

Sistema de obtención de curvas evolutivas de submarinos TR-1700

Trabajo presentado por

Isaías Vidal y Enrique Abella

Para optar al grado de
Ingeniero Mecánico

Director

Dr. Ing. Gustavo E. Carr

2017



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Gracias:

A nuestra familia, por el apoyo que nos brindan todos los días, y a los amigos que hicimos a lo largo de este camino, que ya son familia.

A todos los que nos aportaron su granito de conocimiento. Sin ustedes no hubiera sido posible llegar hasta acá.

Agradecimientos:

A los integrantes de la Escuela de Submarinos, la tripulación del ARA-San Juan y demás personal de la Armada Argentina, por la buena predisposición y el aporte realizado a este trabajo.

A Ricardo Zucal por ser nuestro mentor, consejero y amigo. Por el apoyo recibido a lo largo de estos dos años de trabajo, y por facilitarnos siempre todas herramientas que tuvo a su disposición.

Índice general

Índice general	III
Resumen	1
I Sistema de obtención de curvas evolutivas de Submarinos tipo TR1700	2
1. Introducción y objetivos del trabajo	3
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivos	4
Objetivos generales	4
Objetivos específicos	4
Tareas	5
2. Simulación	6
2.1. Concepto	6
2.2. Simulación militar	7
2.3. Validación	8
3. Simulación de submarinos	9
3.1. Simulador Submarino de la Armada de Turquía (DEDAS)	9
3.2. Simulación de submarinos en la Armada de Estados Unidos	11
3.3. Simulador de submarinos de la Armada Argentina	12
ADITACSUB – SIPER	12
Simulador Integral Submarino (SIS-01)	13
4. El submarino	18
4.1. Propulsión	18
4.2. Inmersión y navegación	19
4.3. Snorkel	21

4.4. El submarino ARA-San Juan	21
5. Física del movimiento del submarino	25
5.1. Dinámica del submarino	25
Dirección del submarino	25
Movimiento de aguas dentro del submarino	27
Posición del submarino	30
5.2. Fuerzas hidrodinámicas y momentos	31
5.3. Ecuaciones generales de movimiento con seis grados de libertad	36
5.4. Limitaciones	40
6. Sistema de navegación	41
6.1. Consola de control de gobierno (PL-10)	42
6.2. Limitación de los ángulos de timón	46
6.3. Sistema Dead Reckoning R-011 EU SubDR	47
6.4. Cálculo de posición	47
6.5. Salidas	48
7. Curvas evolutivas de movimiento	49
7.1. Definición	49
7.2. Límites de las curvas	52
7.3. Diseño de las curvas del submarino	53
Cambio de burbuja	53
Cambio de rumbo	55
Medición de la variación en la velocidad de desplazamiento . .	58
Medición de cambio de plano con planos de proa	60
7.4. Movimiento de agua en los tanques de líquido	61
Sistema de compenso	61
Sistema de balanceo	65
8. Sistema de medición y adquisición de datos	68
8.1. Composición del sistema	68
8.2. Unidades de medición	69
Unidad UNO	69
Unidad DOS	70
8.3. Datos obtenidos	73
Archivo de datos medidos	75
9. Análisis de Datos y Resultados	77
9.1. Cambio de plano	77
Comparación con información previa	79

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	v
9.2. Velocidad	79
9.3. Burbuja	82
10. Conclusión	84
II Apéndices	86
A. Simuladores existentes en Otros países	87
A.1. Fuerzas Armadas de Turquía	87
Centro de Entrenamiento de Simulación Submarina y de Buceo	88
A.2. Simulación de Submarinos en la Armada de los Estados Unidos	89
A.3. Otros simuladores en el resto del mundo	92
B. La Armada Argentina y el submarino A.R.A. San Juan	95
B.1. Comando de la Fuerza de Submarinos	95
C. Sistema de referencias	97
C.1. Sistema de ejes	97
C.2. Definición de velocidades	97
D. Ecuaciones de movimiento	99
D.1. Control de superficies	99
D.2. Propulsión	101
D.3. Ecuaciones generales de movimiento con 6 grados de libertad .	102
E. Sistema de adquisición basado en Arduino	107
E.1. Filtro de Kalman	107
E.2. Funcionamiento de un acelerómetro electrónico	108
E.3. Funcionamiento de un giróscopo electrónico	109
Bibliografía	111

Resumen

Gracias al trabajo de investigación realizado por esta tesis, se logró diseñar un sistema que, a través de una combinación entre datos adquiridos durante navegaciones reales y cálculos matemáticos, describa el movimiento de un submarino.

El sistema de medición y adquisición de datos será utilizado por la Armada Argentina, en la fabricación de un simulador de inmersión.

El simulador sirve para suplantar el adiestramiento en altamar por ejercicios en tierra, bajo un ambiente controlado. El mismo será instalado en la Escuela de Submarinos de la Armada Argentina, en la Base Naval de Mar del Plata.

Parte I

Sistema de obtención de curvas evolutivas de Submarinos tipo TR1700

Capítulo 1

Introducción y objetivos del trabajo

1.1. Introducción

En la Escuela de Submarinos y Buceo de la Base Naval de Mar del Plata se encuentra en desarrollo el Simulador Integral de Submarino (SIS), para el adiestramiento en tierra de futuros submarinistas. La Armada Argentina trabaja para el diseño del mismo en conjunto con la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Unicen) de Tandil y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. De acuerdo al convenio firmado entre las partes, la Facultad de Ingeniería se encarga del diseño estructural y la determinación de las ecuaciones de movimiento del simulador.

El adiestramiento de submarinistas en mar abierto significa, para la Armada Argentina como para cualquier armada del mundo, una cuantiosa inversión económica además del hecho de poner en riesgo la vida de la tripulación y la integridad del submarino en el proceso, sin tener en cuenta daños a terceros. Es por ello que surge la necesidad de introducir la simulación como una alternativa para intentar solucionar esta problemática.

Mediante la simulación es posible, con ciertas limitaciones aceptadas, reproducir la realidad en un entorno controlado. Un simulador puede “reproducir” el entorno, los comandos, el hábitat, la trayectoria y hasta el movimiento real del buque. Cabe destacar que solo interesa simular los movimientos que un tripulante de la nave pudiera llegar a sentir a bordo de la misma. No tiene sentido simular movimientos que no son percibidos dentro del buque.

Para resolver cuestiones relacionadas con la seguridad y la economía naval es clave tomar conocimiento de la dinámica del submarino, de cómo responde al actuar sobre sus variables de mando (planos), y de qué manera se encuentra sujeto a perturbaciones externas (corrientes, salinidad, columna de agua, etc.) e internas (nivel de tanques de líquido, distribución de la tripulación, etc.).

Por otra parte, es esencial tener en cuenta las limitaciones en la maniobrabilidad de la nave para mantener un rumbo deseado o cumplir con órdenes asignadas durante la navegación sin comprometer la integridad de la embarcación, ni la vida de sus tripulantes, tratando de seguir siempre la ruta óptima que signifique el menor gasto de combustible y recorrer distancias en el menor tiempo, dentro de los márgenes en los que el submarino permita actuar.

Una vez conocidas las curvas evolutivas de movimiento del buque (analizadas en detalle en el Capítulo 7), en este caso en particular para el submarino ARA-San Juan de la Armada Argentina, es posible establecer cuál es la secuencia de comandos que debería seguir un navegante para recorrer un trayecto determinado o realizar una maniobra que se le ordene. Para obtenerlas, se estudiaron primeramente los movimientos del submarino real.

Las curvas mencionadas son el motivo de este trabajo.

1.2. Objetivos

Objetivos generales

- Realizar una primera aproximación de las curvas de movimiento del submarino ARA-San Juan (Clase TR-1700) de la Armada Argentina que gobiernen los movimientos del simulador de submarino SIS-01.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de medición y toma de datos in situ.
- Determinar un sistema de obtención de curvas de movimiento para el submarino.
- Establecer posibles mejoras a futuro del sistema diseñado.

Tareas

- Hacer una revisión sobre los simuladores que existen en la actualidad, para poner en contexto la importancia a nivel mundial, del SIS -01.
- Analizar los fenómenos que se deben considerar a la hora de estudiar los movimientos del submarino.
- Estudiar como se controla el submarino.
- Definir un sistema de toma de datos y diseñarlo, adaptándolo a la medida de las limitaciones del submarino.
- Determinar el formato de las curvas en conjunto con el personal de la Armada.

Capítulo 2

Simulación

2.1. Concepto

Según el latín, el origen etimológico del término simulación surge de la unión de dos componentes léxicos latinos: la palabra “similis”, que puede traducirse como “parecido”, y el sufijo “-ion”, que es significa “acción y efecto”.

La simulación es la experimentación mediante un modelo acotado que reproduce o imita ciertos aspectos de la realidad según sea necesario. Así, se puede trabajar en condiciones similares a las reales, con un entorno que se asemeja al real, pero creado o acondicionado artificialmente y con variables controladas. Un modelo es básicamente una herramienta que nos permite responder interrogantes sobre el sistema y corregir errores o fallos, sin tener que recurrir a la experimentación sobre el mismo. Es una representación simplificada de la realidad.

En ingeniería se usa la simulación de procesos para diseñar productos que generen mayor beneficio, facilitando la realización de proyectos y tareas. En economía y finanzas se usan, por ejemplo, los simuladores de renta, para que los ciudadanos puedan llevar a cabo fácilmente su declaración fiscal. A nivel político, se puede mencionar el sistema de simulación electoral, utilizado para tratar de predecir el resultado de las elecciones.

Por último, en el ámbito militar, las simulaciones son habituales en el adiestramiento de pilotos de aviones, helicópteros, submarinos, tanques, etc. Esta práctica garantiza un ámbito seguro, protegiendo la vida de los practicantes, garantizando la conservación de los equipos y reduciendo el costo de operación.

2.2. Simulación militar

La simulación militar fue desarrollada con el fin de probar y refinar las teorías de guerra, sin necesidad de hacerlo durante hostilidades reales. Existen diferentes formas de simulación, de acuerdo con el grado de realismo alcanzado en la recreación de la actividad simulada.

Es posible establecer un rango de clasificación, de acuerdo al grado de intervención tecnológica, partiendo de ejercicios de campo (elevado costo, mayor fiabilidad) a modelos computarizados con escasa o nula intervención humana (menor costo, menor fiabilidad).

Las teorías más confiables se basan en datos obtenidos por observaciones reales, donde se pueden verificar datos de manera certera, como por ejemplo, tiempos de ejecución o el resultado de una acción en un escenario determinado. Sin embargo, esto no siempre es posible, o deseable, debido a la disponibilidad de recursos que la práctica demanda. Por otro lado, hay modelos de guerra que no se prestan para la verificación real, y ésta puede llegar a ser contraproducente, en caso de verse comprometida la vida de las tropas o el desgaste de los escenarios.

Alejándose de los ejercicios de campo, la teoría es puesta a prueba involucrando un número de personal más reducido. Los ejercicios pueden ser conducidos por oficiales de alto rango, sin la necesidad de que estos se muevan con las tropas.

Otra forma de categorización de la simulación militar, es dividir las en heurísticas y estocásticas. El primero, se basa en la búsqueda de soluciones a través de la práctica, y se aplica mayormente para estimular la investigación de operaciones. El segundo, incluye al menos algún elemento aleatorio y es incluido cuando aparece la simulación computarizada.

Las simulaciones militares deben ser lo más realistas posibles, es decir, diseñadas de manera tal que proporcionen resultados medibles, repetibles y que puedan ser confirmados por la observación de acontecimientos del mundo real. Esto es especialmente cierto en las simulaciones de naturaleza estocástica.

2.3. Validación

Cuando se habla de simulación hay que tener en cuenta siempre, que es una aproximación de la realidad, tan precisa como lo sea el modelo utilizado. En simulación, la validación es el proceso por el cual se prueba el modelo, comparando sus resultados con datos experimentales. Si el modelo reproduce de manera fiable los resultados conocidos, se considera validado y sus resultados se consideran útiles, con un grado de incertidumbre aceptado. Esto es cierto en modelos que responden a una lógica estocástica, pudiendo no cumplirse en los modelos de investigación de operaciones, de origen heurístico.

Capítulo 3

Simulación de submarinos

En la guerra naval, la clave consiste en detectar al enemigo, al mismo tiempo que se trata de evitar ser detectado por él. Se gasta mucho tiempo y esfuerzo en negar al enemigo la oportunidad de que pueda detectar la presencia de las propias fuerzas. Esta habilidad para la ocultación es la principal ventaja de los submarinos. Por esta razón, adquirieron vital importancia dentro de las Armadas del mundo a partir de la Primera Guerra Mundial, donde las batallas navales fueron determinantes durante el desarrollo de la misma.

Resulta trivial pensar en que la simulación de submarinos significa un factor clave de las teorías de guerra. Por tal motivo, en este capítulo y en el Apéndice A se muestra el acotado número de países que cuentan con esta tecnología en la actualidad, poniendo en contexto además, su poderío naval para cada caso. Esto permitirá al lector poner en valor a nivel mundial el trabajo realizado por la Facultad de Ingeniería de la UNMdP, en conjunto con la Armada Argentina. Si bien mayoría de las Armadas poseen simuladores en servicio, solo algunas cuentan con tecnologías modernas que inciden en el realismo y la integración con múltiples sistemas y tareas.

3.1. Simulador Submarino de la Armada de Turquía (DEDAS)

Las Fuerzas Armadas de Turquía (Türk Deniz Kuvvetleri)[1] constituyen una de las diez flotas más grandes a nivel mundial, y por lo que se considera un parámetro de referencia en el análisis sobre de la importancia de la simulación. La flota submarina turca, según su página oficial actualizada al año 2016, está compuesta por un total de treinta y dos submarinos, de los cuales

se encuentran activos trece en total y son del tipo diésel/eléctrico, de la clase 209 y 214.

La Fundación de las Fuerzas Armadas de Turquía se encuentra, desde el año 1982, asociada a la compañía Havelsan [2] para el adiestramiento de su personal. Dentro del abanico de simuladores de la compañía, se encuentra el DEDAS [3], diseñado para el entrenamiento del personal de submarinos, tanto en operaciones de inmersión, de superficie, como en situaciones de emergencia. Posee además un gran abanico de escenarios de entrenamiento en situación de inmersión.

El simulador submarino, forma parte del Centro de Entrenamiento de Simulación Submarina y de Buceo [4]. En el Apéndice A se detallan las partes que lo componen. También, se muestran algunos de los simuladores de helicópteros, aviones y drones, que Havelsan desarrolla para la Armada de Turquía, pero que también comercializa a nivel mundial a otros países, como Brasil y Estados Unidos.

La Fig. 3.1 muestra el diseño de la cabina de buceo. Este simulador recrea el movimiento de cabeceo o burbuja (inclinación adelante-atrás) y el de escora (inclinación izquierda-derecha) del submarino (estos movimientos, así como los ejes de referencias están descritos en detalle en el Apéndice C). La Fig. 3.2 es una imagen del interior del simulador de control y radar. No se encuentra dentro de la plataforma móvil, dado que los conceptos que se muestran aquí, no están relacionados con el movimiento del buque.

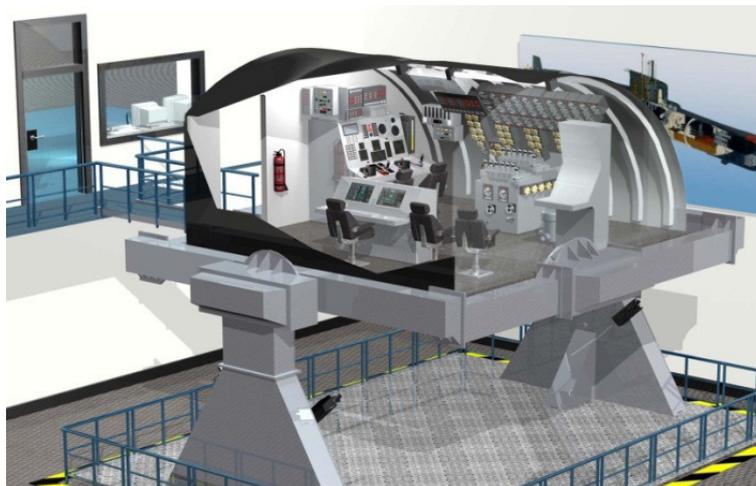


Figura 3.1: Simulador inercial (cabina de buceo).

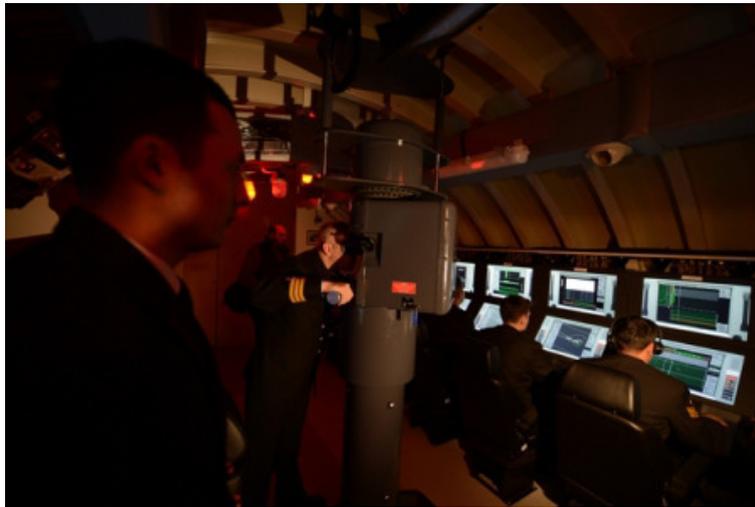


Figura 3.2: Imagen del interior del simulador de control y radar.

3.2. Simulación de submarinos en la Armada de Estados Unidos

En el Estado de Georgia se encuentra una de las bases navales de la Marina de los Estados Unidos donde se ubica el Centro de Formación King Bay [5]. Allí, la Marina cuenta con una serie de simuladores para el entrenamiento de las tropas, algunos de los cuales se detallan en el Apéndice A. Entre ellos, posee un simulador submarino de radar y control, un simulador virtual de submarino para la navegación en superficie y un simulador inercial de navegación submarina donde se pueden realizar maniobras de inmersión y ensayar situaciones de emergencia. (Ver Apéndice A)

El simulador de la Fig. 3.3 [6] se encuentra montado sobre una base hidráulica y permite simular la navegación del buque en diferentes escenarios y ejercicios y recrea solo el cabeceo del buque. En la Fig. 3.4, se muestra el simulador inercial utilizado años atrás por los alumnos de la escuela militar estadounidense, bajo la supervisión de sus profesores. Este simulador recreaba todos los grados de libertad del submarino pero con poca exactitud, puesto que los movimientos eran muy pronunciados, y la reacción del simulador a los comandos difería del caso real a niveles no representativos de la realidad.



Figura 3.3: Simulador de submarino actual.



Figura 3.4: Simulador de submarino de la década de los 80s

3.3. Simulador de submarinos de la Armada Argentina

ADITACSUB – SIPER

La Armada Argentina cuenta, en la Escuela de Submarinos y Buceo de la Base Naval de Mar del Plata, con un Adiestrador Táctico de Submarino (ADITACSUB). Esta sala posee equipos extraídos de los submarinos TR-1700 que fueron dados de baja en su etapa de construcción.

El ADITACSUB permite ensayar el manejo de radar, el sonar pasivo y el activo. Gracias a una modernización incorporada trabajando en conjunto con la Unicen de Tandil también posee un sistema denominado SIPER, conectado con un periscopio real, y adaptado con una pantalla de realidad virtual. Simula la superficie marina, con diferentes escenarios, condiciones climáticas y buques. Esto permite una práctica fundamental de la navegación submarina, que debe realizarse en todo momento.

Por otro lado, posee un simulador de navegación de submarino, que mediante dos computadoras enlazadas. Se puede fijar, en una de ellas, el número de revoluciones de la hélice, el rumbo, la profundidad, el ángulo de los planos y el timón. En la otra computadora puede observarse cómo varía la posición del submarino de acuerdo a las variables establecidas mediante indicadores analógicos simulados en el programa Timonel – DIRAC.

Una de las limitaciones que se plantean en el ADITACSUB, es que el simulador de navegación no está realizado en base a ninguno de los submarinos actualmente en servicio. El sistema fue realizado con las curvas evolutivas de movimiento del submarino ARA Santa Fe (S-21), fuera de servicio desde 1982. Si bien sirve como referencia, su comportamiento difiere de los submarinos en servicio. Otra limitante importante, es el hecho de que todo el simulador se encuentre montado en una sala, es decir, fijo a tierra. Privando de factores sensoriales y de movimiento que también deben ser adquiridos en la práctica por los aspirantes a submarinistas.

Simulador Integral Submarino (SIS-01)

- Surgimiento del Proyecto

A mediados de 2013 inició un vínculo entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mar del Plata, y la Escuela de Submarinos y Buceo de la Armada Argentina, ubicada en la Base Naval de Mar del Plata. Mediante un convenio firmado por ambas partes se planteó realizar, en la Facultad de Ingeniería, el diseño estructural de una plataforma inercial de simulación submarina como parte del proyecto SIS-01 (Simulador Integrado de Submarino).

La Armada, a su vez, comenzó a trabajar con la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires de Tandil. Desde el Instituto Pladema, se diseñó un software que funcionará como el “cerebro” del simula-

dor, interconectando las consolas y los comandos que moverán la plataforma. Por otra parte, desde el INTIA (Instituto de Investigación en Tecnología Informática Avanzada) se desarrolló un sistema embebido para la integración de consolas reales extraídas de un submarino TR 1700 fuera de servicio.

- Diseño estructural del simulador

Inicialmente, se pensó al simulador montado sobre una plataforma descubierta en la que se ubicarían las consolas y comandos del submarino. Para el diseño, se asignó el desarrollo de un trabajo final de dos alumnos de la Facultad de Ingeniería, quienes realizaron el dimensionamiento y análisis estructural de la misma.

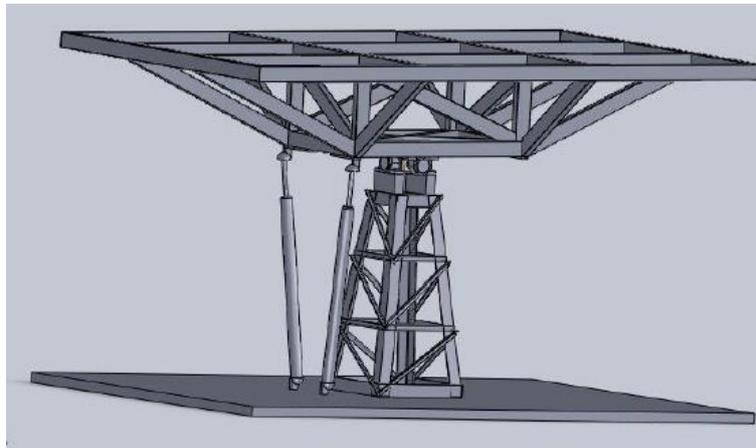


Figura 3.5: Prototipo de la plataforma realizado en SolidWorks por Guillermo Miguel Martínez y Ricardo Agustín Tieri, en su proyecto final “Pre-diseño de simulador de submarino” (2013) [7].

Luego, a través de la modalidad de prácticas profesionales supervisadas, varios alumnos de ingeniería realizaron el análisis de los actuadores de movimiento y la articulación de la plataforma. Se determinó el tipo de actuadores más convenientes y los vínculos adecuados, de acuerdo a variables como: la velocidad de reacción, recorrido de los actuadores, peso de la plataforma y el costo de cada sistema.

Para reproducir fielmente el entorno de simulación, se optó por montar sobre la plataforma una cabina que recree el habitáculo del submarino. Primero, se realizó el renderizado de la cabina con la colaboración de un diseñador gráfico. Luego, se realizó el análisis mecánico de la misma. Para

ello, se asignó esta tarea a otros dos alumnos de ingeniería, que mediante su trabajo final diseñaron y calcularon la estructura de la cabina. Algunos de los factores considerados en este análisis fueron: la iluminación, climatización, sonidos, vibraciones, aspectos visuales, movimientos, disposición de los equipos, accesorios del submarino.



Figura 3.6: Vista externa renderizada del simulador, realizada por el diseñador gráfico Diego E. Franco. (2015).



Figura 3.7: Diseño realizado por Fernando Perez Iacono y Luciano Zabaldano en su Proyecto Final “Cabina de Simulador de Submarino para Entrenamiento de Tripulaciones” (2016) [8].



Figura 3.8: Otra vista del diseño realizado por Fernando Perez Iacono y Luciano Zabaldano en su Proyecto Final “Cabina de Simulador de Submarino para Entrenamiento de Tripulaciones” (2016).

Por último, y de acuerdo al convenio firmado con la Armada, la participación de la Facultad de Ingeniería en el diseño del simulador ARA SIS-01 finaliza con el cálculo de las ecuaciones de movimiento del submarino, motivadoras de este trabajo final. Dichas ecuaciones, tienen como objetivo darle al simulador la posibilidad de reproducir los movimientos del buque real, es decir, ante el accionamiento de los comandos durante la simulación, permitir que el simulador se mueva con la velocidad angular, y dentro del rango de acción que sucede en una maniobra real.

Tener conocimiento sobre cómo se desplaza el submarino real, permite simular la ubicación en el espacio del submarino y su “desplazamiento” de acuerdo a los comandos accionados. Asimismo, permite ensayar maniobras a diferentes profundidades, velocidades y estados del mar, teniendo en cuenta que, el buque reacciona de diferentes maneras ante alguna modificación en una gran cantidad de variables aleatorias.

De acuerdo a lo visto en el capítulo anterior, se puede afirmar que el diseño del SIS-01 se encuentra al nivel de los simuladores de submarino de las Armadas líderes del mundo, pasando a formar parte la Armada Argentina, del selecto grupo de países que disponen de esta tecnología para el adiestramiento de sus tropas.

- Limitaciones

En el campo de la simulación, uno de los aspectos clave es las limitaciones del modelo a utilizar, dado que tendrá influencia directa sobre el grado de realismo de la simulación. Por otra parte, no tiene sentido simular movimientos o situaciones que no son advertidas sensorialmente en una situación real, evitando de esta forma malgastar recursos.

