



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

PROGRAMA DE SISTEMAS AUTONOMOS DE NAVEGACION AÉREA Y SUBMARINA

Navegación con módems acústicos

T E S I S

Que presenta

Ing. José Manuel Valdovinos Fernández

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

Directores de Tesis:

Dr. Rogelio Lozano Leal

Dr. Sergio Salazar Cruz

Ciudad de México.

Febrero, 2018

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología **CONACYT** y a **CINVESTAV** por el apoyo económico otorgado para la realización de esta maestría.

A mis asesores por haberme apoyado y brindado su consejo y retroalimentación de manera objetiva.

A mis padres por haberme formado de manera integral.

A mis compañeros por brindarme su ayuda y compartirme su experiencia.

Resumen

En esta tesis se analiza el problema de navegación de un vehículo submarino autónomo en un plano horizontal (x,y). En específico la localización se realiza utilizando medios acústicos, la resolución de la problemática planteada se lleva a cabo a partir de una arquitectura conformada por dos módems acústicos, uno se coloca en una baliza fija y el otro se monta en un vehículo submarino, posterior se realiza una etapa de filtrado y la señal obtenida se utiliza como la retroalimentación del sistema de control. Con el propósito de validar el algoritmo propuesto se presentan los principales resultados en simulación y posteriormente se realizan pruebas experimentales utilizando para esto el prototipo LIRMMIA 2, vehículo submarino tipo ROV con 4 grados de libertad el cual fue desarrollado previamente para el trabajo de Tesis [8] .

Abstract

In this thesis, the navigation problem of an autonomous submarine vehicle in a horizontal plane (x, y) is analyzed. In specific, the location is made using acoustic means, the resolution of the proposed problem is carried out using an architecture formed by two acoustic modems, one is placed in a fixed beacon and the other is mounted in a submarine vehicle, later it is performs a filtering stage and the resulting signal is used as the feedback of the control system. In order to validate the proposed algorithm, the main simulation results are presented and experimental tests are subsequently carried out using the prototype LIRMMIA 2, an underwater vehicle type ROV with 4 degrees of freedom which was previously developed for the work of Thesis [8].

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	VI
Abstract	VIII
Índice de tablas	XII
Índice de figuras	XIII
1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Breve historia de los vehículos submarinos	3
1.4. Vehículos submarinos no tripulados	4
1.5. Localización acústica en los vehículos submarinos	5
2. Descripción del Prototipo Lirmia 2	9
2.1. Aspectos mecánicos del prototipo	9
2.1.1. Simetría en el diseño del vehículo	9
2.1.2. Orientación del vehículo en un fluido hidrostático	10
2.1.3. Sistema de propulsión del vehículo	11
2.2. Aspectos electrónicos del prototipo	12
2.2.1. Descripción de los componentes del sistema electrónico	12
3. Modelado y Simulación	17
3.1. Cinemática	17
3.1.1. Marcos de Referencia	18
3.1.2. Transformación entre marcos de referencia	19
3.1.3. Calculo numérico de la posición	20
3.1.4. Transformación de la velocidad angular	20
3.1.5. Modelo cinemático para 3 GDL	21
3.2. Modelo Dinámico	21
3.2.1. Matriz de inercia	21
3.2.2. Matriz de coriolis y fuerzas centripetas	22

3.2.3.	Matriz de damping	23
3.2.4.	Vector de fuerzas, momentos gravitacionales y de flotabilidad	23
3.2.5.	Modelo de 3 GDL para un plano horizontal	25
3.2.6.	Modelo para posicionamiento dinámico de vehículos a bajas velocidades	25
3.3.	Parámetros	26
4.	Localización y Navegación	28
4.1.	Localización	28
4.1.1.	Algoritmo de localización	28
4.1.2.	Detección de la falsa posición	31
4.2.	Navegación	31
4.2.1.	Prueba de estabilidad del controlador	34
4.3.	Pruebas de simulación	37
4.3.1.	Simulación del algoritmo de localización	37
4.3.2.	Caracterización del sensor	37
4.3.3.	Resultados de simulación para el algoritmo de localización	38
4.4.	Simulación del algoritmo de navegación	40
4.4.1.	Resultados de simulación para el algoritmo de navegación	41
5.	Pruebas experimentales	43
5.1.	Control PD en ψ	43
5.2.	Validación del algoritmo de navegación	44
6.	Análisis de resultados y Trabajo futuro	53
6.1.	Análisis de resultados	53
6.2.	Trabajo Futuro	54
7.	APÉNDICE A	55
	Bibliografía	56

Índice de tablas

2.1. Propiedades Físicas del LIRMIA 2	12
2.2. Especificaciones del módem acústico	14
3.1. Notación propuesta por la SNAME	17

Índice de figuras

1.1. DVL	2
1.2. Submarino Drebbel	3
1.3. Submarino Drebbel	4
1.4. Submarino Drebbel	4
1.5. Vehiculo ROV	5
1.6. Navegación USBL	6
1.7. Navegación SBL	6
1.8. Navegación LBL	7
2.1. Equilibrio Hidrostatico	11
2.2. Sistema de propulsion del LIRMIA 2.	11
2.3. Sistema electrónico.	12
2.4. Montaje de un par de modems	13
3.1. Velocidades en el Lirmia 2.	18
3.2. Tipos de flotabilidad.	24
4.1. Distancia entre módems	29
4.2. Medición del módem y el sensor de presión	30
4.3. Error de posicion horizontal	33
4.4. Diagrama de flujo del algoritmo de navegacion	34
4.5. Caracterizacion del sensor.	38
4.6. Fusión de Datos	38
4.7. Simulación de Navegación	41
5.1. Control en los motores derechos	44
5.2. Control PD en ψ con perturbaciones.	44
5.3. Resultado experimental: circuito triangular esquemático.	46
5.4. Resultado experimental: circuito triangular con waypoints.	47
5.5. Grafica de la prueba experimental de navegacion	47
5.6. Circuito triangular: grafica Waypoint A	48
5.7. Resultado experimental: Primer waypoint alcanzado.	49
5.8. Circuito triangular: grafica Waypoint B	49
5.9. Prueba: Primer waypoint alcanzado.	50
5.10. Circuito triangular: grafica de final de recorrido	50

5.11. Resultado experimental: Primer waypoint alcanzado. 51

7.1. Dimensiones generales 55

Introducción

La estructura de esta tesis aborda en el primer capítulo las motivaciones de esta, presentando también el objetivo general del trabajo así como los objetivos generales y particulares. En el segundo capítulo se describe el prototipo que se usará para las pruebas experimentales y se tocan temas como el diseño mecánico y el sistema electrónico embebido. El tercer capítulo describe el modelo que se usará para este trabajo y muestra algunas simulaciones del mismo. En el capítulo cuatro se describe el algoritmo de localización y cómo se integrará para la tarea de navegación del vehículo, se incluyen también algunos resultados de simulación para la localización y navegación. En el quinto capítulo se presentan las distintas pruebas experimentales realizadas para validar los controladores empleados, el algoritmo de localización y la tarea de navegación. Por último en el capítulo seis se comparan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales con los resultados de simulación presentados en el capítulo cuatro y también se muestran objetivos para trabajos futuros.

