



DISEÑO CONCEPTUAL DE MODULO ROBOTICO DE INSPECCION PARA AMBIENTES SUBACUATICOS

E. Matías Robador ^{*1}, Sol Pedre ^{*1,*2}, A. Tobías Quispe Mamani ^{*2}, Luis Rovere ^{*1,*2}

^{*1} Instituto Balseiro – Universidad Nacional de Cuyo
Av. Bustillo 9500 San Carlos de Bariloche Río Negro Argentina
correo-e: robador88@gmail.com

^{*2} Grupo de Robótica CAREM – CAB
Centro Atómico Bariloche – CNEA
Av. Bustillo 9500 San Carlos de Bariloche Río Negro Argentina

RESUMEN

En este trabajo se diseñó un módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos cerrados. La motivación es facilitar las tareas de inspección visual de los internos de los recipientes de presión de reactores nucleares. Tradicionalmente, esto se realiza de forma manual durante el recambio de combustibles, lo que presenta inconvenientes, como la falta de precisión en el control de la cámara y el empleo de muchos operarios, con la consiguiente exposición a la radiación.

El trabajo se encaró desde el diseño conceptual del vehículo subacuático, haciendo especial énfasis en el sistema de propulsión. Los principales requerimientos considerados fueron: el tamaño compacto, forma suave, peso liviano, flexibilidad y manejabilidad con buena precisión para movimientos a bajas velocidades. Esto llevó a optar por una configuración esférica para la carcasa del robot, con un sistema de propulsión, basado en chorros de agua, proporcionados por pequeñas bombas hidráulicas, y direccionados por servomotores; ubicados de manera específica para obtener todos los movimientos deseados.

Para verificar la factibilidad del proyecto y validar el diseño conceptual, se desarrolló un primer prototipo de este robot esférico subacuático, con materiales de fácil adquisición en el mercado local. Para la carcasa se utilizaron semiesferas de acrílico de 25 cm de diámetro y para el sistema de propulsión se emplearon bombas de lava parabrisas y servomotores que se impermeabilizaron con selladores de poliuretano.

Por último, se realizaron pruebas experimentales que confirmaron cualitativamente el diseño ideado; y se caracterizaron las bombas utilizadas, para obtener estimaciones cuantitativas de las fuerzas generadas por las mismas, que podrían servir para etapas posteriores donde se planteen modelos dinámicos de control.

En base a la experiencia adquirida durante el diseño, la construcción del prototipo y los ensayos, se propusieron mejoras y caminos a seguir para la continuación del proyecto.

Palabras Claves: Robot esférico subacuático, aplicaciones nucleares, propulsión por jets.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del proyecto

El motivo principal de este trabajo fue facilitar las tareas de inspección visual de los internos de los recipientes de presión de reactores nucleares. Estas son actividades exigidas por las autoridades regulatorias que deben realizarse con mayor frecuencia a medida que las centrales nucleares envejecen y sus componentes empiezan a desgastarse. El fin que poseen es detectar por ejemplo fisuras en cordones de soldaduras, zonas de corrosión en juntas de metales distintos, discontinuidades u otro tipo de defectos en los componentes, etc.

Tradicionalmente, esto se realiza de forma manual con brazos telescópicos o endoscopios de gran longitud, durante el recambio de combustibles. Algunos inconvenientes que presenta este método son: la falta de precisión en el control de la cámara y el empleo de muchos operarios, con la consiguiente exposición a la radiación, [1].

Como alternativa a procedimiento, se propone la utilización de un pequeño vehículo sumergible no tripulado (conocido como *UUV*, por sus siglas en inglés: *Unmanned Underwater Vehicles*). Algunas ventajas que presentaría esto serían: el acceso a múltiples zonas de inspección, con movimientos de gran precisión; la obtención de mejores imágenes con la cámara a bordo; menor tiempo requerido para la inspección completa y menos operarios necesarios para el manejo y control del robot, ubicados en zonas alejadas del ambiente radiactivo.

El módulo robótico buscado se encontraría en un punto medio entre los *UUV's* autónomos completamente (los *AUV's*) y los operados por control remoto (los *ROV's*).

1.2. Requerimientos globales de diseño

En pocas palabras, los requisitos impuestos para lograr el diseño que se pretende fueron los siguientes: precisión para movimientos a bajas velocidades, flexibilidad, forma suave, peso liviano, tamaño compacto y la minimización de los componentes electrónicos a bordo.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal es lograr el diseño conceptual del robot buscado, haciendo énfasis en el sistema de propulsión del mismo; y construir un primer prototipo con materiales de fácil adquisición en el mercado local, para verificar el diseño propuesto y comprobar la viabilidad del proyecto.



2. TRABAJOS RELACIONADOS

Conviene distinguir entre los UUV's destinados a otras aplicaciones (como la oceanografía o la industria naval y marina), donde los desarrollos se realizan considerando otros requerimientos y, en general, se pretende que el robot pueda sumergirse a grandes profundidades, recorrer largas distancias y tener buena maniobrabilidad a velocidades altas; y los UUV's destinados a fines similares a los del presente proyecto. Dentro de estos últimos, se destaca a continuación los proyectos más relevantes encontrados luego de una extensa búsqueda bibliográfica.