El SIS-01 se diseñó montado sobre una plataforma de movimiento, que le da la posibilidad de recrear el cabeceo o cambio de burbuja. Al igual que en otros simuladores de submarino existentes, no se contempló la simulación del giro que define el rumbo de navegación, puesto que éste no se puede percibir.

Un aspecto clave a discutir es el hecho de que el SIS-01 simula el movimiento de escora, es decir el giro alrededor del eje longitudinal del submarino. Este movimiento, en una maniobra durante una navegación normal, significa un giro de 1° o 2° por minuto, con un ángulo máximo en situaciones de emergencia de 5° . Algunos simuladores en otras partes del mundo, que ensayan típicamente maniobras de emergencia, reproducen este movimiento. En conversación con personal de la Armada durante el desarrollo de esta tesis, se llegó a la conclusión de que esta característica podría prescindirse en el SIS-01, basándonos en que no es advertida sensorialmente a bordo del submarino.

Finalmente, no se simularán tampoco ejercicios de navegación en superficie, dada la inestabilidad del buque en esta situación y los rápidos movimientos que esta genera. Para reproducir la sensación de navegación en superficie, bastaría con que la plataforma siguiera un comportamiento estocástico, con aceleraciones y rangos de movimiento que mucho mayores que durante la navegación en inmersión. El dimensionamiento del sistema de movimiento sería entonces más complejo, y significaría un aumento en los costos para una aplicabilidad prácticamente nula, por lo que fue desestimado.

El rango de ángulos de operación de la plataforma del simulador, es de 20° para el rolido y 30° para el cabeceo, para cada lado. Y el de velocidades de rotación es de $2^\circ/s$ en ambos sentidos.

Capítulo 4

El submarino

4.1. Propulsión

Actualmente, la propulsión utilizada por los submarinos en funcionamiento en todas las Armadas del mundo son del tipo Nuclear o Diesel-Eléctrico. La mayoría de los submarinos diseñados en el siglo XX usan baterías eléctricas para la navegación subacuática y motores de combustión interna para recargar las baterías, como es el caso de los submarinos argentinos. Cuando el submarino se sumerge, se apaga el motor diésel, de forma que el motor eléctrico gira la hélice haciendo uso de la energía de las baterías. El motor eléctrico puede tener más de un inducido sobre el eje, estando eléctricamente acoplados en serie para velocidades bajas y en paralelo para velocidades altas.

En el caso de los submarinos con propulsión nuclear, se elimina la necesidad de utilizar oxígeno atmosférico. Estos submarinos pueden permanecer sumergidos indefinidamente, siempre y cuando duren las reservas de alimento (el aire para la tripulación se recicla y el agua potable se obtiene por destilación del agua de mar). Estos buques siempre tienen una pequeña batería y un generador diésel para situaciones de emergencia si los reactores nucleares deben ser detenidos.

La energía nuclear se usa actualmente en todos los submarinos de gran tamaño, pero debido al elevado costo y gran porte de los equipos nucleares, los submarinos más pequeños siguen usando propulsión diésel-eléctrica. Los primeros son más rápidos y grandes, tienen más potencia de fuego y mayor autonomía que los segundos. Dependiendo de la misión a la que se destinen, los submarinos diésel-eléctricos son a veces más adecuados para misiones en

aguas poco profundas o costeras.

La Armada Estadounidense, por ejemplo, cuenta sólo con submarinos nucleares, lo que puede justificarse por la necesidad de operar transoceánicamente. Otras potencias militares cuentan con submarinos nucleares para fines estratégicos y buques diesel-eléctricos para la defensa costera. La mayoría de las flotas carece de submarinos nucleares debido a la poca disponibilidad de la tecnología nuclear y submarina. Por otro lado, varias Armadas han empezado el desarrollo de buques de propulsión anaeróbica que combinan las ventajas de los que ambos sistemas de propulsión.

4.2. Inmersión y navegación

El centro de carena del submarino se define como el baricentro del volumen de agua desplazado y es, a través de ese punto, que el empuje actúa en forma vertical y hacia arriba, mientras que la fuerza peso lo hace en dirección contraria, pasando por el centro de masa. La ubicación del centro de carena (o de flotabilidad), puede variar, si varía la cantidad de agua que el submarino desplaza. Cuando esto sucede, el empuje y el peso producen un par que tiene a estabilizar el buque, regresándolo a su posición original. Podemos analizar el caso particular de un submarino, que al estar sumergido, el centro de carena y el baricentro del mismo coinciden en un punto. [9]

En superficie, el submarino, al igual que todos los buques, se encuentra en flotación positiva. Esto significa que, siguiendo el principio de Arquímedes, su peso es menor que el peso del volumen de agua desalojada. Es decir que su centro de gravedad (G), se encuentra por encima del centro de carena (B). Para sumergirse el submarino incrementa su peso. En contraposición, para emerger, libera lastre. Estas dos condiciones de flotación se pueden apreciar en la Fig. 4.1 [10]

En situación de inmersión, los tanques de lastre, ubicados fuera del casco resistente, permanecen inundados, por lo que el centro de gravedad se ubica por debajo del centro de carena. Para un control preciso de la profundidad, los submarinos disponen de depósitos más pequeños, capaces de soportar altas presiones y que se ubican cerca del centro de gravedad del submarino para evitar que afecten a la posición del centro de masas. Estos tanques se denominan tanques de compenso. Este sistema de control y regulación de las masas del submarino complementa durante la navegación la acción con los

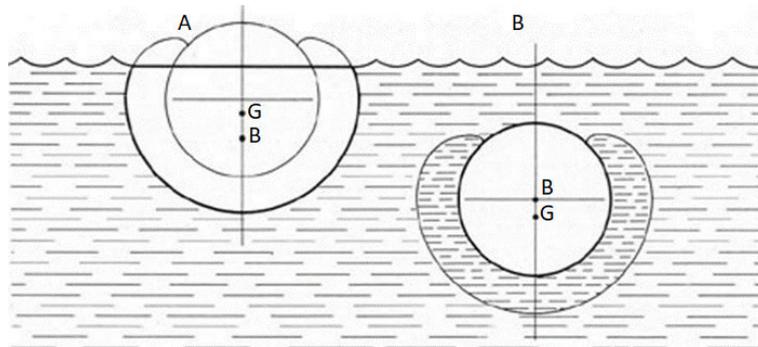


Figura 4.1: En la figura se muestra el cambio de las posiciones relativas de G y B según sea la condición de navegación, en superficie y en inmersión.

diferentes planos de direccionamiento y la hélice. En el Capítulo 5 se detalla el análisis de estos sistemas, haciendo énfasis en los que posee el submarino estudiado en esta tesis.

A medida que el submarino gana profundidad, el aumento de la presión externa producida por la columna de agua, trae aparejada una disminución del volumen del submarino (se comprime), lo cual se traduce en una disminución del desplazamiento de agua (disminuye el empuje). Por otro lado, también aumenta la densidad del agua con la profundidad, por lo cual incrementa el empuje, pero no lo suficiente como para compensar la compresión del casco. Como consecuencia, la flotabilidad del submarino disminuye con la profundidad.

Para que el submarino navegue hacia aguas más profundas de manera controlada, deben mantenerse equilibrados el empuje y el peso, achicando agua de los tanques de líquido. Las particularidades del caso serán analizadas en el Capítulo 7.

De lo anterior, se puede concluir que un submarino sumergido se encuentra en un equilibrio inestable, tendiendo a flotar hacia la superficie, o a caer hacia el fondo. Para regular este fenómeno, los submarinos cuentan con depósitos de lastre, que se llenan con agua tomada del exterior. Cuando el submarino realiza una emersión de emergencia, se utilizan simultáneamente, todos los métodos de control de la profundidad disponibles para propulsar al buque hacia arriba, pudiendo expulsar miles de litros de agua y aire a alta presión en unos pocos minutos. Dicha emersión es muy rápida, por lo que el submarino puede incluso, saltar parcialmente fuera del agua. Lo mismo



Figura 4.2: Imagen de un submarino ruso realizando una emersión de emergencia.

ocurre cuando en una situación no deseada, el submarino se va a pique por un mal compenso del mismo, debiendo ventear los tanques de aire y agua, para evitar colisionar con el fondo del lecho marino, por ejemplo.

4.3. Snorkel

Los Snorkel son usados para navegar justo por debajo de la superficie, intentando evitar la detección visual y por radar. Tanto el periscopio, como el snorkel, el mástil de radar y las antenas, se izan a una profundidad denominada, profundidad de periscopio. A esta distancia de la superficie, los submarinos diesel-eléctricos pueden navegar sumergidos, pudiendo usar el aire exterior para hacer funcionar sus motores diésel, y así cargar sus baterías.

Al desplegar las antenas, y hasta esta profundidad, se cuenta con la posibilidad de utilizar la localización por GPS. Esta limitante será tratada en el Capítulo

4.4. El submarino ARA-San Juan

El ARA-San Juan es del tipo diésel-eléctrico, al igual que todos los submarinos que posee la Armada Argentina (Consultar Apéndice B). Está provisto de snorkel con mástil izable. La profundidad de periscopio en este caso es de 18 metros, medidos desde la base del buque. Cuenta con 960 baterías



Figura 4.3: Imagen de snorkel (punta roja) y antenas de un submarino navegando a profundidad de periscopio.

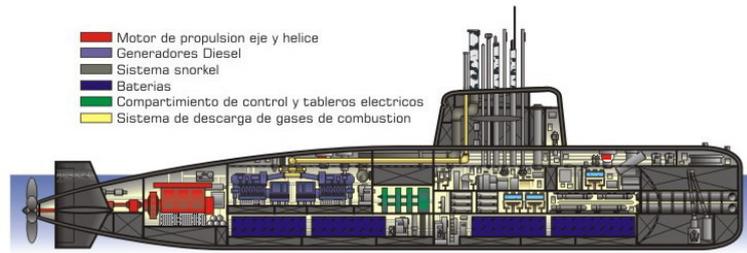


Figura 4.4: Corte longitudinal de un TR 1700. Las partes principales se enumeran, y están en diferente color.

de plomo-ácido, que alimentan un motor eléctrico de 6400 kilowatts para la navegación en inmersión. Para la navegación en superficie y hasta la profundidad de periscopio cuenta con 4 motores diésel de 16 cilindros en V y 1200 kilowatts de potencia cada uno, los cuales accionan cuatro alternadores de 4000 amperes, para cargar las baterías que le dan energía el motor eléctrico. Como lo indica su Clase (TR-1700), pesa 1700 toneladas en seco, mientras que cargado y sumergido, pesa en total 2336 toneladas. Con casi 61 metros de eslora, 8 metros de manga y 7 metros de calado, se lo considera un submarino oceánico, y puede operar durante períodos en inmersión tales como para dar la vuelta al mundo en la latitud de Mar del Plata. Su velocidad crucero es de 6 nudos (11 km/h), pudiendo navegar hasta 15 nudos (27,8 km/h) operando con snorkel, y alcanzar y sostener una velocidad máxima en inmersión de 25 (46 km/h) nudos.

En la figura 4.4 se pueden observar las partes principales, y su distribución dentro del submarino. En la parte inferior, de proa a popa y en gris, se encuentran los tanques de combustible. Tanto en la proa, como en la popa, se encuentran los tanques de lastre y de balanceo, mientras que los tanques de compenso están en el centro del submarino. Estos, se describirán en profundidad en el Capítulo 5. En el centro, se encuentra la sala de control, donde se ubica el sistema de navegación y control del buque. Este es el sector del submarino que se reproducirá en el simulador.

La figura 4.5 es una imagen del ARA-San Juan fuera de borda, luego de su reparación de media vida en 2009, antes de su regreso al servicio de la Armada. La imagen le brinda al lector una noción real de las dimensiones de los diferentes planos de direccionamiento, timón, y hélice respecto del tamaño del buque.



Figura 4.5: El ARA-San Juan fuera de borda.

Capítulo 5

Física del movimiento del submarino

La matemática es una herramienta imprescindible para el estudio de cualquier sistema físico, y esta no es la excepción. A la hora de abordar cualquier análisis o diseño, es necesario elaborar un modelo con fundamento matemático que se ajuste lo más fielmente posible al sistema real de navegación del submarino, utilizando para ello las leyes físicas aplicables a este caso, o en su defecto, resultados experimentales debidamente tratados. Lo que obtendremos será un conjunto de curvas, con ecuaciones (no necesariamente lineales ni invariantes en el tiempo), que podremos analizar mediante algún método conocido.

El procedimiento será establecer primeramente las variables que intervienen en el proceso de la navegación para, posteriormente interrelacionarlas entre sí, mediante las leyes físicas que regulan esta situación.

En este capítulo, vamos a realizar una breve introducción al procedimiento a realizarse, sin profundizar exhaustivamente en el mismo, pues carece de sentido a los fines de esta tesis. Sin embargo, servirá para tomar algunos conceptos fundamentales a tener en cuenta.

5.1. Dinámica del submarino

Dirección del submarino

Durante una navegación, la dirección del submarino se gobierna con la posición de los diferentes planos de direccionamiento que posee. A diferencia de un buque de superficie, que solo cuenta con el timón y la hélice, el

submarino, tiene también otras superficies fijas y móviles, que se especifican a continuación para el ARA-San Juan:

Vela: Forma parte del casco del submarino, y está adherida al casco principal. El objetivo de esta, es aumentar la estabilidad del buque en inmersión, desplazando el baricentro hacia arriba. Estabiliza el rumbo del submarino, haciendo que una variación en este, se realice alrededor de un eje que pase a través suyo. Otra función, es resguardar las diferentes antenas, mástiles y periscopios. En la parte superior delantera, tiene una escotilla utilizada por la tripulación durante la navegación en superficie, por ejemplo, durante el ingreso a puerto.

Hélice de popa: La hélice de popa impulsa el submarino hacia adelante y es accionada por los motores eléctricos como se describe en el Capítulo II. El diseño de la misma, es muy complejo y representa una parte crucial en la navegación, que se considera información clasificada. Si el enemigo conociera de qué forma se impulsa el submarino, podría deducir cómo abatirlo fácilmente en combate.

Hélice de proa (bow thruster): Algunos submarinos poseen una hélice en la proa, que impulsa el buque transversalmente, generalmente para maniobras como el amarre a puerto. No es el caso del ARA-San Juan, por lo que su análisis no será tenido en cuenta.

Hidroplanos: Esta denominación se utiliza para agrupar el timón y los planos que actúan con el flujo de agua circundante al submarino. En la figura 5.1 se indica la ubicación de cada uno sobre el submarino y son:

- **Timón:** Está ubicado en la popa y formado por dos planos, sirve para cambiar el rumbo del buque. Para virar a babor o estribor, simplemente se modifica el ángulo de la parte móvil del timón, respecto de la parte fija, que se encuentra alineada con el eje x. Otra función, es estabilizar el rolido del submarino.

El plano inferior es ligeramente más corto que el superior, de manera que no sobresalga del casco, y le permita al buque navegar cerca del fondo del mar.

Sin embargo, esto trae como consecuencia, un aumento de la inestabilidad cuando se navega en superficie.

- Planos de la vela: Son usados para cambiar el plano de navegación, es decir, modifican la posición en z_0 del buque. En otros submarinos, estos planos se ubican en la proa, variando de esta forma, el efecto que producen sobre el cabeceo.
- Planos de popa: Son usados para cambiar la burbuja. Producen o corrigen el cabeceo del submarino durante las maniobras de cambio de plano. Cumplen una función similar a la del timón, estabilizando también el rolido. También se denominan planos de proa.

Durante la navegación se distinguen dos tipos de maniobras de cambio de plano, de acuerdo a las condiciones en la que esta se realice. A baja velocidad, o para cambios leves en la profundidad de navegación, el submarino utiliza solo los planos de popa. Pero si se navega a gran velocidad, o si se requiere una gran variación de la profundidad, se utilizan tanto los planos de popa como los de la vela.

El ARA- San Juan, presenta una disposición de los planos de popa y los planos del timón en “+”. Esta configuración simplifica la navegación para el submarinista, puesto que para cada cambio de dirección se utilizan planos diferentes. Pero trae como consecuencia, el hecho de que si un plano deja de funcionar, disminuye considerablemente la maniobrabilidad en la dirección que éste controla. En caso de averiarse dos planos, puede perderse completamente la maniobrabilidad en una dirección dada. Otros submarinos, poseen una configuración en “X” donde todos los planos controlan el cabeceo y el rumbo. Por lo que, son más difíciles de controlar por un lado, pero como ventaja, pueden navegar aun con dos planos averiados.

Movimiento de aguas dentro del submarino

El ARA-San Juan cuenta con 34 tanques de líquido en total, de los cuales, solo son de interés para esta tesis 13 de ellos, los que están relacionados con la navegación, y son los tanques de compenso, lastre y balanceo. Los 21 tanques restantes contienen: combustible, aceite, agua dulce, aguas servidas, y sustancias sanitarias. (Para ver la ubicación de los tanques consultar el Apéndice B).

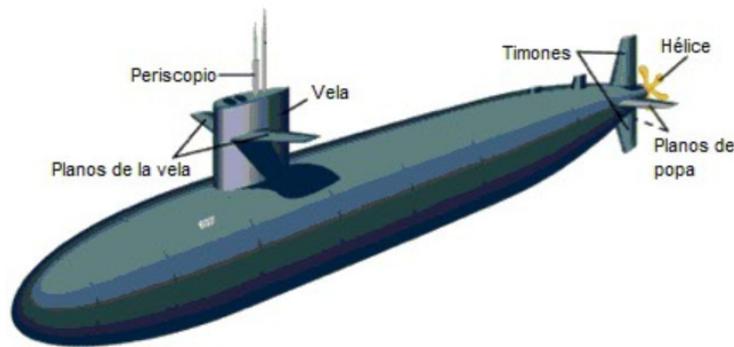


Figura 5.1: Descripción de los hidropianos del submarino.

Al igual que como se hizo con los diferentes planos del submarino, para el estudio del movimiento de aguas es necesario realizar una diferenciación entre los sistemas que existen en el buque, de acuerdo a su uso.

Sistema de balanceo: Sirve para nivelar horizontalmente el submarino en el eje longitudinal y transversal, teniendo en cuenta el estado de carga respectivo, y de llevarlo a la profundidad de inmersión deseada sirviéndose de los tanques de lastre.

El sistema de balanceo consta de una bomba (que impulsa 24.000 litros por hora) para llenar o vaciar los tanques de balanceo, un sistema de medición de caudal y diversos accesorios. Este sistema además está asignado al venteo de los tanques de lastre, accionamiento y accesorios.

Mediante el sistema de balanceo se nivela el submarino en burbuja cero, o se le da una burbuja determinada para la inmersión o salida a superficie. Esto se hace distribuyendo el agua a los tanques de balanceo según sea necesario, mediante la bomba de balanceo y a través de las válvulas de regulación de caudal. El contenido respectivo de los tanques de balanceo se determina mediante sistemas de medición de caudal.

Los tanques de lastre principales llevan instalados venteos en sus puntos más altos, para efectuar el venteo durante la inundación. Al abrir los venteos, ubicados en la parte superior del casco, venciendo la presión interna de los tanques de lastre, se inicia el proceso de inmersión. El colchón de aire escapa de los tanques de lastre, ingresando agua en los mismos a través de las rendijas de inundación ubicados en la parte inferior. Cuando el submarino sobrepasa en algunos metros el plano ordenado, realiza un movimiento

pendular de 3° a 4° hacia popa y hacia proa con el fin de que no queden bolsas de aire en los tanques de lastre. Cuando finaliza, se vuelven a cerrar los venteos.

Sistema de compenso: Sirve para mantener constante la flotabilidad positiva o negativa del submarino con independencia de las variaciones de peso del submarino debidas a: consumo de materiales de servicio (aceite de motores, combustible, etc.), consumo de víveres y agua dulce, variaciones en la densidad del agua de mar debidas a diferencias en la salinidad y vías de agua excesivas.

Este sistema sirve como complemento a la acción de los planos, para mantener la profundidad de inmersión deseada, a través del control del volumen de agua en los tanques de compenso. Esto se realiza llenando o achicando según necesidad los tanques, mediante la bomba de compenso. En caso de una emergencia, los tanques pueden soplarse mediante aire comprimido, para lograr el achique de los mismos de manera más veloz.

Los tanques de compenso de baja presión de babor y estribor están dispuestos en el interior del casco resistente, encima del compartimento de control de máquinas, y el central, situado debajo del compartimento de bombas de popa, en la misma sección en crujía. Los tanques de compenso de alta presión se encuentran encerrados dentro de los de compenso de babor y estribor de baja presión.

Sistema de achique: Sirve para el achique de las sentinas de los recintos de proa y de popa; los compartimentos de baterías: el tanque de compenso de los torpedos; el tanque de aguas servidas; el tanque del snorkel, el pozo del periscopio. Vertiendo el agua que haya ingresado al buque directamente hacia el mar, o hacia los tanques de compenso.

Para navegación en superficie o de poca profundidad el agua de achique se bombea directamente hacia el exterior. Mientras que para la navegación en aguas profundas, el agua de achique es impulsada por la bomba de achique, hacia los tanques de compenso, desde los cuales se bombea al exterior a través de las bombas de compenso o con aire a presión en caso de emergencia. En el caso de fallar la bomba de achique, se usa la bomba de compenso para realizar su tarea. Si esta tampoco se encontrara en condiciones de funcionamiento, se mantiene un régimen de emergencia mediante la bomba de agua de mar

de refrigeración del motor de propulsión y las bombas de agua de mar de refrigeración del sistema de baterías.

Posición del submarino

El submarino puede ser considerado como un sólido rígido con 6 grados de libertad, definidos mediante 6 variables independientes. Considerando una terna de ejes (x, y, z) solidaria al buque, y otra (x_0, y_0, z_0) solidarias a la tierra, el submarino puede realizar los siguientes movimientos: rotaciones respecto de los ejes (x, y, z) y desplazamientos respecto de (x_0, y_0, z_0) .

A diferencia del análisis que se realiza para el movimiento de barcos o navíos, en el caso de los submarinos es importante el desplazamiento en el eje z , debido a las maniobras de inmersión y cambio de plano. En el análisis que se realiza en este trabajo, la rotación alrededor del eje z sólo se utiliza para ubicar el submarino en el espacio, dado que no se simula.

Una vez realizada la maniobra de inmersión, se navega a “plano” constante, es decir, a un valor de z_0 constante, por lo que la posición del buque varía en el plano horizontal (x_0, y_0) . La posición del submarino queda definida entonces por la velocidad absoluta V , siendo (u, v) sus componentes en el plano (x, y) , y los ángulos de los diferentes planos:

- ψ (rumbo del buque) medido sobre el plano (x_0, y_0) . Que se modifica variando γ (ángulo del timón) medido sobre el plano (x, z)
- α (ángulo del plano de popa) medido sobre el plano (x, z) .
- β (ángulo del plano de la vela) medido sobre el plano (x, z) .

Una variación de los ángulos de los planos de popa y de la vela del submarino, sirve para cambiar el plano de navegación. La diferencia radica en la velocidad con la que se realiza la maniobra y la actitud que adopta el submarino. Los planos de popa modifican la burbuja, produciendo o corrigiendo el cabeceo del buque, es decir, rotan el plano (x, z) alrededor del eje y . Mientras que los planos de la proa solo varían la posición en z_0 .

Lo anterior es solo idealmente cierto: para mantener el submarino navegando a plano constante se debe corregir continuamente el nivel de los tanques de compenso, tanto como el ángulo de los hidroplanos. A su vez, para las maniobras de inmersión y cambio de plano, se utilizan en conjunto los tanques de balanceo. Estas variables se aprenden a controlar a través

de muchas horas de entrenamiento, y de experiencia en navegación. Es ahí donde la simulación juega un papel fundamental.

5.2. Fuerzas hidrodinámicas y momentos

Para realizar un análisis de los fenómenos que ocurren durante la navegación y que tienen incidencia sobre el submarino, primero es necesario repasar conceptos clave. Luego, se verá si son considerados o no en esta tesis, para el desarrollo de las ecuaciones del ARA-San Juan.

Fuerzas hidrostáticas:

Su efecto se analizó en el Capítulo 4, en la sección 4.2, Inmersión y Navegación.

Fuerzas hidrodinámicas

Como todo cuerpo que se desplaza en un fluido, el submarino experimenta una fuerza de arrastre en la dirección del fluido entrante. Se dividirán esas fuerzas de acuerdo a [11] en:

- **Arrastre de presión**

Es la fuerza que comúnmente se llama arrastre (drag). Cuando un cuerpo se desplaza en el agua, suprime líquido en la parte delantera para avanzar. Esto depende en gran medida de la forma del cuerpo, cuanto más aerodinámico, experimentará menos arrastre de presión.

Se puede interpretar como una diferencia de presión. Al frente, donde se desplaza fluido para hacer lugar al submarino, hay un incremento de la presión. En la popa, el fluido va ocupando el espacio que el submarino dejó detrás, la presión allí, será menor. Esta diferencia de presión induce una fuerza, similar a la que se produce en el ala de un avión. Una popa menos aerodinámica, también creará turbulencia, que reduce más la presión en la popa y aumenta la fuerza de arrastre.

- **Arrastre por fricción**

Surge de la fricción entre el submarino y el fluido circundante. Cuando el submarino se desplaza, acelera el agua circundante más cercana a su

superficie. Se puede ver como capas de agua paralelas, cada una con velocidades diferentes disminuyendo con la distancia, desde la superficie del buque. A bajas velocidades este flujo de agua es laminar, provocando poca fricción y ruido, pero a medida que la velocidad aumenta, aumenta la turbulencia, aumenta la fricción y el ruido.

- **Amortiguación de las olas**

Es la resistencia que oponen las olas en la superficie al avance del submarino. Este efecto, es el de mayor amortiguamiento en mares agitados, dado que la fuerza de las olas es proporcional al cuadrado de su altura [12].

- **Amortiguamiento potencial**

Se refiere a la energía que se pierde cuando un cuerpo es forzado a oscilar verticalmente hacia arriba y hacia abajo, producto de la acción de las olas en la superficie.

