsqueda de objetos específicos, requeridas para los propósitos de esta tesis.

Los experimentos finales de este prototipo se presentarán en el capítulo de Resultados, sus conductas individuales y compuestas se describirán en la siguiente sección concerniente al Control.

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS67

3.4.1. Control

En esta sección se presenta la arquitectura de control empleada por el prototipo de robot acuático (prototipo 3), así como sus características de percepción, acciones simples y comportamientos.

3.4.2. Capacidades y comportamientos del sistema

En este apartado, se describen cada una de las capacidades y comportamientos que conforman el sistema.

3.4.2.1. Capacidades de percepción

La percepción del ambiente está limitada a las capacidades de sus sensores, los cuales proporcionan información pertinente del ambiente que puede ser empleada para tomar decisiones.

Las capacidades de percepción del robot acuático propuesto en la presente tesis son:

- Detección de colisiones del robot con algún obstáculo.
- Detección de un color específico.

La percepción le permite al robot:

- Saber cuándo y en qué zona de su cuerpo ha colisionado, de tal forma que pueda evadir el objeto colisionado.
- Reconocer si se encuentra sobre la marca o no.

3.4.2.2. Capacidades de acción simples(Ca)

Las capacidades de acción simples (Ca) del robot, son aquellos comandos directos a los actuadores del robot. El robot acuático propuesto en esta tesis es capaz de realizar siete acciones simples, las cuales se describen a continuación.

1. **avanzar:** Envía ordenes a los motores DC para accionar las hélices correspondientes y permite que el robot avance hacia adelante durante un tiempo t específico.
2. **girar:** Envía órdenes a los motores DC para que el robot gire hacia algún lado en particular por un tiempo t específico. La dirección del giro depende de los parámetros recibidos.
3. **detenerse:** Detiene por completo sus tareas, i.e. apaga sus motores, no sensa, no se mueve, etc.

4. **abrir válvula:** Envía la orden al servo-motor uno para que se abra la válvula.
5. **cerrar válvula:** Envía la orden al servo-motor uno para que se cierre la válvula.
6. **disparar tanque:** Envía la orden al servo-motor dos para disparar el tanque de aire comprimido.
7. **finalizar disparar tanque:** Envía la orden al servo-motor dos para dejar de disparar el tanque de aire comprimido.

3.4.2.3. Comportamientos (Co)

A continuación presentamos los comportamientos divididos en conductas básicas o comportamientos básicos (CoB) y comportamientos compuestos o complejos (CoC). Los comportamientos se acompañan de sus respectivos autómatas de control. Recordemos que un autómata es un conjunto de estados finitos, unidos por transiciones que indican las condiciones que se deben cumplir para pasar de un estado a otro. En el caso de los autómatas que representan la actuación de un robot, los estados son los comportamientos del robot y las transiciones equivalen a condiciones que se verifican por medio de la percepción del robot. En los autómatas siguientes, la transición ε indica el paso libre de un estado a otro, y en los estados con líneas punteadas se indica una instrucción que, sin ser una capacidad o comportamiento, es indispensable para la comprensión del proceso.

- **Comportamientos básicos (CoB):** Los comportamientos básicos son conductas que el robot puede realizar a partir de las capacidades de acción simples **Ca** y de percepción.

A continuación se describen los comportamientos básicos que el prototipo de robot acuático puede realizar. Los tiempos mencionados serán definidos en el capítulo 4.

1. **sumergirse:** El robot abre la válvula de la "campana" para permitir que el aire que se encuentre dentro de ella escape, y espera con la válvula abierta durante un tiempo t , posteriormente, el robot cierra la válvula (figura 3.15).
2. **emerger:** El robot dispara el tanque de aire comprimido durante un tiempo t_2 , posteriormente, deja de disparar el tanque de aire comprimido (figura 3.16).
3. **evadir obstáculos:** Cuando el robot detecta un obstáculo o percibe una colisión con alguno de sus sensores de contacto, realiza un giro aleatorio hacia la derecha o hacia la izquierda de 90° aproximadamente (figura 3.17).

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS69

4. **cambiar de dirección:** Sólo si el robot no ha encontrado la marca, podrá cambiar de dirección girando hacia la izquierda 180° aproximadamente, posteriormente avanzará hacia adelante por un tiempo t_5 específico (figura 3.18).
5. **grabar color:** El robot realiza diez lecturas de la cámara, las promedia, y guarda el valor obtenido en registros de la cámara. Con esto, el robot inicializa a la cámara para indicarle que deberá detectar el color de la marca que acaba de almacenar (figura 3.19), i.e. en el comportamiento básico **muestrear imágenes**.
6. **muestrear imágenes:** El robot realiza seis lecturas de la cámara y las promedia, si el promedio es igual a cero, equivale a que no encontró el color deseado, por tanto se actualiza el valor de una variable interna llamada *marca* con el valor de *no encontrada*; de lo contrario, si el promedio es diferente de cero, i.e. detectó el color de la marca, entonces el valor de la variable *marca* será igual a *encontrada* (figura 3.20).
7. **explorar balístico:** El robot avanza hacia adelante siempre y cuando no se active ninguno de sus sensores de contacto (durante un tiempo t_6). De lo contrario, se detiene (figura 3.21).

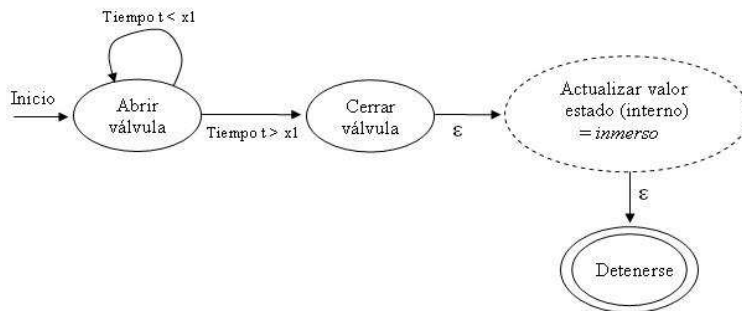


Figura 3.15: Autómata del comportamiento básico **sumergirse**. $x1$ es el límite del tiempo t durante el cual se mantendrá abierta la válvula. El estado con línea punteada indica una instrucción que, sin ser una capacidad, es indispensable para la comprensión del proceso.

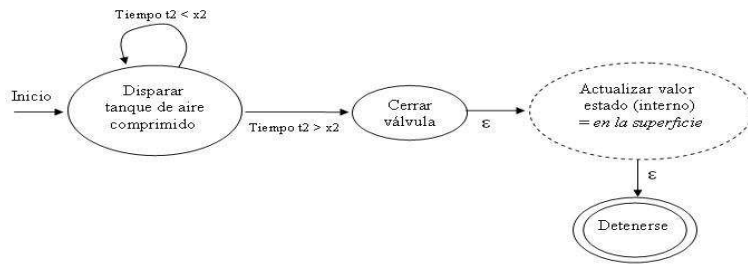


Figura 3.16: Autómata del comportamiento básico **emerger**. x_2 es el límite del tiempo t_2 durante el cual se disparará el tanque de aire comprimido.

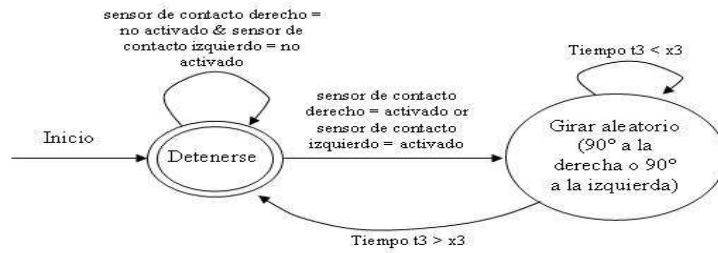


Figura 3.17: Autómata del comportamiento básico **evadir obstáculos**. En caso de que se activen ambos sensores de contacto "simultáneamente", el robot acuático gira hacia la derecha. x_3 es el límite del tiempo t_3 durante el cual se activarán los motores del robot para girar.

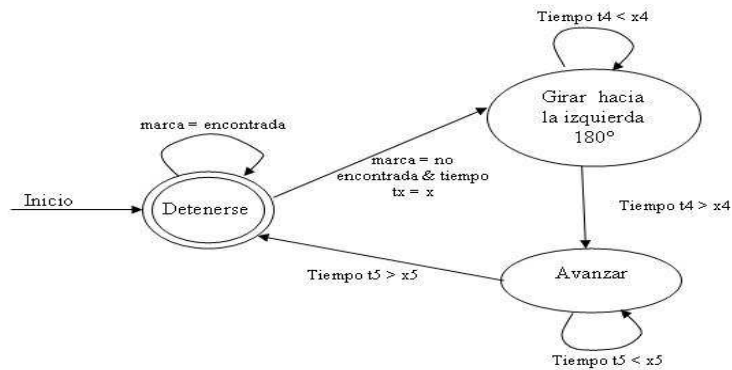


Figura 3.18: Autómata del comportamiento básico **cambiar de dirección**. x_4 es el límite del tiempo t_4 durante el cual se activan los motores para hacer girar al robot hacia la izquierda 180° aproximadamente, x_5 es el límite del tiempo t_5 durante el cual el robot avanza hacia adelante.

3.4. PROTOTIPO 3: VEHÍCULO SUBMARINO ORIENTADO A TAREAS71

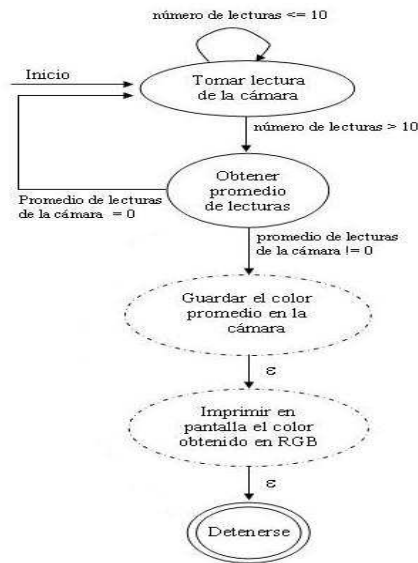


Figura 3.19: Autómata del comportamiento básico grabar color. Las transiciones ϵ indican el paso libre de un estado a otro.

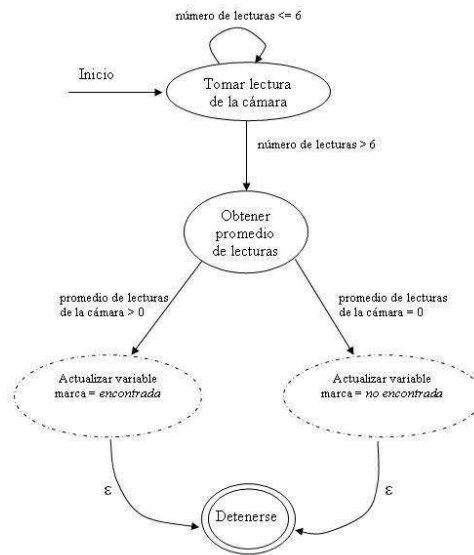


Figura 3.20: Autómata del comportamiento básico muestrear imágenes. En líneas punteadas se indicó una instrucción que, sin ser un comportamiento, es indispensable para la comprensión del proceso.

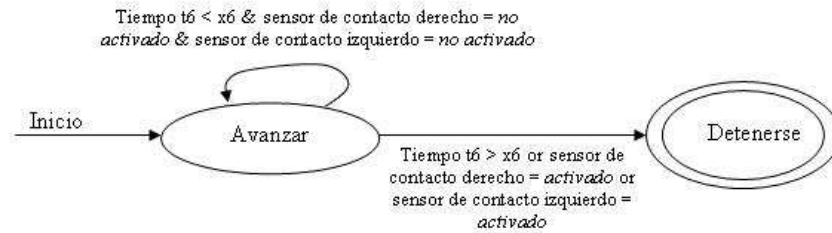


Figura 3.21: Autómata del comportamiento básico **explorar balístico**. x_6 es el límite del tiempo t_6 durante el cual el robot avanza hacia adelante.

- **Comportamientos compuestos (CoC):** Los comportamientos compuestos son conductas que el robot puede realizar empleando capacidades de percepción, de acción simples **Ca**, y comportamientos básicos **CoB**. A continuación se describen los comportamientos compuestos para el prototipo de robot acuático.

1. **dar resultado:** Hay cuatro tipos de resultados posibles, tales que indican si el robot encontró la marca o no.

- Cuando el robot detecta la marca y éste se encuentra en la superficie, avisa que encontró la marca con un letrero y se queda estático en su posición, ya que esto indica a simple vista que encontró la marca, y que dicha marca se encuentra en el fondo y en la posición en la que el robot se encuentra aproximadamente. En caso de que el robot se encuentre inmerso cuando detecta la marca, deberá emerger para dar el resultado, tal como se indicó anteriormente.
- Cuando el robot no detecta la marca y este se encuentra en la superficie, gira hacia la derecha siete veces, indicando con el giro que no encontró la marca, posteriormente, avisa que no encontró la marca con un letrero. En el caso cuando el robot se encuentra inmerso y no detecta la marca, el robot deberá emerger para posteriormente, indicar que no encontró la marca ejecutando el proceso antes mencionado, i.e. girar siete veces hacia la derecha, etc.

Estos dos últimos casos en los que el robot no detecta la marca, podrán ejecutarse siempre y cuando haya expirado un tiempo máximo de exploración, e.g. después de 3,30 *min*.

Las capacidades de acción simples y los comportamientos básicos que integran el comportamiento compuesto **dar resultado** son **girar**, **emerger** y **detenerse** (figura 3.22).

2. **explorar:** El robot revisa si la marca se encuentra abajo de él. Sino, alterna entre **explorar balístico**, **muestrear imágenes**, **evadir**

obstáculos, cambiar de dirección, etc., hasta que el robot detecte la marca o hasta que el tiempo máximo de ejecución expire. Las acciones simples y comportamientos básicos que integran el comportamiento explorar son abrir válvula, detenerse, grabar color, explorar balístico, muestrear imágenes, evadir obstáculos, cambiar de dirección y sumergirse (figura 3.23).

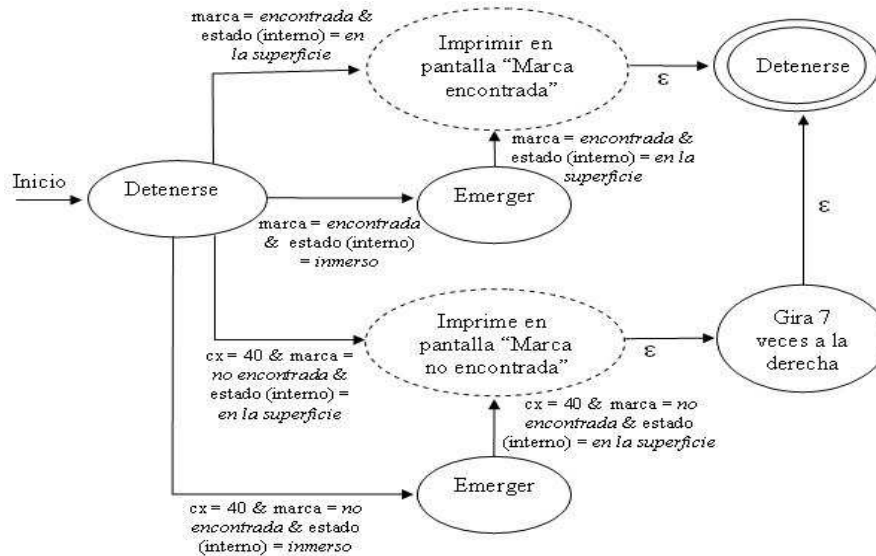


Figura 3.22: Autómata del comportamiento compuesto dar resultado. El contador cx indica el número de veces que el robot ha buscado la marca, si su valor es igual a 40, el robot indicará que no encontró la marca.

3.5. Recapitulativo

En este capítulo se presentó el análisis, diseño y construcción de diversos prototipos, los cuales permitieron obtener con base en la experimentación, la versión final del prototipo desarrollado en esta tesis, i.e. el prototipo 3.

El Prototipo 1 (c.f. sección 3.2), también llamado vehículo acuático básico, es un prototipo capaz de desplazarse en la superficie del agua y de detectar obstáculos. Fue construido para obtener una idea de lo que implica trabajar en un medio acuático. Además, permitió empezar a establecer el tipo de materiales necesarios para la construcción de un vehículo submarino, a partir de sus deficiencias.