Existe una amplia gama de aplicaciones para los vehículos submarinos algunos ejemplos abarcan; uso bélico, tareas de exploración, recuperación de materiales, inspección de zonas peligrosas para el hombre, arqueología, control de calidad en la industria de los combustibles.

Dentro de los vehículos submarinos se encuentran los tripulados y no tripulados, dentro de la segunda clasificación encontramos los tipo ROV por sus siglas en inglés (*Remotely Operated Vehicles*) que datan de los años 50's y los AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) que hicieron su primera aparición a inicios de los años 60's. Estos segundos navegan utilizando sistemas de control con retroalimentación de posición, velocidad y/o aceleración para lo que se emplean diversos sensores así como métodos de localización

La navegación y localización de AUV's es un reto complicado debido a la rápida atenuación de señales en el medio acuático y la naturaleza no estructurada en el entorno submarino.

En superficie, la mayoría de los sistemas autónomos se basan en comunicaciones de radio y GPS. Sin embargo en el entorno submarino estas señales solo se propagan distancias cortas y los sensores y sistemas de comunicación basados en acústica tienen un mejor desempeño.

Existen algunos sensores como los DVL (*Doppler Velocity Logger*) que han probado ser eficientes en la tarea de obtener la velocidad del vehículo, su principio de funcionamiento se

describe a continuación:

- Envía una señal acústica oscilatoria a través de cada uno de los ejes del transductor.
- Muestra la señal que regresa.
- Determina el corrimiento en frecuencia entre la señal enviada y la recibida para cada eje.
- Encuentra la velocidad del DVL para cada uno de los ejes del transductor utilizando los corrimientos en frecuencia.
- Utiliza estas velocidades parciales para encontrar la velocidad del DVL.



Figura 1.1: DVL (*Doppler Velocity Log*)

Sin embargo el rango de precios para estos se encuentra muy por encima de algunas aplicaciones, por lo que esta infraestructura no resulta adecuada para todo tipo de vehículos.

Otra opción para la localización son las balizas acústicas, inspiradas en los sistemas SBL (*Short BaseLine*) y USBL (*Ultra Short BaseLine*)

1.1. Objetivo General

Llevar a cabo la tarea de navegación para un vehículo submarino en un plano horizontal (x,y), utilizando como retroalimentación de posición el dato estimado a partir de la medición de dos sensores acústicos (módems).

1.2. Objetivos Específicos

- Puesta en marcha de un vehículo submarino tipo ROV de 4 grados de libertad para validación del método de navegación propuesto en este trabajo de tesis
- Triangular posición en 2 dimensiones con 2 módems

Contribución

Este trabajo de tesis presenta un método para estimar la velocidad y posición de un vehículo submarino relativa a un sensor acústico anclado a una baliza fija de coordenadas conocidas.

1.3. Breve historia de los vehículos submarinos

1620 - Cornelio Van Drebbel inventor Holandés que radicaba en Inglaterra quien también invento el termómetro construyo un vehículo sumergible de madera forrado por piel caprina el cual es considerado como el primer proyecto serio de construcción de un submarino, su diseño se inspiro en los bocetos de Da Vinci.

1775 - En Estados Unidos, David Bushnell desarrollo un pequeño submarino para una persona conocido como *Turtle*, este fue el primer submarino de la historia usado en combate.

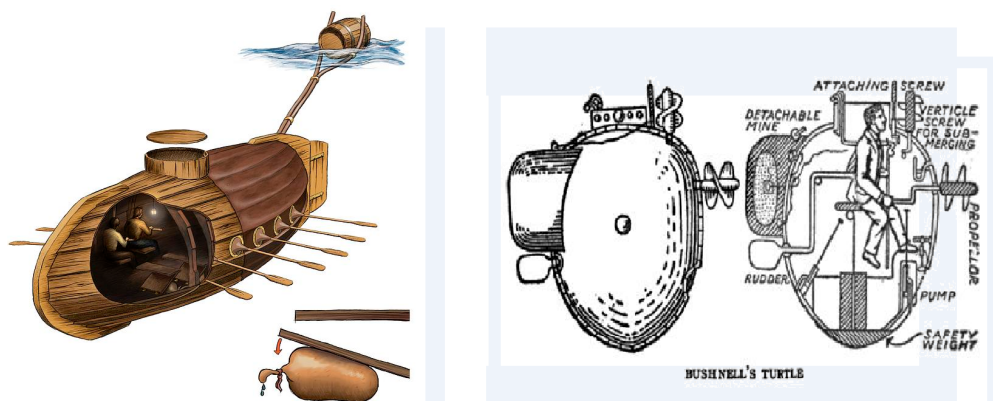


Figura 1.2: Submarino de Cornelius Drebbel lado izquierdo. Submarino *Turtle* lado derecho.

1885 - Isaac Peral, un ingeniero Español diseña el primer submarino con motores eléctricos y acumuladores el tenía una longitud de 22 m.

1953 - El Científico e Ingeniero Francés Dimitri Rebikoff desarrolla el primer Vehículo submarino no tripulado tipo ROV llamado *Poddle*.