- **Coefficiente de arrastre**

Los efectos de arrastre, a cierta velocidad, se describen como un coeficiente adimensional, definido como:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u^2} \quad (5.1)$$

donde F es la fuerza de arrastre, ρ es la densidad del agua, A es el área perpendicular al flujo y u la velocidad longitudinal del submarino. En este caso, u es un dato que arroja la corredera del submarino (mide la velocidad axial del agua respecto del submarino), A es el área del buque sumergido, y se denomina superficie mojada. Para el intervalo de velocidades en el que navega el submarino, C_d varía levemente, por lo que se lo puede considerar constante y la ecuación anterior, puede usarse para calcular la fuerza de arrastre para una velocidad dada, quedando:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot u^2 \quad (5.2)$$

Esta ecuación la utilizaremos en el Capítulo 7.

Número de Reynolds

Es la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido. En mar abierto se define como:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (5.3)$$

Donde D es la longitud característica del cuerpo, u la velocidad y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Un número de Reynolds alto, indica que el flujo es principalmente turbulento, mientras que un Reynolds bajo, es característico de un flujo más bien laminar.

Al igual que la fuerza de arrastre, el número de Reynolds será utilizado en el Capítulo 7.

Sustentación

Al igual que cualquier cuerpo que viaja en un fluido, el submarino, al desplazarse en el agua, experimenta una fuerza sustentación (lift), perpendicular al fluido entrante. Este efecto es causado por una diferencia de presión entre las superficies superior e inferior de los planos de navegación.

En la figura 5.2 los puntos negros de la imagen, se encuentran equiespaciados temporalmente, y antes de llegar al perfil, también lo están en el espacio, pues viajan a la misma velocidad. Luego, se puede ver como la serie de puntos superior atraviesa completamente el perfil, mientras que la inferior, solo llega a la mitad del recorrido reflejando por un desfase temporal entre ellos. Las moléculas tardan menos en recorrer la superficie superior, la presión es menor en ésta que en la superficie inferior, generándose una fuerza de sustentación hacia arriba.

Debido a estas fuerzas, es que cuando el submarino realiza por ejemplo, maniobras con el plano de popa, el submarino cambia su burbuja, o cuando realiza maniobras con los planos de proa, cambia el plano de navegación. A través de los planos, tanto el casco como la torre generan fuerzas de sustentación. Este fenómeno de reubicación de las fuerzas sobre el centro de flotabilidad, genera un momento alrededor del eje y .

La sustentación generada depende en gran medida del ángulo de ataque, es decir, del ángulo del vector de velocidad del flujo entrante. Un perfil aerodinámico perfectamente simétrico no producirá elevación si el ángulo de ataque es cero, pero si está inclinado, habrá una diferencia de presión y se

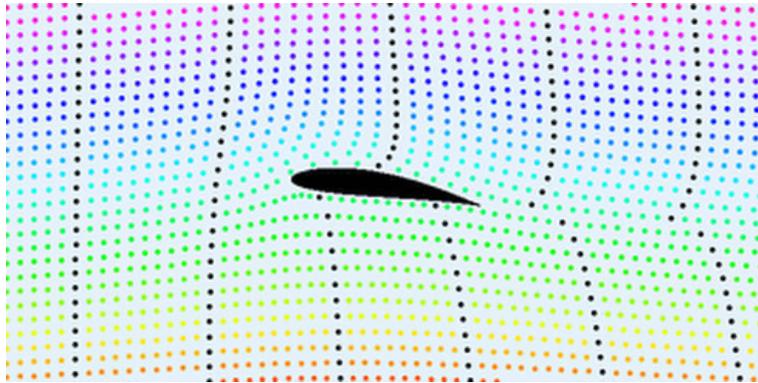


Figura 5.2: Perfil alar siendo atravesado por el fluido [De Kraaiennest].

generará una fuerza de elevación.

Masa adicional: Cuando el submarino se desplaza en el agua, la fricción del casco acelerará el de agua en contacto más cercana, creando una capa de agua en movimiento. La capa más cercana a su vez, acelerará a la siguiente, en menor medida, y así sucesivamente. Por lo tanto, habrá una capa de agua que se mueve con el submarino y que influirá sobre su movimiento. Cuando el submarino acelere deberá acelerar también la masa de agua circundante y cuando el submarino vire tendrá que girar también el agua que está viajando con él.

Este efecto se denomina efecto de masa añadida, ya que el buque parecerá más pesado de lo que realmente es. Esto afecta tanto a la masa aparente como a la inercia del cuerpo y es difícil de calcular su magnitud. Depende en gran medida de la forma y rugosidad del casco del submarino. En general, se analiza experimentalmente.

Control de superficies

Para controlar la posición del submarino, se usan diversas superficies de control, analizadas en la sección 5.1. Todos los hidroplanos experimentarán una fuerza de arrastre en dirección opuesta al flujo entrante D_{ru} , y una fuerza de sustentación perpendicular al mismo L_{ru} . Una forma de calcular estas fuerzas por ejemplo, para el timón de popa, se propone en el Apéndice D según Toxopeus [13].

Los coeficientes de drag y lift se determinan experimentalmente. Cada

autor realiza sus ensayos y determina fórmulas de origen empírico para analizar estos fenómenos. En el análisis propuesto por Toxopeus ninguno de los dos coeficientes mencionados varía con la velocidad, solo dependen de la forma de los hidrolanos. Otra formulación, hecha por Ridley [14], propone una relación parabólica entre el ángulo de ataque y el coeficiente de drag de acuerdo a ensayos realizados, mientras que para el coeficiente de lift, propone una relación lineal con el ángulo de ataque.

Enderezamiento de flujo

Cuando un submarino se mueve, el vórtice del flujo de agua a lo largo del casco alterará el flujo de agua en los timones. Toxopeus sugiere un método para compensar este fenómeno mediante la adición de un coeficiente de enderezamiento de flujo para el ángulo hidrodinámico δ_h , es decir, disminuyéndolo; no se considerará en esta tesis. El enderezamiento del flujo es aumentado por la hélice, en gran medida cuando se coloca delante de los timones. Aunque, para los submarinos modernos, las hélices son colocadas más a menudo detrás de los hidrolanos, para disminuir la turbulencia alrededor de los timones.

Propulsión

La hélice convierte un movimiento rotacional en empuje. Para calcular el empuje F_p y el torque τ_p , diferentes autores sugieren calcular coeficientes adimensionales de empuje y de par, que dependen únicamente de la relación de avance. En el Apéndice D se hace referencia a la forma de calcularlos que propone Newman [15].

Cavitación

La cavitación se produce cuando las fuerzas que actúan sobre un líquido forman pequeñas cavidades o burbujas. Esto suele ser el resultado de rápidos cambios de presión, por ejemplo alrededor de la hélice. Si las pequeñas cavidades implosionan, generarán una onda de choque intensa. Este es un comportamiento no deseado ya que las implosiones repetidas son ruidosas y causan un desgaste importante en los materiales.

5.3. Ecuaciones generales de movimiento con seis grados de libertad

Siguiendo el sistema de referencias definido en el Apéndice C, consideramos un sistema de coordenadas fijo en el espacio (x_0, y_0, z_0) y otro solidario al submarino, con origen OR en su centro de flotabilidad (x, y, z) . Sea a_G la aceleración y x_G la posición del centro de masas. Sea v la velocidad y ω la velocidad angular de OR expresado en las coordenadas (x, y, z) . El valor de la aceleración a_G está dado por las ecuaciones de Newton-Euler de la mecánica clásica [16]:

$$a_G = \frac{\partial v}{\partial t} + \omega \times v + \dot{\omega} \times x_G + \omega \times (\omega \times x_G) \quad (5.4)$$

Con fuerzas $(F_x, F_y, F_z)_i$ actuando sobre el origen OR , el movimiento del cuerpo será:

$$\Sigma(F_x; F_y; F_z) = m \cdot a_G \quad (5.5)$$

donde m es la masa del submarino.

Los momentos angulares τ_i alrededor de OR resultan de:

$$\Sigma\tau_i = J \cdot \dot{\omega} + \omega \times J + x_G \times a_G \quad (5.6)$$

donde J es la matriz de momentos de inercia.

En esta sección se aplicarán las ecuaciones anteriores al submarino sumergido en el agua y se describirán las fuerzas externas $F_i = (F_x; F_y; F_z; \tau_x; \tau_y; \tau_z)_i$, que son las fuerzas y los torques hidrostáticos e hidrodinámicos, así como las fuerzas y momentos de propulsión e hidropianos. En cuanto a la nomenclatura, se define de acuerdo a los estándares utilizados en la bibliografía.

Para las fuerzas y momentos del submarino respecto del agua: $F = (F_x; F_y; F_z; \tau_x; \tau_y; \tau_z) = (X, Y, Z, K, M, N)$.

En base a las referencias para las velocidades lineales y angulares mencionadas en los Apéndices C y D, las ecuaciones 5.5 y 5.6 quedan expresadas ahora como:

$$\Sigma X_i = m (\dot{u} - v \cdot r + w \cdot q - x_G(q^2 + r^2) + y_G(p \cdot q - \dot{r}) + z_G(p \cdot r + \dot{q})) \quad (5.7)$$

$$\Sigma Y_i = m (\dot{v} - w \cdot p + u \cdot r - y_G(p^2 + r^2) + z_G(q \cdot r - \dot{p}) + x_G(q \cdot p + \dot{r})) \quad (5.8)$$

$$\Sigma Z_i = m (\dot{w} - u \cdot q + v \cdot p - z_G(p^2 + q^2) + x_G(p \cdot r - \dot{q}) + y_G(r \cdot q + \dot{p})) \quad (5.9)$$

$$\Sigma K_i = I_{xx} \cdot \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})q \cdot r - (\dot{r} + p \cdot q)I_{zx} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (p \cdot r - \dot{q})I_{yx} \quad (5.10)$$

$$\Sigma M_i = I_{yy} \cdot \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})r \cdot p - (\dot{p} + q \cdot r)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (q \cdot p - \dot{r})I_{yz} \quad (5.11)$$

$$\Sigma N_i = I_{zz} \cdot \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})p \cdot q - (\dot{q} + r \cdot p)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (r \cdot q - \dot{p})I_{zx} \quad (5.12)$$

El sistema de ecuaciones 5.7 a 5.12 es complejo y no presenta ecuaciones explícitas para calcular las aceleraciones lineales y angulares. Sin embargo, es un sistema lineal en el sentido de las aceleraciones, por lo que puede ser resuelto mediante una inversión matricial. Para el modelado matemático del submarino se debe entonces, dividir las fuerzas y momentos en seis direcciones y analizar cada una de ellas por separado.

Se debe contar con información suficiente para poder calcular todas las variables, y como se mencionó anteriormente, para realizar esta tarea se deben ensayar diferentes condiciones que permitan la obtención de coeficientes experimentales, ya sea en el submarino mismo, o en un modelo a escala. Cualquiera de éstas posibilidades no es una opción viable y excede el alcance de esta tesis, por lo que solo nos limitaremos a mostrar las relaciones que deben tenerse en cuenta y las fórmulas que las vinculan, tanto aquí como en el Apéndice D.

Fuerzas externas

De acuerdo a lo visto en capítulos anteriores, las fuerzas externas y efectos que actúan sobre el submarino se pueden resumir en:

$$\Sigma F_i = F_{HS} + F_{HD} + F_P + F_C \quad (5.13)$$

donde F_{HS} representa los momentos y fuerzas hidrostáticas, es decir, la fuerza de gravedad y la de flotabilidad, F_{HD} son las fuerzas hidrodinámicas

de arrastre y flujo cruzado, masa adicional e inercia, F_P son las fuerzas de propulsión y F_C son las fuerzas relacionadas con las superficies de control, es decir, los hidroplanos. De acuerdo al planteo realizado de descomponer las fuerzas en 6 direcciones tenemos:

$$\Sigma \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ K_i \\ M_i \\ N_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{HS} + X_{HD} + X_P + X_C \\ Y_{HS} + Y_{HD} + Y_C \\ Z_{HS} + Z_{HD} + Z_C \\ K_{HS} + K_{HD} + K_P + K_C \\ M_{HS} + M_{HD} + M_C \\ N_{HS} + N_{HD} + N_C \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Esta es la forma más común de expresar las fuerzas y momentos que actúan sobre un submarino encontrada en publicaciones y en la bibliografía técnica específica. Los términos de fuerzas inducidas por la hélice se consideran en la dirección del eje x y los momentos que genera, alrededor del mismo eje. Una introducción a su cálculo se detalla en el apéndice D.

Esto es cierto si el eje de la hélice estuviera perfectamente alineado con el centro de flotabilidad en el plano (x, z) , lo cual rara vez ocurre. Sería más certero introducir un momento alrededor de y debido a la propulsión del rotor, sin embargo, el brazo de palanca probablemente sería muy pequeño, por lo cual se despreciaría su contribución.

Simulación de fuerzas y momentos

Sumando los momentos y las fuerzas hidrodinámicas con las fuerzas hidrostáticas descritos en el Apéndice D, tenemos la sumatoria total de fuerzas externas, que se puede expresar como:

$$\begin{aligned}
\Sigma X_{ext} &= (X_{u|u}|u| + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v}|v| + X_{w|w}|w|) + \\
&\quad + (X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}q^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2) + X_{HS} + X_{Prop} \\
\Sigma Y_{ext} &= (Y_{uv}uv + Y_{v|v}|v|) + \\
&\quad + (Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq) + Y_{uu}u^2 \cdot \delta_{f_1} + Y_{HS} \\
\Sigma Z_{ext} &= (Z_{uw}uw + Z_{w|w}|w|) + (Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp) + \\
&\quad + Z_{uu\delta_{f_2}}u^2 \cdot \delta_{f_2} + Z_{HS} \\
\Sigma K_{ext} &= K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_{f_1}}u^2 \cdot \delta_{f_1} + K_{HS} + K_{prop} \\
\Sigma M_{ext} &= (M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uw}uw + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uq}uq) + \\
&\quad + M_{uu\delta_{f_2}}u^2 \cdot \delta_{f_2} + M_{HS} \\
\Sigma N_{ext} &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{uv}uv + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{ur}ur + \\
&\quad + N_{uu\delta_{f_2}}u^2 \cdot \delta_{f_2} + N_{HS}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Repasando, consideramos por ejemplo, las fuerzas en la dirección de x . Tenemos términos como $X_{u|u}|u|$ e $Y_{v|v}|v|$ que describen como los movimientos en x e y generan fuerzas longitudinales relativas al signo de las velocidades u y v . $X_{\dot{u}}$ es una fuerza inducida por la aceleración en la dirección de x . X_{uv} describe una fuerza en x debida un desplazamiento en el plano xy . Algo similar ocurre con X_{uw} pero para un movimiento en el plano xz . Los términos que incluyen un valor absoluto de una velocidad se interpretan como un término de arrastre, ya que son cuadráticos y relativos a la dirección. Los términos con subíndices derivados como $X_{\dot{u}}$, tratan de modelar la masa aumentada aparente debido a la aceleración del agua alrededor del casco. Los términos cruzados, por ejemplo, X_{uv} , son fuerzas de movimientos combinados en diferentes direcciones que surgen debido al agua acelerada alrededor del casco.

Hemos descripto así las ecuaciones generales de movimiento del submarino, Si bien tenemos una especie de sistemas de ecuaciones (en realidad una mezcla de ecuaciones diferenciales y algebraicas), este sistema así planteado no tiene una estructura que nos permita estudiar y resolver nuestro problema. El análisis no se realiza en profundidad debido a que, no vamos a utilizar estas fórmulas para resolver el problema, por las limitaciones ya mencionadas.

5.4. Limitaciones

Un punto de gran importancia a la hora de realizar cualquier análisis es definir los límites del problema, estableciendo que fenómenos se tienen en consideración y cuales no. Habiendo realizado la introducción de todos los factores que pueden aparecer, procedemos a realizar las siguientes consideraciones:

- El submarino se encuentra completamente sumergido, por lo que se desprecia el efecto de amortiguamiento potencial, y amortiguación de las olas.
- Los hidroplanos son simétricos por lo cual no se consideran fuerzas de sustentación en las superficies de control para ángulo de ataque cero. Solo aparecerá el efecto cuando se varíe el ángulo del hidroplano respecto de su posición natural.
- El océano en el que se analiza el submarino es lo suficientemente grande como para despreciar el efecto del fondo y de estar cerca la costa.
- Los sistemas de tanques no bombean agua durante las maniobras ensayadas para la obtención de datos.
- No se considera el efecto del giro de la hélice sobre los cambios de dirección del submarino.
- Solo se analiza por separado el efecto que producen las fuerzas hidrostáticas y como se compensa este efecto con los tanques de líquido en el Capítulo 7.
- El número de ensayos realizados depende de la disponibilidad de activar los dispositivos de medición durante la navegación en el submarino.
- Las mediciones son responsabilidad del personal de la Armada.

Capítulo 6

Sistema de navegación

Para la obtención de las curvas de movimiento del ARA-San Juan de forma experimental, se realizaron una serie de mediciones in-situ. Antes de comenzar, fue necesario tomar conocimiento de cómo está compuesto el sistema de navegación, que datos están disponibles durante la navegación y de qué manera se miden en el submarino.

El sistema principal está formado por una consola de gobierno, la que es utilizada en simultáneo por dos submarinistas, y una consola de control de situación, operada por otro submarinista, que controla y regula la presión y contenido de los sistemas de tanques del submarino. Esta parte del submarino es la que se recrea en el simulador SIS-01. El manejo de estos equipos conjuntamente con el control del sistema de propulsión determina el desplazamiento de la nave.

Para seguir la acción de los mandos y controlar el estado del buque, el submarino consta de un girocompás, que proporciona el rumbo del submarino; una corredera ubicada debajo del centro de gravedad del buque, que mide la velocidad longitudinal en nudos; un tacómetro que indica las RPM de la hélice; y un sistema batimétrico, que mide la profundidad (plano) de navegación, en metros, respecto de la superficie del mar por diferencia de presión.

En superficie, para saber su posición geo-referencial, el submarino cuenta con un GPS que muestra sus mediciones a través de un plotter Garmin GPSMAP 5012. Mientras que en inmersión, al superar los 14 metros de profundidad, se arrian las antenas y el submarino continúa su navegación por estima. Un sistema de Dead Reckoning denominado EU R-011 SubDR simula la posición utilizando información de la corredera y el girocompás cuando



Figura 6.1: Indicador del girocompás mecánico (izq). Girocompás electrónico STD 22M, con indicador digital (der).

la señal del GPS se interrumpe, partiendo del último dato conocido. Este sistema de estima no considera cambios de profundidad.

Por último, un inclinómetro indica la escora de manera analógica y un nivel de burbuja indica la burbuja del submarino. Los sensores analógicos son utilizados para verificar los valores de los sensores electrónicos y para asistir a los pilotos en una emergencia. Cada indicador, tiene un segundo indicador de respaldo para corroborar los valores leídos en caso de posibles fallas.

6.1. Consola de control de gobierno (PL-10)

La consola de control permite el gobierno del submarino, tanto en profundidad como en rumbo de tres maneras:

- **Automática:** Una computadora conduce la unidad de acuerdo a valores introducidos, generando órdenes que mueven los hidroplanos.
- **Poder:** En este modo, los operadores (llamados planeros) tienen el control del movimiento de los timones, introduciendo las correcciones necesarias para mantener el plano y el rumbo ordenados.
- **Manual:** Al igual que en el modo anterior, los planeros tienen el control sobre los timones, pero actuando directamente sobre válvulas hidráulicas de poder ubicadas a los costados de sus asientos en lugar de las

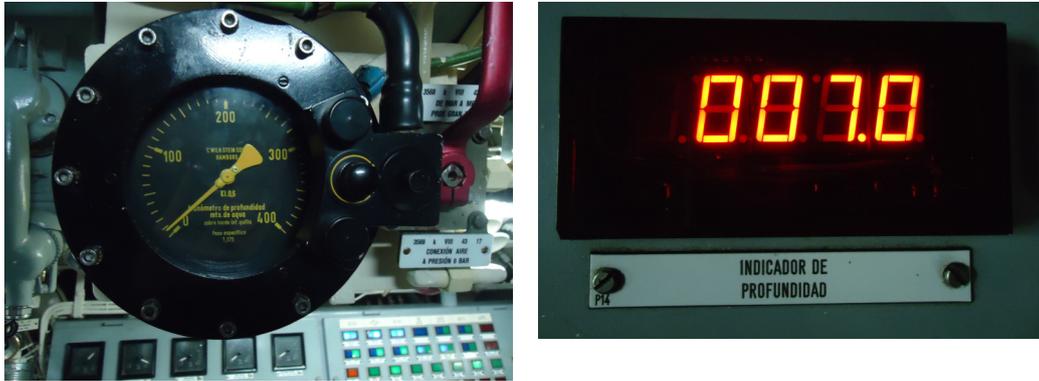


Figura 6.2: Manómetro de profundidad. Indica los metros de agua sobre el borde inferior de la quilla (izq). Indicador de profundidad de la consola de ingeniería que recibe el dato medido por el sistema batimétrico (der)

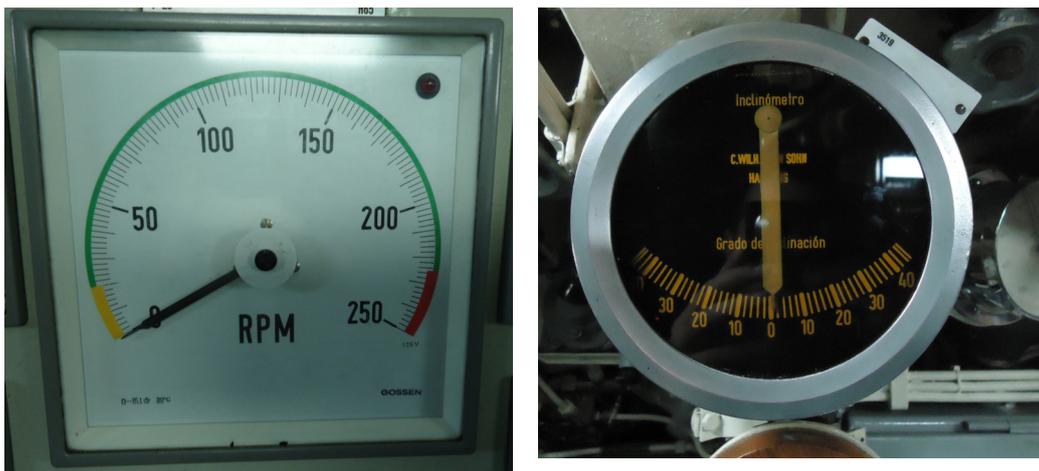


Figura 6.3: Indicador de RPM de la hélice (izq). Indicador de escora (der).



Figura 6.4: Corredera LMN-5 (izq). Imagen del software EUREKA que muestra la posición en base a información Plotter Garmin GPSMAP 5012 (der).

electroválvulas para el comando, actuando sobre el sistema de emergencias.

Los movimientos deben efectuarse con mayor cuidado en este modo, por cuanto la precisión es mucho menor y, normalmente, no se cuenta con los instrumentos eléctricos, siendo los mecánicos (burbuja y manómetros) más lentos en sus reacciones.

En la figura 6.5 se muestra la PL-10 antes de ser instalada, donde se detallan los diferentes módulos que la componen, los cuales sirven a los planeros para gobernar y verificar en todo momento el estado de navegación del submarino:

Frente al equipo de control se encuentran dos palancas similares para la operación, ítem 11 y 12 de la figura 6.5. Cada una de ellas es de doble propósito, capaz de operar simultáneamente el timón o los planos. Ambas, pueden asumir el control total del buque. En cada palanca están dispuestos cuatro potenciómetros inductivos divididos en dos grupos que responden a órdenes al timón y órdenes a los planos:

- **Órdenes de timón:** Para este control cuenta con dos potenciómetros inductivos, cumpliendo una misma función, dar órdenes en un sentido

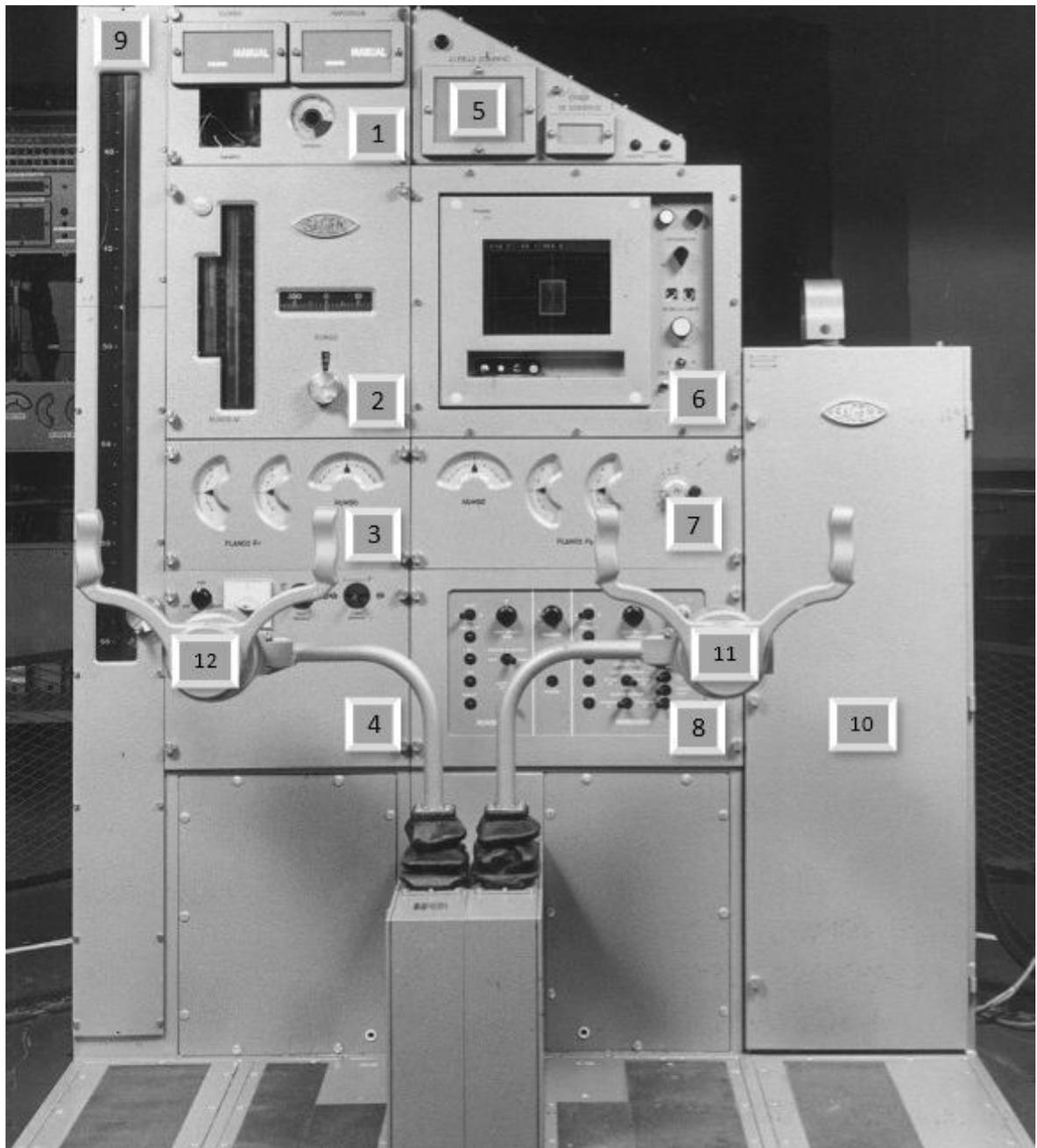


Figura 6.5: 1.-Módulo de situación 2.-Módulo de equilibrio y rumbo 3.-Panel de axiometría D. 4.-Módulo de alimentación 5.-Modulo de incidentes y defectos 6.-Sintetizador 7.-Panel de axiometría I. 8.-Módulo de control 9.-Módulo de inmersión 10.- Armario de tarjetas electrónicas. 11.- Mando de control de timón vertical y planos de popa 12.-Mando de control de timón vertical y planos de proa.

u otro para el gobierno. Accionando los comandos en forma circular 31° a la derecha o izquierda del punto “O” se transite tensión hacia el equipo de seguimiento. En la parte posterior de los potenciómetros posee un sistema recuperador por resorte para volver el comando a “O” y evitar que por rolido esta pueda desplazarse y emitir órdenes.