Durante el diseño del prototipo 2 en sus versiones 1.0, 1.1, 1.2 y 2.0 (c.f. sección 3.3), se probaron diferentes ideas con el objetivo en común de lograr que

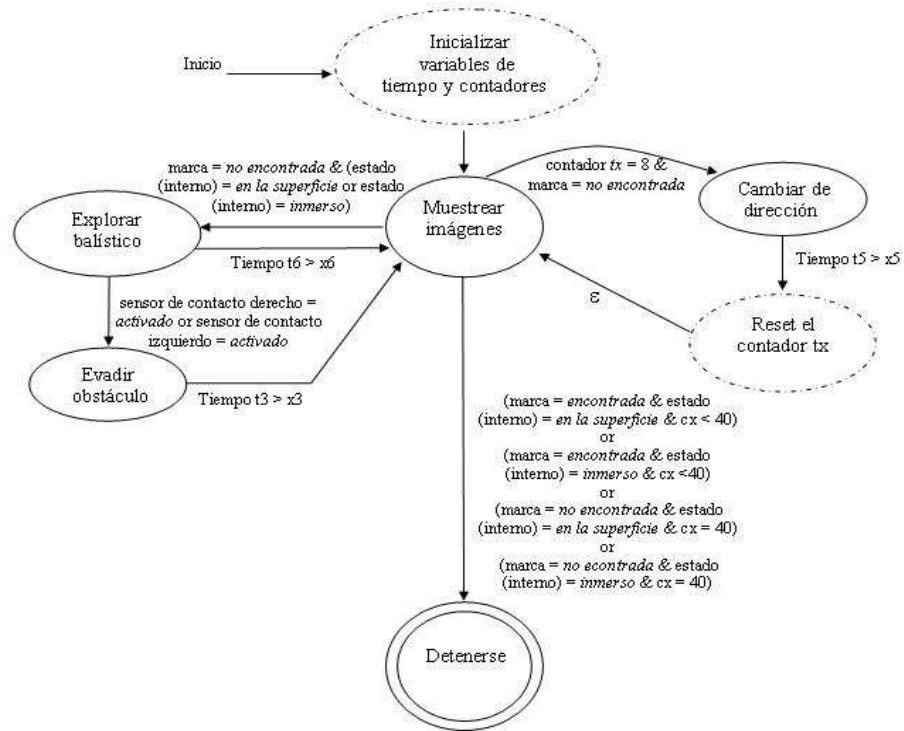


Figura 3.23: Autómata del comportamiento compuesto **explorar**. El contador cx lleva la cuenta del número de veces que el robot ha buscado la marca, y éste sigue buscando mientras el valor de cx sea menor a 40. El contador tx le indica al robot cuándo cambiar de dirección.

el prototipo final fuera capaz de sumergirse, de emerger, y de desplazarse tanto en la superficie como inmerso en el agua.

Hasta la versión 1.2 del Prototipo 2, se trató de construir un vehículo capaz de mantenerse sumergido en el agua a una profundidad de 20 *cm*, lamentablemente no se logró el objetivo, pues se concluyó con base en la experimentación, que al menos para aguas poco profundas, del orden de 30 *cm* de profundidad, la más mínima cantidad de peso extra en el vehículo, e.g. lastres internos, lastres externos o agua en la campana, hacen que el prototipo emerja o se hunda sin lograr que el robot mantenga una profundidad entre el fondo del ambiente y la superficie del mismo.

En la versión 2.0 del Prototipo 2 (c.f. sección 3.3.4), se logró construir un prototipo de vehículo submarino con capacidades de inmersión, emersión y desplazamiento tanto en la superficie como en el fondo del ambiente. Se resolvió el

problema del equilibrio, pues fue posible ordenar adecuadamente los elementos, e.g. caja *A*, caja *B*, campana, tanque de aire comprimido, motores, etc. En esta versión se decidió, que la tarea de inmersión tuviera como resultado que el prototipo descendiera hasta el fondo del ambiente, en lugar de quedarse flotando a 20 *cm* de profundidad como se deseaba originalmente. Debido al material empleado en las cajas *A* y *B*, i.e. plástico flexible, el prototipo presentó problemas de fugas de agua.

El prototipo 3 (c.f. sección 3.4), se basó en el prototipo 2 v2.0. Su estructura física es prácticamente la misma, la principal diferencia radica en que para la construcción de este prototipo se empleó acrílico, lo cual permitió que este prototipo fuera totalmente a prueba de agua. Debido a que su desempeño fue satisfactorio al realizar las tareas de inmersión, emersión, desplazamiento, etc., fue elegido para ser el prototipo final de esta tesis.

Finalmente, se presentó la arquitectura de control empleada por el robot acuático, i.e. Prototipo 3, así como sus capacidades de percepción, de acción simples, y comportamientos básicos y compuestos (c.f. sección 3.4.1).

Capítulo 4

Experimentos y resultados

En este capítulo se presentan experimentos, de los comportamientos básicos del robot, así como de los comportamientos compuestos, todos ellos realizados de manera independiente. Finalmente, se realizó un experimento general en el que se englobó el uso de todos los comportamientos antes mencionados.

Se utilizaron marcas de dimensiones considerables, las cuales se describirán posteriormente. Dichas marcas se eligieron de colores característicos que contrastaran con el ambiente, pues como la pecera era transparente, el fondo correspondía al piso en el estaba colocada la pecera, i.e. diferentes tonos de color café. Los colores elegidos para las marcas empleadas en los experimentos permitieron, hasta cierto punto, que la cámara distinguiera sin dificultades entre dichas marcas y el fondo de la pecera.

Cabe mencionar que la lente de la CMUcam2+© es de 1,00 *cm* de diámetro aproximadamente. La cámara se colocó viendo hacia el fondo de la pecera, por tanto, su rango de visibilidad es limitado. Por ello, si se elegían marcas de dimensiones pequeñas, la probabilidad de que el robot encontrara alguna de ellas sería mínima, por lo cual se eligieron marcas medianas de dimensiones descritas en la descripción del ambiente (c.f. sección 4.1.1), con las cuales fue posible probar el funcionamiento de los comportamientos tanto básicos como compuestos del robot.

Para cada experimento, se reportan dos pruebas elegidas de un gran número de pruebas realizadas en esta parte de la tesis. Cabe mencionar, que aún cuando se reportan parámetros cuantitativos, e.g. tiempos de ejecución, logro de objetivos, etc., parte de los comportamientos contienen descripciones cualitativas. Estas formas de evaluación son estándares conocidos en robótica móvil, una disciplina esencialmente experimental.

Otro tipo de prueba se podría hacer comparando nuestro prototipo con otros diseñados para propósitos similares. Esta última prueba tendría también un carácter cualitativo, pues los diversos prototipos habrán sido diseñados por di-

versos diseñadores.

4.1. Condiciones experimentales

4.1.1. Ambiente

El ambiente consta de una pecera de policarbonato de 150 *cm* de largo \times 100 *cm* de ancho \times 50 *cm* de alto. El nivel de agua utilizado en todos los experimentos fue de 25 *cm* de profundidad.

Para probar el desempeño de algunos de los comportamientos así como el funcionamiento general del robot, se utilizaron tres tipos de marcas planas de plástico, las cuales se colocaron aleatoriamente en el fondo de la pecera, dichas marcas se describen a continuación.

- **Marca 1:** color azul rey de 9 *cm* de ancho \times 22 *cm* de largo.
- **Marca 2:** color naranja de 14,5 *cm* de ancho \times 15,5 *cm* de largo.
- **Marca 3:** color verde claro de 15 *cm* de ancho \times 22 *cm* de largo.

4.1.2. Condiciones externas

Debido a que la pecera se colocó en exterior, es prácticamente imposible, al menos con los dispositivos con los que se cuenta, controlar ciertos factores que afectan el funcionamiento del prototipo, principalmente de la cámara, e.g. la intensidad de luz, pues como ésta debía reconocer cierto tipo de color de acuerdo a la marca que se deseaba buscar, era necesario tomar nuevas lecturas del color constantemente de acuerdo a la intensidad de luz actual, para asegurar que la cámara reconociera en algún momento la marca deseada al pasar el robot sobre ella.

Existen otros factores que no afectan el funcionamiento del prototipo, tales como la temperatura del agua, el viento y la lluvia. Sin embargo, uno de los factores que afectan la visión del prototipo es indiscutiblemente la aparición de bacterias en el agua, tales que generan el cambio de la coloración de la misma, afectando la visibilidad en el agua.

A continuación se describen los experimentos realizados para cada uno de los comportamientos básicos y compuestos empleados por el prototipo final.

4.2. Comportamientos básicos

4.2.1. Sumergirse

4.2.1.1. Objetivo del experimento

Tomando como estado inicial del experimento que el robot se encuentre flotando en la superficie del agua en una posición aleatoria, se desea que el robot se sumerja hasta llegar al fondo de la pecera.

4.2.1.2. Criterios de éxito

Se considera que la inmersión se realizó exitosamente si el robot abre su válvula durante un tiempo t específico, consiguiendo que el robot se sumerja hasta llegar al fondo de la pecera, de lo contrario, se considera que la prueba no fue exitosa.

4.2.1.3. Experimentos

Los experimentos para este comportamiento se enfocaron principalmente en obtener el tiempo t mínimo. Dicho tiempo t corresponde al tiempo que el robot necesita para abrir su válvula y permitir que ésta se llene de agua, logrando que el robot se sumerja al ganar peso. Además, el tiempo t debe ser el tiempo suficiente para permitir que el robot se sumerja hasta llegar al fondo de la pecera de manera equilibrada (c.f. sección 2.1.1), i.e. durante la inmersión el robot debe de conservar su equilibrio principalmente en el eje transversal.

Se hicieron varias pruebas para obtener el tiempo t mínimo que permitiera al robot sumergirse manteniendo su equilibrio. Estas pruebas consistieron en colocar el robot en la superficie del agua en una posición aleatoria.

En la figura 4.1 se presentan dos imágenes que corresponden a la ejecución de uno de los experimentos del comportamiento básico *inmersión*, el cual se consideró como exitoso. La figura 4.1 (a) corresponde al estado inicial del robot al comenzar la prueba, y la figura 4.1 (b) corresponde al estado final del robot al concluir la prueba.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados de dos experimentos seleccionados. En la primera fila se muestra el experimento antes mencionado (figura 4.1), el cual tomó dos segundos en llevarse a cabo. Dicho tiempo se considera no adecuado, pues se observó que el robot se desestabilizó durante el proceso de inmersión, i.e. no conservó el equilibrio en su eje transversal, descendiendo en diagonal hasta llegar al fondo de la pecera. En la tabla 4.1 se registró también un segundo experimento de la misma prueba, éste tomó tres segundos en llevarse a cabo (tiempo $t = 3 \text{ seg}$), en el cual se observó que el equilibrio del robot durante el comportamiento de *inmersión* mejoró. Para experimentos futuros en los que

sea necesario utilizar el comportamiento básico de **inmersión**, se fijará el tiempo $t = 3$ segundos.

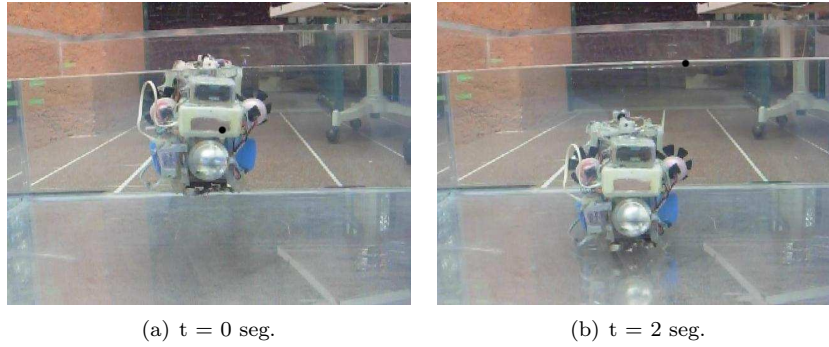


Figura 4.1: Comportamiento básico **sumergirse**, vista frontal del robot, (a) estado inicial del robot, (b) estado final del robot.

No. Experimento	Tiempo Total	Resultado	Observaciones
1	2 seg	Exitoso	El robot se desequilibró en su eje transversal durante la inmersión, $t = 2$ seg, i.e. el aire contenido en la campana fue liberado muy rápido, provocando inestabilidad en el robot.
2	3 seg.	Exitoso	El robot mantuvo su equilibrio durante la inmersión, $t = 3$ seg. La válvula fue abierta con menos fuerza y el aire contenido en la campana fue liberado de forma más lenta que en el experimento 1, provocando que el robot descendiera casi verticalmente.

Cuadro 4.1: Resumen de resultados del comportamiento básico **sumergirse**.

4.2.2. Emerger

4.2.2.1. Objetivo del experimento

Tomando como estado inicial una posición aleatoria del robot en el fondo de la pecera, lograr que el robot emerja hasta que éste llegue a la superficie del agua.

4.2.2.2. Criterios de éxito

Se considera que la emersión se realizó exitosamente si el robot logra tener al final del experimento una parte de su cuerpo fuera de la superficie del agua, i.e. si al terminar la prueba, la línea de flotación divide necesariamente el cuerpo del robot en dos, obra viva y obra muerta (ver apéndice A), sin importar que la obra muerta del robot al final de la prueba sea muy pequeña.

4.2.2.3. Experimentos

Los experimentos realizados consistieron principalmente en calcular el tiempo t_2 necesario para lograr que el robot emergiera, además, el robot debía conservar su equilibrio durante el proceso de emersión. Es por eso, que antes de calcular el tiempo t_2 , fue necesario probar la fuerza que el servo-motor dos (c.f. sección 3.4, figura 3.11 (a)) debía ejercer sobre el disparador del tanque de aire comprimido, para evitar que el disparador fuera presionado con más fuerza de la necesaria, provocando que el aire comprimido saliera con mayor presión hacia la campana, ocasionando que el robot se desequilibrara. Se probaron diferentes posiciones del servo-motor dos para disparar el tanque de aire comprimido con una fuerza moderada, y se encontró una posición adecuada, con la cual fue posible conseguir con cierto margen de error, el equilibrio del robot durante la emersión. La posición encontrada, del orden de 70° aproximadamente, fue empleada para posicionar el servo-motor dos en todos los experimentos. Posteriormente, se probaron diferentes tiempos t_2 de manera experimental, que permitieran al robot emerger y mantenerse equilibrado durante la emersión.

Las pruebas consistieron en colocar el robot en el fondo de la pecera en posiciones aleatorias, posteriormente, el robot debía emerger al llenar de aire comprimido su campana.

En la figura 4.2 se muestra una secuencia de imágenes que corresponden a uno de los experimentos realizados del comportamiento básico **emerger**. La figura 4.2 (a) representa el estado inicial del robot al inicio de la prueba, la figura 4.2 (b) corresponde a un paso intermedio entre los estados inicial y final del experimento, en esta figura puede apreciarse el equilibrio del robot durante la emersión, y la figura 4.2 (c) corresponde al estado final del robot al terminar el comportamiento **emerger**.

Cabe señalar que en el estado final del presente experimento, mostrado en la figura 4.2 (c), el robot se encuentra desequilibrado debido a que el tanque de aire comprimido fue disparado por más tiempo del necesario durante la emersión. En la tabla 4.2, se especifica el tiempo total que le toma al robot equilibrarse principalmente en su eje transversal (c.f equilibrio de un submarino, sección 2.1.1) después de cada experimento de emersión registrado.

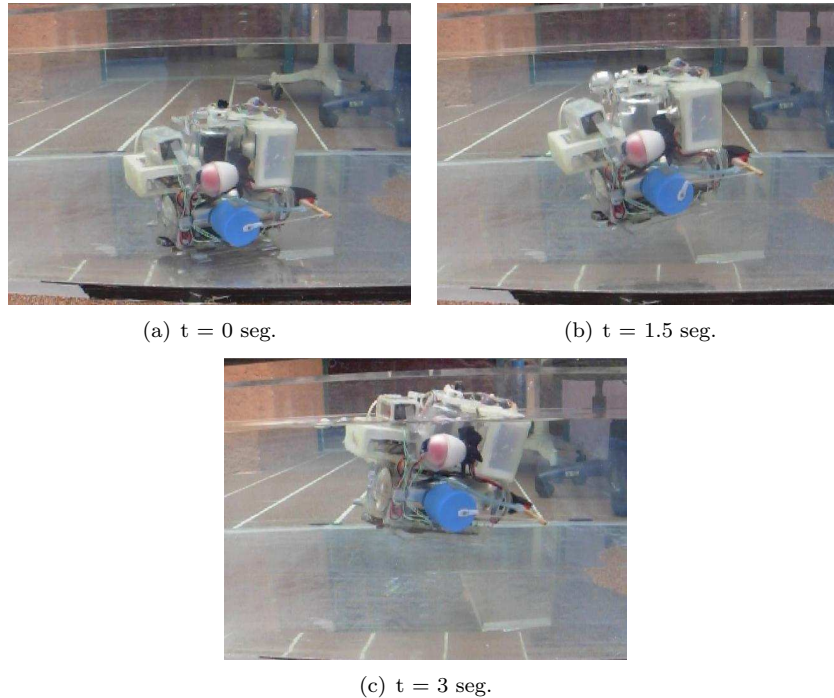


Figura 4.2: Comportamiento básico **emerge**, (a) estado inicial del robot al comenzar la prueba, (b) estado intermedio del experimento, y (c) estado final del robot al concluir la prueba.

