

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA
SIMULACIÓN DINÁMICA DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO
TRIPULADOS**



Titulación: Ingeniero Naval y Oceánico

Alumno: Jorge Juan García García

Directores: Gregorio Munuera Saura

Mariano Saura Sánchez

Agradecimientos

Si no fuera por la ayuda y el apoyo de las siguientes personas, este trabajo habría sido mucho más difícil, incluso imposible de lograr.

En primer lugar, me gustaría darles las gracias a mis directores de Proyecto D. Gregorio Munuera Saura y D. Mariano Saura Sánchez, por darme la oportunidad y ayudarme en un proyecto tan interesante como este, su paciencia y colaboración fueron fundamentales en la elaboración de este proyecto.

Me gustaría agradecer la participación de D. Jose Luis Aguirre Martínez y Dr.Sonia Busquier Sáez por sus consejos y comentarios.

En casa, tengo que agradecer a toda mi familia por su confianza y apoyo constante, y por ultimo me gustaría dar las gracias a Laura por absolutamente todo.

Índice General

<i>CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1. - INTRODUCCIÓN	1
1.2. - OBJETIVOS.....	2
1.3. – ESTRUCTURA DEL PROYECTO	3
<i>CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL ARTE</i>	5
2.1. - DEFINICIÓN DE AUV.....	5
2.2. - ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS AUV'S.....	5
2.3. - TECNOLOGÍA AUV.....	11
2.3.1. - Autonomía / Cooperación / Sistemas Inteligentes y Tecnologías	12
2.3.2. - Sistemas de Energía / Gestión de la Energía.....	12
2.3.3. - Sistemas de Navegación	14
2.3.4. - Sistemas Sensores y Procesamiento / imágenes 3D	28
2.3.5. - Comunicaciones	29
<i>CAPÍTULO 3 - TIPOS Y CARACTERISTICAS DE LOS UUV'S</i>	31
3.1 - INTRODUCCIÓN.....	31
3.2. – ALISTER AUV.....	31
3.2. – HUGIN 1000.....	34
3.3.- AUV 62 – MR	39
3.4. - SEA OWL SUBROV	41
3.5. – REMUS 600	43
3.6. – REMUS 100	46

<i>CAPÍTULO 4 - MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UUV'S.....</i>	<i>50</i>
4.1. – INTRODUCCIÓN.....	50
4.2. – SISTEMAS DE COORDENADAS, POSICIONAMIENTO Y CINEMÁTICA	51
4.2.1 – Sistemas de referencia	53
4.2.2 – Ángulos de Euler.....	55
4.2.3 – Cinemática	62
4.3 – ECUACIONES DINÁMICAS DEL MOVIMIENTO	67
4.3.1 – Ecuaciones del Movimiento de Translación	67
4.3.2 – Ecuaciones del Movimiento de Rotación	70
4.3.3 – Ecuaciones del Movimiento	74
4.4 – FUERZAS HIDROSTÁTICAS Y MOMENTOS	76
4.5 – FUERZAS HIDRODINÁMICAS Y MOMENTOS	80
4.5.1 – Amortiguamiento Hidrodinámico	80
4.5.1.1 – Arrastre Axial	81
4.5.1.2 – Flujo-cruzado de arrastre	82
4.5.1.3 – Coeficiente de arrastre de balance.....	84
4.5.2 – Masa añadida	85
4.5.2.1 – Masa añadida axial	87
4.5.2.3 – Masa añadida flujo transversal	88
4.5.2.4 – Masa añadida debido al balance	90
4.5.2.5 – Masa añadida términos cruzados	90
4.5.3 – Sustentación del cuerpo	90
4.5.3.1 – Fuerza de sustentación del cuerpo.....	91
4.5.3.2 – Momento de sustentación del cuerpo.....	93
4.5.4 – Sustentación de las aletas	93
4.5.5 – Modelo de propulsión	98
4.5.6 – Términos Combinados.....	100
4.5.7 – Fuerzas y Momentos Externos	101
<i>CAPÍTULO 5 – VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UUV'S.....</i>	<i>102</i>
5.1 – INTRODUCCIÓN	102
5.2 – COMBINACIÓN DE LAS ECUACIONES DEL MOVIMIENTO	102
5.3 – ECUACIONES DEL MOVIMIENTO PARA ROV	102
5.4 – INTEGRACIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DEL MOVIMIENTO.....	106
5.5 – MÉTODO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA RUNGE-KUTTA	107
5.6 – SIMULACIÓN POR ORDENADOR	108
5.6.1 – Condiciones Iniciales para la simulación	108
5.6.2 – Maniobra en el Plano Horizontal.....	109

5.6.3 – Maniobra en el Plano Vertical	116
5.6.4 – Maniobra de Turning Circle o Círculo de Evolución	123
<i>CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES</i>	132
<i>APÉNDICE A - TABLAS DE PARÁMETROS</i>	134
<i>APÉNDICE B - TABLAS DE COEFICIENTES NO-LINEALES</i>	137
<i>APÉNDICE C - CÓDIGO DE MATLAB</i>	141
C.1. SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO	141
C.1.1. Maniobra REMUS 100.m	142
C.1.2. InvMasaRemus100.m	146
C.1.3. PropFisREMUS100.m	147
C.1.4. CoefREMUS100.m	148
C.1.5. Minv.m	149
C.1.6. ensayoREMUS100.m	149
C.1.7. ensayoREMUS100Vt.m	150
C.1.8. ensayoTurningCircle.m	152
C.1.9. REMUS100.m	153
C.1.10. rk4REMUS100.m	156
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	157

Índice de figuras

Figura 1. - Explorador Autónomo Benthic (ABE), Instituto Oceanográfico Woods Hole.....	6
Figura 2. - Un posible calendario para la transición de la tecnología del AUV	10
Figura 3. - Vehículo AUTOSUB en el Centro Oceanográfico de Southampton.....	10
Figura 4. - Modelo de AUV - STDV - (Manta AUV NUW C Newport)	11
Figura 5. - Modelo Ausi de AUV de funcionamiento con energía solar	13
Figura 6. - Ubicación de transpondedores en un sistema LBL.....	16
Figura 7. - Ubicación de transpondedores en un sistema SBL	18
Figura 8. - Ubicación de transpondedores en un sistema USBL	19
Figura 9. - Esquema de funcionamiento de un sistema de navegación electromagnético	26
Figura 10. - Vehículo submarino autónomo Alister AUV	31
Figura 11. - Modelo 3D del Hugin 1000	34
Figura 12. - Diagrama de sistemas y comunicaciones del Hugin 1000	36
Figura 13. - Estructura del AINS del Hugin 1000	37
Figura 14. - Modelo 3D del SAAB AUV 62	39
Figura 15. - Modelo 3D del Sea Owl SUBROV	42
Figura 16. - Modelo 3D del REMUS 600	43
Figura 17. - Imagen captada mediante SSAM	45
Figura 18. - Modelo 3D del REMUS 100	47
Figura 19. - Especificaciones del REMUS 100	48
Figura 20. - Imagen captada por el sonar de barrido lateral	48
Figura 21. - Sistemas de referencia local y global.....	54
Figura 22. - Sistema de referencia local con ángulos de rotación	56
Figura 23. - Transformación de coordenadas en el eje Zo	57
Figura 24. - Transformación de coordenadas en el eje Yo	59
Figura 25. - Transformación de coordenadas en el eje Xo	60

Figura 26. - Perfil del Remus en el plano XZ	87
Figura 27. - Ángulo de ataque efectivo del timón	96
Figura 28. - Ángulo de ataque efectivo del plano de popa	96
Figura 29. - Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	109
Figura 30. - Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Horizontal	109
Figura 31. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	110
Figura 32. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Horizontal	110
Figura 33. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	111
Figura 34. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Horizontal	111
Figura 35. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	112
Figura 36. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal	112
Figura 37. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	113
Figura 38. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal	113
Figura 39. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	114
Figura 40. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Horizontal	114
Figura 41. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)	115
Figura 42. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Horizontal	115
Figura 43. - Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Vertical	116
Figura 44. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	117
Figura 45. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)	117
Figura 46. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)	117
Figura 47. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	118
Figura 48. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)	118
Figura 49. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)	118
Figura 50. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	119
Figura 51. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amort. Cuadrático)	119
Figura 52. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amort. Lineal)	119
Figura 53. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	120
Figura 54. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amort. Cuadrático)	120
Figura 55. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amort. Lineal)	120
Figura 56. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	121
Figura 57. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)	121
Figura 58. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lienal)	121
Figura 59. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	122
Figura 60. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)	122
Figura 61. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)	122
Figura 62. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)	123
Figura 63. - Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)	123

Figura 64. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio)	124
Figura 65. - Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)	124
Figura 66. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio)	125
Figura 67. - Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww) ..	125
Figura 68. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio).....	126
Figura 69. - Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)	126
Figura 70. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio)	127
Figura 71. - Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)	127
Figura 72. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio)	128
Figura 73. - Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)	128
Figura 74. - Turning Circle para un ángulo de timón constante	129
Figura 75. - Trayectoria del REMUS 100 en Turning Circle	130
Figura 76. - Desplazamientos del REMUS 100 en Turning Circle	130
Figura 77. - Velocidades del REMUS 100 en Turning Circle	131
Figura 78. - Transductor Sonar de Baja Frecuencia del REMUS 100 (Plano XZ)	136
Figura 79. - Aletas o Timones del REMUS 100 (Plano XY e XZ)	136

Índice de tablas

Tabla 1. - Comparativa entre sistemas acústicos.....	15
Tabla 2. - Características de LBL de alta y baja frecuencia.....	17
Tabla 3. - Evaluación del sistema de posicionamiento LBL.....	17
Tabla 4. - Variedad de LBL según fabricante y modelo.....	17
Tabla 5. - Evaluación del sistema de posicionamiento SBL.....	18
Tabla 6. - Variedad de SBL según fabricante y modelo.....	19
Tabla 7. - Evaluación del sistema de posicionamiento USBL.....	20
Tabla 8. - Variedad de USBL según fabricante y modelo.....	20
Tabla 9. - Comparación entre sistemas de posicionamiento acústico.....	21
Tabla 10. - Reconocimiento de imagen frente a rastreo de la fuente.....	25
Tabla 11. - Sensores comúnmente utilizados para la navegación en vehículos submarinos.....	27
Tabla 12. - Características de sistemas de guiado acústico, magnético y óptico.....	28
Tabla 13. - Misiones y plataformas de lanzamiento del Alister AUV.....	32
Tabla 14. - Sistemas de superficie de Alister AUV.....	32
Tabla 15. - Resumen de características del Alister AUV.....	33
Tabla 16. - Precisión típica de navegación del Hugin 1000.....	37
Tabla 17. - Resumen de características del Hugin 1000.....	38
Tabla 18. - Resumen de características del SAAB AUV 62.....	41
Tabla 19. - Resumen de características del SUBROV.....	42
Tabla 20. - Capacidades contra minas ligeramente sepultadas del Remus 600.....	45
Tabla 21. - Resumen de características del REMUS 600.....	46
Tabla 22. - Resumen de características del REMUS 100.....	49
Tabla 23. - Nomenclatura estándar AUV.....	52
Tabla 24. - Masa Añadida Axial (Parámetros α y β).....	88
Tabla 25. - Condiciones Iniciales de simulación REMUS 100.....	108

Tabla 26. - Parámetros del REMUS 100	134
Tabla 27. - Coordenadas del Casco para los Límites de Integración del REMUS 100	134
Tabla 28. - Coordenadas del Centro de Gravedad (c.d.g), con respecto al centro de Carena (c.d.c) del REMUS 100.....	135
Tabla 29. - Parámetros de las Aletas del REMUS 100	135
Tabla 30. - Parámetros del Videoray III	135
Tabla 31. - Coeficiente de Arrastre Axial del REMUS 100	137
Tabla 32. - Coeficientes de Flujo Cruzado de Arrastre del REMUS 100	137
Tabla 33. - Coeficiente de Resistencia al Balance del REMUS 100	137
Tabla 34. - Coeficientes de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas del REMUS 100	138
Tabla 35. - Coeficientes de Masa Añadida del REMUS 100	138
Tabla 36. - Coeficientes de Fuerza de Masa Añadida Términos Cruzados del REMUS 100	138
Tabla 37. - Coeficientes de Momento de Masa Añadida Términos Cruzados del REMUS 100	139
Tabla 38. - Términos de Propulsión.....	139
Tabla 39. - Coeficientes de Control de las Aletas.....	139
Tabla 40. - Coeficientes de Amortiguamiento Lineal de Arrastre del VideoRay III.....	140
Tabla 41. - Coeficientes de Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre del VideoRay III.....	140
Tabla 42. - Coeficientes de Masa Añadida del Videoray III	140
Tabla 43. - Coeficientes de Propulsión del VideoRay III.....	140

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. - Introducción

El desarrollo tecnológico de vehículos autónomos, tanto aéreos como submarinos está sufriendo en los últimos años un crecimiento exponencial. Son de interés prioritario, ya que pueden realizar con los sistemas de navegación, control y de adquisición de información actuales, un elevado abanico de misiones de alto nivel, con un riesgo mínimo y un coste tremendamente reducido respecto a otros sistemas convencionales.

Este proyecto tiene como objetivo fundamental el crear una herramienta informática para la simulación del comportamiento dinámico de vehículos submarinos no tripulados.

Para dotar de generalidad al proyecto será necesario realizar una extensa búsqueda bibliográfica sobre los distintos tipos de vehículos UUV comercializados en la actualidad. También se deberá estudiar, con gran nivel de detalle, el desarrollo de los términos empleados en la formulación cinemática y dinámica del movimiento de estos vehículos, dado que se ha comprobado que existe gran discrepancia entre cómo diferentes autores expresan sus respectivas ecuaciones del movimiento.

Una vez desarrollada la formulación cinemática y dinámica Newtoniana aplicables a cualquier tipo de UUV, se procederá a su implementación en el entorno de programación MATLAB y se validará, mediante el uso de determinadas maniobras básicas, su funcionamiento en los planos horizontal y vertical.

Finalmente, se generarán los scripts que permitan realizar otros tipos de maniobras, clásicas en el estudio del nivel de ejecución técnica de los UUV, y se implementará un módulo para la simulación del movimiento del vehículo en un entorno de realidad virtual.

1.2. - Objetivos

Así pues, los principales objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este Proyecto son los siguientes:

- 1.- Revisión bibliográfica sobre el estado del arte en UUV's .
- 2.- Desarrollo detallado de las relaciones cinemáticas y de las ecuaciones del movimiento generales para los 6 grados de libertad de vehículos submarinos no tripulados (UUV's).
- 3.- Formulación e integración de las ecuaciones del movimiento en UUV's en el entorno de programación MATLAB.
- 4.- Validación de la herramienta de simulación.
- 5.- Programación de distintas maniobras que permiten evaluar el nivel de ejecución técnica de cualquier UUV.
- 6.- Simulación del comportamiento de UUV en un entorno de Realidad Virtual.

1.3. – Estructura del proyecto

El presente Proyecto ha sido estructurado y desarrollado en los siguientes seis capítulos:

- Capítulo 1. Introducción y Objetivos.
- Capítulo 2. Estado del Arte.
- Capítulo 3. Tipos y Características de los UUV's.
- Capítulo 4. Modelización Matemática del Comportamiento Dinámico de UUV's.
- Capítulo 5. Validación y Simulación del Comportamiento Dinámico de UUV's.
- Capítulo 6. Conclusiones.

En el Capítulo 1 se realiza una pequeña introducción de UUV, y se enumeran los distintos objetivos de este proyecto.

En el Capítulo 2 se realiza un estudio bibliográfico sobre el estado del arte de los UUV; Sus principales características físicas, los sistemas más comunes que emplean para la navegación y los sensores con los que se equipan para cumplir con éxito la gran diversidad de misiones para las que han sido concebidos. Aunque algunos de los sistemas analizados en la biografía no son de una utilidad directa a los objetivos de este proyecto se han incluido con la intención de recoger, en un solo documento, la información que podrá servir de base al desarrollo de futuros trabajos. Esta revisión bibliográfica permitirá estudiar con mayor claridad el uso de los UUV's.

En el Capítulo 3 se describen, una selección de los tipos de UUV's más representativos del mercado los cuales son distintos entre sí respecto al estudio de su geometría, propiedades físicas, sensores y sistemas de navegación instalados lo cual permitirá estudiar con

mayor claridad las ecuaciones del movimiento, coeficientes y fuerzas hidrodinámicas de los UUV's. También se describen las principales misiones para las que se conciben y su adaptabilidad a los sistemas de estiba de algunos de estos vehículos.

En el Capítulo 4 se procede a desarrollar con gran nivel de detalle las relaciones cinemáticas y los términos que aparecen en sus ecuaciones del movimiento. Se obtienen las ecuaciones del movimiento generales para sus seis grados de libertad (GDL) incluyendo, como única simplificación respecto a su aplicación a otros tipos de vehículos, que se trata de vehículos totalmente sumergidos.

En el Capítulo 5 se empieza por completar las ecuaciones que rigen el movimiento del UUV. Seguidamente se obtiene una aproximación numérica para las ecuaciones del movimiento y las ecuaciones cinemáticas del UUV en el marco de un sistema de coordenadas Locales unido al sistema de referencia Global o de la Tierra. Se usa esta aproximación numérica de las ecuaciones para escribir un código de simulación mediante MATLAB que describa el movimiento del UUV, para poder simular una serie de maniobras tanto en el plano horizontal como el vertical. Por último se desarrolla un módulo de simulación del comportamiento dinámico de UUV's en un entorno de Realidad Virtual.

Finalmente, en el Capítulo 6 se aportan conclusiones derivadas del análisis de los resultados de las maniobras simuladas, y se introducen las posibles líneas futuras de desarrollo en este tema.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. - Definición de UUV

Un vehículo submarino autónomo no tripulado (UUV) es un robot que viaja bajo el agua y que no posee su propia capacidad de control a bordo, sino que está controlado por un operador remoto a través de algún tipo de enlace de comunicaciones. Los UUV's forman parte de un grupo más amplio de sistemas submarinos conocidos como vehículos submarinos no tripulados, una clasificación que incluye también a los (AUV) que no necesitan de aportaciones de un operador, y los no autónomos operados a distancia (ROV) que son controlados y alimentados desde la superficie por un operador / piloto a través de un cordón umbilical o usando el control remoto.

2.2. - Antecedentes Históricos de los AUV's

El concepto de un vehículo sumergible no es una idea nueva. El primer submarino estadounidense se llamó "Turtle". Fue construido en Saybrook, Connecticut en 1775 por David Bushnell y su hermano, Ezra. La tortuga tenía forma de huevo y estaba formada por maderas unidas por tirantes de hierro. Tortuga se balanceaba como un corcho con los vientos de superficie y mares a pesar de que se le introdujo plomo en la parte inferior. En este artilugio, una persona podría descender utilizando una válvula para admitir agua en el tanque de lastre y ascender con el uso de bombas para expulsar dicha agua. Dos tipos de aberturas de ventilación en la parte superior de la escotilla, se abren cuando salen a superficie y se cierra cuando hay agua. El suministro de aire duró sólo 30 minutos. La primera prueba de la tortuga, se llevó a cabo en el puerto de Nueva York en 1776.

Hay diferentes tipos de vehículos submarinos. Un método para clasificar estos vehículos es como sistemas tripulados y no tripulados. En general son más conocidos los sistemas tripulados. Pueden ser descritos simplemente en dos sub-clases, submarinos militares y sumergibles no militares, como los utilizados para apoyar las investigaciones submarinas y su evaluación. Las marinas de guerra del mundo utilizan vehículos de diferentes clases para llevar a cabo sus misiones. Los sumergibles no tripulados, también están comprendidos en un número de diferentes sub-clases. La más simple y más fácil de describir son los sumergibles que son remolcados detrás de un barco, actúan como plataformas para diversos sensores conectados al bastidor del vehículo. Un segundo tipo de sistema sumergible se denomina Vehículo Operado Remotamente (ROV). Un ROV tiene un cordón de sujeción al vehículo, los elementos de sujeción, alimentación y comunicación del ROV se controlan directamente por un operador remoto. Un tercer tipo de sumergible es un vehículo no tripulado "sin ataduras" (UUV). Este vehículo "sin ataduras" no posee su propia capacidad de control a bordo, sino que está controlado por una operador remoto a través de algún tipo de enlace de comunicaciones. Un AUV es un sistema submarino que contiene su propia capacidad de control de sí mismo durante el cumplimiento de una tarea predefinida. La distinción entre el AUV y UUV es que el AUV no requiere comunicación durante su misión, mientras que el UUV requiere cierto nivel de comunicación hasta que se complete la misión asignada.



Figura 1 Explorador Autónomo Benthic (ABE), Instituto Oceanográfico Woods Hole

Una breve historia cronológica del desarrollo de los AUVs, es necesaria para entender lo que ha sucedido durante las últimas décadas en relación con el desarrollo de AUVs.

Aplicaciones de los AUVs antes de 1970:

- Las investigaciones iniciales sobre la utilidad de los sistemas de AUV.

El desarrollo AUV se inició en la década de 1960. Algunos vehículos AUVs se construyeron principalmente para aplicaciones muy específicas de recopilación de datos. Son escasos los artículos publicados que describen estos procesos.

Potencial de los AUVs entre 1970 y 1980:

- El desarrollo tecnológico, y algunos bancos de pruebas construidos.

Durante la década de 1970, un gran número de bancos de pruebas se desarrollaron. La Universidad de Washington desarrolló las APL UARS y vehículos SPURV para recopilar datos de las regiones árticas. La Universidad de la Marina de New Hampshire Laboratorio de Ingeniería de Sistemas (actualmente el Instituto de Sistemas Subacuáticos) desarrolló el vehículo EAVE (un sistema abierto dentro del marco AUV) junto con un esfuerzo complementario llevado a cabo en las instalaciones de la Marina de los EE.UU, en San Diego. También en esta ocasión el Instituto de Tecnología Marina, la Academia Rusa de Ciencias (IMTP, RAS) comenzaron su programa de AUVs con el desarrollo de los vehículos SKAT, así como, el primer análisis profundo en los AUVs L1 y L2. También se fabricaron otros bancos de pruebas de AUVs, este fue un momento significativo de experimentación con la esperanza de definir el potencial de estos sistemas autónomos. Hubo algunos éxitos y muchos fracasos la visión obtenida para su desarrollo ha superado con creces a la tecnología existente para poder aplicar dicha visión. No obstante, fue un avance importante en el desarrollo de los AUVs.

Experimentos con prototipos entre 1980 y 1990:

- Los avances de la tecnología para reforzar los esfuerzos de desarrollo.
- Prueba del concepto (POC) se desarrollan prototipos que son probados y usados.

En la década de 1980 hubo una serie de avances tecnológicos fuera del campo de los AUVs y que en gran medida afectaron al desarrollo de los AUVs. Los ordenadores pequeños de baja potencia ofrecen la posibilidad de implementar algoritmos complejos de guía y control en plataformas autónomas. Los avances en los sistemas de software y de ingeniería han permitido desarrollar sistemas complejos capaces de poner en práctica la visión de los diseñadores del sistema. A pesar de estos avances tecnológicos, se hizo evidente una serie de problemas en el desarrollo tecnológico, los cuales tuvieron que ser resueltos, si los AUVs se iban a convertir en sistemas operativos.

El desarrollo más importante en los EE.UU., son los programas de investigación que se iniciaron proporcionando una importante financiación para el desarrollo de prototipos de prueba. El programa más exitoso fue el esfuerzo en los laboratorios Draper que llevó al desarrollo de dos AUVs grandes para ser utilizados como bancos de prueba para una serie de programas de la marina de guerra.

Esta década fue de hecho el punto de inflexión para la tecnología de AUVs. Estaba claro que la tecnología evolucionaría en los sistemas operativos, pero no estaba tan claro en cuanto a las tareas que realizarían esos sistemas.

Objetivos Tecnológicos de desarrollo entre 1990 y 2000

- Más líneas de financiamiento basadas en el desarrollo tecnológico.
- Muchos AUVs desarrollados internacionalmente.

Durante esta década, los AUVs pasaron de ser un concepto en bancos de pruebas de los sistemas operativos, a la generación de la tarea para lograr los objetivos definidos. Un número de organizaciones de todo el mundo se comprometió al desarrollo de proyectos basados en diversas tareas operativas. Los usuarios potenciales aparecieron y ayudaron a definir sistemas de misión necesarios para lograr los objetivos de sus programas de recopilación de datos. Esta década también identificó nuevos paradigmas para los AUVs, tales como la utilización del sistema de muestreo Autónomo Oceanográfico (AOSN) y proporcionó los recursos necesarios para avanzar en su tecnología de cara a la comercialización.

Expansión de los mercados comerciales entre 2000 y 2010:

- Los primeros productos verdaderamente comerciales están disponibles.

Esta década supone el comienzo de la utilización tecnológica de los AUVs, por lo tanto el número de tareas comerciales es obvia. Los programas están en marcha para construir, operar y ganar dinero usando AUVs. Los mercados han sido definidos y están siendo evaluados en cuanto a su viabilidad. Esta será la última fase del movimiento AUV respecto a la tecnología desde el entorno académico y de investigación. Todavía hay problemas tecnológicos por resolver. La viabilidad económica de la tecnología aún tiene que ser probada. El AUV debe ser probado en un régimen de funcionamiento a fin de que pueda continuar con su desarrollo y para que la industria aumente su potencial.

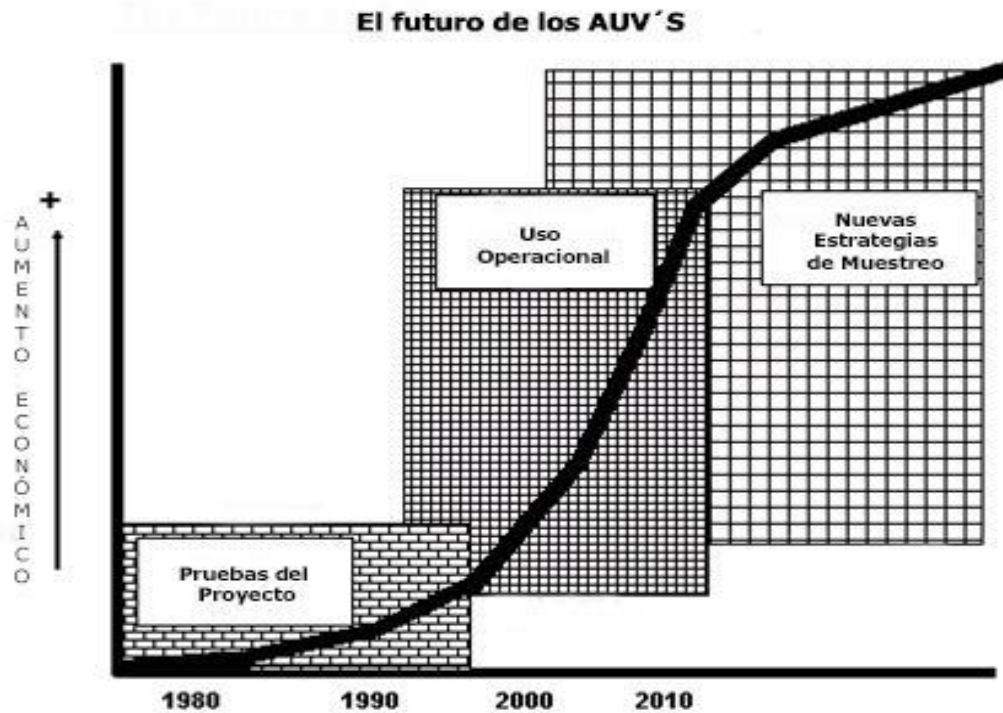


Figura 2 Un posible calendario para la transición de la tecnología del AUV, desde prototipos de sistemas a sistemas operativos, se describe mediante la característica curva "S" asociado con la introducción de una nueva tecnología en el mercado. El año 2000 debería ver esta tecnología expandirse en el uso operacional y producir un aumento económico para los desarrolladores.



Figura 3 Vehículo AUTOSUB en el Centro Oceanográfico de Southampton.

2.3. - Tecnología AUV

Con los años, el enfoque de desarrollo de la tecnología ha cambiado, han surgido nuevas ideas para abordar los problemas tecnológicos. Algunos de los problemas se han resuelto, otros permanecen y deben ser abordados, algunos problemas, no reconocidos anteriormente, han surgido. Es difícil enumerar las tecnologías que se necesitan para los sistemas de AUV.

Cualquier lista que se desarrollase sería incompleta. Se puede sugerir, sin embargo, que la siguiente lista representa muchas de las tecnologías que se han tratado en las últimas tres décadas.

- Autonomía.
- Energía.
- Navegación.
- Sensores.
- Comunicación.

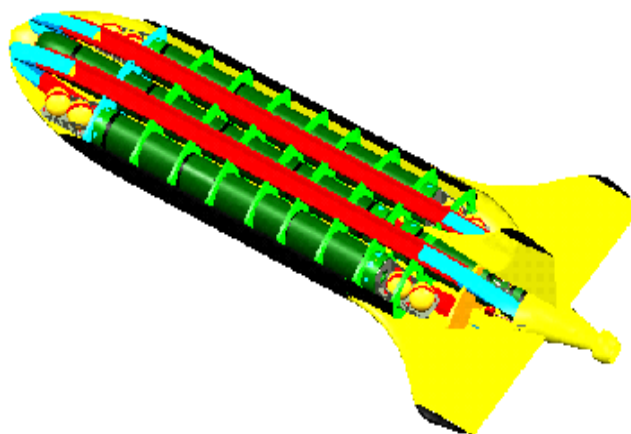


Figura 4.- Modelo de AUV - STDV - (Manta AUV NUW C Newport)

Tecnología a desarrollar en los AUVs:

- Autonomía / Cooperación / Sistemas Inteligentes y Tecnologías
- Sistemas de Energía / Gestión de Energía
- Navegación
- Sistemas Sensores y Procesamiento
- 3D de imágenes
- Comunicaciones.

2.3.1. - Autonomía / Cooperación / Sistemas Inteligentes y Tecnologías

En la década de 1980 se produjo un considerable esfuerzo para dotar a un AUV del nivel de inteligencia necesario para realizar las tareas asignadas. Cuestiones tales como el diseño de sistemas inteligentes, arquitecturas, planificación de la misión, la percepción y evaluación de la situación fueron investigadas. Todos estos son problemas difíciles y hubo pocos éxitos que se llevaran a su evaluación en el agua. Por este motivo las tareas de los AUVs debían no exigir un alto nivel de comportamiento inteligente. De hecho, muchas de las misiones que se asignan a los AUVs de hoy en día requiere sólo una lista de instrucciones pre programadas para realizar una tarea. Por esta razón, no ha habido un significativo nivel de desarrollo; recientemente se trabaja en el desarrollo de la autonomía del AUV.

2.3.2. - Sistemas de Energía / Gestión de la Energía

La resistencia de los AUVs ha aumentado desde unas pocas horas a días. Algunos sistemas ya contemplan misiones de días y muy pocos de años. Esta resistencia prolongada, sin embargo, es a expensas de la capacidad de detección, así como de velocidades de tránsito muy limitadas.

En la mayoría de los primeros sistemas de AUV, las baterías de ácido de plomo fueron los caballos de batalla para los sistemas de energía. Algunos diseños AUV incluyen baterías de plata zinc, pero para la mayoría de los casos el coste era prohibitivo. Algunas aplicaciones, como el vehículo ABE, utilizaron baterías primarias de litio. Los recientes avances en las baterías de NiMH (níquel-hidruro metálico), han creado nuevas oportunidades para los AUVs y esta tecnología se está utilizando en muchos de los actuales sistemas de AUV.

En 1987 el uso de un aluminio / Oxígeno "semi-cell" fue propuesto a DARPA para ser utilizado en un AUV. También la energía solar está siendo utilizada para alimentar un AUV [Ausi]. Este sistema exige un diseño detallado de la gestión de la energía a bordo; tanto durante la fase de adquisición como en la fase de operaciones.

Es una fuente de energía inagotable pero exige que el AUV este en la superficie durante la recarga. En el AUVs Glider [Simonetti] se utiliza energía térmica para variar la flotabilidad del AUV, que puede deslizarse hacia arriba y hacia abajo, en la columna de agua. La resistencia potencial de este sistema se mide en años.



Figura 5 Modelo Ausi de AUV de funcionamiento con energía solar

2.3.3. - Sistemas de Navegación

Los primeros sistemas de navegación de los AUVs se basaron en la estimación de su posición. Sistemas acústicos de navegación con transpondedor de mayor exactitud, pero con un coste logístico considerable.

También se disponían de los sistemas de navegación inercial para los AUVs más caros, pero los costes eran prohibitivos para uso civil, con los avances en la tecnología de plataforma inercial, el coste se ha reducido de manera significativa hasta el punto en que es posible utilizar estos sistemas para AUVs de menor coste.

Los sistemas de navegación continúan mejorando en exactitud así como en precisión. En los últimos años, muchos de los AUVs se han aprovechado de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Sin embargo, hay un fuerte interés en ser capaz de navegar con respecto al entorno, en dicho entorno de referencia de navegación se utilizan las características del fondo, las variaciones gravimétricas y otras características similares, es un objetivo a alcanzar. Un sistema eficiente proporcionará un aumento significativo de la capacidad del AUV.

A continuación vamos a nombrar y describir los distintos sistemas de navegación empleados en los AUVs:

I. Navegación geofísica

Consiste en la medida de parámetros geofísicos para posicionarse y orientarse en el espacio.

El vehículo debe tener almacenados parámetros geofísicos de la zona de navegación (mapas geofísicos): campo magnético, batimetría o anomalías gravitacionales de forma que, al medirlos con sus propios instrumentos y compararlos, pueda reconocer su posición exacta. El sistema debe asumir que puede existir una variación espacial suficiente de estos parámetros para asegurar un posicionamiento preciso.

En la práctica, este sistema de navegación asume ciertas simplificaciones, como: restringir las orientaciones, limitar los tipos de mapas de datos, utilizar mapas de baja resolución. Además se debe complementar este sistema con sistemas de otro tipo: navegación inercial o sistemas de estimación para limitar el área de búsqueda.

Todo ello hace de este sistema de navegación una opción poco interesante para aplicaciones de acercamiento y acoplamiento de AUV's.

II. Acústicos

Los sistemas de navegación mediante señal acústica son los más empleados en aplicaciones submarinas. Permiten determinar la posición de un elemento respecto a determinados puntos utilizados como referencia. Se requiere la instalación de dos grupos de transmisores/receptores: los ubicados en la posición de referencia y los instalados sobre el elemento a localizar (en este caso, el AUV).

El AUV emite una señal acústica que reciben los transpondedores. Éstos responden con otra señal acústica que registra el AUV. Conocida la posición de cada transpondedor y el tiempo de viaje de sus señales, el AUV calcula su ubicación exacta mediante técnicas de triangulación.

Estos sistemas presentan un inconveniente relacionado con su fundamento y es que toda fuente de reflexión provoca interferencia, por lo que operaciones cercanas al fondo marino, la superficie o cualquier otro foco reflector (termoclinas) pueden afectar al posicionamiento.

Los sistemas acústicos se clasifican en tres tipos en función de la distancia entre transpondedores. A partir de éstos se derivan otros sistemas (Tabla 1).

Tipos de sistema	Distancia entre transpondedores
Long Baseline	100 - 6000 m
Short Baseline	20 - 50 m
Ultrashort Baseline	< 0,1 m

Tabla 1 Comparativa entre sistemas acústicos

III. Long-Baseline (LBL)

Los sistemas de navegación tipo LBL (Figura 6) emplean como mínimo 4 transpondedores; uno situado en el AUV y los otros 3, en la mayor parte de los casos, sobre el fondo marino. También se pueden ubicar en el casco de un buque de superficie o bajo el hielo que cubre el océano.

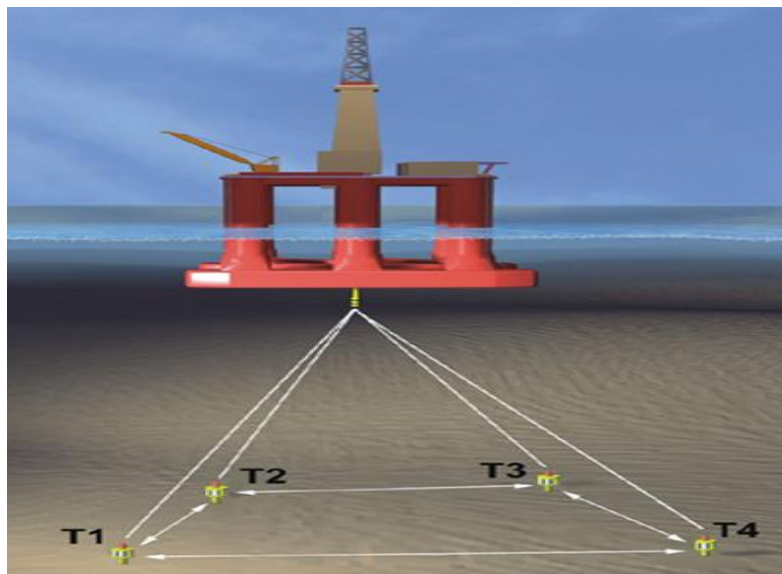


Figura 6 Ubicación de transpondedores en un sistema LBL

En función de la frecuencia de las señales acústicas, estos sistemas obtienen distinto alcance y precisión en el posicionamiento. Con frecuencias de 300 kHz pueden posicionar un objeto con una resolución inferior a 1 cm en un área de operación triangular de 100 metros de lado. Sin embargo, lo habitual en LBL's es funcionar con una frecuencia de 12 kHz en rangos de más de 10 km, con una precisión que varía en función de la distancia entre el emisor y los transpondedores de 0,1 a 10m y con una tasa de actualización de 20 segundos o más. Las características del funcionamiento a ambas frecuencias se resumen en la Tabla 2.

Sistema	Tasa de Actualización	Precisión Típica	Alcance Efectivo
12 KHz	0,1 a 1,0 Hz	0,01 a 10 m	5 a 10 Km
	0,1 a 1,0 Hz	0,1 a 10 m	5 a 10 Km
300 KHz	0,1 a 5,0 Hz	+/- 0,002 m	100 m
	1,0 a 10,0 Hz	+/- 0,007 m	100 m

Tabla 2 Características de LBL de alta y baja frecuencia

Existe una variante del sistema LBL denominada UGPS que sigue el mismo principio de funcionamiento con la salvedad de que los hidrófonos no se anclan al fondo marino sino que flotan en la superficie del océano y se posicionan mediante GPS.

Ventajas	Inconvenientes
Muy buena precisión de posicionamiento independiente de la profundidad.	Son necesarios operadores expertos debido a la complejidad del sistema.
Operación en grandes áreas y profundidades.	Inversión elevada.
En el vehículo únicamente es necesario instalar un pequeño transductor.	Consume mucho tiempo la instalación de transpondedores en el fondo marino.
Redundancia probada.	

Tabla 3 Evaluación del sistema de posicionamiento LBL

Marca	Modelo
Sonardyne	PAN, Compatt
Kongsberg	408
Linkquest	-
Nautronix	906,916
Benthos	-
Desert Star	-
Edgetech (EG & G)	-
Imetrix	-
MORS (Oceano)	-
ORCA	GIB
Sonatech	-

Tabla 4 Variedad de LBL según fabricante y modelo

IV. SBL (Short Baseline)

El sistema SBL utiliza transpondedores similares a los del LBL; la diferencia entre ambos sistemas reside en la distancia entre ellos (Tabla 1). Debido a la corta distancia entre transpondedores en el sistema SBL no es necesario ubicarlos sobre el fondo, de modo que suelen utilizarse posiciones conocidas sobre un vehículo de superficie como referencia (Figura 7). La separación típica entre transpondedores es de 20 – 50 m.

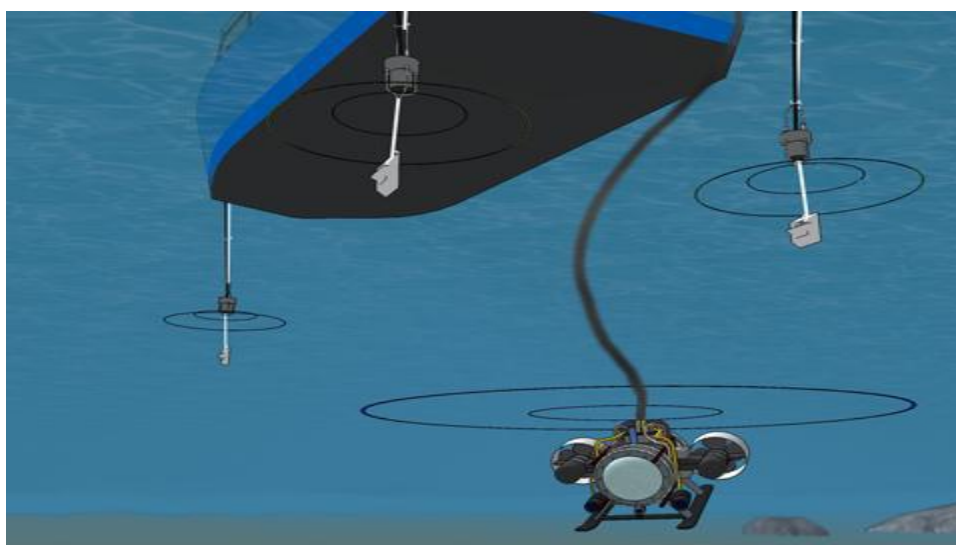


Figura 7 Ubicación de transpondedores en un sistema SBL

Ventajas	Inconvenientes
<p>Su baja complejidad respecto al LBT.</p> <p>Buen rango de precisiones.</p> <p>Despliegue rápido al no ser necesario instalar transductores en el fondo marino.</p> <p>Transductores de pequeño tamaño en el buque.</p>	<p>Grandes distancias entre transductores (> 50 m) para lograr precisión en aguas profundas.</p> <p>La posición de los transductores se debe mantener con precisión, lo que requiere operaciones en dique seco.</p> <p>Necesidad de sensores adicionales como giroscopios o medidores de profundidad para conocer la posición absoluta con precisión.</p>

Tabla 5 Evaluación del sistema de posicionamiento SBL

Marca	Modelo
MORS (Oceano)	-
Nautronix (Honeywell)	RS5D
Sonardyne	SBL

Tabla 6 Variedad de SBL según fabricante y modelo

V. USBL (Ultra-Short Baseline)

Ha llegado a ser el sistema de posicionamiento estándar utilizado para seguimiento y aproximación de AUV y ROV. La facilidad de despliegue y transporte del sistema hace del USBL una buena elección para misiones con ROV y AUV con alcances entorno a los 4 km. En este sistema, el array de transpondedores presenta una separación entre los hidrófonos de aproximadamente 10 cm (Figura 8). La Tabla 7 recoge sus principales ventajas respecto a otros sistemas de posicionamiento.

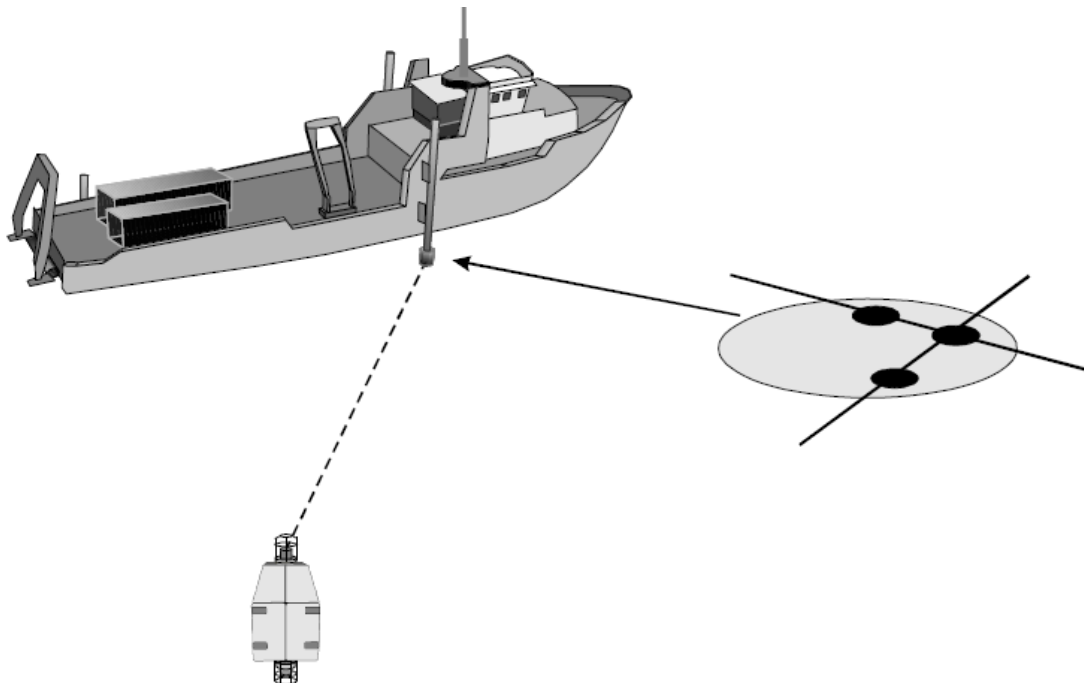


Figura 8 Ubicación de transpondedores en un sistema USBL

Ventajas	Inconvenientes
<p>El bajo número de componentes.</p> <p>Buen rango de precisiones.</p>	<p>Calibración rigurosa del sistema.</p> <p>La precisión es proporcional a la inclinación de la línea que conecta emisor y receptor por lo que la precisión varía con la distancia *.</p> <p>Necesidad de sensores adicionales como giroscopios o medidores de profundidad para conocer la posición absoluta con precisión.</p> <p>Mínima redundancia en sistemas USBL comparado con LBL.</p>

*. Los transpondedores se encuentran situados muy próximos entre sí, por lo que la posición relativa entre el plano de los hidrófonos y el emisor resulta crucial para el posicionamiento. Si la distancia entre cada elemento del array y el emisor es idéntica, la triangulación no se puede realizar y el sistema no será capaz de determinar la posición.