2.1. Kepro VT: Korea Electric Power for Visual Tests

En la Figura 1 puede verse el robot diseñado en la Referencia [1]. Se muestra el robot dentro de la unidad 1 de la Central Nuclear *Hanbit* en Corea del Sur.

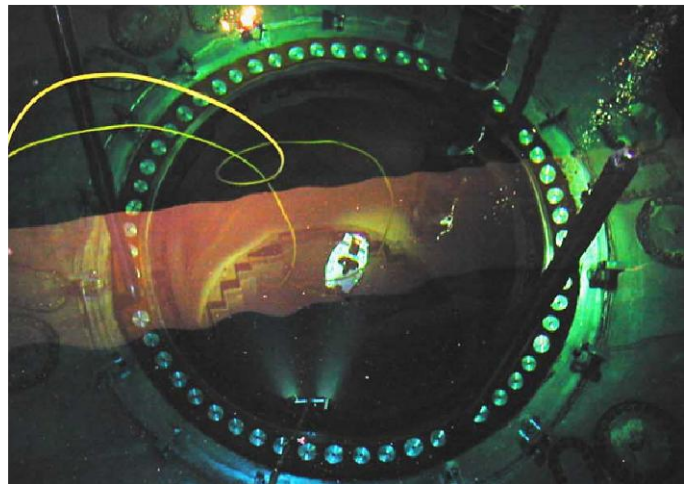
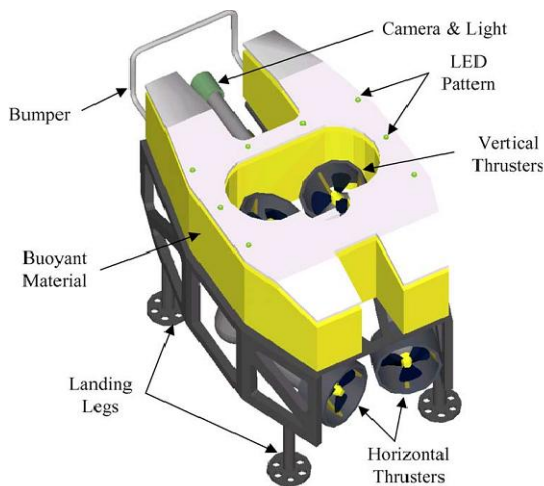


Figura 1 Diseño CAD del prototipo y una fotografía del robot

En este proyecto quedó demostrado que no solo es factible realizar inspecciones visuales con UUV's, sino que también se puede llegar a obtener mejores resultados que con los métodos tradicionales de inspección visual.

2.2. El robot "Omni-Egg" desarrollado en MIT

En la Figura 2 se muestra el robot esférico omni-direccional construido en el *Instituto Tecnológico de Massachusetts*, [2].

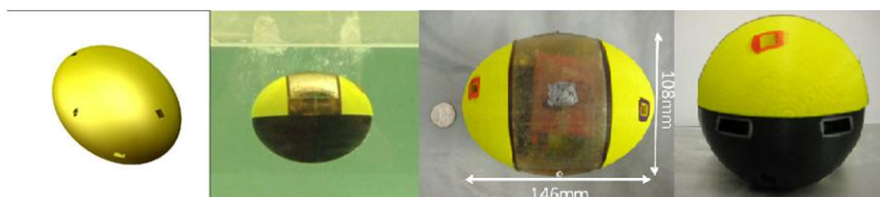


Figura 2 Modelo 3D y fotografías del robot "Omni - Egg".

El sistema de propulsión que posee consiste en chorros de agua o jets proporcionados por microbombas sumergibles, que son direccionados por unas válvulas especialmente diseñadas.



Para el diseño que se desea realizar se toma ésta idea de propulsión mediante jets, frente a los sistemas convencionales de propulsores de hélices; debido a que éstos últimos son relativamente más pesados y ruidosos, consumen más energía, y además para obtener velocidades bajas deben girar solo un par de veces, lo cual resulta en un funcionamiento ineficiente y no lineal, que complica la etapa de control de los movimientos.

2.3. SUR: “Spherical Underwater Robot”

En la Figura 3 se muestra el robot diseñado en la Referencia [3], en la *Universidad de Kagawa*.