En la tabla 4.2 se presentan dos experimentos realizados en las mismas condiciones. Se registran los tiempos en los que se realizó el comportamiento **emerge** así como algunas observaciones de cada experimento. El primer experimento registrado corresponde al de la figura 4.2.

No. Experimento	Tiempo Total	Resultado	Observaciones
1	5 seg.	Exitoso	El robot emergió en 3 <i>seg</i> conservando hasta cierto punto el equilibrio en el eje transversal, y tardó 2 <i>seg</i> para estabilizarse por completo, $t_2 = 3 \text{ seg}$, debido a que el robot continuó disparando aire comprimido cuando ya se encontraba en la superficie.
2	6 seg.	Exitoso	El robot emergió en 3 <i>seg</i> manteniendo su equilibrio, pero al emerger continuó disparando aire comprimido a la campana durante 1 <i>seg</i> aproximadamente, por lo cual se desestabilizó y tardó 2 <i>seg</i> más en estabilizarse por completo, $t_2 = 4 \text{ seg}$.

Cuadro 4.2: Resumen de resultados del comportamiento básico **emerger**.

4.2.3. Evadir obstáculos

4.2.3.1. Objetivo del experimento

Sin importar la posición del robot ni su estado, i.e. inmerso o en la superficie, si se activa alguno de sus sensores de contacto, el robot deberá girar hacia la izquierda o hacia la derecha. Como el giro se hace de forma aleatoria, hay dos opciones posibles, girar hacia la derecha 90° o girar hacia la izquierda 90° , ambos giros son aproximados.

4.2.3.2. Criterios de éxito

Se considera que el comportamiento básico **evadir obstáculos** se realizó exitosamente, si cuando el robot choca con algún obstáculo, se activa alguno de sus sensores de contacto provocando que el robot gire aleatoriamente hacia la derecha o hacia la izquierda 90° aproximadamente, de lo contrario la prueba se considera no exitosa.

4.2.3.3. Experimentos

Los experimentos realizados para este comportamiento se enfocaron principalmente en obtener el tiempo de giro necesario t_3 , para hacer que el robot rote sobre su eje 90° aproximadamente.

El comportamiento básico **evadir obstáculos** se probó con *estado interno* igual a *en la superficie* e *inmerso*. Los resultados de las pruebas para ambos estados se muestran en la tabla 4.3.

En los experimentos realizados para este comportamiento, se colocó el robot en una posición aleatoria de la pecera, e.g. en la superficie o en el fondo de la misma. Posteriormente, el robot debía avanzar hacia adelante hasta que alguno de sus sensores de contacto se activara indicando que había detectado un obstáculo. Finalmente, el robot debía girar aleatoriamente hacia alguno de sus lados.

En la figura 4.3 se muestra uno de los experimentos del comportamiento básico **evadir obstáculos**, en la figura 4.3 (a) se muestra el estado inicial del robot a una distancia aproximada de 3 cm de una de las paredes de la pecera, posteriormente en la figura 4.3 (b) se observa cómo el sensor de contacto derecho del robot se activa al chocar con la pared de la pecera, en las figuras 4.3 (c) y (d) se muestra cómo gira el robot hacia la derecha un poco más de 90°, en la figura 4.3 (e) se observa el estado final del robot al concluir la prueba.

En la tabla 4.3 se resumen los resultados de dos de los experimentos del comportamiento **evadir obstáculos**. En cada experimento se especifica el tiempo total que le tomó al robot ejecutar el comportamiento, así como el estado del robot al inicio la prueba. Cabe mencionar que el tiempo total registrado en la siguiente tabla para cada experimento, comienza a contar desde que se activa alguno de los sensores de contacto del robot hasta que éste se detiene por completo al terminar de ejecutar el comportamiento, i.e. cuando el robot apaga sus motores y deja de girar en el agua por el efecto de la inercia.

Puede observarse en la tabla 4.3 que el tiempo $t3$ es el mismo en los dos experimentos registrados, pero se obtiene un mejor resultado en el segundo experimento, pues la densidad (c.f. densidad, sección 2.1.1) del agua así lo permitió.

No. Experimento	Estado del robot	Tiempo Total	Resultado	Observaciones
1	En la superficie	6 seg.	Éxito	El robot giró más de 90° respecto a su posición inicial (figura 4.3 (e)), debido al tiempo $t3 = 3 \text{ seg}$.
2	Inmerso	5 seg.	Éxito	El robot giro 90° aproximadamente debido a la densidad del agua, pues ésta opuso resistencia impidiendo que el robot se pasara de los 90°, $t3 = 3 \text{ seg}$.

Cuadro 4.3: Resumen de resultados del comportamiento básico **evadir obstáculos**.

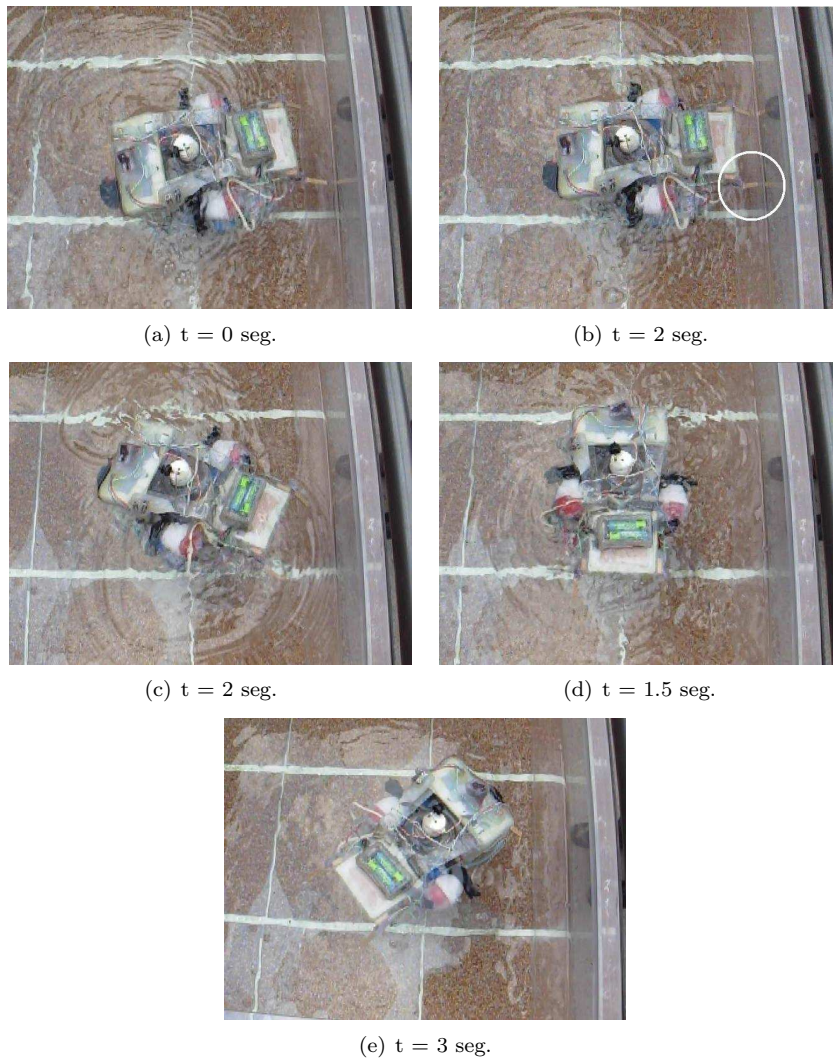


Figura 4.3: Comportamiento básico evadir obstáculos, vista superior. (a) Corresponde al estado inicial del robot al comenzar la prueba, (b) se observa como el sensor de contacto derecho del robot, marcado con un círculo, es activado por una de las paredes de la pecera, (c) y (d) muestran el giro hacia la derecha de un poco más de 90° , (e) corresponde al estado final del robot al final de la prueba.

4.2.4. Cambiar de dirección

4.2.4.1. Objetivo del experimento

Que el robot gire hacia la izquierda 180° aproximadamente si la marca no ha sido detectada, posteriormente, el robot deberá avanzar hacia adelante al

menos 15 *cm*, finalmente, el robot deberá detenerse.

4.2.4.2. Criterios de éxito

Experimentalmente se considera una prueba como exitosa, si al cabo de un tiempo tx definido por el diseñador, el robot gira 180° aproximadamente hacia la izquierda y posteriormente, avanza hacia adelante una distancia mayor o igual a 15 *cm*, de lo contrario se considera que la prueba no fue exitosa.

Se estableció que la distancia mínima posible para avanzar fuera de 15 *cm*, ya que puede darse el caso en el que la trayectoria del robot se convierta en un ciclo debido a los giros aleatorios llevados a cabo en otros comportamientos, lo cual representa un problema si lo que se desea es abarcar la mayor cantidad de área posible de la superficie de la pecera. Por tanto, si hacemos que el robot avance hacia adelante al menos 15 *cm*, aunque la trayectoria del robot sea cíclica, éste tendrá más posibilidades de recorrer superficies de la pecera por las que no había pasado con anterioridad.

4.2.4.3. Experimentos

Durante los experimentos realizados para este comportamiento básico **cam-
biar de dirección**, se calcularon experimentalmente los tiempos $t4$ y $t5$ necesarios para permitir que el robot girara 180° aproximadamente y avanzara una distancia de al menos 15 *cm* hacia adelante.

Antes de iniciar las pruebas, se asignó vía software un tiempo tx igual a un número aleatorio fijo de un orden mayor o igual a 10 *seg* y menor a 20 *seg*. Los experimentos consistieron en colocar el robot en una posición aleatoria, i.e. en la superficie o en el fondo de la pecera, posteriormente, el robot debía mantenerse avanzando hacia delante hasta que el tiempo tx expirara, lo cual producía la ejecución del comportamiento básico **cam-
biar de dirección**.

En la figura 4.4 se muestra una secuencia de imágenes que corresponden a uno de los experimentos de este comportamiento. Para este experimento, se asignó el tiempo $tx = 12$ *seg*, por tanto el robot se mantuvo avanzando hacia adelante durante ese tiempo. Cuando el tiempo tx expiró y el valor de la variable interna *marca* era igual a *no encontrada*, el robot se encontraba orientado como lo indica la figura 4.4 (a), las figuras 4.4 (b) y (c) muestran el giro del robot hacia la izquierda durante un tiempo $t4$ (obtenido experimentalmente), lo cual provocó que el robot girara aproximadamente 180° , en la figura 4.4 (d) se observa el estado final del robot al concluir la prueba, este indica que el robot avanzó hacia delante durante un tiempo $t5$ obtenido experimentalmente para avanzar 15 *cm* aproximadamente.

La tabla 4.4 muestra dos de los experimentos realizados para este comportamiento, el primero corresponde al experimento de la figura 4.4, en el cual el

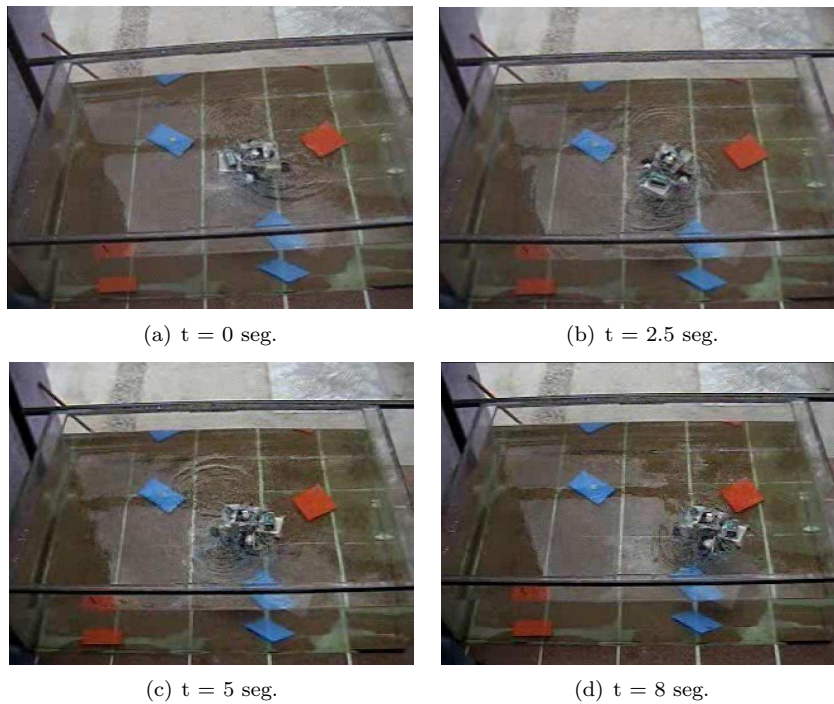


Figura 4.4: Comportamiento básico **cambiar de dirección**, (a) estado inicial del robot al comenzar el comportamiento, (b) estado intermedio del robot antes de alcanzar los 180° , (c) posición del robot al final del giro de 180° aproximadamente, (d) estado final del robot al concluir el comportamiento, en esta figura se observa un desplazamiento hacia adelante del robot durante 3 *seg* respecto a su posición en la figura (c).

robot ejecutó el comportamiento **cambiar de dirección** estando en la superficie del agua. En el segundo experimento, el robot fue colocado en el fondo de la pecera, i.e. inmerso. La tabla 4.4 también proporciona los tiempos durante los que el robot ejecutó el comportamiento, así como algunas observaciones respecto a dichos experimentos.

No. Experimento	Estado del robot	Tiempo Total	Observaciones
1	En la superficie	8 seg.	El robot giró 180° aproximadamente durante 5 <i>seg</i> , y avanzó 15 <i>cm</i> aproximadamente durante 3 <i>seg</i> , por lo cual la prueba se consideró exitosa. Los tiempos empleados en el experimento son: $t_4 = 5 \text{ seg}$ y $t_5 = 3 \text{ seg}$.
2	Inmerso	9 seg.	El robot giró 180° aproximadamente durante 5 <i>seg</i> , y avanzó 11 <i>cm</i> aproximadamente durante 4 <i>seg</i> debido a la densidad del agua, por lo cual la prueba se consideró no exitosa. Para pruebas posteriores los tiempos serán $t_4 = 5 \text{ seg}$ y $t_5 > 5 \text{ seg}$ en inmersión.

Cuadro 4.4: Resumen de resultados del comportamiento básico cambiar de dirección.

4.2.5. Grabar color

4.2.5.1. Objetivo del experimento

Que el robot grabe con su cámara el color de la marca que se le presenta al frente a una distancia de 5 *cm* aproximadamente.

4.2.5.2. Criterios de éxito

Se considera que la prueba es exitosa si el robot obtiene el color equivalente al de la marca situada al frente de la lente de la cámara, y además lo guarda en la memoria de la cámara, de lo contrario, se considera que la prueba no fue exitosa.

4.2.5.3. Experimentos

Para llevar a cabo este experimento, se colocaron diferentes colores de marcas al frente de la cámara del robot, posteriormente, se ejecutó el comportamiento básico **grabar color**. Una vez que el comportamiento es ejecutado, este imprime en la pantalla de la tarjeta controladora Handyboard© el valor en (R, G, B) del color previamente grabado en la cámara. Para comprobar que el valor que el robot había guardado en la cámara era equivalente al color real de la marca, se caracterizaron previamente los rangos de los colores de las marcas utilizadas. Pudo comprobarse que el color obtenido por la cámara en condiciones de luz normales, i.e. en el día, era equivalente al color real de la marca en cuestión. Se observó que el robot obtenía una medición del color más parecida al color real de la marca cuando la cantidad de luz era mayor, i.e. cuando el sol alumbraba más y cuando se probó de noche alumbrando la pecera con dos lámparas de

22 *watts* de luz blanca.

En la figura 4.5 se muestra la forma en la que se coloca la marca bajo la cámara del robot, para que éste reconozca el color.

Para que el robot sea capaz de obtener una mejor medición del color, la marca se movía bajo la lente, i.e. se inclinaba en diferentes direcciones para que el robot obtuviera el promedio de todas sus lecturas, consiguiendo así obtener un color equivalente al de la marca.

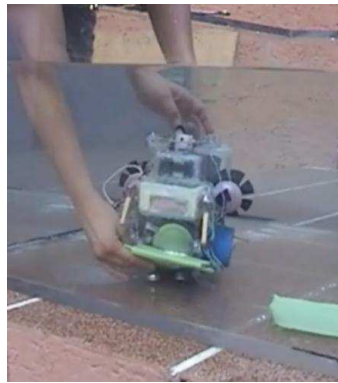


Figura 4.5: Comportamiento básico **grabar color**. En la figura se ilustra la forma en la que debe colocarse la marca debajo de la cámara del robot, para que éste reconozca el color de la misma.

