

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado y control basados en lógica difusa para el movimiento en el plano horizontal de un AUV.

Autor: Ana Elena Juvier Ayala

Tutores: Ing. Yunier Valeriano Medina
Dr.C. Boris Luis Martínez Jiménez

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado y control basados en lógica difusa para el movimiento en el plano horizontal de un AUV.

Autor: Ana Elena Juvier Ayala
email: anae@uclv.edu.cu

Tutores: Ing. Yunier Valeriano Medina Prof. Asistente
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: yunierv@uclv.edu.cu

Dr.C. Boris Luis Martínez Jiménez Prof. Titular
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: boris@uclv.edu.cu

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”



Hago constar que el presente TRABAJO DE DIPLOMA fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Ana Elena Juvier Ayala
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Ana Elena Juvier Ayala
Autor

Fecha

Boris Luis Martínez Jiménez, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr.C., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“Para cortar rápidamente un árbol gaste el doble del tiempo afilando el hacha”

ÁNONIMO

DEDICATORIA

A mi madre, **Noemi**,
quién ha sido un ejemplo a seguir,
y el motor impulsor de todos mis logros.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Noemi, por quererme incondicionalmente y por su incomparable dedicación.

A mi papá Walfrido, por estar ahí siempre que lo necesito.

A mi hermana Chari, por aguantar a su adorado tormento y por ser la mejor hermana del mundo.

A mi novio Dairo, por su apoyo incondicional, por malcriarme y por su inmenso amor.

A mi abuelita Clotilde, por su cariño.

A mi tutor Yunier, por su dedicación, paciencia, comprensión, optimismo y sobre todo por su confianza en mí.

A mi cotutor Boris, por su dedicación y paciencia, contra todo pronóstico, en la realización de este Trabajo de Diploma. Es brillante profe.

A mi mejor amiga Leisis, por ser un apoyo, una hermana en todos estos años de estudio.

A mi tía postiza Carmen por su valiosa ayuda.

A todos los profesores que me han aportado un poco de sus conocimientos.

A Oscar, por estar siempre dispuesto a ayudar. Pablo, Delvis, Orlando, Carlos por haber dedicado algún momento de su tiempo para sacarme de problemas.

Al resto de los profesores del 117 y a los estudiantes de 4to año que día a día amenizaban mi trabajo.

Santa Clara, Cuba, 2013

RESUMEN

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (*AUVs*) se han convertido en un tema de gran interés a nivel mundial por sus amplias aplicaciones. En Cuba, con el proyecto *HRC-AUV*, se dan los primeros pasos en el estudio de esta temática. En esta investigación se determina un modelo difuso del tipo *Takagi – Sugeno* para el movimiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal. La obtención de un modelo difuso obedece a la presencia de incertidumbres en la dinámica del vehículo. El comportamiento del modelo difuso se evalúa mediante simulación y se analiza estadísticamente, obteniéndose resultados satisfactorios. Una estructura de controlador difuso tipo *PI – D* se diseña como autopiloto. El diseño se realiza tomando como base el modelo difuso, de manera que cada regla de control esté en función de compensar las reglas establecidas para el modelo. Los resultados obtenidos tras simular el controlador difuso demuestran la factibilidad del diseño.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA EN EL MODELADO Y CONTROL DE <i>AUVs</i>	8
1.1. Introducción	8
1.2. Evolución y desarrollo de los <i>AUVs</i>	8
1.3. Ventajas y aplicaciones de los <i>AUVs</i>	9
1.3.1. Ejemplos de <i>AUVs</i>	10
1.4. Definiciones relacionadas con el modelado y control de vehículos ma- rinos	11
1.4.1. Conceptos relacionados con el modelado de un vehículo marino	12
1.4.2. Conceptos relacionados con el control de un <i>AUV</i>	14
1.5. Modelado y control de sistemas inteligentes	16
1.5.1. Modelado basado en lógica difusa	17
1.5.2. Control Inteligente basado en lógica difusa	18
1.6. Aplicaciones de técnicas difusas en el modelado y control de <i>AUVs</i> .	20
1.7. Consideraciones finales.	22

2.	MODELO DINÁMICO BORROSO PARA EL MOVIMIENTO DEL <i>HRC-AUV</i> EN EL PLANO HORIZONTAL	24
2.1.	Modelo dinámico no lineal de 3 <i>GDL</i> que describe el movimiento del <i>HRC-AUV</i> en el plano horizontal.	24
2.1.1.	Sistemas de coordenadas y notación utilizada.	25
2.1.2.	Cálculo de los parámetros del modelo no lineal de 3 <i>GDL</i> a partir de las ecuaciones dinámicas.	26
2.2.	Modelado difuso.	30
2.2.1.	Descripción del modelado basado en la arquitectura <i>T – S</i>	30
2.2.2.	Modelo borroso de 3 <i>GDL</i>	33
2.3.	Evaluación del modelo difuso.	36
2.4.	Consideraciones finales.	40
3.	APLICACIÓN DE TÉCNICAS BORROSAS EN EL DISEÑO DE UN AUTOPILOTO PARA EL <i>HRC-AUV</i>	41
3.1.	Diseño del controlador difuso.	42
3.2.	Ajuste de los controladores lineales.	43
3.3.	Simulación del control difuso.	48
3.4.	Análisis de robustez.	50
3.5.	Análisis económico.	52
3.6.	Consideraciones finales.	53
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
A.	Códigos en Matlab para el modelado y control difuso	62
B.	Códigos en Matlab para desarrollar la comparación estadística del MDNL de 3 <i>GDL</i> y el Modelo difuso	64

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
2-1.	Nomenclatura utilizada en el <i>HRC-AUV</i>	26
2-2.	Valores geométricos e inerciales del <i>HRC-AUV</i>	29
2-3.	Resumen de los parámetros identificados y estimados para el <i>HRC-AUV</i>	29
2-4.	Comparación estadística entre el modelo borroso y el <i>MDNL</i> de 3 <i>GDL</i>	40
3-1.	Valores de ganancias para los controladores lineales tipo <i>PI - D</i>	48
3-2.	Valores utilizados en las pruebas realizadas.	50
3-3.	Experimentos realizados.	51
3-4.	Resultados de los experimentos.	51

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1–1. Imagen del <i>AUV Hugin</i>	10
1–2. Imagen del <i>AUV R – One</i>	10
1–3. Imagen del <i>AUV Remus</i>	11
1–4. Imagen del <i>AUV MARIUS</i>	11
1–5. Esquema para el diseño de un controlador difuso basado en un modelo difuso.	22
2–1. Sistemas de coordenadas para un <i>AUV</i>	25
2–2. Estructuras geométricas.	31
2–3. Funciones de membresía.	32
2–4. Modelo difuso implementado con la herramienta <i>fuzzy</i> del <i>Matlab</i>	34
2–5. Funciones de membresía	35
2–6. Diagrama en bloques del modelo borroso de 3 <i>GDL</i> para el <i>HRC – AUV</i>	37
2–7. Comportamiento del modelo borroso y del modelo no lineal de 3 <i>GDL</i> .	37
2–8. Comportamiento de la velocidad <i>u</i>	38
2–9. Comportamiento de la velocidad <i>v</i>	38
2–10. Comportamiento de la velocidad <i>r</i>	39
3–1. Controlador difuso implementado con la herramienta <i>fuzzy</i> del <i>Matlab</i> .	43
3–2. Esquema para el diseño de los controladores tipo <i>PI-D</i>	44

3-3. <i>LGR</i> del sistema en lazo abierto que sirve de base para el ajuste de la ganancia K_d del lazo interno r	45
3-4. <i>LGR</i> del sistema que sirve de base para el ajuste de las ganancias K_i y K_d del primer controlador $PI - D$	46
3-5. <i>LGR</i> del sistema en lazo abierto que sirve de base para el ajuste de la ganancia K_d del lazo interno r	47
3-6. <i>LGR</i> del sistema que sirve de base para el ajuste de las ganancias K_i y K_d del segundo controlador $PI - D$	47
3-7. Esquema para la simulación del controlador difuso.	48
3-8. Respuesta temporal del ángulo de rumbo obtenida con el controlador $PI - D$ difuso.	49
3-9. Señal de mando.	49
3-10. Respuesta temporal del ángulo de rumbo simulada con el controlador difuso y el MDNL de 3 <i>GDL</i>	50

INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos sumergibles (*Autonomous Underwater Vehicles, AUVs*) pertenecen al grupo de vehículos sumergibles no tripulados que portan consigo su propia fuente de energía y utilizan una unidad de cómputo para la ejecución de softwares y soluciones de control que les permiten llevar a cabo misiones y maniobras subacuáticas de manera precisa y económica sin intervención humana ([Fjellstad, 1994](#)).

Estos submarinos han abierto un amplio horizonte de aplicaciones desde hace varios años, cobrando cada día mayor protagonismo en distintas aplicaciones debido al mejoramiento en las tecnologías empleadas para su concepción. A su vez, constituyen una herramienta muy importante en las operaciones de ultramar y, específicamente, en la industria petrolera y gasífera se reconoce que con el empleo de estos vehículos se logra reducir los costos hasta en un 30 % ([Antonelli, 2008](#)).

Los *AUVs* presentan marcadas ventajas respecto a los vehículos tripulados ya que permiten una navegación más cercana al objeto de estudio, incrementan la velocidad de traslación debido a que no necesitan un cable que los una a alguna embarcación en la superficie, son más pequeños, de menor peso y requieren menor apoyo logístico de la superficie; características que les permiten la ejecución de misiones y maniobras subacuáticas con mayor precisión ([Acosta, 2008](#)).

Debido a las ventajas que su utilización proporciona, los *AUVs* han sido objeto de estudio para muchas instituciones y universidades ([Geridönmez, 2007](#); [Antonelli, 2008](#); [Fossen, 2011](#); [Cruz, 2012](#)). Específicamente en Cuba, el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (*CIDNAV*) y el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (*GARP*)

de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas se encuentran desarrollando un prototipo de *AUV* denominado *HRC – AUV* (Martínez, 2010; Garcia-Garcia, 2012; Valeriano-Medina, 2013).

Al igual que otros vehículos como aviones, automóviles y naves espaciales, los *AUVs* también requieren un mecanismo de control adecuado para completar sus misiones satisfactoriamente. Por tanto, para incorporar en un vehículo subacuático la capacidad de seguir trayectorias prefijadas de forma autónoma, se hace imprescindible el desarrollo de un sistema de control. A su vez, para conseguir este propósito, resulta necesario obtener una representación dinámica del vehículo lo más exacta posible.

La dinámica de los *AUVs*, generalmente es representada por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de movimiento para lo cual se necesita determinar un conjunto de coeficientes, variables en muchos casos. Además, en la práctica existen frecuentes cambios en los requerimientos de diseño y pueden existir variaciones abruptas en algunas variables, o estas pueden cambiar o fluctuar de manera drástica. En estas condiciones, las características no lineales de la respuesta transiente se hacen presentes y el esquema de control propuesto puede que no opere adecuadamente. Para cubrir estas condiciones dinámicas se deben considerar esquemas de modelado o control avanzados que sean capaces de tomar en cuenta dichas interacciones irregulares o no lineales (Kim, 2002; Fernandez, 2012; Cruz, 2012)

Las no linealidades presentes en el modelo dinámico, junto con las incertidumbres que incorporan los coeficientes hidrodinámicos, hacen de los vehículos subacuáticos sistemas retadores a la hora de modelar y controlar. Existen distintos métodos para determinar los parámetros de los modelos:

- Experimentación con modelos a escala (Perez, 2006). Este método requiere la realización de experimentos en canales de pruebas con características ideales, lo cual no es posible para el caso particular del *HRC – AUV*.

- Métodos numéricos de dinámica de fluidos (*CFD* y *CAD*) (Kim, 2002). Estos métodos están basados en aproximaciones numéricas de la dinámica de fluidos, los cuáles requieren alta potencia de cálculo de las computadoras.
- Métodos de identificación (Miskovic, 2008). Con estos métodos se utilizan datos de entrada-salida recopilados en experimentos en el mar, pero no permiten realizar interpretaciones físicas.
- Métodos analíticos y semi empíricos (daSilva, 2007). Estas técnicas ofrecen la posibilidad de calcular el modelo, combinando la solución analítica de las ecuaciones matemática con los resultados que se obtienen en experimentos sencillos que se realizan con el vehículo. Esta es la variante que se emplea para el *HRC – AUV* (Valeriano-Medina, 2013).

Las técnicas de control comenzaron a utilizarse en vehículos marinos en 1908. Resulta interesante conocer que la estrategia de control basada en *PID* fue utilizada por primera vez en 1929. Desde ese momento, el control constituye un elemento indispensable de los autopilotos que aseguran el comportamiento autónomo de estos vehículos. Posteriormente, de manera gradual y junto a la profundización del estudio para implementar un mejor control de plantas complejas como los *AUVs*, emerge la necesidad de aplicar estrategias no lineales de control (Slotine, 1991).

El tema del control no lineal constituye un área importante del control automático. Anteriormente, la aplicación de métodos de control no lineal había estado limitada por la dificultad computacional, sin embargo, los avances en la tecnología de cómputo han venido a solucionar este impedimento y el tema del diseño de control no lineal para un amplio rango de operación ha atraído la atención de los diseñadores. Las estrategias no convencionales de control más utilizadas en vehículos de este tipo son: Control Inteligente, Control Robusto, Control Adaptable y Control Deslizante (Fernandez, 2012).

La investigación sobre control inteligente nace motivada por la necesidad de lograr mejoras en el control de sistemas reales inherentemente complejos, no lineales y/o sujetos a incertidumbre elevada, donde ha fallado la aplicación de las técnicas convencionales de modelado y control.

El Control Inteligente está constituido por un grupo de herramientas basadas en técnicas de inteligencia artificial, fundamentalmente lógica difusa y redes neuronales, que han sido aplicadas por varios investigadores en el control automático de sistemas y, específicamente, en el control de *AUVs* (Kim, 2001).

La lógica difusa ha sido también empleada para modelar, ya que esta ofrece solución al modelado de sistemas en que no son aplicables eficientemente las técnicas convencionales debido a la falta de precisión y conocimiento formal del sistema. En tal sentido, existen trabajos en que se emplea la lógica difusa para obtener, además del controlador, el modelo dinámico no lineal de un submarino (Chang, 2003).

Situación Problémica

El *HRC-AUV* es un vehículo que emplea sensores y arquitectura de hardware de bajo costo, complementado con soluciones complejas en el campo del modelado, control y navegación (Martínez, 2010). El sistema de control es la función principal de los autopilotos y requiere de un modelo que describa fielmente la dinámica del vehículo subacuático. Hasta este momento, se cuenta con el modelo dinámico no lineal del *HRC-AUV* y han sido diseñados sistemas de control convencionales para el rumbo y la profundidad. Sin embargo, con el aumento de las exigencias para el correcto funcionamiento del *HRC-AUV*, se hace necesario continuar investigando en técnicas avanzadas de modelado y control.

Hipótesis

Las técnicas difusas brindan la posibilidad de obtener un modelo dinámico del vehículo que asegura exactitud a pesar de las incertidumbres existentes en distintos parámetros

propios del modelo. Por esta razón, en esta investigación se utilizarán estas técnicas para la obtención del modelo dinámico del vehículo en el plano horizontal, a partir del cual se diseñará un controlador difuso.

A partir de estos antecedentes, el **objetivo general** del presente trabajo es:

Analizar la factibilidad del diseño de un controlador difuso de rumbo para el *HRC-AUV* basado en un modelo dinámico difuso.

Para lograr este objetivo se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificar en la literatura especializada las técnicas de modelado y control difuso más empleadas en vehículos autónomos subacuáticos.
- Seleccionar las técnicas de modelado y control difuso a utilizar en el *HRC – AUV*.
- Obtener el modelo dinámico del *HRC – AUV* en el plano horizontal utilizando lógica difusa.
- Evaluar mediante simulación la calidad del modelo dinámico difuso del *HRC – AUV* en el plano horizontal.
- Utilizar el modelo dinámico difuso del *HRC – AUV* para el diseño de un controlador difuso de rumbo.
- Evaluar mediante simulación el controlador difuso diseñado para el *HRC – AUV*.

Esta investigación constituye un paso de avance en el estudio del modelado y control del *HRC-AUV*, formando parte del proyecto de colaboración existente entre el *CIDNAV* y el *GARP*. Los resultados obtenidos están dirigidos a demostrar la factibilidad de la aplicación de técnicas difusas para el diseño de un autopiloto basado en modelo. El controlador difuso constituirá una nueva propuesta de control a evaluar para su implementación como autopiloto en el *HRC-AUV*. Las técnicas de modelado y control que se proponen poseen aplicación práctica y teórica para las instituciones donde se investiga con sistemas de este tipo.