Tabla 7 Evaluación del sistema de posicionamiento USBL

Las principales características de este sistema son:

- Rango de actuación superior a 4500 m.
- Precisión varía entre un 0,25 % y 0,5 % dependiendo de la profundidad o distancia oblicua.
- Velocidad de actualización de la posición de 1s.
- Profundidades de trabajo de diez hasta varios miles de metros.
- Frecuencias de trabajo 18-36 KHz.

Marca	Modelo
Linkquest	-
ORE	LXT, Trackpoint II Plus
Sonardyne	SBL
IxSea	-
Nautronix	ATSII
Kongsberg	Simrad HPR300, HPR410,HiPAD

Tabla 8 Variedad de USBL según fabricante y modelo

	LBL	SBL	USBL
Distancia entre transpondedores	Varios Kilómetros	20 – 50 m	< 10 cm
Cantidad mínima y localización de los elementos acústicos fijos	≥ 3 en el fondo marino	≥ 3 en el caso del buque	1 en el casco del buque
Posicionamiento	Relativo al fondo marino	Relativo al buque	Relativo al buque
Precisión relativa	Buena	Mala	Media
Facilidad de instalación	Difícil. Requiere de un posicionamiento preciso de los transpondedores en el fondo marino	Difícil. Requiere de un posicionamiento preciso de los transpondedores conectados en el buque	Simple. Un único transmisor-receptor instalado en el buque
Tamaño	Grande	Medio	Pequeño
El objetivo conoce su posición	Posible	No	No

Tabla 9 Comparación entre sistemas de posicionamiento acústico

VI. Navegación Doppler

Este sistema conocido como *Doppler Velocity Logs* (DVL) se basa en el efecto Doppler para la medida de la velocidad del vehículo con respecto al fondo marino o a la columna de agua. Un pulso de sonar, emitido desde el AUV a una frecuencia conocida, rebota en el fondo marino y alcanza de nuevo al vehículo, registrándose la frecuencia de la señal reflejada. Comparando ambas frecuencias es posible determinar la velocidad del vehículo en la dirección en que se emitió el haz del sonar.

La configuración típica del DVL es de 3 haces de sonar distanciados 120° ó 4 haces colocados a 90° con lo que se logra determinar la velocidad del vehículo en las tres direcciones del espacio. Integrando estos valores es posible determinar desplazamientos.

El desarrollo de sistemas de este tipo empleando alta frecuencia, con múltiples haces sonar y tasa de actualización de 5 Hz ha permitido obtener medidas de velocidad para navegación cercana al fondo marino (18 – 100 m) con un error de 0,3%.

La precisión de la medida de velocidad depende de diversos factores: velocidad de propagación local del sonido, distancia al fondo y frecuencia de los pulsos. Estimar valores para estos parámetros, distintos a los reales, puede introducir errores importantes en esta medida.

VII. Inercial

Este tipo de sistemas ha experimentado un importante desarrollo en los últimos 15 años. Los sistemas de navegación inercial permiten estimar la posición de un vehículo a partir de un punto de referencia, a un coste muy reducido.

Los sistemas de navegación inercial (INS) poseen medios pasivos (giroscopios, brújulas, sensores de presión, etc.) para determinar la posición espacial con una excelente precisión a corto plazo. Debido a la falta de compensación del giroscopio, a los errores de los acelerómetros y las alteraciones no lineales del INS, la precisión se degrada con el tiempo al ir acumulándose constantemente los errores cometidos.

Los sistemas de este tipo determinan un elevado número de variables que le permiten estimar la posición del vehículo, del siguiente modo:

- **Aceleración angular:** Los giroscopios de anillo láser o los de fibra óptica miden la fase entre dos haces de luz que viajan en direcciones opuestas, a partir de lo cual la velocidad angular puede ser determinada. Presentan errores de 0.1-0.01°/h y se emplean habitualmente en vehículos de bajo coste. Dentro de los giroscopios de fibra óptica son destacables aquellos que incorporan espejos, mejorando el sistema al ser completamente silenciosos debido a la ausencia de elementos móviles.
- **Aceleración lineal:** Los acelerómetros emplean resortes y masas para medir los pequeños desplazamientos de estas últimas a lo largo de ejes ortogonales cuando

son sometidas a fuerzas externas. Estos desplazamientos son convertidos en lecturas de aceleración.

- **Velocidad lineal y angular:** Para el control de navegación resulta necesario conocer, tanto la velocidad angular como la lineal, para lo que se realiza una integración de las medidas de los acelerómetros y giroscopios.
- **Orientación:** La brújula permite determinar la orientación con respecto al campo magnético terrestre con la ventaja respecto a los sistemas anteriores de que no posee un error acumulativo. Sin embargo, presenta el inconveniente de que su medida puede verse afectada por campos magnéticos creados por los propios equipos del vehículo o variaciones locales en el entorno.
- **Inclinación:** Los inclinómetros aportan información acerca de los giros entorno a los ejes longitudinal y transversal del vehículo mediante la medida de la orientación angular que toma el vector gravedad respecto al bastidor.
- **Profundidad:** Sensores de profundidad se encargan de determinar la distancia hasta la superficie mediante la medida de la presión hidrostática.

La precisión de los sistemas de navegación inercial viene determinada principalmente por los acelerómetros. Considerando, además, que el error es acumulativo en el tiempo, se puede estimar el error cometido en posición δ_S mediante la ecuación (1).

$$\delta_S = 0,5 \cdot \delta_a \cdot t^2 \quad (1)$$

Donde δ_a = compensación del acelerómetro y t= tiempo transcurrido desde que se inicializó la posición.

El INS se suele complementar con otros sistemas de posicionamiento (GPS o DVL), de manera que se pueda corregir el error cometido sin dejarlo evolucionar de forma acumulada. Presenta, como característica distintiva respecto al resto de sistemas, una alta precisión direccional del vehículo a un coste reducido.

VIII. Dead Reckoning

Dead Reckoning es un sistema de navegación básico, presente en muchos vehículos autónomos, cuyo fundamento es similar al del inercial por lo que normalmente se instala uno u otro. Consiste en determinar la posición en cualquier instante mediante la estimación del desplazamiento realizado por el vehículo desde una posición inicial conocida.

Al igual que el INS, se evita una acumulación en el error cometido complementándolo con otros sistemas (GPS, USBL, etc.) que actualizan cíclicamente la posición a partir de la cual debe estimarse la trayectoria seguida.

Asimismo, presenta como ventaja respecto a los otros sistemas de navegación su reducido coste, mantenimiento y una alta precisión direccional del vehículo.

IX. Óptico

Los sistemas de navegación ópticos se pueden clasificar en dos tipos: reconocimiento de imagen y rastreo de la fuente. El primero consiste en la captura de imágenes desde un vehículo y mediante el reconocimiento de lo que en ellas aparece, se logra orientar la trayectoria en la dirección deseada. Es similar al método empujado por el ser humano.

Por otro lado, el método de rastreo de fuente se basa en la emisión de uno o varios haces de luz desde el objetivo y mediante el procesado de las imágenes corregir la trayectoria para lograr alcanzarlo. Este segundo método es quizás el que posee un mayor interés para aplicaciones submarinas por no ser necesarias imágenes con alta nitidez para lograr resultados satisfactorios.

El método de rastreo de fuente ha sido estudiado en profundidad e implementado en AUVs para realizar operaciones de acoplamiento alcanzando precisiones de menos de 1cm. Sin embargo, presenta dos inconvenientes. Por un lado, su rango de acción se encuentra limitado a 10 -15 m por la turbiedad del agua que impide que los haces de luz sean visibles a distancias superiores.

Por otro lado, la direccionalidad de los haces lumínicos provoca que el vehículo deba encontrarse en un área limitada frente a la fuente de emisión para lograr que este método de guiado sea efectivo.

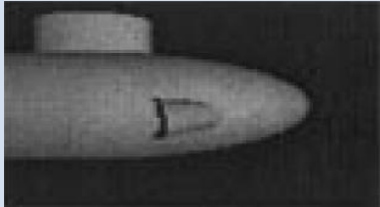

	Reconocimiento de imagen	Fuente de rastreo
Principio	Reconocimiento óptico del submarino y del dispositivo de recuperación.	Seguimiento de las mayores intensidades de luz.
Vista desde el AUV	 <p>Iluminación en el AUV</p>	 <p>Iluminación en el submarino</p>
Equipamiento	El submarino tiene marcas reflectantes. El AUV lleva un sensor óptico y la suficiente iluminación.	El dispositivo de recuperación del submarino lleva instalado una fuente de luz de alta intensidad. El AUV va equipado con una cámara.
Consumo energético	Las altas corrientes necesarias limitan la autonomía del AUV y amenazan la supervivencia del vehículo.	El submarino proporciona un amplio suministro energético.
Escenario	El AUV analiza la imagen y busca la forma del dispositivo de recuperación.	El AUV realiza un seguimiento de la mayor intensidad de luz bajo el horizonte o aproximadamente en la dirección del sonar. El movimiento relativo a la fuente de luz ayuda a determinar una dirección precisa.

Tabla 10 Reconocimiento de imagen frente a rastreo de la fuente

X. Electromagnético

El sistema de navegación electromagnético (EM) emplea un dipolo que genera un campo magnético en el objetivo a alcanzar y, sensores en el AUV para la medida del rumbo y la orientación. Para llevar a cabo el guiado, el vehículo detecta las líneas del campo magnético que emanan del dipolo (Figura 9) y, simplemente, las sigue hasta alcanzar la posición final. Este sistema logra una precisión de 20 cm y su rango de operación es de 25 – 30m.

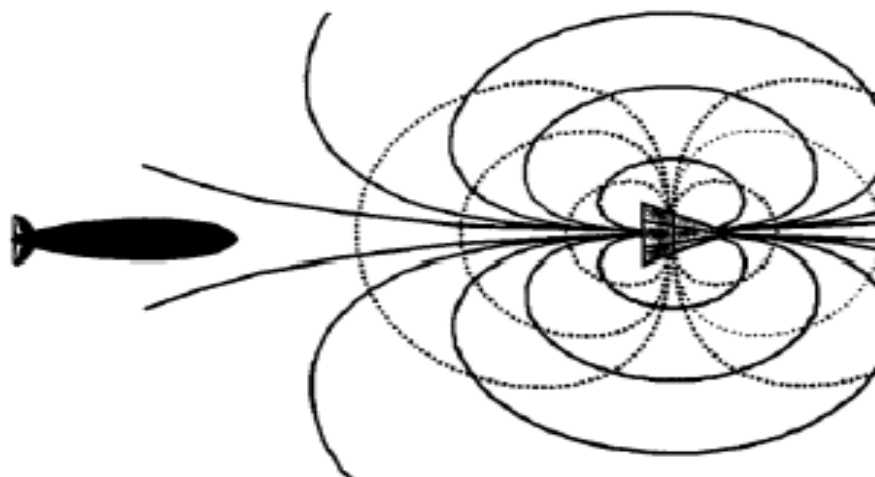


Figura 9 Esquema de funcionamiento de un sistema de navegación electromagnético

Este sistema no puede ser utilizado en aplicaciones militares, es fácilmente detectable por lo tanto su aplicación se ve restringida al uso civil.

XI. GPS / DGPS

Las siglas responden a Sistemas de Posicionamiento Global y Sistema de Posicionamiento Global Diferencial. El fundamento es el empleo de satélites que orbitan entorno al globo terráqueo para lograr posicionar cualquier objeto mediante triangulación. La diferencia entre GPS y DGPS estriba en la precisión alcanzada. Así pues, el DGPS mejora notablemente la precisión del GPS mediante la corrección del error cometido.

Consiste en tomar la medida de dos puntos uno de los cuales tiene completamente definida su ubicación mientras que la del otro se desea conocer. Calculando el error cometido en la determinación del punto que se encuentra definido se puede ajustar la localización del que se desea conocer. Sin embargo, cualquiera de estos sistemas presenta problemas para el posicionamiento bajo el agua por lo que su aplicación queda limitada a acciones en superficie.

XII. Comparación entre diferentes sistemas de navegación

La tabla siguiente recoge una comparativa entre diferentes instrumentos de posicionamiento.

Instrumento	Variable	Tasa de actualización	Precisión	Alcance	Desviación
Altímetro acústico *	Altitud – Z	Varia: 0,1 – 1,0 m	0,01 – 1,0 m	Varía con la frecuencia	-
Sensor de presión *	Profundidad – Z	Medio: 1 Hz	0,1 % - 0,1 %	Profundidad total del océano	-
Inclinómetro *	Alabeo, cabeceo	Rápido: 1 – 10 Hz	0,1 ° - 1°	+/- 45°	-
Brújula magnética *	Dirección	Rápido: 1 – 10 Hz	1° - 10°	360°	-
Giroscopio (mecánico) *	Dirección	Rápido: 1 – 10 Hz	0,1°	360°	10°/h
Giroscopio (anillo laser y fibra óptica) *	Dirección	Rápido: 1 – 1600 Hz	0,1° - 0,01°	360°	0,1 – 10°/h
Giroscopio (orientado al Norte) *	Dirección, cabeceo, alabeo	Rápido: 1 – 100 Hz	0,1° - 0,01°	360°	-
IMU *	x, v, w	Rápido: 1 – 1000 Hz	0,01 m	Variable	Variable
Cierre de fondo (sonar Doppler) *	X _{cuerpo}	Rápido: 1 – 5 Hz	0,3 % o menor	Varía: 18 – 100 m	-
GPS	Posición XYZ	Rápido: 1 – 10 Hz	0,1 – 10 m en aire	En agua: 0 m	-

* Sensores internos

Tabla 11 Sensores comúnmente utilizados para la navegación en vehículos submarinos

Criterio	Acústico	Magnético	Óptico
Baja vulnerabilidad a la detección externa	-	-	••••
Buena precisión direccional	••	••	••••
Capacidad para diferentes usos	••	-	••••
Buena propagación en el entorno	•••	••	•
Baja sensibilidad a ruidos parásitos	•	•	•••
Tecnología probada	••••	•	••
Coste bajo	••••	•••	••
Conclusión	••	••	•••
Leyenda:	- malo • medio •• bueno ••• muy bueno •••• excelente		

Tabla 12 Características de sistemas de guiado acústico, magnético y óptico

2.3.4. - Sistemas Sensores y Procesamiento / imágenes 3D

Un AUV es simplemente una plataforma sobre la que montar sensores y sistemas de detección, los esfuerzos iniciales fueron para establecer las tecnologías básicas necesarias para permitir el funcionamiento del vehículo AUV.

Los sensores se añadieron a la red de a bordo para adquirir datos desde el medio ambiente marino, la mayor parte de estos esfuerzos hasta la fecha han sido integrar sensores existentes y el procesamiento de estos sensores a las limitaciones a veces únicas del AUV. Este método ha demostrado que funciona razonablemente bien.

Recientemente se ha reconocido que hay que desarrollar sensores completamente nuevos basados en las restricciones impuestas por un AUV.

Esto cambió el paradigma de la integración del sensor. Se impulsaría el desarrollo de sensores específicamente para AUV; más inteligentes, de menor consumo de energía, de menor tamaño, etc.

También es cada vez más evidente que los AUVs pueden utilizarse en grupos para la adquisición de los datos necesarios, al mantener una referencia común espacial y temporal, los datos adquiridos por los AUVs, pueden ser agregados y procesados para obtener datos sinópticos y de alta resolución que describan un proceso de interés.

Gran parte del trabajo continúa en el desarrollo de más y más altos sistemas de resolución de imagen, tanto ópticos y acústicos. Con los nuevos procesadores ha sido posible obtener imágenes de alta resolución en rangos más grandes.

El puesto de control de gran parte de este trabajo es la capacidad de analizar los datos adquiridos autónomamente de manera que el AUV pueda utilizar estos datos para las decisiones de dirección y control. Esta capacidad de percepción va aún más allá de las actuales capacidades de los AUVs.

2.3.5. - Comunicaciones

En el medio marino las comunicaciones acústicas subacuáticas son probablemente el sistema de comunicación más viable del que dispone el diseñador del sistema.

Algunos programas de desarrollo han investigado y evaluado otras tecnologías como la comunicación por láser a corta distancia y las comunicaciones relativamente sin ruido sobre grandes rangos de radio frecuencia utilizando las técnicas actuales de densidad de campo.

En los últimos 10 años ha habido importantes avances en las comunicaciones acústicas de tal manera que las comunicaciones de tasa de error relativamente baja son posibles a través de rangos de KMs a una velocidad de un par de bits (Kbps).

Otro aspecto dentro de la comunicación es como poder conectar varios vehículos entre sí o en una plataforma, para poder conseguir así una red de comunicación. Esta red submarina puede entonces ser conectada a un vehículo de superficie que va a actuar como enlace de comunicación terrestre. Se están realizando esfuerzos para investigar cómo implementar una red y poder tener una comunicación efectiva entre los múltiples sistemas subacuáticos.

Ha habido una serie de avances significativos en estas áreas, estas tecnologías siguen siendo investigadas y desarrolladas dentro de los sistemas operativos:

- Orientación / Bajo Nivel de control
- Hidrodinámica y Sistemas de Control
- Manipulación AUVs
- Interfaz de usuario / Herramientas de desarrollo / Emulación / Modelización

Capítulo 3

TIPOS Y CARACTERISTICAS DE LOS UUV'S

3.1 - Introducción

En este apartado se describen una selección de los tipos de UUV's más representativos del mercado los cuales son distintos entre sí respecto al estudio de su geometría, propiedades físicas, sensores y sistemas de navegación instalados lo cual permitirá estudiar con mayor claridad las ecuaciones del movimiento, coeficientes y fuerzas hidrodinámicas de los UUV's. También se describen las principales misiones para las que se conciben y su adaptabilidad a los sistemas de estiba de algunos de estos vehículos.

3.2. – Alister AUV

El Alister AUV es un vehículo de rango medio-largo adaptado para trabajar a cotas inferiores a 300 m en aguas con diferente salinidad y temperatura. Las plataformas desde las que se prevé que pueda ser desplegado y las misiones para las que se ha concebido, según el fabricante, se recogen en la Tabla 13.

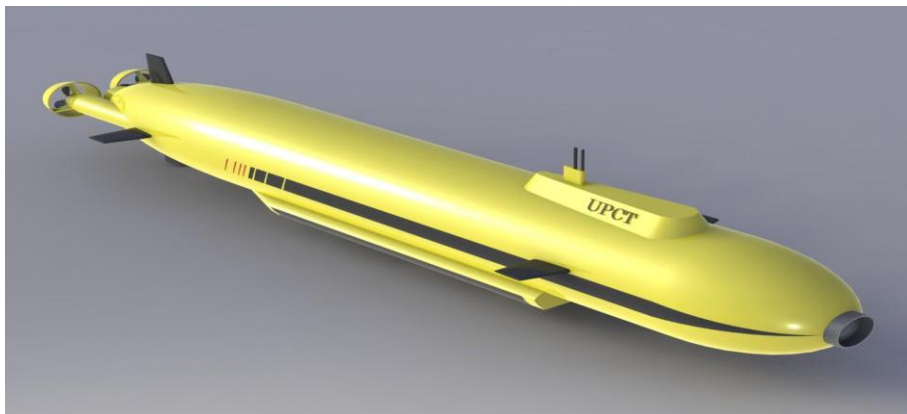


Figura 10 Vehículo submarino autónomo Alister AUV

Plataformas	Misiones
Barco de reconocimiento	Reconocimiento del fondo marino
Buque científico	Oceanográficas e Hidrográficas
Cazaminas	Reconocimiento del litoral
Patrulla de reconocimiento Offshore	Rápido aseguramiento del entorno
Plataformas multipropósito	Seguridad portuaria y costera
Corvetas y Fragatas	Prevención y medidas antiminas

Tabla 13 Misiones y plataformas de lanzamiento del Alister AUV

El sistema básico Alister se compone de dos partes, el AUV y el sistema de superficie compuesto del software y hardware enumerado en la Tabla 14.

Módulos de interfaz que alojan comunicaciones por radio y acústicas submarinas, antenas y transductores	Una unidad portátil de control del vehículo desde popa durante maniobras de L&R
Consola de supervisión (Interfaz maquina – hombre)	Consola de gestión de misiones
Dos consolas de post-proceso de datos	Un sistema de comunicación acústica submarina
Una plataforma de almacenamiento para el AUV	Interfaz de sistema de posicionamiento acústico (opcional)
Equipo de recarga de baterías	Software Triton para post-procesado de datos de imagen

Tabla 14 Sistemas de superficie de Alister AUV

El Alister dispone de un sistema de gestión de misiones fácil de utilizar. Un equipo con doble pantalla permite definir las misiones y simultáneamente observar y controlar el estado actual de los sensores instalados en el AUV.

La planificación de las misiones es sencilla, mediante el uso de herramientas interactivas que permiten definir comportamientos básicos del AUV (a partir de modelos predefinidos).

Así se puede especificar una misión a partir de una composición de diferentes fases, asociadas a comportamientos y métodos que permiten encadenar las distintas fases seleccionadas. El sistema permite una simulación de la misión programada para verificar su viabilidad.

Por otro lado, la misión puede ser monitorizada en la pantalla de Datos, se muestran datos de vídeo/sonar de las cámaras del AUV y parámetros de navegación que permiten a un operador controlar manualmente el vehículo. La misión se monitoriza mediante USBL y, cuando es posible, mediante envío de datos mediante módem acústico. Este mismo sistema se puede emplear, también, para supervisar las operaciones y enviar órdenes simples al AUV de acuerdo a la misión programada.

Este vehículo está equipado con dos propulsores longitudinales y aletas horizontales y verticales a popa y horizontales a proa. Sus principales características físicas y operacionales se recogen en la Tabla 15.

Fabricante	ECA (F _r)	Dim. (LxWxH)	5 x 0,7 x 0,7	Peso (Kg)	980
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	4 Kn	OAS	SSS/SAS	INS	DVL & Filtro Kalman
Vel. Máxima	8 Kn	MBES	SBP (op)	USBL/LBL	GPS
Duración (h)	8 (V _{cr}), 2 (V _{max})	CTD	Cam. Acústica	Transpondedor acústico de localización	
Cota máxima	300 m	Videocámara	Sensor de profundidad	DOF 3	Velocímetro acústico
Radio giro	15 m	Altímetro		Comunicación: enlace de radio Ethernet, sistema de comunicación acústico submarino, enlace de fibra óptica	
Capacidades				Seguridad	
Modo de gobierno automatic con waypoints				Autonomous security board	
Enlace de fibra óptica incluso durante operación				Lastres de seguridad integrados	
Datos, estatus del vehículo, datos de sensores, situación táctica				Enlace acústico bidireccional de corto alcance	
Corrientes de 0 – 3 Kt				Faro de seguridad, radio, flasher, sensor de entrada al agua	

Tabla 15 Resumen de características del Alister AUV

3.2. – Hugin 1000

El programa para el desarrollo del AUV HUGIN comienza en 1990 y se está utilizando para fines civiles desde 1997 y militares desde 2001.

HUGIN 1000 está disponible para profundidades de 1000 m y 3000 m. Presenta una estructura modular en 3 secciones de las que popa y proa son estándar y la intermedia se puede configurar con distintos sensores como SSS, SAS, MBE, SBP, recuento de plancton mediante láser, etc. Se puede suministrar con un contenedor personalizado para transporte y movilización.

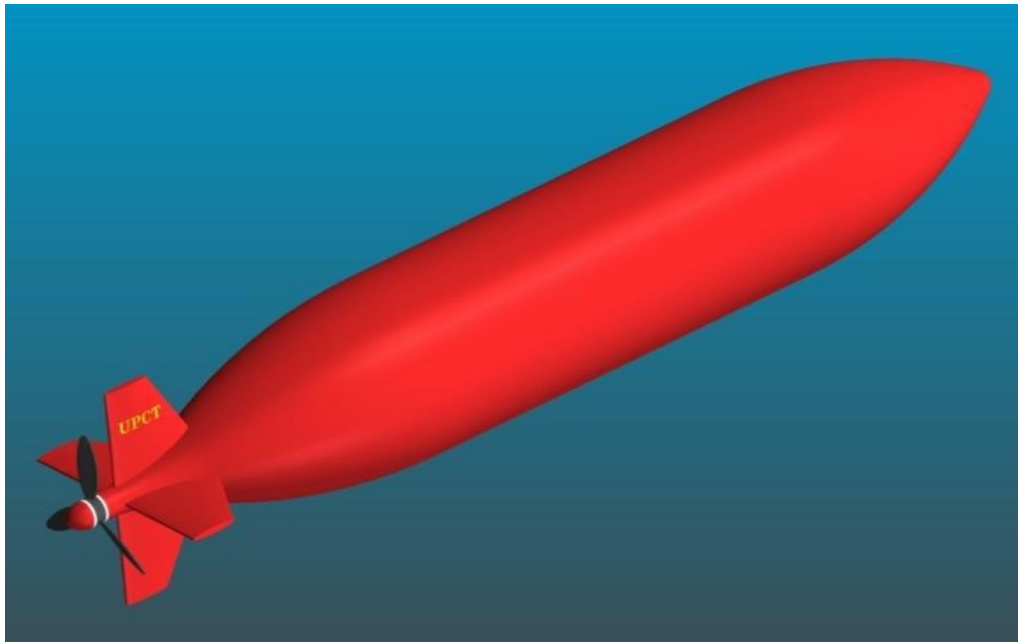


Figura 11 Modelo 3D del Hugin 1000

Una de las claves del Hugin es la integración de varios sensores acústicos que trabajan simultáneamente (Figura 12). Los datos de los sensores están geo-referenciados con datos precisos de posición y altitud aportados por el INS.

Características mecánicas

El diseño del HUGIN ofrece una baja Resistencia hidrodinámica, elevada estabilidad y maniobrabilidad. Está fabricado en fibra de carbono laminada y espuma sintética.

La propulsión está diseñada para una gran eficiencia a bajas velocidades y las palas están construidas con unos perfiles eficientes y bajos niveles de ruido.

Navegación

Aided Inertial Navigation System (AINS)

HUGIN se puede equipar (opcionalmente) con NavP, un sistema de navegación inercial avanzado en tiempo real (según el fabricante).

Durante la navegación, en los AUV una unidad de medida inercial (IMU) evalúa aceleraciones lineales y angulares del vehículo. Con esta información, el sistema INS integra las ecuaciones dinámicas que definen el comportamiento del AUV y obtiene una estimación de su posición, velocidad y orientación. La AINS mejora la navegación porque incorpora en el sistema de control una formulación matemática conocida como filtro de Kalman, que permite obtener el error que comete el INS en la estimación de su estado al compararlo con valores más precisos recibidos (actualizados) desde una plataforma nodriza (mediante link acústico) u obtenidos mediante otros sensores incorporados en el AUV (GPS, DVL). Una vez que ha determinado el error en sus estados los puede corregir, haciendo que su navegación sea mucho más precisa (Figura 13).

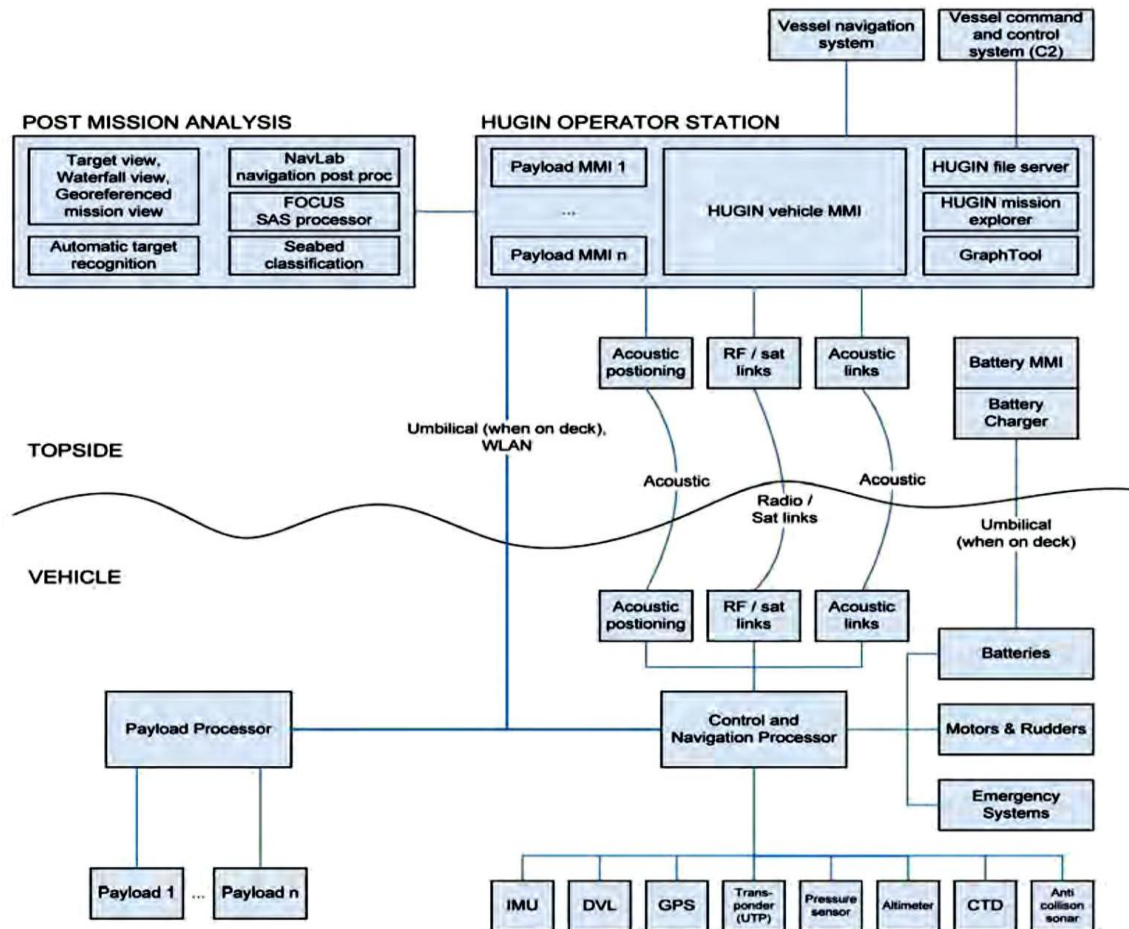


Figura 12 Diagrama de sistemas y comunicaciones del Hugin 1000

En el caso de que el HUGIN opere cerca del vehículo nodriza, lo podría hacer en modo (supervisado) de forma que mediante actualizaciones regulares GPS-USBL sea eficaz el sistema AINS.

Otro modo de actualizar información útil para mejorar la precisión en la navegación es mediante navegación geo-referencial, donde el HUGIN compara medidas batimétricas actuales con las almacenadas en su sistema para la zona en la que está navegando (que habrá obtenido mediante un mapeado previo).

Otra alternativa es el uso de transpondedores. A esta función se la conoce como NavP UTP (Underwater Transponding Positioning) y funciona de forma análoga al LBL pero con un único transpondedor (USBL). Se podrían utilizar más transpondedores para mejorar la precisión e integridad en la navegación.

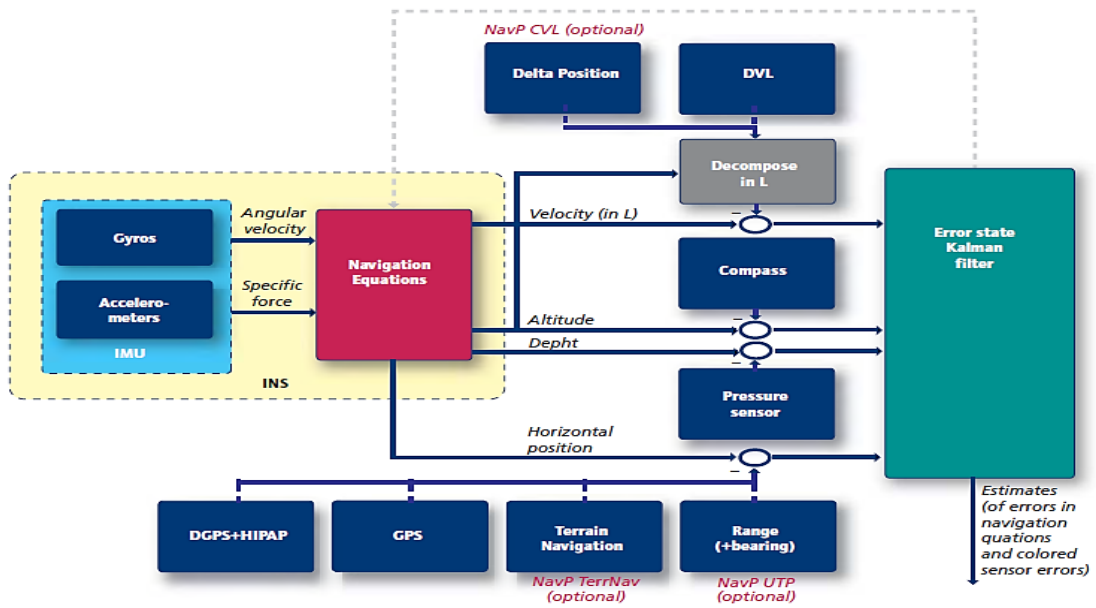


Figura 13 Estructura del AINS del Hugin 1000

NavLab

El NavLab, además del filtro de Kalman para la navegación en tiempo real, dispone de un algoritmo más preciso aún para trabajos de postprocesado (*Optimal Smoothing*).

Precisión en Navegación

En general, la precisión en la navegación depende de la del IMU, la del DVL y del patrón en la planificación de la misión (trayectoria). Por ejemplo, un patrón *lawnmower* es efectivo eliminando errores en velocidad y orientación. La Tabla 16 muestra precisiones típicas de navegación.

Scenario	Navigation error (1σ)	
	Real time	Post-processed
No position updates, straight line	0.25% of distance travelled	<0.25% of distance travelled
No position updates, lawnmower pattern	0.025% of distance travelled	<0.025% of distance travelled
Regular pos updates from HiPAP USBL (option)	2 m (200 m water depth)	1 m (200 m water depth)
NavP UTP (option)	5 m	2 m
Terrain referenced navigation (option)	10 m	5 m

Tabla 16 Precisión típica de navegación del Hugin 1000

Sistema de Sensorización

Los sensores estándar que se incluyen el HUGIN 1000 se enumeran en la Tabla 17. La mayoría de los sensores vienen equipados con una estación operadora dedicada (POS) que incluye:

- Interface Gráfica de Usuario (GUI) para envíos de comandos al sensor.
- GUI para *display* de errores y eventos del sensor (ej. Confirmación de respuesta a comandos enviados).
- *Display* de información del estado del sensor.

Fabricante	Kongsberg	Dim. (LxD)	4,5 x 0,75 m	Peso (Kg)	650 - 850
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	-	SSS, SAS.	SBP, CTD	NavP AINS: DVL, INS, Depth, USBL	
Rango Vel	2 - 6 Kn	Turbidity	ADCP	Comunicaciones: RF, IRIDIUM, WLAN, Ethernet	
Duración (h)	24 h a 4 Kt	Camera	ACS	NavP TP Ranging	GPS, TerrNav
Cota máxima	1000 – 3000 m	MBE	IMU		
Capacidades				Seguridad	
Medidas antiminas (MCM)				Sistemas extensos de errores y emergencias	
Aseguramiento rápido del entorno (REA)					
Elevada capacidad para navegar a distancia constante del fondo					
Launch and Recovery Systems desde la superficie					
NavLab (postproceso) mejora la precisión en posicionamiento					
Tres modos de navegación:					
1.- Supervisado: Permite la supervisión por un operador, permitiéndole reprogramar una misión y mejorar su precisión en posición mediante refresco con USBL.					
2.- Autónomo					
3.- Semiautónomo: Combinación de los dos					

Tabla 17 Resumen de características del Hugin 1000

3.3.- AUV 62 – MR

El AUV 62 es la segunda y última generación de AUV de SAAB. Incorpora equipamiento para planificación de misiones, análisis post-misión y Sistema LARS, pudiéndose adaptar fácilmente a una gran variedad de misiones.

Las principales misiones para las que se ha concebido, junto con los sensores específicos son las siguientes:

- Reconocimiento de minas (Side-looking Sonar).
- Reconocimiento general y vigilancia.
- Mapeado del fondo marino (Sonar batimétrico).
- Mapeado de la estructura del fondo marino (Subbottom profile).
- Monitorización del entorno (CTD).
- Submarino artificial para entrenamiento de objetivo acústico.

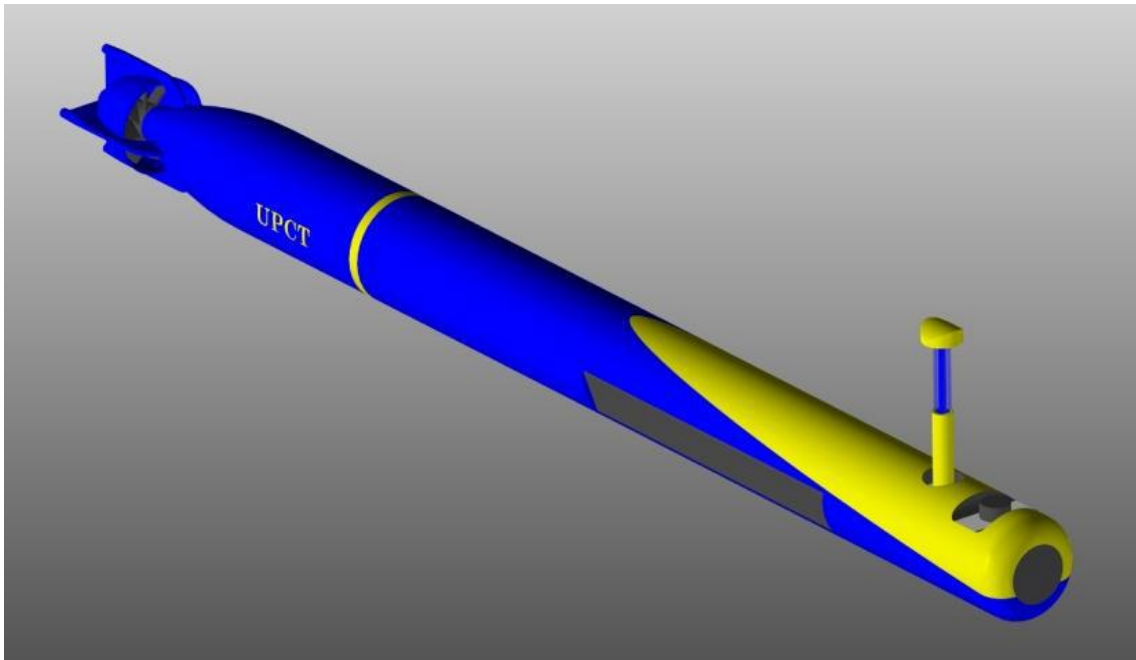


Figura 14 Modelo 3D del SAAB AUV 62

Este AUV está especialmente adaptado para un fácil lanzamiento desde TLT. También se puede lanzar desde plataformas en barcos de superficie o incluso desde tierra.

También hay diseñados sistemas de recogida para las mismas plataformas desde las que se puede lanzar. En concreto, la recogida desde plataforma móvil submarina, en TLT, debe realizarse con apoyo del SAAB-ROV.

Planificación de misiones

Tanto la planificación de misiones como el post-procesado de los datos y la información recabada en ellas, recae en la unidad MPAU (Mision Planning & Analysis Unit).

El vehículo admite dos modos de operación: autónomo y manual. En modo autónomo se puede programar para que el AUV siga una ruta de waypoints predefinida o resolver tareas específicas con el uso de sus sensores en un volumen predefinido.

Comunicación

WLAN. Permite el control manual completo del AUV así como la transferencia de datos del sonar en tiempo real. Suele utilizarse inmediatamente después de lanzar el AUV y su rango de operación máximo es de 500 m. El vehículo debe navegar por superficie para su utilización.

RADIO. Cuando interese controlar al AUV a mayores distancias, aun navegando por superficie, las comunicaciones por radio se pueden utilizar para transferencia de información, incluidas imágenes en formato comprimido. El rango de comunicación es de 4-8 km pero se puede extender sustancialmente mediante una comunicación por satélite opcional.

La información comercial ofrece unos datos de precisión en posición mayores de ± 5 m en coordenadas geográficas.

Fabricante	SAAB	Dimensiones (LxD)	4 – 7 m x 0,53 m	Peso (Kg)	650 - 1500
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	3 Kn	FAS, FLS, SAS	SVM	DVL	GPS
Vel Max	10 Kn	UAV	Radio	Comunicación: Superficie; WLAN,UHF/VHF SatLink; submarina; Hydro Acústica; Link	
Duración		Cámara	FLS		
Cota máxima	500 m			DOF = 3	
Capacidades				Seguridad	
Launch and Recovery: TLT				Sonar anticolidión	
Area de cobertura; 2 Km²/h					
Hovering; No					
Bombas y tanques para ajuste de densidad					
Mission Planning & Analysis Unit (MPAU)					
Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR)					
Medida Antiminas (MCM)					
Dos modos de operación:					
1.- Autónomo (el AUV sigue una ruta predefinida)					
2.- Manual					

Tabla 18 Resumen de características del SAAB AUV 62

3.4. - Sea Owl SUBROV

Se trata de un sistema ideado para usar desde TLT. El SUBROV tiene capacidades de inspección, medidas contraminas, como plataforma de comunicación y vigilancia y como herramienta activa para asistir el *docking* de un AUV.

El sistema SUBROV consiste en la consola del operador, un suministrador de energía, el cabrestante y el ROV. La consola se utiliza para controlar al ROV y mostrar las imágenes proporcionadas por el sonar o las cámaras que lleve equipadas el vehículo. El suministrador es un convertidor capaz de transformar el suministro energético de las baterías de a bordo en energía aprovechable por el ROV. El cabrestante es un sistema de gestión del cable del ROV, de forma que mantiene la longitud y tensión de cable adecuadas para asegurar la seguridad del vehículo. El ROV es un vehículo muy maniobrable y versátil. Es modular, lo que le permite montar una gran variedad de

accesorios según sea la misión a realizar. Está basado en el Sea Owl 500 MK IV. Está diseñado con las dimensiones de un torpedo, para facilitar su instalación en los TLT.