4.2.6. Muestrear imágenes

Este es un caso especial de los comportamientos básicos propuestos para el robot acuático, ya que dicho comportamiento no utiliza ninguna de las capacidades de acción simples (Ca) propuestas anteriormente, únicamente utiliza una de las capacidades de percepción, i.e. detección de un color específico. A diferencia de los demás comportamientos, este se lleva a cabo totalmente de manera interna, y la única acción que realiza al concluir dicho comportamiento, es actualizar el valor de una variable llamada *marca*, la cual indica si detectó o no el color previamente guardado en el comportamiento **guardar color**.

Para este comportamiento no se realizaron experimentos en particular, pues dicho comportamiento no produce un resultado visible al usuario que indique la ocurrencia del mismo. Por eso, dicho comportamiento será evaluado como parte de un comportamiento compuesto (CoC) en la siguiente sección.

4.2.7. Explorar balístico

4.2.7.1. Objetivo del experimento

Lograr que el robot avance hacia delante durante un tiempo t_6 específico, posteriormente, el robot se detendrá.

4.2.7.2. Criterios de éxito

Los criterios de éxito para este comportamiento son los siguientes:

Criterio uno: si la distancia mínima que avanzó el robot fue de 5 cm, y este se desplazó en línea recta hacia adelante con un ángulo en su eje vertical entre $\pm 30^\circ$, entonces la prueba se considera exitosa.

Criterio dos: si la distancia que avanzó el robot es menor a 5 cm o el ángulo en su eje vertical durante el comportamiento de **explorar balístico** estuvo fuera del rango permitido de $\pm 30^\circ$, entonces la prueba se considera como no exitosa.

Errores de este tipo suelen ocurrir cuando se da un tiempo t_6 muy pequeño, lo cual provoca que el robot no pueda avanzar la distancia mínima de 5 cm, o cuando las baterías comienzan a descargarse, ya que no alimentan con suficiente potencia a los motores y por tanto alguno tiende en ocasiones a rotar con menor fuerza, provocando que el robot gire en lugar de avanzar.

4.2.7.3. Experimentos

Los experimentos de este comportamiento se enfocaron principalmente en hacer que el robot avanzara hacia adelante y en calcular el tiempo t_6 antes mencionado, de tal forma que éste fuera suficiente para permitirle al robot avanzar y a la vez conservar su dirección.

Uno de los principales problemas al realizar los experimentos de este comportamiento básico, fue precisamente hacer que el robot avanzara hacia adelante, pues éste tendía a hacer trayectorias circulares al cabo de un tiempo, i.e. el robot siempre giraba hacia un mismo lado debido a que la tarjeta controladora Handyboard© no alimenta a ambos motores con la misma potencia. Fue necesario regular el voltaje que la tarjeta debía mandar a los motores (vía software) para ejecutar el comportamiento, dicho cálculo del voltaje se hizo manualmente, lo cual produjo una mejor trayectoria respecto a las obtenidas anteriormente. Sin embargo, no se resolvió el problema por completo, pues el robot continuó haciendo trayectorias circulares en lugar de lineales.

Aunque no se implementó el uso de algún dispositivo a prueba de agua capaz de contar el número de vueltas que cada hélice realizaba, se cree que la implementación de algún odómetro o algún dispositivo que permita contar el número de vueltas de las hélices, ayudará en gran medida a permitir que el robot corrija

su trayectoria de forma automática.

En la figura 4.6 se presenta uno de los experimentos de este comportamiento básico. En este experimento se tomó como estado inicial, que el robot se encuentre en la superficie del agua, y se tomó el tiempo $t_6 = 10 \text{ seg}$. Como puede observarse en la secuencia de imágenes de la figura 4.6, el robot avanzó haciendo un semicírculo en lugar de avanzar hacia adelante y en línea recta, aún cuando se hicieron las correcciones necesarias en el voltaje que alimenta a los motores.

El tiempo $t_6 = 10 \text{ seg}$ se consideró excesivo para pruebas en las que el robot tiene como estado inicial la superficie del agua, pues como podrá observarse en la tabla 4.5, en el experimento registrado como número uno, el robot avanza 40 *cm* aproximadamente (medido en línea recta desde su posición inicial hasta su posición final), y para efectos de búsqueda de marcas, la distancia avanzada por el robot se considera muy grande. El tiempo t_6 se tomará del segundo experimento registrado en dicha tabla, ya que funciona para los experimentos cuando el robot se encuentra inmerso, por tanto deberá funcionar cuando el robot se encuentre en la superficie, debido a que en inmersión el agua opone más resistencia durante el desplazamiento.

No. Experimento	Estado del robot	Tiempo Total	Resultado	Observaciones
1	En la superficie	10 seg.	Exitoso	El robot avanzó 40 <i>cm</i> aproximadamente. La distancia obtenida corresponde a una ejecución del comportamiento explorar balístico con $t_6 = 10 \text{ seg}$. La prueba se consideró exitosa, pero la distancia avanzada fue excesiva.
2	Inmerso	6 seg.	Exitoso	El robot avanzó 6 <i>cm</i> aproximadamente, la distancia obtenida corresponde a una ejecución del comportamiento con $t_6 = 6 \text{ seg}$. La prueba se considero exitosa.

Cuadro 4.5: Resumen de resultados del comportamiento básico **explorar balístico**.

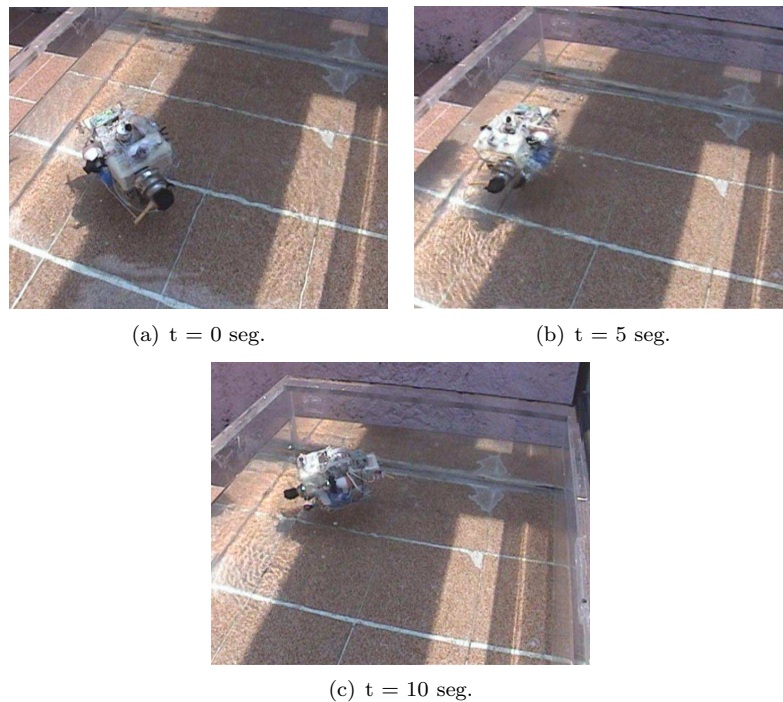


Figura 4.6: Comportamiento básico `explorar balístico`, (a) estado inicial del robot al comenzar el comportamiento, (b) estado intermedio del robot a los 5 *seg* de iniciar el comportamiento, (c) posición del robot al concluir el comportamiento, la distancia total avanzada por el robot al terminar el comportamiento fue de 40 *cm* aproximadamente.

4.3. Comportamientos compuestos

4.3.1. Dar resultado

Este comportamiento compuesto del robot depende del valor de dos variables *marca* y *estado interno* del robot. La variable *marca* toma los valores, *encontrada* o *no encontrada*, y la variable *estado interno* toma los valores de *inmerso* o *en la superficie*. Ambas variables son actualizadas en algunos de los comportamientos básicos del robot, tales como: `sumergirse`, `emerger` y `muestrear imágenes`.

Para probar el funcionamiento de este comportamiento compuesto `dar resultado`, se mostrarán a continuación dos experimentos de los cuatro posibles casos en los que el robot puede dar un resultado (ver el autómata de la figura 3.22, sección 3.4.2.3). Debe tenerse en cuenta que los dos experimentos no documentados, son similares a los que se presentarán a continuación, y únicamente

difieren en el estado interno del robot al iniciar la prueba.

Si el robot se encuentra inmerso, no podrá dar ningún resultado, por tanto, primero deberá emerger en cualquiera de los casos que así lo requieran, como se indica en el autómata de la figura 3.22.

En todos los experimentos realizados para este comportamiento, se ejecutará una vez el comportamiento básico **muestrear imágenes**, con lo cual se actualizará el valor de la variable *marca*, y dicho comportamiento asignará el nuevo valor a la variable dependiendo de si el robot detectó o no la marca.

4.3.1.1. Objetivo del experimento no. 1. Caso en el que el robot detecta la marca estando inmerso

El robot será capaz de indicar que ha encontrado la marca independientemente de si se encuentra inmerso o en la superficie, además deberá mantener su posición sobre la marca detectada.

4.3.1.2. Criterios de éxito

La prueba se considera exitosa si el robot detecta la marca y puede indicarlo a través de la pantalla de la tarjeta controladora Handyboard©. Además, el robot debe conservar su posición sobre la marca detectada, lo cual indica a simple vista, que el robot detectó la marca. De lo contrario, la prueba se considera no exitosa.

4.3.1.3. Experimentos

En el siguiente experimento, el *estado interno* del robot al inicio de la prueba es igual a *inmerso*, y éste se colocó sobre la marca a buscar como lo indica la figura 4.7 (a). Para llevar a cabo el experimento, fue necesario ejecutar una vez el comportamiento básico **muestrear imágenes**, para que éste actualizara el valor de la variable *marca* y asignara el valor de *marca = encontrada*, pues la marca se encontraba debajo del robot. Posteriormente, el robot debía dar el resultado ejecutando el comportamiento compuesto **dar resultado**, pues la marca había sido encontrada. En la figura 4.7 (a) se muestra el estado inicial del robot al comenzar la prueba, en la figura 4.7 (b) se muestra que el robot emergió para dar el resultado, y en la figura 4.7 (c) se muestra el estado final del robot al concluir la prueba, i.e. el robot mantuvo su posición sobre la marca aunque se desestabilizó un poco al emerger.

Todos los experimentos se realizaron de manera similar al caso anterior, incluso los experimentos en los que el *estado interno* del robot al inicio de la prueba es igual a *en la superficie*. Para estos casos, el robot no debía ejecutar el comportamiento básico **emerger** durante la ejecución del comportamiento compuesto **dar resultado**, pues el robot ya se encontraba en la superficie. Por tanto, el robot únicamente conservó su posición actual, indicando que la marca

había sido encontrada y que dicha marca se encontraba debajo de él.

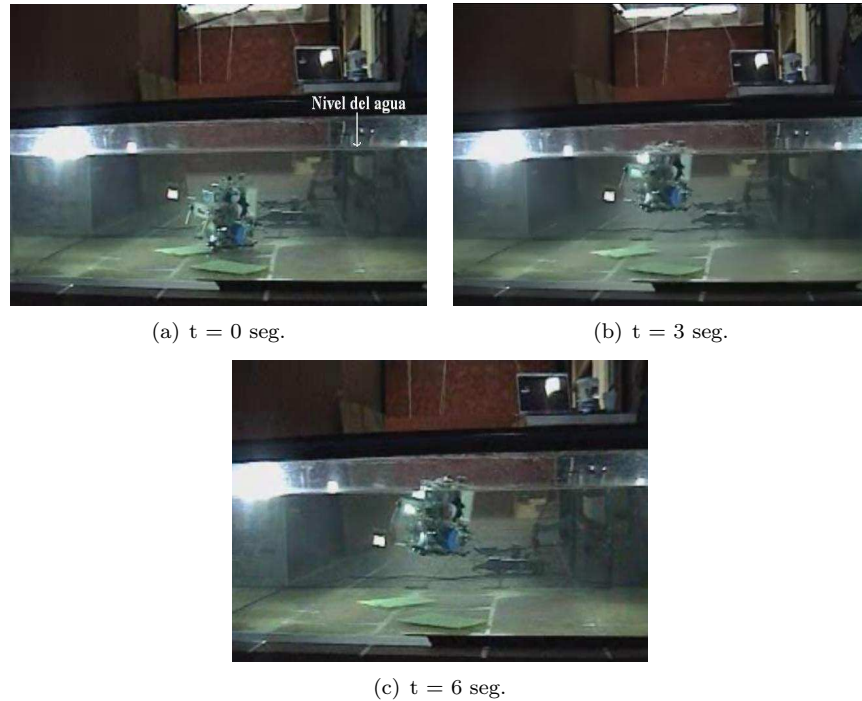


Figura 4.7: Comportamiento compuesto **dar resultado**, caso en el que el robot detecta la marca estando inmerso. (a) Estado inicial del robot al comenzar el comportamiento, (b) robot emergiendo para dar el resultado, y (c) estado final del robot al concluir la prueba.

En la gráfica de la figura 4.8 se muestran las capacidades y los comportamientos llevados a cabo durante el experimento mostrado en la figura 4.7.

En la gráfica 4.8 el eje de las X 's indica el tiempo en segundos durante el cual se ejecutan las capacidades y comportamientos llevados a cabo durante el experimento, y el eje de las Y 's representa las capacidades y comportamientos ejecutados durante el experimento.

La línea de tiempo que aparece en la parte superior de la gráfica, la cual corresponde al comportamiento compuesto **dar resultado**, indica de donde a donde abarca dicho comportamiento, i.e. las capacidades y comportamientos que se encuentran debajo de dicha línea, corresponden a las capacidades y comportamientos ejecutados en el comportamiento compuesto **dar resultado**.

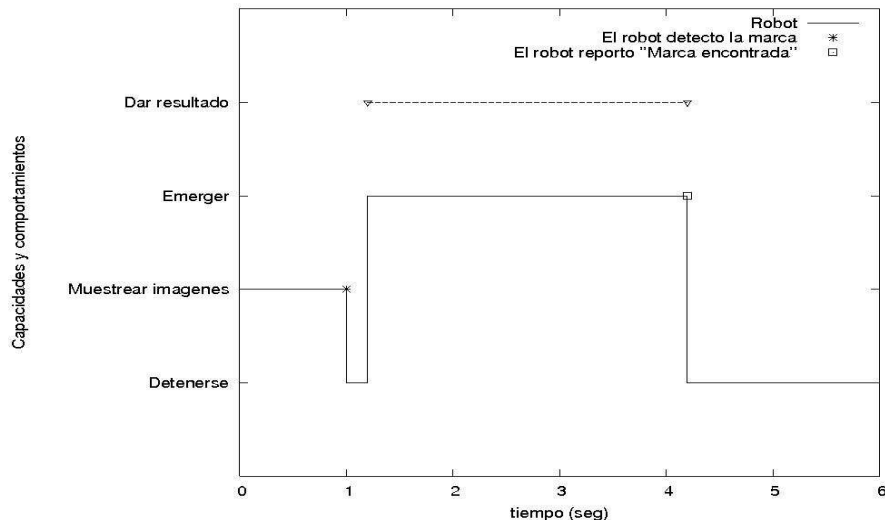


Figura 4.8: Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento no. 1 del comportamiento compuesto **dar resultado**. El comportamiento **dar resultado** termina en el tiempo 4.3 *seg* debido al estimado de tiempo que le toma a la tarjeta controladora imprimir el mensaje en su pantalla, i.e. 0.1 *seg*.

4.3.1.4. Objetivo del experimento no. 2. Caso en el que el robot no encuentra la marca.

El robot deberá indicar con un letrero en su pantalla que no detectó la marca independientemente de su *estado interno*, i.e. en la superficie o inmerso, además deberá girar siete veces hacia su derecha estando en la superficie del agua, lo cual indica a simple vista que el robot no encontró la marca.

4.3.1.5. Criterios de éxito

Si los valores del contador *cx* y de la variable *marca* son 40 y *no encontrada* respectivamente, entonces el robot deberá ejecutar el comportamiento **dar resultado**, el cual consiste en que el robot dé siete vueltas hacia su derecha. Si eso ocurre, se considera que la prueba fue exitosa, de lo contrario la prueba será considerada no exitosa.

4.3.1.6. Experimentos

En el siguiente experimento el *estado interno* del robot fue igual a *en la superficie*, y el robot fue colocado en una posición donde no podía detectar ninguna de las marcas. Se asignó al contador *cx* el valor de 39.

Al principio de la prueba, se ejecutó una vez el comportamiento básico

muestrear imágenes, el cual dejó el valor de la variable *marca* igual a *no encontrada* debido a que el robot fue colocado en una parte de la superficie de la pecera donde no se encontraba ninguna de las marcas deseadas, ejecutando correctamente el comportamiento básico **muestrear imágenes**. Posteriormente, el valor del contador *cx* se incrementó automáticamente en uno, i.e. $cx = 40$, por consiguiente, el robot comenzó a ejecutar el comportamiento compuesto **dar resultado** como lo indica el autómata de la figura 3.22 de la sección 3.4.2.3, i.e. empezó a girar hacia su derecha siete veces indicando que la marca no había sido encontrada.