Metodología de Trabajo:

Para el desarrollo de esta investigación se establece la siguiente metodología de trabajo:

- Construcción del marco teórico de referencia de la investigación relacionado con el modelado y control difuso de *AUVs*.
- Selección de las herramientas y técnicas de modelado y control difuso a aplicar.
- Descripción de las ecuaciones analíticas que caracterizan el movimiento del vehículo en el plano horizontal.
- Definición de las funciones de membresía del modelo difuso.
- Definición de las reglas para el modelo difuso.
- Simulación del modelo difuso.
- Comparación del modelo difuso con el modelo analítico del *HRC – AUV*.
- Cálculo de las funciones de membresía y definición de las reglas del controlador difuso en función del modelo.
- Simulación del sistema de control difuso.
- Análisis de la robustez del sistema de control difuso.

Estructura y contenido de la tesis

En la Introducción queda definida la importancia, actualidad y necesidad del tema que se aborda y se dejan explícitos los elementos del diseño teórico de la investigación.

La investigación incluirá tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordarán en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo I: Análisis crítico de la literatura especializada consultada. Elección de la técnica de modelado y control difuso a aplicar en el *HRC – AUV*. Presentación de los principales conceptos que se tratan en este trabajo.

Capítulo II: Presentación de las ecuaciones dinámicas que rigen el movimiento del *HRC – AUV* en el plano horizontal. Conceptos, definiciones y aspectos de interés

esenciales referidos a la técnica de modelado difuso que se aplicará en el *HRC – AUV*. Simulación del modelo difuso del *HRC – AUV* en el plano horizontal.

Capítulo III: Diseño del controlador difuso a partir del modelo difuso del *HRC – AUV* en el plano horizontal. Simulación del controlador difuso diseñado. Presentación del análisis económico.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA EN EL MODELADO Y CONTROL DE *AUVS*

1.1. Introducción

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (*AUVs*) se han convertido en una herramienta novedosa para los investigadores, ya que estos tienen aplicaciones en diferentes esferas investigativas. En este Capítulo se analiza como se aplican las técnicas difusas en el modelado y control de vehículos subacuáticos. Este análisis se sustenta en las ventajas que se obtienen al aplicar estas técnicas en diversos vehículos marinos.

1.2. Evolución y desarrollo de los *AUVs*

Los vehículos autónomos subacuáticos (*Autonomous Underwater Vehicles, AUVs*) pertenecen al grupo de vehículos sumergibles no tripulados que portan consigo su propia fuente de energía, utilizan una unidad de cómputo para la ejecución de software y soluciones de control, que les permiten llevar a cabo misiones y maniobras subacuáticas de manera precisa y sin intervención humana (Fjellstad, 1994). Los *AUVs* son vehículos relativamente pequeños y auto-propulsados, que pueden operar totalmente bajo agua lejos del alcance del algún centro de control y comunicación.

Los *AUVs* son de gran importancia debido a las diversas aplicaciones a nivel mundial que pueden tener. A lo largo de los años los *AUVs* han sido tema de marcado interés investigativo para varias instituciones en todo el planeta, entre las que se encuentran: el “Instituto de Problemas Tecnológicos Marinos de la Academia Rusa de Ciencias del

Lejano Oriente” (Inzartsev, 2008), la “Agencia de ciencia y tecnología de tierra y mar” en Japón (Yoshida, 2008). Por otra parte, se reportan los estudios realizados por universidades como la “Universidad Nacional del Sur” (UNS) en Argentina (Jordán, 2008), la “Universidad de Oporto” en Portugal (Ramos, 2008), la “Universidad BEIHANG” en China (Li, 2008), la “Universidad de Zagreb” en Croacia (Miskovic, 2008) y la “Universidad de Newcastle” en Australia (Pérez, 2008). De manera particular sobresalen los resultados obtenidos por la “Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología” (NTNU), con aportes significativos reflejados en libros y artículos reconocidos por la comunidad científica (Fossen, 1994, 2002, 2006, 2011).

1.3. Ventajas y aplicaciones de los AUVs

Los AUVs se han convertido en una herramienta muy importante en las operaciones de ultramar, lo que se debe principalmente a que han aumentado su rango de operación. Con el empleo de estos vehículos es posible navegar cerca de un objetivo determinado a una mayor velocidad de traslación y sin conexión directa alguna con la estación en superficie. De este modo, al ser un submarino no tripulado, requiere menor apoyo logístico y cumplimenta las misiones y maniobras subacuáticas con mayor precisión y racionalidad (Acosta, 2008).

La independencia que poseen con respecto al hombre les permite disminuir el riesgo de error humano les garantiza seguridad en el cumplimiento de las misiones que le son encomendadas.

Debido a las marcadas ventajas que su utilización proporciona, los AUVs se utilizan en múltiples esferas entre las que se encuentran:

- Industriales: supervisión de tuberías, mantenimiento de plataformas petrolíferas, inmersión en aguas poco profundas. En la industria petrolera y gasífera se reconoce que con el empleo de estos vehículos se logra reducir los costos hasta en un 30% (Antonelli, 2008).

- Científicas: monitoreo de volcanes marinos, seguimiento de peces y grandes mamíferos, recolección de datos sobre corrientes oceánicas y arqueología subacuática (Blidberg, 2001).
- Militares: exploración, detección y mapeo de minas (Blidberg, 2001).

1.3.1. Ejemplos de AUVs

Varios son los prototipos de AUVs que alrededor del mundo se utilizan en investigaciones científicas y aplicaciones industriales. Entre los más significativos se encuentran:

- El AUV *Hugin* (Gorset, 2007) (Figura 1-1), desarrollado por *Kongsberg Maritime* y por el *Forsvarets Forsknings Institute (FFI)* de Noruega. Está destinado al mapeo de alta precisión del fondo marino, la vigilancia y el reconocimiento de minas.

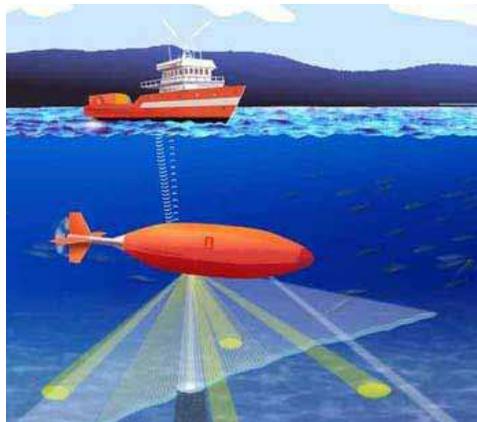


Figura 1-1: Imagen del AUV *Hugin*.

- El AUV *R – One* (Kim, 2002) (Figura 1-2) utilizado por la Universidad de Tokyo con fines científicos en el estudio y validación de estrategias de control a partir del uso óptimo de combustible.



Figura 1-2: Imagen del AUV *R – One*.

- El AUV *Remus* (*Remote Environmental Monitoring Units*) (Gorset, 2007) (Figura 1-3) se diseña bajo un programa cooperativo que involucra al *Naval Oceanographic Office*, al *Office of Naval Research* y la *Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)*. Se emplea en el mapeo del fondo marino, el monitoreo ambiental y en operaciones de búsqueda y rescate. Presenta un rango de operación en ambientes costeros de 100 a 6000 metros de profundidad.



Figura 1-3: Imagen del AUV *Remus*.

- El AUV *MARIUS* (Gorset, 2007) (Figura 1-4) desarrollado por *Marine Science and Technology (MAST)* y el *Programme of the Commission of the European Communities* con propósitos medioambientales y la adquisición de datos oceanográficos en aguas costeras. Está equipado con propulsores para el avance, además de timones laterales que le permiten estabilidad y a la vez realizar tareas de inmersión y emersión.



Figura 1-4: Imagen del AUV *MARIUS*.

1.4. Definiciones relacionadas con el modelado y control de vehículos marinos

Las no linealidades que caracterizan a los vehículos que operan en ambientes acuáticos, junto con las incertidumbres que incorporan varios de sus parámetros, hacen que estos sistemas sean retadores a la hora de modelar y controlar.

Una de las tareas más importantes para el correcto funcionamiento de un vehículo marino (*VM*) lo constituye la obtención del modelo dinámico. La mayor parte de los resultados y el cumplimiento satisfactorio de las misiones dependen de la precisión y exactitud del mismo. A partir del modelo dinámico, es posible diseñar algoritmos de control ([Lienard, 1990](#); [Fossen, 1994](#)), sistemas de tolerancia a fallos ([Antonelli, 2003](#)) y sistemas de navegación ([Hegrenaes, 2007](#)) que aseguren el comportamiento autónomo del vehículo.

A continuación se abordan los principales conceptos relacionados con el modelado y control de vehículos marinos.

1.4.1. Conceptos relacionados con el modelado de un vehículo marino

En muchas áreas de las ciencias y las ingenierías, el método más apropiado para representar la conducta de un proceso es plasmar su comportamiento en una representación matemática, un modelo del proceso.

Un modelo satisfactorio debe cumplir dos requerimientos contradictorios: debe ser lo suficientemente exacto para representar al sistema real y a su vez, lo suficientemente sencillo para permitir un análisis matemático práctico. Una vez que se tiene la representación matemática del proceso, se compara el comportamiento del sistema físico con la respuesta del modelo matemático. Si los comportamientos del sistema real y del modelo matemático son similares, se dice que bajo las condiciones del experimento, se tiene un modelo representativo del proceso ([Ura, 2004](#); [daSilva, 2007](#); [Valeriano-Medina, 2013](#)).

El modelado para la simulación del comportamiento de los vehículos marinos y el diseño de controladores para ellos, requiere la determinación de los coeficientes que expresan las relaciones, lineales y no lineales, de las fuerzas y momentos que actúan sobre el *VM* y sus actuadores con las aceleraciones y velocidades del vehículo. Los modelos dependen en gran medida del tipo de vehículo y de las maniobras para las que se diseña el control ([Cruz, 2012](#)).

Existen distintos métodos para determinar los parámetros de los modelos en estos vehículos:

- Experimentación con modelos a escala.
- Métodos analíticos y semi empíricos.
- Métodos numéricos de dinámica de fluidos (*CFD* y *CAD*).
- Métodos de identificación.

Estos métodos no son excluyentes entre sí y pueden utilizarse de forma combinada para determinar todos los parámetros del modelo.

La experimentación para obtener los modelos se puede realizar con, o sin, restricciones en el movimiento del vehículo. En ambos casos la embarcación es arrastrada en un estanque y se miden las fuerzas, velocidades y aceleraciones resultantes, y a partir de dichas medidas, mediante análisis de regresión, se determinan parámetros característicos del movimiento ([Perez, 2006](#)).

Los métodos semi-empíricos ([Fossen, 1994](#); [daSilva, 2007](#)) se basan en modelos analíticos obtenidos mediante principios físicos junto con valores numéricos obtenidos mediante ensayos o cálculo numérico.

Los métodos *CFD*, o métodos basados en aproximaciones numéricas de la dinámica de fluidos, están teniendo un gran auge debido a la mejora en los algoritmos y la potencia de cálculo de las computadoras. Se determina el campo de flujo del fluido en los movimientos del *VM* y se deducen las presiones que el fluido ejerce sobre la parte sumergida del *VM*, y las fuerzas y momentos que de ellas se derivan ([Kim, 2002](#)).

La identificación de sistemas, entendida como la construcción de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos ha adquirido gran importancia en la ingeniería de control automático. Diversas son las técnicas de este tipo que se

emplean para determinar modelos dinámicos de embarcaciones de distintos tipos ([Miskovic, 2008](#)). Generalmente los experimentos se realizan en canales de pruebas que no permiten las afectaciones provocadas por perturbaciones externas.

1.4.2. Conceptos relacionados con el control de un AUV

El control de vehículos marinos se inicia con la primera patente, en el año 1914, de un sistema automático de seguimiento del rumbo o autopiloto. En 1922 se introdujeron por primera vez los controladores con las acciones *PID*. Desde entonces se han ido utilizando distintas tecnologías de control para los vehículos marinos. El sistema de control de movimiento de un *VM* está integrado por tres sistemas: guiado, navegación y control ([Cruz, 2012](#)).

El sistema de guiado tiene como objetivo proporcionar de forma continuada al controlador el estado de las referencias necesarias para que el *VM* siga la ruta precisa. Una función secundaria de este sistema es la de proporcionar señales de aviso de colisión o de proximidad a tierra.

El sistema de control se puede considerar dividido en tres partes: observador de estado, controlador y sistema de distribución de las fuerzas de control en los actuadores. El controlador puede implementar distintas funciones o modos y, dependiendo del tipo de operación que vaya a realizar, puede seleccionar o combinar modos. Entre los más utilizados están: control de velocidad, autopilotos o controladores de rumbo, controladores dinámicos de la posición, estabilizadores de alabeo y cabeceo.

El sistema de navegación es el encargado de dirigir y determinar la posición, curso y trayectoria de un vehículo ([Fossen, 2011](#)). Utiliza sensores que proporcionan la información necesaria del exterior, con la cuál, el vehículo debe ser capaz de evitar obstáculos, rechazar perturbaciones y adaptarse a las distintas situaciones que puedan aparecer.

Los sistemas de control empleados en vehículos subacuáticos se dividen en dos grandes grupos, aquellos que utilizan controladores convencionales y otros que emplean estrategias de control no lineales.

Los controladores convencionales son los más usados a nivel mundial, ya que son muy sencillos y garantizan la estabilidad del sistema. Son numerosos los vehículos que tienen implementados alguna de las variantes del control convencional, destacando los algoritmos basados en *PID* (Kim, 2002; Jalving, 1994; Radzak, 2005; Geridönmez, 2007). Estos controladores garantizan un adecuado desempeño del sistema a partir de lograr un correcto procedimiento de ajuste. Sin embargo, presentan como limitante la necesidad de mantener al sistema de control próximo a un punto de operación, si este, por algún motivo, sale de dicho punto de operación el sistema pierde calidad en el desempeño. A partir de lo antes planteado se puede afirmar que los controladores lineales no son capaces de asegurar, en todo momento, el alto grado de exactitud y precisión que se exige en las diferentes misiones que se ejecutan con este tipo de vehículo.

Los controladores no lineales pueden manejar directamente las no linealidades en un amplio rango de operación, mientras que el control lineal parte de un pequeño rango de operación válido para el modelo lineal. Otra suposición del control lineal es que el modelo del sistema es linealizable, sin embargo, en los sistemas de control existen no linealidades que no permiten aproximación lineal alguna. También, el control lineal puede requerir actuadores y sensores de alta calidad para producir un comportamiento lineal en el rango de operación especificado, mientras que el control no lineal puede permitir el uso de componentes menos costosos con características no lineales (Slotine, 1991).

El tema del diseño de control no lineal para un amplio rango de operación atrae la atención de los diseñadores, debido por una parte a la existencia en la actualidad de poderosos microprocesadores que permiten que la implementación de controladores no

lineales resulte relativamente simple, y por otro lado, a las aplicaciones sofisticadas que están apareciendo con requisitos de alta velocidad de respuesta y precisión. Las estrategias no convencionales de control más utilizadas en vehículos subacuáticos son: Control Inteligente, Control Robusto, Control Adaptable y Control Deslizante (Fernandez, 2012).

El tema del control no lineal constituye entonces un área importante y abierta a la investigación en los *AUVs*. Dentro de este campo sobresale por sus ventajas la aplicación de la lógica difusa en el modelado y control de estos vehículos.

1.5. Modelado y control de sistemas inteligentes

El empleo de las técnicas de inteligencia artificial, y específicamente de los sistemas borrosos, en diferentes esferas de aplicación constituye actualmente un tema casi obligado en varios eventos de carácter científico a escala mundial.

Las técnicas para el diseño de sistemas de control están actualizándose continuamente para poder ofrecer el nivel de precisión requerido por las nuevas aplicaciones y dar cumplimiento a los requisitos que surgen constantemente, dados por el aumento de las restricciones medioambientales, los costos de los materiales y de la energía, las demandas de sistemas más robustos y tolerantes a fallos. Estas consideraciones introducen necesidades extras para las técnicas de modelado de procesos.

Ante esos requerimientos, la teoría de control ha creado técnicas avanzadas para resolver parte de los problemas planteados, como el control robusto, el control adaptativo, el control predictivo, entre otras. Sin embargo, cuando el modelo presenta parámetros con un alto grado de incertidumbre o simplemente no se dispone de un modelo matemático del proceso, suele recurrirse a otras herramientas como sistemas borrosos (razonamiento y conocimiento experto), redes neuronales (aprendizaje, adaptación, procesamiento paralelo) y algoritmos genéticos (optimización) (Martínez, 2007).