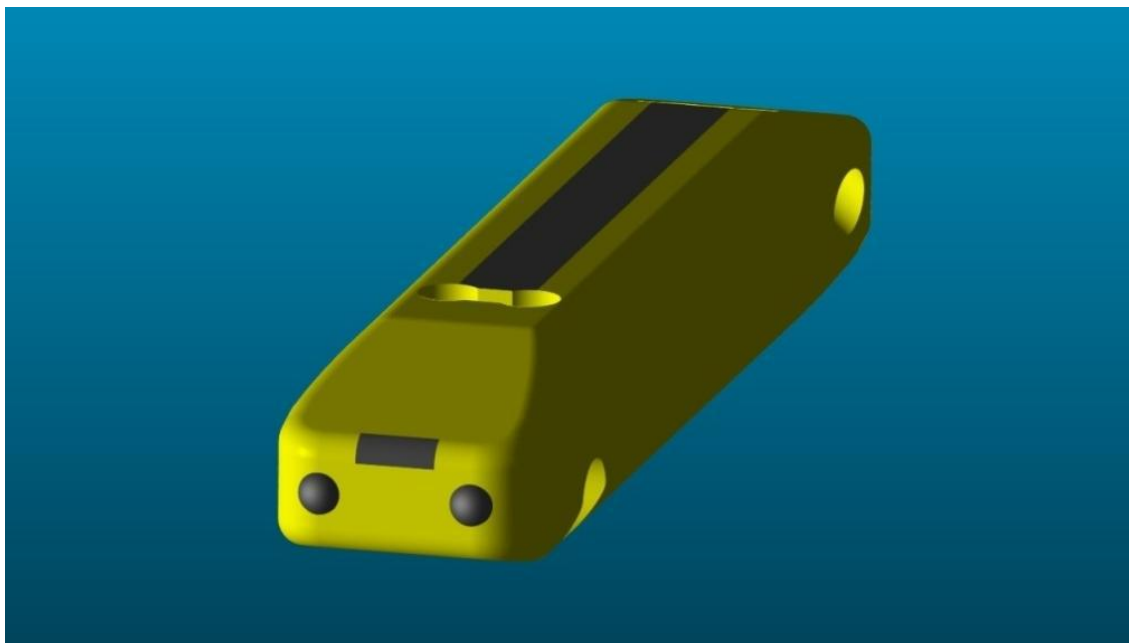


Figura 15 Modelo 3D del Sea Owl SUBROV

Fabricante	SAAB	Dimensiones (LxD)	1,8/2,5 m x 0,53 m (Solo ROV) 6,5 m x 0,53 m (Sistema Total)	Peso (Kg)	120 – 180 *
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	-	Sonar	Cámara a color	GPS	
Vel Max	3 Kn	Cámara para baja iluminación			
Duración (h)	60 h			Comunicación (op): ESM, ELIS, Com	
Cota máxima	500 m				
Capacidades				Seguridad	
Medidas contra mina (MCM)				Sonar anticollisión	
Launch & Recovery System: TLT					
Modular					

* Incluyendo paquete de baterías

Tabla 19 Resumen de características del SUBROV

3.5. – REMUS 600

Desarrollado en el WHOI en 2003, el Remus 600 está diseñado para operaciones a grandes profundidades, alcanzando cotas de hasta 600 metros. Según su configuración puede alcanzar cotas superiores (1500 m). Tiene una autonomía elevada (hasta 70 horas) lo que le permite alcanzar un rango de trabajo (286 millas náuticas) que lo convierte en un AUV de elevadas prestaciones.

La capacidad modular del AUV permite reconfigurarlo para una gran variedad de misiones. Está compuesto por una serie de secciones de casco que se pueden separar rápidamente para la reconfiguración, mantenimiento o transporte del vehículo.

El sistema Vehicle Interface Program (VIP) empleado se basa en el que utiliza la marca en toda su gama de AUV's, y gracias a su funcionamiento en cualquier plataforma PC o portátil bajo Windows® 95, 98, NT, 2000 o XP, permite simplificar el mantenimiento, la planificación de misiones, la comprobación del vehículo y el análisis de datos.

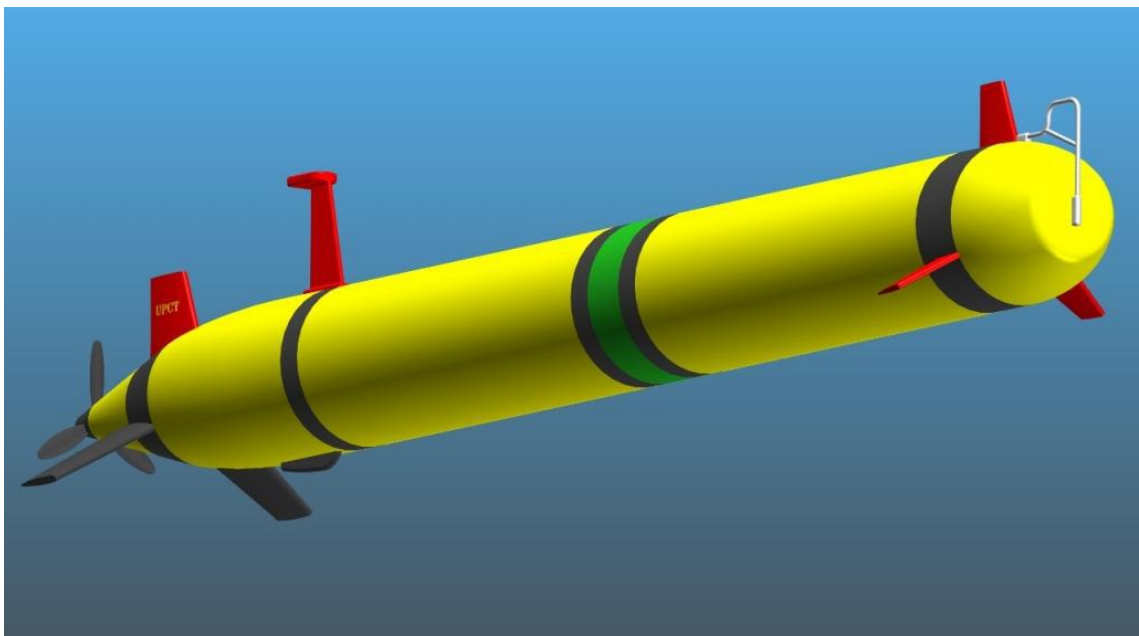


Figura 16 Modelo 3D del REMUS 600

Aplicaciones principales del REMUS 600

- Estudios hidrográficos.
- Operaciones de medidas contra minas.
- Operaciones de seguridad portuaria.
- Monitorización del entorno.
- Mapeado de restos.
- Operaciones de búsqueda y salvamento.
- Operaciones pesqueras.
- Muestreo y mapeado científico.

Los tres planos de popa tienen un control independiente, lo que permite un control total de los movimientos de guiñada, cabeceo y balance. Además permiten la incorporación de unas aletas delanteras opcionales para el control lateral y del cabeceo.

Integración de sensores SAS

El SAS Imaging proporciona una alta resolución y una anchura de barrido grande en comparación a los escáneres laterales de un haz. Con el control independiente de los tres planos de popa, el REMUS 600 puede conseguir imágenes de alta calidad.

Sensores SSAM

SSAM - 'Small Synthetic Aperture Minehunter'

El sistema tiene un peso aproximado de 87 kg, y requiere un suministro de 150 W, aumentando considerablemente dicho consumo cuando está transmitiendo.

Simultaneous dual frequency band operation:

HF band = 105 - 135 kHz, 1" × 1" res.
 LF Band = 10 - 52 kHz, 3" × 3" res.
 DC Capabilities against proud & slightly buried targets.
 Array elements used for MoComp = 2.
 Range = 90/V (45 meters @ 2 m/sec).
 LSA HF band = 11 meters LSA LF band = 22 meters.

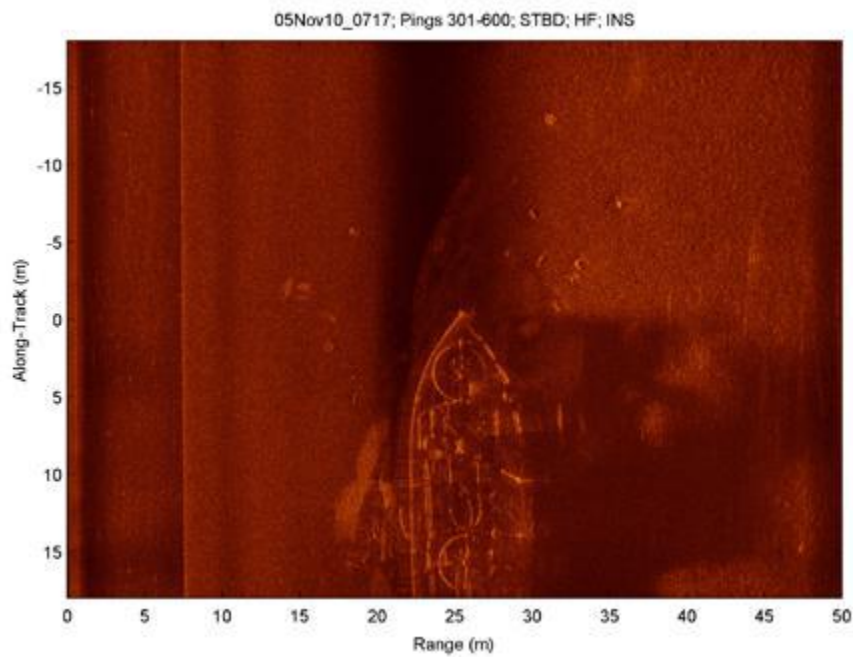


Figura 17 Imagen captada mediante SSAM

HF Band	105 kHz – 135 kHz, 212 db 2,54 cm x 2,54 cm resolution	Peso	240 Kg (530 lbs)
BB Band	10 kHz – 52 kHz, 205 dB 7,6 cm x 7,6 cm resolution	Longitud	3,6 m (140 ")
Range per side	90 m/V (60 m @ 1,5 m/sec) (with 2 hydrophones for RPC)	Duración	Aproximadamente 12 h
Nav	GPS, RDI 1,2 MHz DVL Kearfott IMU, Acoustic	Comms	RF: Wifi & Iridium Acoustic: WHOI micromodem

Tabla 20 Capacidades contra minas ligeramente sepultadas del Remus 600

Fabricante	Hydroid	Dimensiones (LxD)	3,25 m x 0,324 m	Peso (Kg)	240 (530 lbs)
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	3 Kn	ADCP	Iridium	INS	LBL
Vel. máx	5 Kn	SSS, SSAM	Presión	USBL	WAAS, GPS
Duración (h)	70 h a 5 Kn	Conductividad	Temperatura	Comunicación; Acoustic modem, Wifi 2.4 GHz, Iridium, 100 base – T Ethernet	
Cota máxima	600 m	Opcionales: SSS frecuencia dual, SAS, fluorímetro, videocámara, acoustic imagin, electronic still camera.		DOF = 2	
		Rastreo: transpondedor acústico, modem acústico, modem Iridium.			
Capacidades				Seguridad	
Launch and Recovery System; manual (hand – held)					
Capacidad modular; permite alcanzar hasta 1500 m según configuración					
Control independiente de los tres planos (y de las aletas opcionales)					
Área de cobertura de hasta 286 millas náuticas					
Gran autonomía de hasta 70 h según configuración					
Medida Antiminas (MCM)					

Tabla 21 Resumen de características del REMUS 600

3.6. – REMUS 100

El Remus 100 es un AUV ligero, diseñado para funcionar en ambientes costeros de hasta 100 m de profundidad. Puede configurarse con una amplia variedad de sensores y opciones de sistema para realizar diferentes misiones.

En los últimos años el Remus 100 se ha convertido en uno de los AUVs mejor valorados del mercado con miles de misiones. Las capacidades de las que dispone lo hacen adecuado para la investigación marina, la defensa costera....etc.

El vehículo es lo suficientemente pequeño para poder ser transportado por dos personas, sin embargo está dotado de sensores sofisticados para realizar misiones en grandes áreas, como detección de minas.



Figura 18 Modelo 3D del REMUS 100

Aplicaciones principales del REMUS 100

- Estudios hidrográficos.
- Operaciones de medidas contra minas en aguas poco profundas.
- Operaciones de seguridad portuaria.
- Monitorización del entorno.
- Mapeado de restos.
- Operaciones de búsqueda y salvamento.
- Operaciones pesqueras.
- Muestreo y mapeado científico.
- Monitorización y detección de la contaminación.
- Inspección de tuberías.
- Estudios de Biomasa.

Especificaciones principales del REMUS 100



Figura 19 Especificaciones del REMUS 100

Sonar de barrido lateral

El Remus 100 dispone de un sonar de barrido lateral, muy sofisticado el cual permite obtener imágenes a muy alta resolución, tanto del fondo marino como de cualquier objeto que se encuentre en el.

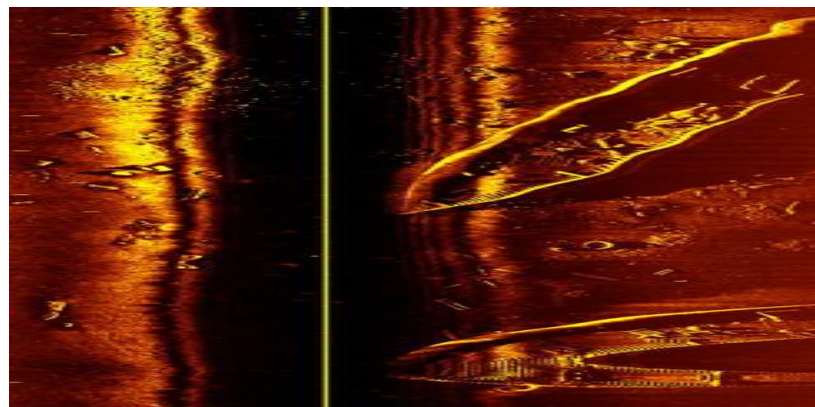


Figura 20 Imagen captada por el sonar de barrido lateral

Fabricante	Hydroid	Dimensiones (LxD)	1,6 m x 0,19 m	Peso (Kg)	38.5 (85 lbs)
Características		Sensores		Sistemas de Navegación	
Vel. Crucero	3 Kn	ADCP	Iridium	INS	LBL
Vel. máx	5 Kn	SSS, SSAM	Presión	DUSBL	WAAS, GPS
Duración (h)	22 h a 3 Kn 8 h a 5 Kn	Conductividad	Temperatura	Comunicación; Acoustic modem, Wifi 2.4 GHz, Iridium, 100 base – T Ethernet	
Cota máxima	100 m	Opcionales: SSS frecuencia dual, SAS, fluorímetro, videocámara, acoustic imagin, electronic still camera. Rastreo: transpondedor acústico, modem acústico, modem Iridium.		DOF = 2	
Capacidades				Seguridad	
Launch and Recovery System; manual (hand – held)					
Capacidad modular; permite alcanzar hasta 120 m según configuración					
Capaces de funcionar hasta 4 vehículos simultáneamente en el mismo espacio de agua					
Capacidad de maniobra autónoma a velocidades entre 0 y 0.5 m /s en los alrededores de barcos y muelles					
Capacidad de mantener un rumbo preciso al operar cerca de objetos metálicos grandes					
Medida Antiminas (MCM)					

Tabla 22 Resumen de características del REMUS 100

Capítulo 4

MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UUV's

4.1. – Introducción

La modelación matemática del comportamiento dinámico de vehículos submarinos no tripulados es un área ampliamente investigada y la información no clasificada está disponible a través de Internet y de otras fuentes de publicaciones escritas.

Sin embargo, existe gran confusión, aun en la actualidad, en los términos asociados a las fuerzas que actúan sobre los UUV's, principalmente de tipo hidrodinámico. Tal y como se planteó en el capítulo de introducción, uno de los objetivos de este proyecto consiste, precisamente, en aclarar la procedencia de cada uno de esos términos y obtener las expresiones generales del comportamiento dinámico de los UUV's.

En este capítulo, vamos a analizar los seis grados de libertad (6 - DOF) y las ecuaciones del movimiento (EOM) para un vehículo submarino no tripulado (UUV). Las suposiciones son las siguientes:

- El vehículo se comporta como un cuerpo rígido.

- La rotación de la Tierra es despreciable en cuanto a componentes de la aceleración del centro de masa se refiere, y los coeficientes hidrodinámicos o parámetros son constantes.

Las suposiciones mencionadas eliminan la consideración de las fuerzas que actúan entre los elementos individuales de la masa y elimina las fuerzas debidas al movimiento de la Tierra (aceleración de coriolis).

Las principales fuerzas que actúan sobre el vehículo son de origen inercial, gravitacional, hidrostáticas e hidrodinámicas. Estas fuerzas principalmente se combinan para constituir el comportamiento hidrodinámico del cuerpo.

El estudio de la dinámica se puede dividir en dos partes: la cinemática, que sólo trata los aspectos geométricos del movimiento, y la cinética, que es el análisis de las fuerzas que provocan el movimiento.

El capítulo comienza con una descripción de los sistemas de coordenadas, la cinemática y las relaciones dinámicas utilizadas en el modelado de un vehículo que se mueve en el espacio libre.

También se representa la hidrodinámica básica. Esta discusión desarrolla la base de la fuerza de diversas expresiones y momentos representando la interacción del vehículo con su entorno fluido.

Las fuerzas de control, como son las de las hélices, propulsores y superficies de control o aletas que permiten que el vehículo maniobre también están representadas.

Con las fuerzas hidrodinámicas, las fuerzas de control y sus momentos se analiza completamente las seis ecuaciones del movimiento que se forman.

4.2. – Sistemas de coordenadas, posicionamiento y cinemática

Es necesario analizar el movimiento de un vehículo autónomo submarino no tripulado (UUV) con seis grados de libertad para determinar su posición y orientación en el espacio tridimensional y en el tiempo.

Las tres primeras coordenadas independientes (x, y, z) son para determinar la posición y el movimiento de traslación a lo largo de X, Y, Z ; los tres restantes (θ, \emptyset, ψ) son para la orientación y el movimiento de rotación en el sistema Global (véase la Figura 21).

Convencionalmente en los vehículos autónomos submarinos no tripulados (UUV's) los componentes mencionados anteriormente se definen como: avance, deriva, arfada, balanceo, cabeceo y guiñada, respectivamente.

Obviamente la posición, orientación y movimiento de rotación de un cuerpo rígido (un cuerpo en el que la posición relativa de todos sus puntos es constante) puede ser descrito con respecto a una posición de referencia. Para este fin, un conjunto de ejes de coordenadas ortogonales se eligen y se supone que se conecta rígidamente al origen arbitrario del cuerpo para construir el sistema de referencia.

De manera similar, las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo autónomo submarino no tripulado (UUV) lo hacen de la misma forma.

Hay que tener en cuenta que el convenio utilizado en los UUVs, la dirección "x" positiva se toma hacia adelante, la dirección "y" positiva se toma a la derecha, la dirección "z" positiva se toma hacia abajo, y la regla de la mano derecha se aplica a los ángulos de rotación.

Grados de Libertad	Movimientos	Fuerzas y Momentos	Velocidades lineales y angulares	Posiciones y ángulos de Euler
1	Avance	X	u	x
2	Deriva	Y	v	y
3	Arfada	Z	w	z
4	Balance	K	p	\emptyset
5	Cabeceo	M	q	θ
6	Guiñada	N	r	ψ

Tabla 23 Nomenclatura estándar AUV

4.2.1 – Sistemas de referencia

Como se mencionó anteriormente y se resume en la Tabla 23, las posiciones y los ángulos requeridos son muy importantes para describir claramente los sistemas de referencia con el fin de entender las ecuaciones cinemáticas del movimiento. Hay dos sistemas de referencia ortogonales; el primero es el sistema fijo XYZ Tierra (Sistema Global) que se define con respecto a la superficie de la tierra como se ilustra en la Figura 21.

El Sistema Global de coordenadas que se utiliza en este proyecto se define con los tres ejes ortogonales, colocados en un punto arbitrario en la superficie del mar. Estos ejes están alineados con las direcciones Norte, Este y Abajo. Se establece un sistema de referencia con vectores unitarios \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} . Ignorando la tasa de rotación de la Tierra en comparación con las velocidades angulares producidas por el movimiento del vehículo, se puede decir que las coordenadas XYZ son un sistema de referencia inercial en el que las leyes del movimiento de Newton son válidas.

La posición de un vehículo en este sistema de referencia tendrá el siguiente vector:

$$r_{O'} = [X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}] \quad (1)$$

En segundo lugar, un sistema de referencia fijado en el cuerpo (Sistema Local) $O'xyz$, con el origen O' y vectores unitarios \vec{i}' , \vec{j}' , \vec{k}' situado en la línea longitudinal del vehículo. El origen O' será el punto sobre el cual se calcula la fuerza. El centro de gravedad del vehículo (masa c.d.g), y el centro de flotabilidad o carena, (c.d.c), que es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas del desplazamiento volumétrico del vehículo totalmente sumergido bajo el agua. Por lo general no están en el origen del sistema de referencia.

Se supone que todas las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo autónomo submarino no tripulado (UUV's) utilizado en este proyecto se aplican en la posición del centro de gravedad (normalmente para suponer que es un cuerpo rígido, y porque es donde se ubican los ejes principales de inercia). La posición del centro de flotabilidad será el punto desde donde todas las fuerzas hidrodinámicas serán calculadas.

Los vectores de posición del c.d.g y c.d.c relativos al origen del sistema de referencia son ρ_G y ρ_B , respectivamente, y sus componentes pueden ser representados como:

$$[x_G i + y_G j + z_G k] \quad \text{y} \quad [x_B i + y_B j + z_B k]$$

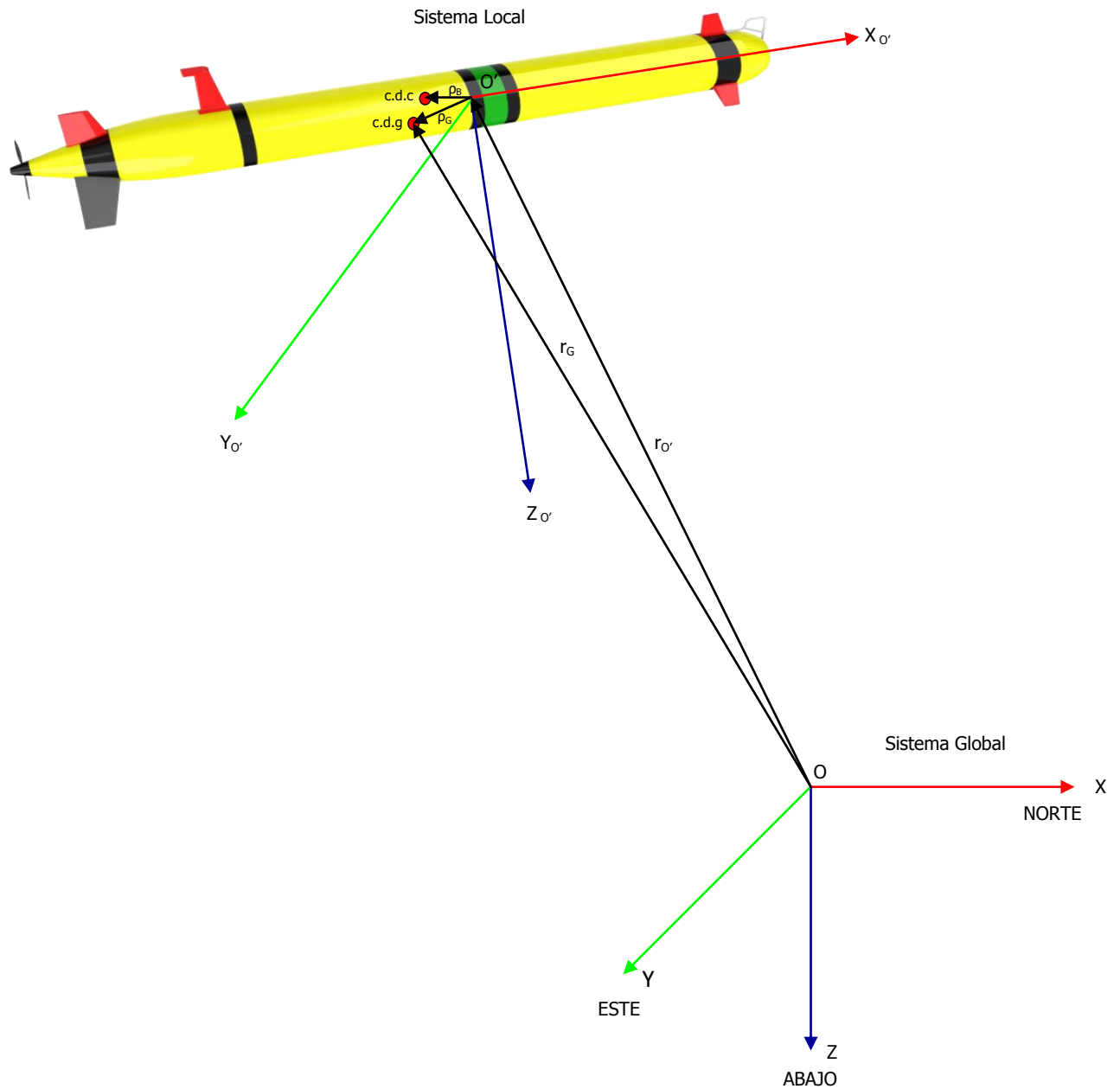


Figura 21 Sistemas de referencia local y global

4.2.2 – Ángulos de Euler

Cuando queremos cambiar de un sistema de coordenadas cartesianas a otro, se realizan tres rotaciones sucesivas. Según el teorema de rotación de Euler, una rotación arbitraria puede ser descrita por sólo tres parámetros. Esto significa que para dar a un objeto una orientación específica tiene que ser sometido a una secuencia de tres rotaciones descritas por los ángulos de Euler. Como resultado, la matriz de rotación se puede descomponer como un producto de tres rotaciones elementales.

Aunque el comportamiento de un vehículo puede ser descrito por varios métodos en un sistema de referencia fijo, el método más común es el método de Euler, que es el utilizado en este caso. Este método representa la orientación espacial de cualquier objeto del espacio como una composición de rotaciones desde un sistema de referencia.

El sistema de referencia Global dentro de la teoría de Euler define los ángulos de balance (\emptyset), cabeceo (θ) y guiñada (ψ) los cuales requieren implícitamente que estas rotaciones deben realizarse en orden.

Para el "balanceo, cabeceo, guiñada" (Sistema Global), una transformación hacia adelante se realiza empleando una magnitud vectorial que originalmente hace referencia al sistema de referencia local. Entonces, a través de una secuencia de tres rotaciones se transforma en un sistema de referencia global que se supone esta unido a la superficie del mar.

Para iniciar la transformación, comenzar por definir una rotación ψ , como una rotación sobre el eje Z, a continuación definimos una posterior rotación θ , sobre el eje Y, seguido de una rotación \emptyset , sobre el eje X, siendo todas las rotaciones positivas sobre los ejes en sentido anti-horario. La triple transformación rotacional en términos de estos tres ángulos es suficiente para describir la orientación angular del vehículo.

La rotación y velocidad angular del sistema de referencia local se pueden ver en la figura 22.

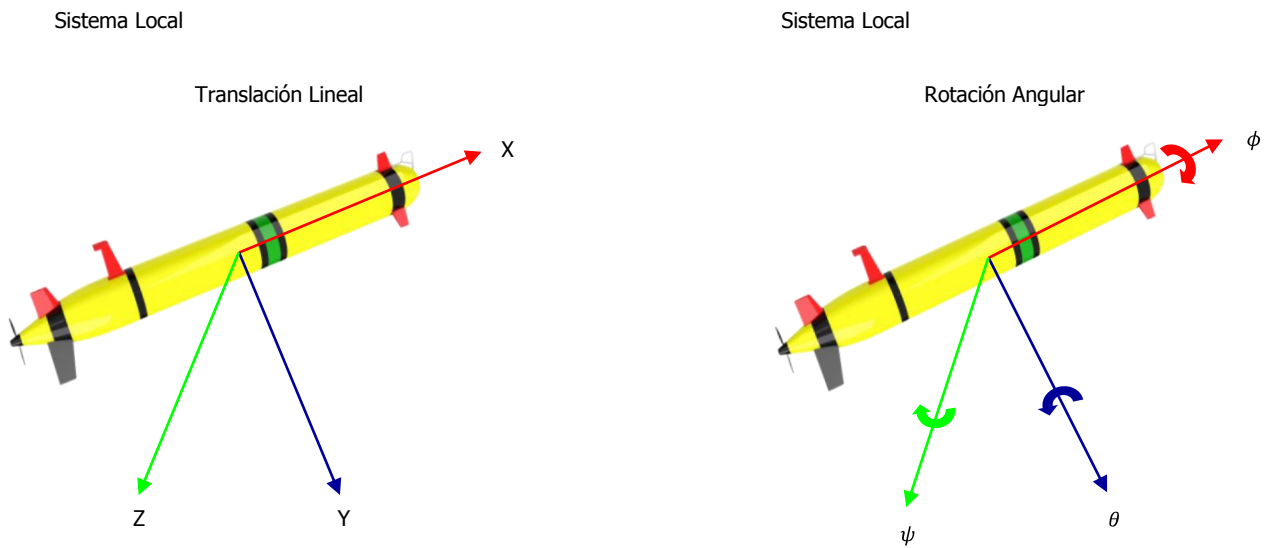


Figura 22 Sistema de referencia local con ángulos de rotación

Como ejemplo, cualquier vector de posición, r_0 , en un sistema de referencia global viene dado por $r_0 = [X_0, Y_0, Z_0]$, que tendrá coordenadas diferentes cuando se produce una rotación del ángulo ϕ , sobre el eje x_0 en el sistema local.

Si la nueva posición se define mediante $r_1 = [X_1, Y_1, Z_1]$, se puede observar que el vector de coordenadas en el nuevo sistema de referencia puede ser escrito con las coordenadas del sistema de referencia anterior como:

$$Y_1 = Y_0 \cos \phi + Z_0 \sin \phi \tag{2}$$

$$Z_1 = -Y_0 \sin \phi + Z_0 \cos \phi \tag{3}$$

con $Z_1 = Z_0$. Esta relación puede expresarse en forma de matriz, mediante la matriz de rotación.

$$r_1 = [R]^{-1}_{x_0, \phi} r_0 \quad (4)$$

donde la rotación $[R]$ es una matriz ortogonal y la inversa de $[R]$ es igual a la transpuesta.

$$[R]^T = [R]^{-1} \quad (5)$$

La multiplicación de esta matriz de rotación con cualquier vector r_0 , da como resultado componentes del mismo vector en el sistema de referencia girado. A continuación vamos a desarrollar las matrices de rotación en cada eje, empezamos por el plano XY, o lo que es lo mismo por la matriz de rotación en el eje Z_0 :

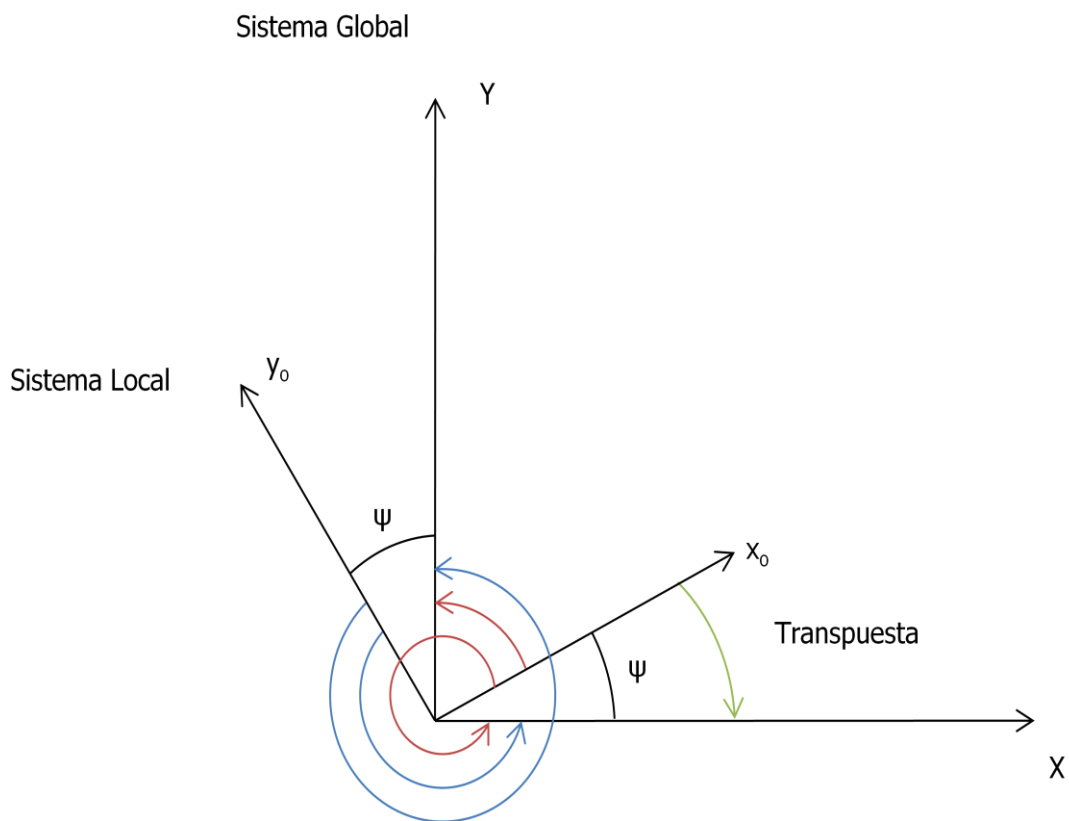


Figura 23 Transformación de coordenadas en el eje Z_0 .

Tomando sentido anti-horario positivo, realizamos las rotaciones del sistema local al global, simbolizadas en rojo las del eje x_o (Local), y en azul las del eje y_o (Local). Una vez realizados los cuatro giros tenemos que la matriz de rotación es igual a:

$$R_{z_o,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos (90 - \psi) & 0 \\ \cos (90 + \psi) & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde el término $\cos \psi$ de la matriz corresponde a la rotación del eje x_o (Local), al X(Global), el término $\sin \psi$ corresponde a la rotación del eje x_o (Local), al Y(Global), el término $-\sin \psi$ corresponde a la rotación del eje y_o (Local), al X(Global), y el término $\cos \psi$ corresponde a la rotación del eje y_o (Local), al Y(Global).

Para referenciar las coordenadas del Sistema Local sobre el Global se gira el sistema Local en sentido horario sobre el sistema Global (como indica la figura 23) contrario al definido para la rotación de nuestros ángulos, por lo tanto hay que realizar la transpuesta a la matriz de rotación, obteniendo así nuestra autentica matriz de rotación en coordenadas Globales:

$$R_{z_o,\psi}^T = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Análogamente tenemos la matriz de rotación en el eje Y_o :

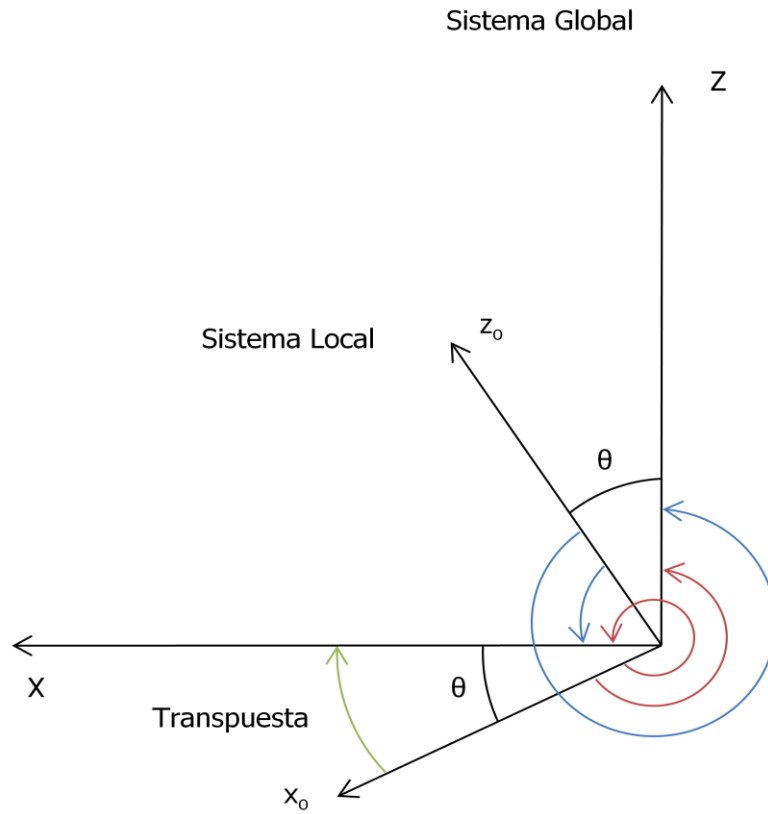


Figura 24 Transformación de coordenadas en el eje Y_0

$$R_{y_0, \theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \cos (90 + \theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos (90 - \theta) & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

Su transpuesta, viene dada por:

$$R_{y_0, \theta}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Finalmente la matriz de rotación del eje X_0 :

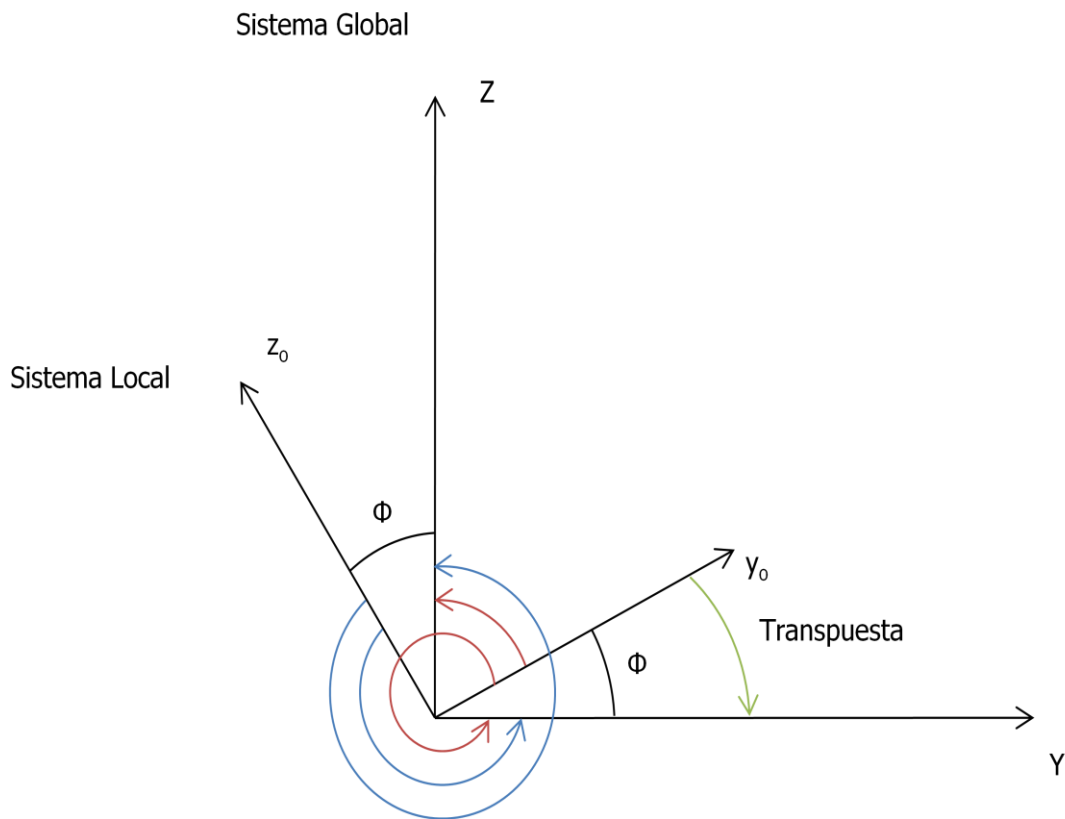


Figura 25 Transformación de coordenadas en el eje X_0

$$R_{x_0, \phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \cos (90 - \phi) \\ 0 & \cos (90 + \phi) & \cos \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

Su transpuesta, viene dada por:

$$R_{x_0, \phi}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

Continuando con la serie de los resultados de las rotaciones, la rotación total viene dada por:

$$[R] = [R]_{z_0, \psi}^T [R]_{y_0, \theta}^T [R]_{x_0, \phi}^T \quad (12)$$

Si desarrollamos la ecuación (12) queda de la siguiente manera:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (13)$$

Si multiplicamos las matrices de la ecuación (13), obtenemos $[R]$ de la siguiente forma:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Se puede decir que cualquier vector de posición bajo un sistema de referencia rotado se puede expresar en términos de las coordenadas del sistema de referencia original, teniendo en cuenta que $[R]^T = [R]^{-1}$ podemos escribirlo de las dos maneras, de local a global o viceversa:

$$\begin{aligned} r_{i'j'k'} &= [R]^{-1} r_{ijk} \quad \circ \quad r_{i'j'k'} = [R]^T r_{ijk} \\ r_{ijk} &= [R]^{-1} r_{i'j'k'} \quad \circ \quad r_{ijk} = [R]^T r_{i'j'k'} \end{aligned} \quad (15)$$

4.2.3 – Cinemática

La cinemática define el movimiento de un objeto sin tener en cuenta la masa y las fuerzas externas que actúan sobre el objeto durante su movimiento. Por lo tanto las velocidades lineal y angular del objeto se tienen en cuenta en la cinemática. Como se ha mencionado en el punto anterior, las velocidades lineal y angular se expresan bajo un sistema de coordenadas o de referencia fijo.

En este punto se analizará la transformación de la velocidad lineal y angular, así como la aceleración que sufre el cuerpo desde el sistema de referencia local hasta el sistema de referencia global.

Un vector velocidad bajo el sistema de referencia global puede ser escrito como,

$$\dot{r} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Estos tres componentes del sistema global se pueden obtener mediante la selección de los componentes lineales del vector velocidad, multiplicados por la matriz de rotación, que es la matriz de transformación rotacional dada en la ecuación (14):

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (17)$$

Inversamente, el vector velocidad se puede obtener de una manera similar, multiplicando por la transpuesta de la matriz rotacional:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [R]^T \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Las tres coordenadas del sistema de referencia global dentro del marco de la rotación angular del cuerpo (Euler), se obtienen de las tasas de rotación del sistema de coordenadas local mediante transformaciones lineales no ortogonales.

$$\dot{\phi} = p + q \sin(\phi) \cdot \tan(\theta) + r \cos(\phi) \cdot \tan(\theta) \quad (19)$$

$$\dot{\theta} = q \cos(\phi) - r \sin(\phi) \quad (20)$$

$$\dot{\psi} = \frac{q \sin(\phi) + r \cos(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (21)$$

En notación matricial, podemos definir una nueva matriz de transformación del sistema local al sistema global, mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (22)$$

Donde T es:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

Hay que tener en cuenta que para pequeñas rotaciones angulares, (suponemos que el ángulo es pequeño)

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (24)$$

Cabe destacar que a diferencia de la matriz de rotación [R], [T] no es ortogonal por lo tanto, $[T]^{-1} \neq [T]^T$.

Las velocidades angulares en términos del sistema de referencia global del vector velocidad angular, puede obtenerse mediante la inversa de la ecuación (23).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \phi \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (26)$$

En forma de matriz el conjunto de velocidades se define de la siguiente manera:

$$[V]_{Sist.local} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[V]_{Sist.global} = \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Transformación en forma matricial del sistema local al global:

$$[V]_{Sist.global} = \begin{bmatrix} [R] & 0 \\ 0 & [T] \end{bmatrix} [V]_{Sist.local} \quad (29)$$

Transformación en forma matricial del sistema global al local:

$$[V]_{Sist.local} = \begin{bmatrix} [R]^T & 0 \\ 0 & [T]^{-1} \end{bmatrix} [V]_{Sist.global} \quad (30)$$

Finalmente desarrollando la ecuación (29), sustituyendo las ecuaciones (14), (23) y (27) podemos ver las relaciones cinemáticas entre las velocidades, y las tasas de cambio de las posiciones globales y los ángulos de Euler de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos \theta \cos \psi + v (-\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi) + w (\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi) \\ u \cos \theta \sin \psi + v (\cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi) + w (-\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi) \\ -u \sin \theta + v \sin \phi \cos \theta + w \cos \phi \cos \theta \\ p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ q \cos \phi - r \sin \phi \\ (q \sin \phi + r \cos \phi) / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (31)$$

4.3 – Ecuaciones Dinámicas del Movimiento

Las ecuaciones generales de traslación y de rotación del movimiento de un cuerpo rígido se desarrollan en este punto. Después de la obtención de los parámetros requeridos para las ecuaciones dinámicas de movimiento, se realiza una formulación matricial completa del sistema para simular mediante un modelo dinámico el comportamiento del UUV utilizando MATLAB.