En la figura 4.9 (a) se muestra el estado inicial del robot, en la figura 4.9 (b) se muestra el estado del robot al finalizar el primer giro hacia la derecha que indica que la marca no fue encontrada, y en la figura 4.9 (c) se observa el estado final del robot al terminar de girar siete veces.

Para los experimentos en los que el *estado interno* del robot al inicio de las pruebas fue igual a *inmerso*, el robot debió emerger para posteriormente dar el resultado, i.e. girar siete veces hacia su derecha.

En la gráfica de la figura 4.10 se muestran las capacidades y los comportamientos llevados a cabo durante el experimento mostrado en la figura 4.9. Como en el caso anterior, la línea que aparece en la parte superior de la gráfica indica el tiempo durante el cual se ejecutó el comportamiento compuesto **dar resultado**. Las capacidades y comportamientos que se encuentran debajo de dicha línea, son los ejecutados internamente por el comportamiento compuesto **dar resultado**.

Es importante señalar, que en el autómata del comportamiento compuesto **dar resultado** de la figura 3.22, se especifica que el robot debe imprimir en la pantalla de la Handyboard un mensaje de "Marca encontrada" y "Marca no encontrada". Esos mensajes pueden ser vistos únicamente si se saca el robot del agua, por tanto no se presentan imágenes de dichos resultados.

En la tabla 4.6 se muestran los resultados de tres experimentos: dos experimentos exitosos del caso en el que el robot detecta la marca, y uno del caso en el que el robot no la detecta. El primer experimento registrado corresponde al de la figura 4.7, y el tercer experimento corresponde al de la figura 4.9. En todos los experimentos, el 0,1 *seg* al final corresponde al tiempo aproximado que tarda la tarjeta en imprimir el mensaje en su pantalla. El comportamiento básico **muestrear imágenes** toma aproximadamente 1 *seg* en ejecutarse.

El número de giros que indican que el robot no detectó la marca (siete), así como los grados alcanzados después de cada giro no son importantes para nosotros, son únicamente representativos, y fueron empleados para permitir al usuario identificar que el robot no había detectado la marca.

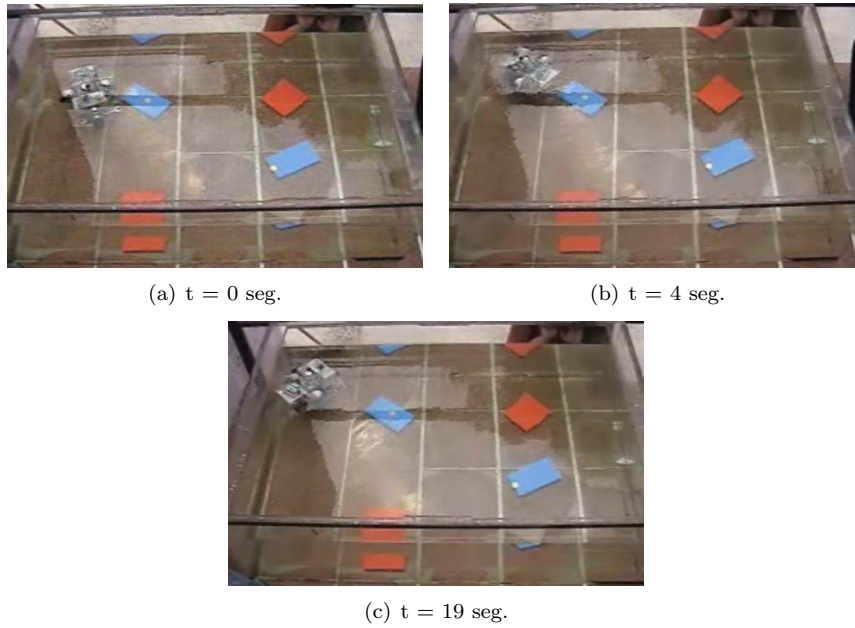


Figura 4.9: Comportamiento básico dar resultado, caso en el que el robot no encuentra la marca estando en la superficie. (a) estado inicial del robot al comenzar el comportamiento, (b) estado del robot en el segundo 4, al terminar de girar por primera vez hacia la derecha, y (c) estado final del robot al concluir el experimento.

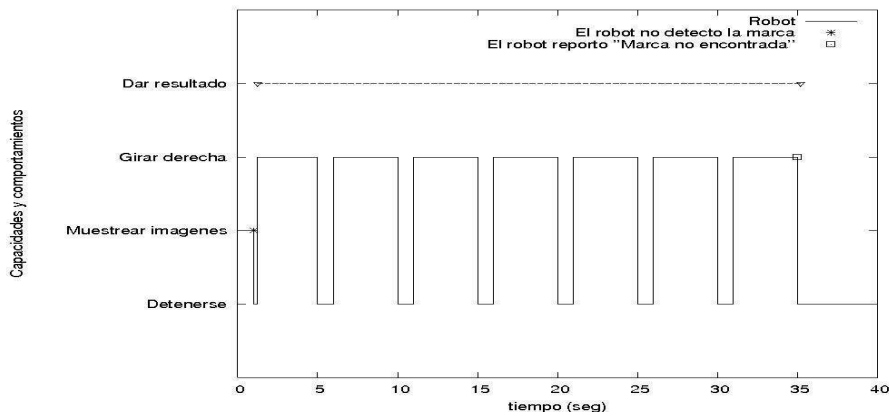


Figura 4.10: Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento no. 2.

No. Experimento	Estado del robot	Tiempo en emerger	Tiempo Total	Observaciones
1	Inmerso	3 seg.	6.3 seg.	El robot ejecutó el comportamiento <code>muestrear imágenes</code> en 1 <i>seg</i> , se detuvo durante 0.2 <i>seg</i> , emergió en 3 <i>seg</i> y tardo 2 <i>seg</i> en estabilizarse por completo después de emerger. El experimento fue exitoso.
2	Inmerso	5 seg.	6.3 seg.	En este experimento se modificó el valor del tiempo t_2 (ver autómata del comportamiento básico <code>emerger</code> , sección 3.4.2.3) y la posición del servo-motor dos para disparar el tanque de aire comprimido, lo cual provocó que el robot emergiera con la mínima cantidad de aire comprimido, i.e. el robot emergió muy lentamente conservando su equilibrio en todo momento, por lo cual no se desestabilizó al emerger. El experimento fue exitoso.
3	Superficie		35.1 seg.	En la gráfica de la figura 4.10 se muestra el comportamiento del robot al dar el resultado de marca no encontrada. Experimento de la figura 4.9, caso en el que el robot no encuentra la marca.

Cuadro 4.6: Resumen de resultados del comportamiento compuesto dar resultado.

4.3.2. Explorar

4.3.2.1. Objetivos del experimento

El robot debe buscar la marca deseada, para esto deberá ejecutar los comportamientos básicos necesarios que le permitan recorrer la pecera hasta encon-

trar la marca del color deseado, i.e. la marca del color igual al grabado en la cámara en el comportamiento básico **grabar color**. Posteriormente, si el robot encontró la marca, deberá ejecutar una parte del comportamiento compuesto **dar resultado** para indicar el éxito de su búsqueda. De lo contrario, si el robot no encontró la marca, deberá ejecutar la otra parte del comportamiento **dar resultado** para indicarlo.

4.3.2.2. Criterios de éxito

Se considera que el experimento fue exitoso si el robot encuentra la marca que posee el color deseado y posteriormente da el resultado. De lo contrario, si el robot no encuentra la marca después de un tiempo y ejecuta la parte del comportamiento compuesto **dar resultado** respectiva (ver autómata **dar resultado**, sección 3.4.2.3), la prueba se considerará no exitosa.

4.3.2.3. Experimentos

Los experimentos realizados para este comportamiento, consistieron en colocar al robot en una posición aleatoria con *estado interno* igual a *en la superficie* o *inmerso*. Debe tenerse en cuenta, que el comportamiento compuesto **explorar** no ejecuta el comportamiento compuesto **dar resultado**, sin embargo, este último se presentará en los resultados de los experimentos del comportamiento compuesto **explorar**, con la finalidad de mostrar el funcionamiento completo del sistema. El comportamiento **dar resultado** se indicará con una línea punteada colocada en la parte superior de las gráficas de los siguientes experimentos, lo que indicará de dónde a dónde abarca el comportamiento compuesto **dar resultado**.

Los siguientes experimentos consistieron en hacer que el robot coordinara la ejecución de los comportamientos básicos antes mencionados con la finalidad de encontrar la marca deseada.

Como podrá observarse en algunos de los siguientes experimentos, se utilizaron dos marcas del color deseado y dos de otro color diferente, para mostrar que el robot no elige cualquier color de marca, sino únicamente una de las deseadas, i.e. una de las marcas que posee el color a buscar.

A continuación se presentan tres experimentos completos del comportamiento **explorar**.

- Caso 1: búsqueda exitosa de marca, explorar en inmersión.

El experimento se llevó a cabo en la noche y se alumbró la pecera con luz blanca. Para realizar el experimento se colocaron dos marcas de color verde en el fondo de la pecera de manera aleatoria, como se muestra en la figura 4.11. Previamente, se ejecutó el comportamiento básico **grabar color**,

para que el robot reconociera el color de la marca a buscar, i.e. color verde.

El *estado interno* del robot al inicio de la prueba fue igual a *inmerso* pero no se encuentra en el fondo de la pecera, en la figura 4.11 (a) puede observarse que el cuerpo del robot está inicialmente bajo el nivel del agua, i.e. tiene flotabilidad negativa mínima, lo que indica que si el robot se detiene por completo, tenderá a hundirse, pero si avanza o gira, podrá elevarse del fondo de la pecera sin llegar a la superficie, i.e. podrá mantenerse flotando en el agua sin emerger y sin tocar el fondo de la pecera por periodos de tiempo pequeños. Conseguir que el robot obtuviera la flotabilidad negativa antes mencionada, no fue tarea fácil, aún cuando se hizo manualmente, i.e. se llenó de agua la campana, y se conservó aire dentro de ella. El efecto antes mencionado permitió que el robot avanzara estando inmerso sin problemas, ya que como el peso del robot era el mínimo, pudo ejecutar todos los comportamientos básicos de manera exitosa. En las pruebas en las que el robot debe sumergirse por sí mismo, no pudo conseguirse que el robot obtuviera dicha flotabilidad negativa mínima.

En la figura 4.11 se presenta una secuencia de imágenes de la prueba realizada. La figura 4.11 (a) corresponde al estado inicial del robot al comenzar la prueba, la figura 4.11 (b) muestra un momento posterior al de detección de la marca, por tanto se realizó la acción simple **abrir válvula**, para permitir que el aire contenido en el interior de la cámara escapara como se observa en la figura 4.11 (b). La finalidad de permitir que el aire contenido en la burbuja escape por completo, se debe a los problemas de inercia en el agua, i.e. si el robot estaba avanzando y detectaba la marca, al detenerse seguía avanzando durante un tiempo t debido a la inercia. Esto ocasionaba que el robot perdiera posiblemente la posición real de la marca encontrada. Para corregirlo se recurrió a sumergir totalmente al robot sobre la marca una vez que había sido detectada, para asegurar con esto, que el robot no perdiera la posición de la marca al momento de emerger. La figura 4.11 (c) muestra el momento en el que el robot desciende hasta llegar al fondo sobre la marca, y la figura 4.11 (d) muestra el estado final del robot después de haber ejecutado el comportamiento compuesto **dar resultado**.

En la gráfica de la figura 4.12 se muestran las capacidades y los comportamientos llevados a cabo durante la ejecución del comportamiento compuesto **explorar** en el experimento de la figura 4.11. También se muestran las capacidades y comportamientos ejecutados por el comportamiento compuesto **dar resultado**, los cuales se indican bajo la línea colocada en la parte superior de la gráfica.

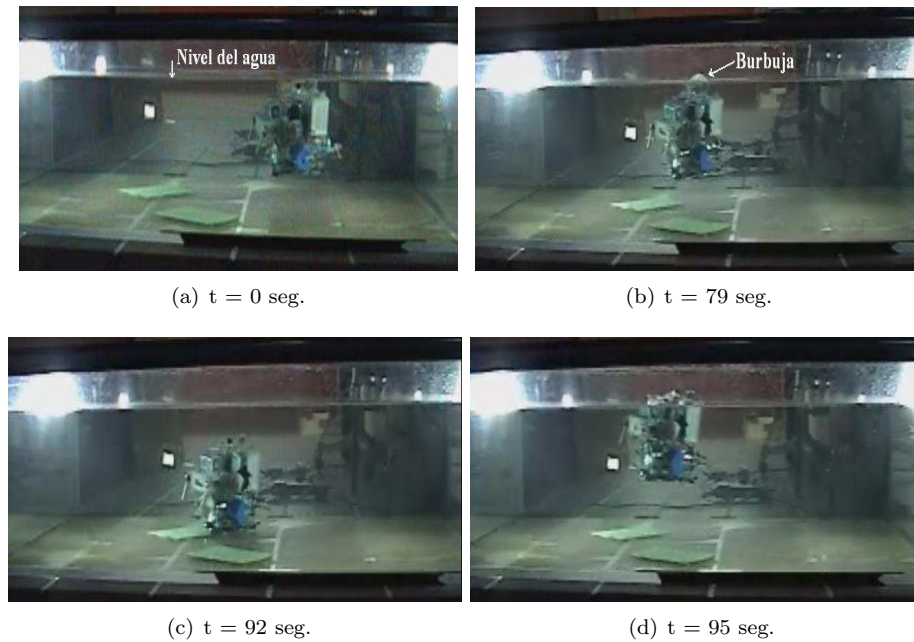


Figura 4.11: Comportamiento compuesto *explorar*, caso 1: búsqueda exitosa de marca, (a) estado inicial igual a *inmerso* pero con flotabilidad negativa mínima, (b) ejecución de la acción simple *abrir válvula*. En la figura puede apreciarse la burbuja de aire que escapa del interior de la campana, ya que la campana no se encontraba totalmente llena de agua, (c) descenso del robot hasta el fondo sobre la marca, y (d) estado final del robot al concluir la prueba.

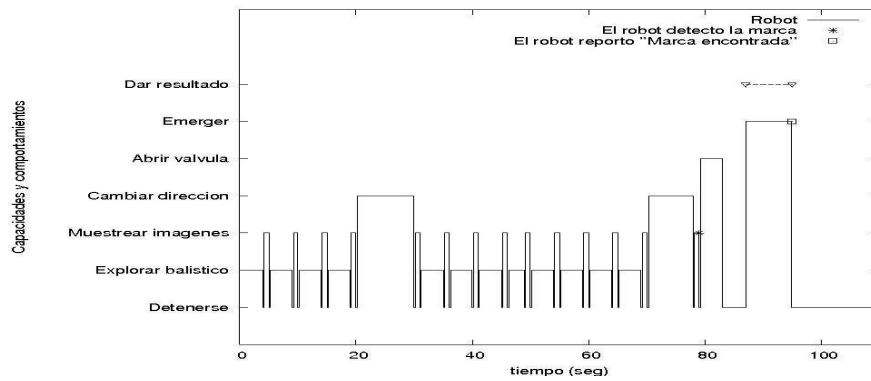


Figura 4.12: Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el caso 1: búsqueda exitosa de marca, *explorar* en inmersión.

- Caso 2: búsqueda exitosa de marca, explorar en la superficie.

Para llevar a cabo este experimento, se colocaron dos tipos de marcas diferentes en el fondo de la pecera como se muestra en la figura 4.13, i.e. marcas verdes y marcas naranjas. En este experimento, el robot debía buscar una marca verde.

En la figura 4.13 (a) se muestra el estado inicial del robot al comenzar la prueba, i.e. el *estado interno* del robot es igual a *en la superficie*. En la figura 4.13 (b), se muestra la posición del robot en el tiempo $t = 60 \text{ seg}$, en este instante, el robot se dirige hacia una de las esquinas de la pecera, en la figura 4.13 (c) se muestra el momento en el que el robot logra salir de la esquina en el tiempo $t = 112 \text{ seg}$. Mientras el robot se encontraba en la esquina de la pecera, se observó que uno de los sensores de contacto no se había colocado adecuadamente, pues en ocasiones no se activaba al chocar con las paredes de la pecera, lo que ocasionó el retraso del robot para salir de la misma, la figura 4.13 (d), muestra la dirección del robot en el tiempo $t = 120 \text{ seg}$, en la figura 4.13 (e) se muestra la posición del robot en el tiempo $t = 140 \text{ seg}$. En pasos intermedios entre las figuras 4.13 (d) y (e), se observó que el robot pasó sobre la marca verde situada del lado izquierdo de la imagen sin detectarla, posteriormente, el robot también pasó sobre la marca naranja situada al centro de la imagen. En la figura 4.13 (e) se observa cómo el robot se encuentra parcialmente sobre la marca naranja antes mencionada. Como se esperaba, el robot no la reconoció, pues para este experimento el robot debía reconocer marcas verdes. En la figura 4.13 (f) se observa el estado final del robot después de haber ejecutado el comportamiento compuesto **dar resultado**, pues el robot detectó exitosamente la marca de color verde.