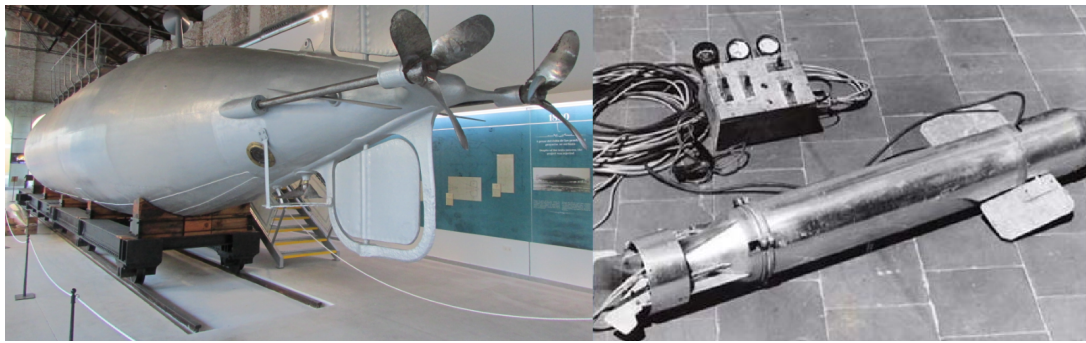


Figura 1.3: Submarino de Isaac Peral lado izquierdo. ROV *Poddle* lado derecho.

1957 - Se desarrolla el primer vehículo submarino autónomo en el laboratorio de Física aplicada de la universidad de Washington llamado SPURV por sus siglas en ingles *Self-Propelled Underwater Research Vehicle*

1970 - La industria de los hidrocarburos produce *Work-Class ROVS* los cuales son utilizados como un soporte para los buzos.

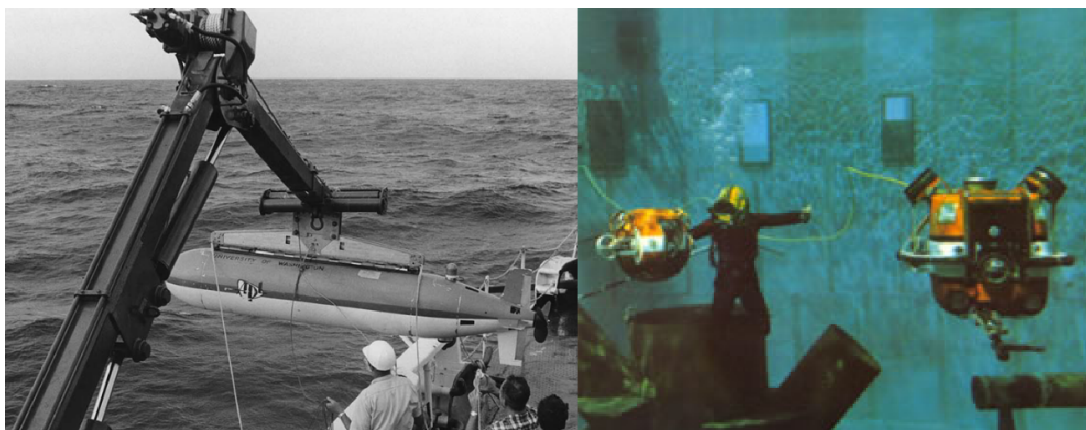


Figura 1.4: Primer AUV *SPURV* lado izquierdo. Work Class ROV RCV-150 y RCV-225 lado derecho.

En la actualidad los vehículos submarinos no tripulados alcanzan profundidades mas haya de los 10'000 metros de profundidad, estas tecnologías han alcanzado un nivel de costo/efectividad que han permitido cada vez a mas sectores operar estos vehículos para aplicaciones cada vez mas variadas.

1.4. Vehículos submarinos no tripulados

Un vehículo submarino no tripulado o UUV por sus siglas en ingles *Unmanned Underwater Vehicle* es un robot submarino que es capaz de operar sin tener una tripulación a bordo.

El desarrollo de los UUV tomo fuerza en los años 70's a partir de la necesidad de llevar a cabo tareas submarinas que por poseer una naturaleza cíclica, ser peligrosas o guiarse por varios indicadores repetitivos resultaban mas indicadas para este tipo de vehículos.

La clasificación de los UUV de acuerdo a su autonomía los divide en ROV y AUV por sus siglas en inglés *Remotely Operated Vehicle* y *Autonomous Underwater Vehicle* respectivamente.

- **ROV** - son vehículos controlados por un piloto remoto, estos vehículos normalmente se conectan a una embarcación o centro de mando a través de un cable también llamado ombligo por donde se puede realizar el suministro de energía y la transferencia de datos.

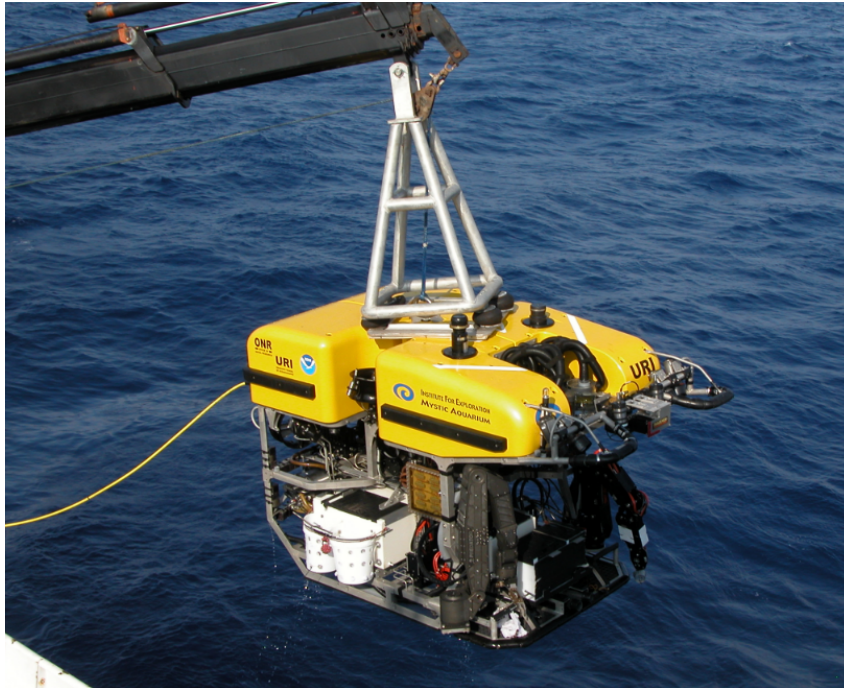


Figura 1.5: Este es un submarino tipo ROV se observa el cable de comunicación y/o alimentación u ombligo en color amarillo

- **AUV** son vehículos submarinos autónomos comúnmente utilizados para tareas de vigilancia, mapeo, monitoreo, etcétera.

estos vehículos realizan sus tareas sin la intervención de un operador y cuando la tarea es completada regresan a una ubicación pre programada donde los datos recolectados pueden ser descargados y el vehículo recargado.