4.3.1 – Ecuaciones del Movimiento de Traslación

Para un vector de posición "r", bajo una velocidad de rotación angular "ω", su derivada respecto al tiempo viene dada por:

$$\frac{dr}{dt} = \dot{r} + \omega \times r \quad (32)$$

Tasa de cambio de "r" respecto al tiempo y referido al c.d.g es:

$$\frac{dr_G}{dt} = \dot{r}_{O'} + \omega \times \rho_G \quad (33)$$

La expresión de "ṙ_{O'}" puede ser escrita ya sea bajo el sistema global o local como:

$$\dot{r}_{O'} = \left[\frac{dX}{dt} \vec{i} + \frac{dY}{dt} \vec{j} + \frac{dZ}{dt} \vec{k} \right] = \left[u\vec{i}' + v\vec{j}' + w\vec{k}' \right] \quad (34)$$

El vector aceleración se considera aplicado en el centro de masas y se obtiene mediante la derivada del vector velocidad, $\frac{dr_G}{dt}$, teniéndose cuenta de que el centro de masa se encuentra en un sistema de referencia giratorio. Considerando lo anterior la derivada del vector aceleración viene dada por:

$$\ddot{r}_G = \ddot{r}_{O'} + \dot{\omega} \times \rho_G + \omega \times \omega \times \rho_G + \omega \times v_{O'} \quad (35)$$

donde ; $\ddot{r}_{O'}$ es la aceleración respecto al sistema de referencia o'

Podemos observar que el término $\dot{\omega} \times \rho_G$ corresponde a la componente de la aceleración tangencial, $\omega \times \omega \times \rho_G$ a la aceleración normal, y por ultimo $\omega \times v_{O'}$ que corresponde a la derivada del vector velocidad debido a la rotación de los ejes. A continuación se desarrolla cada uno de estos términos.

$$\ddot{r}_{O'} = \dot{u} \vec{i} + \dot{v} \vec{j} + \dot{w} \vec{k} \quad (36)$$

$$\dot{\omega} \times \rho_G = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{p} & \dot{q} & \dot{r} \\ x_G & y_G & z_G \end{vmatrix} = (\dot{q}z_G - \dot{r}y_G)\vec{i} + (\dot{r}x_G - \dot{p}z_G)\vec{j} + (\dot{p}y_G - \dot{q}x_G)\vec{k} \quad (37)$$

$$\omega \times \rho_G = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ x_G & y_G & z_G \end{vmatrix} = (qz_G - ry_G)\vec{i} + (rx_G - pz_G)\vec{j} + (py_G - qx_G)\vec{k} \quad (38)$$

$$\begin{aligned}
\omega \times \omega \times \rho_G &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ (qz_G - ry_G) & (rx_G - pz_G) & (py_G - qx_G) \end{vmatrix} = \\
&= (pqy_G - q^2x_G)\vec{i} + (prx_G - p^2z_G)\vec{k} + (qrx_G - r^2y_G)\vec{j} - (q^2z_G - qr y_G)\vec{k} - \\
&(r^2x_G - pr z_G)\vec{i} - (p^2y_G - pq x_G)\vec{j} = (-x_G(q^2 + r^2) + pq y_G + pr z_G)\vec{i} + (pq x_G - \\
&y_G r^2 + p^2 + qr z_G)\vec{j} + pr x_G + qr y_G - z_G p^2 + q^2 k \quad (39)
\end{aligned}$$

$$\omega \times v_{O'} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ u & v & w \end{vmatrix} = (wq - vr)\vec{i} + (ur - wp)\vec{j} + (vp - uq)\vec{k} \quad (40)$$

Sustituyendo las ecuaciones (36-37-39-40) en la ecuación (35), se obtiene la aceleración del centro de masas. La ecuación del movimiento de translación se obtiene igualando esta aceleración por la masa del vehículo, a la suma neta de todas las fuerzas que actúan sobre dicho vehículo en tres grados de libertad de translación (X,Y,Z), que queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
\Sigma F_{Translación} &= m \ddot{r}_G = m (\ddot{r}_{O'} + \dot{\omega} \times \rho_G + \omega \times \omega \times \rho_G + \omega \times v_{O'}) = \\
m \left[[\dot{u} \vec{i} + \dot{v} \vec{j} + \dot{w} \vec{k}] + [(\dot{q}z_G - \dot{r}y_G)\vec{i} + (\dot{r}x_G - \dot{p}z_G)\vec{j} + (\dot{p}y_G - \dot{q}x_G)\vec{k}] + \right. \\
& [(-x_G(q^2 + r^2) + pq y_G + pr z_G)\vec{i} + (pq x_G - y_G(r^2 + p^2) + qr z_G)\vec{j} + \\
& (pr x_G + qr y_G - z_G(p^2 + q^2))\vec{k}] + [(wq - vr)\vec{i} + (ur - wp)\vec{j} + (vp - \\
& uq)\vec{k}] \left. \right] = m [\dot{u} + wq - vr - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \vec{i} + \\
& [\dot{v} + ur - wp + x_G(pq + \dot{r}) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p})] \vec{j} + [\dot{w} + vp - uq + \\
& x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \vec{k} \quad (41)
\end{aligned}$$

4.3.2 – Ecuaciones del Movimiento de Rotación

Para desarrollar las ecuaciones del movimiento de rotación, la suma de los momentos aplicados sobre el centro de masa del vehículo se iguala a la variación del momento angular del vehículo alrededor de su centro de masa. El tensor de inercia a calcular es:

$$I_{O'} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (42)$$

donde,

$$I_{xx} = \sum_{i=1}^N dm_i (y^2 + z^2), \quad I_{xy} = I_{yx} = - \sum_{i=1}^N dm_i (xy), \quad I_{xz} = I_{zx} = - \sum_{i=1}^N dm_i (xz),$$

$$I_{yy} = \sum_{i=1}^N dm_i (x^2 + z^2), \quad I_{yz} = I_{zy} = - \sum_{i=1}^N dm_i (yz), \quad I_{zz} = \sum_{i=1}^N dm_i (x^2 + y^2)$$

Aquí, I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} son los momentos de inercia alrededor del cuerpo de ejes X_0 , Y_0 , Z_0 y el resto de términos de la ecuación (42) son los productos de inercia, que son muy pequeños en comparación con los momentos de inercia, por lo tanto podemos suponer que son cero.

El tensor de inercia en forma vectorial puede definirse como:

$$I_{O'}\omega = \int \rho_G \times (\omega \times \rho_G) dm_i \quad (43)$$

El momento angular viene dado por:

$$H_{O'} = I_{O'} \cdot \omega \quad (44)$$

El momento de rotación total sobre el origen del sistema de referencia del vehículo viene dado por:

$$\sum M_{O'} = \dot{H}_{O'} + \rho_G \times (m\dot{v}_G) \quad (45)$$

donde; $\dot{H}_{O'}$ es el término que corresponde a la derivada del momento angular.
 $\rho_G \times (m\dot{v}_G)$ es el término debido a que el centro de masas no está en el origen, el movimiento no es centroidal.

Derivando la ecuación (44), la variación del momento angular viene dada:

$$\dot{H}_{O'} = I_{O'} \dot{\omega} + \omega \times H_{O'} \quad (46)$$

donde; $I_{O'} \dot{\omega}$ es el término de la variación del módulo cantidad de movimiento.
 $\omega \times H_{O'}$ es el término debido a la rotación de los ejes del vector momento angular.

La aceleración viene dada por la derivada del vector velocidad $\dot{r}_{O'}$, mediante la siguiente expresión:

$$\ddot{r}_{O'} = \dot{v}_{O'} + \omega \times v_{O'} \quad (47)$$

Sustituyendo las ecuaciones (46) y (47) en la ecuación (45), la ecuación del movimiento rotacional en forma de vector viene dada por:

$$\sum M_{Rotación} = I_{O'} \dot{\omega} + \omega \times (I_{O'} \omega) + m (\rho_G \times \dot{v}_{O'} + \rho_G \times \omega \times v_{O'}) \quad (48)$$

donde; $\rho_G \times \dot{v}_{O'}$ es el término de la variación del módulo velocidad debido a que el movimiento no es centrodial.

$\rho_G \times \omega \times v_{O'}$ es el término debido a la rotación de los ejes del vector velocidad.

Ahora vamos a desarrollar cada uno de los términos de la ecuación (48):

$$I_{O'} \dot{\omega} = I_{xx} \dot{p} - I_{xy} \dot{q} - I_{xz} \dot{r} - I_{xy} \dot{p} + I_{yy} \dot{q} - I_{zy} \dot{r} - I_{xz} \dot{p} - I_{yz} \dot{q} + I_{zz} \dot{r} \quad (49)$$

$$\omega \times (I_{O'} \omega) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ (I_{xx} p - I_{xy} q - I_{xz} r) & (-I_{xy} p + I_{yy} q - I_{zy} r) & (-I_{xz} p - I_{yz} q + I_{zz} r) \end{vmatrix} =$$

$$[I_{yz}(r^2 - q^2) - I_{xz} pq + I_{zz} qr - I_{xy} pr - I_{yy} qr] \vec{i} + [I_{xx} pr - I_{xy} qr + I_{xz}(p^2 - r^2) +$$

$$I_{yz} pq - I_{zz} pr] \vec{j} + [I_{yy} pq - I_{yz} pr - I_{xx} pq + I_{xz} qr + I_{xy}(q^2 - p^2)] \vec{k} \quad (50)$$

$$\rho_G \times \dot{v}_{O'} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ \dot{u} & \dot{v} & \dot{w} \end{vmatrix} = (\dot{w}y_G - \dot{v}z_G) \vec{i} + (\dot{u}z_G - \dot{w}x_G) \vec{j} + (\dot{v}x_G - \dot{u}y_G) \vec{k} \quad (51)$$

$$\omega \times v_{O'} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ u & v & w \end{vmatrix} = (wq - vr) \vec{i} + (ur - wp) \vec{j} + (vp - uq) \vec{k} \quad (52)$$

$$\rho_G \times \omega \times v_{O'} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ (wq - vr) & (ur - wp) & (vp - uq) \end{vmatrix} = [y_G (vp - uq) - z_G (ur - wp)] \vec{i} + [z_G (wq - vr) - x_G (vp - uq)] \vec{j} + [x_G (ur - wp) - y_G (wq - vr)] \vec{k} \quad (53)$$

Sustituyendo las ecuaciones (49), (50), (51), y (53) en la ecuación (48), obtenemos las ecuaciones rotacionales para los tres grados de libertad de rotación.

$$\begin{aligned} \Sigma M_{\text{Rotación}} = I_{O'} \dot{\omega} + \omega \times (I_{O'} \omega) + m (\rho_G \times \dot{v}_{O'} + \rho_G \times \omega \times v_{O'}) = & [I_{xx} \dot{p} - \\ & I_{xy} q - I_{xz} r - I_{xy} p + I_{yy} q - I_{zy} r - I_{xz} p - I_{yz} q + I_{zz} r + I_{yz} r^2 - q^2 - I_{xz} pq + I_{zz} \\ & qr - I_{xy} pr - I_{yy} qr] \vec{i} + [I_{xx} pr - I_{xy} qr + I_{xz} p^2 - r^2 + I_{yz} pq - I_{zz} pr] \vec{j} + [I_{yy} pq - I_{yz} pr - I_{xx} \\ & pq + I_{xz} qr + I_{xy} (q^2 - p^2)] \vec{k} + m [y_G w - v z_G] \vec{i} + [z_G w - v x_G] \vec{j} + [v x_G - u y_G] \vec{k} + y_G \\ & (vp - uq) - z_G (ur - wp) \vec{i} + [z_G (wq - vr) - x_G (vp - uq)] \vec{j} + [x_G (ur - wp) - y_G (wq - vr)] \vec{k} = I_{xx} \\ & p + I_{zz} - I_{yy} qr + I_{xy} pr - q + I_{yz} r^2 - q^2 - I_{xz} pq + r + m [y_G w + vp - uq - z_G (v + ur - wp)] \vec{i} + \\ & [I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) pr - I_{xy} (qr + \dot{p}) + I_{yz} (pq - \dot{r}) + I_{xz} (p^2 - r^2) + m [z_G (\dot{u} + wq - \\ & vr - x_G (w + vp - uq)] \vec{j} + [I_{zz} r + I_{yy} - I_{xx} p q + I_{xy} q^2 - p^2 - I_{yz} pr + q + I_{xz} qr - p + m \\ & x_G v + ur - wp - y_G (u + wq - vr)] \vec{k} \quad (54) \end{aligned}$$

4.3.3 – Ecuaciones del Movimiento

En resumen tenemos tres ecuaciones de movimiento translacional obtenidas a partir de la ecuación (41), y tres ecuaciones rotacionales obtenidas de la ecuación (54). Este conjunto de ecuaciones queda de la siguiente manera:

$$m [\dot{u} - vr + wq - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q})] = X_{ext} \quad (55)$$

$$m [\dot{v} + ur - wp + x_G (pq + \dot{r}) - y_G (p^2 + r^2) + z_G (qr - \dot{p})] = Y_{ext} \quad (56)$$

$$m [\dot{w} - uq + vp + x_G (pr - \dot{q}) + y_G (qr + \dot{p}) - z_G (p^2 + q^2)] = Z_{ext} \quad (57)$$

$$I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + I_{xy} (pr - \dot{q}) - I_{yz} (q^2 - r^2) - I_{xz} (pq + \dot{r}) + m [y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} + ur - wp)] = K_{ext} \quad (58)$$

$$I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) pr - I_{xy} (qr + \dot{p}) + I_{yz} (pq - \dot{r}) + I_{xz} (p^2 - r^2) + m [Z_G (\dot{u} + wq - vr) - X_G (\dot{w} + vp - uq)] = M_{ext} \quad (59)$$

$$I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx}) pq - I_{xy} (p^2 - q^2) - I_{yz} (pr + \dot{q}) + I_{xz} (qr - \dot{p}) + m [X_G (\dot{v} + ur - wp) - y_G (\dot{u} - vr + wq)] = N_{ext} \quad (60)$$

La formulación escrita anteriormente de las ecuaciones (55) a (60), puede reescribirse de forma matricial bajo la Segunda Ley de Newton como:

$$[F]_{Global} = \frac{d}{dt} [MV]_{Global} \quad (61)$$

Para el cálculo de los componentes de la velocidad de un cuerpo en un sistema de coordenadas global, como se indica en el lado derecho de las ecuaciones (61) y (41), el

cálculo del vector de velocidad en un sistema de referencia local, necesita la siguiente transformación del sistema de referencia.

$$\frac{d}{dt} [V]_{Global} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [R] & 0 \\ 0 & [T] \end{bmatrix} [V]_{Local} + \begin{bmatrix} [R] & 0 \\ 0 & [T] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} [V]_{Local} \quad (62)$$

Dado que para la simulación dinámica del movimiento de un cuerpo rígido, se necesitan sus velocidades para cada instante de tiempo, esto implica que la integración de las ecuaciones dinámicas de movimiento tiene que hacerse bajo un sistema de coordenadas locales.

La ecuación (61) puede ser redefinida en el sistema local como:

$$[F]_{Local} = \frac{d}{dt} ([M]_{Local} [V]_{Local}) = \frac{d}{dt} ([M]_{Local}) [V]_{Local} + [M]_{Local} \frac{d}{dt} ([V]_{Local}) \quad (63)$$

Considerando la ecuación (33), la ecuación (63) puede ser reescrita como:

$$[F]_{Local} = [M]_{Local} \left[[\dot{V}]_{Local} + \omega \times [V]_{Local} \right] \quad (64)$$

Para obtener la aceleración del cuerpo, la inversa de la matriz de masa local se puede multiplicar a ambos lados de la ecuación (64).

$$[\dot{V}]_{Local} = [M]_{Local}^{-1} [F]_{Local} - \omega \times [V]_{Local} \quad (65)$$

La representación general de las ecuaciones de la dinámica del movimiento se hace dejando las fuerzas externas y momentos en el lado derecho y las aceleraciones del cuerpo, su masa, su inercia, y los términos de masa añadida en el lado izquierdo.

$$\begin{bmatrix} \text{Masa} \\ \text{Inercia} \\ \text{Masa Añadida} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Aceleraciones} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Fuerzas Hidrostáticas y Momentos} \\ + \\ \text{Fuerzas Hidrodinámicas y Momentos} \\ + \\ \text{Fuerzas Propulsivas y Momentos} \end{bmatrix} \quad (66)$$

4.4 – Fuerzas Hidrostáticas y Momentos

Las fuerzas gravitatorias y de empuje generalmente se llaman fuerzas de restauración en la terminología usada en hidrodinámica. Los vectores de peso y de empuje no cambian las reacciones del vehículo para los cuerpos que están sumergidos. La expresión del empuje y del peso bajo el sistema de referencia global puede ser escrita como: $F_W = 0\vec{i} + 0\vec{j} + W\vec{k}$ y $F_B = 0\vec{i} + 0\vec{j} - B\vec{k}$. Como se mencionó anteriormente, las componentes del peso y empuje están actuando en la dirección vertical global y deben ser transformadas con el fin de ser añadidas a las ecuaciones de movimiento.

Mediante la aplicación de la transformación del sistema de referencia global al local dada en la ecuación (13), las componentes de la fuerza vertical total se pueden obtener como:

$$F_{Hidrostática} = [R^{-1}][F_W] - [R^{-1}][F_B] \quad (67)$$

donde $[R^{-1}]$ es la inversa de la matriz R multiplicada por el peso (W) y el empuje (B), quedando de la siguiente manera:

$$F_{Hidrostática} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (68)$$

La componente vertical del peso actúa en el c.d.g del vehículo, mientras que la componente vertical del empuje actúa en el c.d.c. los cuales no se encuentran en la misma vertical, por lo tanto el momento resultante respecto al centro del vehículo viene dado por:

$$M_{hidrostática} = \rho_G \times ([R^{-1}] \cdot [W]) - \rho_B \times ([R^{-1}] \cdot [B]) \quad (69)$$

A continuación se desarrolla los distintos términos de la ecuación, empezamos por el producto matricial de $[R^{-1}] \cdot W$ y $[R^{-1}] \cdot B$:

$$[R^{-1}] \cdot [W] = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W \sin \theta \\ W \cos \theta \sin \phi \\ W \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$[R^{-1}] \cdot [B] = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B \sin \theta \\ B \cos \theta \sin \phi \\ B \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (71)$$

Ahora los productos vectoriales:

$$\rho_G \times ([R^{-1}] \cdot [W]) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_G & y_G & z_G \\ -W \sin \theta & W \cos \theta \sin \phi & W \cos \theta \cos \phi \end{vmatrix} = (y_G W \cos \theta \cos \phi) \vec{i} +$$

$$(x_G W \cos \theta \sin \phi) \vec{k} - (z_G W \sin \theta) \vec{j} + (y_G W \sin \theta) \vec{k} - (z_G W \cos \theta \sin \phi) \vec{i} - (x_G W \cos \theta \cos \phi) \vec{j} \quad (72)$$

$$\rho_B \times ([R^{-1}] \cdot [B]) = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_B & y_B & z_B \\ -B \sin \theta & B \cos \theta \sin \phi & B \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} = (y_B B \cos \theta \cos \phi) \vec{i} +$$

$$(x_B B \cos \theta \sin \phi) \vec{k} - (z_B B \sin \theta) \vec{j} + (y_B B \sin \theta) \vec{k} - (z_B B \cos \theta \sin \phi) \vec{i} - (x_B B \cos \theta \cos \phi) \vec{j} \quad (73)$$

Sustituyendo de la ecuación (70 a la 73), en la ecuación (69) tenemos que:

$$M_{hidrostática} = [(y_G W \cos \theta \cos \phi) \vec{i} + (x_G W \cos \theta \sin \phi) \vec{k} - (z_G W \sin \theta) \vec{j} + (y_G W \sin \theta) \vec{k} - z_G W \cos \theta \sin \phi \vec{i} - x_G W \cos \theta \cos \phi \vec{j} - y_G W \sin \theta \vec{k} + x_B B \cos \theta \sin \phi \vec{k} - z_B B \sin \theta \vec{j} + y_B B \sin \theta \vec{k} - z_B B \cos \theta \sin \phi \vec{i} - x_B B \cos \theta \cos \phi \vec{j} + y_G W - y_B B \cos \theta \cos \phi + -z_G W + z_B B \cos \theta \sin \phi \vec{i} + -z_G W + z_B B \sin \theta \vec{j} + x_B B \cos \theta \cos \phi \vec{j} + x_G W - x_B B \cos \theta \sin \phi + y_G W - y_B B \sin \theta \vec{k} \quad (74)$$

Este momento será distinto de cero, incluso si W (peso) y B (empuje) son iguales o ρ_G (c.d.g) y ρ_B (c.d.c) son cero. El centro de gravedad (c.d.g) tiene que estar situado por debajo del centro de carena (c.d.c) para que el vehículo se mantenga estable. Las fuerzas hidrostáticas totales y sus momentos pueden ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} F_{Hidrostáticas} \\ M_{Hidrostáticas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (-z_G W + z_B B) \cos \theta \sin \phi \\ (-z_G W + z_B B) \sin \theta + (-x_G W + x_B B) \cos \theta \cos \phi \\ (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \phi \end{bmatrix} \quad (75)$$

4.5 – Fuerzas Hidrodinámicas y Momentos

4.5.1 – Amortiguamiento Hidrodinámico

Es bien sabido que el amortiguamiento de un vehículo submarino no tripulado moviéndose a gran velocidad con sus seis grados de libertad es acoplado, altamente no lineal y que está formado por dos términos; uno cuadrático y otro lineal. Con el fin de simplificar el modelado del vehículo, se harán las siguientes suposiciones:

- No tener en cuenta los términos acoplados lineales y angulares. Se va a suponer que los términos como Y_{rv} y M_{rv} son relativamente pequeños. El cálculo de estos términos está más allá de este proyecto.
- Se supone que el vehículo es simétrico de arriba abajo (plano xy) y de babor-estribor (plano xz). Se va a ignorar la asimetría causada por el transductor del sonar. Esto permite no tener en cuenta los momentos de arrastre inducidos como son $K_{v/v}$ y $M_{u/u}$.
- No se tendrá en cuenta ninguno de los términos de amortiguamiento mayores de segundo orden. Esto permitirá descartar los términos de orden superior como Y_{vv} .

Los principales componentes de amortiguamiento hidrodinámico son el rozamiento superficial debido a la capa límite, que es fundamentalmente laminar y, turbulento él debido a la formación de remolinos. El análisis dimensional nos ayuda a predecir el tipo de flujo alrededor del vehículo. El número de Reynolds representa la relación de inercia para fuerzas viscosas, y viene dado por la ecuación:

$$Re = \frac{Ul}{\nu} \quad (76)$$

Donde U es la velocidad de funcionamiento del vehículo en (m/s), l es la longitud característica del vehículo en (m) y ν que es la viscosidad cinemática del fluido, el cual para agua de mar a 15 ° C, según Newman [8] da un valor de $1,190 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Esto produce un número de Reynolds que, para un cuerpo con una superficie lisa cae en la zona de transición entre el flujo laminar y turbulento. Por lo tanto en más de una ocasión el flujo de alrededor del vehículo será turbulento. Se puede usar esta información para estimar el coeficiente de arrastre del vehículo.

Hay que tener en cuenta que el arrastre viscoso siempre se opone al movimiento del vehículo. Con el fin de establecer el signo correcto, es necesario que en todas las ecuaciones donde se introduzcan términos de arrastre considerar v/v , en lugar de v^2 .

4.5.1.1 – Arrastre Axial

La fuerza de amortiguamiento hidrodinámico axial, viene definida por:

$$F_{axial} = X_{u|u|} u|u| + X_u u \quad (77)$$

donde;

$X_{u|u|} u|u|$, corresponde al término de amortiguamiento cuadrático y es el dominante cuando la velocidad es elevada caso de los AUV's.

$X_u u$, corresponde al término de amortiguamiento lineal y es el dominante cuando la velocidad es pequeña caso de los ROV's.

El arrastre axial del vehículo puede ser expresado por la siguiente formula empírica:

$$X_{axial} = - \left(\frac{1}{2} \rho C_D A_f \right) u |u| \quad (78)$$

De esta ecuación se obtiene la siguiente relación no lineal del coeficiente de fricción axial:

$$X_{u|u|} = - \frac{1}{2} \rho C_D A_f \quad (79)$$

donde ρ es la densidad del fluido circundante, A_f es el área frontal del vehículo, y C_D es el coeficiente de arrastre axial del vehículo.

Existen muchas formulas empíricas para calcular el coeficiente de fricción axial una de ellas es la de Triantafyllou [9]:

$$C_D = \frac{C_{SS} \pi A_p}{A_f} \left[1 + 60 \left(\frac{d}{l} \right)^3 + 0,0025 \left(\frac{l}{d} \right) \right] \quad (80)$$

donde C_{SS} es el valor de fricción de la placa plana de Schoenherr's, A_p es el área en planta del vehículo, y A_f es el área frontal del vehículo. En *Principles of Naval Architecture* [7], se aporta una estimación de C_{SS} de $3,397 \times 10^{-3}$.

A partir de esta ecuación empírica se obtiene un valor de C_D entre 0,11-0,13. Experimentos llevados a cabo mediante el Sistema de Laboratorio Oceanográfico en la medición de la eficiencia propulsiva del vehículo, dio como resultado una estimación para el C_D de 0,2.

Ensayos de arrastre axial realizados a escala real del vehículo en la universidad de Rhode Island, obtuvieron como resultado un coeficiente axial de 0,27. Este valor más alto refleja la resistencia del casco del vehículo más el arrastre de las fuentes olvidadas en la estimación empírica, tales como las aletas de los vehículos, el transpondedor del sonar,...etc. Se utilizará este valor más alto, medido experimentalmente en la simulación del vehículo.

4.5.1.2 – Flujo-cruzado de arrastre

Al igual que en la fuerza de amortiguamiento axial, en el flujo cruzado de arrastre las fuerzas y el momentos están formadas por dos términos de amortiguamiento uno cuadrático y otro lineal. Sus expresiones son las siguientes:

$$F_{Flujo\ Cruzado\ Arraste} = Y_{v|v} v|v| + Y_v v = Z_{w|w} w|w| + Z_w w \quad (81)$$

$$M_{Flujo\ Cruzado\ Arrastre} = M_{q|q} q|q| + M_q q = N_{r|r} r|r| + N_r r \quad (82)$$

El flujo de arrastre cruzado de un vehículo se considera que es la suma de la resistencia de flujo cruzado del casco más el flujo de arrastre transversal de la aleta. El método utilizado para el cálculo de la resistencia del casco es análogo al strip theory, el método usado para calcular la masa añadida del casco: la resistencia total del casco se aproxima como la suma de los arrastres de dos secciones transversales de un vehículo cilíndrico.

La teoría de cuerpo delgado (Slender body theory), es un método razonablemente exacto para calcular la masa añadida, pero para los términos viscosos puede no serlo tanto. Este método, sin embargo, permite incluir todos los términos en las ecuaciones del movimiento. Al llevar a cabo la simulación de vehículos, se tratará de corregir cualquier error en los términos de arrastre de flujo cruzado a través de la comparación con los datos y observaciones experimentales del vehículo en el mar.

Los coeficientes de resistencia de flujo cruzado se expresan de la siguiente manera:

$$Y_{vv} = Z_{ww} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b_2}} 2R(x)dx - 2 \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \quad (83)$$

$$M_{ww} = -N_{vv} = \frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b_2}} 2xR(x)dx - 2x_{fin} \cdot \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \quad (84)$$

$$Y_{rr} = -Z_{qq} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b_2}} 2x|x|R(x)dx - 2 x_{fin} |x_{fin}| \cdot \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \quad (85)$$

$$M_{qq} = N_{rr} = -\frac{1}{2} \rho C_{dc} \int_{x_t}^{x_{b_2}} 2x^3R(x)dx - 2x_{fin}^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \rho S_{fin} C_{df} \right) \quad (86)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, C_{dc} es el coeficiente de arrastre de un cilindro, $R(x)$ es el radio del casco como una función de la posición axial, S_{fin} es el area de la aleta de control, y C_{df} es el coeficiente de arrastre de flujo cruzado de las aletas de control. Los límites de integración son del x_{b_2} extremo delantero de la sección de proa, a x_t extremo en popa de la sección de cola.

Hoerner [5] estima el coeficiente de arrastre de flujo cruzado de un cilindro C_{dc} con un valor de 1,1. El coeficiente de arrastre de flujo cruzado C_{df} se obtiene utilizando la fórmula desarrollada por Whicker y Fehlner [10]:

$$C_{df} = 0,1 + 0,7t \quad (87)$$

donde t es el índice de adelgazamiento de la aleta, o la relación de las anchuras de la parte superior e inferior de la aleta a lo largo del eje del vehículo. A partir de esta fórmula, se obtiene una estimación de C_{df} de 0,56.

4.5.1.3 – Coeficiente de arrastre de balance

Podemos aproximar la resistencia de balanceo de un vehículo asumiendo que el componente principal proviene de la resistencia de flujo transversal de las aletas.

$$F_{Arrastre\ Balance} = (Y_{vvf} r_{mean}) r_{mean}^2 p|p| + K_p p \quad (88)$$

donde Y_{vvf} es el coeficiente de flujo cruzado de arrastre de la aleta del vehículo, r_{mean} es la altura de la aleta medida por encima de la línea central del vehículo y $K_p p$ es el término de amortiguamiento lineal. Se obtiene la siguiente ecuación para el coeficiente de arrastre de balance:

$$K_{p|p} = Y_{vvf} r_{mean}^3 + K_p p \quad (89)$$

Esto es a lo sumo una aproximación del valor real, sería mejor utilizar los datos experimentales.

4.5.2 – Masa añadida

La masa añadida es una medida de la masa del agua en movimiento cuando el vehículo acelera. Las fuerzas y momentos para un fluido ideal pueden ser expresadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_j = -\dot{u}_i m_{ji} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{li} \quad (90)$$

$$M_j = -\dot{u}_i m_{j+3,i} - \varepsilon_{jkl} u_i \Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{jkl} u_k \dot{u}_i m_{li} \quad (91)$$

donde $i = 1,2,3,4,5,6$

y $ijkl = 1,2,3$

y donde el tensor ε_{jkl} es igual a +1 si los índices están en orden cíclico (123, 231, 312), -1 si los índices son acíclico (132,213,321), y cero si cualquier par de los índices son iguales. Para el desarrollo completo de estas ecuaciones consultar Newman [8] o Fossen [2]. Si el vehículo cuenta con tres planos de simetría, se puede prescindir de la contribución de los elementos fuera de la diagonal de la matriz de masa añadida M_A . Por lo tanto, se obtienen las siguientes expresiones simples para M_A :

$$M_A = -diag [X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}] = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad (92)$$

que es equivalente a:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (93)$$

La estructura de la diagonal es muy importante ya que los elementos fuera de la diagonal son difíciles de determinar tanto de manera experimental como teórica. En la práctica, la aproximación de la diagonal se considera que es aceptable para muchas aplicaciones, esto es debido al hecho de que los elementos fuera de la diagonal de una matriz positiva (inercia) serán mucho más pequeños que sus homólogos diagonales.

Desarrollando las ecuaciones (90) y (91), fijando el valor de j en 1,2,3 en sus distintas combinaciones con los valores de $i=1,2,3,4,5,6$. Obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$X_A = X_{\dot{u}} \dot{u} - Y_{\dot{v}} vr + Z_{\dot{w}} wq \quad (94)$$

$$Y_A = X_{\dot{u}} ur + Y_{\dot{v}} \dot{v} - Z_{\dot{w}} wp \quad (95)$$

$$Z_A = -X_{\dot{u}} uq + Y_{\dot{v}} vp + Z_{\dot{w}} \dot{w} \quad (96)$$

$$K_A = K_p \dot{p} - (M_{\dot{q}} - N_{\dot{r}}) qr - (Y_{\dot{v}} - Z_{\dot{w}}) vw \quad (97)$$

$$M_A = M_{\dot{q}} \dot{q} - (N_{\dot{r}} - K_p) rp - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}) uw \quad (98)$$

$$N_A = N_{\dot{r}} \dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}) uv - (K_p - M_{\dot{q}}) pq \quad (99)$$

4.5.2.1 – Masa añadida axial

Para estimar la masa añadida axial, nosotros aproximamos la forma del casco a un elipsoide en la cual el eje mayor es la mitad de la longitud del vehículo l , y el eje menor es la mitad del diámetro del vehículo. Ver la figura 26 para una comparación de las dos formas, (la del perfil del casco con la elipsoide). Blevins [6, p.407] obtuvo las siguientes fórmulas empíricas para el cálculo de la masa añadida axial de un elipsoide, que no es más que el cálculo del volumen del elipsoide teniendo en cuenta unos parámetros empíricos debido a la variación de las formas en las zonas de proa y popa. Utilizaremos la ecuación (97) por considerarla más aproximada.

$$X_{\dot{u}} = -m_{11} = -\frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{l}{2}\right) \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (100)$$

$$X_{\dot{u}} = -m_{11} = -\frac{4\beta\rho\pi}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (101)$$

donde ρ es la densidad del fluido circundante, y α y β son parámetros empíricos medidos por Blevins y determinados mediante la relación de la longitud del vehículo con el diámetro como se muestra en la tabla 24, cuanto más se aleje de la forma elipsoidal mayor será el error cometido.

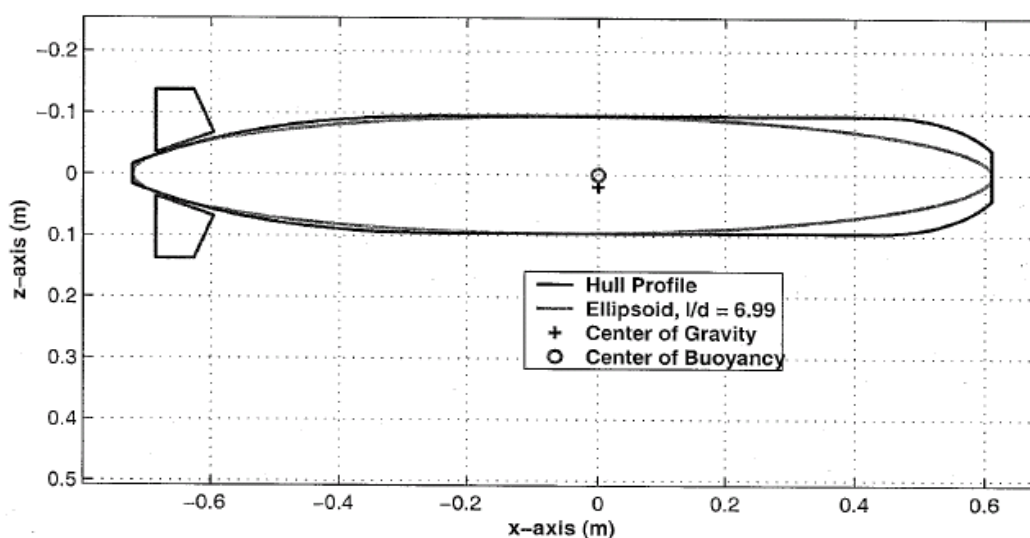


Figura 26 Perfil del Remus en el plano XZ

l/d	α	β
0,01	-	0,6348
0,1	6,148	0,6148
0,2	3,008	0,6016
0,4	1,428	0,5712
0,6	0,9078	0,5447
0,8	0,6514	0,5211
1	0,5000	0,5000
1,5	0,3038	0,4557
2,0	0,2100	0,4200
2,5	0,1563	0,3908
3,0	0,1220	0,3660
5,0	0,05912	0,2956
7,0	0,03585	0,2510
10,0	0,02071	0,2071

Tabla 24 Masa Añadida Axial (Parámetros α y β)

4.5.2.3 – Masa añadida flujo transversal

La masa añadida del vehículo es calculada usando la "strip theory" aplicada a las secciones transversales del casco tanto las cilíndricas como las cruciformes. A continuación se va a explicar brevemente en qué consiste la "strip theory", para cuerpos delgados, el principio de esta teoría consiste en dividir la parte sumergida del vehículo en una serie de rebanadas. Por lo tanto los coeficientes hidrodinámicos en dos dimensiones para la masa añadida se pueden calcular para cada sección y ser integrados a lo largo de la longitud del cuerpo para obtener los coeficientes en tres dimensiones. La masa añadida por unidad de longitud de un único segmento cilíndrico calculada por Newman [8] viene dada por:

$$m_a(x) = \pi\rho R(x)^2 \quad (102)$$

donde ρ es la densidad del fluido circundante y, $R(x)$ es el radio del casco como una función de la posición axial. La masa añadida de un círculo con aletas, calculada esta vez por Blevins [4], viene dada por:

$$m_{af} = \pi\rho \left(a_{aleta}^2 - R(x)^2 + \frac{R(x)^4}{a_{aleta}^2} \right) \quad (103)$$

donde a_{aleta} es la altura máxima por encima de la línea de crujía hasta la parte superior de las aletas.

Integrando las ecuaciones (102) y (103), a lo largo de la longitud del vehículo, obtenemos las siguientes ecuaciones para la masa añadida del flujo transversal:

$$Y_{\dot{v}} = -m_{22} = -\int_{x_t}^{x_f} m_a(x) dx - \int_{x_f}^{x_{f2}} m_{af}(x) dx - \int_{x_{f2}}^{x_{b2}} m_a(x) dx \quad (104)$$

$$Z_{\dot{w}} = -m_{33} = -m_{22} = Y_{\dot{v}} \quad (105)$$

$$M_{\dot{q}} = -m_{55} = -\int_{x_{tail}}^{x_{fin}} x^2 m_a(x) dx - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} x^2 m_{af}(x) dx - \int_{x_{fin2}}^{x_{bow2}} x^2 m_a(x) dx \quad (106)$$

$$N_{\dot{r}} = -m_{66} = -m_{55} = M_{\dot{q}} \quad (107)$$

Para más detalle sobre los límites de integración ver la tabla 27 (Apéndice A).

Solo se tienen en cuenta las fuerzas y momentos de los ejes YZ, debido a que se están analizando los términos de masa añadida del flujo transversal, por lo tanto $X_{\dot{u}}$ y $K_{\dot{p}}$ son cero. También se podrían tener en cuenta en el análisis los términos del movimiento acoplado con los ejes YZ, es decir, como afecta la deriva en el cabeceo ($Y_{\dot{r}}$ $M_{\dot{w}}$) y la arfada en la guiñada ($Z_{\dot{q}}$ $N_{\dot{v}}$). Pero al ser estos tan pequeños y difíciles de obtener, tanto de manera teórica como practica, no se van a tener en cuenta.

4.5.2.4 – Masa añadida debido al balance

Para estimar la masa añadida debida al balanceo, se va a suponer que las secciones relativamente lisas del casco del vehículo no generan ninguna masa añadida. También se va a ignorar a la masa añadida generada por el transpondedor del sonar y cualquier otra protuberancia pequeña. Teniendo en cuenta estas consideraciones, solo se necesita considerar la sección del casco que contiene las aletas de control del vehículo.

Blevins [4] obtuvo la siguiente formula empírica para la masa añadida de balance en un círculo con aletas:

$$K_{\dot{p}} = - \int_{x_{fin}}^{x_{fin2}} \frac{2}{\pi} \rho a^4 dx \quad (108)$$

donde a es la altura de la aleta por encima de la línea de crujía del vehículo, en este caso la media es de 0,1172 m. Para más detalle sobre los límites de integración ver la tabla 27 (Apéndice A).

4.5.2.5 – Masa añadida términos cruzados

El resto de términos cruzados de masa añadida, corresponden al acoplamiento de los distintos movimientos que afectan al UUV y son los que figuran a continuación:

$$X_{wq} = Z_{\dot{w}} \quad X_{qq} = Z_{\dot{q}} \quad X_{vr} = -Y_{\dot{v}} \quad X_{rr} = -Y_{\dot{r}} \quad (109)$$

donde, todos son coeficientes que se ven afectados por los movimientos acoplados de velocidades lineales con angulares o de angulares simplemente.

4.5.3 – Sustentación del cuerpo

La sustentación del cuerpo viene dada por el movimiento del vehículo a través del agua con un determinado ángulo de ataque, causando la separación del flujo y la consiguiente caída en la presión a lo largo de la sección de popa, y en la parte superior del casco del vehículo.

Esta caída de presión se modela como una fuerza aplicada en el centro de presión, como este centro de presión no se encuentra alineado con el origen del sistema local del vehículo, esta fuerza también produce un momento de cabeceo sobre el origen.

Para determinar la sustentación del cuerpo sería preferible basar las estimaciones en datos reales del vehículo, a partir de pruebas de tanques, remolque..., o mediciones del vehículo montado sobre un brazo giratorio. Como no se dispone de la infraestructura para determinarlos, ni los datos de los fabricantes se utilizarán las estimaciones realizadas por Hoerner [6] para el cálculo de la fuerza de sustentación.

4.5.3.1 – Fuerza de sustentación del cuerpo

Como ya se ha comentado para calcular la sustentación del cuerpo, se utilizará la fórmula empírica desarrollada por Hoerner [6], que establece que:

$$L_{cuerpo} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd} u^2 \quad (110)$$

donde ρ es la densidad del fluido circundante, A_p es el área proyectada del casco del vehículo, u es la velocidad de avance del vehículo, y C_{yd} es un coeficiente de sustentación, el cual Hoerner lo expresa como:

$$C_{yd} = C_{yd}(\beta) = \frac{dC_{yd}}{d\beta} \beta \quad (111)$$

donde β es el ángulo de ataque en radianes y viene dado mediante la siguiente relación:

$$\tan \beta = \frac{\omega}{u} \implies \beta \approx \frac{\omega}{u} \quad (112)$$

Hoerner da la siguiente relación para la pendiente o inclinación de la sustentación:

$$\frac{dC_{yd}^\circ}{d\beta^\circ} = C_{yd\beta}^\circ = \left(\frac{l}{d}\right) C_{y\beta}^\circ \quad (113)$$

donde l es la longitud del vehículo y d el diámetro máximo. Hoerner [6, p.13-3] afirma que para:

$$6,7 \leq \frac{l}{d} \leq 10, \quad C_{y\beta}^{\circ} = 0,003 \quad (114)$$

Hay que tener en cuenta que la ecuación (113) es necesaria para convertir los coeficientes de sustentación de la pendiente $C_{yd\beta}^{\circ}$ y $C_{y\beta}^{\circ}$ de grados a radianes, por lo tanto el coeficiente de sustentación de la pendiente expresado en radianes, viene definido de la siguiente manera:

$$C_{yd\beta} = C_{yd\beta}^{\circ} \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (115)$$

Sustituyendo en la ecuación (110), las relaciones dadas anteriormente, se tiene que:

$$L_{cuerpo} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} \beta u^2 = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} \frac{w}{u} u^2$$

por lo tanto la sustentación queda:

$$L_{cuerpo} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} w u \quad (116)$$

Esta ecuación podemos expresarla en términos de coeficientes de sustentación en función de las velocidades (u, v, w) y de la longitud del vehículo:

$$Y_{uvl} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} \quad (117)$$

$$Z_{uwl} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} \quad (118)$$

4.5.3.2 – Momento de sustentación del cuerpo

Hoerner estima que para un cuerpo de revolución con un cierto ángulo de ataque, la fuerza viscosa se centra en un punto entre el 60 y 70 % de la longitud total del cuerpo desde la nariz de este. Sus hallazgos experimentales sugieren que el flujo pasa suavemente alrededor del extremo delantero del casco, y que la fuerza lateral solo se genera en la parte interior en la mitad delantera del casco.

A raíz de estos resultados, vamos a suponer que en sistema de coordenadas local:

$$x_{cp} = -0,65l - x_{cero} \quad (119)$$

donde x_{cp} es la coordenada del centro de presión

Este resultado podemos expresarlo en la siguiente ecuación del momento de sustentación:

$$M_{uwl} = -\frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} x_{cp} \quad (120)$$

$$N_{uwl} = \frac{1}{2} \rho A_p C_{yd\beta} x_{cp} \quad (121)$$

4.5.4 – Sustentación de las aletas

El movimiento del vehículo es controlado por dos aletas horizontales, o planos de popa y de dos apéndices verticales o timones. Los pares de aletas se mueven juntos, es decir, los planos de popa no se mueven independientemente uno del otro, ni tampoco los planos del timón.

Para el control de las aletas, la formula empírica de sustentación de las aletas viene dada por:

$$L_{aleta} = \frac{1}{2} \rho C_L S_{aleta} \delta_e v_e^2 \quad (122)$$

$$M_{aleta} = x_{aleta} L_{aleta} \quad (123)$$

donde C_L es el coeficiente de sustentación de la aleta, S_{aleta} es el área de la aleta, δ_e es el ángulo efectivo de la aleta en radianes, v_e es la velocidad efectiva en la aleta, y x_{aleta} es la posición axial de la aleta en el sistema de referencia local.

Hoerner [6, p. 3-2] establece la siguiente fórmula empírica para la sustentación de la aleta como una función de α en radianes:

$$C_{L\alpha} = \frac{dC_L}{d\alpha} = \left[\frac{1}{2\bar{\alpha}\pi} + \frac{1}{\pi(AR_e)} \right]^{-1} \quad (124)$$

donde el factor $\bar{\alpha}$ tiene un valor de 0,9 según Hoerner, y (AR_e) es el alargamiento efectivo el cual es un parámetro adimensional que mide lo esbelta que es la aleta, vamos a definir primero AR (aspect ratio):

$$AR = \frac{b_{aleta}}{c} \quad (125)$$

donde b_{aleta} es la envergadura, la distancia que hay entre las puntas de la aleta, y c es la cuerda. Definimos también la superficie o área de la aleta, que viene definida por:

$$S_{aleta} = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} c(y) dy = b\bar{c} \quad (126)$$

donde $c(y)$ es la distribución de cuerdas, y \bar{c} es la cuerda media. Por lo tanto despejando de la ecuación (126) el valor de \bar{c} y sustituyéndolo en la ecuación (125), obtenemos el valor de AR como:

$$AR = \frac{b_{aleta}^2}{S_{aleta}} \quad (127)$$

Finalmente (AR_e) queda de la siguiente manera:

$$AR_e = 2(AR) = 2 \left(\frac{b_{aleta}^2}{S_{aleta}} \right) \quad (128)$$

donde el factor 2, es debido que el vehículo contiene dos aletas, una a cada banda.