El área de investigación del modelado y el control inteligente nace motivada por la necesidad de lograr mejoras en el control de sistemas reales inherentemente complejos, no lineales y/o sujetos a incertidumbre elevada en su modelado, donde ha fallado la aplicación de las técnicas convencionales de modelado y control. Los sistemas borrosos, junto a otras técnicas de la inteligencia artificial (*IA*), han sido reconocidos como herramientas eficaces para estos casos.

Muchos sistemas industriales presentan características complejas que han motivado la aplicación de las modernas herramientas de la *IA* en el modelado y control de distintos procesos. En la actualidad, el desarrollo de estrategias de identificación y control inteligente en tiempo real para procesos complejos constituye un área de investigación mundial.

Dentro de la *IA*, la teoría de los conjuntos borrosos ([Zadeh, 1965](#)), y en específico, los sistemas de inferencia borrosos (*SIB*) ([Mamdani, 1977](#); [Takagi, 1985](#)), reciben actualmente una gran atención en la construcción de modelos dinámicos para representar procesos complejos al ser aproximadores universales de funciones continuas.

1.5.1. Modelado basado en lógica difusa

El modelado de sistemas dinámicos utilizando técnicas borrosas es una de las áreas que mayor atención ha recibido dentro de la identificación inteligente. Este ofrece solución al modelado de sistemas en que no son aplicables eficientemente las técnicas convencionales debido a la falta de precisión y conocimiento formal del sistema, a comportamientos fuertemente no lineales, altos grados de incertidumbres y/o a características variantes con el tiempo.

El modelado borroso, como método de identificación de sistemas no lineales, comienza a emerger con fuerza en la década de 1990 ([Sugeno, 1993](#)). A partir de estos primeros

avances ha existido un gran crecimiento en la actividad investigativa enfocada al desarrollo de métodos de construcción y/o actualización automática de modelos borrosos a partir de datos numéricos (Chang, 2003; Hassanein, 2011).

Los sistemas de inferencia borrosos (*SIB*), o simplemente sistemas borrosos, pueden ser vistos como modelos lógicos que utilizan reglas condicionales (*if*(expresión)-*then*(relación conclusión)) para establecer relaciones cualitativas entre las variables en el modelo. Esta naturaleza basada en reglas hace a los modelos transparentes para la interpretación y el análisis. En el nivel computacional, estos sistemas son considerados estructuras matemáticas flexibles que pueden aproximar una gran cantidad de sistemas continuos no lineales complejos al nivel de exactitud deseado.

Entre las arquitecturas de (*SIB*) más populares se encuentra la de *Takagi – Sugeno* (*TS*) (Takagi, 1985), la cual proporciona una poderosa herramienta para el modelado de sistemas no lineales complejos. Esto se debe a que generalmente requieren de un pequeño número de reglas para describir procesos altamente no lineales, son sencillos y eficientes computacionalmente y además, posibilitan la aplicación de determinadas técnicas de modelado lineales (Babuska, 1998).

Las metodologías de modelado e identificación borrosas, junto a otras técnicas relacionadas como las redes neuronales y los algoritmos genéticos, han sido empleadas exitosamente en varias aplicaciones actuales y utilizadas como poderosas herramientas que facilitan el desarrollo efectivo de modelos (Babuska, 1998; Chang, 2003).

1.5.2. Control Inteligente basado en lógica difusa

El Control Inteligente constituye un grupo de herramientas basadas en lógica difusa y redes neuronales que han sido aplicadas por varios investigadores en el control (Ishaque, 2010; Torres-Pinzón, 2011).

El primer trabajo sobre los conjuntos difusos fue elaborado, por *Lofti Zadeh* en 1965 en la *Universidad de Berkeley*. El profesor *Zadeh* es considerado el padre de este campo.

Este trabajo representó un avance en el concepto de razonamiento aproximado para la toma de decisiones efectivas sobre la base de información lingüística imprecisa.

La lógica difusa (*FL*, por sus siglas en inglés) se origina en el deseo de emular la forma del razonamiento humano que es aproximado, no cuantitativo y lingüístico.

La *FL* provee una estructura de inferencia que posibilita apropiadas capacidades de razonamiento humano. Por el contrario, la teoría de conjuntos binarios tradicional describe eventos precisos, eventos que ocurren o no ocurren. Usa la teoría de la probabilidad para explicar si un evento ocurre o no, mide la posibilidad de que un evento dado pueda ocurrir. La utilidad de los conjuntos difusos está en su habilidad para modelar incertidumbre o datos ambiguos, que a menudo se encuentran en la vida real.

El control difuso describe en términos de reglas *If-Then*, las acciones de control correspondientes a condiciones particulares del sistema. Los conjuntos difusos son utilizados para definir el significado de los valores cualitativos de entrada y salida del controlador. La lógica difusa puede capturar la naturaleza continua del proceso de decisión de los humanos y mejorar los métodos basados en la lógica binaria (ampliamente utilizados en los controladores industriales).

En muchos casos los controladores difusos son utilizados directamente en el lazo de realimentación. Sin embargo, estos pueden ser utilizados en el nivel de supervisión, como dispositivos de auto-ajuste en los controladores *PID* convencionales. Además, los controladores difusos no solo son usados para expresar directamente el conocimiento a priori del proceso sino que pueden ser derivados a partir de modelos difusos obtenidos a través de un sistema de identificación.

Los controladores difusos más utilizados son ([Martínez, 2007](#)):

- Controladores *Mamdani*, usualmente usados directamente como controlador en lazo cerrado.
- Controladores *Takagi-Sugeno*, típicamente usados como un controlador supervisor.

1.6. Aplicaciones de técnicas difusas en el modelado y control de AUVs.

Numerosas son las aplicaciones que se reportan en la literatura especializada referidas a la aplicación de la lógica difusa en el modelo y control de AUVs.

Hassanein y colaboradores obtienen un modelo y control difuso para un vehículo autónomo subacuático ([Hassanein, 2011](#)). En este trabajo primeramente se utiliza la técnica difusa para obtener mediante identificación el modelo no lineal de 6 *GDL* (Grados De Libertad) del AUV. La dinámica del vehículo se representa como una caja negra que recoge la relación entre la entrada y la salida del sistema. Luego se diseña un sistema de control difuso para el guiado con el propósito de alcanzar los valores de velocidad y posición deseada.

Un controlador neuro-difuso es utilizado en el control del vehículo *ODIN* ([Kim, 2001](#)). Esta variante intenta aprovechar las ventajas que ofrecen la lógica difusa y las redes neuronales. De esta manera a partir de reglas difusas iniciales dadas por un operador, o automáticamente generadas por un controlador, el vehículo podrá adquirir los parámetros del control sin intervención humana, tomando en consideración para ello las características de los sensores instalados y del ambiente donde opera.

En la investigación realizada por *Kanakakis* y colaboradores ([Kanakakis, 2001](#)) se diseña un controlador difuso para el AUV *Phoenix* perteneciente al *Naval Postgraduate School (NPS)*. El propósito de este controlador es lograr la navegación autónoma del vehículo en el océano. La velocidad del vehículo, su dirección y profundidad se controlan simultáneamente en pruebas simuladas considerando la presencia de las corrientes marinas.

Guo y otros autores ([Guo, 1996](#)) proponen un control difuso que utiliza algoritmo genético para optimizar las funciones de membresía.

Sayyaadi ([Sayyaadi, 1999](#)) presenta un sistema de control basado en un algoritmo genético adaptativo neuro-difuso (AGAND) para un vehículo remotamente operado (*ROV*, por sus siglas en inglés) con 4 *GDL*.

En el artículo “*Model-based fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicles in the horizontal plane*”, de *Chang*, y otros autores ([Chang, 2003](#)) se utilizan las reglas de *Takagi – Sugeno* para el diseño de un controlador difuso basado en un modelo no lineal que describe la dinámica del vehículo en el plano horizontal. La idea principal del diseño consiste en derivar cada regla de control a fin de compensar cada regla del modelo difuso.

Para esta investigación se toma como base la metodología recomendada por *Chang* ([Chang, 2003](#)). En el esquema que aparece en la Figura 1–5 se presentan los pasos a seguir para el diseño del control difuso de rumbo del *HRC-AUV* basado en modelo.

El modelo no lineal de 3 *GDL* para el plano horizontal se toma como representación dinámica más exacta del vehículo. A partir de esta representación se define el modelo difuso del tipo *Takagi-Sugeno* formado por estructuras lineales en espacio de estado. Las estructuras lineales del modelo difuso se determinan estableciendo cuatro reglas dependientes de las funciones de membresías. Para el diseño del sistema de control difuso se emplean las mismas funciones de membresías definidas para el modelo. Para cada estructura lineal se diseña un controlador. *Chang* propone ajustar las ganancias de los controladores utilizando la técnica *LMI* (*Linear Matrix Inequality*), sin embargo en este trabajo se propone utilizar controladores *PI – D* (Proporcional Integral Derivativo) sintonizados mediante la técnica de asignación de ceros y polos.

Las perturbaciones marinas que más afectan el desempeño de los vehículos subacuáticos son las corrientes marinas y el oleaje. Estas perturbaciones incorporan incertidumbres en los modelos pero sus efectos no se tendrán en cuenta en esta investigación.

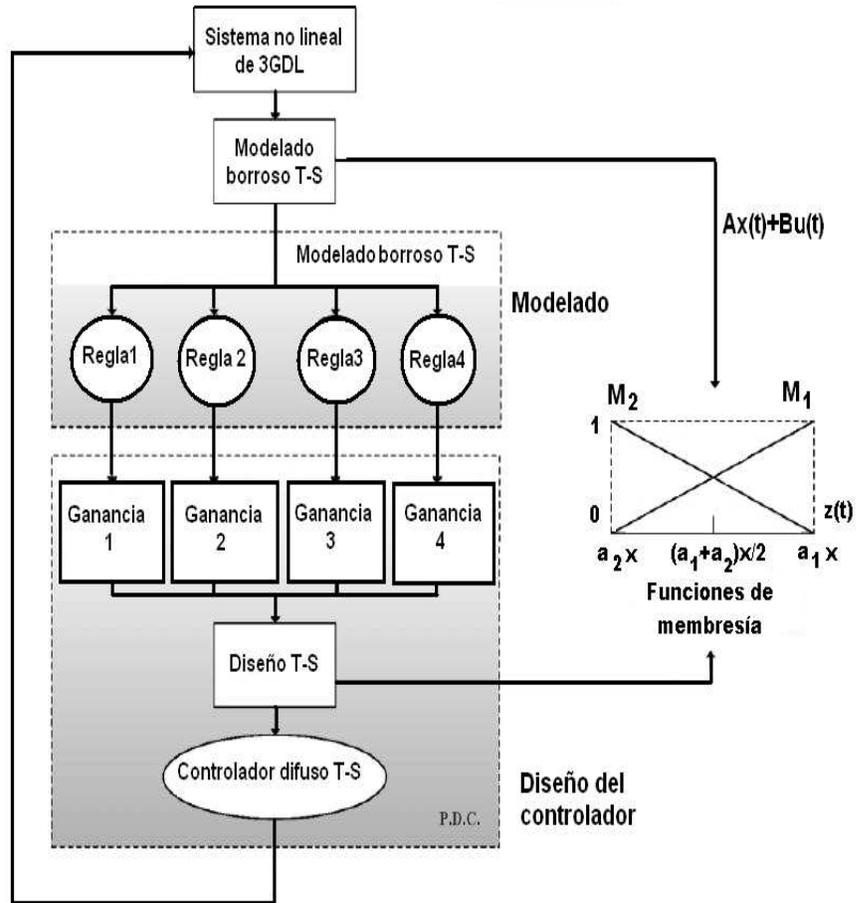


Figura 1-5: Esquema para el diseño de un controlador difuso basado en un modelo difuso.

1.7. Consideraciones finales.

Los vehículos autónomos subacuáticos son de gran importancia debido a las diversas aplicaciones a nivel mundial que pueden tener. A lo largo de los años estos han sido tema de marcado interés investigativo para varias instituciones en todo el planeta. En Cuba esta temática comienza a convertirse en una línea de investigación de creciente interés con el desarrollo del proyecto *HRC-AUV*.

La introducción de nuevas técnicas de control aplicadas en vehículos marinos ha contribuido a solucionar limitaciones que impone el ecosistema marino en la operación de estos vehículos. El modelado y control de sistemas dinámicos utilizando técnicas borrosas ofrece solución a sistemas en que no son aplicables eficientemente las técnicas convencionales debido a la falta de precisión y conocimiento formal del sistema, a

comportamientos fuertemente no lineales, altos grados de incertidumbres y/o a características variantes con el tiempo.

Atendiendo al alto grado de incertidumbres que presenta la dinámica del *HRC-AUV* y el propósito de *GARP* de contar con la mejor versión posible de autopiloto, en esta investigación se pretende diseñar un controlador difuso para el control del rumbo a partir de un modelo, también difuso, del tipo *Takagi-Sugeno*, que describa la dinámica del vehículo en el plano horizontal.

CAPÍTULO 2

MODELO DINÁMICO BORROSO PARA EL MOVIMIENTO DEL *HRC-AUV* EN EL PLANO HORIZONTAL

Los vehículos autónomos subacuáticos se caracterizan por ser sistemas complejos para modelar, debido a las características no lineales que presentan, al alto grado de incertidumbre de sus parámetros y al efecto adversos de las perturbaciones marinas. Las técnicas de modelado difuso aplicadas en este tipo de vehículos permiten obtener representaciones dinámicas que luego pueden ser empleadas en el diseño de controladores.

En este Capítulo se obtiene un modelo difuso de 3 *GDL* que determina el comportamiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal. Este modelo se basa en la arquitectura de *Takagi – Sugeno*, posibilitando contar con una combinación de estructuras lineales que abarcan todo el rango de operación de submarino. El modelo difuso se evalúa mediante simulación con el modelo analítico de 3 *GDL* del *HRC-AUV* que representa la planta física.

2.1. Modelo dinámico no lineal de 3 *GDL* que describe el movimiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal.

Todas las metodologías para la síntesis y sintonía de reguladores requieren de un modelo con vistas a lograr el comportamiento autónomo del *AUV*. En el caso del *HRC-AUV* se cuenta con un modelo no lineal de 6 *GDL* que ha sido validado mediante pruebas experimentales ([Valeriano-Medina, 2013](#)). A partir de este modelo es posible obtener

Modelo dinámico borroso para el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal 25 representaciones dinámicas simplificadas del movimiento del vehículo en los distintos planos.

2.1.1. Sistemas de coordenadas y notación utilizada.

El movimiento de un submarino en el mar se describe respecto a un sistema de referencia inercial. Debido a que la rotación de la Tierra afecta muy poco a los vehículos marinos de baja velocidad puede considerarse que un sistema de referencia situado en tierra (OE), es un sistema inercial cuyos ejes de coordenadas x_E , y_E y z_E están direccionados hacia el Norte, el Este y centro de la Tierra respectivamente (Fossen, 1994).

En la Figura 2-1 se representan los sistemas de coordenadas y la notación para los movimientos de traslación y rotación del vehículo. La posición y orientación del vehículo son referidas a (OE), mientras que las velocidades lineales y angulares están asociadas a un sistema de coordenadas móvil situado en el vehículo (OB). La transformación de coordenadas entre un sistema de referencia y otro se realiza utilizando los ángulos de Euler (Fossen, 2006).

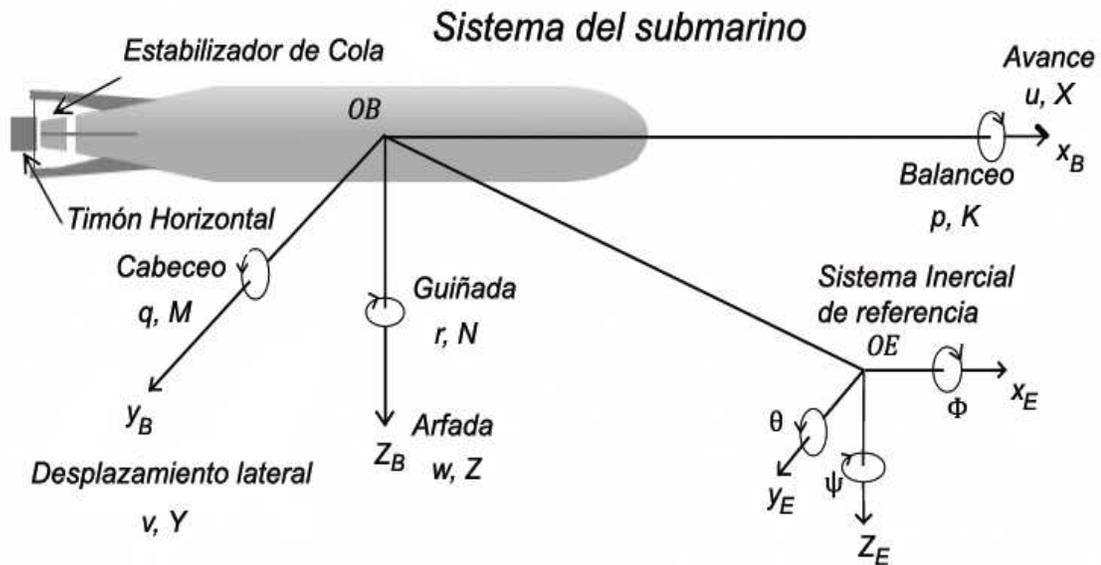


Figura 2-1: Sistemas de coordenadas para un AUV.