1.5. Localización acústica en los vehículos submarinos

Sobre el agua muchos sistemas autónomos se basan en las radiocomunicaciones, comunicaciones de amplio espectro y GPS. En el medio submarino, sin embargo, estas señales se propagan solo distancias cortas por esto los sensores y comunicaciones basados en acústica muestran un mejor desempeño.

Las técnicas basadas en módems acústicos utilizan el tiempo de vuelo, de señales provenientes de balizas o módems acústicos para llevar a cabo la navegación.

Entre los métodos comunes se encuentran:

- USBL: Por sus siglas en ingles *Ultra Short Baseline* En este tipo de navegación el AUV se puede localizar relativo a una embarcación de superficie, los sensores acústicos se colocan a menos de 0.1 m de distancia entre ellos, la distancia relativa se calcula a partir del TOF y la orientación se calcula a partir de la diferencia en la fase de la señal que llega a un arreglo sensores acústicos.

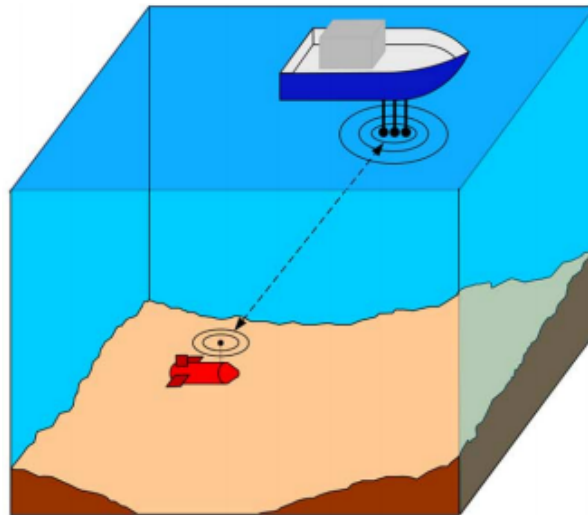


Figura 1.6: Navegación USBL

- SBL: por sus siglas en ingles *Short Baseline* es un método en donde los sensores acústicos se colocan en los extremos opuestos de la parte inferior de una embarcación de superficie.

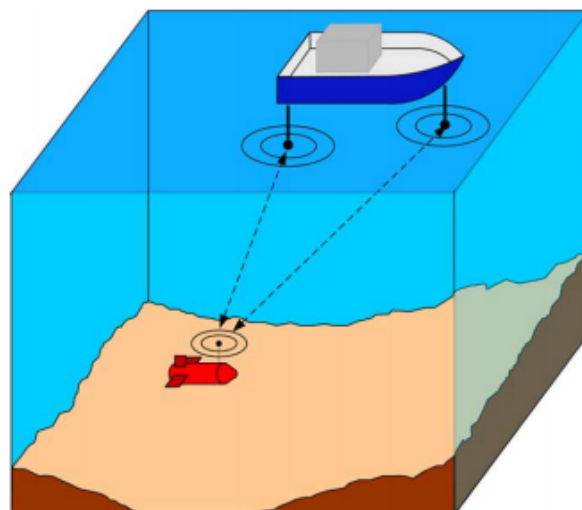


Figura 1.7: Navegación SBL

La mayor limitación de la navegación USBL es el rango y en SBL es que la precisión de la posición depende de la línea base, esto es la longitud de la embarcación de superficie

- LBL (*Long Baseline*) y GIBs (*GPS Intelligent Buoys*) Balizas acústicas son colocadas en los límites del área donde se llevara a cabo la misión, la localización se lleva a cabo en base a triangulación entre las señales acústicas, en el caso de las GIBs las balizas acústicas se colocan en la superficie mientras que en LBL se colocan en el lecho marino o en el fondo de la piscina.

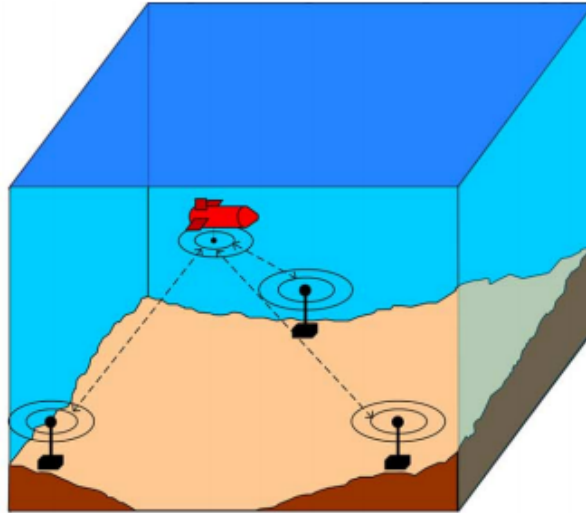


Figura 1.8: Navegación LBL

- *Módems Acústicos* Los módems acústicos permiten medición de rango a partir de TOF y envío y recepción de paquetes pequeños de manera simultánea. Si la posición del transmisor se incluye en la información enviada, el receptor puede delimitar su posición a una esfera centrada en el transmisor. La característica mencionada elimina la necesidad de que las balizas acústicas estén fijas como en el caso de la navegación LBL.

Descripción del Prototipo Lirmia 2

Este capítulo presenta las características principales del vehículo LIRMIA 2, tanto electrónicas como mecánicas, así como algunas consideraciones necesarias para entender simplificaciones del modelo presentadas en el capítulo 3.

La primera parte del capítulo se enfoca en los aspectos mecánicos, así como en algunas consideraciones de diseño, también muestra la configuración de los propulsores que otorgan movilidad al vehículo. La segunda parte muestra como está constituida la electrónica del vehículo la unidad de procesamiento que en este caso es una Fit PC, los diferentes sensores y drivers hasta llegar a los actuadores.

2.1. Aspectos mecánicos del prototipo

Este vehículo submarino se construyó en el laboratorio UMI-LAFMIA como parte del trabajo de tesis [8]. Es la plataforma empleada para la validación del algoritmo de localización y navegación de este trabajo de tesis.

El prototipo empleado en este trabajo de tesis está diseñado para operar a bajas velocidades, esto es, menores a los $2m/s$. Esta condición operacional permite realizar simplificaciones en el modelo dinámico y cinemático así como en los parámetros hidrodinámicos. Así mismo se puso especial atención en los siguientes aspectos del diseño mecánico:

- Simetría en el diseño del vehículo.
- Orientación del vehículo en el fluido hidrostático.