- **Órdenes de planos:** Al igual que para el timón, cuenta con dos potenciómetros inductivos para controlar los planos, para el gobierno en profundidad del submarino. Accionando las palancas (hacia adelante y hacia atrás) se inducen tensiones negativas o positivas que corresponden a órdenes punta arriba o punta abajo. En la parte inferior este comando posee un contrapeso y un sistema antagónico, amortiguador y recuperador para devolver la palanca al punto “O” para evitar que por escora o por cabeceo emita ordenes al sistema. Con el sistema amortiguador, se puede regular la fuerza con la que se deben operar las palancas.

6.2. Limitación de los ángulos de timón

Para limitar los ángulos de los hidroplanos, conforme a la velocidad del submarino, existen circuitos dispuestos en las cadenas electrónicas de servicio y de comprobación. Los topes son eléctricos y operan bajo el principio de limitación de las cadenas electrónicas. No existen topes mecánicos.

Los planos y timones tienen diferentes valores máximos de operación, disminuyendo el ángulo máximo con el aumento de la velocidad del submarino. Estos son:

	Plano popa	Plano proa	Timón	Velocidad [nudos]
Primero	$\pm 5^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	15 a 28
Segundo	$\pm 15^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 30^\circ$	4 a 15
Tercero	$+18^\circ$ *			0 a 4
	-25° **			
* Punta arriba	**Punta abajo			

6.3. Sistema Dead Reckoning R-011 EU SubDR

El sistema microcontrolado R-011 EU SubDR (Unidad Electrónica) implementa un algoritmo de Dead Reckoning (DR) mediante la combinación de la información proveniente de la corredera y el girocompás. El sistema cuenta con dos entradas digitales que aceptan paquetes de información que cumplen con el estándar NMEA 0183. A partir de dicha información se generan paquetes de posición que responden al estándar NMEA 0183 y sentencias propietarias Garmin.

El sistema emite paquetes de posición provenientes de un módulo GPS/Galileo uBlox LEA-6H en el interior de la R-011 EU SubDR. Mientras la señal de GPS sea válida, la información de posición y de satélites se emitirá sin cambios. Cuando se produce un obscurecimiento de la señal, el sistema comienza a realizar estimación de la posición partiendo de la última posición válida y utilizando información de rumbo y velocidad. La información de satélites continúa siendo la última válida.

Cuando el obscurecimiento de la señal desaparece, el sistema sincroniza la posición y continúa emitiendo la información proveniente del módulo GPS.

6.4. Cálculo de posición

El R-011 define la posición por estima, mediante el siguiente algoritmo¹:

$$\phi_2 = a \sin \left(\sin \phi_1 \cdot \cos \frac{d}{R} + \cos \phi_1 \cdot \sin \frac{d}{R} \cdot \cos \theta \right) \quad (6.1)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 \left(\sin \theta \cdot \sin \frac{d}{R} \cdot \cos \phi_1, \cos \frac{d}{R} - \sin \phi_1 \cdot \sin \phi_2 \right) \quad (6.2)$$

Donde ϕ_2 es la latitud estimada, ϕ_1 es la latitud anterior, λ_2 es la longitud estimada, λ_1 la longitud anterior, θ el rumbo en radianes, donde R es el radio de la Tierra, d es la distancia recorrida calculada como la velocidad medida por la corredera por el tiempo.

¹La simbología utilizada en estas ecuaciones solo aplica para las mismas y no se repite en el resto de la tesis



Figura 6.6: Sistema instalado en el submarino, abajo las entradas del GPS, la corredera, y el girocompás y arriba la salida al plotter Garmin.

6.5. Salidas

El sistema R-011 EU SubDR posee dos salidas de datos digitales (GPS y REP) de 4800 baudios, que contienen información de posición, rumbo, y velocidad. El error del DR es de 150 metros para una velocidad de avance de 2 nudos durante 48hs, con una velocidad de cambio de rumbo de $7,5^\circ$ /hora.

La salida GPS tiene una conexión RS-232 que respeta el estándar NMEA0183. La salida REP es una conexión RS-422 por la cual se transmite información proveniente de los sensores y se le agrega información de Dead Reckoning. Las sentencias poseen el formato NMEA y son:

- **GPRMC**: Esta sentencia provee la información de horario, posición, rumbo, velocidad y fecha que proviene del sensor de GPS. En caso de pérdida de recepción de satélites, la sentencia no es enviada.
- **DRRMC**: Provee idéntica información que GPRMC pero estimada a partir de posición inicial, rumbo y velocidad.
- **HEHDT**: Repite sentencia proveniente del girocompás.
- **VMVBW**: Repite sentencia proveniente de la corredera.

Capítulo 7

Curvas evolutivas de movimiento

7.1. Definición

Con el dispositivo que se detalla en el Capítulo 8, es posible encontrar las curvas evolutivas del submarino TR1700. En navegación, este término hace referencia a la curva descrita por el baricentro de un buque, desde el momento en que se coloca la pala del timón a una banda, hasta que la evolución tiende a convertirse en una circunferencia o entrar en régimen estacionario. En un submarino se pueden trazar estas curvas para las maniobras de cambio de rumbo, como para cambios de profundidad y burbuja.

En la figura 7.1 se observa la curva evolutiva simplificada que describe un buque cuando vira a estribor. En ella se destacan algunos elementos característicos a saber:

- **Avance:** Es la distancia entre el punto inicial (A) de la maniobra y el punto más alejado en sentido transversal a la dirección de avance inicial (R_i).
- **Traslado:** O traslado lateral, es la distancia entre la dirección original y cualquier punto de la curva evolutiva. Tiene especial interés observar el traslado para el momento en que se llega al punto de caída de 90° respecto al rumbo inicial.
- **Diámetro táctico:** Es la distancia lateral entre la dirección primitiva de avance y la opuesta es decir el momento en que se alcanza un rumbo de $R_i + 180^\circ$.

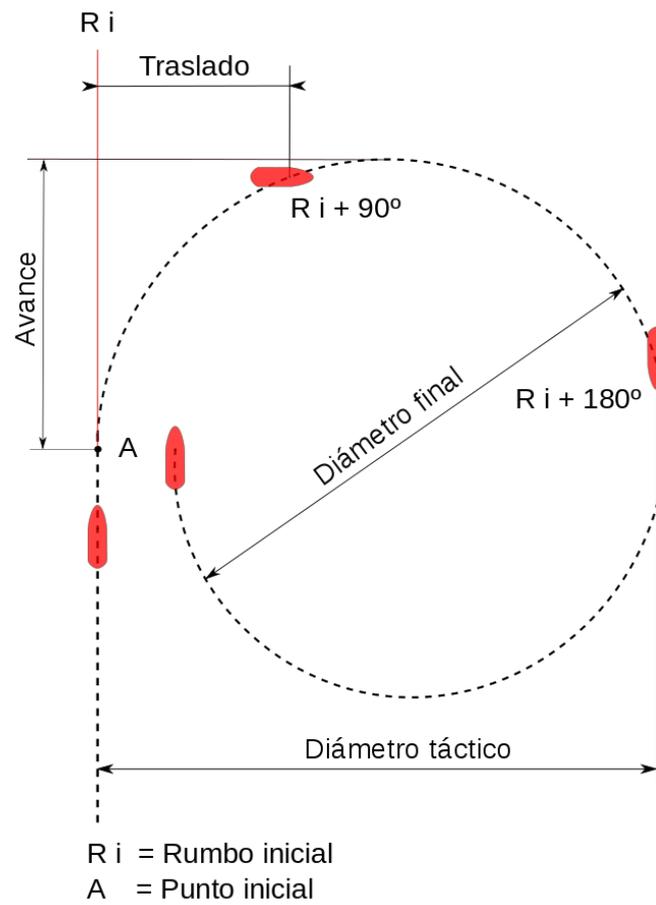


Figura 7.1: Curva a estribor con sus partes características detalladas.

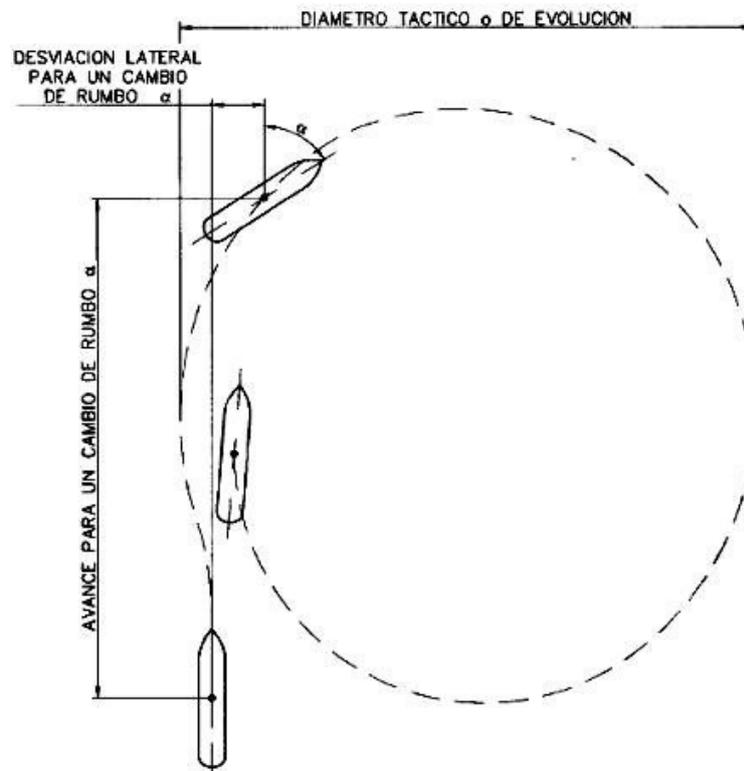


Figura 7.2: Trayectoria descrita en un viraje a estribor

- **Diámetro final:** Es aquel descrito por el buque en la fase final de la evolución cuando esta tiende ser una circunferencia.
- **Duración de la evolución:** Es el tiempo en segundos que demanda alcanzar un rumbo igual al inicial.

Cuando se estudian las características evolutivas de un buque se trazan curvas para diferentes ángulos de pala (10° , 20° y todo timón a la banda), calado y asiento.

A menor ángulo de pala mayores dimensiones para la curva.

La figura 7.2 muestra una curva evolutiva que se asemeja más a una real, donde se aprecia el efecto de desviación lateral inicial que genera el cambio de ángulo de pala del timón.

7.2. Límites de las curvas

En conjunto con personal de la Armada, se decidieron cuáles serían las pruebas a realizar para obtener las curvas evolutivas del ARA-San Juan, teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones del submarino. Se tomó conocimiento de cuáles son las condiciones de navegación estándar y para cada maniobra, cuales son los límites de velocidad y de ángulo de los hidropianos móviles.

Por dar un ejemplo, un viraje con un ángulo de timón superior a 15° a una velocidad de 20 kn, no es una maniobra que se realice bajo ninguna circunstancia. Por lo tanto no será necesario simular esta situación, ni medirla.

Existen maniobras que implican el movimiento en conjunto de varios hidropianos, como el cambio de plano de navegación, donde se le da ángulo máximo a los planos de proa y se regula el ángulo de los de popa para mantener la burbuja deseada. Si bien se analizará su influencia por separado, a la hora de realizar una simulación es necesario tener en cuenta el efecto que producen en simultáneo.

Para resumir la cuestión, se diagramó la siguiente lista de mediciones a realizar, las cuales cubren el abanico de posibilidades durante una navegación normal. Esta lista esta a disposición de la Armada, quien tiene la tarea de llevar a cabo las pruebas.

- **Cambio de rumbo:** Realizar virajes a babor y estribor a 40, 60, 90 y 120 RPM con los siguientes ángulos de pala:
 - 5°
 - 10°
 - 15°
 - Todo timón
- **Cambio de burbuja:** Cambios de plano normal a 70 rpm de la hélice con 3° , 5° y 8° de punta.
- **Cambio de velocidad:** Se medirán las variaciones en las RPM de la hélice. De 30 RPM a 40 RPM, luego a 60 RPM, a 80 RPM y finalmente hasta 120 RPM.

- **Cambio de plano de navegación:** Con los planos de proa en ángulo máximo, y para corregir el plano de navegación, solo utilizando los tanques de compenso.

7.3. Diseño de las curvas del submarino

Las mediciones realizadas nos entregan información sobre la evolución del submarino en cada momento, su velocidad, rumbo, profundidad y burbuja.

Con el submarino navegando estabilizado, compensado y balanceado, se establece una velocidad de desplazamiento, se da un ángulo de mando, y se guardan una serie de datos durante el transcurso de la maniobra. Dependiendo de la prueba a realizar, estos datos permiten obtener las curvas de variación de rumbo, profundidad, burbuja o velocidad en función del tiempo.

Para todos los casos, aproximaremos las funciones correspondientes a los datos medidos mediante el método de mínimos cuadrados¹. Durante todo este Capítulo nos referiremos a la velocidad de desplazamiento longitudinal del submarino, simplemente con el término “velocidad”.

Tanto para los cambios de burbuja con los tanques de balanceo, como para los cambios de plano a partir de los empujes de los tanques de compenso, se calcularán las evoluciones analíticamente considerando el problema como estático, en estado de equilibrio y sin considerar empujes por pérdida de masa, dado que los caudales de las bombas movilizan volúmenes muy pequeños en comparación a la masa del submarino.

Cambio de burbuja

Para modificar la burbuja durante una maniobra de cambio de plano, se utilizan los planos de popa en conjunto con tanques de balanceo y los planos de proa. No es habitual modificar la burbuja en esta, ni en ninguna otra maniobra solo con los planos de popa. Por esta razón se decidió realizar, como primer aproximación, el ejercicio de cambio de burbuja con los planos de popa hasta 5° punta arriba y punta abajo solamente.

¹Método de los mínimos cuadrados: Es un método de aproximación que intenta encontrar una función continua que mejor ajuste a un conjunto de datos, con el criterio de mínimo error cuadrático.

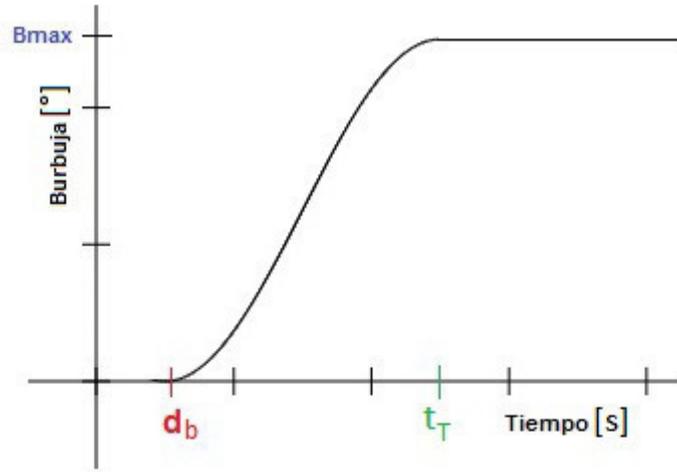


Figura 7.3: Curva típica de cambio de burbuja para una velocidad dada con ángulo máximo de mando.

Luego de realizar pruebas a diferentes velocidades y ángulos de mando, se obtiene el ángulo de cabeceo (burbuja) en función del tiempo. Las curvas encontradas tienen la forma del gráfico de la figura 7.3². LLamaremos B a la burbuja en un instante de tiempo dado, y la aproximaremos mediante la ecuación 7.1.

$$B = \frac{B_{max}}{2} \cdot \left\{ 1 - \cos \frac{(t - d_b) \cdot \pi}{(t_T - d_b)} \right\} \quad (7.1)$$

Donde B_{max} define la burbuja máxima alcanzada por el submarino, d_b es el retardo dado por el tiempo que tarda el sobmarino en comenzar a cambiar su burbuja, y t_T el tiempo total demorado desde que se mueve el mando hasta llegar a B_{max} en las condiciones de navegación en la que se realiza la prueba.

Cuando el submarino comienza a dar punta arriba, se incrementa la burbuja gradualmente hasta B_{max} , donde la cupla que genera la fuerza hidrodinámica del plano de popa se iguala al momento generado por la fuerza peso respecto del baricentro del submarino generando que la burbuja se mantenga constante.

De cada prueba realizada obtenemos un valor de d_b , t_T y de B_{max} , que se relacionan con un valor de ángulo de mando y velocidad del submarino.

²No se muestran las curvas reales porque son confidenciales para la Armada Argentina

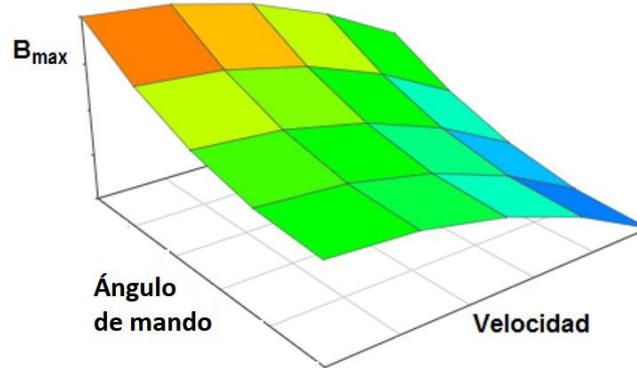


Figura 7.4: Superficie para encontrar B_{max} teniendo la velocidad y el ángulo de mando.[17]

Dispuestos en tres ternas de ejes tridimensionales, con estos puntos se generan superficies a la cuales el simulador recurre cada vez que se realiza un ensayo. De la figura 7.4 obtiene el valor de B_{max} , de la 7.5 el retardo d_b , y de la 7.6 el tiempo total para alcanzar la burbuja máxima en las condiciones dadas.

Cada vez que el programa del simulador se encuentra simulando una navegación a una velocidad dada y se le ingresa una perturbación desde el mando del plano de popa, este recurre a las superficies 7.4, 7.5 y 7.6. De aquí, se obtienen los valores de B_{max} , t_T y d_b que describen la burbuja del submarino en función del tiempo en dichas condiciones de navegación y que permiten calcular una nueva burbuja para cada momento, aproximada a la que se midió en la navegación real.

Cambio de rumbo

Para cada ángulo del timón y velocidad del submarino, existirá una tasa de variación para el cambio de rumbo diferente. Esta relación se ve en el gráfico de la figura 7.7, donde se representa en el eje de las abscisas el tiempo en segundos, y en el de las ordenadas el rumbo en grados.

Al realizar una maniobra de cambio de rumbo ingresando un ángulo de mando dado, se obtiene una serie de puntos que corresponden al estado transitorio inicial de la curva. Como se vió en la figura 7.2, cuando el submarino comienza a virar, el centro de masas de la embarcación se desplaza ligera-

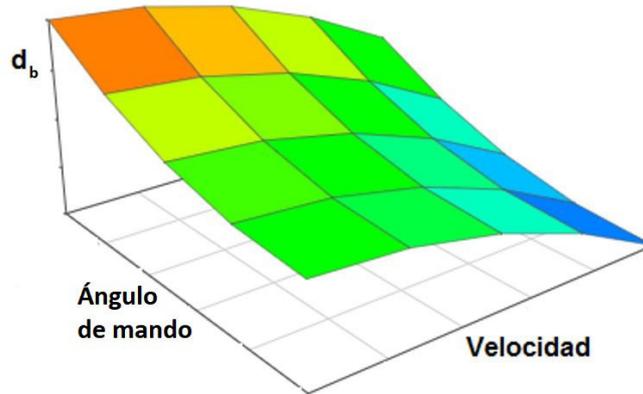


Figura 7.5: Superficie para encontrar d_b teniendo la velocidad y el ángulo de mando.

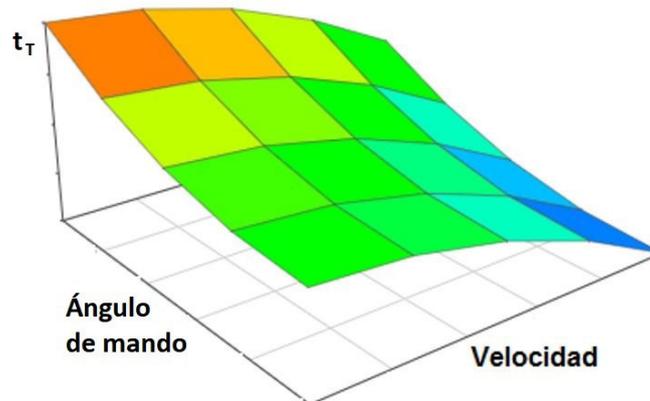


Figura 7.6: Superficie para encontrar t_T teniendo la velocidad y el ángulo de mando.

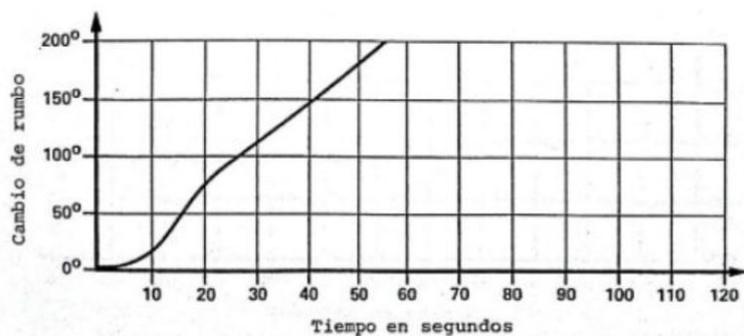


Figura 7.7: Gráfico real de la variación del rumbo respecto del tiempo realizado a 10 nudos, otorgado por la Armada Argentina

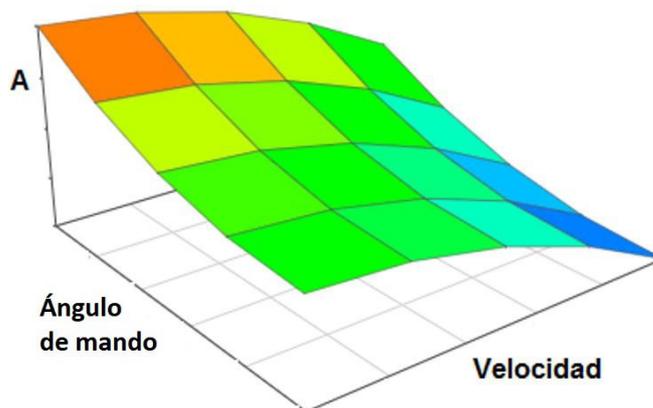


Figura 7.8: Superficie usada para obtener la tasa de variación del rumbo

mente hacia el lado opuesto al que se le ordena. Al corregir este efecto, la tasa de variación del rumbo no es lineal. En esta etapa del diseño, la serie de datos que se corresponden con este estado no serán tenidos en cuenta.

Finalizada la fase inicial el cambio de rumbo entra en un régimen estacionario, aumentando de forma aproximadamente lineal. Se calcula la pendiente “A” de la recta que describe, que se corresponderá con cada situación de velocidad del submarino y ángulo del mando y se construye con estos datos una superficie como la de la figura 7.8. Cada viraje posee un retardo d_r dado por el tiempo que tarda en alcanzarse una tasa lineal de cambio de rumbo y con el que se construye otra superficie tridimensional en función del ángulo de mando y la velocidad. Para construir estas superficies se toman los datos

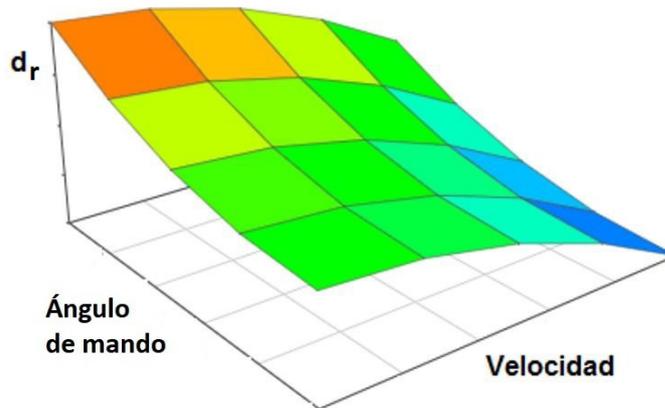


Figura 7.9: Superficie que describe el retardo d_r en función de la velocidad y el ángulo de mando

medidos en navegación por el giróscopo, como se detalla en el Capítulo 8.

Medición de la variación en la velocidad de desplazamiento

Con el submarino navegando a una velocidad dada v_0 , se da la orden de aumentar las RMP y se mide cuanto tarda en adquirir una nueva velocidad máxima para esas revoluciones. Para diseñar la curva que describe esta acción, se tuvieron en cuenta las mediciones reales realizadas para esta tesis en conjunto con curvas de aceleración facilitadas por la Armada, pertenecientes a otro submarino³. El resultado es una serie de puntos que se aproximan con una función cosenoidal con la forma de la mostrada en la figura 7.10.