El origen del sistema de coordenadas del *HRC-AUV* se elige coincidiendo con el Centro de Flotabilidad (*CB*), aprovechando que usualmente tanto el Centro de gravedad (*CG*) como el (*CB*) están situados en los planos de simetría del vehículo.

La Tabla 2-1 resume la nomenclatura utilizada para describir el movimiento del móvil, así como las fuerzas y los momentos que actúan sobre el mismo (SNAME, 1950).

Tabla 2-1: Nomenclatura utilizada en el *HRC-AUV*.

Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
Avance	X	u	x
Desplazamiento lateral	Y	v	y
Arfada	Z	w	z
Rotación	Momento	Velocidad angular	Ángulo
Balanceo	K	p	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

2.1.2. Cálculo de los parámetros del modelo no lineal de 3 GDL a partir de las ecuaciones dinámicas.

El movimiento en el plano horizontal de embarcaciones marítimas se describe en función del avance, del desplazamiento lateral y del ángulo de guiñada del vehículo. Esto implica que la dinámica asociada a los términos z , ϕ y θ puede ser no tenida en cuenta, de manera que $w = p = q = 0$ (Fossen, 2002). Los estados de interés en este plano son: la posición lineal (x), la posición lineal (y) y la posición angular (ψ).

A partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares referidos a un sistema inercial pueden obtenerse las ecuaciones que describen el movimiento de un VM en el espacio tridimensional. Fossen demuestra que la segunda ley de Newton puede expresarse para cualquier vehículo subacuático con un sistema de coordenadas fijo al cuerpo de la forma (Fossen, 1994, 2002, 2011):

$$\underbrace{M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{M_A\dot{\nu} + C_A(\nu)\nu + D(\nu)\nu}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{g(\eta)}_{\text{términos hidrostáticos}} = \tau \quad (2.1)$$

La ecuación anterior se puede representar de forma compacta como:

$$\mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.2)$$

donde $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ representa a la matriz de inercia (incluida las masas añadidas) determinada a partir de la configuración de simetría del vehículo y considerando la estructura del AUV similar a un elipsoide alargado con distribución de masa uniforme. Las matrices $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu})$ y $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ representan a la matriz de Coriolis incluyendo las masas añadidas y a la matriz de amortiguamiento respectivamente. El término $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ es el vector de momentos gravitacionales y de flotabilidad y depende de la distancia entre el (CB) y el (CG), cuyas componentes para los estados (x, y, ψ) son cero. Finalmente $\boldsymbol{\tau} = [\tau_X, \tau_Y, \tau_N]^T$ representa al vector de entradas de control.

Los términos del modelo dinámico de 3 GDL no lineal para el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal, acorde a la ecuación 2.1, pueden ser planteados a partir de las siguientes expresiones:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{M}_A = -diag\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}\} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv \\ 0 & 0 & mu \\ mv & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -diag\{X_u + X_{u|u}|u|, Y_v, N_r\} \quad (2.7)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La ecuación 2.1 puede descomponerse en función de las derivadas del vector velocidad $\dot{\mathbf{v}} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]^T$ como:

$$\dot{u} = \frac{X_u + X_{u|u}|u|}{m - X_{\dot{u}}}u + \frac{m - Y_{\dot{v}}}{m - X_{\dot{u}}}vr + \frac{b_1}{m - X_{\dot{u}}}|n|n \quad (2.9)$$

$$\dot{v} = -\frac{m - X_{\dot{u}}}{m - Y_{\dot{v}}}ur + \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}}v + \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}}\delta_T \quad (2.10)$$

$$\dot{r} = \frac{Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}uv + \frac{N_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}r + \frac{b_5}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}\delta_T \quad (2.11)$$

Las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11 se pueden agrupar en forma de espacio de estado ($\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$) como:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_u + X_{u|u}|u|}{m - X_{\dot{u}}} & \frac{m - Y_{\dot{v}}}{m - X_{\dot{u}}}r & 0 \\ -\frac{m - X_{\dot{u}}}{m - Y_{\dot{v}}}r & \frac{Y_v}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 \\ \frac{Y_{\dot{v}} - X_{\dot{u}}}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}v & 0 & \frac{N_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_1}{m - X_{\dot{u}}} & 0 \\ 0 & \frac{b_2}{m - Y_{\dot{v}}} \\ 0 & \frac{b_5}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

donde $\mathbf{x} = [u, v, r]^T$ representa los estados y $\mathbf{u} = [|n|n, \delta_T]$ son las entradas de control.

En las Tablas 2-2 y 2-3 se presentan los parámetros geométricos, inerciales y experimentales del *HRC-AUV* que intervienen en la dinámica del plano horizontal (Valeriano-Medina, 2013).

Tabla 2-2: Valores geométricos e inerciales del *HRC-AUV*.

Parámetros	Descripción	Valor
m	masa	4094,56 kg
u_0	velocidad crucero	1,9 m/seg
n	revoluciones de la hélice	52,36 rad/s
I_{zz}	momento de inercia	20816 kgm ²
δ_T	ángulo de deflexión timón horizontal	$\pm 30^\circ$

Tabla 2-3: Resumen de los parámetros identificados y estimados para el *HRC-AUV*.

Parámetros	Descripción	Valor
$X_{\dot{u}}$	Masa Añadida	250,84 kg
$Y_{\dot{v}}$	Masa Añadida	3 834 kg
$N_{\dot{r}}$	Masa Añadida	15 572 kgm ²
X_u	Término lineal de amortiguamiento	$-181,45 \frac{N}{m/s}$
Y_v	Término lineal de amortiguamiento	$-1219,8 \frac{N}{m/s}$
N_r	Término lineal de amortiguamiento	$-9096,9 \frac{Nm}{rad/s}$
$X_{u u }$	Término cuadrático de amortiguamiento	$-47,49 \frac{N}{m^2/s^2}$
b_1	Coficiente de ganancia del actuador	$0,1946 \frac{N}{(rad/s)^2}$
b_2	Coficiente de ganancia del actuador	$318,39 \frac{N}{rad}$
b_5	Coficiente de ganancia del actuador	$1273,56 \frac{Nm}{rad}$

Sustituyendo los valores numéricos del vehículo en la ecuación 2.12 se llega a:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0707 & 0,0678r & 0 \\ -14,7518r & -4,6815 & 0 \\ 0,6833v & 0 & -1,7347 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 \\ 0 & 1,2219 \\ 0 & 0,2429 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

El modelo no lineal de 3 *GDL*, expresado mediante la ecuación 2.13, constituye una representación simplificada para el plano horizontal del modelo de 6 *GDL* y sirve de base para la obtención del modelo difuso. Por lo que en esta investigación se emplea como el equivalente dinámico del vehículo.

2.2. Modelado difuso.

Las imprecisiones del modelo dinámico no lineal del *HRC-AUV* están dadas por la incertidumbre de algunos de sus parámetros como son: los términos de masas añadidas, los términos de amortiguamiento y las ganancias de los actuadores. Estos parámetros con incertidumbre afectan considerablemente el comportamiento de las velocidades, específicamente v y r . La velocidad u se considera constante, siendo su valor igual al valor nominal considerando que el motor trabaja al máximo de su capacidad. Esta consideración es válida si se tiene en cuenta que u depende fundamentalmente de la fuerza de empuje del motor, que se caracteriza por su lenta variación en el tiempo.

Las incertidumbres en el modelo vienen dada por la dificultad a la hora de calcular los valores numéricos de los términos de masas añadidas, de amortiguamiento y de ganancias de los actuadores. Estos términos se determinan utilizando técnicas semi empíricas basadas en la geometría del vehículo y mediante la realización de experimentos en el mar, incorporando inexactitudes al modelo (Fossen, 1994; daSilva, 2007; Valeriano-Medina, 2013).

Los modelos difusos del tipo $T - S$ constituyen una herramienta poderosa para el modelado de sistemas complejos con incertidumbres en los parámetros, ya que permite la descomposición de un sistema no lineal en modelos lineales localmente válidos, apropiados para aplicar distintas técnicas de control.

2.2.1. Descripción del modelado basado en la arquitectura $T - S$.

El modelo $T - S$ describe un sistema no lineal por reglas *If-Then*, las cuales representan la dinámica local de cada implicación difusa a través de modelos lineales válidos en la región definida por el antecedente de cada regla. La Figura 2-2 describe un ejemplo donde dos ecuaciones lineales $a_1x(t)$ y $a_2x(t)$ ayudan a la linealización de la función no lineal $z(t)$. A partir de esta representación se pueden definir las funciones de membresía (FM) (Chang, 2003), toda vez que las mismas expresan, con valores entre 0 y 1, el

Modelo dinámico borroso para el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal 31

grado de pertenencia de las funciones lineales $a_1x(t)$ y $a_2x(t)$ a la función no lineal que se quiere modelar. Es decir, estas FM expresan que tanto se asemeja el comportamiento de cada función lineal a la no lineal en distintos puntos del intervalo analizado, donde el valor uno representa el mayor grado de pertenencia.

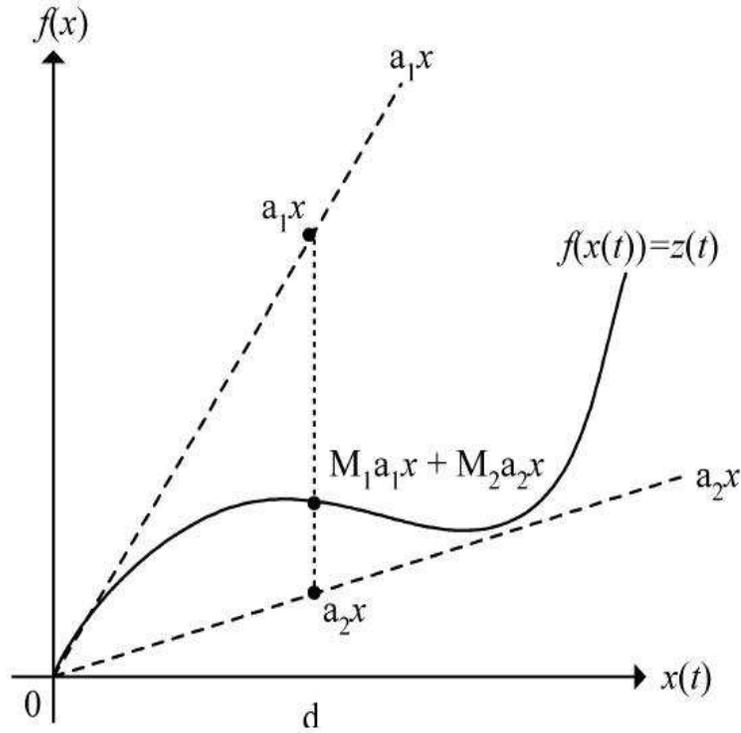


Figura 2-2: Estructuras geométricas.

El sistema no lineal mostrado en la Figura 2-2 puede representarse como:

$$f(x) = z(t) \in [a_1 a_2] x(t) = M_1(t) a_1 x(t) + M_2(t) a_2 x(t) \quad (2.14)$$

donde a_1 y a_2 son escalares constantes; $M_1(t)$ y $M_2(t)$ son las funciones de membresía.

Las funciones de membresía $M_1(t)$ y $M_2(t)$ quedan descritas como:

$$M_1(t) = \frac{z(t) - a_2 x(t)}{a_1 x(t) - a_2 x(t)}, M_2(t) = \frac{a_1 x(t) - z(t)}{a_1 x(t) - a_2 x(t)} \quad (2.15)$$

donde

$$M_1(t), M_2(t) \geq 0, M_1(t) + M_2(t) = 1$$

La Figura 2-3 muestra la descripción geométrica de las funciones de membresía.

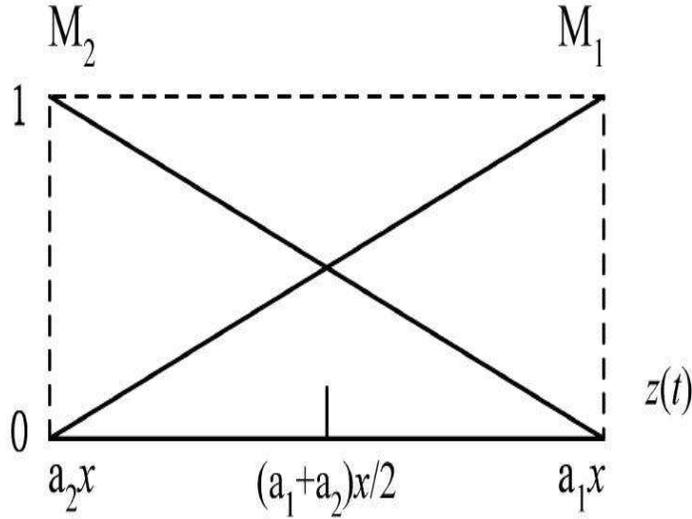


Figura 2-3: Funciones de membresía.

Las reglas *If-Then* que describen el modelo $T - S$ de un sistema no lineal se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\text{If } z_1(t) \text{ es } M_1, \dots \text{y } z_p(t) \text{ es } M_{ip}, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t), i = 1, 2, \dots, q. \quad (2.16)$$

donde M_{ip} son conjuntos difusos, i es el número de reglas del modelo, y p es el número de entradas del modelo.

La salida de cada regla queda representada en espacio de estado, donde $\mathbf{x}(t)$ es el vector de estado, $\mathbf{u}(t)$ es el vector de entrada, \mathbf{A}_i es la i -ésima matriz de estado, \mathbf{B}_i es la i -ésima matriz de entrada y $\mathbf{z}(t) = [z_1, z_2, \dots, z_p]$ es un vector de variables conocidas que pueden ser variables de estado, perturbaciones externas o sencillamente constantes.

Para una planta definida por un vector de estado $\mathbf{x}(t)$ y un vector de entrada de control $\mathbf{u}(t)$ las salidas del sistema difuso correspondiente pueden ser inferidas de la siguiente manera:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^q \omega_i(\mathbf{z}(t))}{\sum_{i=1}^q \omega_i(\mathbf{z}(t))} \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \} \quad (2.17)$$

que puede quedar expresada como:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^q h_i(\mathbf{z}(t)) \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \} \quad (2.18)$$

donde h_i es el peso normalizado:

$$\omega_i(\mathbf{z}(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)) \quad (2.19)$$

$$h_i(\mathbf{z}(t)) = \frac{\omega_i(\mathbf{z}(t))}{\sum_{i=1}^q \omega_i(\mathbf{z}(t))} \quad (2.20)$$

El término $M_{ij}(z_j(t))$ es el grado de membresía de $z_j(t)$ en M_{ij} , mientras que $\omega_i(\mathbf{z}(t))$ es el peso de cada regla.

Como se cumple que: $\sum_{i=1}^q \omega_i(\mathbf{z}(t)) > 0$ $\omega_i(\mathbf{z}(t)) \geq 0$ $i= 1,2,\dots,q$,

entonces se obtiene: $\sum_{i=1}^q h_i(\mathbf{z}(t)) = 1$ $h_i(\mathbf{z}(t)) \geq 0$ $i= 1,2,\dots,q$

2.2.2. Modelo borroso de 3 GDL

Para la obtención del modelo difuso se parte del modelo no lineal de 3 GDL representado en la ecuación 2.13. Al analizar la estructura del modelo no lineal expresado en dicha ecuación, queda claro que las no linealidades se encuentran dentro de la matriz \mathbf{A}_i , por lo que la composición numérica de esta matriz variará según la salida de cada regla. Sin embargo, los términos \mathbf{B}_i son iguales por lo que no se incluyen dentro de las reglas para la construcción del modelo (Torres-Pinzón, 2011).

El modelo difuso para el HRC-AUV se diseña utilizando la herramienta difusa (*fuzzy toolbox*) del software Matlab (Figura 2-4).