A medida que la aleta se encuentre en distintos puntos desde el origen del sistema de coordenadas, el vehículo experimenta las siguientes velocidades efectivas:

$$u_{aleta} = u + z_{aleta} q - y_{aleta} r \quad (129)$$

$$v_{aleta} = v + x_{aleta} r - z_{aleta} p \quad (130)$$

$$w_{aleta} = w + y_{aleta} p - x_{aleta} q \quad (131)$$

donde x_{aleta} , y_{aleta} y z_{aleta} son las coordenadas de las aletas en el sistema local del vehículo. Estas ecuaciones están formadas por la componente de la velocidad en cada eje más los términos que afectan a los distintos giros del vehículo, los cuales vienen dados por el producto vectorial de una velocidad angular y un vector de posición, en nuestro caso:

$$\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ p & q & r \\ x_{aleta} & y_{aleta} & z_{aleta} \end{vmatrix} = (z_{aleta} q - y_{aleta} r) \vec{i} + (x_{aleta} r - z_{aleta} p) \vec{j} + (y_{aleta} p - x_{aleta} q) \vec{k} \quad (132)$$

Para el caso del vehículo estudiado, no se va a tener en cuenta los términos y_{aleta} y z_{aleta} ya que son pequeños en comparación con las velocidades de translación del vehículo.

Los ángulos efectivos de la aleta δ_{se} y δ_{re} pueden ser expresados como:

$$\delta_{re} = \delta_r - \beta_{re} \quad (133)$$

$$\delta_{se} = \delta_s + \beta_{se} \quad (134)$$

donde δ_s y δ_r son los ángulos de la aleta que hacen referencia al casco, β_{se} y β_{re} son los ángulos efectivos de ataque del plano de la aleta, como se muestra en la figura 27 y 28.

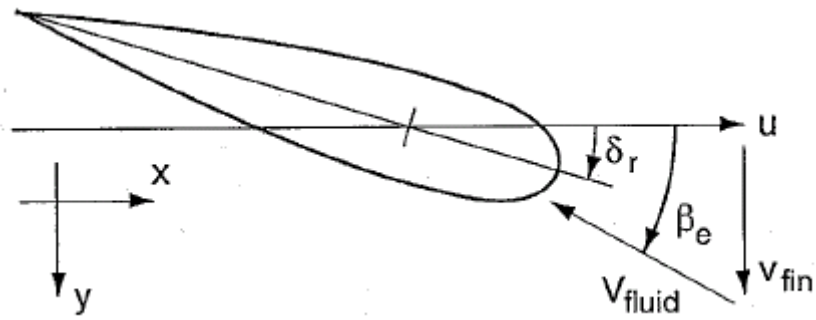


Figura 27 Ángulo de ataque efectivo del timón

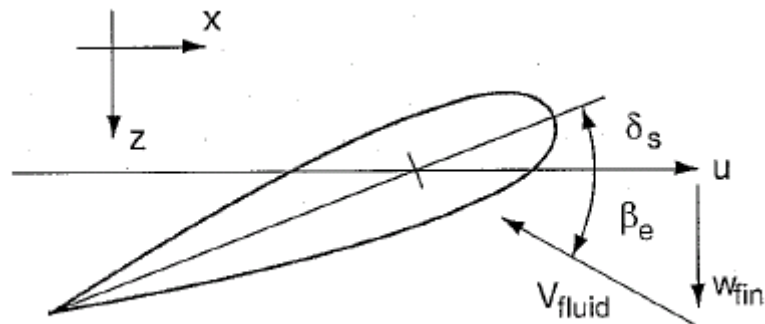


Figura 28 Ángulo de ataque efectivo del plano de popa

Asumiendo que los ángulos son pequeños, estos ángulos efectivos pueden ser expresados como:

$$\beta_{re} = \frac{v_{aleta}}{u_{aleta}} \approx \frac{1}{u} (v + x_{aleta} r) \tag{135}$$

$$\beta_{se} = \frac{w_{aleta}}{u_{aleta}} \approx \frac{1}{u} (w - x_{aleta} q) \tag{136}$$

Sustituyendo las ecuaciones (135) y (136) en las ecuaciones (133) y (134), tenemos que:

$$\delta_{re} = \delta_r - \beta_{re} = \delta_r - \frac{1}{u} (v + x_{aleta} r)$$

$$\delta_{se} = \delta_s + \beta_{se} = \delta_s + \frac{1}{u} (w - x_{aleta} q)$$

Y a su vez estas ecuaciones las sustituimos en las ecuaciones (122) y (123), junto con las ecuaciones (129), (130) y (131) y obtenemos las ecuaciones que definen las fuerzas y momentos de sustentación de la aleta:

$$Y_r = \frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} S_{aleta} [u^2 \delta_r - uv - x_{aleta}(ur)] \quad (137)$$

$$Z_s = -\frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} S_{aleta} [u^2 \delta_s + uw - x_{aleta}(uq)] \quad (138)$$

$$M_s = \frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{aleta} [u^2 \delta_s + uw - x_{aleta}(uq)] \quad (139)$$

$$N_r = \frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{aleta} [u^2 \delta_r - uv - x_{aleta}(ur)] \quad (140)$$

Finalmente, se pueden separar de estas ecuaciones los coeficientes de sustentación y los sus momentos:

$$Y_{uu\delta_r} = -Y_{uvaleta} = \rho C_{L\alpha} S_{aleta} \quad (141)$$

$$Z_{uu\delta_s} = Z_{uwaleta} = -\rho C_{L\alpha} S_{aleta} \quad (142)$$

$$Y_{uraleta} = -Z_{uqaleta} = -\rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{fin} \quad (143)$$

$$M_{uu\delta_s} = M_{uwaleta} = \rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{aleta} \quad (144)$$

$$N_{uu\delta_r} = -N_{uvaleta} = \rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{aleta} \quad (145)$$

$$M_{uqaleta} = N_{uraleta} = -\rho C_{L\alpha} S_{aleta} x_{aleta}^2 \quad (146)$$

donde estos coeficientes se obtienen analizando las ecuaciones (137-140), en función de los movimientos bajo los cuales se ven afectadas las aletas.

4.5.5 – Modelo de propulsión

Existen dos tipos de hélices: Las de paso fijo y de paso variable. Son más eficientes las de paso fijo que las hélices de paso variable para una velocidad concreta de rotación y condición de carga. A esa velocidad particular, de rotación y de carga, puede transmitir energía más eficientemente que una de paso variable. A cualquier otra velocidad de rotación, o cualquier otra carga del buque, el paso fijo no será el más eficiente ya que el ángulo no será el óptimo. Una hélice de paso variable de tamaño adecuado puede ser eficiente para una amplia gama de velocidades de rotación, ya que se puede ajustar para absorber toda la potencia que el motor es capaz de producir en casi cualquier velocidad de rotación, además las hélices de paso variable son propulsores donde las palas se pueden girar bajo el control de un sistema servo hidráulico. Estas hélices se emplean cuando es necesario mejorar las propiedades de maniobra y se requiere que la velocidad en el eje sea constante.

A continuación vamos a formular las ecuaciones generales de propulsión del empuje y par de una hélice:

$$T = T_{|n|n} \theta |n|n + T_{|n|V_a} |n|V_a \quad (147)$$

$$Q = Q_0 |n|n + Q_{|n|n} |\theta| |n|n + Q_{|n|V_a} \theta |n|V_a \quad (148)$$

donde;

T , es el empuje de la hélice.

Q , es el par de la hélice.

$T_{|n|n} \theta |n|n$, es un término de amortiguamiento de empuje de la hélice en función del ángulo de paso de la pala.

$T_{|n|V_a} |n|V_a$, es un término de amortiguamiento de empuje de la hélice en función de la estela producida.

$Q_0 |n|n$, este término representa el par de la hélice debido al movimiento, incluso cuando el ángulo de paso es máximo.

$Q_{|n|n} |\theta| |n|n$, es un término de amortiguamiento del par de la hélice en función del ángulo de paso de la pala.

$Q_{|n|V_a} \theta |n|V_a$, es un término de amortiguamiento del par de la hélice en función de la estela producida.

$T_{|n|n} |n|n$, este término representa el empuje de la hélice debido al movimiento, y está incluido dentro del término $T_{|n|n} \theta |n|n$.

Para el análisis particular del AUV simulado, se va a tomar una serie de criterios en la elección de la hélice, empezando por seleccionar un sistema de hélice de paso fijo, eliminando así el efecto del ángulo de paso θ en la ecuación del empuje $T_{|n|n} \theta |n|n$, y el término de amortiguamiento en función del ángulo de paso de la ecuación del par $Q_{|n|n} |\theta| |n|n$, solo se tendrá en cuenta el efecto del empuje y par producidos por la hélice debido al movimiento y el efecto de la estela producida también sin tener en cuenta el efecto del ángulo de paso θ , quedando las ecuaciones del siguiente modo:

$$T = T_{|n|n} |n|n + T_{|n|V_a} |n|V_a \quad (149)$$

$$Q = Q_0 |n|n + Q_{|n|V_a} |n|V_a \quad (150)$$

donde;

V_a , es la velocidad de avance, o velocidad del agua entrando en la hélice, y viene dada por la siguiente expresión:

$$V_a = (1 - \omega) U \quad (151)$$

ω ,es el coeficiente de estela, normalmente toma el valor entre (0,1-0,4).

U , es la velocidad de avance del vehículo en m/seg.

Los coeficientes de propulsivos de par (K_{prop}) y empuje (X_{prop}) utilizados en las ecuaciones generales del movimiento, se obtienen en las pruebas de mar de nuestro AUV manteniendo constante una velocidad de avance de 1.51 m/seg (3 nudos) y una velocidad de la hélice de 1500 RPM. En estas pruebas se observó que para mantener nuestro AUV en condiciones estables y ángulo de cabeceo 0, durante una trayectoria media necesitamos un ángulo de balance de -5,3 grados, para así compensar el par producido por la hélice.

4.5.6 – Términos Combinados

Combinando los términos semejantes de las ecuaciones (107), (114,115), (117,118), (138, 139,140) y (141, 142,143), obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 Y_{uv} &= Y_{uvl} + Y_{uvaleta} \\
 Y_{ur} &= Y_{ura} + Y_{uraleta} \\
 Z_{uw} &= Z_{uwl} + Z_{uwaleta} \\
 Z_{uq} &= Z_{uqa} + Z_{uqaleta} \\
 M_{uw} &= M_{uwa} + M_{uwl} + M_{uwaleta} \\
 M_{uq} &= M_{uqa} + M_{uqaleta} \\
 N_{uv} &= N_{uva} + N_{uvl} + N_{uvaleta} \\
 N_{ur} &= N_{ura} + N_{uraleta}
 \end{aligned} \tag{152}$$

4.5.7 – Fuerzas y Momentos Externos

Combinando los coeficientes de las distintas ecuaciones para el AUV:

- Hidrostáticas: Ecuación (75)
- Amortiguamiento Hidrodinámico: Ecuaciones (79), (83, a 86), y (89)
- Masa Añadida: Ecuaciones (100), (104, a 107), (108) y (109)
- Fuerzas y Momentos de Sustentación: Ecuaciones (117,118) y (120,121)
- Fuerzas y Momentos de Sustentación de las aletas: Ecuaciones (141, a 146)
- Propulsión: Valores de K_{prop} y X_{prop}

El sumatorio de todas las fuerzas externas y momentos, se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \sum X_{ext} = & -(W - B) \sin \theta + X_{u|u|} u|u| + X_u u + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{wq} wq + X_{qq} qq + X_{vr} vr + \\ & X_{rr} rr + X_{prop} \end{aligned} \quad (153)$$

$$\begin{aligned} \sum Y_{ext} = & (W - B) \sin \phi \cos \theta + Y_{v|v|} v|v| + Y_v v + Y_{r|r|} r|r| + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{ur} ur + \\ & Y_{wp} wp + Y_{pq} pq + Y_{uv} uv + Y_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (154)$$

$$\begin{aligned} \sum Z_{ext} = & (W - B) \cos \phi \cos \theta + Z_{w|w|} w|w| + Z_w w + Z_{q|q|} q|q| + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + \\ & Z_{uq} uq + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp + Z_{uw} uw + Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (155)$$

$$\begin{aligned} \sum K_{ext} = & (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (-z_G W + z_B B) \cos \theta \sin \phi + K_{p|p|} p|p| + K_p p + \\ & K_{\dot{p}} \dot{p} + K_{prop} \end{aligned} \quad (156)$$

$$\begin{aligned} \sum M_{ext} = & (-z_G W + z_B B) \sin \theta + (-x_G W + x_B B) \cos \theta \cos \phi + M_{w|w|} w|w| + \\ & M_{q|q|} q|q| + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{uq} uq + M_{vp} vp + M_{rp} rp + M_{uw} uw + \\ & M_q q + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (157)$$

$$\begin{aligned} \sum N_{ext} = & (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \phi + N_{r|r|} r|r| + N_r r + \\ & N_{v|v|} v|v| + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{ur} ur + N_{wp} wp + N_{pq} pq + N_{uv} uv + \\ & N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (158)$$

Capítulo 5

VALIDACIÓN Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UUV's

5.1 – Introducción

En este capítulo se empieza por completar las ecuaciones que rigen el movimiento del UUV. Seguidamente, se obtiene una aproximación numérica para las ecuaciones del movimiento y las ecuaciones cinemáticas del UUV en el marco de un sistema de coordenadas Locales unido al sistema de referencia Global o de la Tierra. Por último se usa esta aproximación numérica de las ecuaciones para escribir un código de simulación mediante MATLAB que describa el movimiento del UUV.

5.2 – Combinación de las Ecuaciones del Movimiento

La combinación de las ecuaciones de la dinámica del vehículo (55 a 60), con las ecuaciones de las fuerzas y momentos externos (153 a 158), da lugar a las ecuaciones del movimiento no lineales de un vehículo submarino no tripulado (UUV) con sus seis grados de libertad.

- Avance, o translación a lo largo del eje x:

$$\begin{aligned}
 m [\dot{u} - vr + wq - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q})] = \\
 -(W - B) \sin \theta + X_{u|u|} u|u| + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{wq} wq + X_{qq} qq + X_{vr} vr \\
 + X_{rr} rr + X_u u + X_{prop}
 \end{aligned} \tag{159}$$

- Deriva, o translación a lo largo del eje y:

$$\begin{aligned}
 m [\dot{v} + ur - wp + x_G (pq + \dot{r}) - y_G (p^2 + r^2) + z_G (qr - \dot{p})] = \\
 (W - B) \sin \phi \cos \theta + Y_{v|v|} v|v| + Y_{r|r|} r|r| + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{ur} ur \\
 + Y_{wp} wp + Y_{pq} pq + Y_v v + Y_{uv} uv + Y_{uu\delta_r} u^2 \delta_r
 \end{aligned} \tag{160}$$

- Arfada, o translación a lo largo del eje z:

$$\begin{aligned}
 m [\dot{w} - uq + vp + x_G (pr - \dot{q}) + y_G (qr + \dot{p}) - z_G (p^2 + q^2)] = \\
 (W - B) \cos \phi \cos \theta + Z_{w|w|} w|w| + Z_{q|q|} q|q| + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} \\
 + Z_{uq} uq + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp + Z_w w + Z_{uw} uw + Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s
 \end{aligned} \tag{161}$$

- Balance, o rotación sobre el eje x:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + m [y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} + ur - wp)] = \\
 (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (-z_G W + z_B B) \cos \theta \sin \phi + K_{p|p|} p|p| \\
 + K_{\dot{p}} \dot{p} + K_p p + K_{prop}
 \end{aligned} \tag{162}$$

- Cabeceo, o rotación sobre el eje y:

$$\begin{aligned}
 I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) pr + m [Z_G (\dot{u} + wq - vr) - X_G (\dot{w} + vp - uq)] = \\
 (-z_G W + z_B B) \sin \theta + (-x_G W + x_B B) \cos \theta \cos \phi + M_{w|w|} w|w| \\
 + M_{q|q|} q|q| + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{uq} uq + M_{vp} vp + M_{rp} rp + M_q q \\
 + M_{uw} uw + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s
 \end{aligned} \tag{163}$$

➤ Guiñada, o rotación sobre el eje z:

$$\begin{aligned}
I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx}) pq + m [X_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = \\
(x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - y_B B) \sin \phi + N_{v|v|} v|v| + N_{r|r|} r|r| \\
+ N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_r r + N_{ur} ur + N_{wp} wp + N_{pq} pq + N_{uv} uv + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \quad (164)
\end{aligned}$$

En las ecuaciones (162,163 y 164), como los productos de inercia son muy pequeños en comparación con los momentos de inercia I_{xx} , I_{yy} , y I_{zz} se supone que son cero.

Podemos re-escribir las ecuaciones separando los términos de aceleración, puesto que nos será de utilidad a la hora de crear el código, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
(m - X_{\dot{u}})\dot{u} + m z_G \dot{q} - m y_G \dot{r} = -(W - B) \sin \theta + X_{u|u|} u|u| + (X_{wq} - m) wq \\
+ (X_{qq} + m x_G) q^2 + (X_{vr} + m) vr + (X_{rr} + m x_G) r^2 - m y_G pq - m z_G pr + X_u u \\
+ X_{prop} \quad (165)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} - m z_G \dot{p} = (W - B) \sin \phi \cos \theta + Y_{v|v|} v|v| + Y_{r|r|} r|r| \\
+ m y_G r^2 + (Y_{ur} - m) ur + (Y_{wp} + m) wp + (Y_{pq} - m x_G) pq + Y_{uv} uv - m z_G qr \\
+ m y_G p^2 + Y_v v + Y_{uu\delta_r} u^2 \delta_r \quad (166)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - (m x_G - Z_{\dot{q}})\dot{q} + m y_G \dot{p} = (W - B) \cos \phi \cos \theta + Z_{w|w|} w|w| + Z_{q|q|} q|q| \\
+ (Z_{uq} + m) uq + (Z_{vp} - m) vp + (Z_{rp} - m x_G) rp - m y_G qr + m z_G (p^2 + q^2) + Z_{uw} uw \\
+ Z_w w + Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s \quad (167)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m y_G \dot{w} - m z_G \dot{v} + (I_{xx} - K_{\dot{p}})\dot{p} = (y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (-z_G W + z_B B) \cos \theta \sin \phi \\
+ K_{p|p|} p|p| - (I_{zz} - I_{yy}) qr + m y_G (uq - vp) - m z_G (wp - ur) + K_p p + K_{prop} \quad (168)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
mz_G \dot{u} - (mx_G - M_{\dot{w}}) \dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}}) \dot{q} = & (-z_G W + z_B B) \sin \theta + (-x_G W + \\
x_B B) \cos \theta \cos \phi + M_{w|w|} w|w| + M_{q|q|} q|q| + (M_{uq} - mx_G) uq + (M_{vp} + mx_G) vp + \\
(M_{rp} - I_{xx} + I_{zz}) rp + M_{uw} uw + mz_G (vr - wq) + M_q q + M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s
\end{aligned} \quad (169)$$

$$\begin{aligned}
(I_{zz} - N_r) \dot{r} + (mx_G - N_{\dot{v}}) \dot{v} - my_G \dot{u} = & (x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi + (y_G W - \\
y_B B) \sin \phi + N_{v|v|} v|v| + N_{r|r|} r|r| + (N_{ur} - mx_G) ur + (N_{wp} + mx_G) wp + \\
(N_{pq} - I_{yy} + I_{xx}) pq + N_{uv} uv - my_G (vr - wq) + N_r r + N_{uu\delta_r} u^2 \delta_r
\end{aligned} \quad (170)$$

5.3 – Ecuaciones del Movimiento para ROV

En este apartado se va a mostrar cómo, partiendo de las ecuaciones generales del movimiento obtenidas, se pueden adaptar al estudio de un vehículo operado por control remoto (ROV). Dado que se trata de una particularización, se elige un vehículo comercial concreto del que se han podido obtener sus principales características y coeficientes hidrodinámicos en la literatura; el VideoRay Pro III [20]. Hay que considerar una serie de características diferentes a la hora de definir sus ecuaciones, en el ROV solo se tienen cuatro grados de libertad, debido a que no posee timones en la parte de popa, solo de dos hélices traseras una que gira en sentido horario, otra en sentido contrario, y una hélice más en el plano vertical, por lo tanto sus ecuaciones se ven reducidas a los ejes X, Y, Z y el momento N, debido a esto mismo sus velocidades angulares p y q son cero. Respecto al centro de gravedad (c.d.g) y centro de carena (c.d.c), se encuentran situados en la misma vertical por lo tanto a la hora de la simulación sus valores serán cero, simplificándose así aun más las ecuaciones del movimiento que son las siguientes:

$$X = X_{u|u|} u|u| + X_u u - Y_{vr} vr - m \cdot v \cdot r + C_{tr} |n_r| + C_{tl} |n_l| \quad (171)$$

$$Y = Y_{v|v|} v|v| + Y_v v + X_{ur} ur - m \cdot u \cdot r \quad (172)$$

$$Z = Z_{w|w|} w|w| + Z_w w + C_{tv} |n_v| \quad (173)$$

$$N = N_{r|r|} r|r| + N_r r - X_{uv} uv + Y_{uv} uv + (C_{tl} |n_l| - C_{tr} |n_r|) \cdot y_{hélice} \quad (174)$$

Los valores de los coeficientes y características técnicas del ROV se pueden consultar en las tablas (30) y (40 a 43) de los Apéndices A y B respectivamente.

5.4 – Integración Numérica de las Ecuaciones del Movimiento

Las ecuaciones diferenciales no lineales que definen las aceleraciones del UUV (165 a 170), y las ecuaciones cinemáticas (17 y 22) permiten obtener las aceleraciones del UUV en los diferentes sistemas de referencia. Dada la alta complejidad y no linealidad de las ecuaciones, se utiliza la integración numérica para obtener la velocidad y la posición del UUV en función del tiempo.

Se puede considerar que para cada intervalo de tiempo, podemos expresar lo siguiente:

$$\dot{x} = f(x_n, u_n) \quad (175)$$

donde x es el vector de estado o condiciones iniciales y viene dado por:

$$x = [u \ v \ w \ p \ q \ r \ x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (176)$$

u_n es el vector de entrada y viene definido por:

$$u_n = [\delta_s \ \delta_r \ X_{prop} \ K_{prop}]^T \quad (177)$$

y \dot{x} es la derivada del vector de estado en función del tiempo. A continuación se puede definir el método de integración utilizado.

5.5 – Método de Integración Numérica Runge-Kutta

Este método mejora la precisión de la aproximación haciendo un promedio de la pendiente mediante cuatro puntos. En primer lugar, calculamos lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= x_n + f(x_n, u_n) \\
 k_2 &= f\left(x + \frac{\Delta t}{2} k_1, u_{n+\frac{1}{2}}\right) \\
 k_3 &= f\left(x + \frac{\Delta t}{2} k_2, u_{n+\frac{1}{2}}\right) \\
 k_4 &= f(x + \Delta t k_3, u_{n+1})
 \end{aligned}
 \tag{178}$$

donde el vector de entrada interpolado es:

$$u_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (u_n + u_{n+1}) \tag{179}$$

Combinamos las ecuaciones anteriores para obtener:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{177}$$

Este es un método de integración explícito que reúne las condiciones de rapidez y precisión necesarias para las maniobras que se pretenden simular, por lo tanto será el utilizado en el código de MATLAB.

5.6 – Simulación por ordenador

Como ya se describió en la introducción del capítulo, vamos a utilizar MATLAB para la aproximación numérica. El código consta de una función que calcula para cada instante de tiempo o iteración las fuerzas y momentos del AUV, como una función de la velocidad y de la posición del AUV. Estas fuerzas determinan las aceleraciones lineares y angulares del AUV. Estas aceleraciones se utilizan para aproximar las nuevas velocidades del AUV que se convierten en las entradas para la próxima iteración, y así sucesivamente.

El código del AUV requiere dos entradas:

- Las condiciones iniciales, o el vector de estado para esas condiciones.
- Las variables de control de las aletas, los ángulos del timón de popa dados en forma de vector y la variable de control de la fuerza de propulsión, en su caso.

5.6.1 – Condiciones Iniciales para la simulación

Las condiciones iniciales de nuestro vehículo son:

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
z_G	1,96 e -002	m	Posición vertical del centro de gravedad
u	1,54 e +000	m/s	Velocidad de avance
ϕ	-5,00 e +000	grados	Ángulo de balance

Tabla 25 Condiciones Iniciales de simulación REMUS 100

La velocidad de avance es de 1,54 m/s, (3 nudos) es la velocidad de funcionamiento del AUV con su hélice girando a 1500 RPM. El ángulo de balance es el necesario para compensar el par ejercido por la hélice, consiguiendo así que nuestro vehículo se mantenga estable. El resto de los ángulos, velocidades angulares y velocidades lineales se introdujeron como cero, ya que se supone que eran pequeños.

5.6.2 – Maniobra en el Plano Horizontal

A continuación se muestran los distintos resultados de la simulación del AUV REMUS 100 en una maniobra en el plano horizontal, la cual consiste en que el vehículo navegue durante diez segundos en línea recta, a continuación se le introducen cuatro grados (+4°) de timón durante 30 segundos y, acto seguido, cuatro grados de timón negativos (-4°) durante 30 segundos. Estos resultados los vamos a comparar con Prestero [1], para validar nuestro modelo matemático y nuestras ecuaciones.

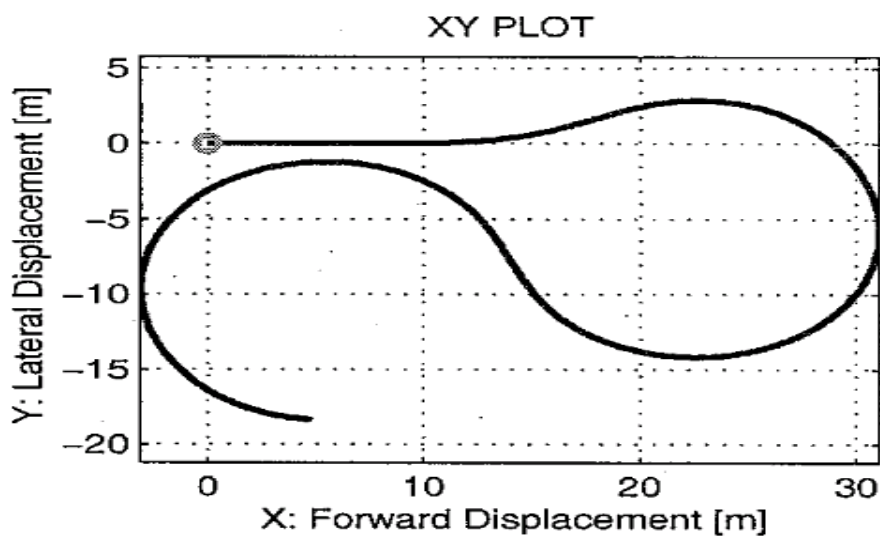


Figura 29 Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)

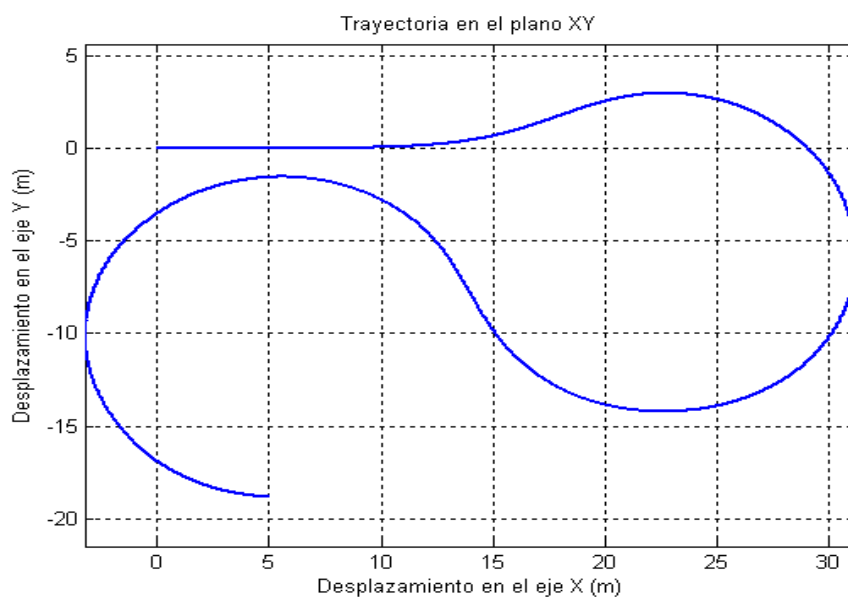


Figura 30 Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Horizontal

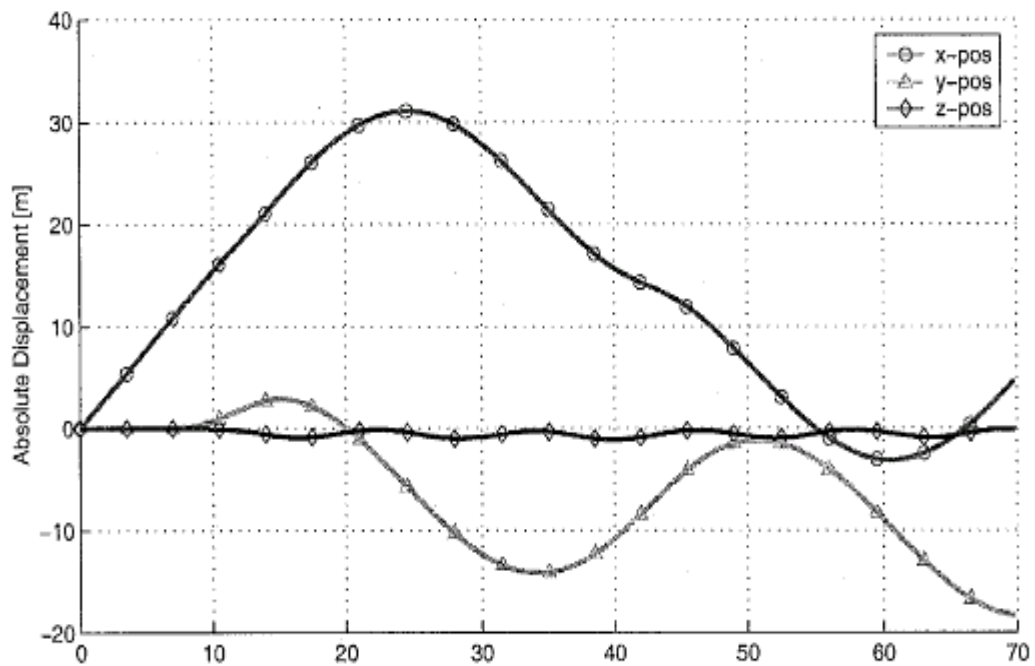


Figura 31 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Presterio)

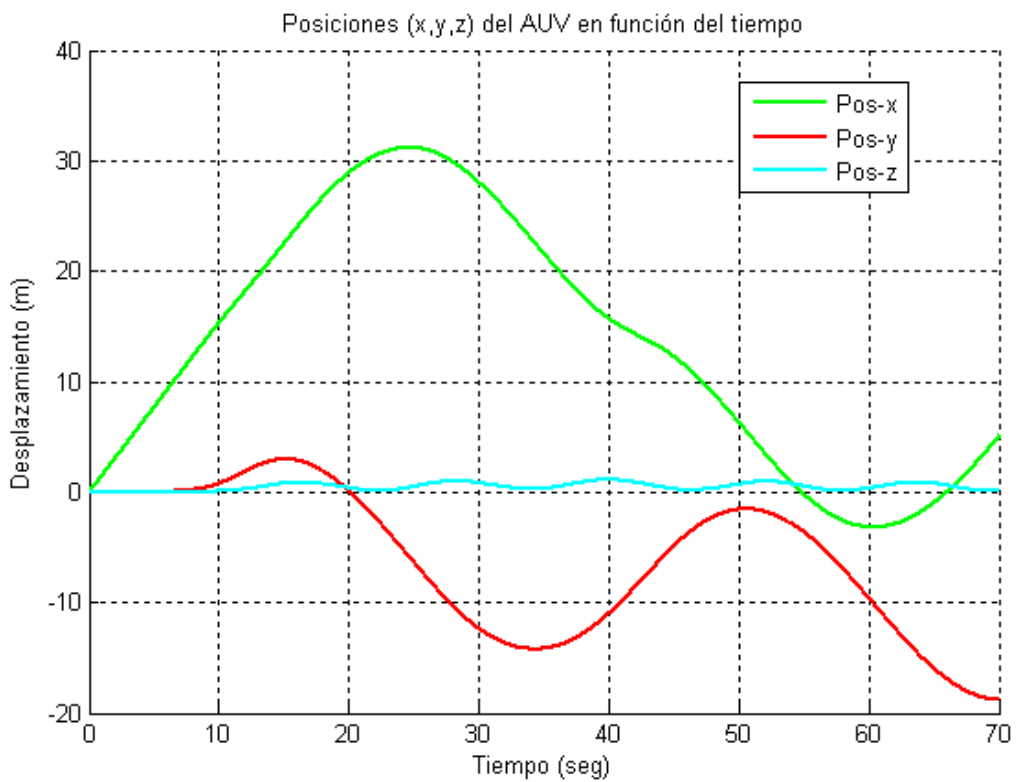


Figura 32 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Horizontal

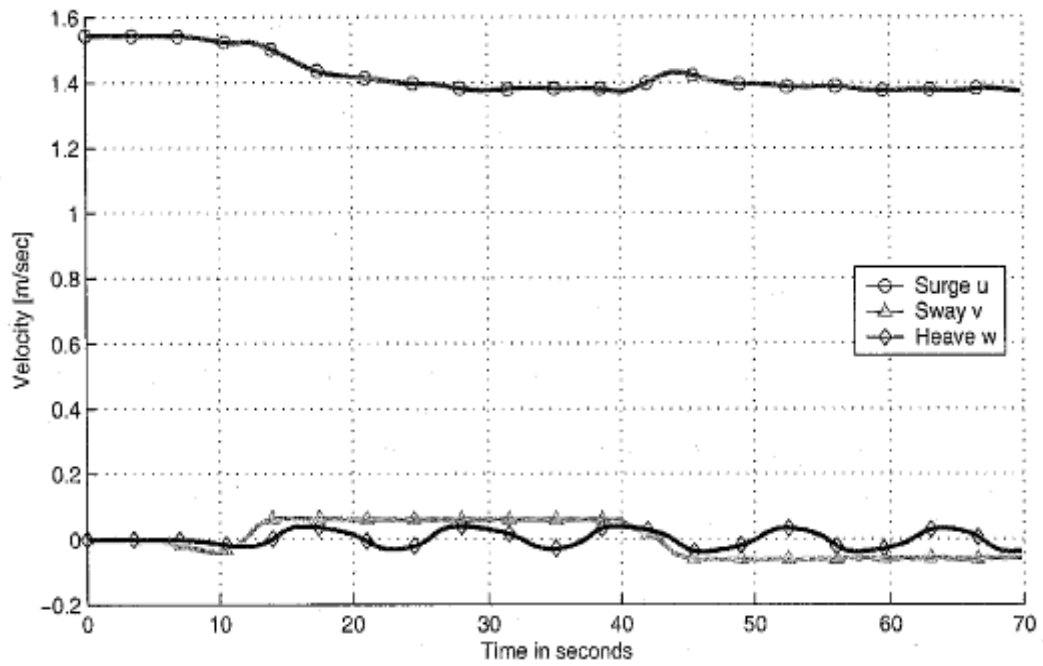


Figura 33 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Prestero)

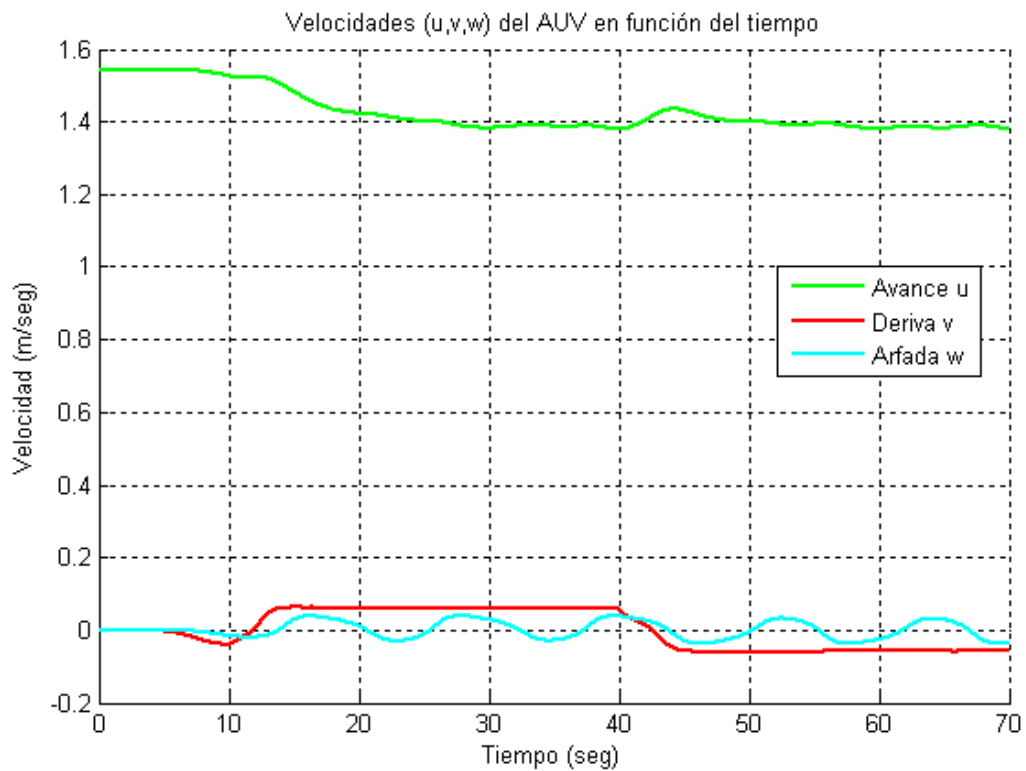


Figura 34 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Horizontal

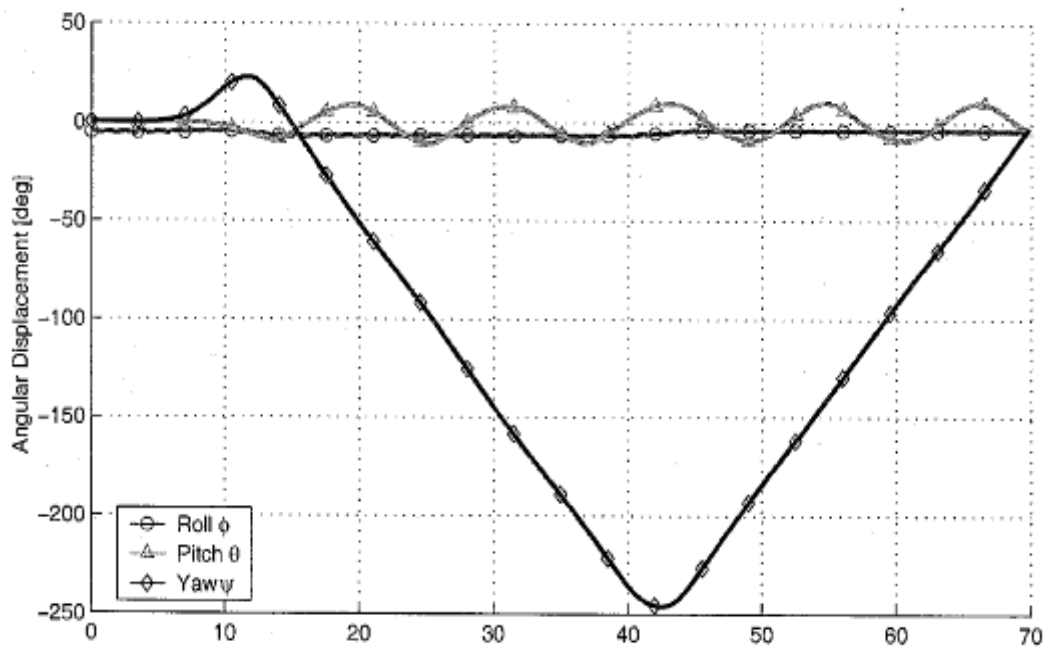


Figura 35 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Presterio)

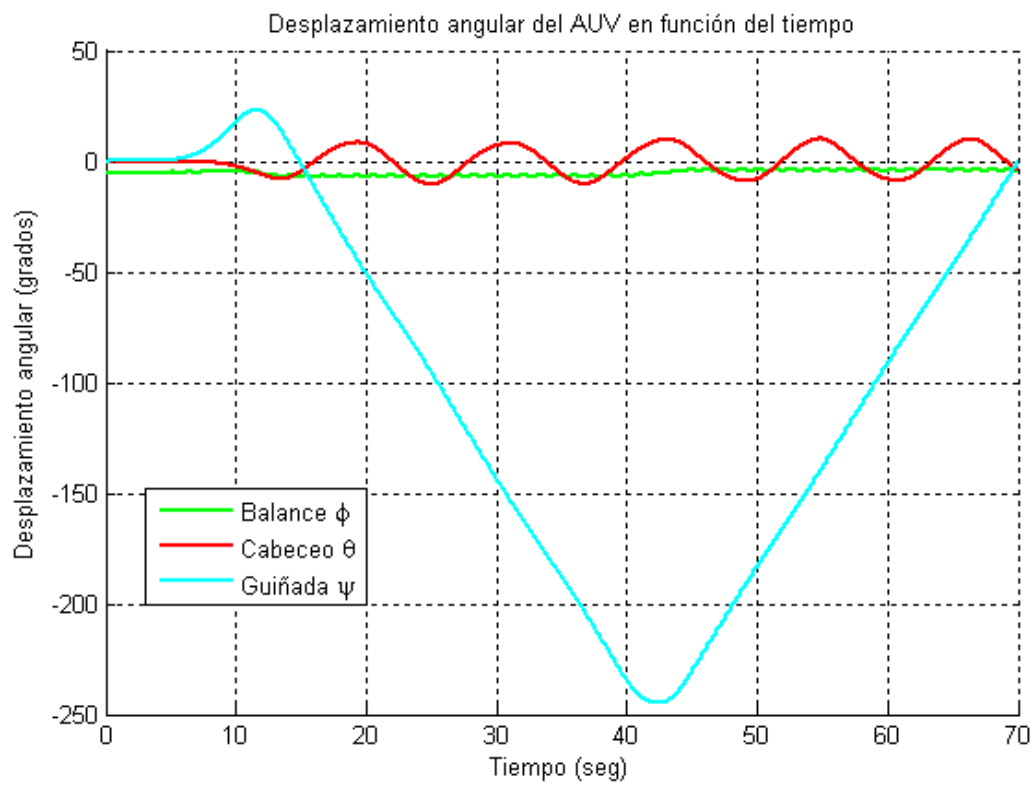


Figura 36 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal

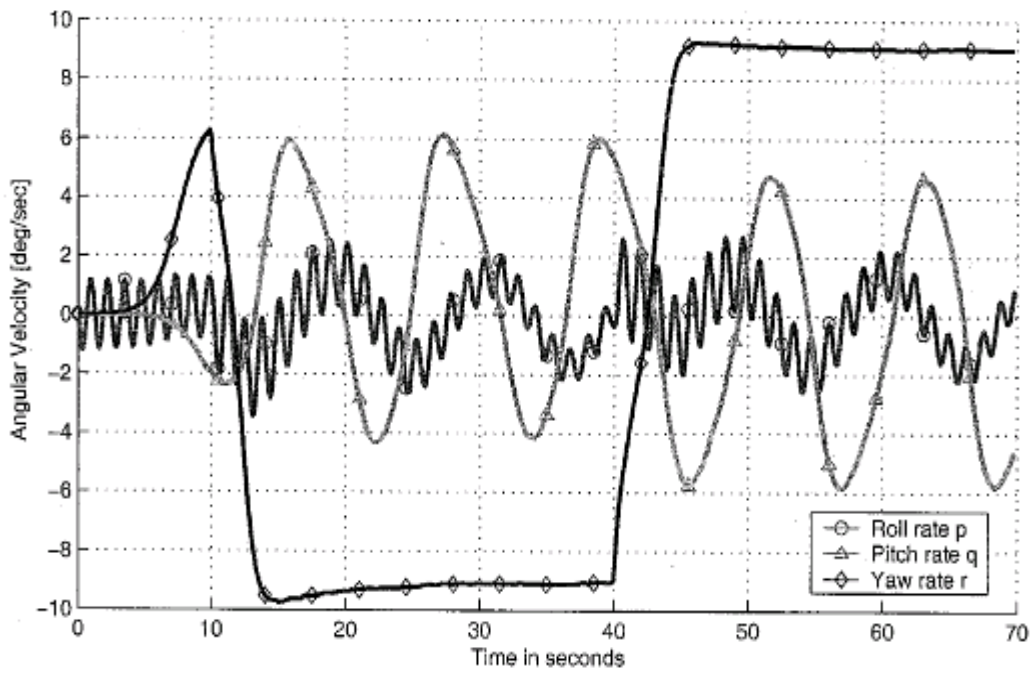


Figura 37 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Presterro)