La ecuación 7.2 representa la curva de cambio de velocidad mencionada y tiene la misma forma que la ecuación 7.1 descripta para el cambio de burbuja.

$$v = v_0 + \frac{v_{max}}{2} \cdot \left\{ 1 - \cos \frac{(t - d_v) \cdot \pi}{(t_T - d_v)} \right\} \quad (7.2)$$

Donde v es la velocidad en un instante dado, v_{max} es la velocidad máxima alcanzada para un número de RPM ordenado, t es la variable independiente tiempo, d_v es el tiempo que tarda el submarino en comenzar a cambiar su

³La información que aportan las curvas mencionadas se considera confidencial, por esta razón no se muestra en esta tesis

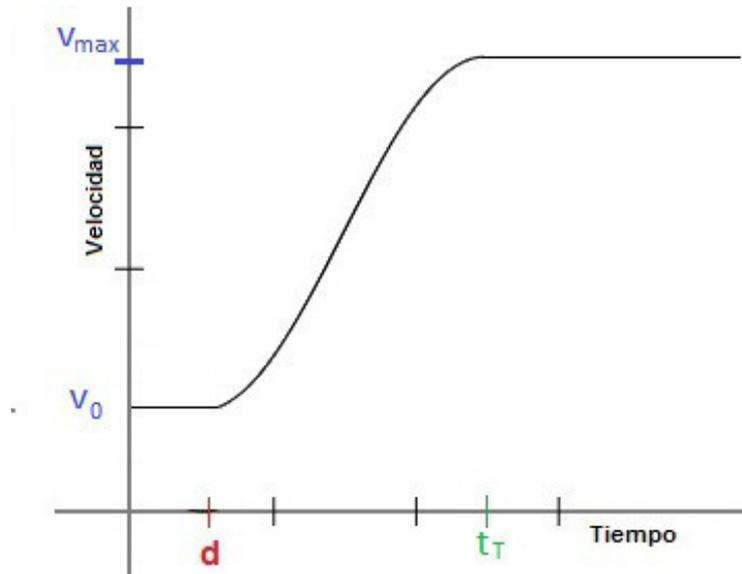


Figura 7.10: Curva que describe el cambio de velocidad del submarino en función del tiempo.

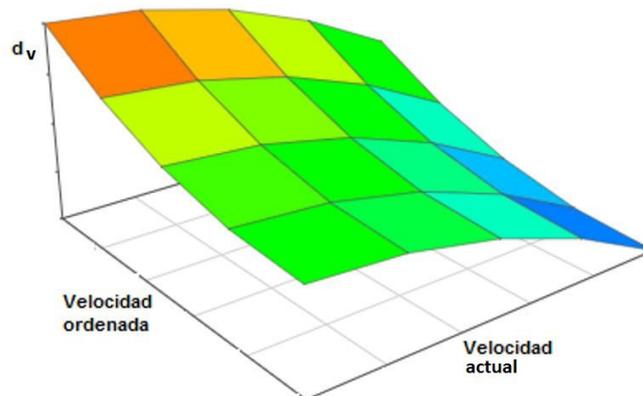


Figura 7.11: Curva que describe el tiempo d_v que tarda el submarino en comenzar a cambiar su velocidad en función de de las velocidades actual y ordenada.

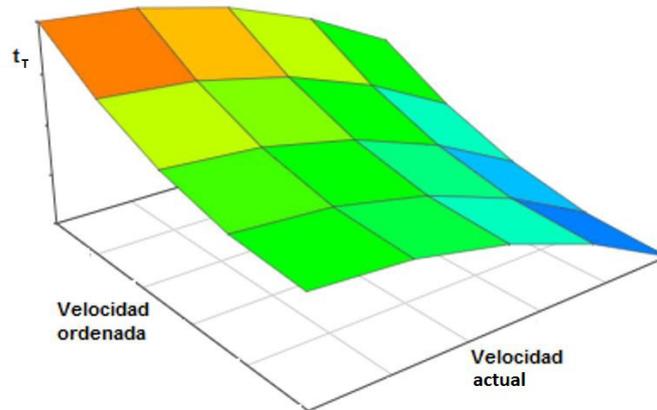


Figura 7.12: Curva que describe el tiempo total que se tarda en adquirir v_{max} en función de las velocidades actual y ordenada.

velocidad desde que se da la orden para que lo haga, y t_T el tiempo total requerido hasta alcanzar v_{max} .

Para adquirir los valores de t_T y d_v el programa del submarino ingresa a las curvas de las figuras 7.11 y 7.12 con los datos de velocidad ordenada y velocidad actual. La velocidad ordenada se calcula en referencia a un valor de RPM ordenado mediante la relación lineal que existe entre estos dos datos mostrado en la figura 7.13.

Medición de cambio de plano con planos de proa

Las curvas de cambio de plano se generan de forma similar a las de cambio de velocidad, midiendo profundidad de navegación vs. tiempo. Al igual que con la velocidad, inicialmente se pasa por un estado transitorio de cambio de profundidad, para luego llegar a la respuesta permanente en función del tiempo. Estos datos describen una curva como la de la figura 7.14. Cuya ecuación esta dada por la 7.3.

$$z = b_p * \sqrt{(x - d_p)^2 + a_p} - \sqrt{a_p} \quad (7.3)$$

Donde z es a profundidad instantánea, d_p representa el lapso de tiempo que el submarino tarda en comenzar a cambiar su profundidad, b_p define la pendiente de subida o bajada del submarino y a_p la rapidez con la que se supera la etapa transitoria para llegar al permanente de cambio de profun-

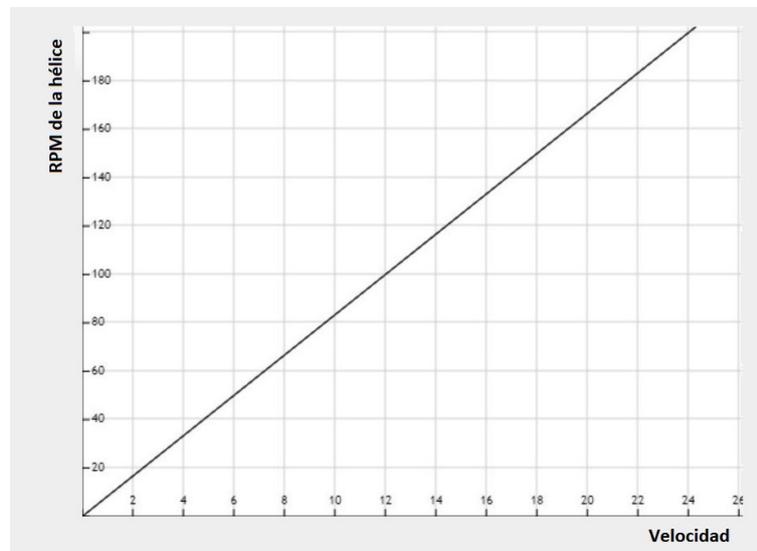


Figura 7.13: Relación entre las RPM de la hélice y la velocidad.

didad.

El simulador determina la trayectoria de la misma forma que en los casos anteriores, a través de datos leídos en superficies tridimensionales, buscando los valores de las variables a_p , b_p y d_p y calculando con ellos el valor de z .

7.4. Movimiento de agua en los tanques de líquido

En el Capítulo 6 se describieron los diferentes sistemas de movimiento de aguas dentro del submarino, mencionando su influencia sobre la posición del mismo. En esta sección se analizará dicho efecto analíticamente, con el objetivo de minimizar la cantidad total de mediciones necesarias a realizar en navegación.

Sistema de compenso

El sistema de compenso es el encargado de mantener las magnitudes de las fuerzas peso y empuje equiparadas. Como se mencionó en el Capítulo 4, a medida que el submarino gana profundidad este se comprime, disminuyendo su volumen y por lo tanto su empuje, que según el Principio de Arquímedes, es igual al peso del volumen del líquido desplazado. La reducción es apro-

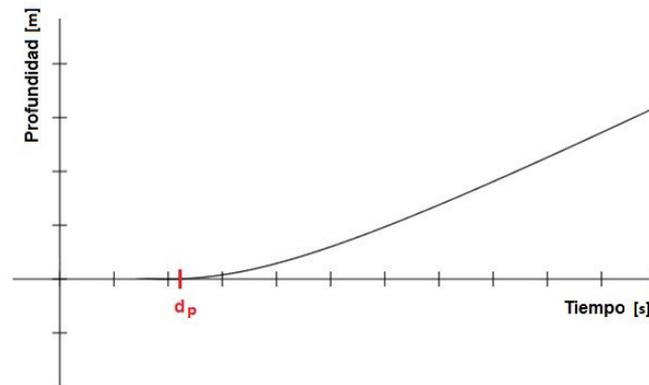


Figura 7.14: Curva que describe el cambio de profundidad del submarino en función del tiempo.

ximadamente lineal, y en el caso en estudio se produce a una tasa de 1000 litros cada 40 metros de profundidad. Es decir que para mantener el submarino estabilizado, deben achicarse cerca de 25 litros de agua por cada metro de profundidad que se gana. Esto significa que si el submarino se encuentra navegando en el plano 100 y sube al plano 60, el sistema de compenso deberá introducir a la nave 1027 Kg ⁴.

Teniendo en cuenta que cada bomba de achique impulsa un caudal de 11,11 litros por segundo, compensar el submarino requiere de poco mas de 2 segundos de bombeo por metro ganado en profundidad. Navegando a una velocidad estandar de 6 nudos, el buque se sumerge en condiciones normales a una velocidad aproximada de 0,5 metros por segundo, por lo que el sistema de compenso debe encontrarse funcionando sin fallas durante la navegación para contrarrestar el efecto mencionado.

El submarino cuenta con muchos de sus sistemas de funcionamiento normal por duplicado como medida de seguridad, tal es el caso de las bombas, manteniendose una siempre en reserva.

Con el submarino estabilizado y con burbuja cero, tanto el centro de masa⁵, como el baricentro⁶, se encuentran alineados verticalmente. A su vez, el baricentro de los tanques de compenso se encuentra en esa misma vertical

⁴Si se considera la densidad del agua salada igual a 1027 Kg/m³.

⁵Centro de masa: Lugar geométrico donde el peso ejerce su fuerza.

⁶Baricentro: Punto donde se aplica la resultante de un sistema de fuerzas, en este caso el empuje.

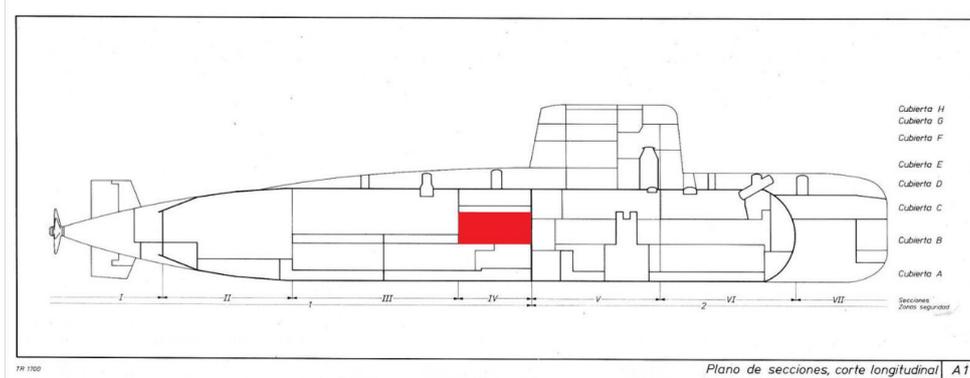


Figura 7.15: Ubicación de los tanques de compensación en el submarino.



Figura 7.16: Diagrama de cuerpo aislado del submarino.

que éstos, por lo que la variación de alguna de las fuerzas inducidas por el sistema de compensación no generará cupla alguna sobre el submarino. En la imagen 7.15 se resalta en rojo la ubicación de los tanques de compensación en el submarino.

Fuerza de arrastre durante el cambio de plano

Si consideramos el diagrama de cuerpo aislado de la figura 7.16 tenemos, la fuerza peso siempre en dirección hacia abajo, el empuje siempre en dirección hacia arriba y una fuerza de arrastre F_a dada por el roce del agua con el submarino y la viscosidad del agua al ganar o perder profundidad. Esta última es siempre contraria a la dirección de la velocidad de desplazamiento vertical de la nave.

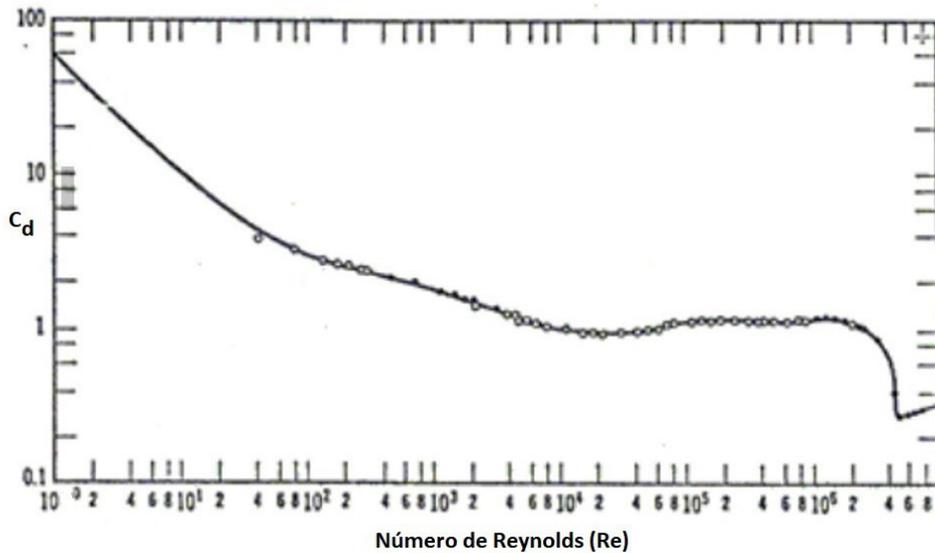


Figura 7.17: Gráfico del coeficiente de drag vs. el número de Reynolds.

En la ecuación 7.4 $E(z)$ es el empuje, dependiente del volumen del submarino, el cual varía con la profundidad z . P es el peso del submarino, modificado a través de la variación de agua del sistema de compenso, debido al accionamiento de las bombas de compenso.

$$m_{sub} \cdot a_z = -F_{arr} - E(z) + P \quad (7.4)$$

La fuerza de arrastre la aproximaremos de acuerdo a la ecuación 5.2 vista en el Capítulo 5 y que repetimos aquí en la 7.5.

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot A \cdot |\vec{V}_z| \cdot \vec{V}_z \cdot C_d \quad (7.5)$$

C_d depende del coeficiente de Reynolds, pero es constante para el rango de velocidades del submarino. A es el área transversal del casco. δ es la densidad del agua. El número de Reynolds se calcula según la ecuación 5.3 vista en el Capítulo 5 y que repetimos a continuación para este caso.

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad (7.6)$$

Si consideramos que el submarino desciende a una velocidad de 0,5 m/s, tiene un diámetro de 7,3 m y una viscosidad de 0,012 Kg/m.s obtenemos un Re igual a 3.123.791 lo cual, como se ve el siguiente gráfico que relaciona C_d con

Re da un C_d igual a 0,8. Con el valor de C_d calculamos la fuerza de arrastre, dando un valor de $F_{arr} = 49.428$ N que se considera aproximadamente consante dentro del margen de operación del submarino.

Si de la ecuación 7.5 se despeja la aceleración y se lleva la ecuación a una resolución por iteraciones se pueden conocer las aceleraciones, velocidades y posiciones en z para un tiempo t^{i+1} conociendo los valores en el instante anterior t^i :

$$\begin{aligned} a_z^{i+1} &= \frac{1}{m_{sub}} \left[\frac{1}{2} |\vec{V}_z|^i \cdot \vec{V}_z^i \cdot C_d \cdot A - E(z)^i + P \right] \\ \vec{V}_z^{i+1} &= \vec{V}_z^i + a_z^{i+1} \cdot (\Delta t) \\ z^{i+1} &= z^i + V_z^{i+1} + \frac{1}{2} a_z^{i+1} \cdot (\Delta t)^2 \\ \Delta t &= t^{i+1} - t^i \end{aligned} \quad (7.7)$$

Sistema de balanceo

El sistema balanceo se ocupa de mantener la nave con burbuja 0. Para hacerlo el sistema cuenta con dos tanques de poco más de 12000 litros de cada uno, ubicados uno en la proa y otro en la popa, como se ve en la figura 7.18 resaltados en rojo, comunicados entre si, y que forman un circuito cerrado. En la conexión, el sistema posee una bomba, que impulsa un caudal de 24000 Kg/h o 6,6 kg/s de agua. El sistema está cargado con aproximadamente 6000 l de agua en cada tanque, dependiendo del estado de carga del submarino.

Teniendo en cuenta las dimensiones del buque, y el caudal que manejan las bombas, puede despreciarse el efecto dinámico que el movimiento de agua produce en el submarino. Es decir, se considera que el submarino pasa por sucesivos estados de equilibrio sin estados oscilantes intermedios.

Sigiendo el diagrama de la figura 7.19 se describen los siguientes componentes:

- BC es el baricentro.
- MC es el centro de masa.
- BS es el baricentro del tanque de balanceo de popa, (stern).
- BB es el baricentro del tanque de balanceo de proa, (bow).
- P es el Peso.
- E es el Empuje.

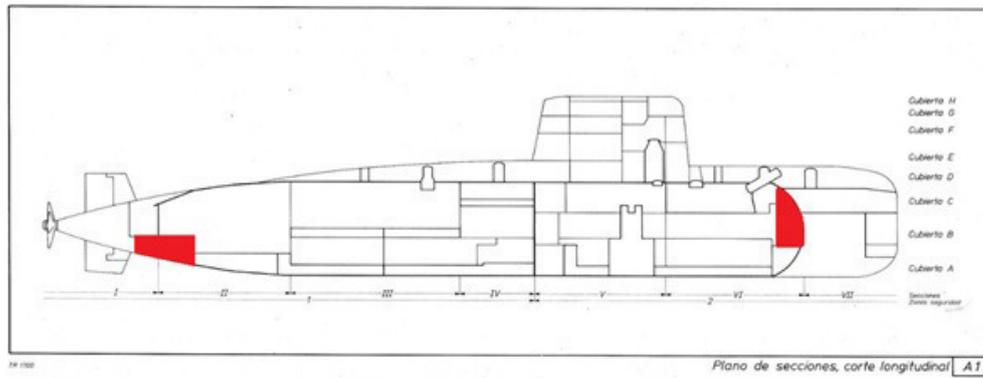


Figura 7.18: Ubicación de los tanques de balanceo.

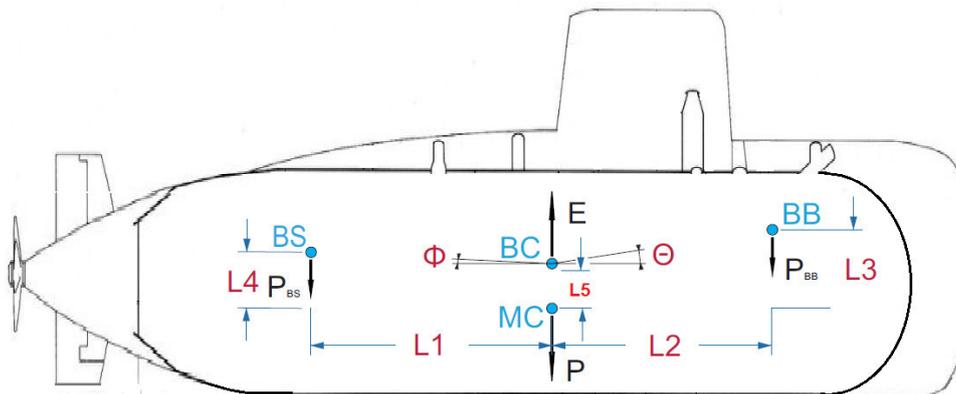


Figura 7.19: Diagrama de fuerzas que se deben compensar con el sistema de balanceo.

- P_{BB} es el peso tanque de balanceo de proa.
- P_{BS} es el peso tanque de balanceo de popa.
-

$$r_{\vec{BS}} = \text{dist}(BC, BS) \quad (7.8)$$

es la distancia entre el baricentro del submarino y el baricentro del tanque de balanceo de popa.

-

$$r_{\vec{BB}} = \text{dist}(BC, BB) \quad (7.9)$$

es la distancia entre el baricentro del submarino y el baricentro del tanque de balanceo de proa.

Del diagrama de fuerzas aplicadas en el submarino mostrado en la figura 7.19 se obtiene la ecuación 7.10

$$\Sigma M_y = P_{BS} \cdot |r_{\vec{BS}}| \cdot \cos(\beta - \varphi) - P_{BB} \cdot |r_{\vec{BS}}| \cdot \cos(\beta + \theta) - P \cdot \cos(\beta - 90) = 0 \quad (7.10)$$

Trabajando algebraicamente y aplicando el teorema de suma y diferencia de ángulos del seno y el coseno se llega a la expresión 7.12 que da valor a la burbuja.

$$\begin{aligned} \Sigma M_y = P_{BS} \cdot |r_{\vec{BS}}| [\cos\beta\cos\varphi + \sin\beta\sin\varphi] - P_{BB} \cdot |r_{\vec{BB}}| [\cos\beta\cos\theta - \sin\beta\sin\theta] \\ - P [\cos\beta\cos90 + \sin\beta\sin90] \end{aligned} \quad (7.11)$$

$$\beta = \arctg \left[\frac{-P_{BS} \cdot |r_{\vec{BS}}| \cdot \cos\varphi + P_{BB} |r_{\vec{BB}}| \cdot \cos\theta}{P_{BS} \cdot |r_{\vec{BS}}| \sin\varphi - P_{BB} \cdot |r_{\vec{BB}}| \sin\theta - P} \right] \quad (7.12)$$

Capítulo 8

Sistema de medición y adquisición de datos

8.1. Composición del sistema

El sistema de medición posee un circuito electrónico y está formado por dos unidades independientes. Ha sido desarrollado especialmente esta tesis con el fin de medir y almacenar datos que permiten estimar la posición del submarino en sus 6 grados de libertad. Consiste en un algoritmo de estima (Dead Reckoning) que mediante la combinación de la información medida por el sistema, e información proveniente de los elementos de medición del submarino, determina la posición y ubicación del buque momento a momento.

Cada uno de los dispositivos diseñados, está compuesto por un Arduino UNO R3 que recibe información de un módulo MPU 6050 (Ver Apéndice E). Los datos censados, se guardan de forma ordenada y bajo una misma base temporal, en un archivo de texto. En cada medición, se continúan guardando datos en el mismo archivo que en la medición anterior. Dicho archivo, se almacena para su posterior análisis en una tarjeta μ SD, que se encuentra ubicada en el módulo Micro SD. Completan el diseño, una batería de 9v, que le confiere al sistema independencia del consumo eléctrico, accesorios electrónicos y un gabinete plástico.

En la figura 8.1 el Arduino UNO se observa parcialmente ensamblado, para poder apreciar la ubicación de algunas de las conexiones y los módulos SD y MPU 6050.

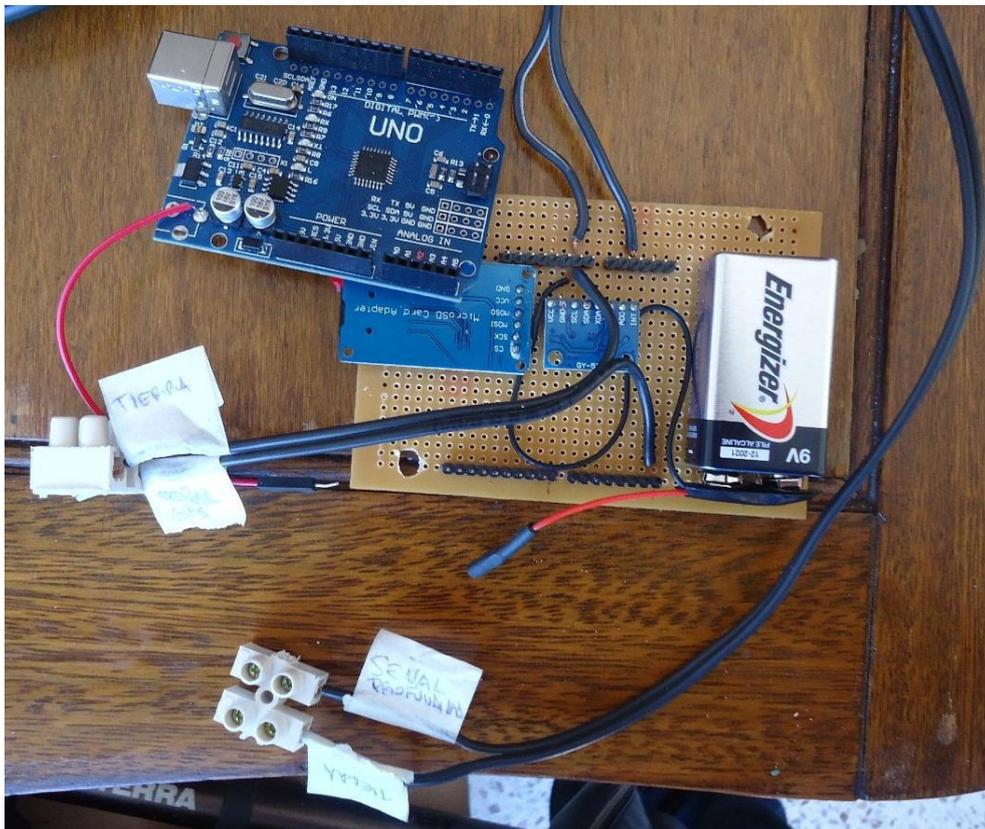


Figura 8.1: Dispositivo diseñado real parcialmente ensamblado.

8.2. Unidades de medición

El sistema de medición, está constituido por dos unidades separadas, independientes y autónomas, que se describen a continuación:

Unidad UNO

La unidad UNO se encuentra ubicada cerca del baricentro del submarino, solidaria al casco resistente. Puede registrar los movimientos de escora y cabeceo del buque, los datos de profundidad que envía el sistema batimétrico y el rumbo que mide respecto de una dirección inicial con el giróscopo del MPU 6050. También guarda el dato de las rpm de la hélice.