Como se puede apreciar en la figura anterior, las variables de estado $\boldsymbol{\nu} = [u, v, r]^T$ del modelo no lineal constituyen las entradas del modelo borroso. Por su parte las salidas del modelo borroso (du, dv, dr) se definen como funciones lineales que representan las filas de la matriz \mathbf{A}_i . De tal manera que la salida du representa la fila uno de la matriz,

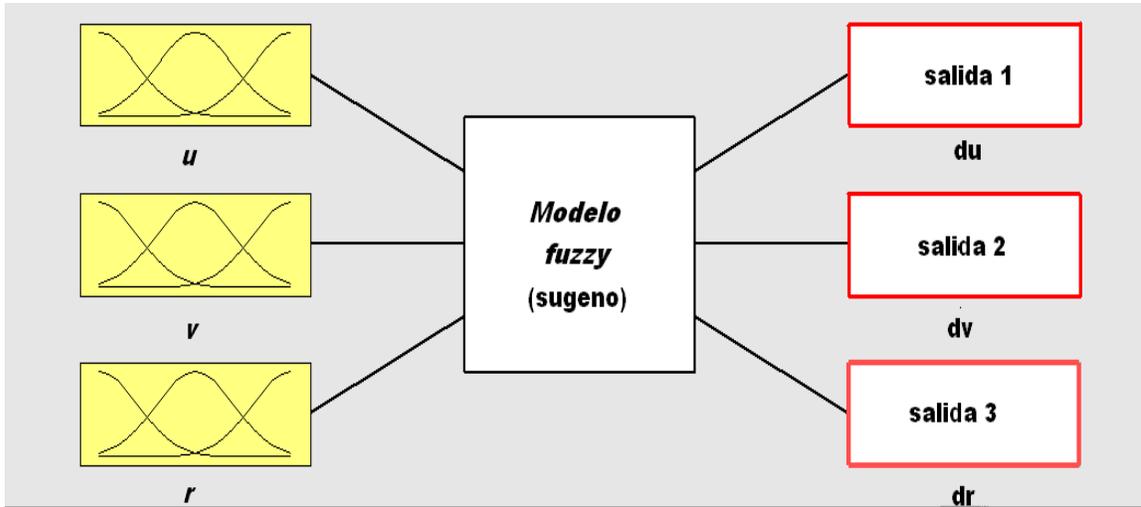


Figura 2-4: Modelo difuso implementado con la herramienta *fuzzy* del *Matlab*

la cual varía en dependencia de los cambios de valores que se producen dentro del rango establecido para las variables v y r . De manera similar ocurre con la salida dv , que define la segunda fila de la matriz, y con la salida dr que define la tercera fila.

Se conoce a partir de resultados obtenidos durante experimentos realizados con el vehículo, que los estados que más se ven afectados por incertidumbres varían en el rango de $[-0.15 \ 0.15]$ (rad/s) para el caso de r y de $[-0.1 \ 0.1]$ (m/s) para el caso de v .

Considerando los valores límites de los rangos de variación antes expuestos, r y v se pueden expresar de la siguiente manera:

$$v(t) = Na(v(t))0.1 + Nb(v(t))(-0.1).$$

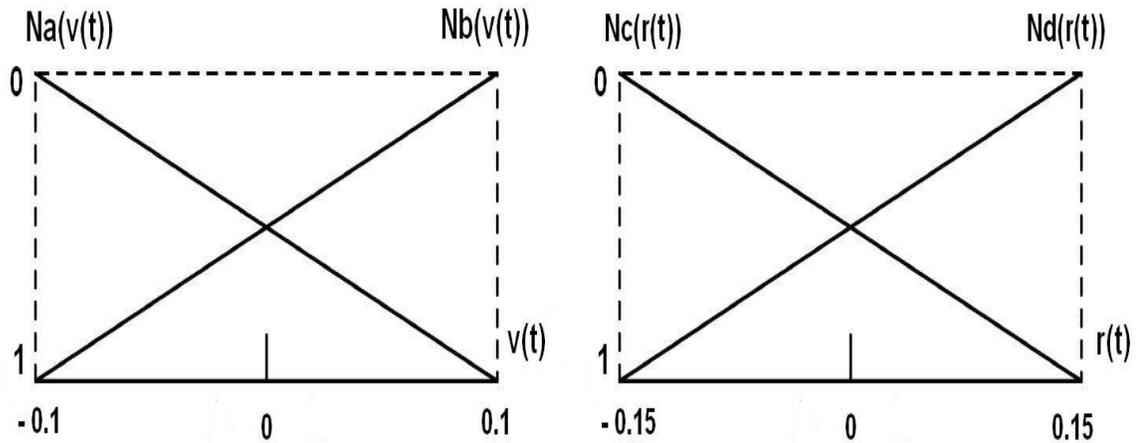
$$r(t) = Nc(r(t))0.15 + Nd(r(t))(-0.15).$$

$$\text{donde } Na(v(t)) + Nb(v(t))=1 \text{ y } Nc(r(t)) + Nd(r(t))=1$$

Na , Nb , Nc y Nd son las funciones de membresía (Figura 2-5) y se expresan de la siguiente forma:

$$Na(t) = \frac{0,1+v(t)}{0,2}, Nb(t) = \frac{0,1-v(t)}{0,2}, Nc(t) = \frac{0,15+r(t)}{0,3}, Nd(t) = \frac{0,15-r(t)}{0,3}$$

Como se cuenta con dos funciones de membresía para cada variable, v y r , se obtienen cuatro reglas para la construcción del modelo $T - S$:



(a) Funciones de membresía para $v(t)$.

(b) Funciones de membresía para $r(t)$.

Figura 2-5: Funciones de membresía

1. *If* (v es Na) y (r es Nc) *then* ($\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t)$)
2. *If* (v es Na) y (r es Nd) *then* ($\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{A}_2\mathbf{x}(t)$)
3. *If* (v es Nb) y (r es Nc) *then* ($\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{A}_3\mathbf{x}(t)$)
4. *If* (v es Nb) y (r es Nd) *then* ($\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{A}}(t) = \mathbf{A}_4\mathbf{x}(t)$)

Estas reglas recogen las posibles combinaciones entre las variables v y r , dando como resultado el modelo borroso linealizado por partes, cuyas matrices \mathbf{A}_i son:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -0,0707 & 0,0102 & 0 \\ -2,2128 & -4,6815 & 0 \\ 0,0683 & 0 & -1,7347 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -0,0707 & -0,0102 & 0 \\ 2,2128 & -4,6815 & 0 \\ 0,0683 & 0 & -1,7347 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -0,0707 & 0,0102 & 0 \\ -2,2128 & -4,6815 & 0 \\ -0,0683 & 0 & -1,7347 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} -0,0707 & -0,0102 & 0 \\ 2,2128 & -4,6815 & 0 \\ -0,0683 & 0 & -1,7347 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La defusificación para este modelo borroso queda:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{A}}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i(\mathbf{z}(t))(\mathbf{A}_i \mathbf{x}(t)) \quad (2.25)$$

donde:

$$h_1(x(t)) = Na(v(t)) \times Nc(r(t))$$

$$h_2(x(t)) = Na(v(t)) \times Nd(r(t))$$

$$h_3(x(t)) = Nb(v(t)) \times Nc(r(t))$$

$$h_4(x(t)) = Nb(u(t)) \times Nd(r(t))$$

El diagrama en bloques que representa la estructura del modelo dinámico basado en lógica difusa, que describe el movimiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal, se muestra en Figura 2-6

2.3. Evaluación del modelo difuso.

Al contar con todos los parámetros del modelo borroso de 3 *GDL* del vehículo, se procede a analizar mediante simulación su comportamiento. Para ello se utiliza como patrón el modelo dinámico no lineal de 3 *GDL* que describe el movimiento en el plano horizontal. Ambos modelos, el difuso y el no lineal de 3 *GDL*, se implementan en *Simulink – Matlab* con la ayuda de la herramienta *MSS* (Perez, 2006).

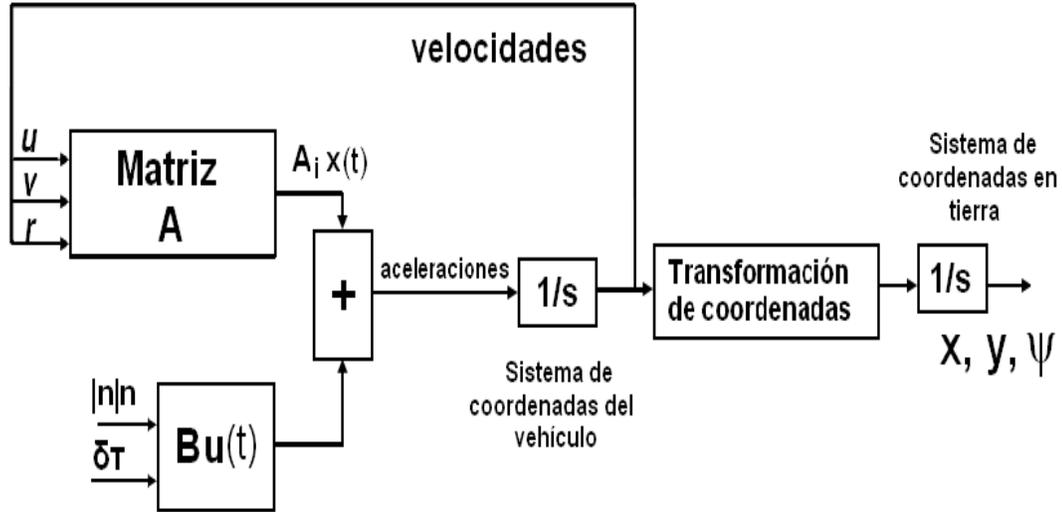


Figura 2-6: Diagrama en bloques del modelo borroso de 3 *GDL* para el *HRC-AUV*. El *HRC-AUV*, debido a su dinámica, presenta un comportamiento inestable en el plano $x - y$, por lo que si se somete a una variación angular constante del timón horizontal debe realizar una trayectoria circular.

Simulando ambos modelos ante un valor constante de 0.4 rad de deflexión angular del timón horizontal (δ_T) y considerando máxima potencia del motor (500 rpm) se obtiene la trayectoria en el plano $x - y$ mostrada en la Figura 2-7.

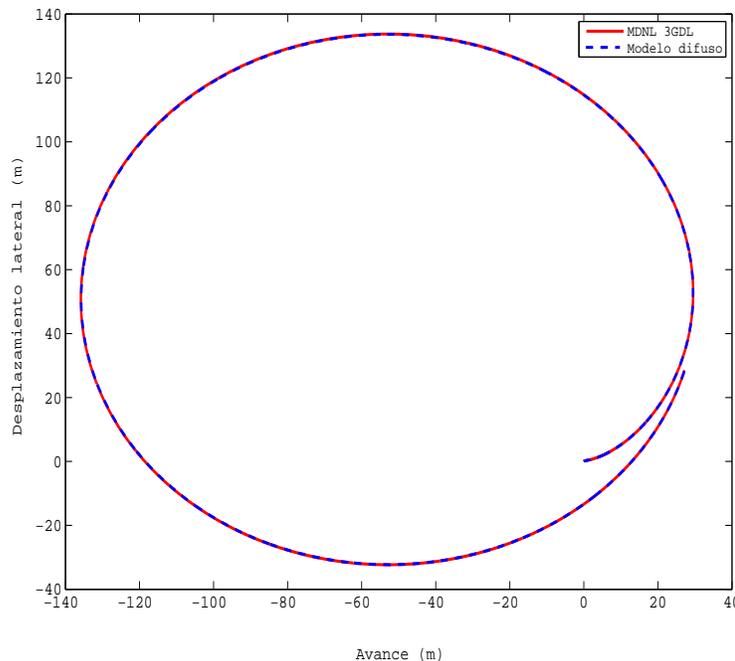


Figura 2-7: Comportamiento del modelo borroso y del modelo no lineal de 3 *GDL*

El comportamiento de la velocidad u se puede apreciar en la Figura 2-8.

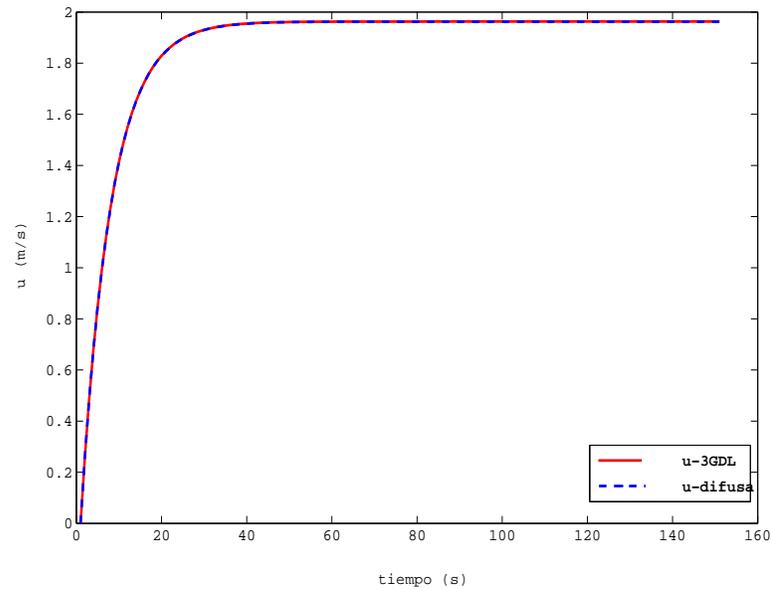


Figura 2-8: Comportamiento de la velocidad u .

La velocidad v se comporta acorde a lo presentado en la Figura 2-9.

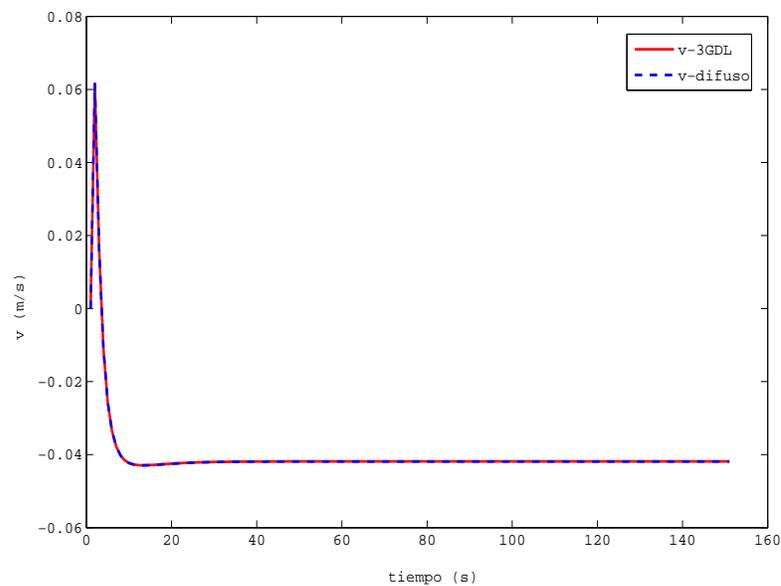


Figura 2-9: Comportamiento de la velocidad v .

Por último el comportamiento de r para ambos modelos durante la trayectoria simulada se aprecia en la en la Figura 2-10.

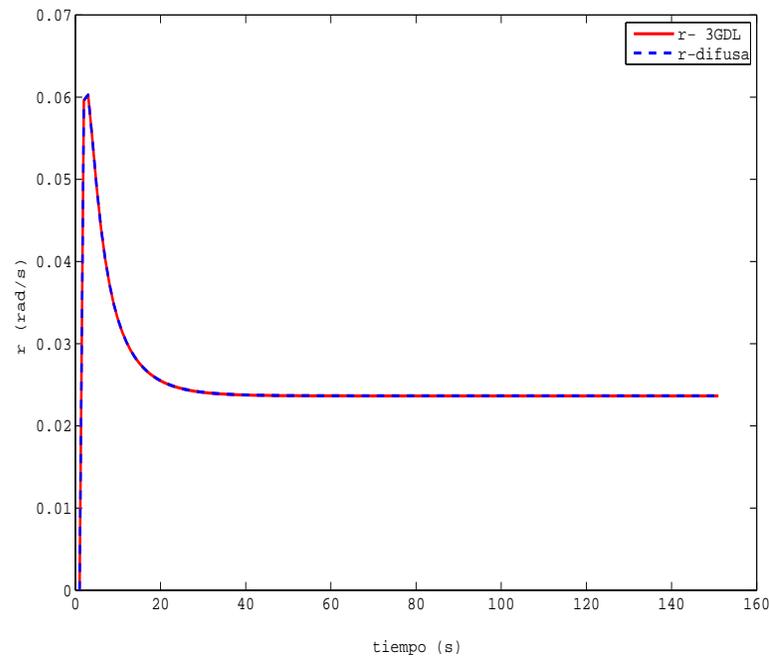


Figura 2–10: Comportamiento de la velocidad r .