2.1.1. Simetría en el diseño del vehículo

Analizar el modelo matemático de un vehículo móvil, implica usar un sistema coordenado fijo en el cuerpo del vehículo (*b-frame*). Con respecto a este sistema de coordenadas se calcula el tensor de inercia de cuerpo rígido; este paso es crucial para obtener las ecuaciones que describen la dinámica del vehículo.

Para un cuerpo rígido, el tensor de inercia es una matriz que se describe como:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad I = I^T > 0 \quad (2.1)$$

con:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \sum_{i \in R_B} m_i (y_i^2 + z_i^2), & I_{xy} &= I_{yx} = \sum_{i \in R_B} m_i x_i y_i \\ I_{yy} &= \sum_{i \in R_B} m_i (x_i^2 + z_i^2), & I_{xz} &= I_{zx} = \sum_{i \in R_B} m_i x_i z_i \\ I_{zz} &= \sum_{i \in R_B} m_i (x_i^2 + y_i^2), & I_{yz} &= I_{zy} = \sum_{i \in R_B} m_i y_i z_i \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde i representa el índice de una partícula de cuerpo rígido, RB por sus siglas en inglés *Rigid Body*, I_{xx} , I_{yy} y I_{zz} describen los torques de inercia, y I_{xy} , I_{xz} , I_{yx} , I_{yz} , I_{zx} y I_{zy} son los productos de inercia con respecto del marco de referencia R_B .

Basado en las ecuaciones de la parte superior se puede ver que si el origen O_{R_B} del b -frame coincide con el centro de inercia y también los ejes del b -frame se eligen como los vectores propios de la matriz de inercia, con estas consideraciones los elementos fuera de la diagonal son cero:

$$\begin{aligned} I_{xy} &= I_{yx} = 0 \\ I_{xz} &= I_{zx} = 0 \\ I_{xy} &= I_{yx} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Así la matriz I queda escrita:

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Otra ventaja del diseño simétrico en los vehículos submarinos es que si se mueven a baja velocidad, tienen tres planos de simetría y tienen el centro de flotabilidad muy cerca del centro de gravedad, la matriz de parámetros hidrodinámicos se aproxima con una matriz diagonal lo cual simplifica el análisis del modelo matemático.

2.1.2. Orientación del vehículo en un fluido hidrostático

En figura 2.1 se puede observar que el peso y la fuerza de flotabilidad actúan directamente sobre el centro de masa (CM) y el centro de flotabilidad (CF) respectivamente. En consecuencia, la ubicación de estos puntos es esencial para determinar la orientación del vehículo.

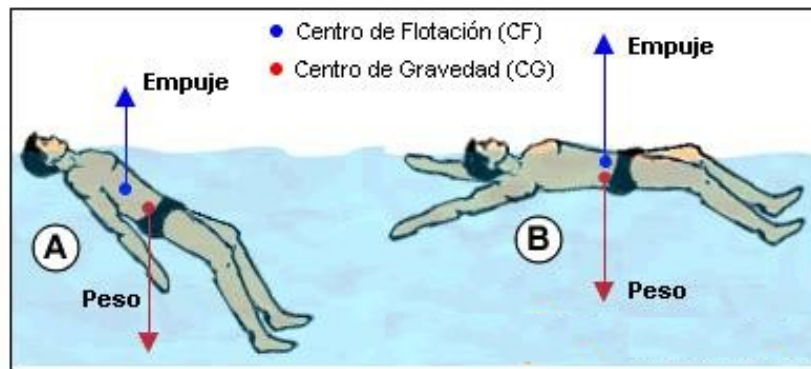


Figura 2.1: La posición relativa del Centro de flotabilidad y el Centro de masa definen la orientación de un cuerpo en equilibrio hidrostático

Dependiendo de los movimientos requeridos para la aplicación, la posición relativa de CM y CF deben ser elegidos tal que en el equilibrio hidrostático, los ejes que ofrezcan el menor amortiguamiento hidrodinámico estén alineados con las principales directrices del vehículo

2.1.3. Sistema de propulsión del vehículo

Los diferentes movimientos del vehículo se llevan a cabo con una configuración de 8 propulsores, como se muestra en la figura 2.2, sin embargo algunos de estos están conectados al mismo *controlador* por lo tanto podemos asumir que $f_1 = f_2$, $f_3 = f_4$, $f_5 = f_6$, $f_7 = f_8$.

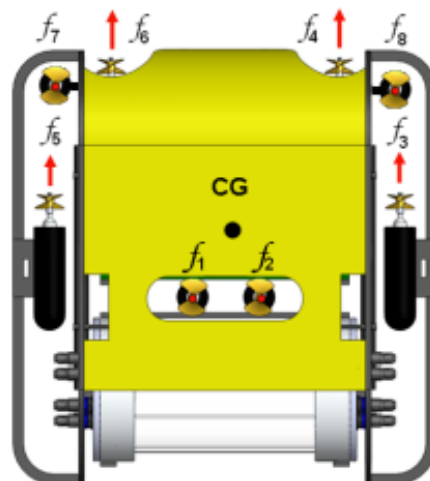


Figura 2.2: Se muestra una vista superior del LIRMIA 2 describiendo la distribución de sus propulsores, con el frente del vehículo orientado a la parte inferior de la imagen.

Nótese que el ángulo roll (ϕ) no está actuado. El movimiento en el ángulo yaw (ψ) se lleva a cabo mediante un control de velocidad diferencial en los propulsores que generan a f_3, f_4, f_5 y f_6 . A su vez el desplazamiento en el eje x del vehículo que es el eje que lo parte por la mitad y apunta al frente de este, se lleva a cabo combinando estos mismos propulsores

de manera uniforme. El desplazamiento en el eje z del vehículo que es aquel normal a la vista superior de este y apunta hacia abajo, se lleva a cabo combinando los propulsores que generan las fuerzas f_1 , f_2 , f_7 y f_8 .

Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del Lirmia 2 se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Propiedades Físicas del LIRMIA 2

Propiedad	Valor	Unidades
Peso	176	N
Flotabilidad	179	N
Dimensiones	53 x 50 x 23	cm

2.2. Aspectos electrónicos del prototipo

La arquitectura del sistema electrónico del vehículo LIRMIA 2 se muestra en la figura 2.3.