Como alternativa, la unidad cuenta con la posibilidad de almacenar el dato de la velocidad longitudinal que provee la corredera y los datos que recibe

del sistema R-011 Eu Sub DR (de profundidad, de posición, velocidad y rumbo) visto en el Capítulo 6. Mediante una de las entradas analógicas del Arduino, y almacenando los datos adquiridos según el protocolo NMEA. También es posible ingresar la señal de rumbo emitida por el giróscopo electrónico del submarino. Estas opciones no han sido utilizadas hasta el momento en esta tesis por problemas ajenos a nuestro dispositivo, relacionados con las conexiones propias del submarino. Su uso está pendiente hasta que se solucione dicho inconveniente.

El módulo microSD está conectado a 5v y tierra para su alimentación y a las entradas digitales 11, 12, 13 y 14. Por su parte, el módulo MPU6050 también conectado a 5v y a tierra, utiliza los pines digitales 2 y 5 más los analógicos A4 y A5 para su funcionamiento. Por otro lado, se utilizan los pines analógicos A1 y A2 para adquirir los datos de RPM y profundidad respectivamente.

El esquema de conexiones que se observa en la figura 8.2 fue realizado en Fritzing¹ y muestra el esquema de las conexiones de la unidad de medición N°1. Se detallan las conexiones entre el Arduino UNO y los módulos MPU 6050 y microSD.

Unidad DOS

La unidad DOS se encuentra solidario a uno de los comandos y guarda sus cambios de posición, en los que se encuentran intrínsecos los movimientos del submarino. Para obtener los movimientos del comando relativos al submarino se debe entonces, cotejar los datos con los censados por la Unidad 1, y realizar la reducción correspondiente. Como se observa en la figura 8.3 a diferencia de la anterior, a esta unidad no se le ingresan datos provenientes de sensores propios del submarino.

De acuerdo al movimiento que se desee medir en particular, deberá colocarse la Unidad 2 en un mando u otro. Como se mencionó en el Capítulo 6 un mando controla el timón vertical y el plano de proa, mientras que el otro controla el plano de popa, pudiendo intercambiarse el control del timón entre ambos mandos, pero manteniendo el dominio del mismo solo en uno de estos a la vez.

¹Fritzing es un programa de software libre, que sirve para la automatización de diseños y/o modelos electrónicos.

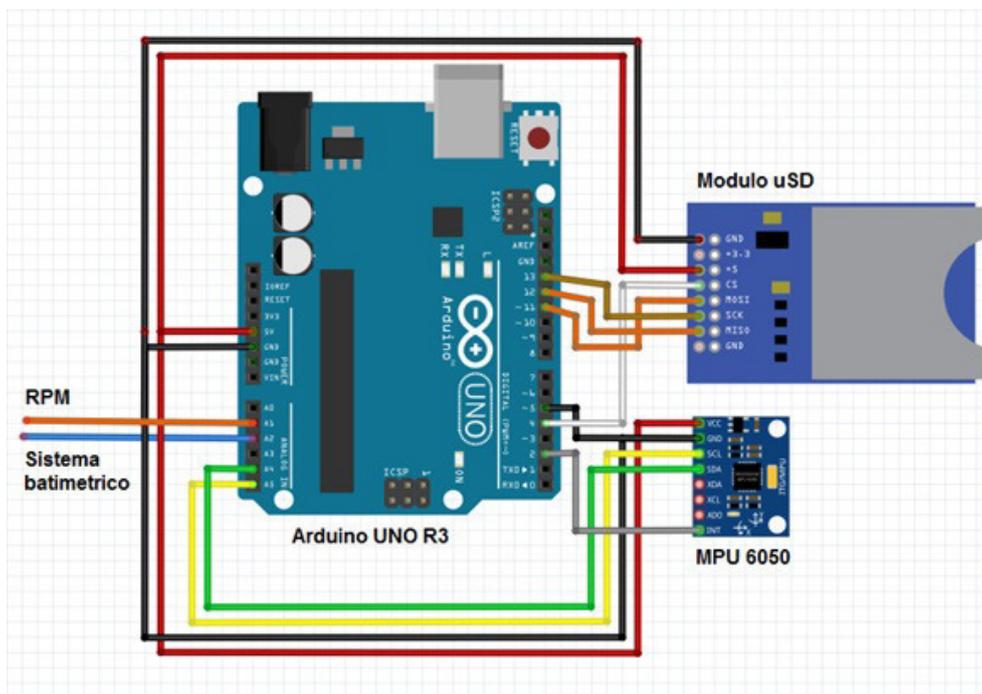


Figura 8.2: Modelo diseñado en Fritzing de la Unidad UNO.

En este caso, la alternativa a la opción utilizada para medir los movimientos de los mandos, podría ser ingresar al Arduino las señales provenientes de los sensores de movimiento para los planos que posee la Consola PL10² vistos en el Capítulo 6. Esto no se realizó por falta de acceso a dicha señal, queda pendiente como trabajo a futuro.

Esta unidad fue pensada para poder analizar y medir la influencia de cada uno de los planos por separado en los movimientos del buque, a lo largo de diferentes mediciones. En caso de querer medir la acción de todos los planos simultáneamente, sería necesario crear una tercer unidad que posea las mismas características que la Unidad DOS, colocar una en cada mando y sincronizarlas, por ejemplo, con un encedido común. En la figura 8.4 se aprecian las dos unidades reales completamente ensambladas, dentro de sus gabinetes plásticos, y preparadas para empezar a tomar datos. La Unidad UNO es la que posee los cables y borneras para conectarse a los equipos del submarino que le envían las señales antes mencionadas.

²Señal analógica que varía entre 0 y 6 volt para la variación entre la posición de equilibrio y el ángulo máximo de los planos.

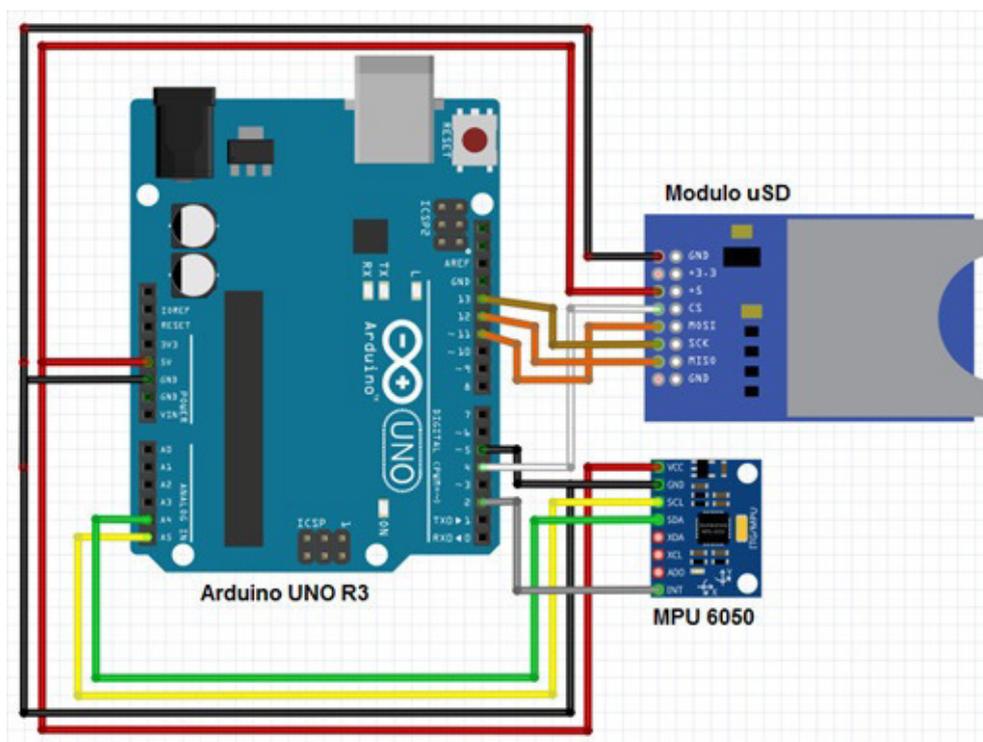


Figura 8.3: Modelo de conexiones de la Unidad DOS

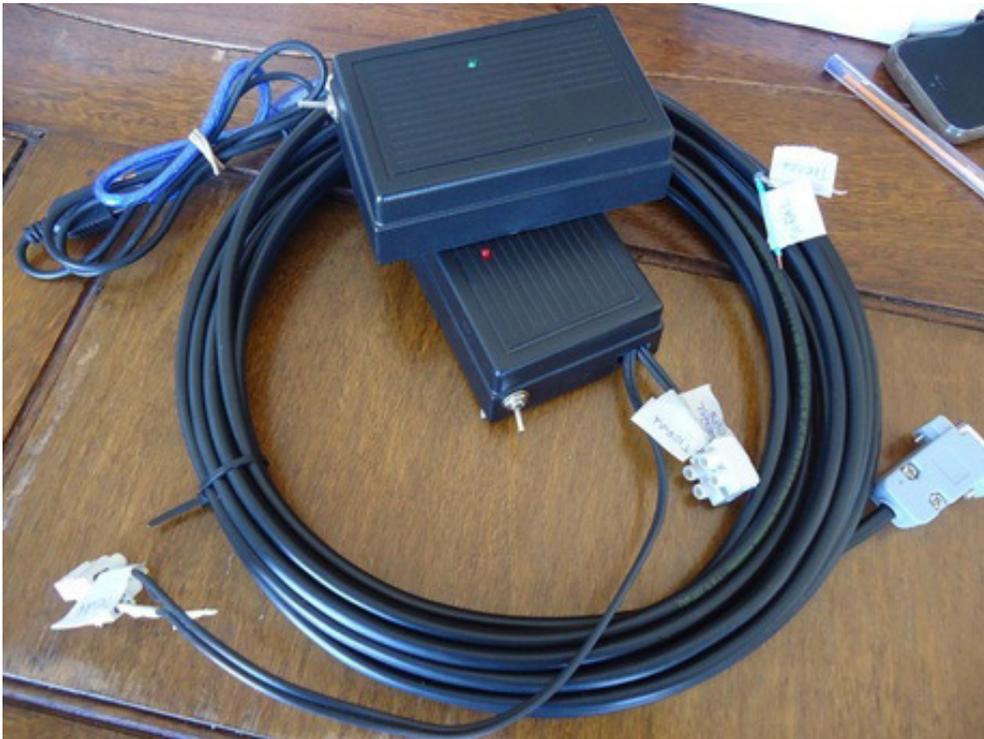


Figura 8.4: Unidades 1 y 2 ensambladas

8.3. Datos obtenidos

El sistema de recopilación de datos adquiere los siguientes tipos de datos, con una frecuencia de 5 veces por segundo:

- 1.- Cuaterniones.
- 2.- Ángulo de escora y burbuja en grados.
- 3.- Profundidad en metros.
- 4.- Rumbo. (relativo al rumbo inicial de la Unidad)

1.-**Quaterniones:** toda rotación en el espacio tridimensional es la acción de un quaternion unitario; la acción del quaternion $q = [z \sin \theta, \cos \theta]$ en cualquier vector, es una rotación alrededor del eje de vector director z un ángulo 2θ (Para más información sobre quaterniones consultar [18]).

Conociendo la posición del submarino en un punto, los quaterniones permiten determinar la magnitud, dirección y sentido de una rotación realizada del mismo, respecto del punto en cuestión en el instante siguiente al que se

toma como referencia. Para saber la nueva posición del buque, solo hace falta afectar la rotación indicada por el quaternion, por la velocidad de desplazamiento. Para bajas velocidades y grandes radios de giro, se puede despreciar el efecto de arrastre del submarino, generado por la inercia del mismo durante un cambio de rumbo. Bajo esta consideración, se puede calcular la posición del buque con el dato de los cuaterniones y la velocidad arrojada por el corredera.

Es necesario mencionar que, se hace uso de este tipo de números para definir la orientación del submarino, puesto que al representar los giros con otros sistemas, por ejemplo los ángulos de Euler, tendríamos que lidiar con el efecto conocido como “Gimbal lock”³. La desventaja que presentan los cuaterniones, es la acumulación del error local. La exactitud en cada medición depende de la exactitud de la medición anterior, lo que genera un aumento del error global, conforme aumenta el número de mediciones.

Los cuaterniones obtenidos, son producto del análisis de las mediciones provenientes del MPU 6050. Estos datos crudos, son procesados por el programa cargado en el Arduino, por un “Filtro Kalman” (Ver Apéndice E).

El giróscopo funciona integrando valores de aceleraciones de Coriolis, arrastrando error al pasar el tiempo, y perdiendo referencia de su posición angular inicial. A su vez, las mediciones realizadas con el acelerómetro arrojan errores repentinos de forma aleatoria, que deben ser filtrados. Además, no se pueden medir giros en los que no haya un cambio de dirección de la aceleración de la gravedad. (Vea el mecanismo de funcionamiento del giróscopo y del acelerómetro en el Apéndice E)

El Filtro Kalman combina las mediciones del giróscopo y el acelerómetro, logrando obtener lo mejor de cada una de ellas para estimar la posición angular del dispositivo.

2.-Ángulo de burbuja y escora: Se calculan en base a los datos medidos por el acelerómetro del MPU 6050. Para obtener los valores de burbuja y escora, el sistema mide sobre su terna de ejes (x, y, z) la dirección del vector aceleración de la gravedad despreciando cualquier otra aceleración. Esto es posible porque las variaciones de velocidad y dirección del submarino, son

³Gimbal lock: Se llama así a la pérdida de un grado de libertad en un mecanismo tridimensional de tres ejes que se produce cuando dos de estos se mueven en una configuración paralela, “bloqueando” el sistema en rotación en un espacio degenerado bidimensional.

extremadamente lentas en las pruebas a realizar, así como durante la navegación en inmersión en general.

Si bien es cierto que al utilizar solo los datos medidos por el acelerómetro, pueden aparecer errores locales muy grandes, las mediciones son absolutas, por lo que no arrastran error. Estos valores discretos erróneos, son filtrados por el programa cargado en el Arduino al momento de guardar cada dato.

3.-Profundidad: La señal medida por el sistema batimétrico visto en el Capítulo 6 es una tensión, que varía entre 0 y 5v, y que se corresponde linealmente con la profundidad medida. Los valores avanzan de a 0.1v, que equivalen a 10 metros. Esta tensión, es adquirida a través de un pin analógico del Arduino y luego transformada en un dato de profundidad por el programa que tiene cargado.

4.-Rumbo: El rumbo se calcula con los datos medidos por giróscopo del modulo MPU6050, que hace uso del efecto coriolis en sus micromecanismos para medir la velocidad de un giro en los ejes (x,y,z). La posición angular se obtiene integrando estos datos en el programa cargado en el Arduino gracias a la librería MPU6050.h.

A diferencia de los datos del acelerómetro, el giróscopo acumula error si consideramos evaluar la posición angular medida con el MPU6050 en un periodo largo de tiempo. En una medición larga se puede ver que los datos arrastran error y se pierde la verdadera posición angular del modulo. Por esta razón, ninguna medición de cambio de rumbo será mayor a 2 minutos, siendo este el tiempo máximo utilizado para realizar una maniobra estandar durante la navegación.

Archivo de datos medidos

El archivo de salida del programa de Arduino que interpreta las diferentes entradas, es un archivo de texto (.txt), con el que se genera una tabla como la de la figura 8.5 de 10 columnas con datos y tantas filas como datos medidos. En la primer columna se muestra el tiempo, en la segunda la burbuja en grados, en la tercer columna aparece la escora en grados, luego las RPM de la hélice, la profundidad en metros y finalmente los 4 cuaterniones con su norma. Se tomaron 4 datos por segundo, descartandose, gracias a un

filtro, los datos con cuaterniones de norma distinta de uno, por considerarse mediciones erróneas.

En caso de realizarse diferentes mediciones sin descargar los datos acumulados en la tarjeta microSD, el programa abre nuevamente el archivo de texto que creó en la primer medición, deja un espacio en blanco luego de la última fila de datos, muestra nuevamente los rótulos y reinicia el contador del tiempo y las referencias para los sensores.

Ti[seg]	Burbuja [°]	Escora [°]	RPM	Prof[m]	Quat W	Quat X	Quat Y	Quat Z	Norma
1,73	2,27	0,49	50,29	32,95	0,6056	0,558	-0,567	0,0126	1,0
2,23	1,94	0,40	50,20	33,44	0,5246	0,6059	-0,597	0,0296	1,0
2,72	2,04	0,20	50,00	33,44	0,4484	0,6437	-0,619	0,0449	1,0
3,22	2,16	-0,04	49,76	32,95	0,3802	0,6722	-0,633	0,058	1,0
3,49	1,75	-0,17	49,63	33,44	0,3472	0,6845	-0,638	0,0643	1,0
3,74	1,63	-0,28	49,52	33,44	0,3179	0,6946	-0,642	0,0697	1,0
4	1,49	-0,38	49,42	33,44	0,2911	0,7032	-0,644	0,0745	1,0
4,26	2,07	-0,45	49,35	33,44	0,2667	0,7106	-0,646	0,0786	1,0
4,52	1,31	-0,49	49,31	33,44	0,2446	0,717	-0,648	0,0823	1,0
4,78	1,41	-0,50	49,30	33,44	0,2244	0,7225	-0,648	0,0856	1,0
5,03	1,55	-0,47	49,33	33,44	0,2062	0,7272	-0,649	0,0884	1,0
5,29	1,45	-0,42	49,38	33,44	0,1896	0,7314	-0,649	0,0909	1,0
5,55	1,23	-0,33	49,47	33,44	0,1747	0,7351	-0,648	0,0931	1,0
5,82	1,54	-0,22	49,58	32,95	0,1608	0,7385	-0,648	0,0951	1,0
6,32	1,25	0,02	49,82	33,44	0,1387	0,7437	-0,647	0,098	1,0
6,57	1,48	0,14	49,94	33,44	0,1287	0,7461	-0,646	0,0993	1,0
7,07	1	0,35	50,15	33,44	0,1124	0,7501	-0,644	0,1014	1,0
7,33	0,92	0,43	50,23	33,44	0,1051	0,7518	-0,643	0,1025	1,0
7,84	1,2	0,50	50,30	33,44	0,0923	0,7551	-0,641	0,1041	1,0
8,09	0,73	0,49	50,29	33,44	0,0869	0,7566	-0,64	0,1047	1,0
8,35	0,57	0,44	50,24	33,44	0,0818	0,7581	-0,638	0,1052	1,0
8,61	0,57	0,36	50,16	33,44	0,0772	0,7594	-0,637	0,1057	1,0

Figura 8.5: Ejemplo de tabla generada con datos provenientes del Arduino

Capítulo 9

Análisis de Datos y Resultados

El sistema desarrollado para la obtención de las curvas evolutivas del submarino, se diseñó a partir de las mediciones adquiridas durante una navegación real de 30 días en altamar a bordo del ARA-San Juan. Estos datos se analizaron en conjunto con personal de la Armada, quien transfirió su conocimiento y experiencia en el asunto, se estudiaron manuales descriptivos de la nave y se compararon las mediciones con curvas existentes.

En la navegación que el submarino realizó con los equipos a bordo, se obtuvo una medición de cambio de plano haciendo uso de los planos de proa (full mando como se describió en el capítulo anterior) y los planos de popa a 70 RPM de la hélice.

9.1. Cambio de plano

El gráfico de la figura 9.1, muestra los datos crudos de una medición de cambio de plano del submarino. Se puede apreciar la evolución de la burbuja y la profundidad de la nave en función del tiempo. En el eje de las ordenadas se representa la profundidad en metros para la curva naranja y burbuja en grados para la curva azul. El eje de las abscisas representa tiempo en segundos, observándose ambas curvas graficadas bajo la misma escala temporal.

En el gráfico de la burbuja se refleja como inicialmente el planero va corrigiendo el cabeceo del buque, para luego darle punta arriba durante el cambio de plano, alcanzando un máximo de 10° . Una vez alcanzada la profundidad de periscopio, la burbuja comienza a estabilizarse, pasando primero por un máximo de ángulo negativo de 7° punta abajo.

CAPÍTULO 9. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

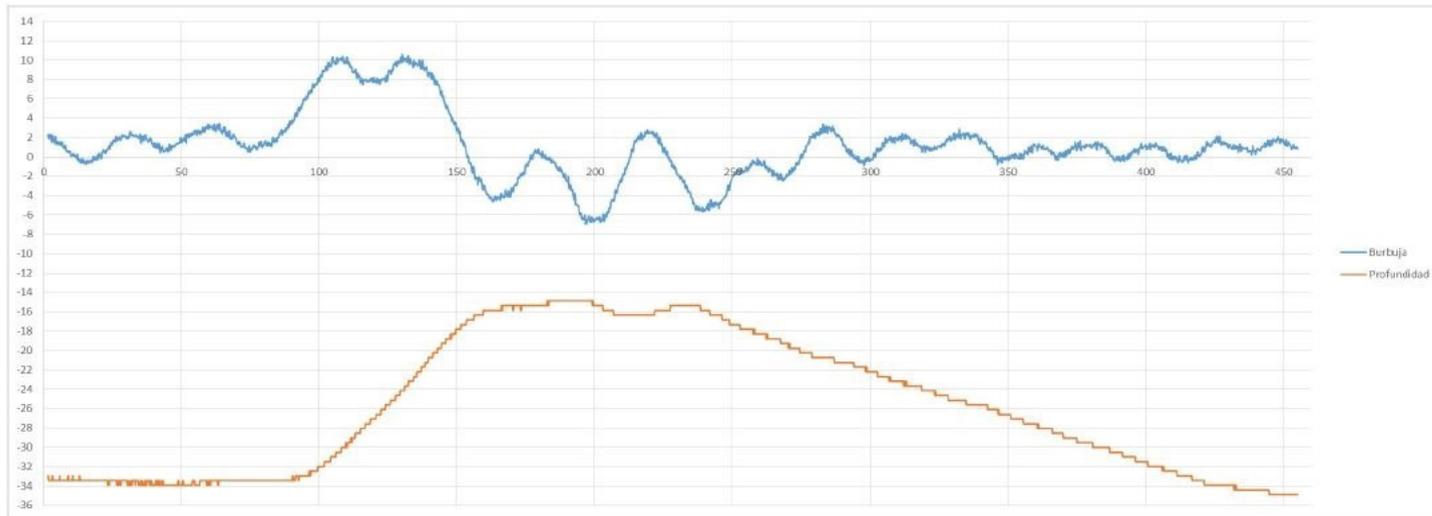


Figura 9.1: Maniobra de cambio en el plano de navegación.

Una vez navegando estabilizado, se inicia nuevamente otra maniobra de cambio de plano, para volver a navegar en el plano 34, en el cual se inició la medición. En este caso la maniobra se realiza sin utilizar el plano de popa, como se hizo en la primer maniobra, sino que se utilizan solo los planos de la vela a la orden de full mando (ángulo máximo). Ahora el planero que controla la burbuja, solo se encarga de intentar que el submarino mantenga burbuja cero.

Comparación con información previa

En la figura 9.2 se comparan dos curvas evolutivas de cambio de plano en inmersión. Una es la realizada por esta tesis, mientras que la otra fue tomada del anexo clasificado como “reservado” de la Armada “DATOS DE PERFORMANCE”. La maniobra de archivo se realizó a 20 nudos, variando 30 metros de profundidad, en 60 segundos. Mientras que la realizada en esta tesis se hizo a 7 nudos, variando 20 metros de profundidad en un tiempo de 180 segundos. Ambas curvas tienen la misma forma y siguen la misma tasa de variación profundidad/tiempo, demostrando la confiabilidad de la medición realizada por la Unidad UNO diseñada en Arduino.

Por último, se muestra en la figura 9.3 la medición otorgada por la Armada de una maniobra de cambio de plano, en paralelo con la orden de los mandos para realizar la maniobra.

9.2. Velocidad

Para las curvas de cambio de velocidad se supone al submarino como a una masa en un medio viscoso, al que se le aplica una fuerza de propulsión, que luego de un transitorio inicial, lo acelera proporcionalmente al aumento de las rpm de la hélice. De la misma manera, la fuerza de arrastre aumenta con la velocidad, dándose una competencia entre esas dos.

Inicialmente el submarino acelera con derivada positiva mientras vence la inercia de la nave para luego comenzar a acelerar con derivada negativa hasta que la fuerza de arrastre se iguala a la que ejerce la hélice.

Se estima que la forma de la curva velocidad versus tiempo tendrá la forma mencionada en el Capítulo 7 en la figura 7.10.