Visualmente se observa que el comportamiento de ambos modelos resulta coherente con la dinámica del vehículo en el plano $x - y$ y que prácticamente no existe diferencia entre uno y otro. Sin embargo, resulta necesario realizar un análisis estadístico que permita avalar el desempeño del modelo difuso del *HRC-AUV*. El análisis se realiza en función de las posiciones (x, y) del vehículo debido a que previamente se pudo demostrar, que la trayectoria obtenida como resultado de simular el modelo no lineal del vehículo, coincide con la determinada a partir de los datos recogidos por el *GPS* instalado en el *HRC-AUV* durante experimentos en el mar (Valeriano-Medina, 2013).

La evaluación estadística entre las trayectorias en el plano $x - y$ obtenidas con el modelo no lineal y el modelo borroso se realiza a partir de los resultados que brinda el test de *Kolmogorov - Smirnov* ($K - S$). Este test permite evaluar muestras bivariadas estableciendo como hipótesis que ambas muestras pertenecen a un mismo conjunto de distribución estadística para un intervalo de confianza ($\alpha=0.05$) (Peacock, 1983).

Los resultados del test se presentan en la Tabla 2–4. Como se puede apreciar la hipótesis establecida se cumple ($H=0$) con un valor de probabilidad ($p\text{Valor}=0.5414$). Además de

Tabla 2-4: Comparación estadística entre el modelo borroso y el *MDNL* de 3 *GDL*.

Hipótesis	<i>p</i> Valor	KSestadístico	Error medio	Desviación estándar
0	0.5414	0.0131	0.1103	0.0721

estos coeficientes, se presenta la desviación estándar y el error cuadrático, demostrándose que prácticamente no existe diferencia entre el comportamiento de ambos modelos.

De esta manera se prueba que el modelo difuso representa adecuadamente la dinámica del vehículo en plano horizontal, por lo que puede utilizarse en el ajuste de controladores.

2.4. Consideraciones finales.

Las incertidumbres presentes en varios parámetros afectan la exactitud del modelo dinámico del *HRC-AUV*. Un modelo basado en lógica difusa posibilita que las inexactitudes provocadas por las incertidumbres disminuyan. El modelo borroso del tipo *Takagi – Sugeno*, calculado para el *HRC-AUV*, sigue siendo una representación no lineal, pero expresada como una combinación de estructuras lineales en forma de espacio de estado que abarca todo el rango de operación del submarino.

Los valores numéricos del modelo borroso del *HRC-AUV* se calculan en función de reglas difusas que definen el comportamiento de los estados que varían con el tiempo. El rango de operación de estas variables se establece a partir de los valores registrados durante experimentos en el mar. El comportamiento en el plano $x - y$ del modelo difuso se evalúa mediante simulación tomando como referencia el modelo no lineal de 3 *GDL*. Los resultados del análisis estadístico realizado permiten asegurar que el modelo difuso de 3 *GDL* representa de manera adecuada la dinámica del vehículo en el plano horizontal, por lo que puede utilizarse en el ajuste de controladores.

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN DE TÉCNICAS BORROSAS EN EL DISEÑO DE UN AUTOPILOTO PARA EL *HRC-AUV*.

Para incorporar la capacidad de cumplir misiones de forma autónoma en un vehículo subacuático se hace imprescindible el desarrollo de un sistema de control. Los controladores de dirección o autopilotos son empleados con el objetivo de mantener un ángulo de rumbo determinado.

Un modelo no lineal suele ser una representación exacta para un sistema determinado. Su empleo en el diseño de controladores resulta conveniente pero incorpora complejidades que muchas veces no pueden ser solucionadas. Es por esto que constituye una práctica muy recomendada obtener una representación linealizada alrededor de un punto de operación para luego emplearla en el proceso de ajuste de los controladores.

El modelo difuso *Takagi – Sugeno* de 3 *GDL* calculado para el *HRC-AUV* es no lineal, pero está conformado por estructuras lineales que se combinan entre sí, para proporcionar una representación en forma de espacio de estado que es capaz de expresar el comportamiento del modelo en cualquier punto, dentro del rango de operación predefinido. Cada configuración lineal, determinada por una regla difusa, puede ser empleada para diseñar un controlador diferente. De manera que resulte necesario emplear un algoritmo que permita cambiar de un controlador a otro a medida que varíen las condiciones de operación. Algunos autores recomiendan utilizar la técnica de ganancia programada ([Silvestre, 2007](#)). Sin embargo, teniendo en cuenta que se dispone de un modelo difuso,

resulta factible emplear un controlador difuso para controlar el rumbo del *HRC-AUV*, cuyo diseño esté enfocado en compensar cada regla establecida para el modelo difuso.

En este Capítulo se detallan los pasos seguidos en el diseño de un controlador *PI – D* difuso con el objetivo de mantener un ángulo de rumbo determinado en el *HRC-AUV*. El desempeño del controlador se evalúa mediante simulación.

3.1. Diseño del controlador difuso.

El controlador borroso se diseña tomando como base el modelo difuso de 3 *GDL* del *HRC-AUV* aplicando el concepto de Compensación Paralelamente Distribuida (*CPD*) (Chang, 2003). El concepto de *CPD* consiste en derivar cada regla de control a fin de compensar cada regla del modelo difuso. De esta manera se diseña un controlador lineal por cada regla difusa definida para el control, obteniéndose como controlador borroso la combinación de los reguladores lineales según el punto en que esté operando el sistema. Los controladores lineales, al igual que las estructuras lineales del modelo borroso, se relacionan entre sí garantizando que para todo el rango de operación el sistema sea estable. El controlador borroso diseñado actuará directamente sobre el sistema no lineal.

El objetivo de control en un autopiloto es controlar el ángulo de rumbo (ψ) del vehículo, siendo para ello necesario controlar además la velocidad angular (r). La selección de una estructura *PI – D* para los controladores lineales obedece a que ya fue implementada anteriormente en el *HRC-AUV* con resultados satisfactorios (Valeriano-Medina, 2013).

Las entradas del controlador difuso son las velocidades u , v y r , mientras que las salidas están dadas por las ganancias K_p , K_i y K_d de los reguladores lineales que se sintonicen.

El controlador se diseña utilizando la herramienta difusa (*fuzzy toolbox*) del software *Matlab*, Figura 3-1.

Las funciones de membresía (Figura 2-5) y el precedente de las reglas establecidas para el controlador son iguales a las que fueron definidas en el capítulo anterior para el modelo borroso.

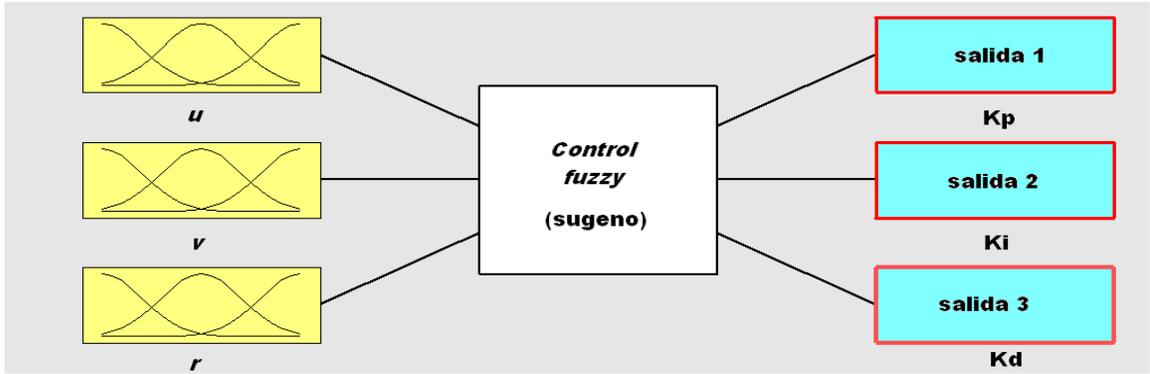


Figura 3-1: Controlador difuso implementado con la herramienta *fuzzy* del *Matlab*

De manera que las reglas para el controlador difuso son:

1. *If* (v es Na) y (r es Nc) *then* (Kp_1 es A_1) (Ki_1 es B_1) (Kd_1 es C_1)
2. *If* (v es Na) y (r es Nd) *then* (Kp_2 es A_2) (Ki_2 es B_2) (Kd_2 es C_2)
3. *If* (v es Nb) y (r es Nc) *then* (Kp_3 es A_2) (Ki_3 es B_2) (Kd_3 es C_2)
4. *If* (v es Nb) y (r es Nd) *then* (Kp_4 es A_1) (Ki_4 es B_1) (Kd_4 es C_1)

donde Kp , Ki y Kd son las ganancias de los controladores lineales y A, B y C son valores constantes que dependen del ajuste de los mismos.

3.2. Ajuste de los controladores lineales.

En el diseño de un autopiloto se necesita conocer las relaciones dinámicas que se establecen entre la velocidad angular (r) y la deflexión angular del timón horizontal (δ_T), así como las que se establecen entre el ángulo de rumbo (ψ) y (δ_T). A partir de las estructuras lineales del modelo borroso del *HRC-AUV* es posible obtener las funciones de transferencias de r contra (δ_T):

$$\frac{r_1(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01854}{s^2 + 1,811s + 0,1311} \quad (3.1)$$

$$\frac{r_2(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01817}{s^2 + 1,811s + 0,1311} \quad (3.2)$$

$$\frac{r_3(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01817}{s^2 + 1,811s + 0,1311} \quad (3.3)$$

$$\frac{r_4(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01854}{s^2 + 1,811s + 0,1311} \quad (3.4)$$

Las funciones de transferencias $\frac{r_1(s)}{\delta_T(s)} - \frac{r_4(s)}{\delta_T(s)}$ y $\frac{r_2(s)}{\delta_T(s)} - \frac{r_3(s)}{\delta_T(s)}$ son iguales, por lo que dos reguladores lineales C_1 y C_2 son suficientes para el control.

Considerando que $\dot{\psi}=r$, es posible establecer las siguientes funciones de transferencias que relacionan el ángulo de rumbo y la deflexión angular del timón horizontal:

$$\frac{\psi_1(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01854}{s^3 + 1,811s^2 + 0,1311s} \quad (3.5)$$

$$\frac{\psi_2(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01817}{s^3 + 1,811s^2 + 0,1311s} \quad (3.6)$$

$$\frac{\psi_3(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01817}{s^3 + 1,811s^2 + 0,1311s} \quad (3.7)$$

$$\frac{\psi_4(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,2429s + 0,01854}{s^3 + 1,811s^2 + 0,1311s} \quad (3.8)$$

La estructura de los controladores lineales $PI - D$ a diseñar se muestra en la Figura 3-2

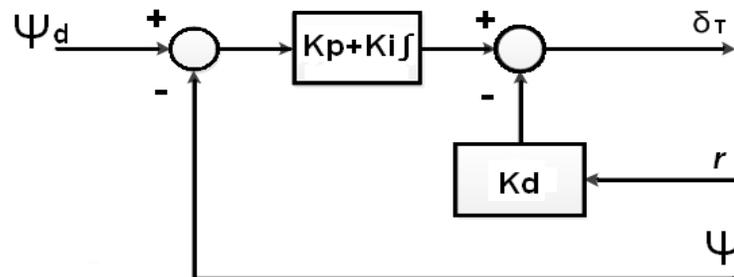


Figura 3-2: Esquema para el diseño de los controladores tipo $PI-D$.

Por lo que la señal de mando queda definida como:

$$\delta_T = Kp(\psi_d - \psi) + Ki \int (\psi_d - \psi) - Kd r \quad (3.9)$$

El ajuste de los controladores tipo *PI-D* se realiza utilizando la técnica de asignación de polos y ceros, a partir de un análisis del lugar geométrico de las raíces (*LGR*) del sistema de lazo abierto.

Como requisitos se persigue una respuesta con un máximo sobreimpulso entre 5 %-25 % y un tiempo de establecimiento acorde a la dinámica lenta del submarino entre 25s-45s.

Controlador 1:

El *LGR* del sistema en lazo abierto, definido por la función de transferencia de la ecuación 3.1, se presenta en la Figura 3-3. La ganancia que se obtiene para el lazo interno r , Figura 3-2, es $Kd=1$.

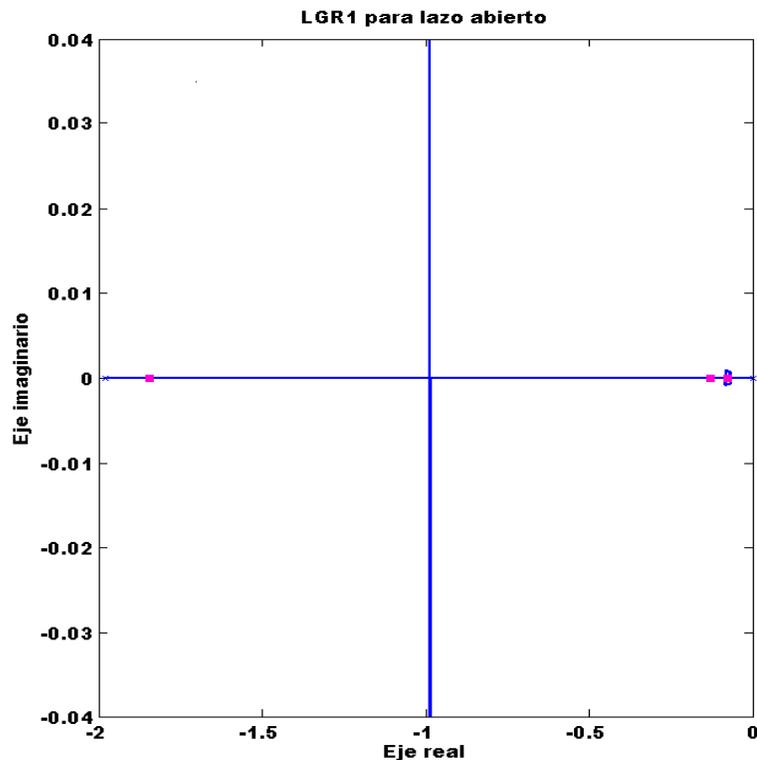


Figura 3-3: *LGR* del sistema en lazo abierto que sirve de base para el ajuste de la ganancia Kd del lazo interno r .

Una vez cerrado el lazo de r , teniendo en cuenta la ganancia K_d , se procede a ajustar el lazo de rumbo. El lugar geométrico del sistema que sirve de base para el ajuste se presenta en la Figura 3-4, a partir del cual se seleccionan como valores de ganancias $K_i=0.7$ y $K_p=7$.

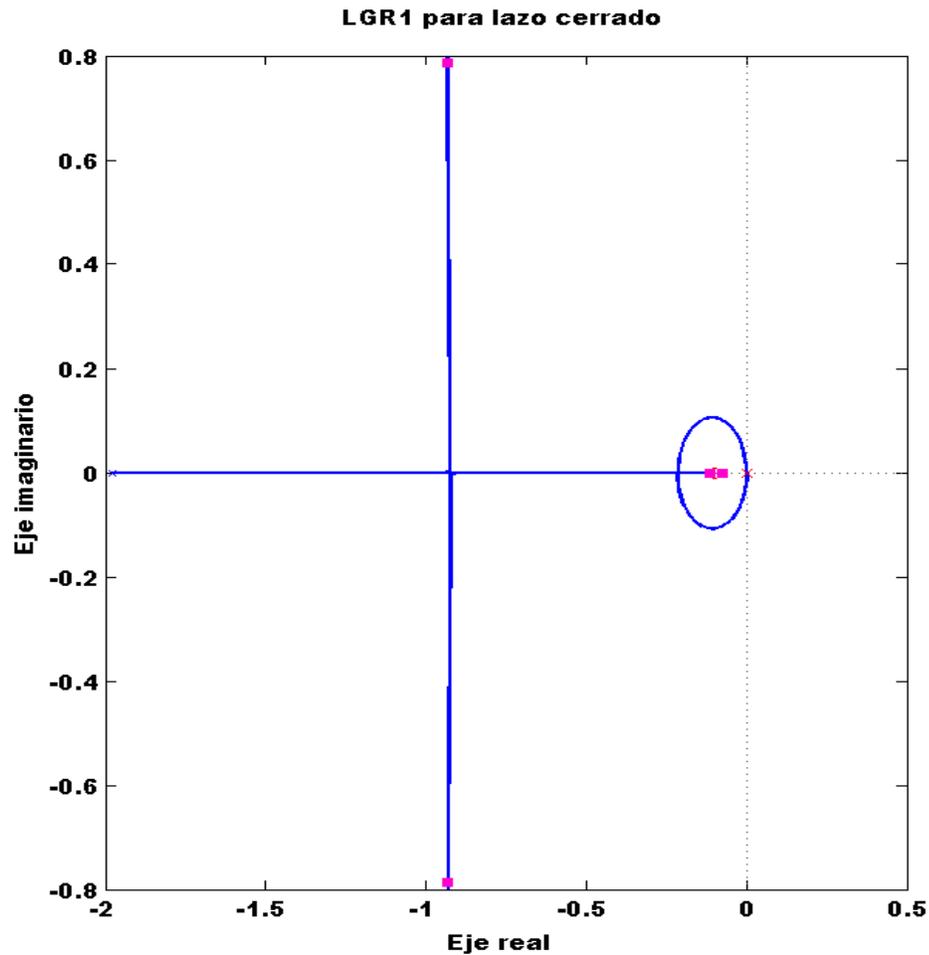


Figura 3-4: *LGR* del sistema que sirve de base para el ajuste de las ganancias K_i y K_d del primer controlador $PI - D$.