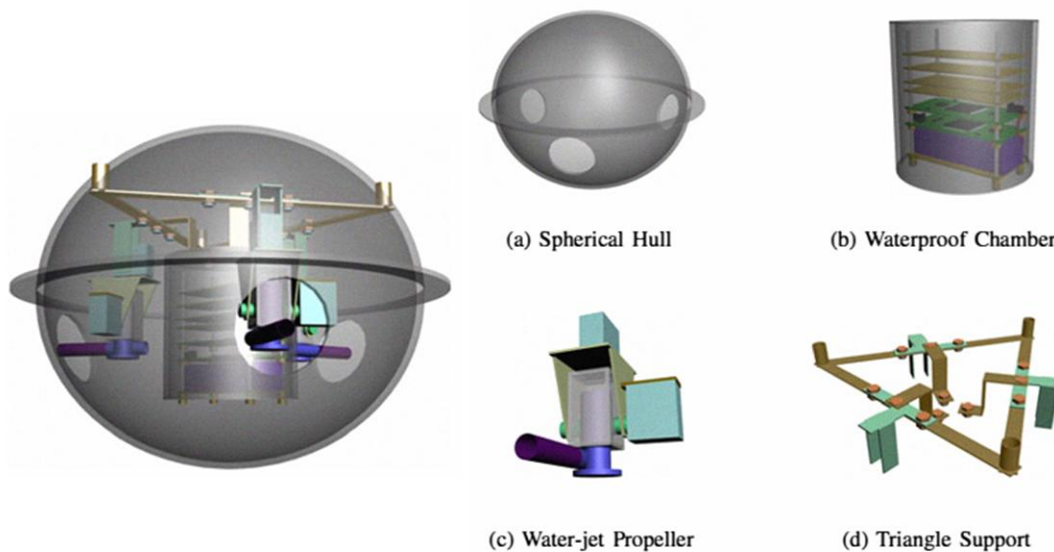


Figura 3 Modelo 3D del robot “SUR”. a) Carcasa esférica, b) Cámara impermeable c) Propulsores de jets y d) Estructura

De este trabajo se tomaron las ideas de: direccionar los chorros de agua utilizando servomotores; y usar una carcasa con forma esférica para el robot, por los argumentos dados en dicha Referencia (básicamente, porque es una forma simple y sencilla para modelar y fabricar, por la estructura simétrica, y porque hidrodinámicamente posee un menor coeficiente de arrastre que otras formas).

3. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SUBMARINO

3.1. Alcance del diseño

El diseño conceptual del módulo robótico se centra en idear un sistema de propulsión basado en chorros de agua, proporcionados por bombas hidráulicas y direccionados por servomotores; ubicados en una configuración esférica que permita obtener todos los grados de libertad deseados: las tres traslaciones y las tres rotaciones posibles en un espacio tri dimensional.

Los aspectos que no se considerarán son: un blindaje o medidas especiales para soportar los niveles de radiación; la comunicación de datos y la alimentación sin el uso de cables externos



al robot; el diseño de un sistema específicamente dedicado a controlar el nivel de flotabilidad; y la incorporación de sensores, para armar un lazo de control cerrado.

Todos estos aspectos, que si bien son necesarios para el diseño definitivo del robot, se dejan de lado en este trabajo debido a los tiempos disponibles y se plantea la posibilidad de considerarlos más adelante en etapas posteriores de optimización del primer diseño.

3.2. Carcasa esférica y estructura interna

El diámetro de la superficie externa o carcasa esférica elegido fue (25 ± 5) cm. Este valor se seleccionó en función del espacio disponible para realizar los movimientos (para ello se tomó como referencia las dimensiones típicas de un reactor tipo *SMNR: Small Modular Nuclear Reactor*: $\approx 1,3$ m de diámetro del núcleo), y de las dimensiones de los componentes internos del robot (bombas pequeñas y servos).

Se optó por una configuración de dos semiesferas separadas mínimamente, para permitir el ingreso del agua al interior del robot; en lugar de una esfera cerrada. De esta manera, no es necesario sellar completamente el vehículo; solamente hace falta impermeabilizar los componentes internos; y además, al tener la misma presión en ambas caras de las semiesferas, se evita la posibilidad de pandeo de la carcasa.

El material seleccionado fue acrílico debido a su bajo peso, disponibilidad en el mercado, facilidad de maquinado y transparencia, lo que permite ver el funcionamiento de los componentes internos.

Para la estructura interna del robot que soporta todos los componentes se eligió utilizar perfiles estructurales de aluminio, debido a su gran relación de rigidez/peso, a su resistencia a la corrosión, a su disponibilidad en el mercado, facilidad de maquinado y trabajado y bajo costo.

3.3. Sistema de Propulsión

3.3.1. Grados de libertad y configuración de los jets

Para lograr los seis grados de libertad (GDL) mencionados anteriormente, se pensó en distintas configuraciones posibles de los jets o chorros de agua necesarios. Finalmente se arribó a la que se muestra en la Figura 4. En las Figuras 5 y 6 se muestra cada uno de los movimientos posibles del robot esférico, con los jets que actuarían en cada caso (indicados con flechas); se utilizó la terminología convencional de ingeniería marítima.