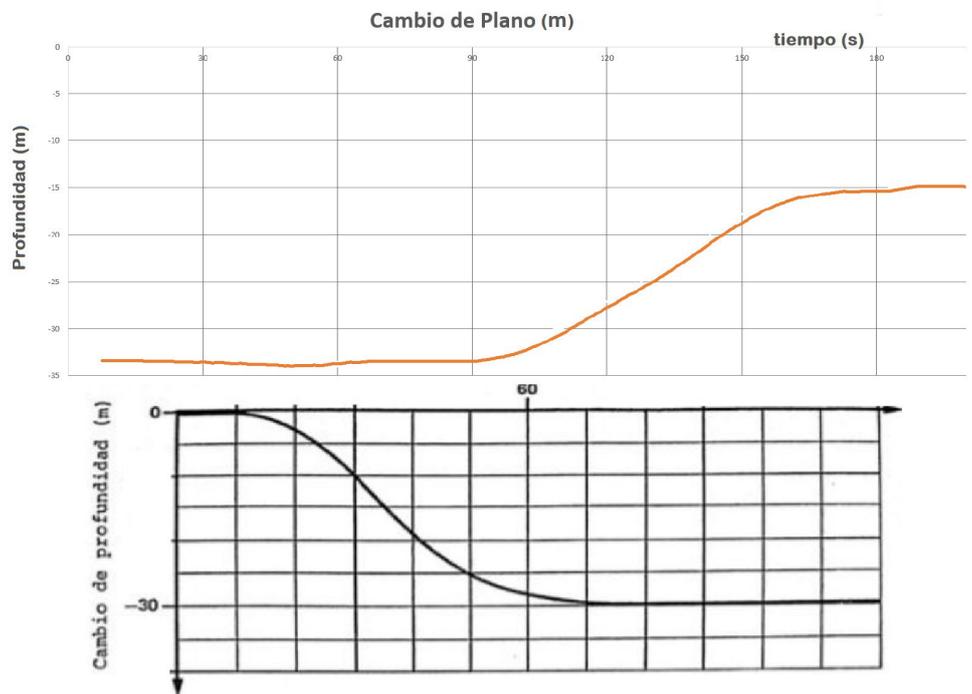


Figura 9.2: Cambio de plano medido con la Unidad UNO diseñada por esta tesis (sup). Medición de cambio de plano otorgada por la Armada (inf)

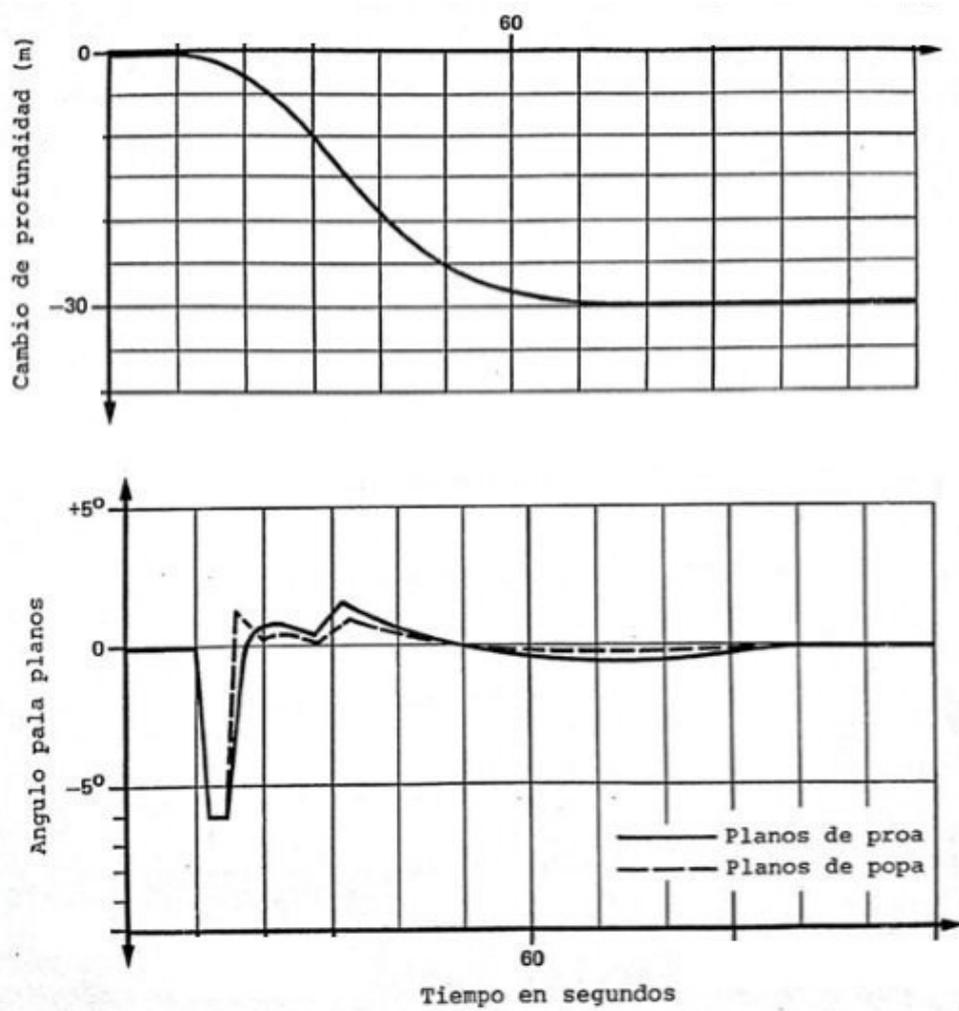


Fig. I-4 Desarrollo típico de una maniobra de cambio de profundidad

Figura 9.3: Medición de cambio de plano otorgada por la Armada (sup). Medición de las órdenes dadas por los mandos para realizar el cambio de plano.

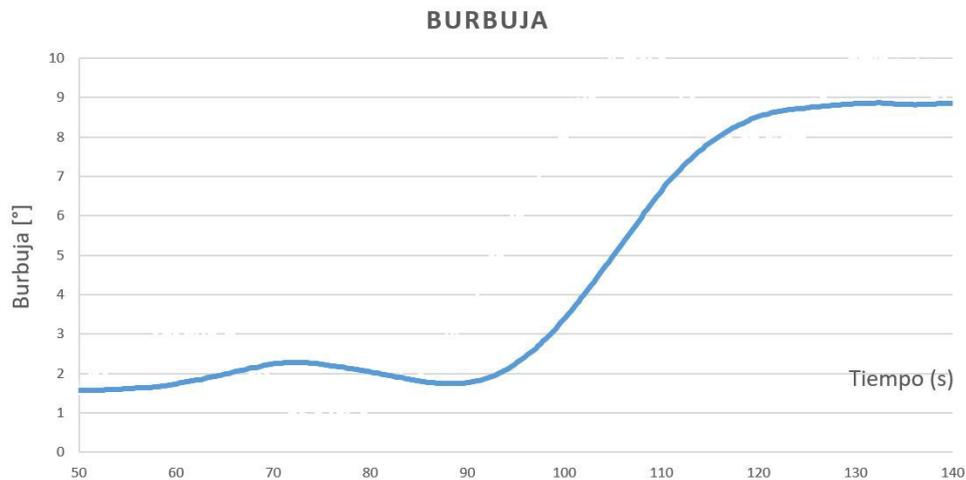


Figura 9.4: Cambio de burbuja desde burbuja cero a burbuja máxima a 7 nudos

9.3. Burbuja

En el Capítulo 7 en la figura 7.3 se estimó que la forma que tendría la curva de “burbuja vs tiempo” luego de dialogar con el personal de la Armada sobre el comportamiento del submarino. En la figura 9.4 se grafica la situación que se registró en las mediciones realizadas con la Unidad UNO, dejando demostrado que se cumple lo planteado. Se puede observar una pequeña oscilación inicial de menos de 1° , luego la burbuja empieza a aumentar con el tiempo hasta una burbuja máxima de 1° .

Notará que en la figura 9.1, el submarino realiza un cabeceo de forma senoidal del con una amplitud de aproximadamente 1° . Esto se debe a lo que se denomina PIO (Pilot induced oscilation)¹ y se amplía en detalle en la figura 9.5. Al establecer el submarino en una condición de navegación dada se logra equilibrar la nave. Este asunto no está representado en los gráficos del anexo de performance.

¹PIO (Pilot induced oscilation): Oscilaciones resultantes de los esfuerzos del piloto para controlar la nave que ocurren cuando éste inadvertidamente ordena una serie de correcciones en direcciones opuestas.

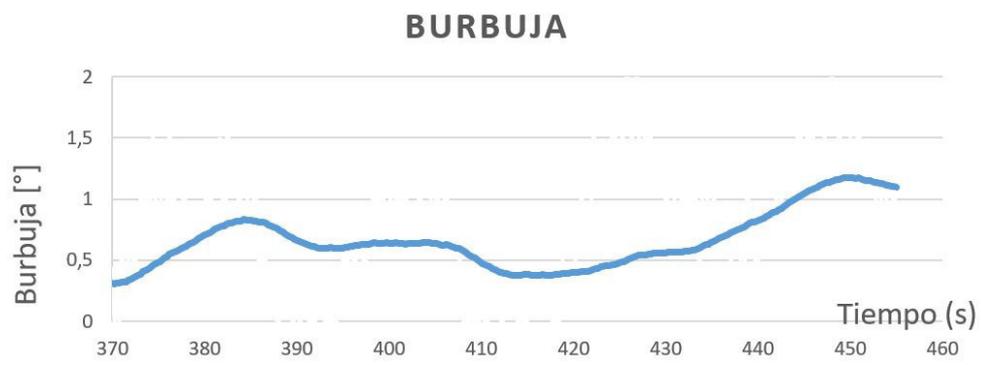


Figura 9.5: Gráfico de la burbuja durante una navegación con el submarino estabilizado y compensado

Capítulo 10

Conclusión

El estudio de la física del movimiento del submarino, nos permitió conocer cuales eran las variables que se deben tener en cuenta durante la navegación submarina. De esta forma, pensar un sistema que midiera el desarrollo de las maniobras en inmersión incluyéndolas. Se evaluaron diferentes formas de obtener datos, opciones para definir las curvas, y confiabilidad de las mediciones.

El uso del sistema de medición y toma de datos diseñado para esta tesis permite descomponer el movimiento del submarino en los diferentes planos, y giros alrededor de los mismos. Tener un conocimiento detallado de la respuesta del buque a diferentes órdenes de los mandos, facilita la tarea de determinar los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar una simulación. En el Capítulo 3, se llegó a la conclusión en conjunto con personal de la Armada, que debería considerarse un rediseño estructural del SIS-01. Teniendo en cuenta que el movimiento de escora es imperceptible en navegación, no tiene sentido simularlo, por las cuestiones explicadas en el Capítulo 2. Esto simplificaría el diseño del mismo, y disminuiría su costo.

Es importante mencionar que el sistema diseñado es adaptable también a submarinos, con características diferentes al ARA-San Juan. Las funciones principales de las unidades de medición no dependen de donde realicen la tarea.

Queda como pendiente, incrementar la cantidad de mediciones realizadas, para obtener las superficies que describen las curvas evolutivas del submarino. Esta tarea dependerá de la disponibilidad de activar los dispositivos en altamar durante las navegaciones normales que realiza el ARA-San Juan. Por último, se recomienda seguir desarrollando el sistema de medición y ob-

tención del datos, con el objetivo de calcular la posición del buque en tiempo real durante la navegación. Esto significaría para la Armada una herramienta fundamental, que complementarí el sistema de estima utilizado actualmente y que superaría la precisión del mismo.

Parte II

Apéndices

Apéndice A

Simuladores existentes en Otros países

A.1. Fuerzas Armadas de Turquía

En el área de la simulación, Havelsan posee un amplio abanico de productos, entre los cuales se pueden distinguir, simuladores para lucha contra incendios, de tácticas de guerra, de ambientaciones especiales, simuladores de vuelo de aviones, de helicópteros, de vehículos no tripulados, de sistemas estructurales, simuladores navales y dentro de estos últimos, simuladores de submarino. Además cada tipo de simulador se encuentra ubicado en un centro de formación específico para cada campo.

A continuación, se puede observar en imágenes algunos de los simuladores desarrollados por Havelsan, para el adiestramiento de las Fuerzas Armadas Turcas:



Figura A.1: Interior del simulador de vuelo de un jet F-16 (izq). Simulador de un vehículo no tripulado (der).



Figura A.2: Simuladores de helicóptero S-70. (izq). Ángulo máximo que puede adoptar el simulador del S-70 y tamaño real respecto de una persona (der).

Centro de Entrenamiento de Simulación Submarina y de Buceo

El Centro de Entrenamiento de Simulación Submarina y de Buceo fue diseñado para albergar todos los elementos de software y hardware que comprenden los simuladores de los submarinos Clase 209 y 214. El edificio del simulador, consta de las divisiones descritas a continuación:

Simulador de Buceo Submarino (Simulador): Incluye el software y el hardware que se utilizan para entrenamientos en operaciones de buceo y superficie, y manejo y control submarino y de superficie de los Submarinos existentes del Comando de las Fuerzas Navales. Consiste en una Sala de Instructor, Cabina de Buceo, Sala de Observadores y el equipo físico entre estos compartimentos, y los subsistemas y conexiones subyacentes y el edificio y la infraestructura asociada.

Cabina de buceo (DC): Esta cabina tiene un hardware similar y el aspecto de una sala de maniobra submarina real, y se puede mover por lo menos en 2 (dos) ejes como en los movimientos de submarino simulado.

Área de simulación: Esta sección ha sido diseñada para reflejar visualmente y funcionalmente las salas de maniobra de los submarinos.

Sala de Instructor (IR): Esta sección cuenta con todos los sistemas para los instructores, que operan el simulador, para la activación y desactivación de la cabina de buceo y otros subsistemas, controlando niveles y escenarios de entrenamiento, planificación de entrenamiento, grabación, análisis, audio y el contacto visual con los alumnos, el botón de apagado de emergencia, la

evacuación, el control de incendios y los paneles de emergencia.

Sala de observadores: Esta sala tiene una capacidad de 25 personas con el fin de monitorear las sesiones de información antes y después del entrenamiento y las actividades realizadas durante el entrenamiento para cada simulación.

Aula: Esta sala tiene una capacidad de 50 personas y está equipada con una variedad de utilidades para llevar a cabo entrenamientos para oficiales de entrenamiento y suboficiales antes de los entrenamientos de buceo aplicados.

Laboratorios: Esta sección comprende un Laboratorio de Máquinas, un Laboratorio de Armas y un Laboratorio de Electrónica para ser equipado con las utilidades necesarias para entrenar oficiales de entrenamiento y suboficiales antes de los entrenamientos de buceo aplicados.

Oficinas: La sección consta de al menos 4 (cuatro) salas de oficina que se utilizarán para las necesidades administrativas del simulador y del edificio.
Sala de conferencias: Esta sección tiene una capacidad de 120 personas.

Tiendas: Estas son las secciones donde se encuentra la tienda de sastre, lavandería, peluquería, Sala de Supervisor de Garaje, talleres de reparación y 3 unidades de almacén.

Trastero: Esta sección está equipada con el almacenamiento adecuado de piezas de repuesto para los simuladores.

A.2. Simulación de Submarinos en la Armada de los Estados Unidos

La fuerza de submarinos norteamericana, está compuesta por un total de 75 submarinos en servicio, y es la única Armada en el mundo que posee todos sus buques del tipo nuclear. Su flota está compuesta por: 14 submarinos de misiles balísticos (SSBN); 4 submarinos de misiles guiados Clase Ohio (SSGN); 11 submarinos de ataque rápido, Clase Virginia (SSN); 3 submarinos de ataque, Clase Seawolf y 43 submarinos de ataque, Clase Los Ángeles (SSN).

En materia de desarrollo tecnológico con fines militares, al igual que en otros aspectos, los Estados Unidos son potencia mundial. Por eso, es interesante hacer un repaso en imágenes de algunos de los simuladores que poseen para el adiestramiento de sus tropas. Plasmando una vez más, la importancia de la simulación militar.



Figura A.3: Vistas a bordo del simulador de submarinos actual para la navegación en superficie de la Armada de los Estados Unidos.

Fue en la década del '70 cuando las Fuerzas Armadas Americanas invirtieron enormes sumas de dinero para implementar un sistema que permitiera entrenar a los pilotos de cazabombarderos con el mayor realismo posible. Gracias a estos esfuerzos se optimizaron los procedimientos para renderizar escenarios tridimensionales, dando origen a lo que son hoy los lenguajes gráficos 3D como OpenGL. Modificando por completo las bases del entrenamiento militar, la simulación, e introduciendo por primera vez el concepto de realidad virtual.

El simulador de la figura A.2 permite instruir a los submarinistas, sobre una de las maniobras clave que deben realizarse durante la navegación, que es ingresar a puerto. El estado de alerta que significa entrar o salir del puerto, es comparable con situaciones de guerra reales. El simulador tiene cargados puertos de diferentes partes del mundo, y a su vez es posible ensayar diferentes condiciones climáticas. En la figura A.2 se observa una persona, sobre el simulador de superficie, utilizando lentes de realidad virtual, en los cuales, puede divisar el puerto en el que quiere aparcar y otras embarcaciones cercanas.

La necesidad de un simulador de navegación en superficie, surgió en la Armada Estadounidense, luego de que ocurriera un accidente en el que, un submarino embistió un buque que se encontraba entrando a puerto. Esta situación, significó una cuantiosa pérdida para la Armada, por lo que, en el 2001 se instaló el primer simulador de realidad virtual, para entrenar a los submarinistas sobre la maniobra de entrada a puerto.

En la Figura A.4 se muestra el primer simulador, en el que, parado en



Figura A.5: Simulador de radar y control (izq), y simulador de snorkel (der)

una torreta de submarino, y con unos anteojos de realidad virtual, el oficial, puede divisar el puerto como se aprecia en la pantalla que se encuentra en el fondo de la imagen. Luego, sería reemplazado por el simulador de las figuras A.2



Figura A.4: Primer simulador submarino de navegación en superficie.

En un último grupo, el área de control y radar, es la de mayor antigüedad y aplicación en lo que respecta a la simulación de submarinos. La figura A.2 los simuladores de radar y control inaugurados en la base de King Bay en el 2012, conjuntamente con el simulador de navegación en superficie, por un costo de 20 millones de dólares.



Figura A.6: Imágenes del interior del simulador de Rheinmetall.

A.3. Otros simuladores en el resto del mundo

Países como Francia, España, Alemania, Italia, Singapur, Grecia, Corea del Sur e Indonesia son algunos de los que también poseen simuladores de submarino montados sobre plataformas móviles, y que cuentan con información pública al respecto. También existen empresas privadas que se dedican a la fabricación y desarrollo de simuladores, tales como ECA Group, Rheinmetall y SAES, y que comercializan sus productos a diferentes Armadas. En general, el diseño y los movimientos que el simulador puede realizar son similares en todos los casos. A continuación se citan algunos ejemplos:

Rheinmetall Defence: El concepto modular de Rheinmetall para la simulación de características técnicas submarinas permite la expansión paso a paso de la simulación de control submarino. De esta manera, se pueden integrar expansiones específicas del cliente hasta la simulación completa de todos los sistemas técnicos a bordo y la replicación del comportamiento real del barco.

Armada de Grecia (HellenicNavy): Cuenta con un total de 7 submarinos clase 209 en servicio. Su escuela de submarinistas, posee simuladores de sonar de torpedos y un simulador de ataque submarino, montado en una habitación que simula ser el interior del submarino. Un simulador de inmersión, ubicado sobre una plataforma móvil.

Armada de la República de Singapur (RSN): Posee siete submarinos en servicio. El comando de entrenamiento (TRACOM), tiene en sus instalaciones, un simulador de manejo y control de buque que recrea el cabeceo y la escora del buque diseñado por ECA Group.

Fuerzas Armadas de Italia: En su flota, cuenta con siete submarinos

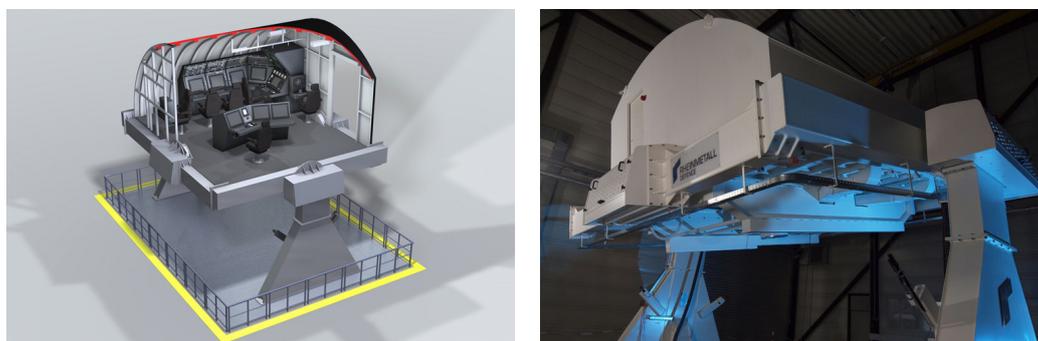


Figura A.7: Imagen de diseño CAD del simulador (izq), e imagen exterior del simulador de Rheinmetall (der)[19]



Figura A.8: Simulador de sonar y ataque submarino (izq), y simulador de inmersión (der)[20]



Figura A.9: Vista externa del simulador de Singapur (izq), imagen del interior del simulador de Singapur (der) [21],[22]

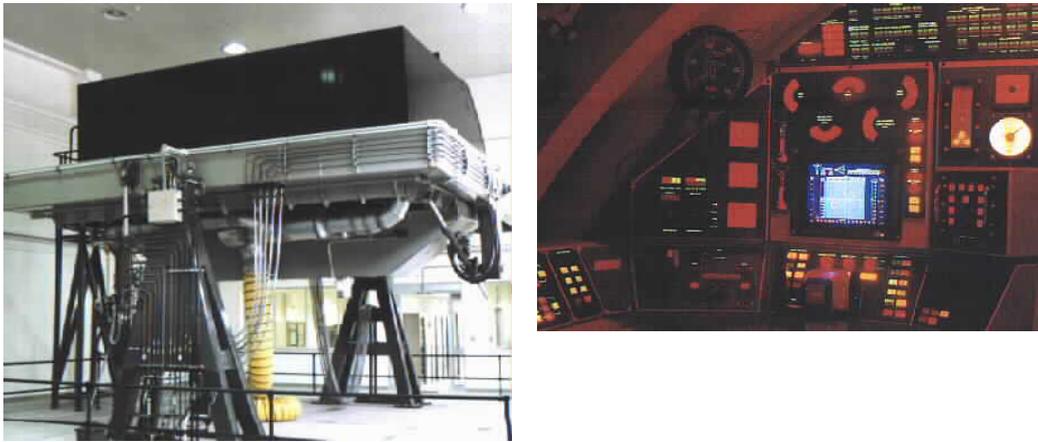


Figura A.10: Vista externa del simulador italiano (izq), imagen del interior del simulador italiano (der) [23]

en funcionamiento. El simulador que posee, tiene la capacidad de reproducir el margen de maniobras del submarino. Puede replicar la instrumentación de la sala de control y los movimientos de escora y cabeceo en condiciones normales de navegación y en situaciones de emergencia.

Apéndice B

La Armada Argentina y el submarino A.R.A. San Juan

B.1. Comando de la Fuerza de Submarinos

El submarino ARA-San Juan de la Armada Argentina, pertenece a la Clase TR-1700 construidos en Thyssen Nordseewerke, Emden, Alemania, y se encuentra al servicio del Comando de la Fuerza de Submarinos desde el año 1985. El otro submarino en servicio con el que cuenta la Armada, es el ARA Salta, el último de la clase 209-1200 de menor tamaño y tecnología más anticuada que los TR 1700.

De la clase TR 1700, el ARA-Santa Cruz, que se encuentra a la fecha de realización de esta tesis, en el astillero Almirante Storni perteneciente Complejo Industrial Naval Argentino (CINAR), en el proceso de reparación de media vida a cargo del astillero Tandonor. Mientras que la construcción de los 4 buques restantes de la flota proyectada inicialmente, se canceló, dejando el ARA-Santa Fe en un 70 % de avance y el ARA-Santiago del Estero en un 30 % de avance. Quedando en suspenso su finalización, y utilizando las partes de los otros dos buques, para simulación en la Escuela de Submarinos y Buceo de la Armada.

El simulador SIS-01 se realiza entonces en base al a ARA San Juan, es decir, un TR 1700 puesto que es el tipo de submarino más tecnológico con el que cuenta la Armada. A su vez, se cuenta con la posibilidad de terminar la construcción de otras dos unidades de la misma clase. Lo cual significa que el presente y futuro del Comando de la Fuerza de Submarinos es en torno a los TR 1700.

APÉNDICE B. LA ARMADA ARGENTINA Y EL SUBMARINO A.R.A. SAN JUAN96



Figura B.1: ARA San Juan, ARA Santa Cruz y ARA Salta en navegación. (2014).



Figura B.2: ARA- Santa Cruz en reparación de media vida, más atrás, el ARA-Santa Fe.

Apéndice C

Sistema de referencias

C.1. Sistema de ejes

Durante el desarrollo de toda esta tesis, utilizamos el sistema de referencia de la figura C.1, solidario y con origen en el centro de masa del submarino. Considerando el eje z vertical, y con sentido positivo hacia abajo, el eje x horizontal, según el sentido de avance del submarino, y positivo hacia adelante, es decir, alineado con la dirección de crujía del submarino. Por último, el eje y , perpendicular a x y a z , es decir, en el plano horizontal, positivo hacia estribor. En cuanto a los giros, se denominan de la siguiente manera:

- **Escora:** Esta determinada por el giro alrededor del eje x .
- **Cabeceo:** es el giro alrededor del eje y , y se produce cuando el submarino cambia su burbuja.
- **Cambio de rumbo:** es el giro alrededor del eje z , es decir, que produce cuando el submarino realiza un viraje.

C.2. Definición de velocidades

Para el sistema solidario al submarino (x, y, z) descrito en la sección anterior, las velocidades lineales asociadas serán (u, v, w) , es decir, $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ las velocidades angulares (p, q, r) (ver figura C.2).

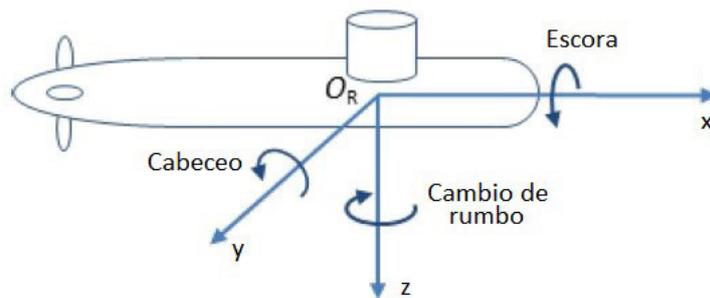


Figura C.1: Simulador de submarino actual.

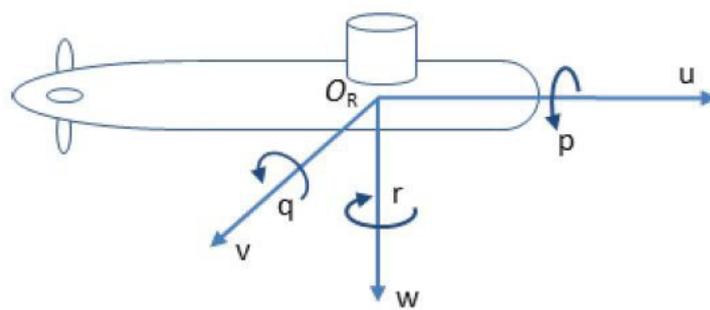


Figura C.2: Simulador de submarino actual.

Apéndice D

Ecuaciones de movimiento

En este Apéndice, se introducen algunas de las ecuaciones necesarias para calcular el movimiento del submarino de forma matemática. En su gran mayoría dependen de coeficientes de origen empírico, o de información que no se encuentra disponible en el ARA San Juan.