Aunque el comportamiento compuesto **explorar** no ejecuta el comportamiento básico **sumergirse**, este último fue ejecutado en el presente experimento debido a los problemas de inercia antes mencionados. Por tanto, cuando el robot detectó la marca, ejecutó el comportamiento básico **sumergirse**, y descendió hasta llegar al fondo de la pecera sobre la marca detectada. Posteriormente, el robot ejecutó el comportamiento compuesto **dar resultado**, con el cual emergió y conservó su posición sobre la marca detectada como se observa en la figura 4.13 (f).

En la gráfica de la figura 4.14 se muestran los comportamientos realizados por el robot durante la ejecución del comportamiento compuesto **explorar**, los cuales corresponden al experimento mostrado en la figura 4.13. Además, se presentan también los comportamientos llevados a cabo durante la ejecución del comportamiento **dar resultado**.

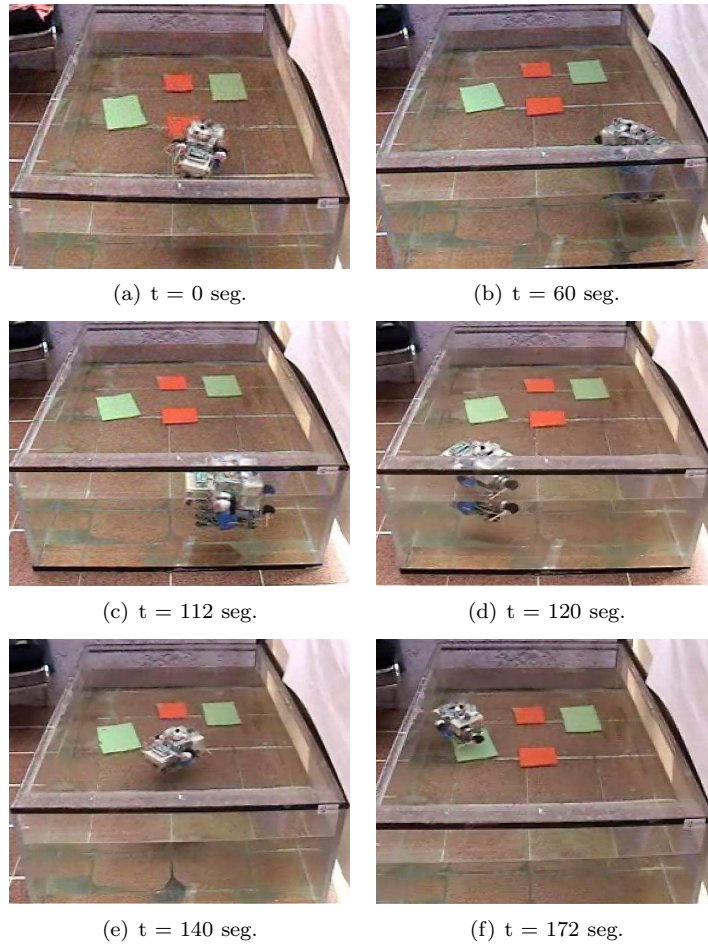


Figura 4.13: Comportamiento compuesto *explorar*, caso 2: búsqueda exitosa de marca, *estado inicial* del robot igual a *en la superficie*. (a) estado inicial del robot al empezar la prueba, (b) el robot se dirige hacia una de las esquinas de la pecera, (c) el que el robot logra salir de la esquina de la pecera, (d) trayectoria del robot en el tiempo $t = 120$ seg, (e) posición del robot en el tiempo $t = 140$ seg, (f) estado final del robot al concluir el experimento.

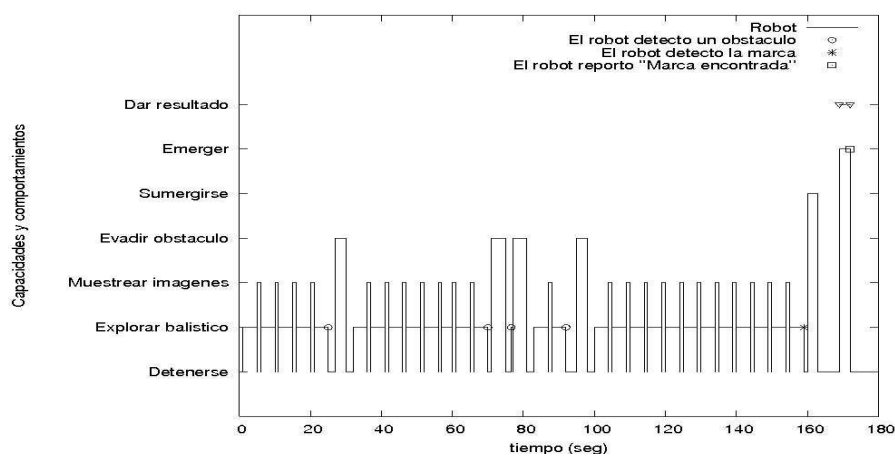


Figura 4.14: Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento del caso 2: búsqueda exitosa de marca, explorar en la superficie.

- Caso 3: búsqueda no exitosa de marca, estado inicial del robot igual a *en la superficie*.

Para realizar este experimento, se colocaron dos tipos de marcas en el fondo de la pecera de manera aleatoria, azules y naranjas. En este experimento el robot debía encontrar una de las marcas azules. En la figura 4.15, se muestra una secuencia de imágenes de este experimento.

Durante el desarrollo del experimento el robot recorrió un poco menos de la mitad del área de la pecera durante la búsqueda, ya que sus movimientos durante la ejecución de los comportamientos básicos no fueron del todo exitosos, ocasionando que el robot repitiera recorridos o trayectorias por las que ya había pasado. Esto puede observarse en las figuras 4.15 (a) y (c), y figuras (e) y (f). En la figura 4.15 (c) se observa cómo el robot se encuentra casi en la misma posición en la que inició, i.e. figura 4.15 (a), debido a que en pasos intermedios a ambas imágenes, el robot había seguido una trayectoria circular con diámetro aproximado de 25 cm, lo que ocasionó que el robot quedara a escasos 10 cm de distancia de la posición en la que inició la prueba. En las figuras 4.15 (e) y (f) ocurrió algo similar que condujo al robot a tener la misma dirección y casi la misma posición en tiempos diferentes. En la figura 4.15 (b), se muestra la posición del robot en el tiempo $t = 30 \text{ seg}$, en pasos intermedios de las figuras 4.15 (a) y (b), el robot pasó sobre la marca naranja que se encuentra en la parte inferior de la imagen. En la figura 4.15 (f) se muestra la posición del robot en el tiempo $t = 150 \text{ seg}$, en pasos intermedios entre las figuras (e) y (f), el robot ejecutó los comportamientos **cambiar dirección** y **avanzar**, pero éste último comportamiento, no se llevó a cabo de manera exitosa, provo-

cando que el robot tuviera casi la misma posición en tiempos diferentes. En la figura 4.15 (g), se observa la posición final del robot al concluir el experimento.

Como puede observarse, el robot logró recorrer una de las zonas por las que no había pasado. Lamentablemente, cuando logró hacer ésto, el valor del contador *cx* ya era igual a 40, ocasionando que el robot comenzara a ejecutar el comportamiento compuesto **dar resultado**, para indicar que no había encontrado la marca.

En la gráfica de la figura 4.16, se muestran las capacidades y los comportamientos llevados a cabo durante el experimento de la figura 4.15, así como los tiempos tomados por el robot para ejecutar cada comportamiento.

En la tabla 4.7 se muestran los resultados de dos experimentos exitosos: los presentados en los casos 1 y 2 antes mencionados, y un experimento no exitoso, el presentado en el caso 3. En el caso 1, el robot ejecutó el comportamiento **explorar** estando inmerso (figura 4.11), en el caso 2 lo ejecutó estando en la superficie (figura 4.13), y en el caso 3, el robot ejecutó el comportamiento **explorar** durante más de 210 *seg* sin detectar la marca.

No. Experimento	Estado del robot	Tiempo Total	Resultado	Observaciones
1	Inmerso	95.1 seg.	Exitoso	El robot detectó la marca y ejecutó los comportamientos satisfactoriamente.
2	Superficie	172.1 seg.	Exitoso	El robot detectó la marca y ejecutó los comportamientos satisfactoriamente.
3	Superficie	212.1 seg.	No exitoso	El robot no detectó la marca y su desempeño no fue satisfactorio. Se presentaron problemas durante la ejecución de la acción simple avanzar .

Cuadro 4.7: Resumen de resultados del comportamiento compuesto **explorar**.

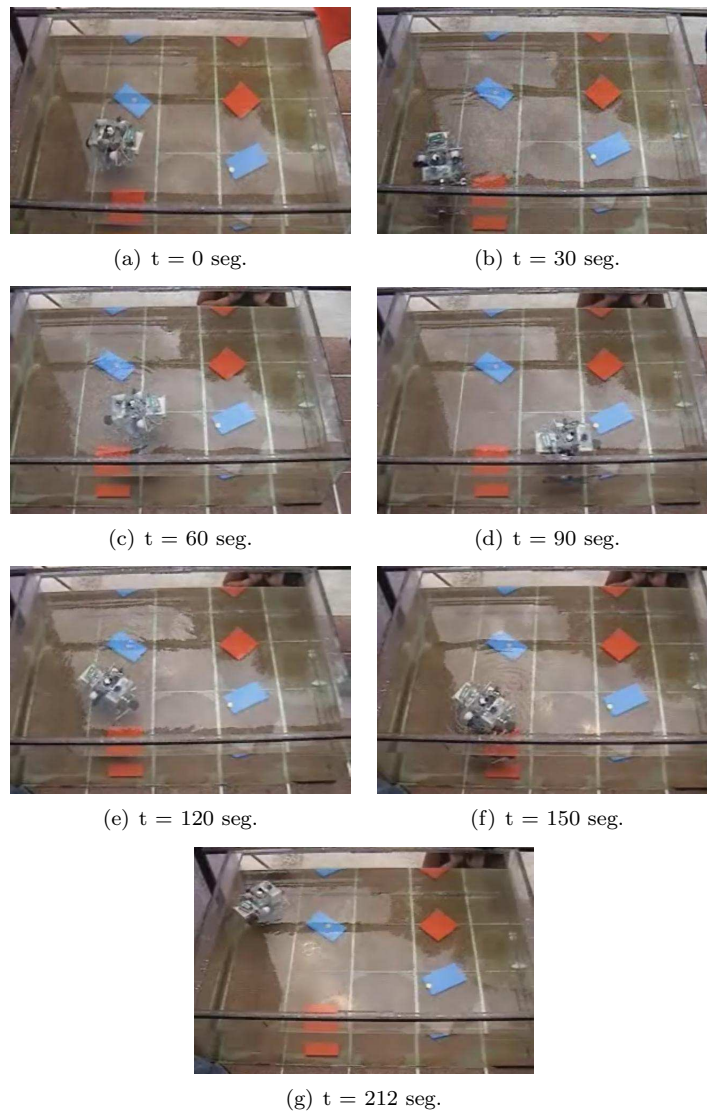


Figura 4.15: Comportamiento compuesto **explorar**, caso 3: búsqueda no exitosa de marca, *estado inicial* del robot igual a *en la superficie*. (a) estado inicial del robot al comenzar la prueba, (b) posición del robot en el tiempo $t = 30$ seg, (c) posición del robot en el tiempo $t = 60$ seg, (d) el robot avanza hacia adelante, (e) posición del robot en el tiempo $t = 120$ seg, (f) posición del robot en el tiempo $t = 150$ seg, (g) estado final del robot. Para este experimento, el robot emitió el resultado de *marca no encontrada*, girando hacia la derecha siete veces.

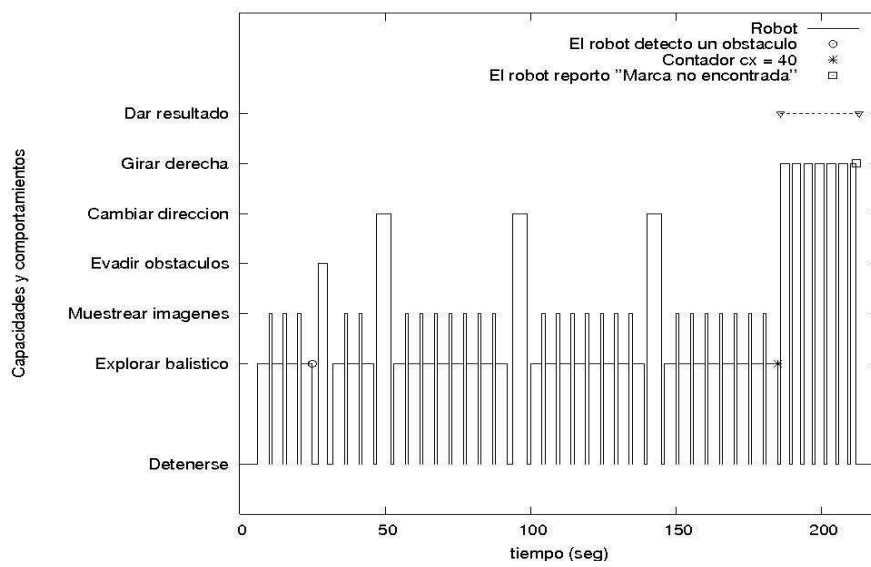


Figura 4.16: Capacidades y comportamientos llevados a cabo en el experimento del caso 3: búsqueda no exitosa de marca, *estado inicial* del robot igual a *en la superficie*.

Capítulo 5

Conclusiones y perspectivas

5.1. Recapitulativo

Esta investigación consistió en el diseño y construcción de un prototipo de robot acuático explorador con diferentes capacidades y comportamientos.

El robot fue diseñado y construido por nosotros mismos a partir del desarrollo de seis prototipos diferentes, los cuales permitieron determinar la forma y el equipamiento del robot. Además, dichos prototipos nos permitieron ir corrigiendo las deficiencias respecto a la existencia de fugas en las versiones anteriores, hasta lograr que nuestro robot fuera totalmente a prueba de agua. Se propuso e implantó el uso de una "campana" y de aire comprimido para realizar los comportamientos básicos de *inmersión* y *emersión*.

El diseño y construcción del prototipo presentó muchos retos, tales como identificar y en algunos casos construir los dispositivos necesarios que permitieran al robot realizar los comportamientos, e.g. la campana, los motores, etc.; convertir dichos dispositivos, e.g. sensores de contacto, motores, cámara, Handyboard©, etc., a prueba de agua, lo cual implicó la búsqueda de materiales adecuados, e.g. acrílico, cera, vaselina, etc. Fue necesario buscar la forma de organizar físicamente en el cuerpo del prototipo todos los elementos con los que se contaba, para lograr obtener un prototipo equilibrado y con flotabilidad positiva mínima. Esta etapa se muestra en el capítulo 3.

Las capacidades de acción simples del robot son *avanzar*, *girar*, *detenerse*, *abrir válvula*, *cerrar válvula*, *disparar tanque* y *finalizar disparar tanque*; los comportamientos básicos del robot son *sumergirse*, *emerger*, *evadir obstáculos*, *cambiar de dirección*, *grabar color*, *muestrear imágenes* y *explorar balístico*; los comportamientos compuestos del robot son: *explorar* y *dar resultado*.

Se realizaron dos tipos de experimentos, en los cuales se probó el funcionamiento de los comportamientos básicos y compuestos del robot de manera individual.

El comportamiento básico **sumergirse** se realizó de manera exitosa en la mayoría de los experimentos. La falla principal en este comportamiento fue la imposibilidad para lograr calcular el tiempo mínimo necesario para abrir la válvula de la campana, consiguiendo que el robot obtuviera una flotabilidad mínima negativa durante la inmersión. Debido a lo anterior, en los experimentos realizados, el robot tenía más peso del necesario para hundirse, ocasionando que el desplazamiento del mismo en inmersión fuera menos eficiente.

El comportamiento **emerger** se ejecutó de manera exitosa en la mayoría de las pruebas realizadas. Los principales problemas detectados durante la experimentación, se debieron principalmente a la carencia de torque en el servo-motor dos, el cual se encarga de disparar el tanque de aire comprimido.

El comportamiento **evadir obstáculos** tuvo un desempeño exitoso, con deficiencias en la detección de obstáculos, pues se observó que para que el robot pudiera detectar un obstáculo, era necesario que el robot chocara de frente con el obstáculo, debido a la posición en la que se colocaron los sensores de contacto en el robot. Además, para que se activara uno de los sensores de contacto del robot, era necesario que el robot llevara cierta fuerza o velocidad durante el choque, para activar los sensores de contacto, pues éstos perdieron sensibilidad en el momento en que fueron convertidos a prueba de agua por nosotros mismos.