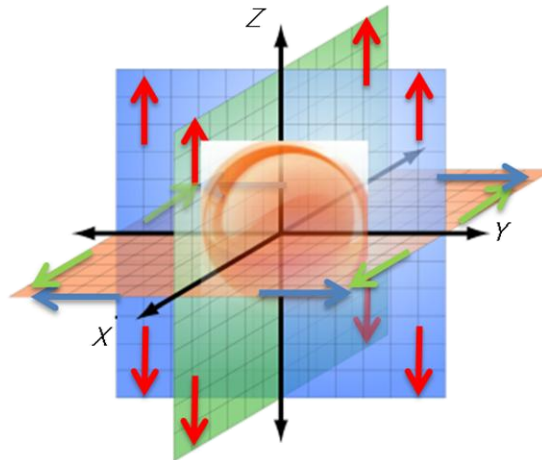


Figura 4 Configuración teórica de los jets del Sistema de Propulsión

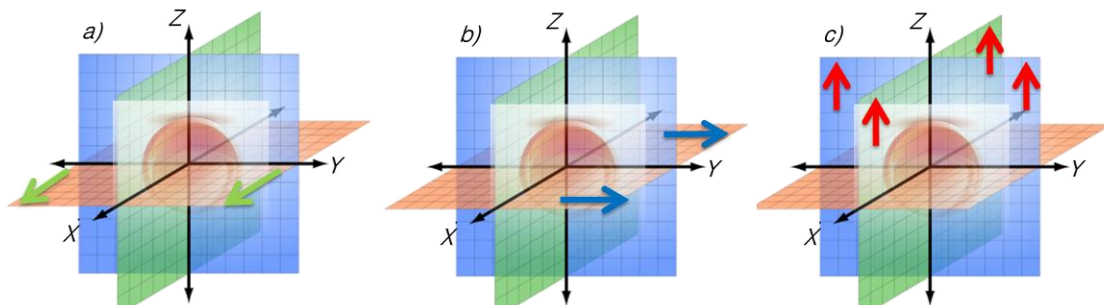


Figura 5 Jets necesarios para las traslaciones: a) Surge, b) Sway y c) Heave

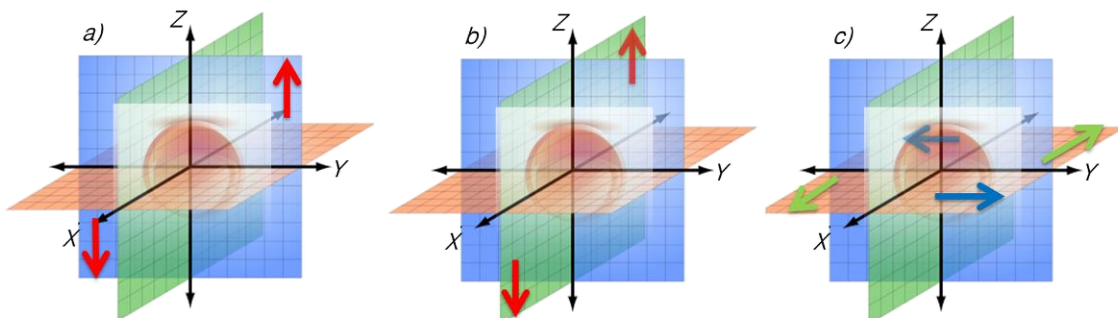


Figura 6 Jets necesarios para las rotaciones: a) Roll, b) Pitch y c) Yaw

Puede verse que con esta configuración se encuentran redundados tanto el Heave, como el Yaw. Esto permite mayor flexibilidad a la hora de seleccionar los jets que actúan en los movimientos en el plano XY, mientras se controla simultáneamente el nivel de profundidad.

3.3.2. Configuración final propuesta

Finalmente, en la Figura 7 se muestra el sistema de propulsión individual propuesto: formado por una bomba hidráulica para generar los chorros de agua, un servomotor y un mecanismo de giro tipo “corona-piñón” encargado de direccionarlos; y la configuración final con cuatro de estos sistemas ubicados simétricamente en el interior de la carcasa esférica de acrílico.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

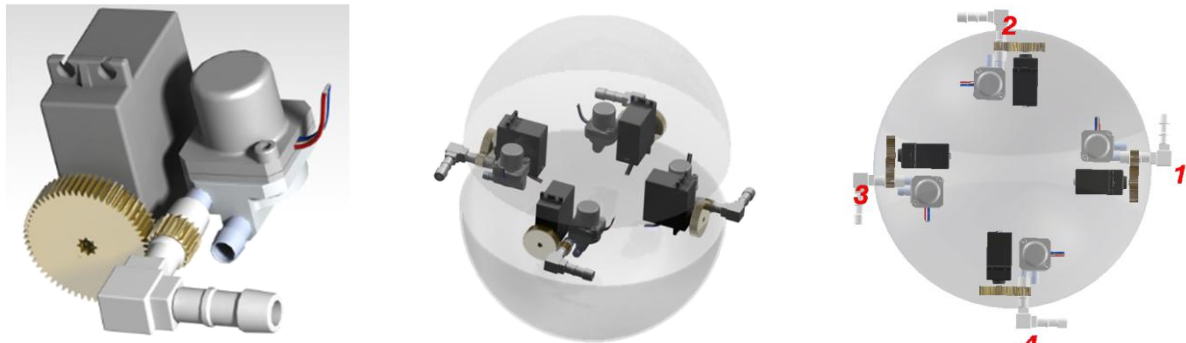


Figura 7 Imágenes renderizadas del sistema de propulsión y de la configuración final propuesta.