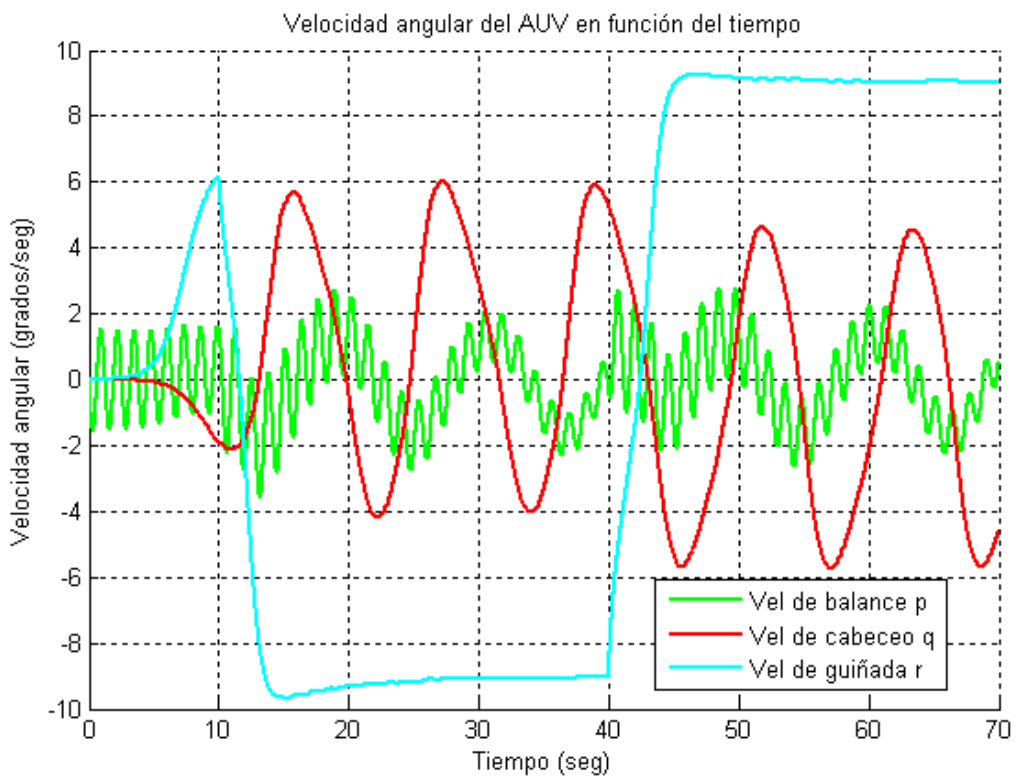


Figura 38 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Horizontal

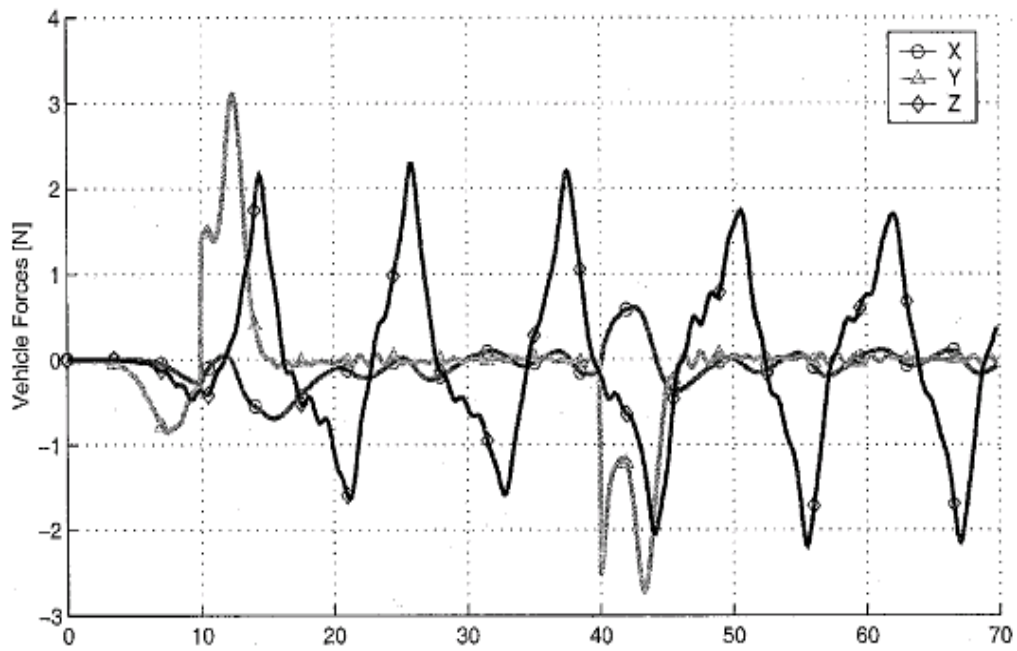


Figura 39 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Horizontal (Pretero)

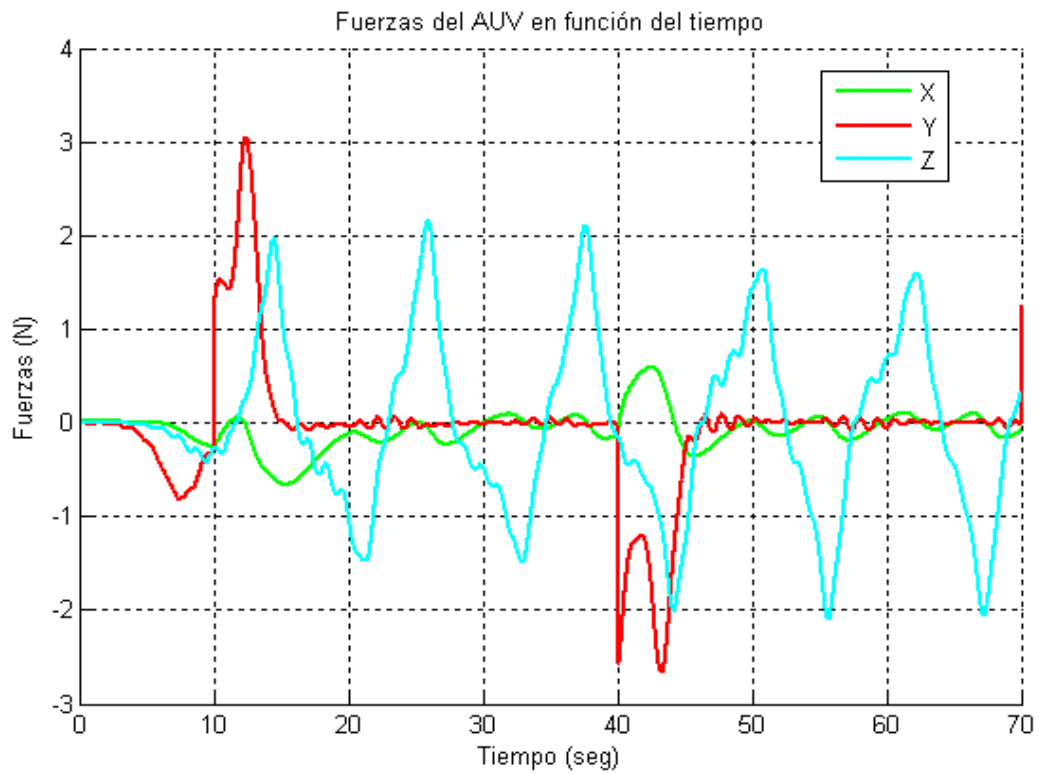


Figura 40 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Horizontal

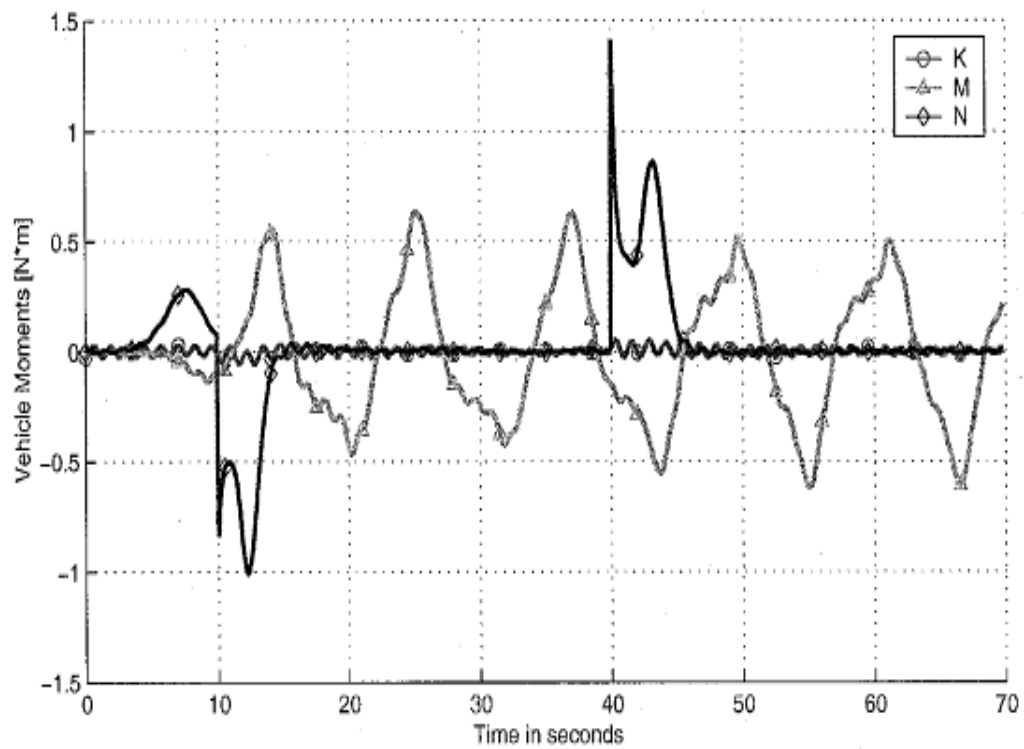


Figura 41 Momentos del REMUS 100 en el Plano Horizontal

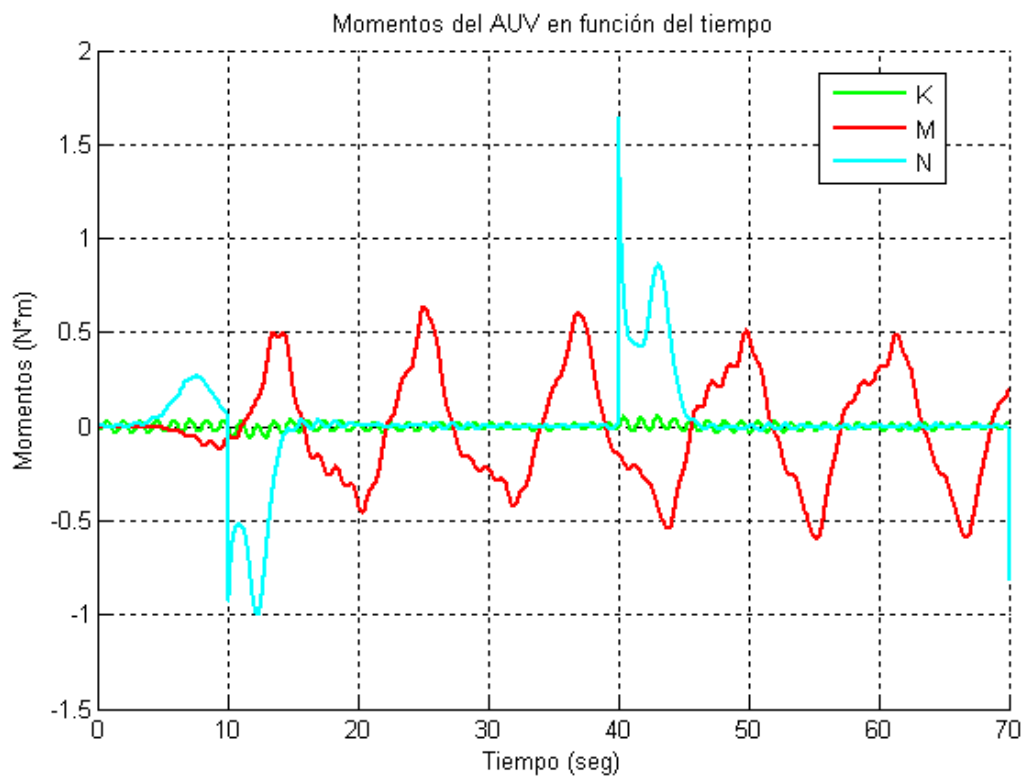


Figura 42 Momentos del REMUS 100 en el Plano Horizontal

En los resultados obtenidos para la maniobra en el Plano Horizontal, el vehículo responde a los comandos introducidos, es decir, varía su posición al introducirle cierto ángulo de timón hacia una banda, recupera y vuelve a cambiar su posición hacia el otro lado. También se puede observar que las gráficas cumplen con lo representado en la maniobra en el caso de las fuerzas y los momentos (Figuras 39 y 41), quizás lo que más llama la atención sea los picos de estas en los instantes de tiempo en los cuales varía el timón tanto a una banda como a la otra. Sin embargo, las trayectorias que teóricamente debería seguir el vehículo se ven afectadas por fuerzas inerciales que no se pueden contrarrestar de forma inmediata.

5.6.3 – Maniobra en el Plano Vertical

A continuación se muestran los distintos resultados de la simulación del AUV REMUS 100 en una maniobra en el plano vertical (hacia abajo), la cual consiste en que nuestro vehículo navegue durante dos segundos con un ángulo de timón de buceo de cero grados (0°), a continuación se le introducen ocho grados positivos ($+8^\circ$) de timón de buceo durante otros dos segundos. Se procede a realizar una comparativa de nuestros resultados con los de Prestero [1], para validar el modelo matemático y las ecuaciones del movimiento en esta maniobra. También los compararemos con los resultados de la misma maniobra pero teniendo en cuenta los coeficientes de amortiguamiento lineal, haciendo así un estudio de sensibilidad de este coeficiente en la simulación de la maniobra.

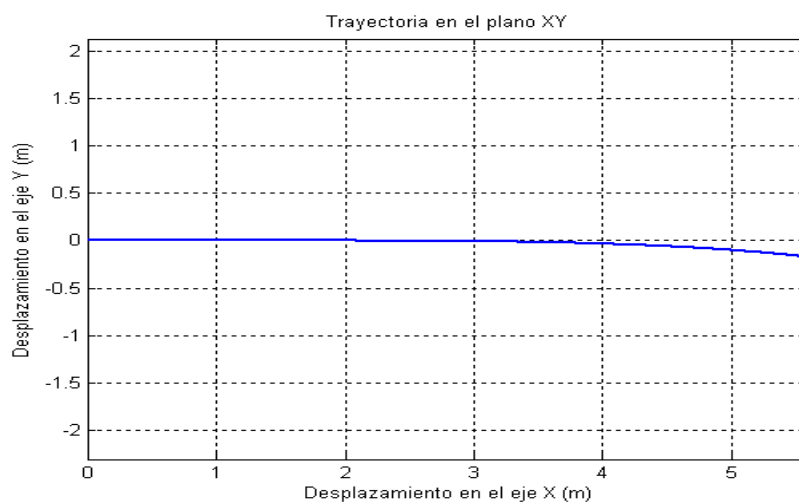


Figura 43 Trayectoria del REMUS 100 en el Plano Vertical

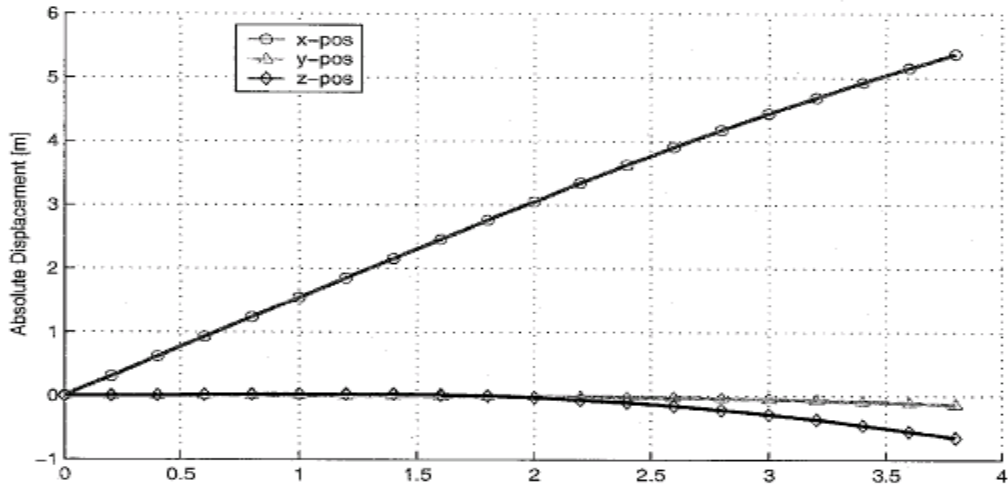


Figura 44 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

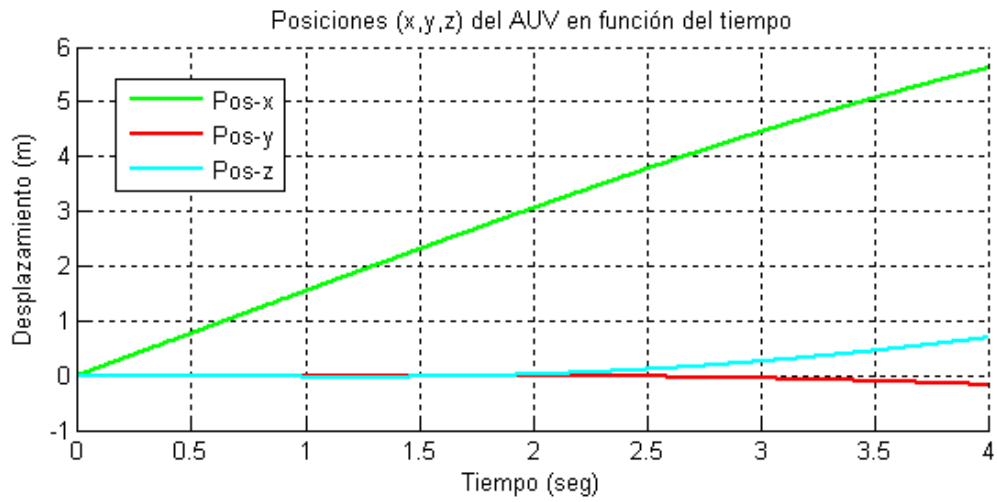


Figura 45 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

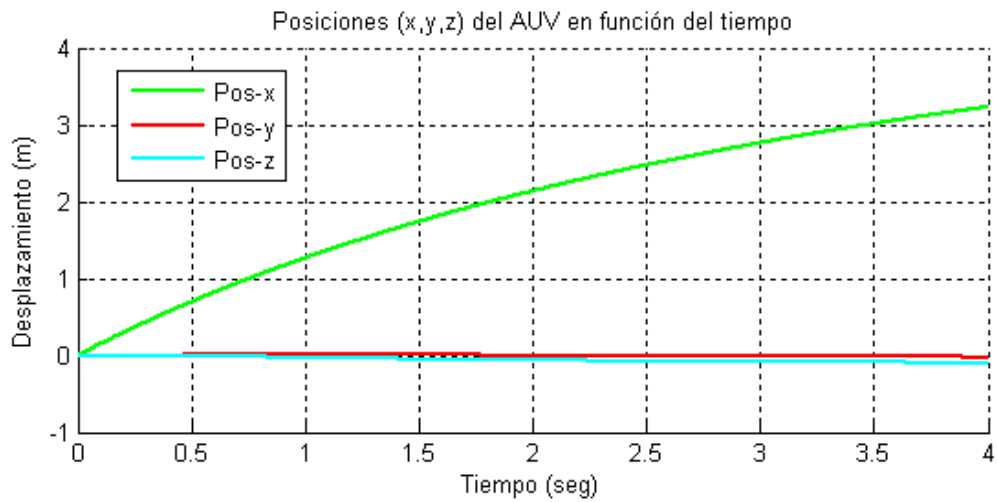


Figura 46 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

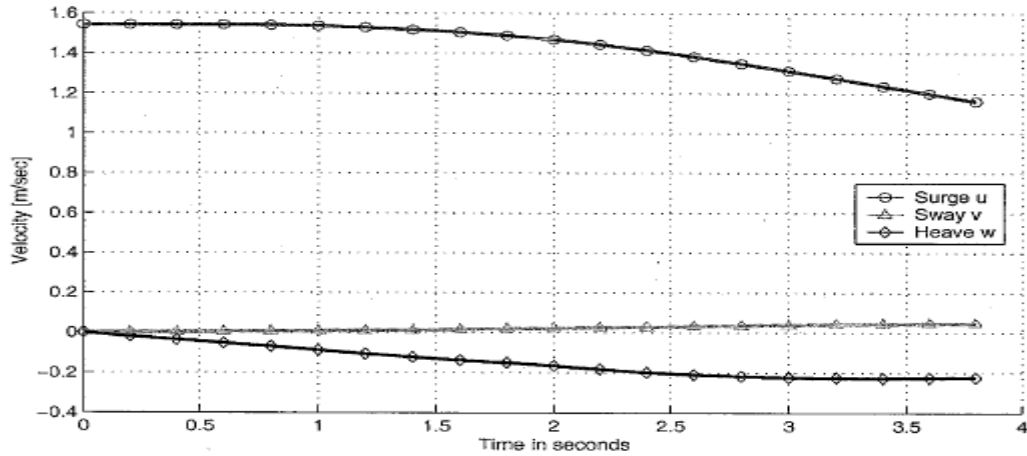


Figura 47 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

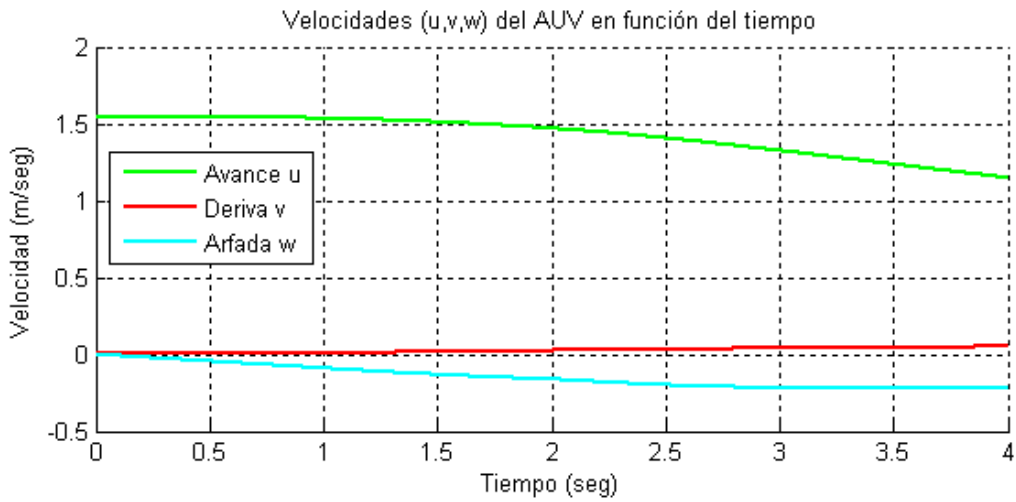


Figura 48 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

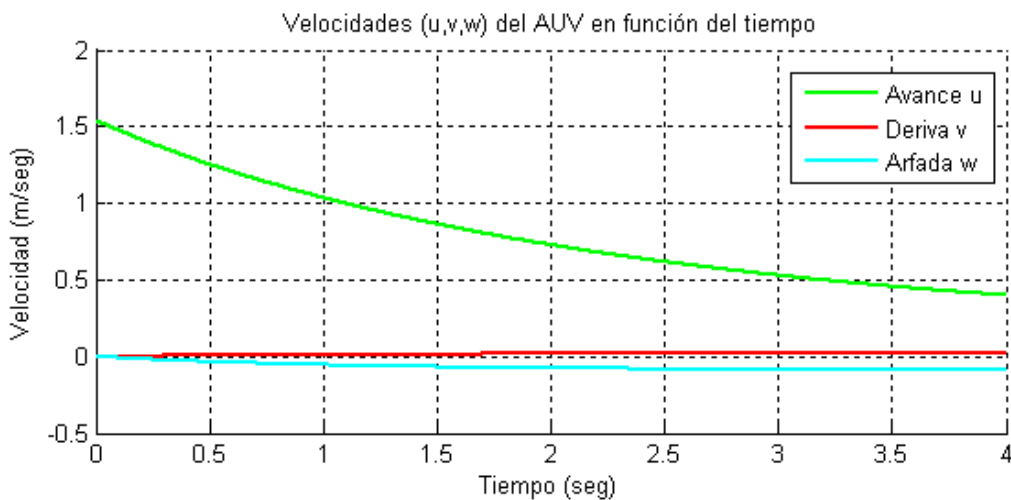


Figura 49 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

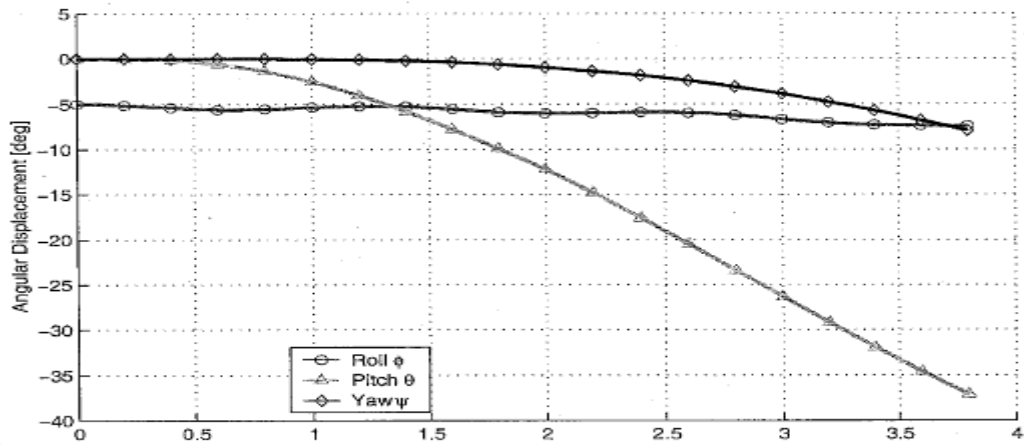


Figura 50 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

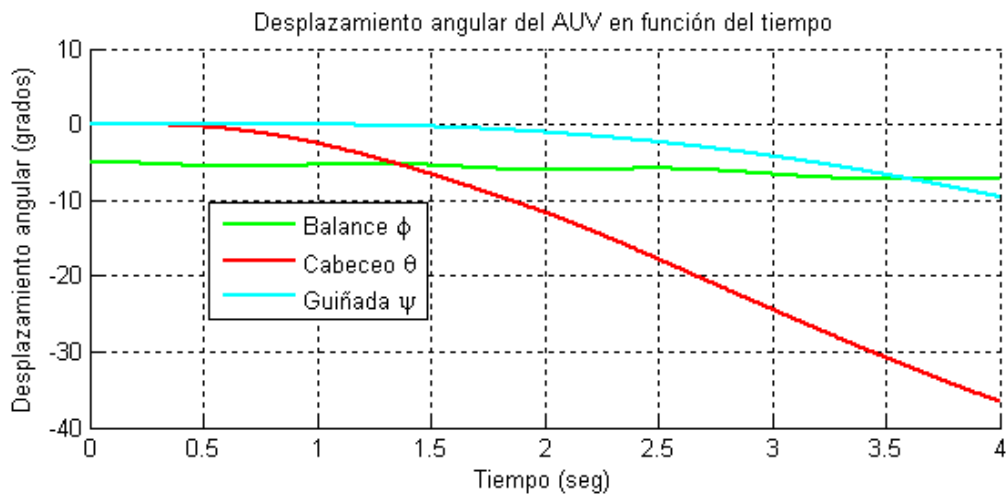


Figura 51 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

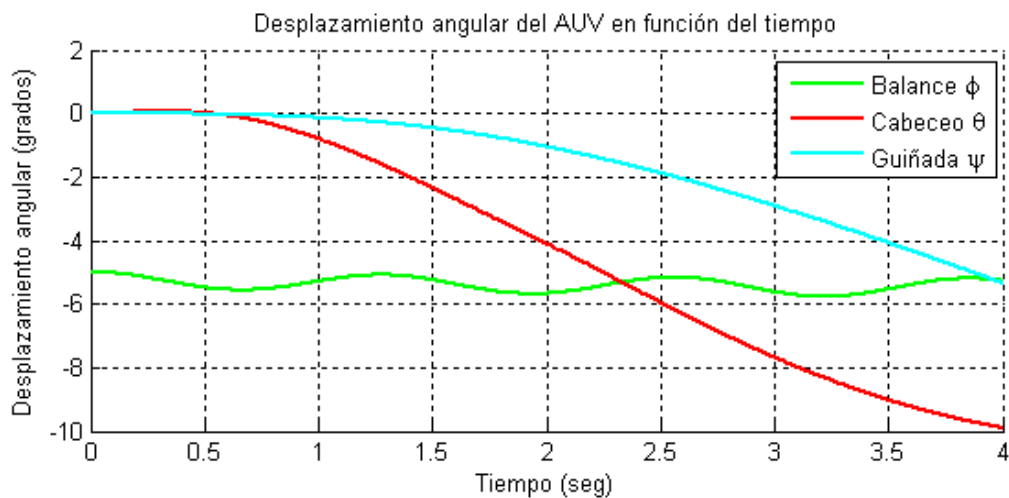


Figura 52 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

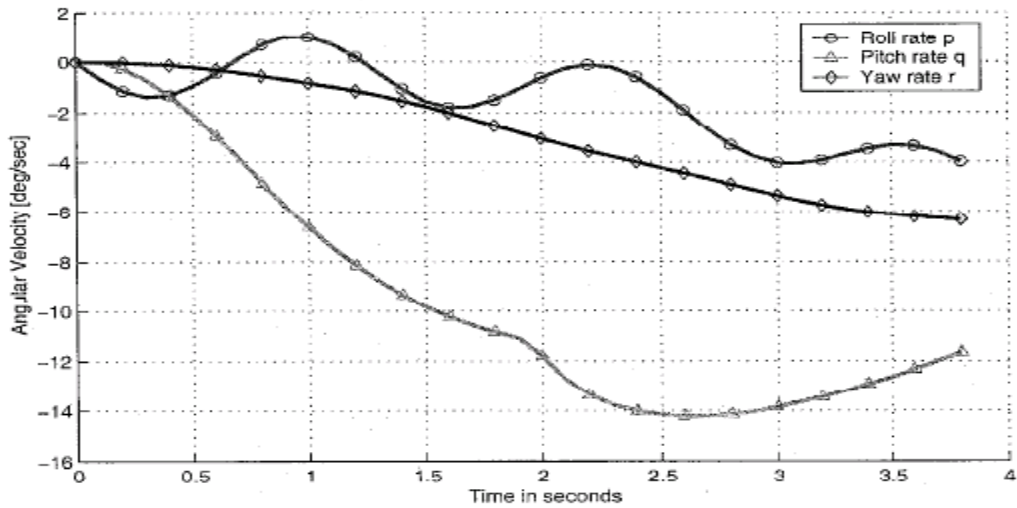


Figura 53 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)

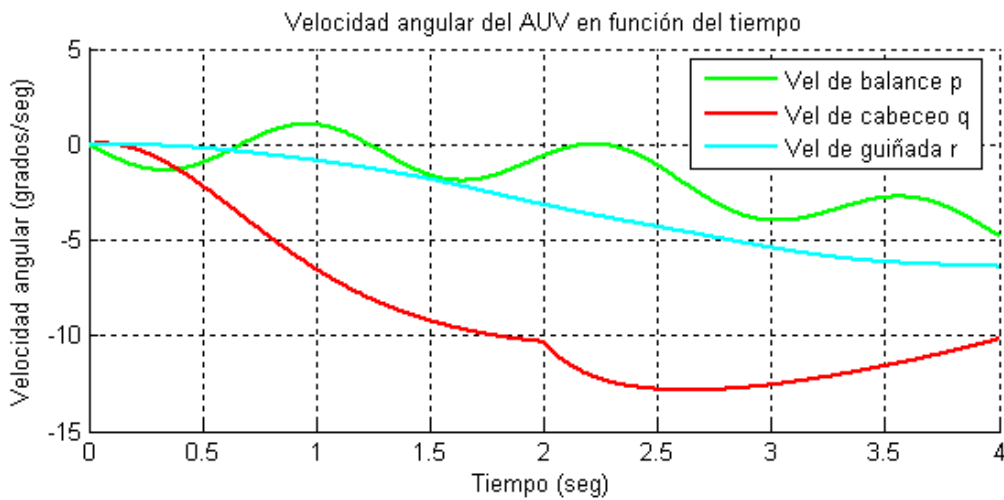


Figura 54 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

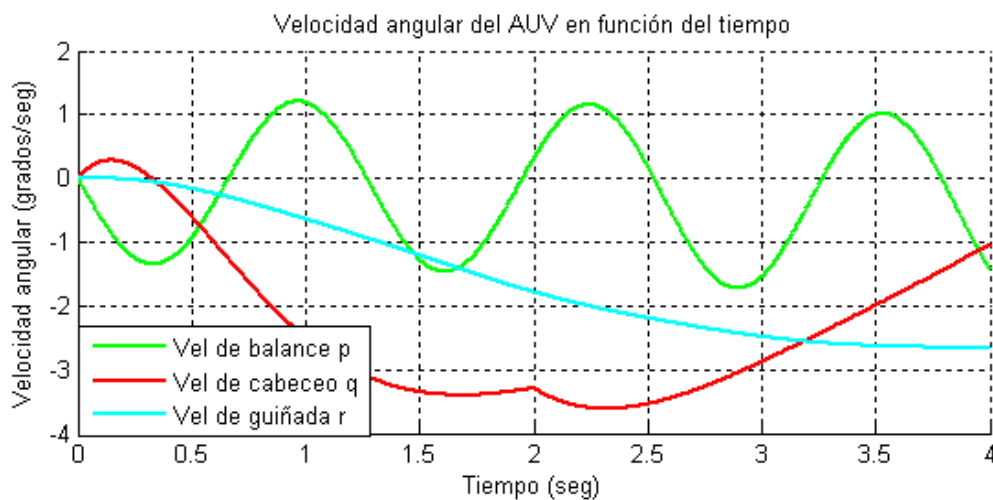


Figura 55 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

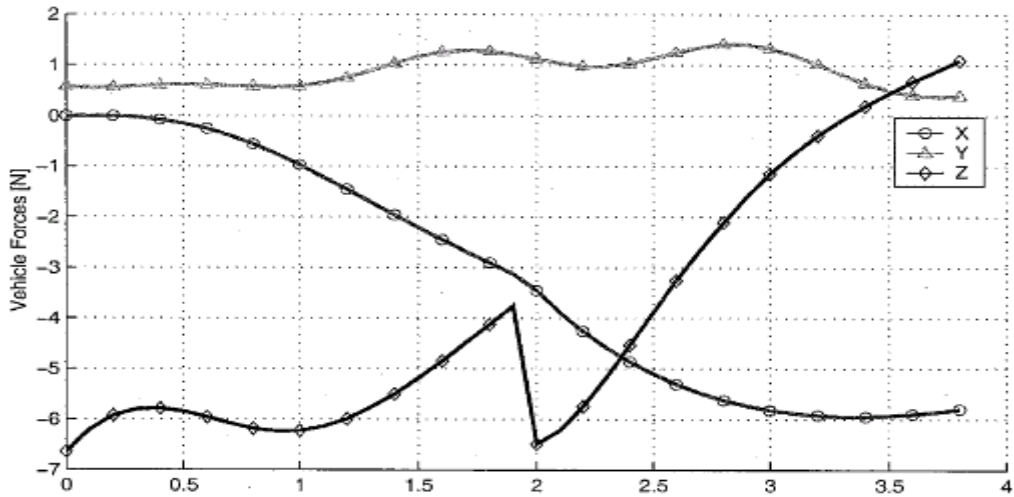


Figura 56 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

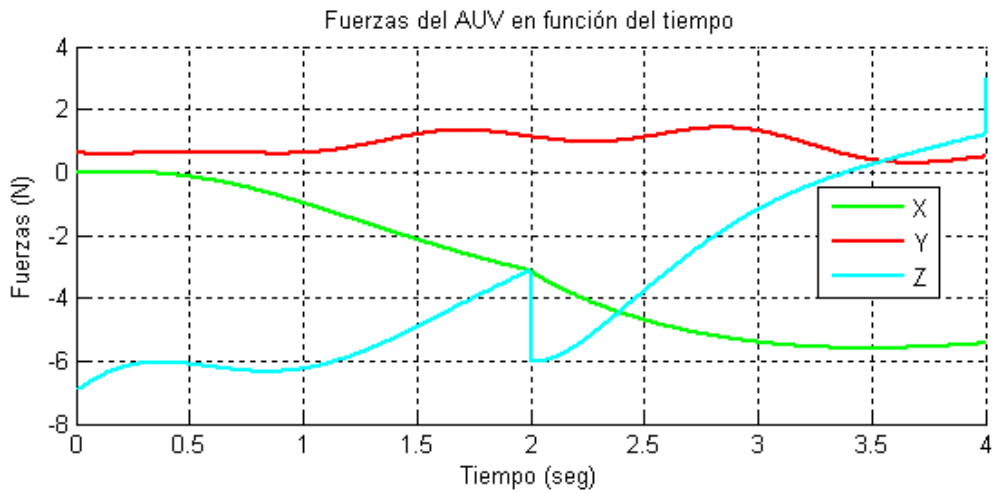


Figura 57 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

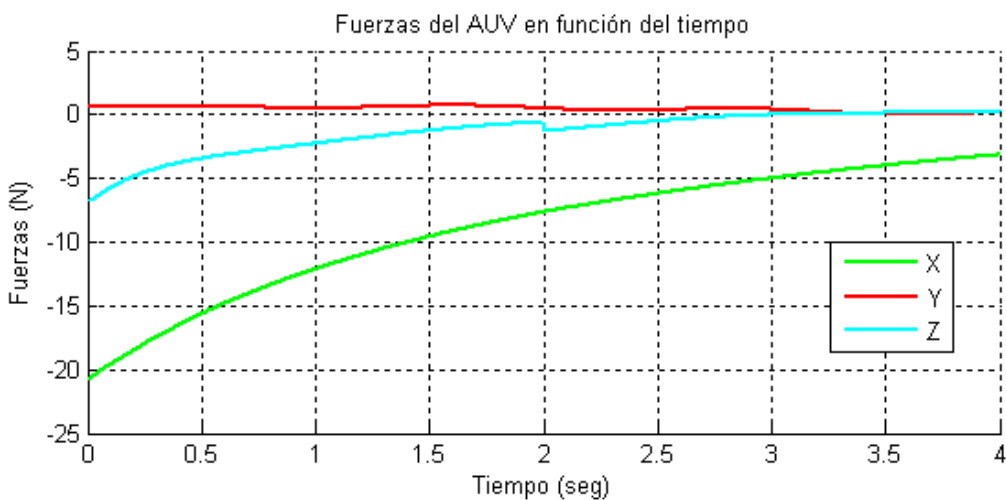


Figura 58 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

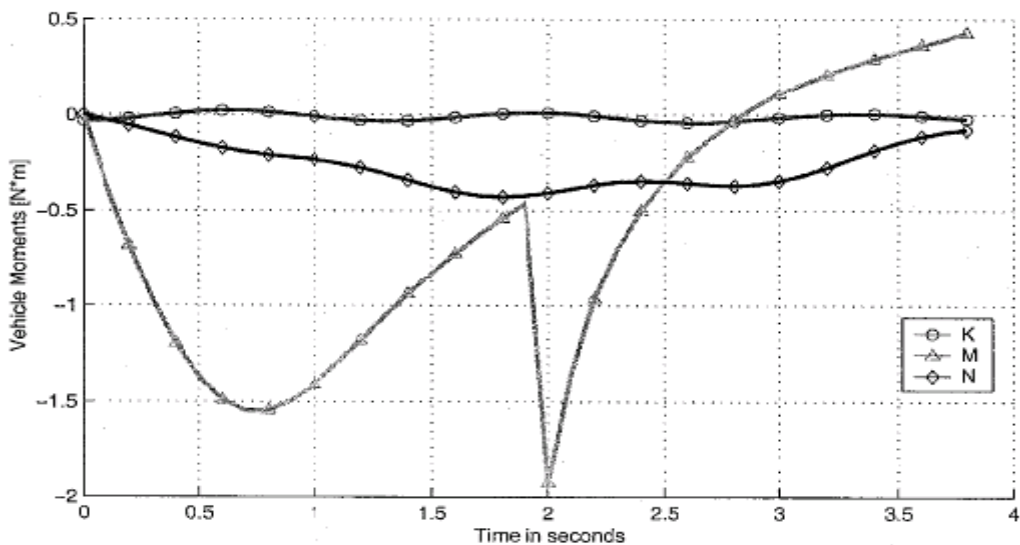


Figura 59 Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)

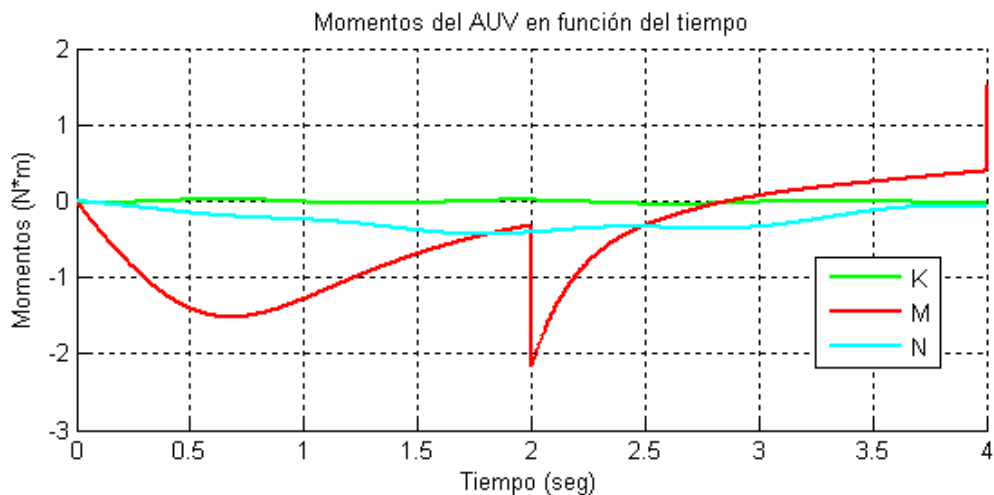


Figura 60 Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Cuadrático)

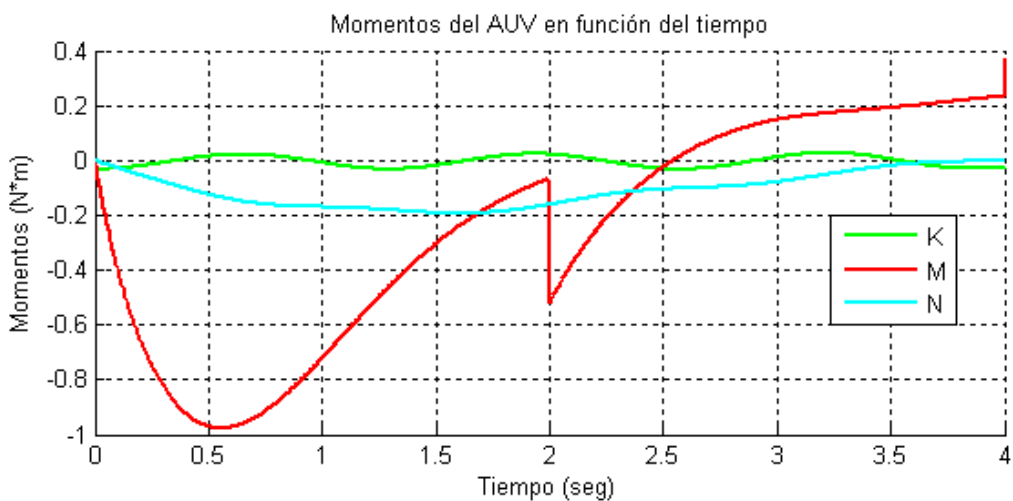


Figura 61 Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Amortiguamiento Lineal)

En el Plano Vertical también se obtienen resultado satisfactorios, observando las gráficas de las fuerzas y momentos (Figuras 57 y 60) se puede apreciar el cambio sufrido en el eje Z así como su momento M a los dos segundos cuando se le dice que cambie su ángulo de los timones de buceo con respecto a la horizontal. Respecto a la sensibilidad del coeficiente de amortiguamiento lineal hidrodinámico frente al cuadrático podemos decir que si que influye en la maniobra sobre todo el valor de las fuerzas.