Los comportamientos **grabar color** y **muestrear imágenes** permitieron obtener: el color de la marca a buscar y reconocer si el color de la marca se encuentra debajo del robot, respectivamente, ambos comportamientos se ejecutaron satisfactoriamente debido a que en ambos se trabajó con un promedio de lecturas de la cámara, lo cual permitió obtener mejores resultados.

El comportamiento básico **explorar balístico** tuvo un desempeño regular, debido a que en algunos de los experimentos realizados, el robot no avanzó hacia adelante como se esperaba, pues los motores no giraban a la misma velocidad, ocasionando que el robot avanzara girando, i.e. al avanzar el robot tendía a girar hacia uno de sus lados. Se trató de resolver el problema enviando más potencia a uno de los motores y quitándosela al otro, pero aún así no se consiguió resolverlo, pues se notó que otro factor que generaba este efecto, era la forma en que incidían las hélices en el agua, pues éstas últimas, fueron pegadas a los ejes de los motores por nosotros mismos, y no quedaron totalmente alineadas, por tanto, oscilaban un poco al girar. Es por eso, que aunque se probó el comportamiento con diferentes motores a prueba de agua, el resultado fue el mismo.

El comportamiento **cambiar de dirección** se realizó de manera satisfactoria, aunque se tuvieron problemas para que el robot lograra avanzar la distancia

requerida, i.e. 15 *cm* aproximadamente, pues el robot no lograba avanzar hacia adelante, tal como ocurre en el comportamiento **explorar balístico**.

El comportamiento **dar resultado** se ejecutó exitosamente en el 100 % de los experimentos. Se hizo una variante de este comportamiento, la cual sirvió para indicar si el robot había o no detectado la marca rápidamente, debido a que en ocasiones no se identificaba la causa por la que el robot se detenía, y la única forma de saber si era por que había encontrado la marca o no, era sacándolo del agua y verificando en la pantalla si se indicaba que la marca había sido encontrada. La variante en este comportamiento se registró en el experimento de la sección 4.3.2 del comportamiento compuesto **explorar** (caso 2: búsqueda exitosa de marca, explorar en la superficie), y modificó el comportamiento **dar resultado** en el caso cuando el robot se encuentra *en la superficie*. Por tanto, si el robot detectaba la marca debía sumergirse para verificar si era o no la marca deseada. Posteriormente, el robot debía emerger y detenerse, indicando con esto que la marca había sido encontrada.

El comportamiento compuesto **explorar** se realizó de manera satisfactoria en muchos de los experimentos, aunque con deficiencias debido al uso del comportamiento básico **explorar balístico**, como se mencionó anteriormente. En los experimentos realizados para el comportamiento compuesto **explorar**, se observó el funcionamiento completo del sistema, y se registraron tres de los cuatro casos posibles que pueden ocurrir al ejecutar dicho comportamiento. En estos experimentos, puede observarse que el robot es capaz de recorrer un área de la superficie de la pecera suficiente para encontrar la marca deseada.

5.2. Aportaciones y conclusiones

5.2.1. Aportaciones

1. Se aportaron diversos prototipos, unos funcionales y otros no, pero cada uno representó una nueva alternativa para solucionar los problemas detectados en prototipos de versiones anteriores (c.f. sección 3.3).
2. Se diseñó la "camapana" utilizada por el robot acuático explorador (c.f. sección 3.3.3, figura 3.4), la cual le permitió sumergirse y emerger al ganar o perder peso, consiguiendo así la inmersión y emersión del robot.
3. Se diseñó y construyó un prototipo de robot acuático explorador, capaz de realizar de manera autónoma diferentes tareas, e.g. sumergirse, emerger, evadir obstáculos, cambiar de dirección, explorar, detectar marcas, etc. Además, se logró que el prototipo de robot acuático construido en esta tesis fuera totalmente a prueba de agua. Debido a que los materiales utilizados para construir el robot son comerciales, e.g. acrílico, pegamentos epóxicos resistentes al agua, así como silicones, etc., se logró la construcción del robot a un bajo costo.

4. Se propuso una forma para la organización de los elementos del robot, e.g. actuadores, sensores de contacto, campana, tarjeta controladora Handyboard©, CMUcam2+©, el tanque de aire comprimido, etc., lo cual permitió obtener un prototipo de robot acuático estable y equilibrado. Además, el robot propuesto fue diseñado con la propiedad específica de tener flotabilidad positiva mínima (c.f. sección 3.4).
5. El prototipo de robot propuesto es capaz de ejecutar sus comportamientos en aguas poco profundas, del orden de 25 *cm* de manera exitosa. Dicho prototipo de robot podría funcionar a mayores profundidades, agregando el lastre necesario para permitirle ejecutar los comportamientos antes mencionados.
6. Se logró establecer comunicación entre la tarjeta controladora Handyboard© y la CMUcam2+© de manera exitosa y segura, pudiendo alternar entre programar la tarjeta controladora utilizando una PC, o comunicarla con la CMUcam2+©. Para ambos casos se utilizó el mismo cable RJ11 (ver apéndice E cable dual y sección 3.4, figura 3.12 (a)).

5.2.2. Conclusiones

Este trabajo se centró en el diseño y construcción de un prototipo de robot acuático explorador tipo AUV, y en la propuesta e implementación de comportamientos básicos y compuestos para dicho robot.

El diseño y la construcción del prototipo de robot acuático explorador a prueba de agua no fueron tareas fáciles, debido a la poca experiencia que se tenía en el diseño de este tipo de sistemas y a los recursos limitados con que se contaba. Se concluye que el uso de acrílico para la estructura física del robot es adecuado, al menos para aguas poco profundas, además, del uso de pegamentos epóxicos y silicones que permiten en conjunto que el robot sea totalmente a prueba de agua.

Aunque se contaba con lineamientos respecto al tamaño del robot, no fue posible respetarlos del todo, debido principalmente al tamaño del tanque de aire comprimido utilizado, y a diversos factores como el tamaño de los servo-motores al ser convertidos a prueba de agua, etc. Se concluye que para el dispositivo de aire comprimido empleado por el robot, debe reservarse un área de proporciones del orden del 40 % de las dimensiones totales del prototipo.

Se concluye que el presupuesto y los medios disponibles para la construcción de un prototipo de robot acuático como el aquí presentado son importantes, su orden es proporcional al equipamiento y materiales empleados durante la construcción. Sin embargo, se puede construir un robot como el nuestro a bajo costo. A continuación presentamos un estimado de los costos de algunos de los dispositivos y materiales empleados para la construcción de nuestro prototipo; tarjeta controladora Handyboard©: 299 *USD*, tarjeta de expansión: 59 *USD*,

CMUcam2+©: 169 *USD*, cable dual: 15 *USD*, tanque de aire comprimido: 40 *pesos*, acrílico: 170 *pesos*, etc.

En general, el robot acuático explorador construido en esta tesis tuvo un desempeño exitoso, debido a los resultados obtenidos en los experimentos realizados de cada uno de los comportamientos propuestos para el robot.

5.3. Perspectivas

Se espera mejorar el diseño, equipamiento y comportamientos actuales del robot, además de agregar nuevos comportamientos que le permitan ejecutar nuevas tareas.

Una de las principales mejoras en cuanto al diseño se refiere, es reducir las dimensiones del robot, cambiando el tanque de aire comprimido actual por uno de menor tamaño, e.g. los tanques utilizados para inflar llantas de bicicleta, de 11 *cm* de largo \times 2 *cm* de diámetro, con capacidad para 16 *gramos* de aire comprimido, e.g. marca *genuine innovations*. Además será necesario, reemplazar tanto los servo-motores como los motores DC actuales por unos de mayor torque que sean construidos especialmente para funcionar bajo el agua. Estos últimos se desean con hélices integradas, lo cual podrá reducir uno de los problemas detectados durante los experimentos realizados en el comportamiento compuesto *explorar balístico*, e.g. las oscilaciones. Al cambiar los motores, se obtendrá más espacio para agregar más elementos, e.g. motores, sensores, etc.

Se desea agregar algún dispositivo que permita medir la profundidad o presión en la que se encuentra el robot, para controlar de cierta forma su operación, i.e. permitir que el robot pueda mantenerse flotando en el agua durante la inmersión sin tocar el fondo de la pecera.

Se considera adecuado, cambiar el material empleado, i.e. el acrílico, por uno que soporte mayor presión para permitir que robot pueda descender a profundidades mayores.

Se espera reemplazar la CMUcam2+© utilizada actualmente por una con mayores capacidades, e.g. la CMUcam3, que permita obtener mayor información del ambiente. Con ello se espéra desarrollar o implementar algoritmos de reconocimiento, navegación o búsqueda más poderosos, respecto a los actualmente disponibles.

Es importante señalar, que este trabajo busca a largo plazo, contribuir al desarrollo de la tecnología propia, diseñada y desarrollada en nuestro país, además de la generación de conocimiento en el desarrollo de robots autónomos submarinos.

Muchas y prometedoras son las perspectivas de la robótica de servicio, muy largo es aún el camino por andar, y esta tesis espera contribuir un poco en esa larga y promisoría ruta de investigación.

Bibliografía

- Bohm H. et Jensen V. (2003). *Build Your Own Underwater Robot*. Westcoast Words Vancouver.
- Bowen A. D., Yoerger D. R., Whitcomb L. L., et Fomari D. J. (2003). Exploring the deepest depths: A novel light-tethered hybrid roV for global science in extreme environments. *Marine Technology Society Journal*.
- Cataldo M., Cooksey D., Garza L., Griffin J., Lockwood B., Parish J., Smith T., Uhlman R., et Balch D. T. (2005). The mongoose. Reporte tecnico, Georgia Tech Marine Robotics Group.
- Gispert C. (1999). *Atlas Visuales Océano de Física*.
- Hagen P. E., Storkersen N. J., Vestgard K., et Simrad K. (1999). Hugin — use of uuv technology in marine applications. *Oceans '99 MTS/IEEE*.
- Rosenblatt J., Williams S., et Durrant-Whyte H. (2002). A behavior-based architecture for autonomous underwater exploration. *International Journal of Information Sciences*, pp. 69–87.
- Small D., Bachmayer R., et Whitcomb L. (1999). A new remotely operated underwater vehicle for dynamics and control research. En *11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*.
- Wernli R. L. (2000). Low cost uuv's for military applications: is the technology ready? *Defence Technical Information Center (DTIC)*.

Referencias en línea

[Handy_board-url] Handy Board, [http : //handyboard.com/](http://handyboard.com/). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[cmr2007-url] 4to. Torneo Mexicano de Robots Limpiadores. [http : //web.upa-ep.mx/cmr2007](http://web.upa-ep.mx/cmr2007). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[Introducción-url] Introducción a Sumergibles, Submarinos, Lastre y Estabilidad, [http : //www.camne.com.ar/submarinos/tecnicassubmarinoshollmann/introduccion.htm](http://www.camne.com.ar/submarinos/tecnicassubmarinoshollmann/introduccion.htm). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[flota-url] ¿Cómo y porque se sumergen los submarinos?, [http : //perso.wanadoo.es/pfcurto/flota.html](http://perso.wanadoo.es/pfcurto/flota.html). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[ac-cess-url] The AC-ROV, <http://www.ac-cess.com/>. Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[Marineopsremus-url] REMUS Autonomous Underwater Vehicle, <http://marine.rutgers.edu/rumfs/MarineOps/Marineopsremus.html>. Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[NOVAone-url] WORLD SUBMARINE HISTORY TIMELINE 1580-2000, [http : //www.submarine-history.com/NOVAone.htm](http://www.submarine-history.com/NOVAone.htm). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[Nautilus_(1800)-url] Nautilus (1800 submarine), [http : //en.wikipedia.org/wiki/Nautilus\(1800\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Nautilus(1800)). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[deepsea-url] Deep Sea Machines, [http : //www.pbs.org/wgbh/nova/abyss/frontier/deepsea.html](http://www.pbs.org/wgbh/nova/abyss/frontier/deepsea.html). Fecha de consulta: 4 de octubre de 2006.

[arquímedes-url] Principio de Arquímedes, [http : //usuarios.lycos.es/pefeco/arquimides/arquimedesndice.htm](http://usuarios.lycos.es/pefeco/arquimides/arquimedesndice.htm). Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2006.

[Peso-url] Peso, [http : //es.wikipedia.org/wiki/Peso](http://es.wikipedia.org/wiki/Peso). Fecha de consulta 10 de diciembre 2006.

[Holland-url] Submarinos y sumergibles civiles, <http://es.wikipedia.org/wiki/Submarino>. Fecha de consulta: 19 de enero de 2007.

[Resurgeam-url] Historia, <http://www.terra.es/personal6/u-boat/textos/historia6.htm>. Fecha de consulta: 19 de enero de 2007.

[simonlake-url] The Submarine Heritage of Simon Lake, [http : //www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue16/simonlake.html](http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue16/simonlake.html). Fecha de consulta: 19 de enero de 2007.

[Fosa_de_las_Marianas-url] Fosa de las Marianas, [http : //es.wikipedia.org/wiki/](http://es.wikipedia.org/wiki/). Fecha de consulta: 24 de enero de 2007.

[USS_Nautilus_(SSN-571)-url] USS Nautilus (SSN-571), [http : //en.wiki-
dia.org/wiki/USS_Nautilus\(SSN-571\)](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Nautilus(SSN-571)). Fecha de consulta: 24 de enero de 2007.

[alvin2.sp-url] El Alvin, [http : //www.windows.ucar.edu/tour/link = /earth/
interior/alvin2.sp.html](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/interior/alvin2.sp.html). Fecha de consulta: 24 de enero de 2007.

[kaiko-url] 10000m class deep sea ROV "KAIKO", [http : //www.jams -
tec.go.jp/jamstec-e/gallery/mujin/kaiko.html](http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/gallery/mujin/kaiko.html). Fecha de consulta: 25 de enero de 2007.

[kaiko2-url] Hope floats for lost deep-sea explorer, [http : //www.abc. -
net.au/science/news/stories/s897958.htm](http://www.abc.net.au/science/news/stories/s897958.htm). Fecha de consulta: 25 de enero de 2007.

[Comanche-url] ROV: S U B A T L A N T I C - C O M A N C H E,
[http : //www.rovexchange.com/rov_r
evie_w_subatatlantic_comanche.php#](http://www.rovexchange.com/rov_review_subatlantic_comanche.php#). Fecha de consulta: 13 de mayo de 2007.

A. Glosario de definiciones

Babor:	Lado izquierdo del vehículo acuático mirando de popa a proa.
Calafatear:	Cerrar las juntas de las maderas de las naves con estopa y brea para que no entre el agua.
Carga útil:	Capacidad de un vehículo para transportar carga.
Crujía:	Línea central de una cubierta, en el sentido de proa a popa y paralela a la quilla, e.g. en crujía, en medio del buque.
Eslora:	Dimensión de un vehículo acuático tomada a su largo, desde la proa hasta la popa.
Estribor:	Lado derecho de la embarcación mirando de popa a proa.
Hidrófono:	Aparato que revela la dirección y la distancia de los sonidos en el agua. Sirven para escuchar los sonidos de las propelas y de los sonares.
Hélice:	Es un dispositivo constituido por un número variable de aspas o palas (2, 3, 4...) que al girar alrededor de un eje producen una fuerza propulsora. Cada pala está formada por un conjunto de perfiles aerodinámicos que van cambiando progresivamente su ángulo de incidencia desde la raíz hasta el extremo (mayor en la raíz, menor en el extremo).

La hélice está acoplada directamente al eje de salida de un motor de pistón o turbina, a través de engranajes o poleas (reductores), lo cual proporciona el movimiento de rotación.

Las hélices son el elemento propulsor del submarino, que al girar en el sentido del mismo hacen moverse al submarino.

- Manivela:** Una manivela es un dispositivo por medio del cual el movimiento alternativo puede transformarse en movimiento rotatorio o momento de torsión aplicado a un eje. Cuando se incorporan varias manivelas a un eje, éste se denomina cigüeñal.
- Latón:** El latón es una aleación de cobre y zinc.
- Línea de flotación:** También llamada *waterline*, es una línea que puede ser pintada, graduada o no, que separa la obra viva de la obra muerta de un vehículo acuático y que señala hasta qué grado se hunde la obra viva de una determinada nave.
- Obra muerta:** Es la parte del casco que sobresale de la superficie del agua cuando el submarino o la embarcación se encuentra flotando en la superficie del agua.
- Obra viva o carena:** Es la parte del submarino o embarcación situada por debajo de la línea de flotación, i.e. es la parte que se encuentra sumergida cuando el submarino se encuentra flotando en la superficie.
- Palas:** Aspas de la hélice que transforman el movimiento circular en un empuje.
- Planos de inmersión:** Trabajan como "alas" hidrodinámicas siempre y cuando el submarino vaya a una velocidad considerable. Crean un empuje hacia abajo (inmersión) o hacia arriba (emersión) dependiendo de la posición en la que sean colocados. Toda maniobra se realiza con ambos planos, delanteros y traseros trabajando juntos; éstos durante la navegación deben estar totalmente sumergidos y deben de ser de generosas dimensiones.