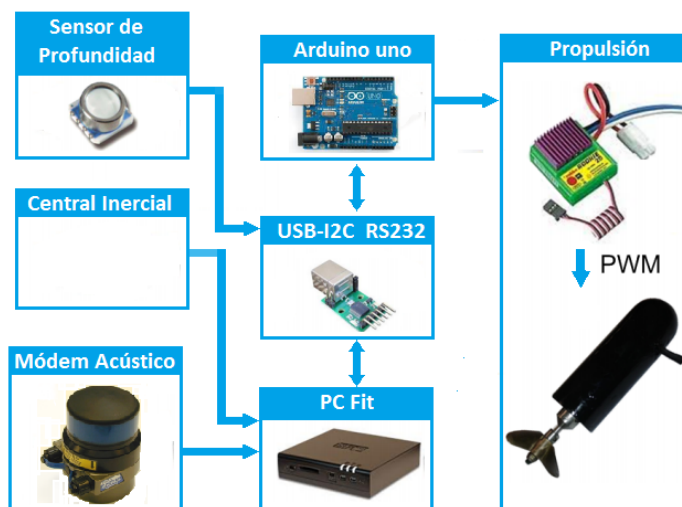


Figura 2.3: Instrumentación electrónica del LIRMIA 2.

2.2.1. Descripción de los componentes del sistema electrónico

A continuación se describen los dispositivos que forman el sistema electrónico.

PC Fit - Es la computadora embebida, cuenta con un procesador Intel Atom Z550 de 2 Ghz con 1 GB de memoria RAM. El sistema operativo de la computadora es Windows XP y se utiliza Visual C++ 2008 para el algoritmo de navegación. La computadora se conecta directamente al módem acústico y a la central Inercial e indirectamente (a través del convertidor USB-I2C) al Arduino uno y al sensor de presión.

Módem Acústico Trittech Micron - El módem acústico montado en el vehículo tiene la tarea de hacer un ping a un segundo módem colocado en una baliza fija, midiendo el tiempo total del ping (TOF - *Time of Flight*) el cual se envía por el canal acústico y conociendo la velocidad de propagación del sonido en el medio acuático es posible determinar distancia entre ambos módems.

El montaje típico de los módems se muestra en la imagen 2.4 en donde los términos esclavo y maestro son solo para ayudar a la descripción del sistema sin embargo se puede utilizar el esclavo en superficie y el maestro en el vehículo.

Una de las principales distinciones entre el módem esclavo y el maestro es que un módem esclavo solo se puede comunicar con el maestro, sin embargo el maestro puede transmitir datos a todos los módems esclavos en la red. Esta característica resulta útil para arquitecturas que utilizan mas de un par de módems.

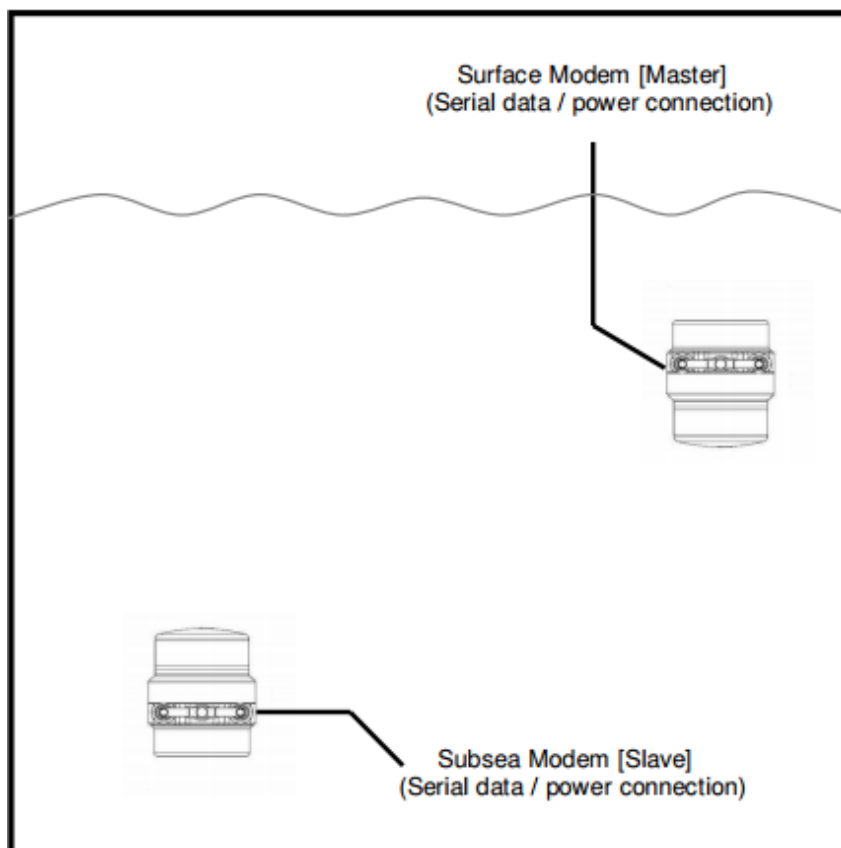


Figura 2.4: Montaje de un par de modems

Las características y desempeño de transmisión en agua dependen de una variedad de condiciones. estas pueden disminuir de manera significativa el rango operativo y son:

- La presencia de superficies que reflejen el sonido.
- Ruido del entorno.
- Salinidad.
- Reflectividad acústica del fondo y de la superficie.
- Corrimientos de efecto doppler, debido al movimiento relativo entre dos módems.

Las especificaciones del módem pueden ser consultadas en el manual del equipo [6] . Las principales se detallan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Especificaciones del módem acústico

Frecuencia de Operación	20 kHz a 24 kHz
Máxima distancia operativa	500m Horizontal / 150m Vertical
Potencia acústica de salida	3.5W Nominal
Tolerancia a efecto doppler	$\pm 5m/s$
SNR Mínimo	-6dB
Consumo de energía del emisor	330mA para 24V
Consumo de energía del receptor	30mA a 24V
Tasa de transferencia de datos	40 bits/seg
Profundidad máxima	750m
Voltaje de operación	12V a 24V
Corriente de operación durante transmisión en agua	600 mA típico
Tipo de comunicación	RS232

Central Inercial *IMU* - La central inercial se utiliza para medir la orientación del vehículo implementa un filtro Extendido de Kalman para mejorar la estimación de los ángulos: yaw ψ , pitch ϕ y roll θ y las velocidades angulares (r,p,q). La orientación se mide con respecto al *i-frame* mientras que las velocidades se miden con respecto al *b-frame*.

USB-I2C - Es la interfaz empleada para realizar el enlace entre la computadora y algunos dispositivos que poseen este protocolo de comunicación. Para este caso son: El sensor de presión y el Arduino uno.