Controlador 2:

Para el diseño del segundo controlador el procedimiento es similar. El *LGR* del sistema en lazo abierto, definido por la función de transferencia de la ecuación 3.2, se presenta en la Figura 3-5. La ganancia que se obtiene para el lazo interno r es $K_d=1$.

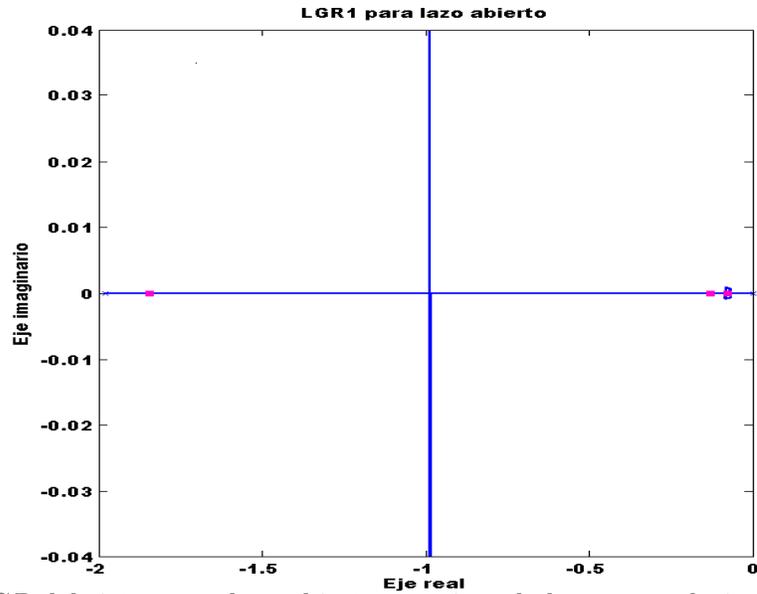


Figura 3-5: *LGR* del sistema en lazo abierto que sirve de base para el ajuste de la ganancia K_d del lazo interno r .

Para el ajuste del lazo de control de rumbo, se cierra el lazo interno r considerando el valor de ganancia K_d calculada. El *LGR* se presenta en la Figura 3-6, a partir del cual se seleccionan las ganancias $K_i=0.9$ y $K_p=9$.

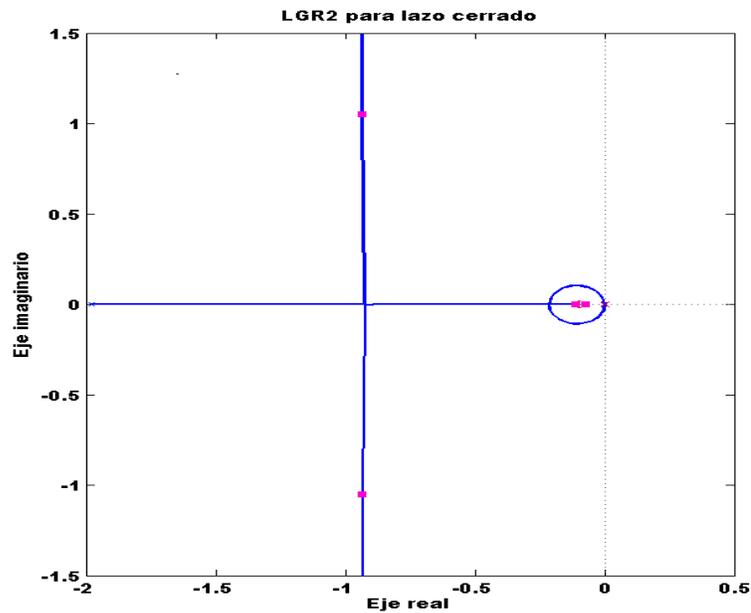


Figura 3-6: *LGR* del sistema que sirve de base para el ajuste de las ganancias K_i y K_d del segundo controlador $PI - D$.

En la Tabla 3-1 se resumen los valores de ganancias obtenidos durante el ajuste de los controladores.

Tabla 3–1: Valores de ganancias para los controladores lineales tipo $PI - D$.

Controlador	K_p	K_i	K_d
C1	7	0.7	1
C2	9	0.9	1

3.3. Simulación del control difuso.

En este epígrafe se evalúa el desempeño del controlador borroso bajo las condiciones de ajuste descritas en el epígrafe anterior y se utiliza como representación del vehículo el modelo difuso obtenido en el Capítulo 2. La Figura 3–7 muestra el esquema del sistema de control a simular en el software del *Matlab*.

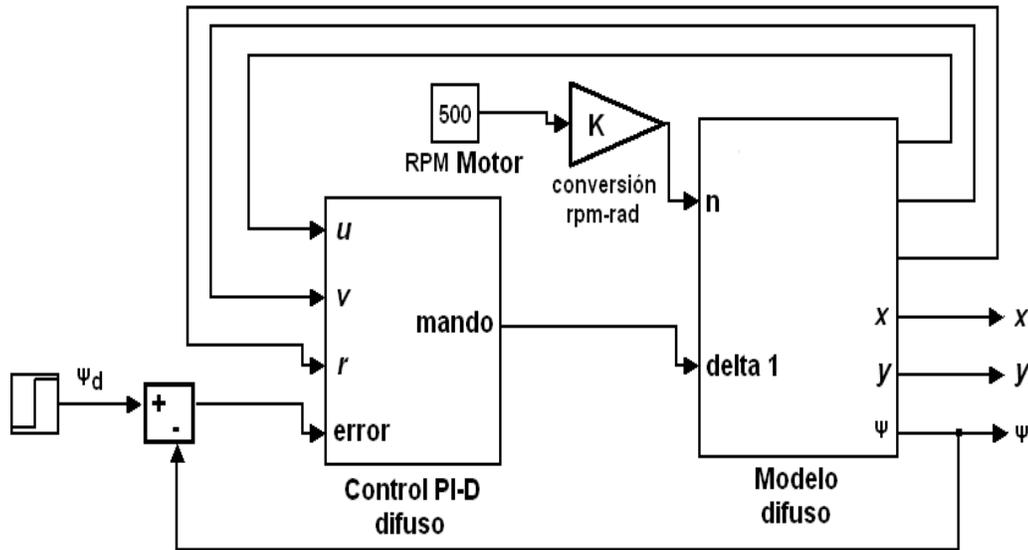


Figura 3–7: Esquema para la simulación del controlador difuso.

La Figura 3–8 muestra la respuesta simulada correspondiente al ángulo de rumbo del *HRC-AUV* ante una señal tipo paso unitario aplicada en la entrada de referencia.

Como se puede apreciar, la respuesta obtenida presenta un comportamiento subamortiguado, con un máximo sobreimpulso (M_p) de 13% y un tiempo de establecimiento (t_s) de 26 s que satisfacen los requisitos previstos para el diseño.

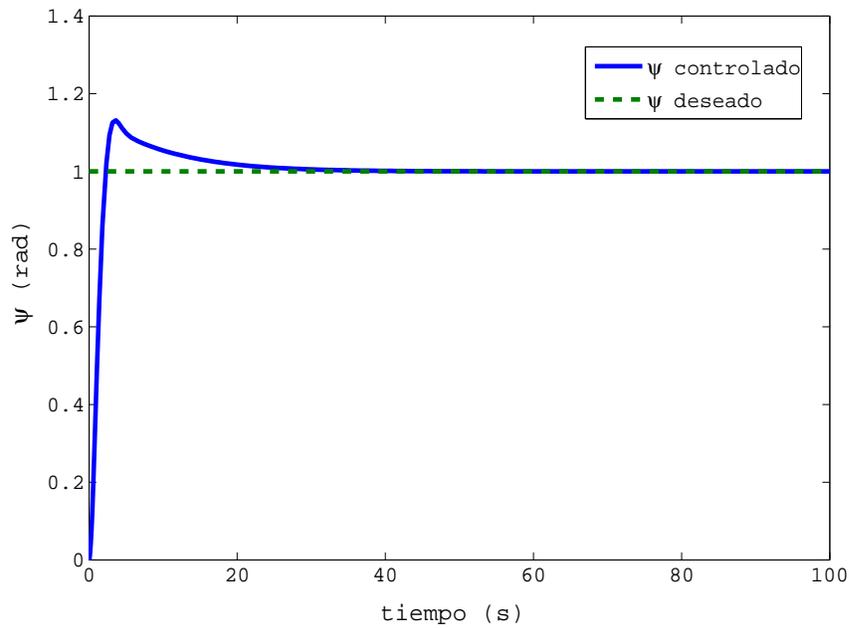


Figura 3–8: Respuesta temporal del ángulo de rumbo obtenida con el controlador $PI - D$ difuso.

La señal de mando de este controlador se presenta en la Figura 3–9:

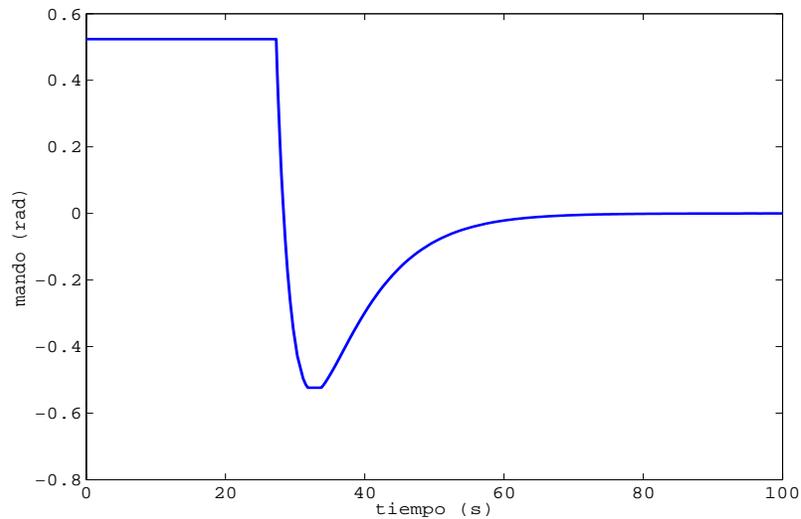


Figura 3–9: Señal de mando.

En la Figura 3–10 se muestra la respuesta simulada del ángulo de rumbo luego de implementar en el *Matlab* el controlador $PI - D$ difuso con el modelo no lineal de 3 *GDL* del *HRC-AUV* presentado en el subepígrafe 2.1.2.

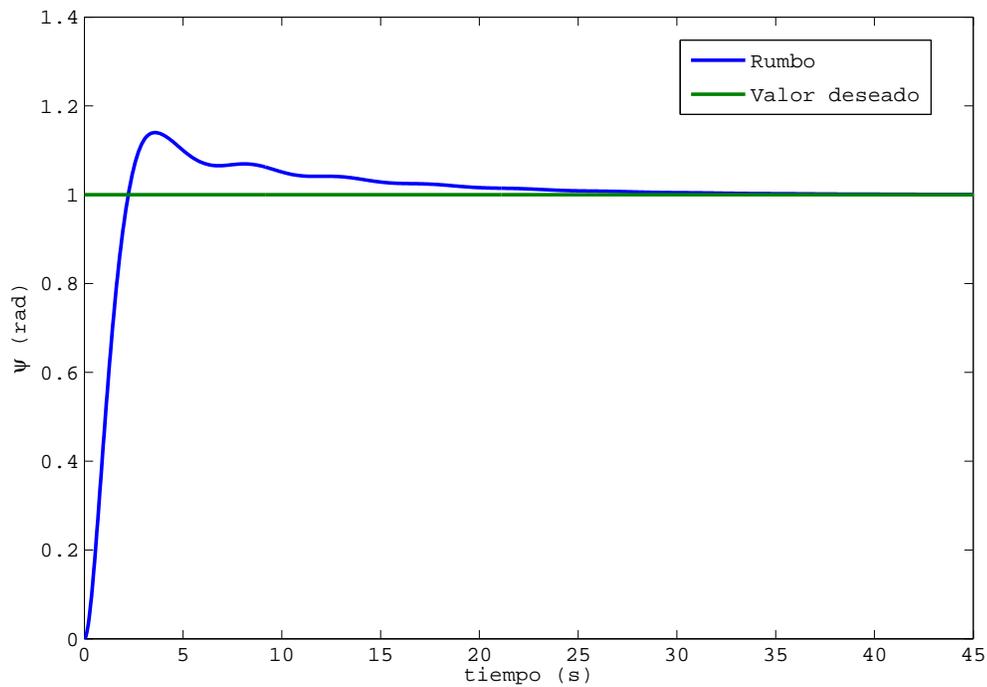


Figura 3–10: Respuesta temporal del ángulo de rumbo simulada con el controlador difuso y el MDNL de 3 *GDL*.

La respuesta obtenida mantiene un desempeño adecuado y demuestra la efectividad del diseño realizado.

3.4. Análisis de robustez.

En este epígrafe se procede a realizar una prueba de robustez para el controlador difuso diseñado. Dicha prueba consiste en evaluar las respuestas que se obtienen al realizar variaciones de $\pm 20\%$ en aquellos parámetros que incorporan incertidumbres al modelo. La evaluación se realiza utilizando el modelo no lineal de 3 *GDL* que describe el comportamiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal. En la Tabla 3–2 aparecen las variaciones realizadas en los valores de los parámetros seleccionados.

Tabla 3–2: Valores utilizados en las pruebas realizadas.

Parámetro	Valor	Valor +20%	Valor -20%	Unidades de medida
Y_v	-1219,8	-1463,8	-975,84	$\frac{N}{m/s}$
b_2	318,39	382,068	254,712	$\frac{N}{rad}$
N_r	-9096,9	-10916	-7277,5	$\frac{Nm}{rad/s}$
b_5	1273,56	1528,3	1018,8	$\frac{Nm}{rad}$

Por su parte, en la Tabla 3-3 se describen los experimentos realizados.

Tabla 3-3: Experimentos realizados.

Experimentos	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Parámetro 4
1	Y_v	b_2	N_r	b_5
2	$Y_v + 20\%$	$b_2 + 20\%$	$N_r + 20\%$	$b_5 + 20\%$
3	$Y_v - 20\%$	$b_2 - 20\%$	$N_r - 20\%$	$b_5 - 20\%$
4	$Y_v + 20\%$	b_2	N_r	b_5
5	$Y_v - 20\%$	b_2	N_r	b_5
6	Y_v	b_2	$N_r + 20\%$	b_5
7	Y_v	b_2	$N_r - 20\%$	b_5
8	Y_v	$b_2 + 20\%$	N_r	b_5
9	Y_v	$b_2 - 20\%$	N_r	b_5
10	Y_v	b_2	N_r	$b_5 + 20\%$
11	Y_v	b_2	N_r	$b_5 - 20\%$

Los resultados de la prueba de robustez para el controlador borroso tipo *PI-D* se muestran en la Tabla 3-4. Para evaluar el desempeño de la respuesta se toman como base las variaciones que se producen en los siguientes parámetros de la respuesta temporal: (t_s) y (M_p).

Tabla 3-4: Resultados de los experimentos.

Parámetros	$t_s(seg)$	$M_p(\%)$
Exp1	30	14
Exp2	40	12.2
Exp3	37	16.5
Exp4	40	14
Exp5	38	13.7
Exp6	40	12.3
Exp7	38	17
Exp8	31	14
Exp9	30	14
Exp10	29	14
Exp11	38	14

Las respuestas, a pesar de las variaciones realizadas en los parámetros del modelo, mantienen un comportamiento similar al obtenido con los valores nominales: pequeñas oscilaciones alrededor del valor deseado y cero error en estado estable ante entrada de referencia. Como se aprecia en la Tabla 3-4, existen pequeñas variaciones en cuanto a

los valores de t_s y M_p , pero son pequeños y no comprometen el comportamiento global de la respuesta. Por lo que se puede plantear que el controlador difuso diseñado ofrece garantías de robustez, manteniendo un desempeño estable independientemente de las inexactitudes presentes en el modelo.