Popa:	Parte trasera del vehículo acuático.
Proa:	Parte delantera del vehículo acuático.
Quilla:	Es una pieza estructural de una nave, es la pieza principal que corre por debajo del buque o submarino.
Timón:	Plancha o pala que se instala en la popa del vehículo acuático, que al girar sobre uno de sus ejes, da dirección y rumbo al vehículo acuático.
Válvula:	Es un dispositivo que regula el paso de líquidos o gases en uno o varios tubos o conductos.

B. Handyboard©

La Handyboard© (figura 1) [Handy_board-url] es una tarjeta controladora comercial que mide $10,7\text{ cm}$ de largo $\times 8\text{ cm}$ de ancho, su suministro de energía es a base de baterías recargables de Nicad de $9,6\text{ V}$, emplea un microcontrolador 68HC11 de Motorola, incluye 32 K de RAM estática, cuatro salidas de motores DC, una pantalla LCD de 16×2 caracteres, un *knob* (pieza circular empleada para elegir opciones de un menú programado por el usuario), una pieza *beeper* programable por el usuario, i.e. una bocina, siete entradas analógicas y nueve entradas digitales para uso de sensores, un emisor infrarrojo de 38 KHz , la base para colocar un receptor infrarrojo de 38 KHz , puertos de conexión para colocar una tarjeta de expansión de puertos I/O. La Handyboard© se programa con un lenguaje de programación interactivo multi-tarea llamado Interactive C (IC).

La Handyboard© también cuenta con una tarjeta de expansión (figura 2) que provee las siguientes características:

- 10 entradas adicionales para sensores analógicos
- 4 entradas para activar sensores de LEGOMindstorms© (sensores reflectivos y sensores de rotación)
- 9 salidas digitales
- 6 señales de control de servo-motores con suministro de poder de la batería interna de la Handyboard©
- poder externo opcional para servo-motores
- espacio para conectar un sistema ultrasónico Polaroid 6500©
- área de prototipado
- conectores para la pantalla LCD de la Handyboard©

Las figuras 1 y 2 muestran una tarjeta Handyboard© y su módulo de expansión.



Figura 1: Tarjeta de control Handyboard©.

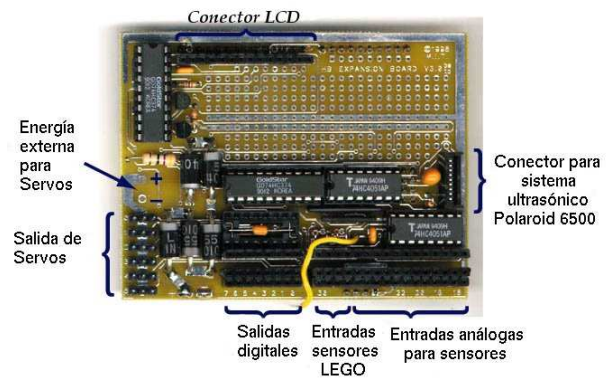


Figura 2: Tarjeta de expansión de la Handyboard©

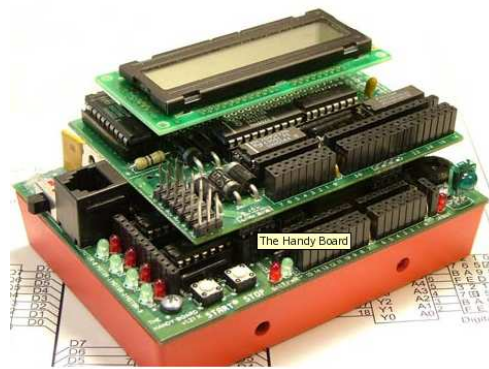


Figura 3: Tarjeta controladora Handyboard© y módulo de expansión

C. Motores a prueba de agua

Al parecer es posible usar los motores eléctricos directamente en el agua, i.e. si no se desea perder tiempo en protegerlos, pero se recomienda hacerlo debido a que los motores se oxidan muy rápido y si eso ocurre, no podrán volverse a usar.

Un motor a prueba de agua es un motor estándar, e.g. un motor DC o un servomotor, protegido de tal forma en la que el agua no puede entrar a través de su eje.

Los materiales que se usaron para convertir motores estándar a motores a prueba de agua son los siguientes:

- cinta de aislar
- vaselina
- silicón caliente
- cera para derretir
- un bote con tapadera de plástico rígido (la forma no importa) en el que quepa el motor a convertir a prueba de agua (los botes empleados para proteger los motores DC utilizados por el prototipo final de esta tesis, son huevos de plástico que sellan a presión, mientras que para los dos servomotores se utilizaron 4 tapaderas de garrafón de agua, ya que por la forma de los servo-motores, no fué fácil encontrar en qué aislarlos).
- cable, cautín, soldadura, etc.

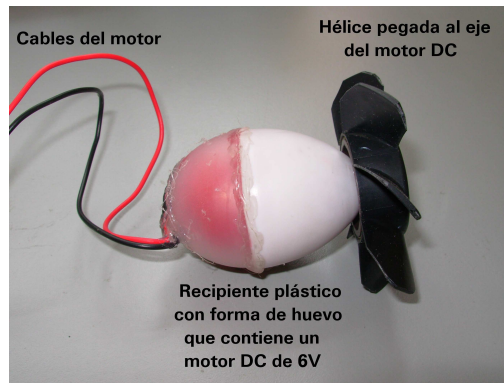
A continuación se describe brevemente el proceso para hacer los motores a prueba de agua:

1. Cablear el motor a utilizar. Para ésto soldar 2 cables en los conectores del motor (en caso de ser motor DC el sentido no importa) utilizando el cable y el cautín. Probar que funcione el motor.
2. Envolver el motor con la cinta de aislar (únicamente los lados) ya que la mayoría de los motores DC poseen orificios. Lo que se desea al hacer

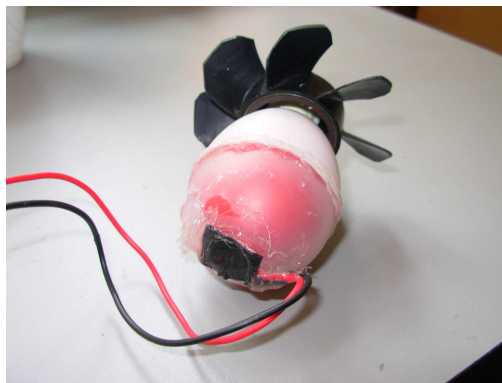
lo antes mencionado es evitar que la cera caliente entre a través de los orificios y se cristalice en el interior del motor, provocando que el motor deje de funcionar o no funcione adecuadamente.

3. Tapar con silicón caliente los orificios que se encuentren en las partes donde no se puso cinta de aislar (los extremos). Debe de procurarse no pegar el eje del motor en ninguno de sus extremos.
4. Por seguridad, hacer un borde de silicón alrededor del eje mayor del motor, dicho borde deberá de ser continuo y deberá medir aproximadamente 1 *cm* de altura.
5. Hacer una burbuja de silicón pequeña al rededor del eje menor del motor (cuidando no pegarlo y dejándole espacio suficiente para girar dentro de la burbuja). Se recomienda probar el motor con unas baterías para ver si continúa funcionando correctamente, i.e. debido a que el eje menor del motor podría haber quedado pegado o podría haber quedado rozando con el silicón, lo cual provocaría que el motor se force o no funcione.
6. Si al probar el motor éste sigue funcionando correctamente, rellenar con vaselina el borde de silicón hecho al rededor del eje mayor del motor. La vaselina será el aislante que evitará que el agua entre al motor por su eje mayor.
7. Insertar el motor en el bote, pero antes de colocar el motor en ese lugar, será necesario hacer una perforación en la base del bote. Se recomienda que la perforación sea del tamaño justo al del eje del motor, ya que entre más grande sea dicha perforación, más posibilidades habrán de que entre el agua por ahí o de que la vaselina se salga. Una vez hecho el orificio, colocar el motor en el bote de forma que su eje mayor pase a través del mismo. Probar si el motor continúa funcionando.
8. Utilizar cera caliente para rellenar el espacio que hay entre el motor y el bote. Durante la aplicación de la cera caliente, se recomienda tener fijos tanto el motor como el bote, así como agitar de vez en cuando para sacar el aire atrapado.
9. Finalmente, se recomienda cerrar el bote con su tapadera correspondiente. Antes de cerrar el bote, será necesario perforar la tapadera para pasar el cable del motor a través de ella. Rellenar el resto de espacios vacíos dentro del bote recién cerrado con cera caliente, aplicarla por la perforación hecha en la tapadera por la cual salen los cables del motor.

La forma de nuestros motores DC a prueba de agua se muestra en la figura 4.



(a)



(b)

Figura 4: Motor DC a prueba de agua. (a) Parte lateral del motor, (b) parte trasera del motor. Se sellaron las uniones del bote con silicón caliente, se tapó la perforación hecha en la tapadera del bote con cinta de aislar y sobre las orillas de la cinta de aislar se aplicó silicón caliente para evitar que se despegara con el agua, también se aplicó silicón sobre los cables para evitar su movimiento, pues podrían causar la ruptura de la cera contenida en el bote permitiendo posiblemente el paso del agua al interior del motor.

D. CMUcam2+

La CMUcam2+© consiste de un microcontrolador SX52 y de una cámara CMOS Omnidireccional 0V6620, que permite extraer datos del flujo de video de la cámara a alto nivel. Su función principal es **seguir** y **monitorear** regiones de color altamente contrastantes. Puede detectar movimiento, proporciona estadísticas de color, y transmite información de la imagen a una computadora para procesamiento adicional. Su suministro de energía es a base de 4 baterías recargables de 1,2 V.

Debido a que la cámara CMUcam2+© fue diseñada para trabajar con microcontroladores, tiene una interfaz serial que usa voltajes TTL (0 – 5 V). Cuando se usa la CMUcam2+© con un puerto serial RS-232, como el de una computadora o un convertidor USB-serial, es necesario un convertidor de RS-232 a señales TTL, e.g. Brainstem [[Handy-board-url](#)].

La CMUcam2+© tiene las siguientes funciones:

- Permite que el usuario defina el color para realizar el seguimiento a 50 cuadros por segundo.
- Permite seguir movimiento usando 26 cuadros por segundo.
- Encuentra el centroide de cualquier del objeto en seguimiento.
- Almacena la media del color y su varianza.
- Manipula la diferencia horizontal entre imágenes.
- Transfiere información en tiempo real vía serial.
- Permite al usuario especificar la región a seguir.
- Permite ajustar las propiedades de la imagen de la cámara.
- Descarga una imagen de un canal o de multiples canales.
- Tiene una resolución de 160×255 pixeles.
- Soporta multiples velocidades de transferencia para el puerto serial (*baudrates*).

- Controla 5 salidas para servo-motores los cuales pueden operar de manera independiente.
- Emplea dos servo-motores de manera automática para hacer seguimiento de un color en dos ejes X y Y.

Las figuras 5 y 6 muestran ilustraciones y esquemas de la cámara CMUcam2+©.

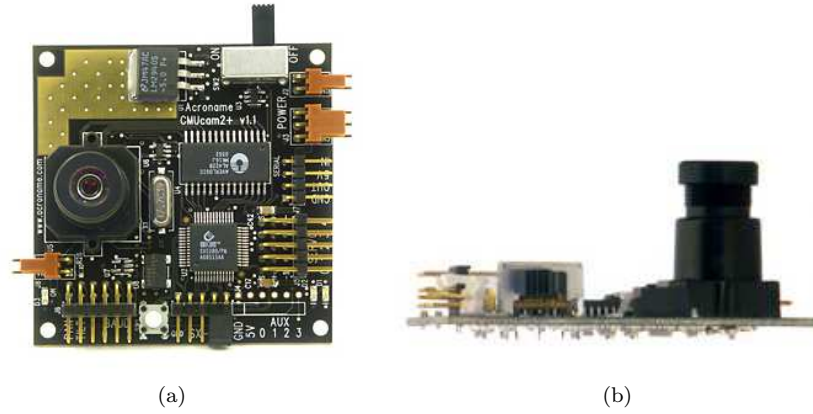


Figura 5: Vistas frontal y lateral de la CMUcam2+©.

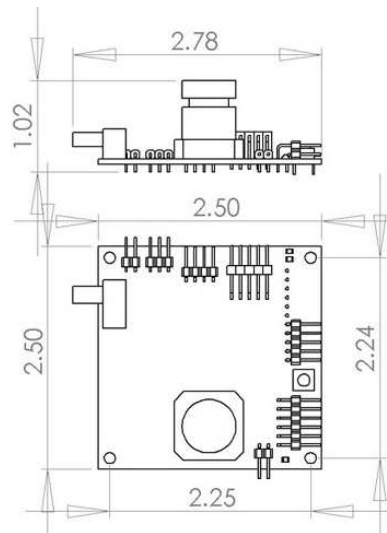


Figura 6: Dimensiones aproximadas de la CMUcam2+© (en centímetros).

E. Dispositivos diversos

Cable RJ11-TTL

El cable RJ11-TTL permite comunicar a la tarjeta controladora Handyboard© con la CMUcam2+©. Dicho cable es una conexión que usa los pines Rx, Tx y GND, i.e. lectura, escritura y tierra del cable serial.

Debido a que el conector RJ11 y a que el puerto serial de la CMUcam2+© manejan señales TTL, i.e. 0 – 5 V, no es necesario ningún dispositivo auxiliar para su conexión.

Los conectores RJ11 y el serial de la CMUcam2+© se conectaron emulando un *null modem*, i.e. se conectaron los pines de escritura con los de lectura del conector opuesto (figura 7).

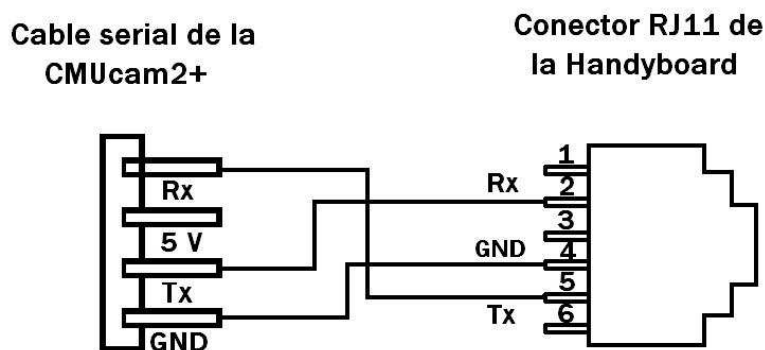
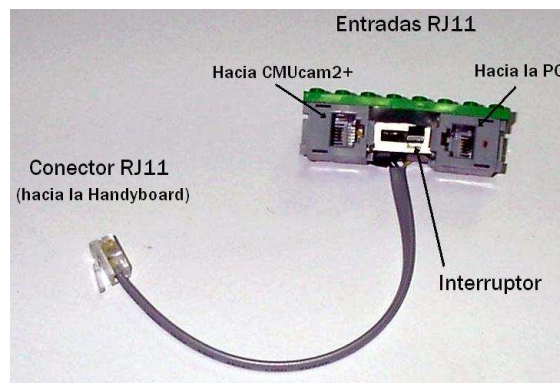


Figura 7: Cable RJ11-TTL. El cable permite comunicar a la Handyboard© con la CMUcam2+©.

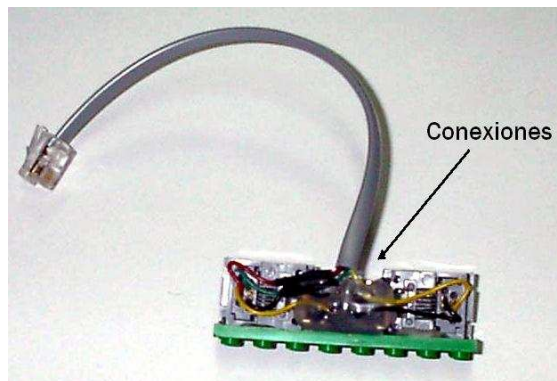
Cable dual

El cable dual posee dos entradas para conectores RJ11, un interruptor y un cable RJ11 común. Fue empleado para alternar entre comunicar a la Handyboard© con la CMUcam2+© o con la PC (c.f. sección 3.4, figura 3.12).

La figura 8 muestra el cable dual empleado por el prototipo final de robot acuático explorador.



(a)



(b)

Figura 8: Cable dual, permite alternar a través del interruptor entre habilitar la comunicación entre la Handyboard©-CMUcam2+© o Handyboard©-PC. (a) Vista frontal, (b) parte trasera.