Los dispositivos mostrados son solo representativos del modelo que se pretende lograr. Las bombas hidráulicas a seleccionar podrían ser tanto de desplazamientos positivos, como dinámicas (por ejemplo centrífugas).

4. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

4.1. Adquisición de los componentes y fabricación

Se compraron dos semiesferas de acrílico de 25 cm de diámetro que luego fueron cortadas y perforadas, como se muestra en la Figura 8.

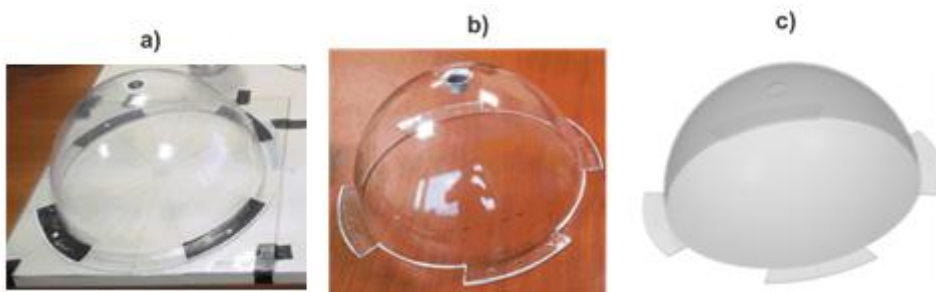


Figura 8 Semiesferas: Fotografías de antes (a) y después (b) del maquinado, y un modelo 3D (c).

Para el sistema de propulsión, lo ideal sería poder comprar componentes ya impermeabilizados de fábrica, pero para evitar grandes demoras de tiempo por las importaciones, y como el presupuesto disponible también es limitado, se optó por buscar elementos similares de fácil adquisición en el mercado local. Esto llevó a seleccionar unas bombas de paletas deslizantes (de las mismas que se utilizan en los automóviles para los lava parabrisas) y unos servomotores digitales. Fue necesario impermeabilizar con un sellador de poliuretano todos estos componentes, para que funcionen correctamente bajo el agua.

Se diseñaron y construyeron los piñones y las coronas necesarias para el mecanismo de giro.

En este diseño se tuvo en cuenta una relación de dientes tal que permita aprovechar al máximo el rango de rotación de los servos, dejando ciertos márgenes respecto a los extremos, para que



puedan operar correctamente. El sistema de propulsión individual diseñado finalmente puede observarse en la Figura 9.

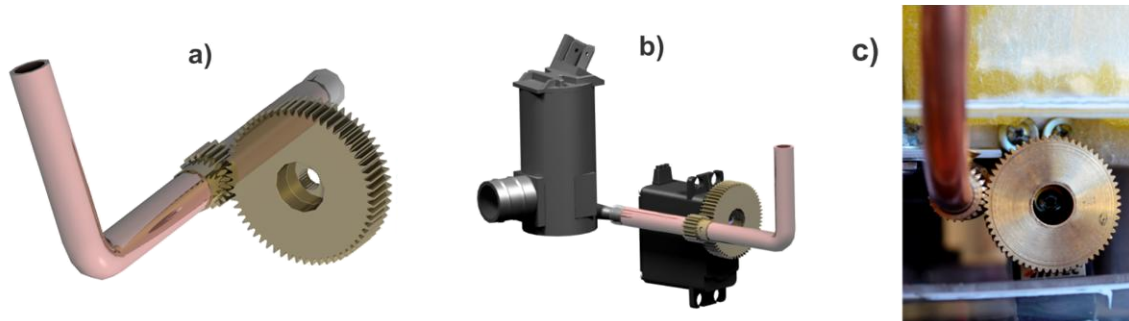


Figura 9 Sistema de propulsión: imágenes redimensionadas del mecanismo de giro solo (a) y de todo el sistema (b); y una fotografía del dispositivo construido (c).

La estructura donde se fijan todos estos componentes, junto a la carcasa esférica, se diseñó y construyó utilizando distintos perfiles de aluminio y uniones metálicas de acero para rigidizar las juntas; como se muestra en la Figura 10.