D.1. Control de superficies

$$D_{ru} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2 \cdot A_r \cdot C_d \cdot \sin^2 \delta_e \quad (\text{D.1})$$

$$L_{ru} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2 \cdot A_r \cdot C_l \cdot \sin \delta_e \cdot \cos \delta_e \quad (\text{D.2})$$

Donde V_r es la velocidad del flujo de agua entrante, A_r es el área del timón, C_l es el coeficiente de sustentación o de lift, δ_e es el ángulo efectivo del timón, C_d es el coeficiente de arrastre o de drag.

Siguiendo a Toxopeus se definen dos ángulos, δ_h , que es el ángulo hidrodinámico del timón, y δ_e , que es el ángulo efectivo del timón. δ_h es el ángulo entre el eje longitudinal del buque (el eje x en nuestro caso) y el fluido que ingresa. El ángulo efectivo del timón, se calcula como la diferencia entre el ángulo mecánico del timón delta y el ángulo hidrodinámico δ_h .

$$\delta_e = \delta - \delta_h \quad (\text{D.3})$$

Se considera que D_{ru} es opuesta a la dirección del flujo entrante, y que L_{ru} es perpendicular a él. En la ecuación D.3, $\delta_h = \arctg(v_y/v_x)$ donde v_y y v_x son las componentes de la velocidad del agua visto desde el timón. Esto

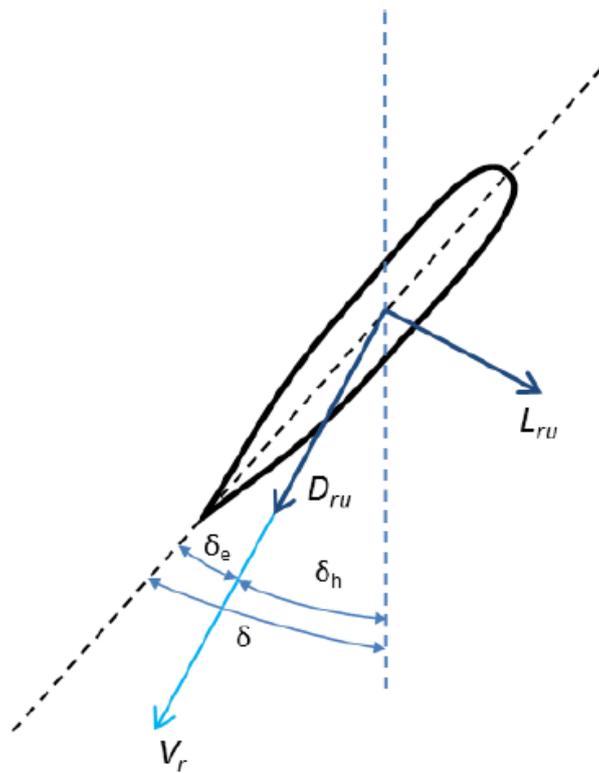


Figura D.1: Fuerzas en el timón según Toxopeus.

se traslada sobre las fuerzas longitudinales y transversales del submarino (fuerzas en x e y) y en el momento sobre el eje z :

$$F_x = D_{ru} \cdot \cos\delta_h - L_{ru} \cdot \delta_h \quad (D.4)$$

$$F_y = L_{ru} \cdot \cos\delta_h - D_{ru} \cdot \sin\delta_h \quad (D.5)$$

$$\tau = \mu x(F_x, F_y, 0) \quad (D.6)$$

donde μ es la posición del timón.

[Toxopeus, 2011] se refiere a las siguientes fórmulas para calcular los coeficientes de drag y de lift obtenidos experimentalmente:

$$C_l = \frac{6,13 \cdot \lambda}{2,25 + \lambda} \quad (D.7)$$

$$C_d = \frac{C_l^2}{\pi \cdot \lambda} \quad (D.8)$$

Donde C_l es el coeficiente de lift, C_d el coeficiente de drag y λ es denominado relación de aspecto del hidroplano.

D.2. Propulsión

J [Newman, 1980]:

$$K_t(J) = \frac{F_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^4} \quad (D.9)$$

$$K_q(J) = \frac{\tau_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D_p^5} \quad (D.10)$$

$$J = \frac{v_p}{n \cdot D_p} \quad (D.11)$$

Donde F_p es la fuerza ejercida por la hélice, τ_p es el torque generado, n son las revoluciones por segundo, D_p es el diámetro de la hélice y v_p es la velocidad del fluido entrante.

Las funciones $K_t(J)$ y $K_q(J)$ son determinadas en pruebas hidráulicas o cálculos por computadora muy complejos a diferentes relaciones de avance.

Las ecuaciones D.9 y D.10 pueden ser utilizadas para calcular el empuje y el torque:

$$F_p = K_t \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_p^4 \quad (\text{D.12})$$

$$\tau_p = K_q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_p^5 \quad (\text{D.13})$$

La hélice en un submarino opera en una estela desde el casco que reduce el flujo promedio en la hélice. Esto se corrige con un factor de corrección unidimensional w_T :

$$v_p = (1 - w_T) \cdot u \quad (\text{D.14})$$

donde w_T es el factor de Taylor de estela, u la velocidad de avance del submarino.

Dado que la hélice acelera el agua hacia atrás, genera una presión negativa sobre el casco aguas arriba de su posición. Esto aumentará la fuerza de arrastre en el casco, negando parte del empuje de la hélice. Esto se puede corregir con otra constante, también sugerida por Toxopeus conocida como la fracción de deducción de empuje t :

$$F_{res} = (1 - t) \cdot F_p \quad (\text{D.15})$$

Para determinar w_T y t , deben realizarse experimentos de modelado del casco para determinar la fracción de estela, así como del casco con la hélice unida para determinar el factor de deducción de empuje.

D.3. Ecuaciones generales de movimiento con 6 grados de libertad

Relación de velocidades

Teniendo en cuenta las velocidades definidas en el Apéndice C, la relación entre las velocidades angulares (p, q, r) y la derivada de los giros respecto de cada eje $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ es:

$$\dot{\phi} = p + q \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{tg}\theta + r \cdot \text{cos}\phi \cdot \text{tg}\theta \quad (\text{D.16})$$

$$\dot{\theta} = q \cdot \cos\phi - r \cdot \text{sen}\phi \quad (\text{D.17})$$

$$\dot{\psi} = q \frac{\text{sen}\phi}{\cos\theta} + r \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \quad (\text{D.18})$$

Fuerzas hidrostáticas

La orientación del sistema de referencias solidario al submarino respecto del sistema fijo a tierra se describe mediante los ángulos de Euler en el orden: roll φ , pitch θ , y yaw ψ . Como vimos en el Capítulo 4, las fuerzas hidrostáticas, es decir, el peso (W) y la flotabilidad (B) actúan a través del centro de gravedad y el centro de flotabilidad respectivamente.

De acuerdo con Feldman [24], las fuerzas hidrostáticas para un cuerpo con 6 grados de libertad, se pueden descomponer en:

$$\begin{pmatrix} X_{HS} \\ Y_{HS} \\ Z_{HS} \\ K_{HS} \\ M_{HS} \\ N_{HS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(W - B) \cdot \text{sen}\theta \\ (W - B) \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\phi \\ (W - B) \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \\ (y_G W - y_B B) \cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B) \cos\theta \text{sen}\phi \\ -(x_G W - x_B B) \cos\theta \cos\phi - (z_G W - z_B B) \text{sen}\theta \\ (x_G W - x_B B) \cos\theta \text{sen}\phi - (y_G W - y_B B) \text{sen}\theta \end{pmatrix} \quad (\text{D.19})$$

Fuerzas hidrodinámicas

La hidrodinámica es un fenómeno muy complejo y difícil de modelar, por lo que la mayoría de las fórmulas para su cálculo constan de coeficientes de origen empírico.

Fuerzas debidas al efecto de masa adicional

Según Ridley para los seis grados de libertad, se pueden calcular como:

$$\begin{pmatrix} X_{HD} \\ Y_{HD} \\ Z_{HD} \\ K_{HD} \\ M_{HD} \\ N_{HD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}q^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur_a}ur + Y_{vp}vp + Y_{pq}pq \\ Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq_a}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp \\ K_{\dot{p}}\dot{p} \\ M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uw_a}uw + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uq_a}ua \\ N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + M_{uv_a}uv + N_{wp}wp + M_{pq}pq + M_{ur_a}ur \end{pmatrix} \quad (\text{D.20})$$

donde por ejemplo, $X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}$ [Kg] y $K_{\dot{u}} = \frac{\partial K}{\partial \dot{p}}$ [Kg.m²] etc., $X_{\dot{u}}$ y $K_{\dot{u}}$ son términos de masa adicional y momentos de inercia adicionales debidos a la masa adicional.

La suma de estos diferentes términos se puede ver como una expansión de Taylor y los coeficientes son a menudo llamados derivados hidrodinámicos. $X_{\dot{u}}$ y $K_{\dot{p}}$ son estimados mediante relaciones empíricas por Blevins [25] y las masas adicionales debidas al flujo cruzado considerando el perfil del submarino simétrico ($Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}}$, $M_{\dot{w}} = Z_{\dot{q}}$, $N_{\dot{v}} = -M_{\dot{w}} = Y_{\dot{r}}$, $M_{\dot{q}} = N_{\dot{r}}$) son calculadas numéricamente usando la técnica de Newmann[15]. Los restantes términos cruzados resultan de una cupla de masa adicional y pueden evaluarse a partir de los términos de masa adicional ya derivados, según Ridley [14]:

$$\begin{aligned}
 X_{wq} &= -X_{ur} = -Y_{wp} = Z_{\dot{w}} = Z_{vp} \\
 X_{qq} &= -Y_{pq} = Z_{\dot{q}} = N_{wp} = -M_{uq_a} \\
 X_{rr} &= -Y_{\dot{r}} = -Z_{rp} = M_{vp} = -N_{ur_a} \\
 Y_{ur_a} &= X_{\dot{u}} = -Z_{uq_a} \\
 M_{uw_a} &= -(Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}) = -N_{uv_a} \\
 M_{rp} &= (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}}) = -N_{pq}
 \end{aligned} \tag{D.21}$$

Fuerzas debidas al efecto de arrastre o drag

En este caso, teniendo las consideraciones realizadas en la sección anterior para el drag, tenemos:

$$\begin{pmatrix} X_{HD} \\ Y_{HD} \\ Z_{HD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{u|u}|u| + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v}|v| + X_{w|w}|w| \\ Y_{uv_d}uv + Y_{v|v}|v| \\ Z_{uw_d}u + Z_{w|w}|w| \end{pmatrix} \tag{D.22}$$

donde se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 X_{uw} &= X_{uv} \\
 X_{w|w}|w| &= X_{v|v}|v| \\
 -Y_{v|v}|v| &= Z_{w|w}|w| \\
 Z_{uw_d} &= -Y_{uv_d}
 \end{aligned} \tag{D.23}$$

Se debe considerar, que estas fuerzas dependen de la forma en la que se calcule el coeficiente de drag, pero que en todos los casos la ecuación tiene la forma de la 5.2, es decir, densidad, por área frontal, por un coeficiente de drag, por la velocidad en la dirección evaluada al cuadrado.

Fuerzas debidas al efecto de elevación o lift

De manera similar al drag, ocurre que las fuerzas y momentos dependen de la forma en la que se calcule el coeficiente de lift. Teniendo las siguientes componentes en los planos xz y xy : Y_l , Z_l , M_l , N_l ; con las siguientes componentes cruzadas:

$$\begin{aligned} Y_{uv_l} &= -Z_{uW_l} \\ M_{uw_l} &= N_{uv_l} \end{aligned} \quad (D.24)$$

De manera análoga, todas las fuerzas y momentos tienen la forma: $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_r \cdot C_{lift} \cdot V^2$ donde el área A_r , el coeficiente de lift C_{lift} y la velocidad V tomarán valores particulares para cada dirección analizada.

Fuerzas debidas al efecto de elevación o lift en los hidroplanos (fins)

Siguiendo el análisis efectuado anteriormente, y lo expresado en las ecuaciones D.1, D.2 y D.3, para cada hidroplano tenemos un ángulo de ataque efectivo δ_e , un ángulo mecánico δ , y un ángulo hidrodinámico δ_h (ver figura D.1). Las fuerzas dependen ahora de la velocidad, la densidad y el coeficiente de lift y de una relación geométrica que involucra la posición relativa de los hidroplanos y el submarino y la relación de largo y área de cada hidroplano. En este caso también aparecen fuerzas y momentos en z y en y de acuerdo a cual sea el hidroplano que se está analizando, para más información al respecto consultar en [14].

De acuerdo a las ecuaciones D.20, D.21, 5.2, D.22, D.23 y D.24 y sumando también los términos de fuerzas debidos a las superficies de control, se pueden combinar todos los términos cruzados y obtener las fuerzas hidrodinámicas para el submarino:

$$\begin{aligned} Y_{uv} &= Y_{uv_l} + Y_{uv_f} + Y_{uv_a} \\ Y_{ur} &= Y_{ur_a} + Y_{ur_f} \\ Z_{uw} &= Z_{uw_l} + Z_{uw_f} + Z_{uw_a} \\ Z_{uq} &= Z_{uq_a} + Z_{uq_f} \\ M_{uw} &= M_{uw_l} + M_{uw_f} + M_{uw_a} \\ M_{uq} &= M_{uq_a} + M_{uq_f} \\ N_{uv} &= N_{uv_l} + N_{uv_f} + N_{uv_a} \\ N_{ur} &= N_{ur_a} + N_{ur_f} \end{aligned} \quad (D.25)$$

donde los subíndices “ a ” significan masa adicional, “ d ” drag o arrastre, “ l ” lift o sustentación y “ f ” fins, para nosotros, superficies de control.

Consideraciones realizadas

El lector notará probablemente, que la expansión de la ecuación 5.15 no incluye todas las combinaciones posibles de (u, v, w, p, q, r) , esto se debe a que algunos se consideran cero, o al menos de valor muy pequeño. Debido a la simetría del casco, muchos de los coeficientes de masa adicional también son cero. Es común asumir también, la simetría alrededor del plano xz . Esto lleva a ser cero los siguientes coeficientes[26]:

$$\begin{aligned}
 X_{\dot{v}}, X_{\dot{p}}, X_{\dot{r}} &= 0 \\
 Y_{\dot{u}}, Y_{\dot{w}}, Y_{\dot{q}} &= 0 \\
 Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{p}}, Z_{\dot{q}} &= 0 \\
 K_{\dot{u}}, K_{\dot{w}}, K_{\dot{q}} &= 0 \\
 M_{\dot{v}}, M_{\dot{q}}, M_{\dot{r}} &= 0 \\
 N_{\dot{u}}, N_{\dot{w}}, N_{\dot{q}} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{D.26}$$

Apéndice E

Sistema de adquisición basado en Arduino

Arduino es una compañía de hardware libre y una comunidad tecnológica, que diseña y manufactura placas computadora, de desarrollo de hardware y software, compuesta por circuitos impresos que integran un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE), en donde se programa cada placa.[27]

El Arduino Uno R3 es una placa electrónica basada en el microprocesador AtMega328. Cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico a 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador, simplemente conectarlo a un ordenador con un cable USB, o alimentarla con un adaptador de corriente AC a DC para empezar.

El MPU-6050 es un sensor de movimiento que posee un acelerómetro y un giroscopio en los 3 ejes (x,y,z) con una alta precisión. Posee ADC internos de 16Bit y se maneja por I2C desde cualquier microcontrolador como Arduino. Dentro de una de las ventajas que cabe mencionar, El MPU-6050 posee conversores analógicos digitales por cada uno de los ejes de cada uno de los sensores para obtener los valores en simultaneo con un rango de hasta $2000^\circ/s$ para el giroscopio y hasta $\pm 16g$ para el acelerómetro.

E.1. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman en 1960 que sirve para poder identificar el estado oculto (no medible) de

un sistema dinámico lineal cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo. Este contiene una ganancia K de realimentación del error que el sistema escoge de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que lo afectan. Ya que el Filtro de Kalman es un algoritmo recursivo, este puede correr en tiempo real usando únicamente las mediciones de entrada actuales, el estado calculado previamente y su matriz de incertidumbre. No requiere ninguna otra información adicional.

E.2. Funcionamiento de un acelerómetro electrónico

En la figura E.1 se puede ver una ilustración simplificada de un acelerómetro semiconductor capacitivo, donde se ve un electrodo rojo (1) en el centro (terminal eléctrico), que tiene suficiente masa para moverse hacia arriba y hacia abajo muy levemente cuando se mueve o inclina el acelerómetro. El electrodo es soportado en voladizo por una viga (2) que es lo suficientemente rígida para sostenerla pero lo tan flexible como para permitir que se mueva. Hay una conexión eléctrica desde el voladizo y el electrodo hacia el exterior del chip (3) para que pueda conectarse a un circuito. Debajo del electrodo rojo, y separado por un espacio de aire (4), hay un segundo electrodo (violeta). El espacio de aire entre los dos electrodos significa que los electrodos rojo y violeta trabajan juntos como un capacitor.

A medida que mueve el acelerómetro, el electrodo rojo se mueve hacia arriba y hacia abajo, y la distancia entre los electrodos rojo y violeta cambia, variando la capacidad entre ellos. Estos movimiento son del orden del micrón.

Pequeños pedazos de aislación, que se muestran como líneas negras en la imagen, evitan que el electrodo rojo haga contacto eléctrico directo con el violeta si el acelerómetro experimenta una fuerza realmente grande. De la misma manera, hay un electrodo azul encima del electrodo rojo y otro espacio de aire (5) formando un segundo capacitor. La distancia entre los electrodos azul y rojo (y la capacitancia entre ellos) cambia a medida que mueve el acelerómetro. Los electrodos están conectados a más terminales eléctricos en los bordes del chip (6), de nuevo, por lo que se puede conectar a un circuito más grande.

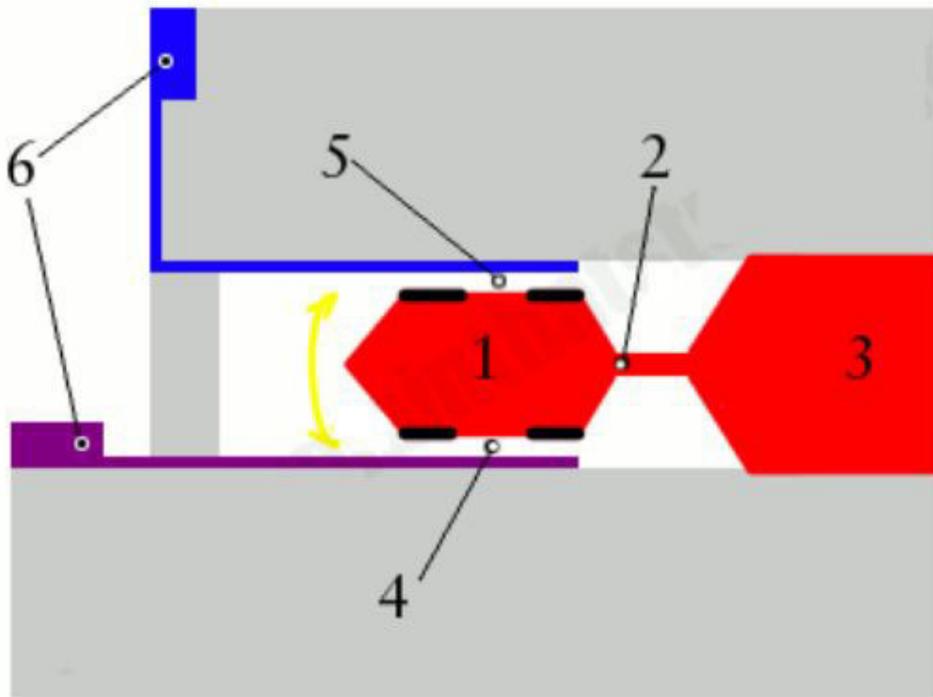


Figura E.1: Esquema del funcionamiento de un acelerómetro.

E.3. Funcionamiento de un giróscopo electrónico

El principio bajo el cual un giróscopo mide es el mismo del acelerómetro, consistiendo este en medir la variación de campo eléctrico entre dos terminales electrónicos. En el caso de la figura E.2 será entre el cuerpo azul central y el rojo por un lado y el amarillo y azul exterior por otro.

El conjunto amarillo y rojo vibra continuamente según se indica con la flecha negra. Mientras que los dos cuerpos azules están solidarios a la placa. Si no exista ninguna perturbación extrema de movimiento este se moverá linealmente como se indicó.

Al introducir un giro a la placa (el giróscopo) la masa amarillo-rojo, por la primera ley de Newton, intentará seguir vibrando como lo hacía tardará en acompañar movimiento de la placa. Esto genera variaciones en las distancias de los terminales azul y rojo, y amarillo y azul que se traducen en variaciones de campo eléctrico entre ellas que son medibles.

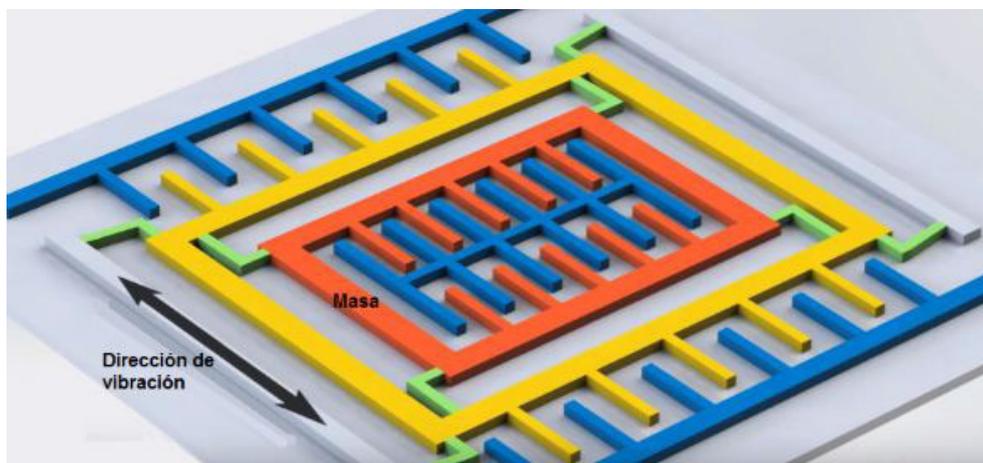


Figura E.2: Esquema del funcionamiento de un acelerómetro.

Bibliografía

- [1] Turkish Naval Forces.
Türk deniz kuvvetleri.
<https://www.dzkk.tsk.tr/>, 2017.
- [2] Denizaltı dalış simülatörleri.
<http://www.havelsan.com.tr/a/Main/urun/881/denizalti-dalis-simulatorleri>, 2015.
- [3] Turkish Armed Forces Foundation.
Havelsan - akıllı teknolojiler, entegre Çözümler.
<http://www.havelsan.com.tr/a/Main/urun/607/simulasyon-urunleri>,
2015.
- [4] Submarine diving training centre.
<http://www.havelsan.com.tr/eng/Main/urun/1016/submarine-diving-training-centre>, 2015.
- [5] United States Naval Submarine School.
Naval submarine school.
<http://www.netc.navy.mil/centers/slc/nss/>, 2017.
- [6] Chief of Information US Navy.
America's navy.
<http://www.navy.mil/>, 2003.
- [7] Tieri R. M. Martínez, G. M.
Pre-diseño de simulador de submarino.
Tesis de grado. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de
Ingeniería, 2013.
- [8] Zabaldano L. Pérez Jácono, F.
Cabina de Simulador de Submarino para Entrenamiento de Tripulaciones.

- Tesis de grado. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería, 2016.
- [9] Cesáreo Díaz Fernández.
Teoría del Buque.
LÁutor - Barcelona, 1968.
- [10] Fabián Ximénez Roa.
Flotabilidad y estabilidad.
<https://issuu.com/fabianximenezroa/docs/>, 2013.
- [11] T. I. Fossen.
Guidance and Control of Ocean Vehicles.
John Wiley, 1994.
- [12] T. I. Fossen.
Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.
John Wileys, 2011.
- [13] S. L. Toxopeus.
Practical application of viscous-flow calculations for the simulation of manoeuvring ships.
PhD thesis, Maritime Research Institute - Netherlands, 2011.
- [14] Peter Ridley, Julien Fontan, and Peter Corke.
Submarine dynamic modelling.
In Jonathan Roberts and Gordon Wyeth, editors, *Australasian Conference on Robotics and Automation 2003*, Brisbane, December 2003.
Australian Robotics & Automation Association.
Proceedings of ACRA available on CD-ROM, at a cost of Aus\$200 each.
- [15] Newman J.N.
Marine Hydrodynamics.
MIT Press, 1980.
- [16] R. Hertig.
Mecánica Teórica.
Editorial .^{EI} Ateneo", Buenos Aires, Argentina, 1970.
- [17] Academo.
Academo.org.
<https://academo.org/demos/3d-surface-plotter/>, 2016.

- [18] *Quaternions*.
Department of Computer and Information Science University of Pennsylvania, 1970.
- [19] Rheinmeall Defence.
Submarine simulation.
<https://www.rheinmetall-defence.com/>, 2017.
- [20] Hellenic Navy.
Hellenic navy.
<http://www.hellenicnavy.gr/>, 2016.
- [21] Government of Singapore.
Flagship of naval training excellence.
<https://www.mindef.gov.sg/>, 2006.
- [22] A. Golpe.
Singapur.
<http://ordendebatallainternacional.blogspot.com.ar/2012/05/singapur.html>, 2012.
- [23] Ministero della Difesa.
Marina militare.
<http://www.marina.difesa.it/Pagine/Default.aspx>, 2017.
- [24] J. Feldman.
Dtnsrdc revised standard submarine equations of motion.
Technical Report. Carderock Division of the Naval Surface Warfare Center, Maryland, USA., 1:31, 1979.
- [25] R. D. Blevins.
Applied Fluid Dynamics Handbook.
Van Nostrand Reinhold Co., 1984.
- [26] G. D. Watt.
Modelling and simulating unsteady six degrees-of-freedom submarine rising maneuvers. tech. rep.
Defence Research and Development Canada - Atlantic, Canadá., 1:72, 2007.
- [27] Arduino.
Arduino.org.
<https://www.arduino.cc/>, 2017.