A continuación se van a comparar los resultados obtenidos por Prestero [1] en la maniobra vertical (hacia abajo), con los obtenidos en nuestra simulación pero cambiando el valor del coeficiente Z_{ww} de $-1,31e^2$ a $-1,31e^3$ el cual según Prestero [1], corrige los resultados obtenidos teóricamente con los resultados experimentales.

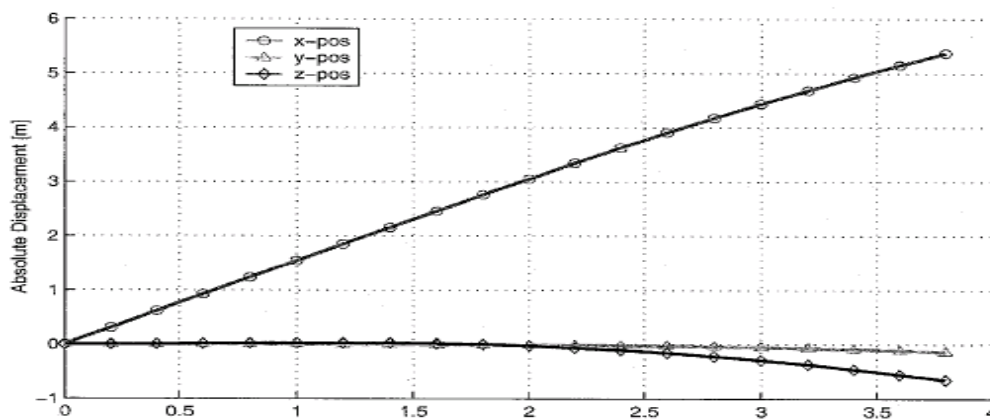


Figura 62 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestero)

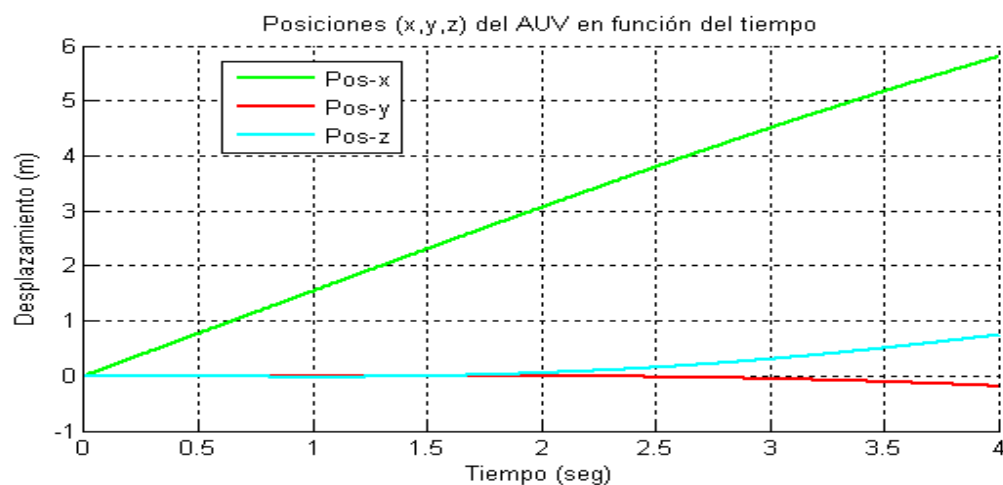


Figura 63 Desplazamientos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)

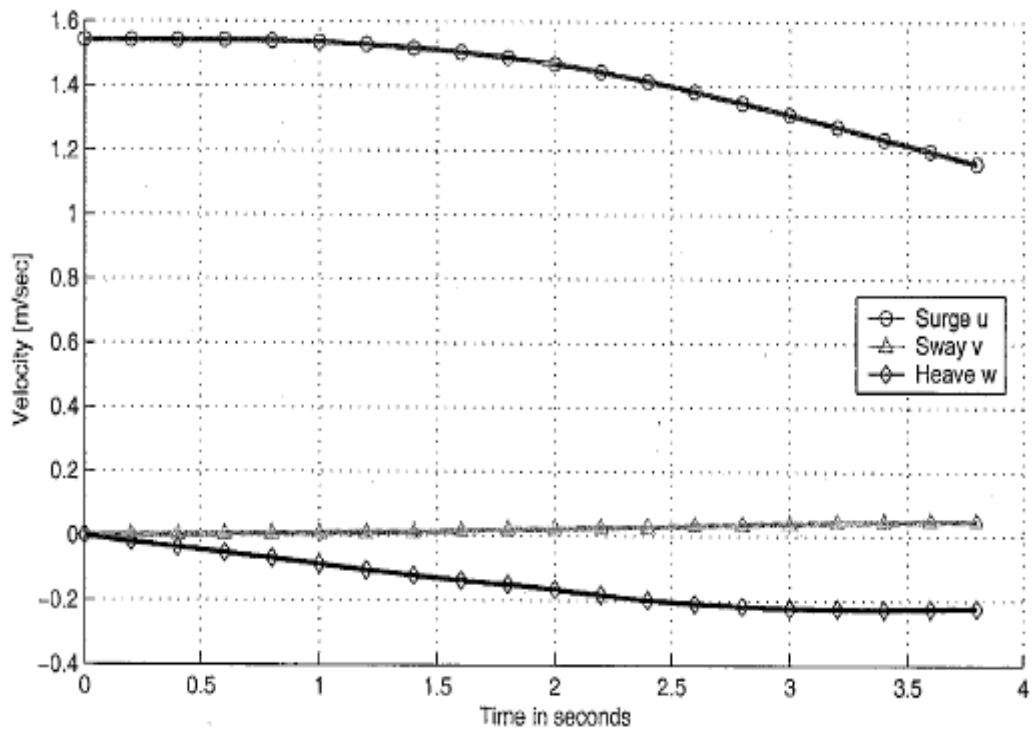


Figura 64 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

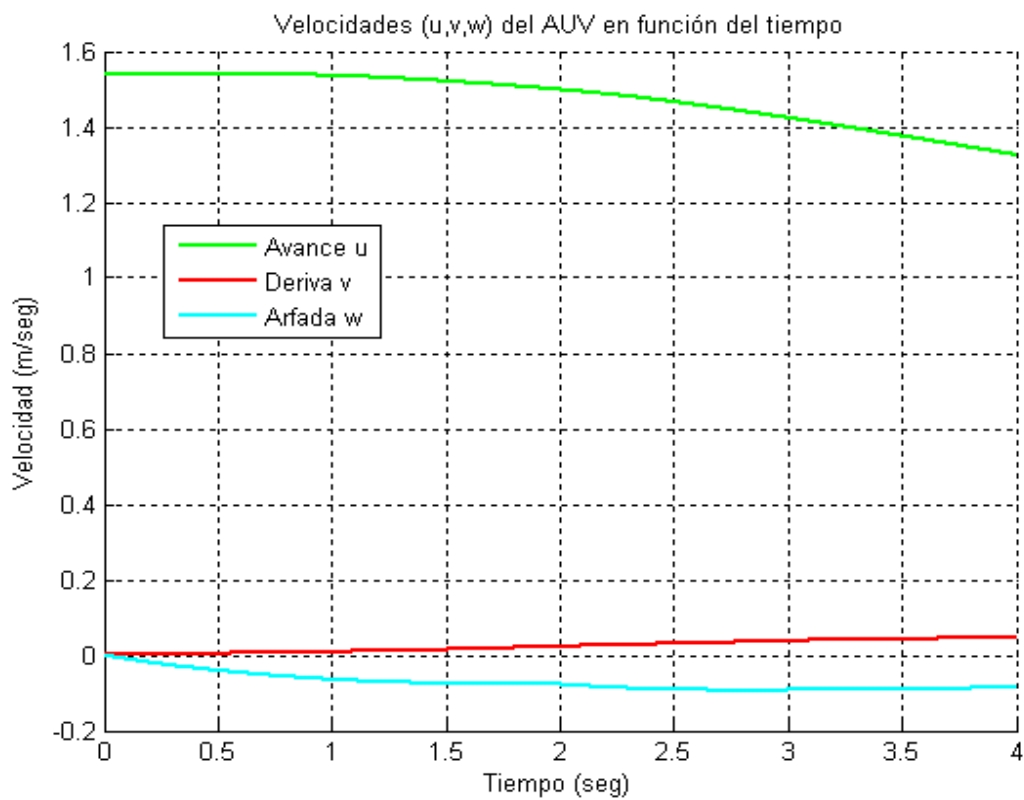


Figura 65 Velocidades del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)

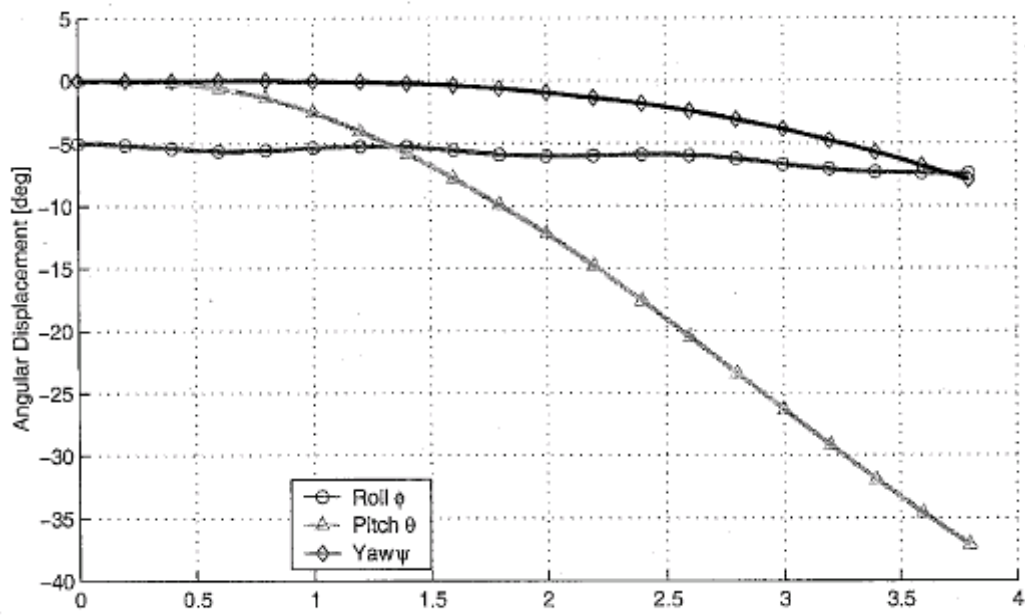


Figura 66 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

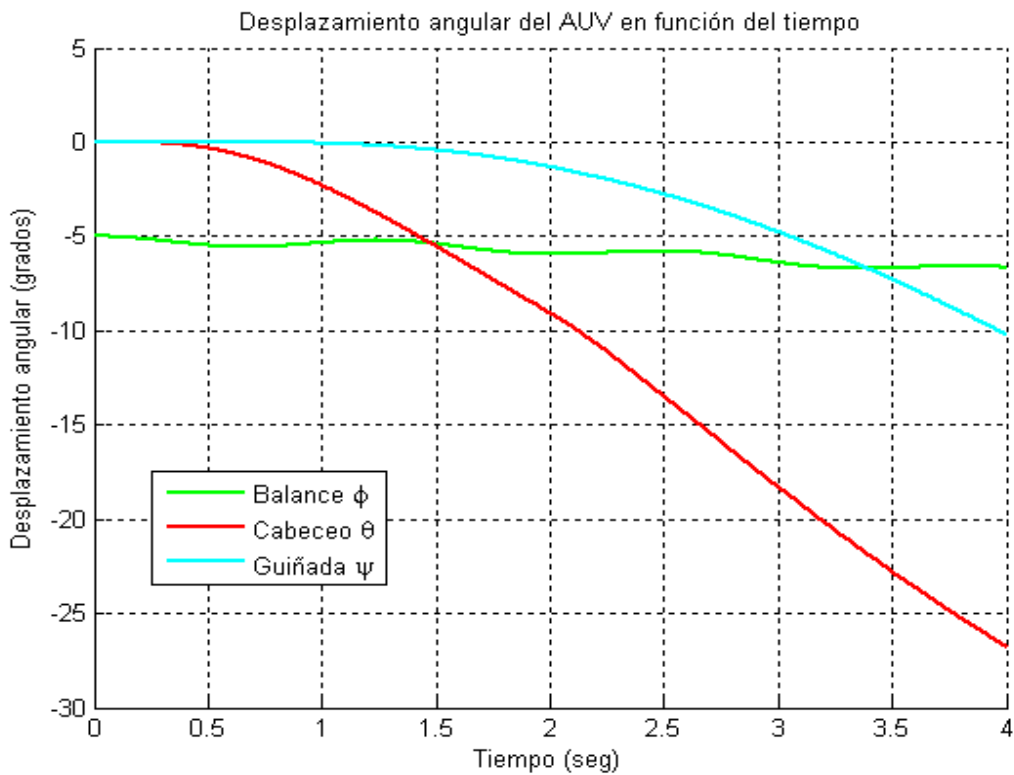


Figura 67 Desplazamientos Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)

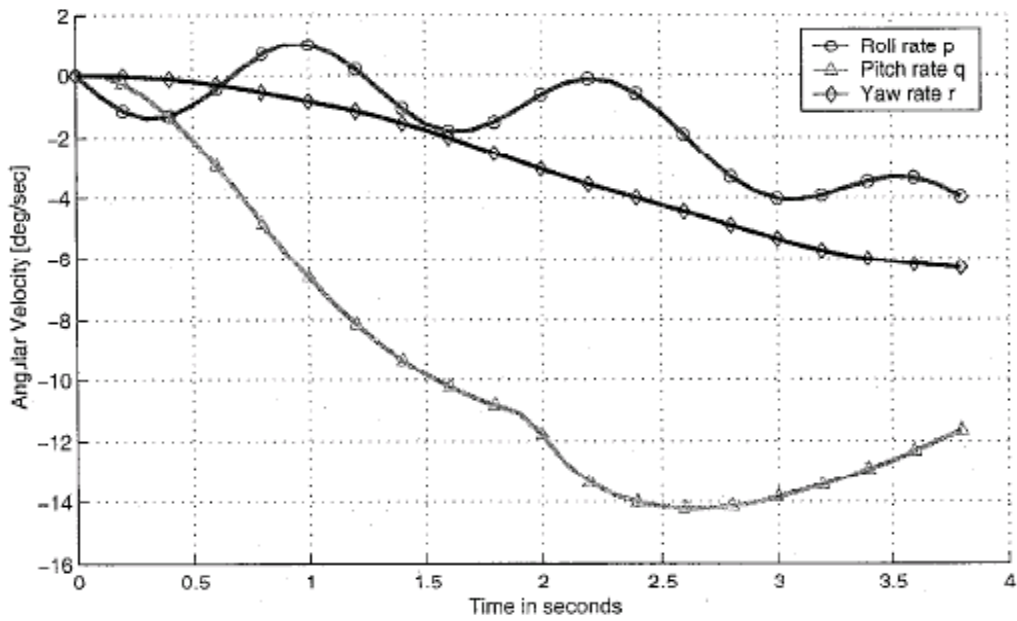


Figura 68 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prestro)

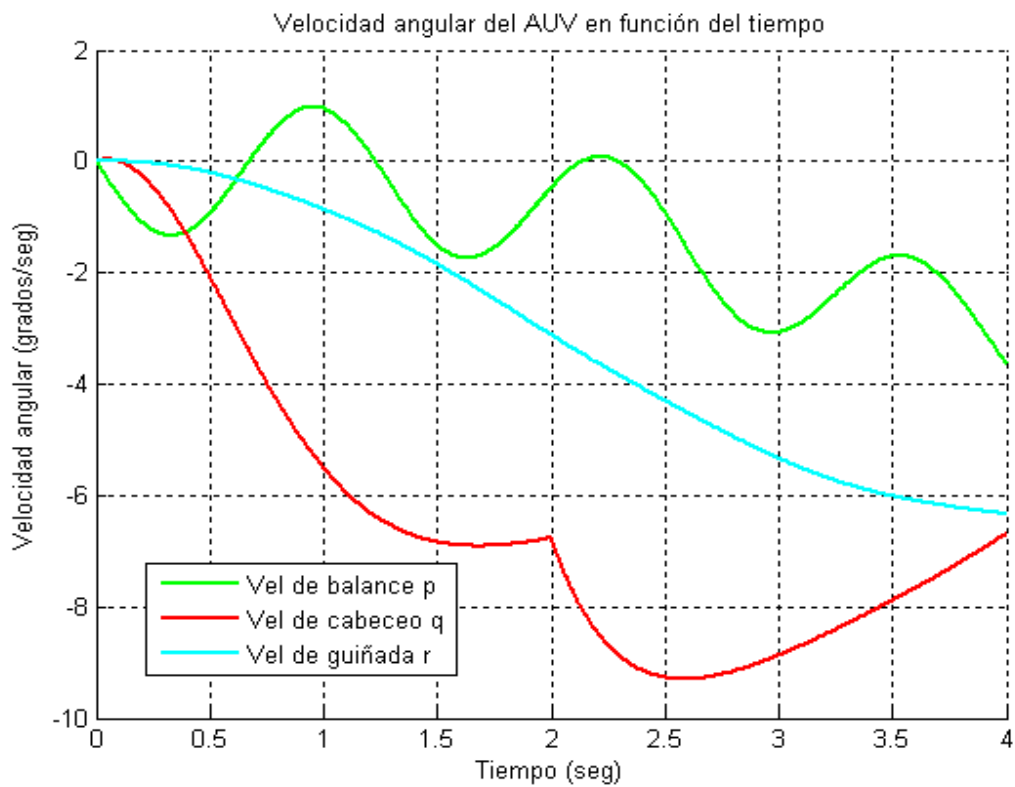


Figura 69 Velocidades Angulares del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)

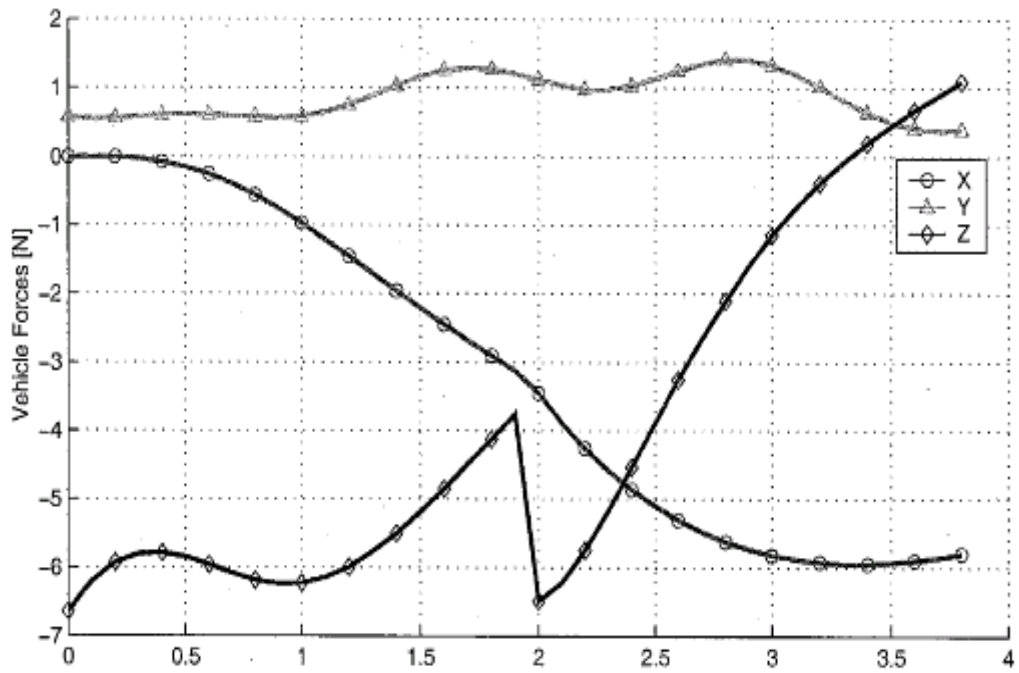


Figura 70 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Presterio)

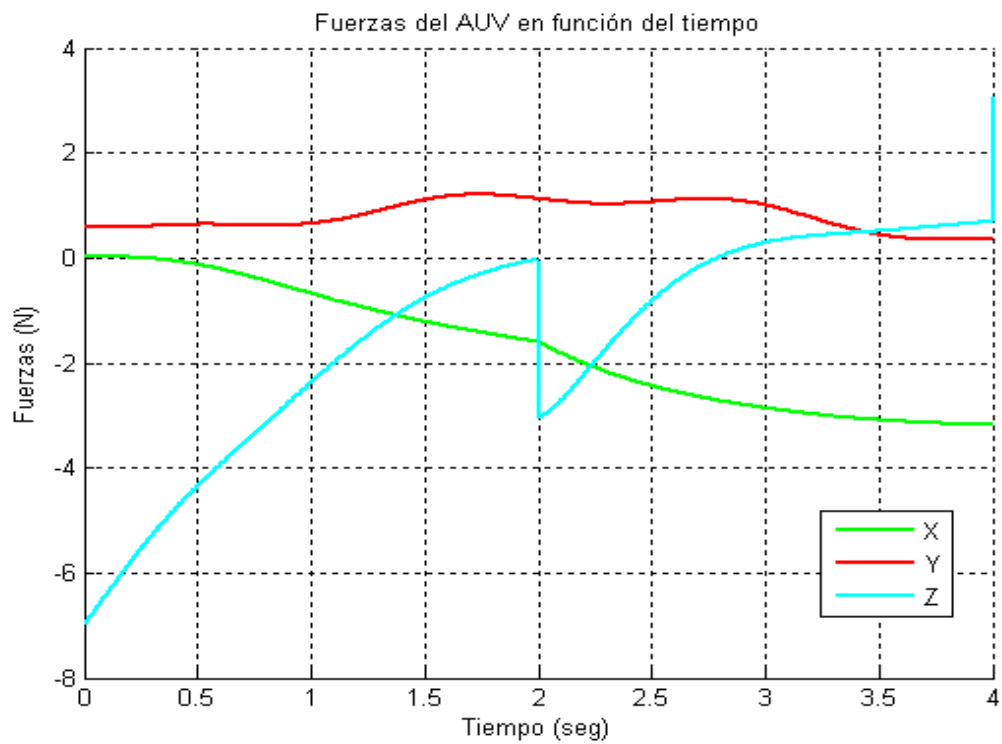


Figura 71 Fuerzas del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Zww)

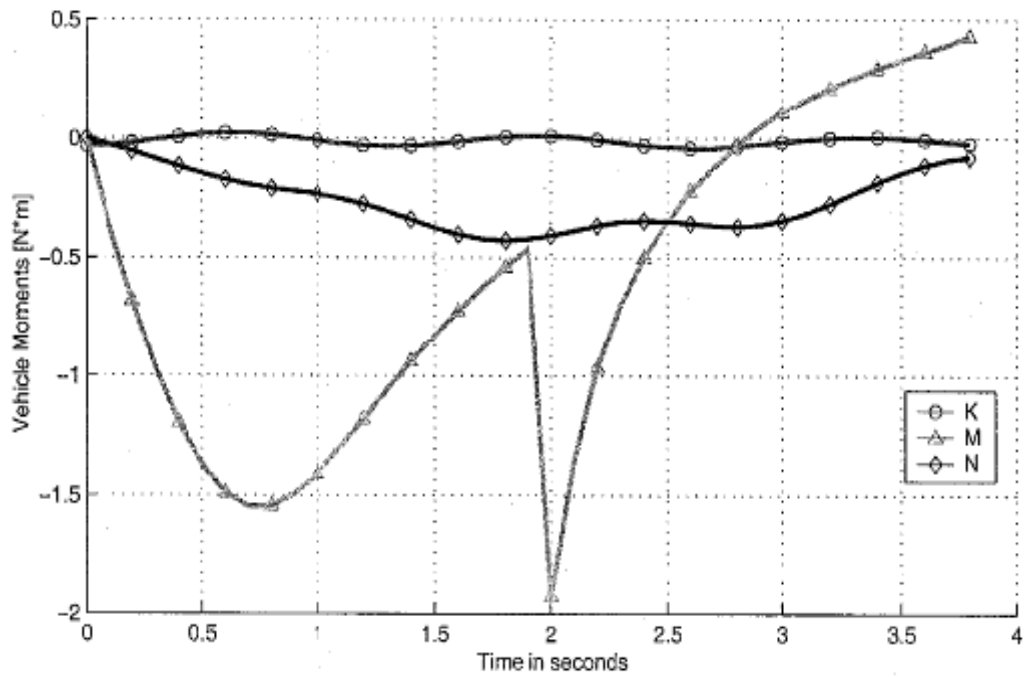


Figura 72 Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Prester)

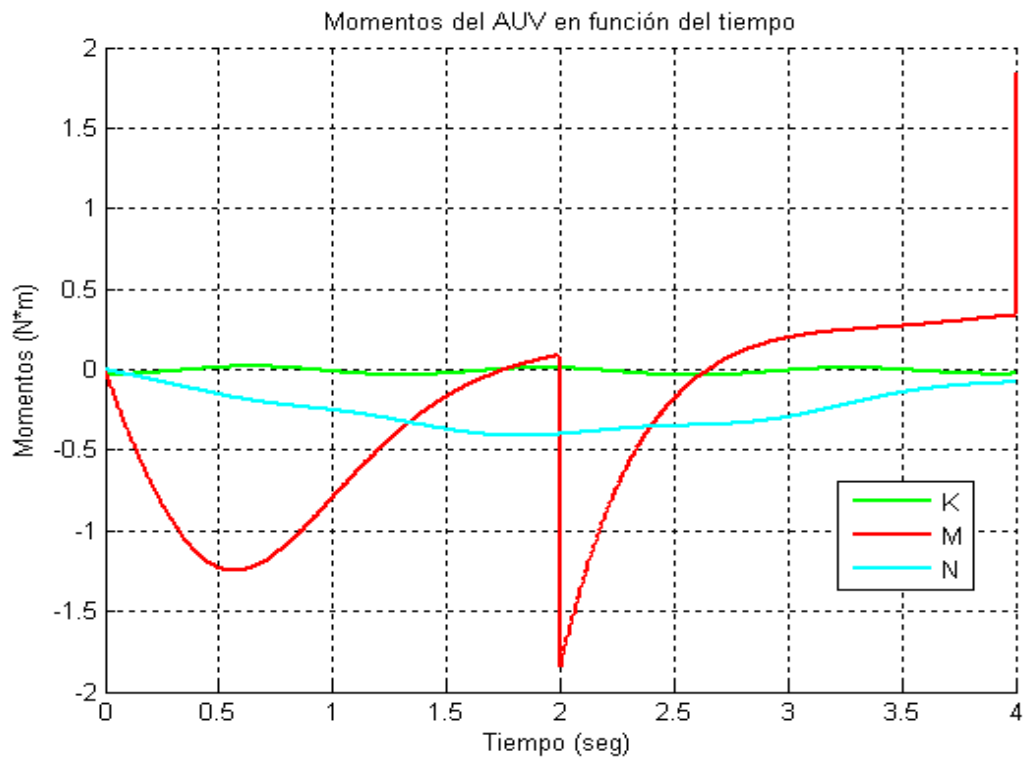


Figura 73 Momentos del REMUS 100 en el Plano Vertical (Cambio de Z_{ww})

Analizando las gráficas llegamos a la conclusión de que el cambio de valor del coeficiente Z_{ww} , no afecta demasiado a la maniobra solo en el caso de las fuerzas (Figura 71) se aprecia un cambio en la componente Z, por lo tanto, hay una discrepancia entre la bibliografía consultada y los resultados reales.

5.6.4 – Maniobra de Turning Circle o Círculo de Evolución

Esta maniobra se realiza principalmente para el cálculo del radio de giro constante del vehículo y comprobar lo bien que responde el vehículo al cambio de trayectoria. También se utiliza para calcular las medidas estándar de maniobrabilidad como diámetro táctico, avance y transferencia, como se muestra en la figura 74.

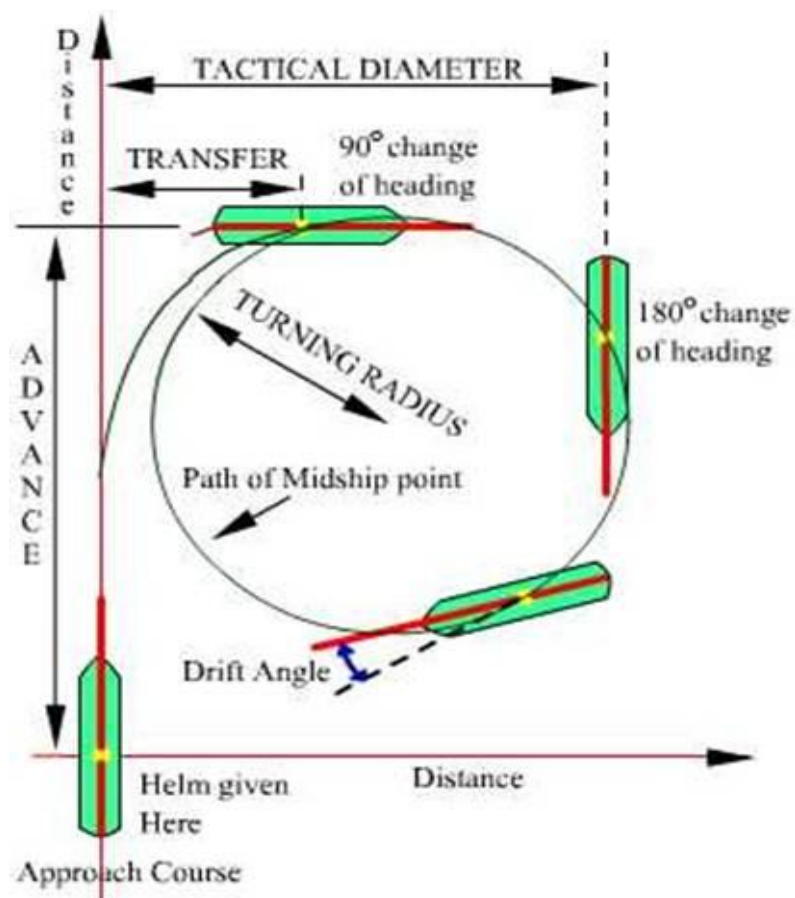


Figura 74 Turning Circle para un ángulo de timón constante

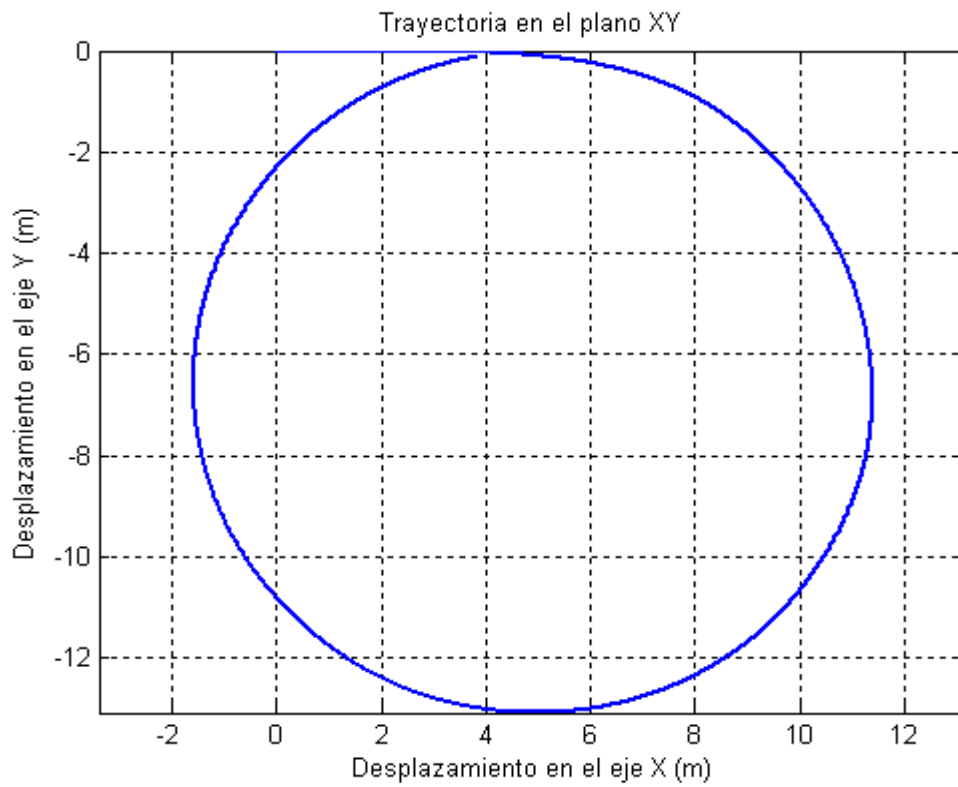


Figura 75 Trayectoria del REMUS 100 en Turning Circle

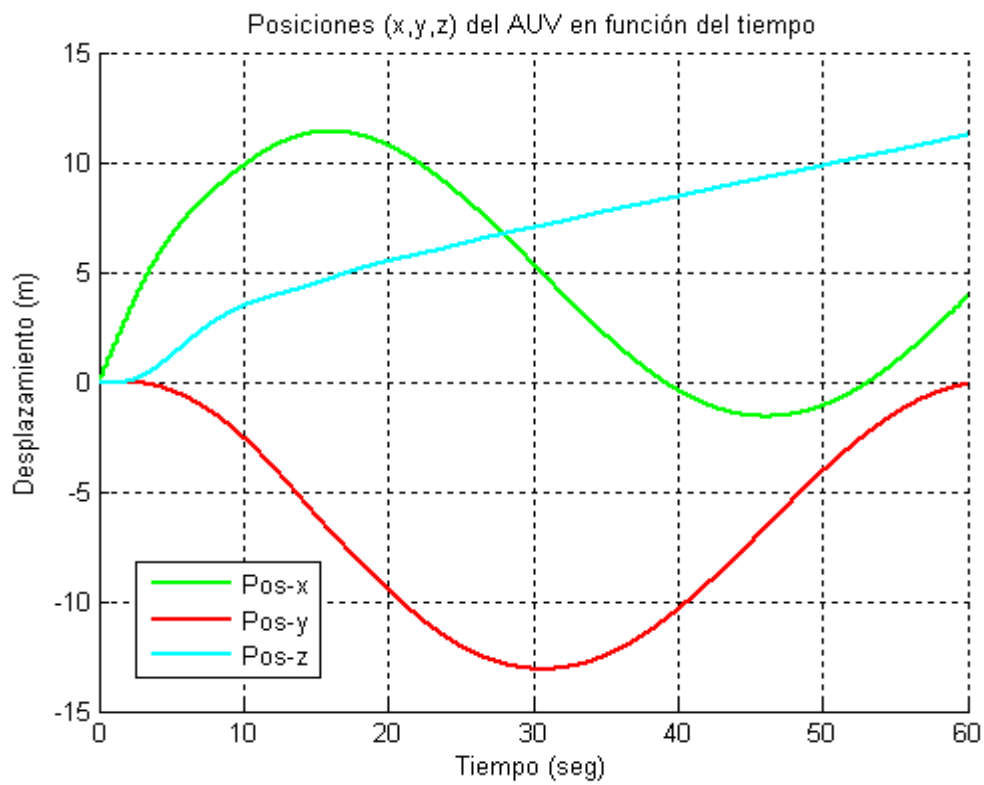


Figura 76 Desplazamientos del REMUS 100 en Turning Circle

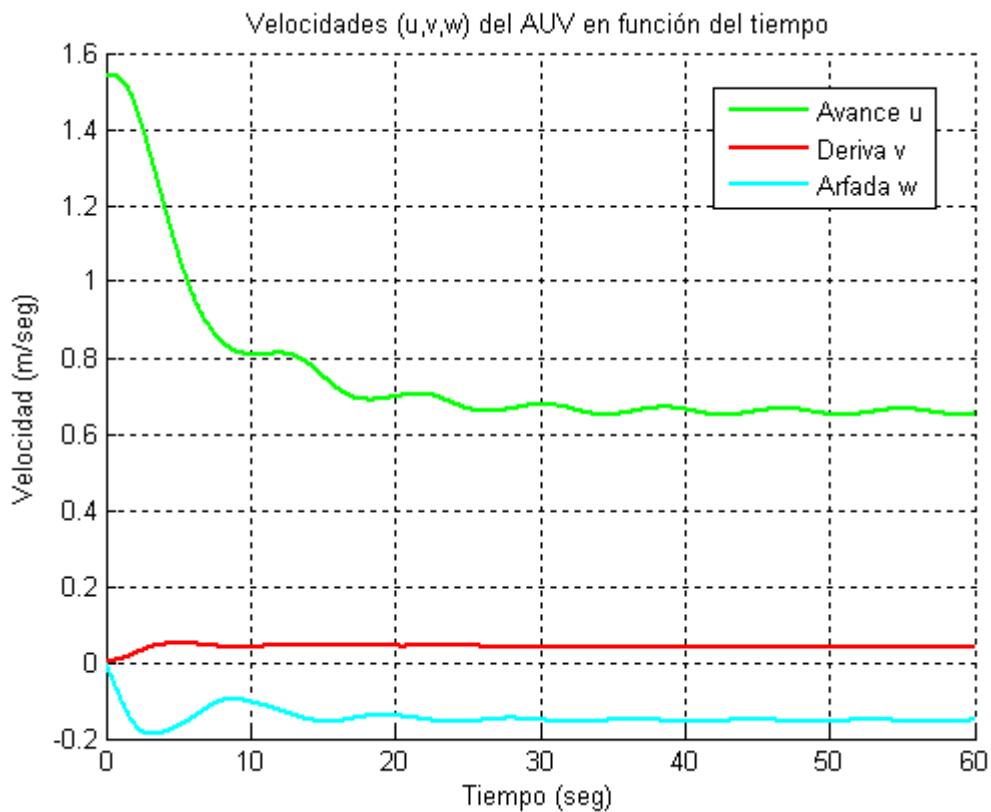


Figura 77 Velocidades del REMUS 100 en Turning Circle

Como podemos ver en la (Figura 75) el vehículo describe con precisión la trayectoria que hemos definido obteniendo unos resultados gráficos que son los siguientes:

- Radio de Giro: Aproximadamente 6 m.
- Diámetro Táctico: Aproximadamente 12 m.

También se puede apreciar en la (Figura 77) que la velocidad de avance u disminuye su valor desde el inicio de su trayectoria hasta que conseguir que se quede constante aproximadamente a los veinte segundos del inicio de la maniobra.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

En este proyecto, se han simulado un conjunto de maniobras propias de distintas misiones estándar para el movimiento de un vehículo autónomo sumergible no tripulado (UUV).

Las seis ecuaciones dinámicas del movimiento de un UUV se obtienen a partir de las ecuaciones de la cinemática y de la dinámica del movimiento de un cuerpo rígido. Una vez obtenidas dichas ecuaciones se ha conseguido programar un código en MATLAB con el cual poder simular de la manera más real posible una serie de maniobras.

Se ha conseguido validar mi modelo matemático y mis ecuaciones del movimiento con respecto a Presterro [1]. Sin embargo, las trayectorias que teóricamente debería seguir el vehículo se ven afectadas por fuerzas inerciales que no se pueden contrarrestar de forma inmediata.

Después del análisis de la maniobras podemos afirmar que el coeficiente de amortiguamiento lineal, es muy sensible e importante y que hay que tenerlo en cuenta. Así como el cambio del coeficiente Z_{ww} corregido no afecta tanto como dice Presterro[1].

Se ha conseguido programar y ejecutar con éxito no solo maniobras en el plano horizontal y vertical sino también la del Circulo de Evolución que es una maniobra clásica, obtenido unos resultados satisfactorios.

Queda demostrado en el análisis de resultados, que para que el vehículo pueda operar de forma autónoma. Requiere de un control automático de lazo cerrado para todas las variables que afectan a la trayectoria (profundidad, tiempo de accionamiento del timón, etc.)

Desarrollos Futuros:

Siguiendo esta línea de investigación y desarrollo, se puede seguir profundizando en el análisis de las ecuaciones y la simulación de maniobras para distintos vehículos.

Sería interesante analizar qué efectos causaría para las ecuaciones respecto a términos y en la maniobra respecto al comportamiento, el efecto de las corrientes y del oleaje para vehículos autónomos no tripulados (UUV's).

Introducir un sistema de Control para la profundidad y para el timón sería un factor importante a tener en cuenta ya que los coeficientes son muy sensibles a cualquier cambio y de esta manera se podría controlar de manera más eficaz la trayectoria del vehículo.

Apéndice A

Tablas de Parámetros

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
ρ	1,03 e +003	Kg/m ³	Densidad del agua
A_f	2,85 e -002	m ²	Área Frontal del casco
A_p	2,26 e -001	m ²	Área Proyectada del casco (Plano xy)
S_w	7,09 e -001	m ²	Superficie Mojada del casco
∇	3,15 e -002	m ³	Volumen de Carena
W	2,99 e +002	N	Peso
B	3,08 e +002	N	Flotabilidad
C_d	3,00 e -001	-	Coef de Arrastre Axial REMUS
C_{dc}	1,10 e +000	-	Coef de Flujo Cruzado de Arrastre del Cilindro
$C_{y\delta\beta}$	1,20 e +000	-	Coef. de Sustentación (Hoerner)
x_{cp}	-3,21 e -001	-	Centro de Presión
α	3,59 e -002	-	Coef de Masa Añadida de la Elipsoide
I_{xx}	1,77 e -001	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje X
I_{yy}	3,45 e +000	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje Y
I_{zz}	3,45 e +000	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje Z

Tabla 26 Parámetros del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
x_t	-7,21 e -001	m	Extremo de Popa en la Sección de Trasera
x_{t2}	-2,18 e -001	m	Extremo de Proa en la Sección de Trasera
x_f	-6,85 e -001	m	Extremo de Popa en la Sección de Aleta
x_{f2}	-6,11 e -001	m	Extremo de Proa en la Sección de Aleta
x_b	4,37 e -001	m	Extremo de Popa de la Sección Delantera
x_{b2}	6,10 e -001	m	Extremo de Proa de la Sección Delantera

Tabla 27 Coordenadas del Casco para los Limites de Integración del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
x_{cdg}	0,00 e +000	m	Coordenada x del centro de gravedad
y_{cdg}	0,00 e +000	m	Coordenada y del centro de gravedad
z_{cdg}	1,96 e -002	m	Coordenada z del centro de gravedad

Tabla 28 Coordenadas del Centro de Gravedad (c.d.g), con respecto al centro de Carena (c.d.c)

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
S_{aleta}	6,65 e -003	m ²	Área de la Aleta
b_{aleta}	8,57 e -002	m	Envergadura de la Aleta
x_{aleta}	-6,38 e -001	m	Coordenada Axial de la Aleta
a_{aleta}	5,14 e +000	m	Altura Máxima por encima de la línea de Crujía
t	6,54 e -001	-	Índice de adelgazamiento de la aleta
c_{df}	5,58 e -001	-	Coef de Arrastre de Flujo Cruzado
AR_e	2,21 e +000	-	Alargamiento Efectivo
$\bar{\alpha}$	9,00 e -001	-	Factor de Sustentación
$c_{L\alpha}$	3,12 e +000	-	Coef de Sustentación de la Aleta en función del ángulo de ataque efectivo

Tabla 29 Parámetros de las Aletas del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
L	0,36 e +000	m	Longitud del Vehículo
W	0,35 e +000	m	Peso del Vehículo
H	0,23 e +000	m	Altura del Vehículo
I_{xx}	2,27 e -002	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje X
I_{yy}	2,39 e -002	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje Y
I_{zz}	2,53 e -002	Kg · m ²	Momento de Inercia Eje Z

Tabla 30 Parámetros del VideoRay III

A continuación vamos a introducir dos figuras:

1. La primera corresponde al transductor sonar que se encuentra situado a proa, y que tiene forma de cilindro de 10,1 cm de diámetro, el resto de dimensiones son las indicadas en la figura 78.