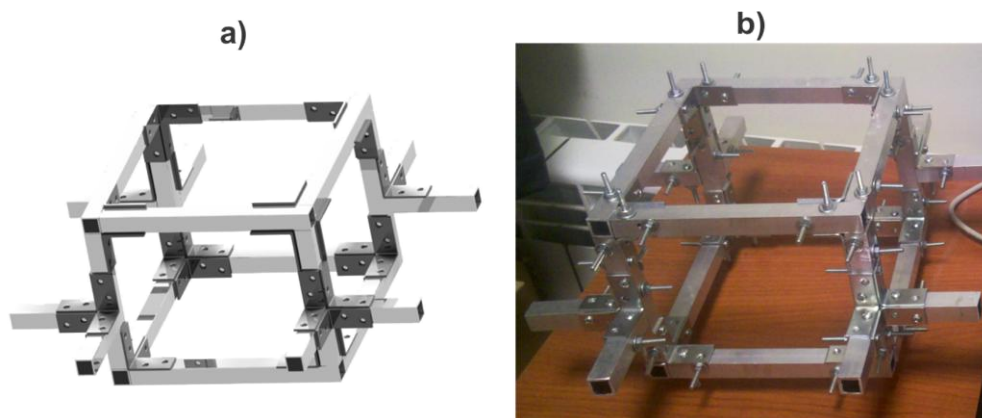


Figura 10 Estructura cúbica fabricada. a) Modelo CAD diseñado y b) Fotografía del prototipo construido.

4.2. Ensamblaje

Por último, como se observa en la Figura 11, se ensamblaron todos los componentes, para dar origen al módulo robótico buscado, que se decidió bautizar como “*Robotino*”, por un juego de palabras entre robot y submarino.

Los últimos componentes que se añadieron fueron: unos flotadores y una cámara sumergible. Los primeros, con el fin de obtener una flotabilidad levemente positiva; es decir, que en condiciones hidrostáticas solo una pequeña porción del robot esté por encima de la superficie del agua; y la segunda, para poder obtener imágenes bajo el agua en las pruebas a realizar.



a)



b)

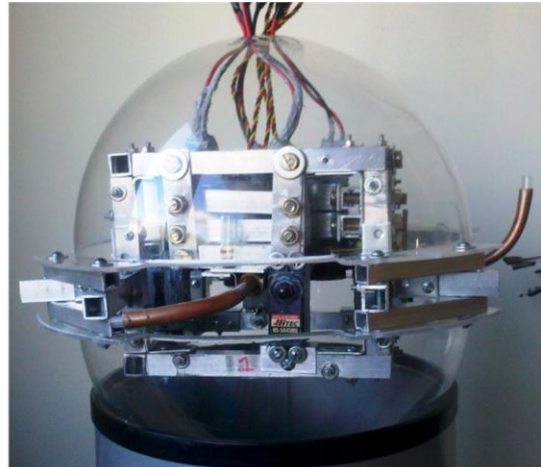


Figura 11 Diseño conceptual final del "Robotino". a) Modelo CAD diseñado y b) Fotografía del prototipo

En la Figura 12 se muestra la construcción definitiva, con los flotadores y la cámara sumergible.

a)



b)

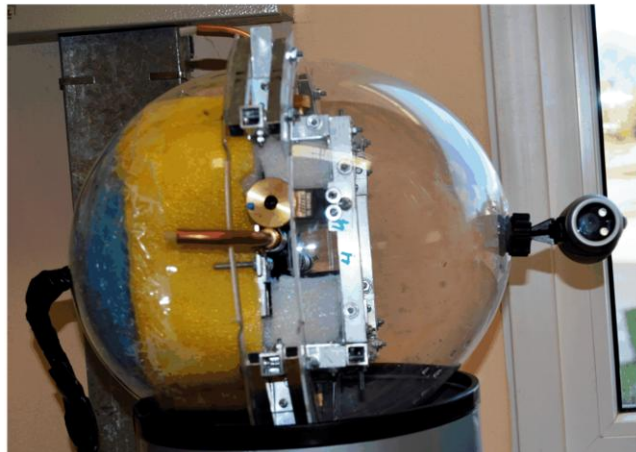


Figura 12 Fotografías del "Robotino". a) en posición vertical (normal) y b) en posición horizontal

4.3. Sistema de control

El sistema de control implementado para dar las órdenes necesarias a las bombas y a los servos en cada movimiento deseado, se realizó con un microcontrolador de *Arduino*TM. Los circuitos eléctricos realizados fueron relativamente sencillos; básicamente, se controló la velocidad de las bombas y la posición angular de los servos utilizando el método de *PWM*. Al final, para reducir la posibilidad de fallas se realizó un circuito impreso o *PCB*, por sus siglas en inglés, con métodos domésticos.

En la Figura 13 se muestra el circuito eléctrico esquemático implementado, realizado en el programa *Fritzing*TM.