Arduino uno - Esta tarjeta posee entradas/salidas analógicas y digitales, un microcontrolador ATmega328, 6 puertos PWM con modulación de ancho de pulso, un puerto de comunicación RS232 y un puerto I2C. Esta tarjeta se utiliza para generar los PWM que se emplean para controlar los propulsores a través de los controladores de motor (*drivers*).

Controladores de motor Rookie - Son dispositivos que controlan la velocidad y sentido de giro de los propulsores (formados por un motor de CD y una propela fija a la flecha del motor) mediante una configuración de puente H, trabajan a 12V con una corriente máxima de 20A.

Sensor de presión - este se utiliza para medir la posición vertical (z) del vehículo, relativa a la superficie del fluido. Esta medición resulta esencial cuando se requiere que el vehículo permanezca a una profundidad constante o cuando se utiliza acotar alguna medición en base a la profundidad.

Modelado y Simulación

Para este trabajo se adopta el modelo dinámico i cinemático propuesto por Fossen [2] para describir los vehículos submarinos.

La comunidad dedicada al estudio de los vehículos submarinos normalmente utiliza la notación de la SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*) [1] para representar fuerzas, torques, posición, altitud, velocidades lineales y angulares como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Notación propuesta por la SNAME

	Fuerzas y Torques	Velocidades Lineales y Angulares	Posición y Orientación
Movimiento en dirección del eje x (surge)	X	u	x
Movimiento en dirección del eje y (sway)	Y	v	y
Movimiento en dirección del eje z (heave)	Z	w	z
Rotación respecto al eje x (roll)	K	p	ϕ
Rotación respecto al eje y (pitch)	M	q	θ
Rotación respecto al eje z (yaw)	N	r	ψ

El análisis del modelo se puede dividir en dos partes: Cinemático que aborda solo los aspectos geométricos del movimiento y Dinámico que es aquel que estudia las fuerzas que generan el movimiento.

3.1. Cinemática

La cinemática de los vehículos móviles es el estudio del movimiento considerando la geometría del móvil sin considerar las fuerzas que lo generan. Para los vehículos submarinos los dos movimientos básicos son:

Traslacionales - que son *surge* (u) en dirección al eje "x", *sway* (v) en dirección al eje "y", así como *heave* (w) en dirección al eje "z". En este caso se hace referencia a los ejes del *b-frame* lo cual se explica mas a detalle en el apartado sobre marcos de referencia

Rotacionales - que son *roll* con respecto al eje "x", *pitch* con respecto al eje "y", así como *yaw* con respecto al eje "z".

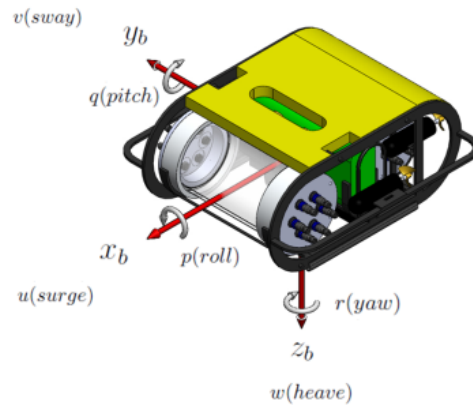


Figura 3.1: Velocidades rotacionales y traslacionales y *b-frame* en el Lirmia 2.

3.1.1. Marcos de Referencia

Dado que se está empleando el modelo propuesto por Fossen se emplearán los mismos marcos de referencia que propone en su libro [3] para mantener la misma nomenclatura.

El análisis del movimiento para el vehículo se lleva a cabo considerando tres marcos de referencia, uno fijo en el cuerpo (*b-frame*), otro fijo en el centro de la tierra (*e-frame*) y el último siendo un plano pequeño tangente a la tierra con sus ejes orientados al norte, este y hacia abajo normal al plano tangente a la superficie (*n-frame*). Estando la posición y orientación expresados de manera relativa al *n-frame* mientras que la velocidad lineal y angular, así como las fuerzas y momentos se definen respecto al *b-frame*.

e-frame - El *e-frame* o sistema de coordenadas centrado en la tierra $[x_e, y_e, z_e]$ tiene su origen en el centro del planeta y sus ejes giran relativos al movimiento de rotación terrestre. Debido a la velocidad (relativamente baja) en el movimiento de rotación, para vehículos submarinos de baja velocidad, el marco de referencia puede asumirse inercial y por lo tanto se rige por las leyes del movimiento de Newton.

b-frame - El *b-frame* o marco fijo en el cuerpo $[x_b, y_b, z_b]$ es móvil y está fijo a la embarcación por conveniencia se define su origen en el centro de gravedad de la embarcación y sus ejes se definen coincidentes con los principales ejes de inercia de la embarcación, esto para simplificar el modelo matemático que describe la dinámica del vehículo.

n-frame (NED) El sistema de coordenadas NED $[x_n, y_n, z_n]$ recibe su nombre de las siglas en inglés (*North-East-Down*). Está definido como el plano tangente en la superficie terrestre el cual sigue a la embarcación donde el eje *x* apunta hacia el Norte terrestre, el eje *y* hacia el Este mientras que el eje *z* apunta hacia abajo, normal a la superficie de la tierra. Se puede localizar

el n -frame de forma relativa al e -frame usando la latitud y longitud.

Para embarcaciones marinas que operan en un área local, con latitud y longitud aproximadamente constante, se utiliza un plano tangente fijo en la tierra para navegación. Nos referimos a esta como navegación de tierra plana y por simplicidad se denotara como n -frame para navegación de tierra plana, también se asumirá que el n -frame es inercial tal que las leyes de Newton siguen aplicando.

La posición y orientación del submarino están descritos por:

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (3.1)$$

Las velocidades lineales y angulares quedan definidas:

$$\nu = [u, v, w, p, q, r]^T \quad (3.2)$$

Las fuerzas y momentos que actúan sobre el submarino se definen:

$$\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T \quad (3.3)$$

3.1.2. Transformación entre marcos de referencia

La notación empleada para referirse a las matrices de rotación es la siguiente:

$$v^{to} = R_{from}^{to} v^{from} \quad (3.4)$$

Las matriz de rotación entre los marcos de referencia R_b^n se forma del producto punto entre las matrices correspondientes a la rotación respecto a cada eje. Las matrices que describen estas rotaciones son las siguientes.