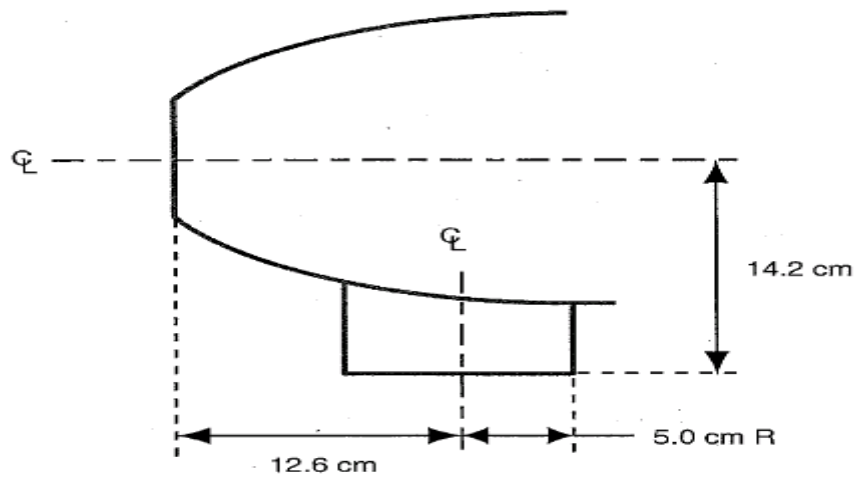


Figura 78 Transductor Sonar de Baja Frecuencia del REMUS 100 (Plano XZ)

2.- El REMUS100 está equipado con cuatro aletas de control o timones idénticos, montados de forma cruciforme cerca del extremo de popa del casco. Estos timones tienen una sección transversal NACA 0012, el resto de sus dimensiones se dan en la figura 79.

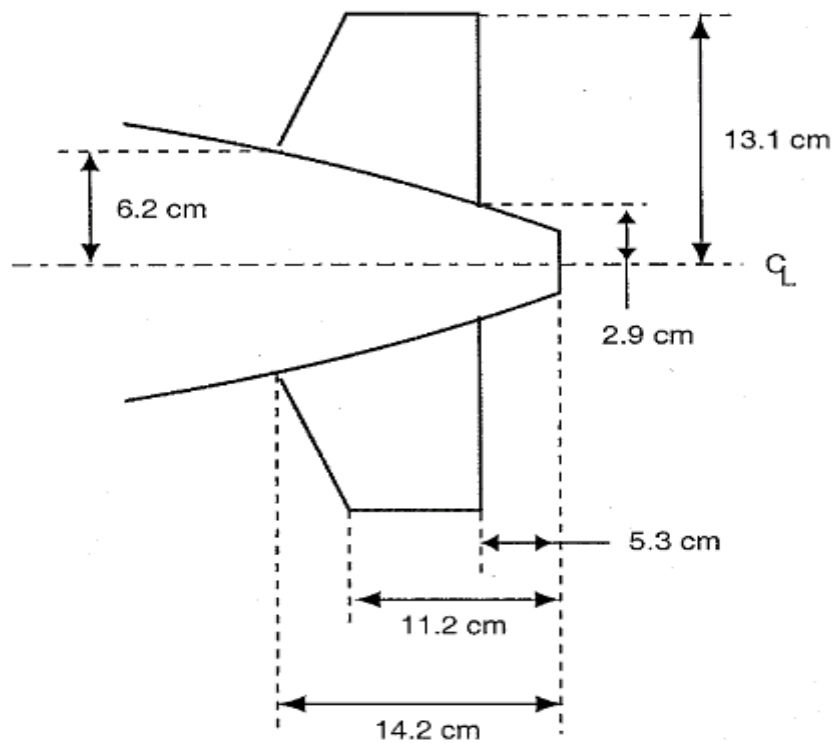


Figura 79 Aletas o Timones del REMUS 100 (Plano XY e XZ)

Apéndice B

Tablas de Coeficientes No-Lineales

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_{uu}	-1,62 e +000	Kg/m	Flujo Cruzado de Arrastre Axial

Tabla 31 Coeficiente de Arrastre Axial del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
Y_{vv}	-1,31 e +003	kg/m	Flujo Cruzado de Arrastre
Y_{rr}	6,32 e -001	Kg · m / rad ²	Flujo Cruzado de Arrastre
Z_{ww}	-1,31 e +002	kg/m	Flujo Cruzado de Arrastre
Z_{qq}	-6,32 e -001	Kg · m / rad ²	Flujo Cruzado de Arrastre
M_{ww}	3,18 e +000	Kg	Flujo Cruzado de Arrastre
M_{qq}	-1,88 e +002	Kg · m / rad ²	Flujo Cruzado de Arrastre
N_{vv}	-3,18 e +000	Kg	Flujo Cruzado de Arrastre
N_{rr}	-9,40 e +001	Kg · m / rad ²	Flujo Cruzado de Arrastre

Tabla 32 Coeficientes de Flujo Cruzado de Arrastre del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
K_{pp}	-1,30 e -001	Kg · m ² / rad ²	Resistencia al Balance

Tabla 33 Coeficiente de Resistencia al Balance del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
Y_{uv}	-2,86 e +001	kg/m	Fuerza de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas
Z_{uw}	-2,86 e +001	kg/m	Fuerza de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas
M_{uw}	-4,47 e +000	Kg	Momento de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas
N_{uw}	4,47 e +000	Kg	Momento de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas

Tabla 34 Coeficientes de Sustentación del Cuerpo y de las Aletas del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
$X_{\dot{u}}$	-9,30 e -001	kg	Masa Añadida
$Y_{\dot{v}}$	-3,55 e +001	Kg	Masa Añadida
$Y_{\dot{r}}$	1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida
$Z_{\dot{w}}$	-3,55 e +001	Kg	Masa Añadida
$Z_{\dot{q}}$	-1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida
$K_{\dot{p}}$	-7,04 e -002	Kg · m ² / rad	Masa Añadida
$M_{\dot{w}}$	-1,93 e +000	Kg · m	Masa Añadida
$M_{\dot{q}}$	-4,88 e +000	Kg · m ² / rad	Masa Añadida
$N_{\dot{v}}$	1,93 e +000	Kg · m	Masa Añadida
$N_{\dot{r}}$	-4,88 e +000	Kg · m ² / rad	Masa Añadida

Tabla 35 Coeficientes de Masa Añadida del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_{wq}	-3,55 e +001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
X_{qq}	-1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
X_{vr}	3,55 e +001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
X_{rr}	-1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
Y_{ura}	-9,30 e -001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
Y_{ur}	5,22 e +000	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado y Sustentación de Aleta
Y_{wp}	3,55 e +001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
Y_{pq}	1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
Z_{uqa}	9,30 e -001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
Z_{uq}	-5,22 e +000	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado y Sustentación de Aleta
Z_{vp}	-3,55 e +001	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado
Z_{rp}	1,93 e +000	Kg/rad	Masa Añadida Término Cruzado

Tabla 36 Coeficientes de Fuerza de Masa Añadida Términos Cruzados del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
M_{uqa}	1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
M_{uq}	-2,00 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado y Sustentación de Aleta
M_{uwa}	3,46 e +001	Kg	Masa Añadida Término Cruzado
M_{vp}	-1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
M_{rp}	4,86 e +000	Kg · m ² /rad ²	Masa Añadida Término Cruzado
N_{uva}	-3,46 e +001	Kg	Masa Añadida Término Cruzado
N_{ura}	1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
N_{ur}	-2,00 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado y Sustentación de Aleta
N_{wp}	-1,93 e +000	Kg · m / rad	Masa Añadida Término Cruzado
N_{pq}	-4,86 e +000	Kg · m ² /rad ²	Masa Añadida Término Cruzado

Tabla 37 Coeficientes de Momento de Masa Añadida Términos Cruzados del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_{prop}	3,86 e +000	N	Empuje de la Hélice
K_{prop}	-5,43 e -001	N · m	Par de la Hélice

Tabla 38 Términos de Propulsión del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
$Y_{uu\delta_r}$	9,64 e +000	Kg/m · rad	Fuerza de Sustentación de las Aletas
$Z_{uu\delta_s}$	-9,64 e +000	Kg/m · rad	Fuerza de Sustentación de las Aletas
$M_{uu\delta_s}$	-6,15 e +000	Kg/rad	Momento de Sustentación de las Aletas
$N_{uu\delta_r}$	-6,15 e +000	Kg/rad	Momento de Sustentación de las Aletas
$Y_{uvaleta}$	-9,64 e +000	Kg/m	Control de las Aletas
$Z_{uvaleta}$	-9,64 e +000	Kg/m	Control de las Aletas
$Y_{uraleta}$	6,15 e +000	Kg/rad	Control de las Aletas
$Z_{uraleta}$	-6,15 e +000	Kg/rad	Control de las Aletas
$M_{uwaleta}$	-6,15 e +000	Kg	Control de las Aletas
$N_{uvaleta}$	6,15 e +000	Kg	Control de las Aletas
$M_{uqaleta}$	-3,93 e +000	Kg · m/rad	Control de las Aletas
$N_{uraleta}$	-3,93 e +000	Kg · m/rad	Control de las Aletas

Tabla 39 Coeficientes de Control de las Aletas del REMUS 100

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_u	2,30 e +000	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre
Y_v	8,01 e +000	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre
Z_w	5,81 e +000	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre
K_p	9,00 e -004	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre
M_q	1,2 e -003	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre
N_r	4,8 e -003	kg/m	Amortiguamiento Lineal de Arrastre

Tabla 40 Coeficientes de Amortiguamiento Lineal de Arrastre del VideoRay III

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_{uu}	8,28 e +000	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre
Y_{vv}	23,68 e +000	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre
Z_{ww}	20,52 e +000	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre
K_{pp}	4,8 e -003	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre
M_{qq}	6,9 e -003	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre
N_{rr}	8,9 e -003	kg/m	Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre

Tabla 41 Coeficientes de Amortiguamiento Cuadrático de Arrastre del Videoray III

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
$X_{\dot{u}}$	1,94 e +000	Kg	Masa Añadida
$Y_{\dot{v}}$	6,05 e +000	Kg	Masa Añadida
$Z_{\dot{w}}$	3,94 e +000	Kg	Masa Añadida
$K_{\dot{p}}$	3,26 e -002	Kg · m ² / rad	Masa Añadida
$M_{\dot{q}}$	1,75 e -002	Kg · m ² / rad	Masa Añadida
$N_{\dot{r}}$	3,21 e -002	Kg · m ² / rad	Masa Añadida

Tabla 42 Coeficientes de Masa Añadida del VideoRay III

Parámetros	Valores		Unidades	Descripción
	Hacia Delante	Hacia Atrás		
C_{tl}	2,59 e -004	1,00 e -004	N	Propulsión Hélice Izquierda
C_{tr}	2,59 e -004	1,00 e -004	N	Propulsión Hélice Derecha
C_{tv}	1,19 e -004	0,75 e -004	N	Propulsión Hélice Vertical
n_l	60	-	r.p.m	Nº de Revoluciones de la Hélice Izquierda
n_r	60	-	r.p.m	Nº de Revoluciones de la Hélice Derecha
n_v	60	-	r.p.m	Nº de Revoluciones de la Hélice Vertical

Tabla 43 Coeficientes de Propulsión del VideoRay III

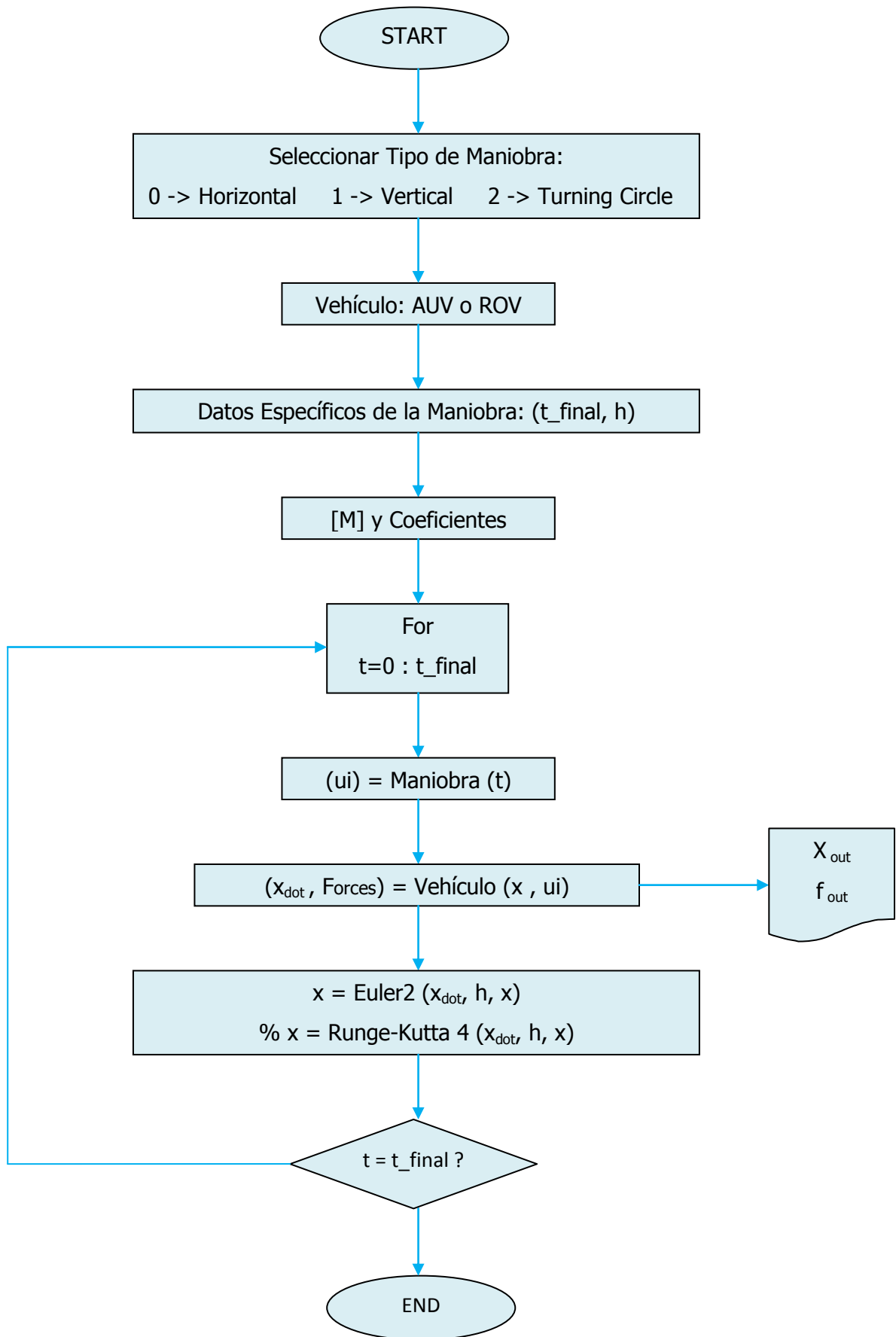
Apéndice C

Código de MATLAB

C.1. Simulación del Vehículo

El código de simulación del REMUS 100 ha sido escrito con el programa MATLAB. El primer programa, ManiobraRemus100, carga las distintas maniobras realizadas en este proyecto, llamando a su vez a distintos sub-programas los cuales van cargando las condiciones iniciales y los tiempos de las distintas maniobras ejecutadas, así como también las propiedades físicas y las nuevas aceleraciones del REMUS 100 basadas en el vector de estado y las condiciones iniciales.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que representa el funcionamiento del código comenzando por la selección de la maniobra introduciendo el número correspondiente, definiendo el tipo de vehículo, después leemos el tiempo final de la maniobra seleccionada así como su paso de integración, también se leen los coeficientes hidrodinámicos así como la matriz de masas. Para un bucle dado en función del tiempo el programa reconoce la maniobra y devuelve (ui) la cual es integrada mediante un método explícito el cual puede ser Euler o Runge-Kutta, para dar las nuevas aceleraciones y fuerzas las cuales serán representadas gráficamente.



C.1.1. Maniobra REMUS 100.m

```
% Se modifica el fichero para generar distintas trayectorias que permitan
% validar el modelo de MBSLIMF90 con este.

% Se van a ejecutar dos maniobras para el vehiculo autonomo sumergible
% (AUV) REMUS 100.

% 1.- Trayectoria en el Plano Horizontal, la cual llamaremos
ensayoREMUS100.

% 2.- Trayectoria en el Plano Vertical, la cual está compuesta por:

% 2.1.- Trayectoria de cabeceo hacia abajo (pitching down), la cual
% llamaremos ensayoREMUS100Vt.

% 3.- Trayectoria Turning Circle, la cual llamaremos ensayoTurningCircle.

clc
clear all
format long

ensayo= 0;      % ensayo = 0 -> Horizontal; 1 -> Vertical; 2 ->
TurningCircle; 3 -> Barrido;

if ensayo== 0;

    % Ensayo Horizontal

    t_final = 70;      % Tiempo Final de la Simulación (seg)
    h = 0.002;        % Tiempo de Muestreo

elseif ensayo== 1;

    % Ensayo Vertical Cabeceo hacia Abajo

    t_final= 4;      % Tiempo Final de la Simulación
    h = 0.005;      % Tiempo de Muestreo

else ensayo== 2;

    % Ensayo TurningCircle

    t_final = 60;      % Tiempo Final de la Simulación
    h = 0.005;      % Tiempo de Muestreo

end

disp(' '); disp('Press a key to simulate:REMUS100');
```

```

%% Cálculos

x      = [1.54 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -5*pi/180 0 0]';      % Valores Iniciales x
= [ u v w p q r x y z phi theta psi]
%delta_r = -5*pi/180;                                % Ángulo del timón
%nrpm     = 1500;                                     % Revoluciones de la
Hélice rpm
%delta_s= 0;                                         % Ángulo de los
timones de buceo

N = round(t_final/h);                                % Numero de muestras
xout = zeros(N+1,13);                                % Asignación de memoria
fout= zeros(N+1,6);
store1 = 1; store2 = 1;                              % Variables logicas (0,1)

disp('Simulating...')

% Calculamos la matriz de masas

InvMasaRemus100

for i=1:N+1,
    time = (i-1)*h;

    % Leemos condiciones del ensayo

    if ensayo== 0;

        % Ensayo Plano Horizontal

        [ui] = ensayoREMUS100(time);

    elseif ensayo == 1;

        % Ensayo Plano Vertical

        [ui] = ensayoREMUS100Vt(time);

    else ensayo == 2;

        % Ensayo Turning Circle

        [ui] = ensayoTurningCircle(time);

    end

    [xdot,forces] = feval('REMUS100',x,ui);           % ship model
        % Euler integration
    xout(i,:) = [time,x(1:12)'];
    fout(i,:) = [forces'];
    %x = euler2(xdot,x,h);
    x = rk4REMUS100(x,ui,h);

end

```

```

t      = xout(:,1);
u      = xout(:,2);
v      = xout(:,3);
w      = xout(:,4);
p      = xout(:,5)*180/pi;
q      = xout(:,6)*180/pi;
r      = xout(:,7)*180/pi;
posx   = xout(:,8);
posy   = xout(:,9);
posz   = xout(:,10);
phi    = xout(:,11)*180/pi;
theta  = xout(:,12)*180/pi;
psi    = xout(:,13)*180/pi;
X      = fout(:,1);
Y      = fout(:,2);
Z      = fout(:,3);
K      = fout(:,4);
M      = fout(:,5);
N      = fout(:,6);

```

```

%% Gráficas

```

```

figure(1)

```

```

plot(posx, posy, 'linewidth', 2), hold on, axis('equal'), grid
xlabel ('Desplazamiento en el eje X (m)'), ylabel ('Desplazamiento en el
eje Y (m)')
title('Trayectoria en el plano XY')

```

```

figure(2)

```

```

clf
grid on, hold on, xlabel ('Tiempo (seg)'), ylabel ('Desplazamiento (m)')
title('Posiciones (x,y,z) del AUV en función del tiempo')
plot(t, posx, 'g', 'linewidth', 2)
plot(t, posy, 'r', 'linewidth', 2)
plot(t, posz, 'c', 'linewidth', 2)
legend ('Pos-x', 'Pos-y', 'Pos-z');

```

```

figure(3)

```

```

clf
grid on, hold on, xlabel ('Tiempo (seg)'), ylabel ('Velocidad (m/seg)')
title('Velocidades (u,v,w) del AUV en función del tiempo')
plot(t, u, 'g', 'linewidth', 2)
plot(t, v, 'r', 'linewidth', 2)
plot(t, w, 'c', 'linewidth', 2)
legend ('Avance u', 'Deriva v', 'Arfada w');

```

```

figure(4)

```

```

clf
grid on, hold on, xlabel ('Tiempo (seg)'), ylabel ('Desplazamiento angular
(grados)')
title('Desplazamiento angular del AUV en función del tiempo')
plot(t, phi, 'g', 'linewidth', 2)
plot(t, theta, 'r', 'linewidth', 2)
plot(t, psi, 'c', 'linewidth', 2)
legend ('Balance \phi', 'Cabeceo \theta', 'Guiñada \psi');

```

```

figure(5)
clf
grid on,hold on,xlabel ('Tiempo (seg)'),ylabel ('Velocidad angular
(grados/seg)')
title('Velocidad angular del AUV en función del tiempo')
plot(t,p,'g','linewidth',2)
plot(t,q,'r','linewidth',2)
plot(t,r,'c','linewidth',2)
legend ('Vel de balance p','Vel de cabeceo q','Vel de guiñada r');

```

```

figure(6)
clf
grid on,hold on,xlabel ('Tiempo (seg)'),ylabel ('Fuerzas (N)')
title('Fuerzas del AUV en función del tiempo')
plot(t,X,'g','linewidth',2)
plot(t,Y,'r','linewidth',2)
plot(t,Z,'c','linewidth',2)
legend ('X','Y','Z');

```

```

figure(7)
clf
grid on,hold on,xlabel ('Tiempo (seg)'),ylabel ('Momentos (N*m)')
title('Momentos del AUV en función del tiempo')
plot(t,K,'g','linewidth',2)
plot(t,M,'r','linewidth',2)
plot(t,N,'c','linewidth',2)
legend('K','M','N');

```

C.1.2. InvMasaRemus100.m

```

% Cálculo de la Inversa de la Matriz de Masas para el REMUS 100

% Leemos las Propiedades Físicas del REMUS 100

PropFisREMUS100

% Leemos los Coeficientes del REMUS 100

CoefREMUS100

% Matriz de Masas

MRB(1:3,1:3)= m*eye(3);
MRB(1:3,4:6)= -m*Smtx(r_G);
MRB(4:6,1:3)= m*Smtx(r_G);
MRB(4:6,4:6)= [Ix 0 0
                0 Iy 0
                0 0 Iz];

```

```

MA =- [Xudot  0      0      0      0      0
       0      Yvdot  0      0      0      Yrdot
       0      0      Zwdot  0      Zqdot  0
       0      0      0      Kpdot  0      0
       0      0      Mwdot  0      Mqdot  0
       0      Nvdot  0      0      0      Nrdot];
Mass = MRB+MA;
Minv = inv(Mass);

save ('Minv.m', 'Minv', '-ascii')

```

C.1.3. PropFisREMUS100.m

```

% Propiedades Físicas del REMUS 100:

% L= Longitud del Vehículo
L   = 1.33;

% Aceleración de la Gravedad
g   = 9.81;

% Coordenadas del Centro de Gravedad (c.d.g)
xG  = 0;      yG  = 0;      zG  = 1.96e-2;

% Vector de Posición con respecto al c.d.g
r_G = [xG yG zG]';

% Coordenadas del Centro de Carena (c.d.c), origen del sistema de
referencia intrínseco
xB  = 0;      yB  = 0;      zB  = 0;

% Valor de la Densidad del Agua de Mar
rho = 1.03e3;

% Masa del Vehículo
m   = 2.99e2/g;

% Peso y Empuje del Vehículo
W   = 2.99e2;  B   = 2.99e2; % En el ensayo horizontal W=B=2.99e2; % Para
el ensayo vertical B=3.06e2

```

```
% Momentos de Inercia del Vehículo  
  
Ix = 1.77e-1;   Iy = 3.45;   Iz = 3.45;  
  
% Productos de Inercia del Vehículo  
  
Ixy = 0; Iyz = 0; Ixz = 0;
```

C.1.4. CoefREMUS100.m

```
% Coeficientes hidrodinámicos de REMUS100  
  
Xuu = -1.62;  
Xudot = -9.3e-1;  
Xwq = -3.55e1;  
Xqq = -1.93;  
Xvr = 3.55e1;  
Xrr = -1.93;  
Xprop = 3.86;  
Yvv = -1.31e3;  
Yrr = 6.32e-1;  
Yuv = -2.86e1;  
Yvdot = -3.55e1;  
Yrdot = 1.93;  
Yur = 5.22;  
Ywp = 3.55e1;  
Ypq = 1.93;  
Yuudr = 9.64;  
Zww = -1.31e2;  
Zqq = -6.32e-1;  
Zuw = -2.86e1;  
Zwdot = -3.55e1;  
Zqdot = -1.93;  
Zuq = -5.22;  
Zvp = -3.55e1;  
Zrp = 1.93;  
Zuuds = -9.64;  
Kpp = -1.3e-1;  
Kpdot = -7.04e-2;  
Kprop = -5.43e-1;  
Mww = 3.18;  
Mqq = -9.4*12.5;  
Muw = 2.4e1;  
Mwdot = -1.93;  
Mqdot = -4.88;  
Muq = -2.0;  
Mvp = -1.93;  
Mrp = 4.86;  
Muuds = -6.15;  
Nvv = -3.18;  
Nrr = -9.4e1;  
Nuv = -2.4e1;  
Nvdot = 1.93;  
Nrdot = -4.88;  
Nur = -2;  
Nwp = -1.93;  
Npq = -4.86;
```



```
Nuudr = -6.15;
```

```
% Coeficientes de Amortiguamiento No-Lineal (Usados en la comparativa en
la Maniobra Vertical)
```

```
%Xu = -1.35e1;
```

```
%Zw = -6.66e1;
```

```
%Mq = -6.87;
```

C.1.5. Minv.m

```
% Resultados de la Inversa de la Matriz de Masas
```

```
 3.1850195e-002  0.0000000e+000  6.7307976e-005  0.0000000e+000 -
2.3020794e-003  0.0000000e+000
 0.0000000e+000  1.5596345e-002  0.0000000e+000  3.7698521e-002
0.0000000e+000  3.6135588e-003
 6.7307976e-005  0.0000000e+000  1.5252639e-002  0.0000000e+000 -
3.5387567e-003  0.0000000e+000
 0.0000000e+000  3.7698521e-002  0.0000000e+000  4.1331597e+000
0.0000000e+000  8.7344712e-003
-2.3020794e-003  0.0000000e+000 -3.5387567e-003  0.0000000e+000
1.2103319e-001  0.0000000e+000
 0.0000000e+000  3.6135588e-003  0.0000000e+000  8.7344712e-003
0.0000000e+000  1.2088525e-001
```

C.1.6. ensayoREMUS100.m

```
% Maniobra de Ensayo en el Plano Horizontal del REMUS 100
```

```
function [ui] = ensayoREMUS100(time)
```

```
% [ui] = ensayoREMUS100(time) Devuelve el valor de los parámetros de
control
```

```
% para el ensayo del movimiento en el plano horizontal.
```

```
% u      = Velocidad de Avance           (m/s)
% v      = Velocidad de Deriva           (m/s)
% w      = Velocidad de Arfada           (m/s)
% p      = Velocidad de Balance          (rad/s)
% q      = Velocidad de Cabeceo          (rad/s)
% r      = Velocidad de Guiñada          (rad/s)
% xpos   = Posición en la dirección de x (m)
% ypos   = Posición en la dirección de y (m)
% zpos   = Posición en la dirección de z (m)
% phi    = Ángulo de Balance              (rad)
% theta  = Ángulo de Cabeceo              (rad)
% psi    = Ángulo de Guiñada              (rad)
```

```
%
```

```
% El vector de entrada es :
```

```
%
```

```

% ui = [ delta_s delta_r nrpm ] donde
%
% delta_r = Ángulo de Timón (rad)
% delta_s = Ángulo de los Timones de Buceo (rad)
% nrpm = Revoluciones de la Hélice (rpm)
%
% Reference : Tesis Timothy Presterero (2001)
%
% Author: Jorge Juan García García
% Date: 03/06/2013
% Revisions:
% Condiciones y Tiempos del Ensayo Horizontal

delta_s = 0;
delta_r = 0;
nrpm = 1500;
angulo= 4*pi/180; % Valor del Ángulo del Timón (rad)

if time < 10
    delta_r = 0;
end

if (time >= 10 && time < 40)
    delta_r = angulo;
end

if (time >= 40 && time < 70)
    delta_r = -angulo;
end

if time >=70
    delta_r = 0*pi/180;
end

ui(1)= delta_s;
ui(2)= delta_r;
ui(3) = nrpm;

```

C.1.7. ensayoREMUS100Vt.m

```

% Maniobra de Ensayo en el Plano Vertical (Cabeceo hacia Abajo) del REMUS
100

function [ui] = ensayoREMUS100Vt(time)

% [ui] = ensayoREMUS100Vt(time) Devuelve el valor de los parámetros de
control
% para el ensayo del movimiento en plano vertical.

% u = Velocidad de Avance (m/s)
% v = Velocidad de Deriva (m/s)

```

```

% w      = Velocidad de Arfada           (m/s)
% p      = Velocidad de Balance          (rad/s)
% q      = Velocidad de Cabeceo          (rad/s)
% r      = Velocidad de Guiñada          (rad/s)
% xpos   = Posicion en la dirección x    (m)
% ypos   = Posicion en la dirección y    (m)
% zpos   = Position en la direccion z    (m)
% phi    = Ángulo de Balance              (rad)
% theta  = Ángulo de Cabeceo             (rad)
% psi    = Ángulo de Guiñada             (rad)
%
% El vector de entrada es:
% ui = [ delta_s delta_r nrpm ] donde
%
% delta_r = Ángulo del Timón              (rad)
% delta_s = Ángulo de los Timones de Buceo (rad)
% nrpm    = Revoluciones de la Hélice    (rpm)
%
% Reference : Tesis Timothy Presterro (2001)
%
% Author:   Jorge Juan García García
% Date:     29/07/2013
% Revisions:
%
% Condiciones y Tiempos del Ensayo Vertical (Cabeceo hacia abajo)

delta_s = 0;
delta_r = 0;
nrpm = 1500;

if time < 2
    delta_s = 0;
end

if (time >= 2 && time < 4)
    delta_s = 8*pi/180;
end

if (time >= 4 && time < 6)
    delta_s = 0;
end

if time >=6
    delta_s = 0*pi/180;
end

ui(1)= delta_s;
ui(2)= delta_r;
ui(3) = nrpm;

```

C.1.8. ensayoTurningCircle.m

```

% Maniobra de TurningCircle en el REMUS 100

function [ui] = ensayoTurningCircle(time)

% [ui] = ensayoTurningCircle(time) Devuelve el valor de los parámetros de
control
% para el ensayo de TurningCircle.

% u      = Velocidad de Avance          (m/s)
% v      = Velocidad de Deriva         (m/s)
% w      = Velocidad de Arfada         (m/s)
% p      = Velocidad de Balance        (rad/s)
% q      = Velocidad de Cabeceo       (rad/s)
% r      = Velocidad de Guiñada       (rad/s)
% xpos   = Posición en la dirección de x (m)
% ypos   = Posición en la dirección de y (m)
% zpos   = Posición en la dirección de z (m)
% phi    = Ángulo de Balance           (rad)
% theta  = Ángulo de Cabeceo          (rad)
% psi    = Ángulo de Guiñada          (rad)
%
% El vector de salida es :
%
% ui = [ delta_s delta_r nrpm ] donde
%
% delta_r = Ángulo de Timón           (rad)
% delta_s = Ángulo de los Timones de Buceo (rad)
% nrpm    = Revoluciones de la Hélice (rpm)
%
% Reference : Tesis Timothy Presterro (2001)
%
% Author:   Jorge Juan García García
% Date:    05/08/2013
% Revisions:

% Condiciones y Tiempos del Ensayo de TurningCircle

delta_s = 0;
delta_r = 0;
nrpm = 1500;
angulo= 5*pi/180;          % Valor del Ángulo del Timón

if time < 10
    delta_r = 0;
end

if (time >= 10 && time < 60)
    delta_r = angulo;
end

ui(1)= delta_s;
ui(2)= delta_r;
ui(3) = nrpm;

```

C.1.9. REMUS100.m

```

% Ecuaciones de Fuerzas y Momentos Hidrodinámicos del REMUS 100

function [xdot,forces] = REMUS100(x,ui)

% [xdot,forces] = REMUS100(x,ui) devuelve la velocidad U in m/s
% (opcionalmente) y
% deriva en función del tiempo el vector de estado: x = [ u v w p q r x
% y z phi theta psi ]
% para el vehículo (AUV) REMUS100.

% La longitud del AUV es L = 1.33 m, mientras que el vector de estado
% viene definido por:
%
% u      = Velocidad de Avance           (m/s)
% v      = Velocidad de Deriva           (m/s)
% w      = Velocidad de Arfada           (m/s)
% p      = Velocidad de Balance          (rad/s)
% q      = Velocidad de Cabeceo          (rad/s)
% r      = Velocidad de Guiñada          (rad/s)
% xpos   = Posición en la dirección de x (m)
% ypos   = Posición en la dirección de y (m)
% zpos   = Posición en la dirección de z (m)
% phi    = Ángulo de Balance             (rad)
% theta  = Ángulo de Cabeceo             (rad)
% psi    = Ángulo de Guiñada             (rad)
%
% El vector de entrada es :
%
% ui = [ delta_s delta_r n ] donde
%
% delta_r = Ángulo de Timón               (rad)
% delta_s = Ángulo de los Timones de Buceo (rad)
% nrpm    = Revoluciones de la Hélice    (rpm)
%
% Reference : Tesis Timothy Presterero (2001)
%
% Author:   Jorge Juan García García
% Date:     03/06/2013
% Revisions:

% Comprobación de las Dimensiones de Entrada y de Estado

if (length(x) ~= 12),error('x-vector must have dimension 12 !');end
if (length(ui) ~= 3),error('u-vector must have dimension 3 !');end

% Dimensiones de Estado

u = x(1); v = x(2); w = x(3);
p = x(4); q = x(5); r = x(6);
phi = x(10); theta = x(11); psi = x(12);

```

```

% Límites de los Ángulos de Popa y de las Revoluciones de la Hélice

max_ui(1) = 20*pi/180;      % Máximo valor del Ángulo de Timón delta_r
(rad)
max_ui(2) = 20*pi/180;      % Máximo valor del Ángulo de Buceo delta_s
(rad)
max_ui(3) = 1500;      % Máximo valor de las Revoluciones de la Hélice nrpm
(rpm)

% Parámetros Hidrodinámicos

c1 = cos(phi);
c2 = cos(theta);
c3 = cos(psi);
s1 = sin(phi);
s2 = sin(theta);
s3 = sin(psi);
t2 = tan(theta);

% Leemos Propiedades Físicas del REMUS 100

PropFisREMUS100

% Leemos Coeficientes del REMUS 100

CoefREMUS100

% Saturaciones de Timón y Eje

for i=1:1:3,
    if abs(ui(i))>max_ui(i),ui(i)=sign(ui(i))*max_ui(i);end
end

% Control de las Variables de Entrada (buceo, timón y revoluciones)

delta_s = ui(1);
delta_r = ui(2);
nrpm    = ui(3)/60*2*pi;

% Fuerzas y Momentos Hidrodinámicos

X = - (W - B)*sin(theta)+ Xuu*u*abs(u) + (Xwq-m)*w*q + (m*xG+Xqq)*q^2 ...
    + (m+Xvr)*v*r + (m*xG+Xrr)*r^2 - m*yG*p*q - m*zG*p*r + Xprop;% + Xu*u;

Y = (W-B)*cos(theta)*sin(phi) + Yvv*v*abs(v)+ Yrr*r*abs(r) + m*yG*r^2 +
Yuv*u*v ...
    + (Ywp+m)*w*p + (Yur-m)*u*r - (m*zG)*q*r + m*yG*p^2 + (Ypq -
m*xG)*p*q ...
    + Yuudr*u^2*delta_r;

Z = (W-B)*cos(theta)*cos(phi) + Zww*w*abs(w) + Zqq*q*abs(q) + Zuw*u*w ...
    + (Zuq+m)*u*q + (Zvp-m)*v*p + (m*zG)*p^2 + (m*zG)*q^2 ...
    + (Zrp - m*xG)*r*p - m*yG*q*r + Zuuds*u^2*delta_s; % + Zw*w;

K = -(yG*W-yB*B)*cos(theta)*cos(phi) - (zG*W-zB*B)*cos(theta)*sin(phi) +
Kpp*p*abs(p) ...

```

```

- (Iz - Iy)*q*r + m*yG*(u*q - v*p) - (m*zG)*w*p + (m*zG)*u*r + Kprop;

M = -(xG*W-xB*B)*cos(theta)*cos(phi) - (zG*W-zB*B)*sin(theta) +
Mww*w*abs(w) ...
+ Mqq*q*abs(q) + (Mrp - (Ix-Iz))*r*p + (m*zG)*v*r - (m*zG)*w*q ...
+ (Muq - m*xG)*u*q + Muw*u*w + (Mvp +m*xG)*v*p + Muuds*u^2*delta_s; %
+ Mq*q;

N = -(xG*W-xB*B)*cos(theta)*sin(phi) - (yG*W-yB*B)*sin(theta) +
Nvv*v*abs(v) + Nrr*r*abs(r) ...
+ Nuv*u*v - m*yG*(v*r-w*q) + (Npq - (Iy-Ix))*p*q + (Nwp + m*xG)*w*p +
(Nur - m*xG)*u*r ...
+ Nuudr*u^2*delta_r;

forces = [X Y Z K M N]';

Minv=load('Minv.m');

% Aceleraciones en Movimientos de Translación y Rotación

xdot =
[Minv(1,1)*X+Minv(1,2)*Y+Minv(1,3)*Z+Minv(1,4)*K+Minv(1,5)*M+Minv(1,6)*N
Minv(2,1)*X+Minv(2,2)*Y+Minv(2,3)*Z+Minv(2,4)*K+Minv(2,5)*M+Minv(2,6)*N
Minv(3,1)*X+Minv(3,2)*Y+Minv(3,3)*Z+Minv(3,4)*K+Minv(3,5)*M+Minv(3,6)*N
Minv(4,1)*X+Minv(4,2)*Y+Minv(4,3)*Z+Minv(4,4)*K+Minv(4,5)*M+Minv(4,6)*N
Minv(5,1)*X+Minv(5,2)*Y+Minv(5,3)*Z+Minv(5,4)*K+Minv(5,5)*M+Minv(5,6)*N
Minv(6,1)*X+Minv(6,2)*Y+Minv(6,3)*Z+Minv(6,4)*K+Minv(6,5)*M+Minv(6,6)*N
c3*c2*u + (c3*s2*s1-s3*c1)*v + (s3*s1+c3*c1*s2)*w
s3*c2*u + (c1*c3+s1*s2*s3)*v + (c1*s2*s3-c3*s1)*w
-s2*u + c2*s1*v + c1*c2*w
p + s1*t2*q + c1*t2*r
(c1*q - s1*r)
s1/c2*q + c1/c2*r
];

```

C.1.10. rk4REMUS100.m

```

% Integrador Runge-Kutta

function xnext = rk4REMUS100(x,u_ship,h)

% RK4   Integrar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias con el
%       Método Runge-Kutta de cuarto orden. La entrada de valores de
%       control "u" puede ser constante durante el intervalo de muestreo
%       "h" o una función variable en el tiempo u = g(x,t).
%
% La salida de xnext = x(k+1) es:
%
%       xnext = rk4('f',x,'g',h,t)   Sistemas no autónomos
%       xnext = rk4('f',x,u,h)      Sistemas autónomos (con la "u" constante)
%
% donde
%
%       f       - Función Externa:
%                 dx/dt(k) = f(x(k),u(k),t(k))   Sistemas no autónomos
%                 dx/dt(k) = f(x(k),u(k))        Sistemas autónomos
%
%       x       - x(k)
%       u       - Función Externa: u(k)= g(x(k),t(k)) Sistemas no autónomos
%                 u(k)= constante durante el tiempo de la muestra "h" Sistemas
autónomos
%       h       - Paso de Integración
%       t       - time t(k) - Solo se necesita para vehículos que no son
autónomos
%
% Ex 1:   function u = g(x,t)
%         u = -2*x + cos(t);
%
%         function dx = f(x,u,t)
%         dx = -x^2 + u + cos(t);
%
%         ==> xnext = rk4('f',x,'g',h,t)
%
% Ex 2:   u = constante
%
%         function dx = f(x,u),
%         dx = -x^2 + u;
%
%         ==> xnext = rk4('f',x,u,h)
%
% Author:   Thor I. Fossen
% Date:     2001-07-14

xo = x;

k1 = h*feval('REMUS100',x,u_ship);
x  = xo+0.5*k1;
k2 = h*feval('REMUS100',x,u_ship);
x  = xo+0.5*k2;
k3 = h*feval('REMUS100',x,u_ship);
x  = xo+k3;
k4 = h*feval('REMUS100',x,u_ship);

xnext = xo + (k1+2*(k2+k3)+k4)/6;

```


Bibliografía

- [1] Prestero Timothy. *Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle*. Master's Thesis, MIT/ WHOI Joint Program in Applied Ocean Science and Engineering, 2001.
- [2] Fossen Thor I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1994.
- [3] Geridönmez Fatih. *Simulation of motion of an underwater vehicle*. Middle East Technical University, 2007.
- [4] Blevins Robert D. *Formulas for Natural Frequency and Modal Shape*. Kreiger Publishing, Florida, 1979, pp 28-29.
- [5] Hoerner Sighard F. *Fluid Dynamic Drag*. Published by author, 1965, pp 25-26-43.
- [6] Hoerner Sighard F. and Borst Henry V. *Fluid Dynamic Lift*. Published by author, second edition, 1985, pp 30-31-99.
- [7] Lewis E.V, editor. *Principles of Naval Architecture*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey, second edition, 1988, pp 26.
- [8] Newman J.M. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Massachusetts, 1977, pp 25-27-28.
- [9] Triantafyllou Michael S. *Maneuvering and Control of Surface and Underwater Vehicles*. Lecture notes for MIT Ocean Engineering Course 13.49, 1996, pp 25-26.

- [10] Whicker L.F and Fehlner L.F. *Free-stream characteristics of a family of low-aspect ratio control surfaces*. Technical Report 933, David Taylor Model Basin, 1958. NC, pp 26.
- [11] Blidberg Richard D. *The Development of Autonomous Underwater Vehicles*. Autonomous Undersea Systems Institute, Lee New Hampshire, USA.
- [12] Especificaciones del fabricante Kongsberg,
<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/90CBC5D82A8F2A6CC125721F003360C2?OpenDocument>, 2012.
- [13] Especificaciones del REMUS 100 fabricante Kongsberg,
<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/20B22B5CFEC19B92C12574AB0046575E?OpenDocument>.
- [14] Year 2000. HUGIN bathymetry data from the Sigsbee Escarpment, GOM. Mapped with HUGIN 3000 and EM 2000 multibeam echo sounder. C&C Technology Inc.
- [15] Year 2002. HUGIN bathymetry from the Ormen Lange field. Mapped with HUGIN II and EM 3000 multibeam echo sounder. NUI AS.
- [16] Year 2066. HUGIN sea bottom SAS imagery data. Surveyed with HUGIN 1000 and the HISAS 1030 SAS sonar.
- [17] Year 2000. HUGIN sub bottom data from the Sigsbee Escarpment, GOM. Mapped with HUGIN 3000 and Edgetech FS 2200 SBP. C&C Technology Inc.
- [18] Especificaciones del sistema NASDrill USBL del fabricante Nautronix consultado en <http://www.nautronix.com/files/spec%20Sheets%2010/NH-MS-019%20-%20NASDrill%20USBL.pdf>,2012
- [19] Especificaciones del fabricante Sonardyne
<http://sonardyne.com/products/positioning/usbl-all-system.html>,2012

[20] Wei Wang and Christopher M. Clark. *Modeling and Simulation of the VideoRay Pro III Underwater Vehicle*. Lab for Autonomous and Intelligent Robotics (LAIR). University of Waterloo, Canada.