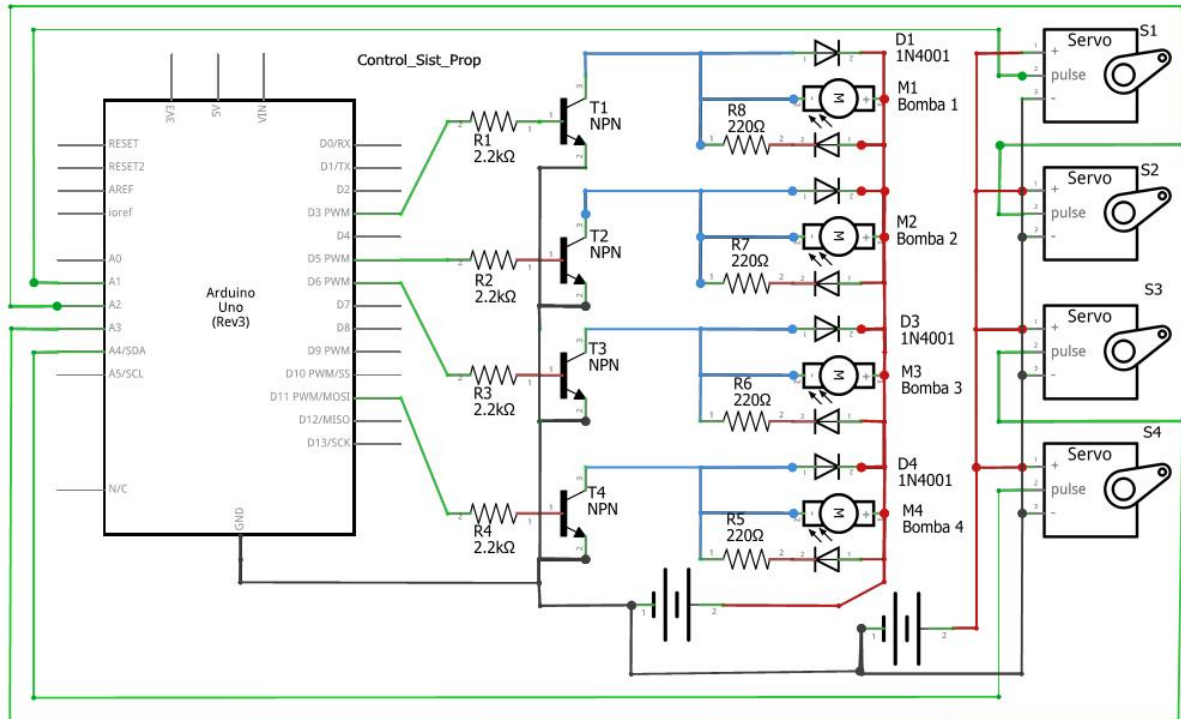


Figura 13 Circuito esquemático implementado para el control del sistema de propulsión del robot.

5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1. Pruebas Cualitativas

Con el propósito de validar cualitativamente el diseño logrado, se realizaron algunas pruebas.

En las Figuras 14 y 15 se muestran imágenes tomadas en distintos instantes de tiempo de los videos correspondientes de las pruebas de "Avance en el eje X" y "Giro respecto al eje Z", que pueden verse completos en los links:

<https://www.dropbox.com/s/4ek765ucru3o3tp/Avance%20en%20X.mp4> y

<https://www.dropbox.com/s/835nef4ubcr02x9/Giro%20en%20Z.mp4>, respectivamente.

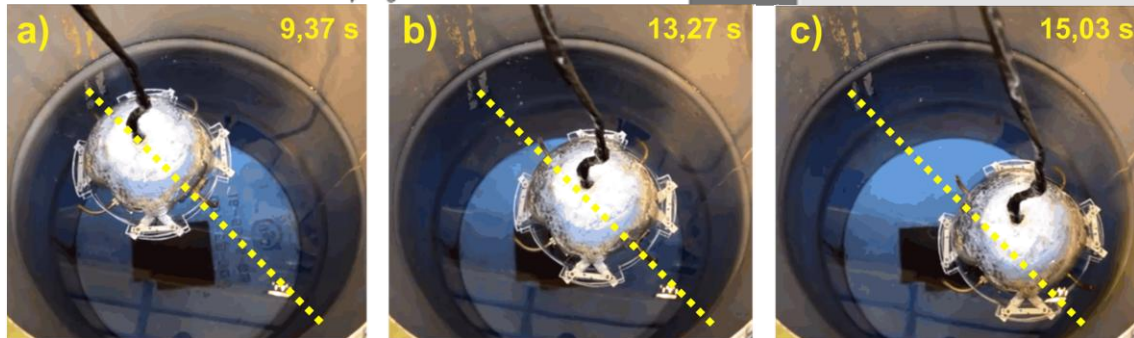


Figura 14 Imágenes del movimiento de Avance o Surge. Se indica con una línea amarilla punteada la trayectoria aproximada recorrida por el robot.



Figura 15 Imágenes del movimiento de Yaw. Se indica con una estela amarilla el recorrido aproximado de la salida de una de las bombas.

5.2. Caracterización de las bombas

Con el objetivo de obtener estimaciones cualitativas de las fuerzas generadas por las bombas adquiridas, se realizó una simple prueba de caracterización. La idea fue registrar el caudal producido una de las bombas en función de las distintas señales de PWM enviadas por el sistema de control.