3.5. Análisis económico.

El *HRC-AUV* es un vehículo de bajo costo que ha sido totalmente diseñado y construido en Cuba. Todo el equipamiento de hardware y sensores instalados clasifican en la gama media y baja que proporcionan sus fabricantes. Por ejemplo, el sensor inercial instalado en el *HRC-AUV*, el (MTI-G de Xsens) está valorado en 5069 *USD*, por lo que es de bajo costo si se le compara con los empleados en otros vehículos a nivel mundial. Para que se tenga un idea el sensor inercial que se utiliza en el *AUV HUGIN* se cotiza en 9000 *USD*. Como se puede apreciar, la diferencia en precio es notable, lo que trae consigo limitaciones en calidad y prestaciones. Para suplir las deficiencias que provoca el sistema de bajo costo instalado, los miembros de *GARP* y *CIDNAV* han tenido que adoptar soluciones ingenieriles basadas fundamentalmente en técnicas de modelado y control que han requerido un esfuerzo adicional.

El aprovechamiento de las potencialidades del *HRC-AUV* representa un ahorro considerable al país, ya que la compra de una aplicación como esta significa invertir entre 1.5 y 2 millones de dólares americanos (*USD*) (Wernli, 2000), mientras que la prestación de servicios de este tipo por una corporación extranjera significaría desembolsar entre 15 y 20 mil *USD* diarios. A lo anteriormente explicado se suma el costo del mantenimiento del vehículo, normalmente brindado por especialistas del fabricante y el desconocimiento parcial o total de las características del funcionamiento del *AUV*, lo cual representa un valor agregado nada despreciable.

El proyecto *HRC-AUV* demuestra que es posible realizar en Cuba aplicaciones de este tipo que solo son reportadas en países del primer mundo y contribuye a la independencia tecnológica del país.

3.6. Consideraciones finales.

El control de rumbo $PI - D$ difuso ha sido diseñado a partir del modelo borroso de 3 GDL que caracteriza la dinámica del *HRC-AUV* en el plano horizontal. El empleo de un controlador difuso resulta factible debido a que se cuenta con un modelo difuso compuesto por estructuras lineales combinadas entre sí. El controlador difuso se utiliza para compensar cada regla establecida en el modelo. Las salidas del control difuso están determinadas por los valores de K_p , K_i y K_d de los controladores lineales tipo $PI - D$.

Las funciones de transferencias que se derivan de las estructuras lineales del modelo difuso y que relacionan la dinámica de la variación de rumbo y el ángulo de rumbo con respecto a la deflexión angular del timón horizontal son las que se emplean para el ajuste de los controladores lineales $PI - D$. Los dos controladores $PI - D$ se ajustan utilizando la técnica de asignación de polos y ceros. El control de rumbo $PI - D$ difuso para el *HRC-AUV* se simula con el modelo difuso y con el modelo no lineal de 3 GDL que se considera como la representación más exacta de la planta. Las respuestas obtenidas y el análisis de robustez realizado demuestran la factibilidad del diseño y la efectividad del ajuste realizado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Las técnicas borrosas son utilizadas en el modelado y diseño de controladores para *AUVs*, ya que ofrecen soluciones adecuadas en aquellos sistemas donde no son aplicables eficientemente las técnicas de control convencionales debido a sus características no lineales y al alto grado de incertidumbres.

La dinámica del movimiento del *HRC-AUV* en el plano horizontal se representa con un modelo borroso no lineal definido por estructuras lineales combinadas entre sí, capaces de describir el comportamiento del vehículo en un amplio rango de operación. El modelo difuso obtenido presenta un desempeño similar al modelo no lineal de 3 *GDL*, por lo que puede utilizarse en el ajuste de controladores.

El ángulo de rumbo del *HRC-AUV* se controla con un *PI – D* difuso. Para el diseño se derivó cada de regla de control a partir de las establecidas para el modelo. Las respuestas simuladas presentan un adecuado desempeño acorde a los requisitos previamente establecidos. Los resultados de simulación obtenidos y las pruebas de robustez realizadas demuestran la efectividad del diseño y avalan su factibilidad.

Recomendaciones

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

- ★ Valorar la posible implementación en el *HRC-AUV* del controlador difuso diseñado.
- ★ Analizar el efecto de las perturbaciones marinas dentro del modelo difuso de 3 *GDL*.
- ★ Valorar la posible utilización del modelo dinámico difuso para el diseño e implementación del sistema de navegación del vehículo.
- ★ Evaluar la factibilidad de diseñar otras estrategias de control a partir del modelo difuso.
- ★ Investigar sobre el diseño de un autopiloto para el seguimiento de trayectorias empleando técnicas difusas.
- ★ Realizar pruebas experimentales con el vehículo donde se evalúen los diseños realizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, G. G.; Calvo, O. A. (2008). Vehículo autónomo submarino para la inspección de tuberías y cables. In: *V Jornadas Argentinas de Robótica (JAR08)*. Universidad Nacional del Sur. IEEE CIS. Bahía Blanca, Argentina.
- Antonelli, G. (2003). A survey of fault detection/tolerance strategies for AUVs and ROVs. In: *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances* (F. Caccavale and L. Villani, Eds.). Vol. 1 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*. pp. 109–127. Springer Berlin Heidelberg.
- Antonelli, G.; Fossen, T. I.; Yoerger D. R. (2008). Underwater robotics. In: *Springer Handbook of Robotics* (B. Siciliano; O. Khatib, Ed.). pp. 987–1008. Springer-Verlag.
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy Modeling for Control*. 1st ed.. Kluwer Academic Publishers.
- Blidberg, D. R. (2001). The development of autonomous underwater vehicles (auv); a brief summary. In: *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE Xplore. Seul, Corea del Sur.
- Chang, W.-J.; Wei, C.; Hsien-Hsueh L. (2003). Model-based fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicles in the horizontal plane. *Journal of Marine Science and Technology* **11**(3), 155–163.
- Cruz, J. M.; Aranda, J.; Girón-J. M. (2012). Tutorial automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **9**(3), 205–218.
- daSilva, J. E.; Terra, B.; Martins-R.; deSousa J. B. (2007). Modeling and simulation of the LAUV autonomous underwater vehicle. In: *13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. IEEE Control Systems Society. Szczecin, Polonia.

- Fernandez, A. (2012). Estrategia de control no convencional para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- Fjellstad, O. (1994). Control of Unmanned Underwater Vehicles in Six Degrees of Freedom. A Quaternion Feedback Approach. Tesis doctoral. Norwegian Institute of Technology. Noruega.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I. (2002). *Marine Control Systems Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics. Noruega.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I.; Ross, A. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Nonlinear modelling, identification and control of UUVs, pp. 13–42. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD. Gran Bretaña.
- Garcia-Garcia, D.; Valeriano-Medina, Y.; Hernández L.; Martínez A. (2012). Wave filtering for heading control of an auv based on passive observer. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* **41**(6), 540–549.
- Geridönmez, F. (2007). Simulation of motion of an underwater vehicle. Tesis de maestría. Middle East Technical University. Alemania.
- Gorset, J.E. (2007). Nonlinear model-based control of slender body AUVs. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Guo, J.; Huang, S.H. (1996). Control of an autonomous underwater vehicle testbed using fuzzy logic and genetic algorithms. In: *Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. IEEE Xplore. California, Estados Unidos. pp. 485 – 489.
- Hassanein, O.; Anavatti, S. G.; Ray T. (2011). Fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicle. In: *5th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. IEEE Xplore. Wellington, Nueva Zelanda. pp. 169 – 174.

- Hegrenaes, O.; Hallingstad, O.; Jalving B. (2007). Comparison of mathematical models for the *hugin 4500 auv* based on experimental data. In: *IEEE Internatinal Symposium on Underwater Technology*. IEEE Xplore. Japón.
- Inzartsev, A.; Pavin, A. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. AUV application for inspection of underwater communications, pp. 216–234. InTech. Vienna, Austria.
- Ishaque, K.; Abdullah, S. S.; Ayob S. M.; Salam Z. (2010). Single input fuzzy logic controller for unmanned underwater vehicle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **59**(1), 87–100.
- Jalving, B. (1994). The *ndre – auv* flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engenierring* **19**(4), 497–501.
- Jordán, M. A.; Bustamante, J. L. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Adaptive control for guidance of underwater vehicles, pp. 251–278. InTech. Vienna, Austria.
- Kanakakis, V.; Tsourveloudis, N. C.; Valavanis K. P. (2001). Design and testing of a fuzzy logic controller for an autonomous underwater vehicle. In: *Proc. of the IARP Internat. Workshop on Underwater Robotics for Sea Exploration and Environmental Monitoring*. Río de Janeiro, Brasil.
- Kim, K.; Ura, T. (2002). 3 – dimensional trajectory tracking control of an *auv r – one robot* considering current interaction. In: *The twelfth (2002) international offshore and polar engineering conference*. Vol. 2. ISOPE. Kita-Kyushu, Japón. pp. 277–283.
- Kim, T.W.; Yuh, J. (2001). A novel neuro-fuzzy controller for autonomous underwater vehicles. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. IEEE Xplore. Seoul, Corea del Sur. pp. 2350–2355.
- Li, Ji-Hong; Jun, Bong-Huan; Lee Pan-Mook; Lim Yong-Kon (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Schooling for Multiple Underactuated AUVs, pp. 295–314. InTech. Vienna, Austria.
- Lienard, D. E. (1990). Control of unmanned underwater vehicles in six degrees of freedom a quaternion feedback approach. Tesis doctoral. Naval Postgraduate School.

- California, Estados Unidos.
- Mamdani, E. H. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers* **26**(12), 1182–1191.
- Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández-L.; Guerra C.; Sahli H. (2010). Hardware and software architecture for *auv* based on low-cost sensors. In: *The 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV*. IEEE Xplore. Singapur.
- Martínez, B. L. (2007). Identificación borrosa de sistemas no lineales mediante algoritmo de agrupamiento incremental con aplicación a un proceso fermentativo de bioetanol. Tesis doctoral. UCLV. Villa Clara, Cuba.
- Miskovic, N.; Vukic, Z.; Barisic-M. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Identification of underwater vehicles for the purpose of autopilot tuning, pp. 327–346. InTech. Vienna, Austria.
- Peacock, J. A. (1983). Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy. *Monthly Notices Royal Astronomy Society* **202**, 615–627.
- Perez, T.; Smogeli, O. N.; Fossen T. I.; Sorensen A. J. (2006). An overview of the marine systems simulator (mss): a simulink toolbox for marine control systems. *Modeling, Identification and Control* **27**(4), 239–258.
- Pérez, T.; Fossen, T. I. (2008). Joint identification of infinite-frequency added mass and fluid-memory models of marine structures. *Modeling, Identification and Control* **29**(3), 93–102.
- Radzak, M. Y.; Arshad, M. R. (2005). Auv controller design and analysis using full-state feedback. In: *9th WSEAS International Conference on Systems (ICS'05)*. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). ACM. Wiscosin, Estados Unidos.
- Ramos, P.; Neves, M. V. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Environmental impact assessment and management of sewage outfall discharges using AUVs, pp. 417–436.

- InTech. Vienna, Austria.
- Sayyaadi, H.; Ura, T. (1999). Auv controller design and analysis using full-state feedback. In: *OCEANS '99*. Estados Unidos. pp. 201 – 208.
- Silvestre, C.; Pascoal, A. (2007). Depth control of the *infante auv* using gain-scheduled reduced order output feedback. *Control Engineering Practice* **15**(6), 883–895.
- Slotine, J. J.; Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical and research bulletin no. 1-5. SNAME. Nueva York, Estados Unidos.
- Sugeno, M.; Yasukawa, T. (1993). A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **1**(1), 7–31.
- Takagi, T. y Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **15**(1), 1166–132.
- Torres-Pinzón, C. A.; Leyva, R.; (2011). *MATLAB: A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer*. Chap. MATLAB: A Systems Tool for Design of Fuzzy LMI Controller in DC-DC Converters, pp. 259–276. InTech. Vienna, Austria.
- Ura, T.; Obara, T.; Nagahashi K.; Kim K.; Oyabu Y.; Sakamaki-T.; Asada A.; Koyama H. (2004). Introduction to an auv *r2d4* and its kuroshima knoll survey mission. In: *OCEANS 04*. Vol. 3. MTTTS/IEEE TECHNO-OCEAN 04. Japón. pp. 1606 – 1611.
- Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli H.; Rodríguez Y.; Cañizares J. R. (2013). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences* **19**(2), 175–200.
- Wernli, R. L. (2000). Auv commercialization-who's leading the pack?. Technical report. SPAWAR Systems Center San Diego. California, Estados Unidos.

- Yoshida, H. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Fundamentals of underwater vehicle hardware and their applications, pp. 557–582. InTech. Vienna, Austria.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control* **8**(3), 338–353.

ANEXO A

CÓDIGOS EN MATLAB PARA EL MODELADO Y CONTROL DIFUSO

El MDNL de 3 GDL y el modelo difuso se determinan a partir de datos geométricos, inerciales y experimentales del *HRC-AUV* que a continuación se declaran:

`m=4094.56;`

`Izz= 20816;`

`Xu= -181.45;`

`Yv= -1219.8;`

`Nr= -9096.9;`

`u=1.9 % velocidad lineal`

`Xuuu=(-47.49*u);`

`Xud= 250.84;`

`Yvd= 3834;`

`Nrd= 15572;`

`b1=0.1946;`

`b2=318.39;`

`b6=1273.56;`

Definición del rango de incertidumbre de las velocidades r y v .

`rmax=0.15`

`rmin=-0.15`

```
vmax=0.1
```

```
vmin=-0.1
```

Cálculo de los parámetros de la matriz A que presentan incertidumbres

Variación del término ubicado en la fila 1, columna 2.

```
Xd12max= (m-Yvd)*rmax/(m-Xud)
```

```
Xd12min= (m-Yvd)*rmin/(m-Xud)
```

Variación del término ubicado en la fila 2, columna 1.

```
Xd21max= (-m+Xud)*rmax/(m-Yvd)
```

```
Xd21min= (-m+Xud)*rmin/(m-Yvd)
```

Variación del término ubicado en la fila 3, columna 1.

```
Xd31max= (Yvd-Xud)*vmax/(Izz-Nrd)
```

```
Xd31min= (Yvd-Xud)*vmin/(Izz-Nrd)
```

Matrices A. Salidas del modelo difuso

```
A1=[(Xu+Xuuu)/(m-Xud) Xd12max 0; Xd21max Yv/(m-Yvd) 0; Xd31max 0 Nr/(Izz-Nrd)]
```

```
A2=[(Xu+Xuuu)/(m-Xud) Xd12min 0; Xd21min Yv/(m-Yvd) 0; Xd31max 0 Nr/(Izz-Nrd)]
```

```
A3=[(Xu+Xuuu)/(m-Xud) Xd12max 0; Xd21max Yv/(m-Yvd) 0; Xd31min 0 Nr/(Izz-Nrd)]
```

```
A4=[(Xu+Xuuu)/(m-Xud) Xd12min 0; Xd21min Yv/(m-Yvd) 0; Xd31min 0 Nr/(Izz-Nrd)]
```

Matriz B.

```
B=[b1/(m-Xud) 0; 0 b2/(m-Yvd); 0 b6/(Izz-Nrd)];
```

Ejecución de los *FIS*

```
Fuzzy_finishOK =readfis('Fuzzy_finishOK')
```

```
fuzzycontrol = readfis('fuzzycontrol')
```

ANEXO B

CÓDIGOS EN MATLAB PARA DESARROLLAR LA COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DEL MDNL DE 3 GDL Y EL MODELO DIFUSO

Coordenadas (x, y)

```
x11=[PosX.signals.values, PosY.signals.values]
```

que representan el MDNL de 3 GDL}

Coordenadas (x, y) que representan el Modelo difuso

```
x22=[PosXfz.signals.values, PosYfz.signals.values]
```

Intervalo de confianza

```
alpha=0.05; Intervalo de confianza
```

Ejecución del test de Kolmogorov-Smirnov

```
[H, pValue, KSstatistic] = kstest_2s_2d(x11, x22, alpha)
```

Cálculo de la media del error y la Desviación Estándar

```
dist=sqrt((PosX.signals.values-PosXfz.signals.values)^2+
```

```
(PosY.signals.values-PosYfz.signals.values).^2)
```

```
mean_error = mean(dist)
```

```
std_dev=std(dist)
```