Luego, con estos datos, se hizo uso de estudios y modelados realizados en [4], para aproximar la fuerza de los propulsores como se muestra en la Ecuación (1).

$$F_{\text{prop}} \cong \dot{m}v = \frac{\rho Q^2}{A} = \frac{4\rho Q^2}{\pi D^2} \quad (1)$$

Donde F_{prop} es la fuerza generada por los propulsores, o bombas, \dot{m} es el flujo másico del fluido, v es la velocidad con la que sale el chorro, ρ es la densidad del agua, Q es el caudal, A es el área transversal de salida del jet y D es el diámetro de esa salida.

Los resultados obtenidos finalmente pueden verse en la Figura 16.

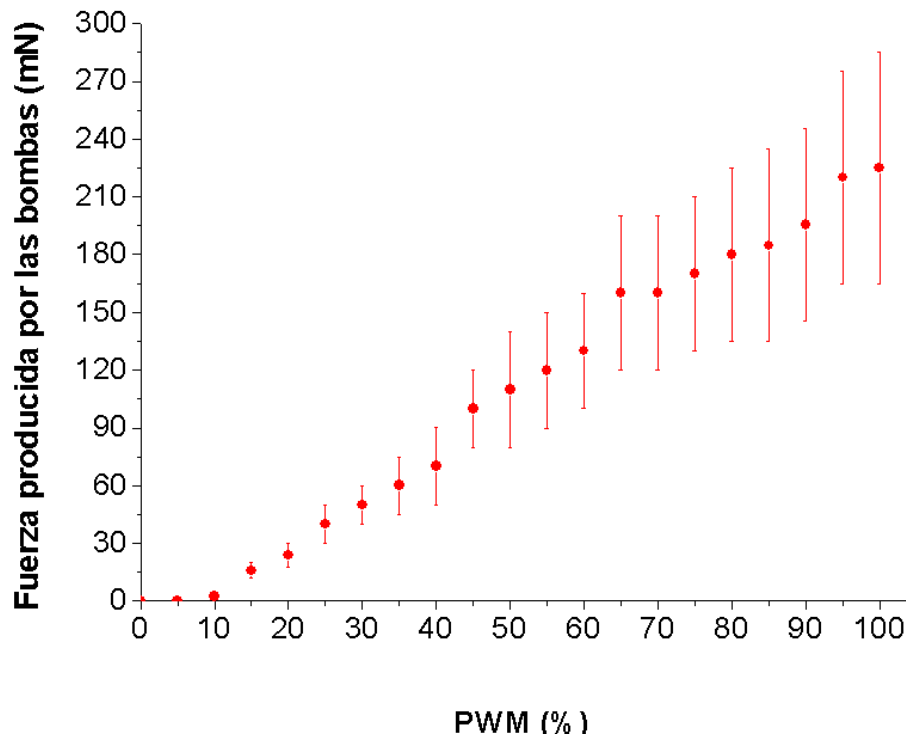


Figura 16 Gráfico estimativo de Fuerza en [mN] versus PWM en porcentaje.

Puede verse que recién a partir de una señal del 10 % de señal PWM, las bombas empiezan a succionar agua y produce una fuerza mínima de (2 ± 1) mN. Esta fuerza va incrementando proporcionalmente con la señal enviada, hasta llegar a un máximo de (225 ± 60) mN, correspondiente con el 100 % de PWM.

6. CONCLUSIONES

Se logró realizar el diseño conceptual de un módulo robótico para inspección de ambientes subacuáticos cerrados; centralizando este diseño en el sistema de propulsión a base de chorros de agua, direccionados por servomotores, ubicados simétricamente en una configuración esférica.

Se verificó cualitativamente el diseño mediante la construcción y el ensayo de un primer prototipo fabricado con materiales de fácil adquisición en el mercado local.

Se realizaron estimaciones cuantitativas de las fuerzas de propulsión generadas por las bombas, lo que da el inicio para el estudio y de los modelos dinámicos de control a implementar en etapas posteriores de optimización del diseño.

Algunos de los caminos posibles a seguir en la continuación del trabajo son: pensar en blindajes o medidas para soportar los ambientes radiactivos; investigar sobre métodos de comunicación y alimentación sin cables; desarrollar un sistema de propulsión dedicado



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

exclusivamente a regular el nivel de flotabilidad; y por último, incorporar sensores para cerrar el lazo de control de los movimientos del robot.

7. REFERENCIAS

[1] Cho, B.-H., Byun, S.-H., Shin, C.-H., Yang, J.-B., Song, S.-I., Oh, J.M., 2004. KeproVt: underwater robotic system for visual inspection of nuclear reactor internals. *Nuclear Engineering and Design* 231 (3), 327–335.

[2] A. Mazumdar, H.H. Asada, A Compact Underwater Vehicle Using High Bandwidth Coanda-Effect Valves for Low Speed Precision Maneuvering in Cluttered Environments, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp 1544-1550.

[3] Lin, X, Guo, S., Development of a spherical underwater robot, *Proc. of the IEEE-IICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2011, pp 662-665.

[4] Newson, E., Randle, K., Wells, O., Mills, N., Venning, L., Richardson, P., Water Jet ROV, Proyecto Fin de Carrera, University of Southampton, 2001.