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}, \quad R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix},$$

$$R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

El orden de las rotaciones se lleva a cabo en el orden zyx:

$$R_b^n(\theta) := R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (3.6)$$

Expandiendo la Ecuación (3.6) tenemos:

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\phi) & -\sin(\psi) \cos(\phi) + \cos(\psi) \sin(\theta) \sin(\phi) & \sin(\psi) \sin(\phi) + \cos(\psi) \cos(\phi) \sin(\theta) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Así el vector de velocidad en el marco NED queda definido como:

$$[\dot{n}, \dot{e}, \dot{d}]^T = R_b^n(\Theta)[u, v, w]^T \quad (3.8)$$

3.1.3. Cálculo numérico de la posición

La posición de la embarcación se puede encontrar aplicando integración de Euler a la ecuación 3.8

$$\begin{bmatrix} n(k+1) \\ e(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n(k) \\ e(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + hR_b^n(\Theta(k)) \begin{bmatrix} u(k) \\ v(k) \\ w(k) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Donde:

$h > 0$ es el tiempo de muestreo

k es el número de muestra

3.1.4. Transformación de la velocidad angular

Para las velocidades angulares la matriz de transformación entre el NED frame y el b-frame esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T_\Theta(\Theta) \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Donde $T_\Theta(\Theta) \in R^{3 \times 3}$ es:

$$T_\Theta(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

En este caso la matriz no es ortogonal y por lo tanto su transpuesta no es igual a su inversa.

Ecuaciones Cinemáticas para 6 GDL

Resumiendo lo expuesto hasta este punto la representación vectorial de las ecuaciones cinemáticas para 6 GDL es:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= J(\eta)\nu \\ &\Downarrow \\ \begin{bmatrix} \dot{p}^n \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_\Theta(\Theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}^n \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.1.5. Modelo cinemático para 3 GDL

Una simplificación de (3.12) es la representación para 3 GDL (surge, sway y yaw), que se basa en la suposición de que ϕ y θ son pequeños. Por lo tanto, $R_b^n(\Theta) = R_{z,\psi}R_{y,\theta}R_{x,\phi} \approx R_{z,\psi}$ y $T_\Theta(\Theta) \approx I_{3 \times 3}$. Descartando los elementos correspondientes a heave, roll y pitch finalmente tenemos:

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (3.13)$$

donde:

$$R(\psi) = R_{z,\psi}, \text{ mientras } \nu = [u, v, r]^T \text{ y } \eta = [x, y, \psi]^T.$$

3.2. Modelo Dinámico

Para este trabajo se utilizó la representación propuesta por la SNAME y ecuación que describe la dinámica para el submarino en 6 GDL con respecto al b-frame fue adoptada de [2] y queda definida como:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \omega_e \quad (3.14)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (3.15)$$

donde:

M - Es la matriz de inercia

C - Es la matriz de Coriolis y fuerzas centripetas

$D(\nu)$ - Es la matriz de damping

$g(\eta)$ - Es el vector de fuerzas y momentos gravitacionales y de flotabilidad

τ - Es el vector de entradas de control

ω_e - Es el vector de perturbaciones ambientales (viento, olas y corrientes)

3.2.1. Matriz de inercia

La matriz de inercia se compone de la suma entre la matriz de masa e inercia de cuerpo rígido M_{RB} y la matriz debida a la energía cinética del fluido M_A :

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.16)$$

Las ecuaciones de cuerpo rígido se pueden simplificar eligiendo el origen coincidente con el CG $r_g^b = [0, 0, 0]^T$ y haciendo los ejes del b-frame coincidentes con los ejes principales de inercia, con estas simplificaciones la matriz de inercia del cuerpo rígido tendría la forma:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \text{diag}(I_x, I_y, I_z) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

La matriz M_A que describe las masas agregadas esta dada por:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Los coeficientes de la matriz M_A son en general difíciles de calcular sin embargo para aplicaciones de baja velocidad los coeficientes fuera de la diagonal son muy pequeños en comparación con los coeficientes de la diagonal por lo que la matriz M_A se puede reducir a:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.2.2. Matriz de coriolis y fuerzas centripetas

Asumiendo que el vehículo es un cuerpo rígido que se desplaza en un fluido ideal la matriz de coriolis para masas agregadas se expresa como una matriz antisimétrica que es:

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.2.3. Matriz de damping

La matriz de damping representa la interacción entre el vehículo y el fluido que lo rodea; las fuerzas y torques hidrodinámicos resultantes son no lineales y acoplados. Estas fuerzas y torques son difíciles de calcular de manera precisa, en consecuencia se prefieren explotar las propiedades físicas del sistema para reducir el numero de coeficientes que se necesitan para el control; por ejemplo una aproximación para aplicaciones de baja velocidad es considerar el damping lineal y no acoplado. Se asume que la matriz de damping tendrá una estructura diagonal similar a la de masas agregadas, siendo esta:

$$D(\nu) = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Se sabe al menos que los parámetros hidrodinámicos son positivos por lo tanto la matriz satisface la siguiente propiedad:

$$D(\nu) > 0 \quad \forall \dot{\nu} \in \mathbb{R}^{6 \times 1} \quad (3.23)$$

3.2.4. Vector de fuerzas, momentos gravitacionales y de flotabilidad

En términos de vehículos submarinos la fuerza gravitacional (f_W) y la fuerza de flotabilidad (f_B) son llamadas fuerzas restaurativas. Se puede tomar ventaja de estas fuerzas a modo de reducir el numero de thrusters para controlar algunos grados de libertad. Por otro lado, sabemos que estas fuerzas son siempre normales a la superficie terrestre, entonces podemos asumir que la componente del peso se encuentra colineal al eje Z del marco inercial hacia el centro de la tierra y que la componente de flotabilidad se encuentra en la dirección opuesta como se muestra en la figura 3.2. Así de acuerdo al principio de flotabilidad de Arquímedes tenemos:

$$f_B = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho g V \end{bmatrix} \quad f_W = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

donde:

ρ Representa la densidad del fluido.

g Representa la aceleración debido a la gravedad.

V Es el volumen del fluido desplazado.

m Es la masa del vehículo

Para analizar f_W y f_B en el b-frame utilizamos la matriz de transformación de ángulos de Euler $R_b^n(\theta)$ que se definió en el apartado sobre la cinemática del vehículo, de la forma:

$$F_B = R_b^n(\theta)^{-1} f_B \quad F_W = R_b^n(\theta)^{-1} f_W \quad (3.25)$$

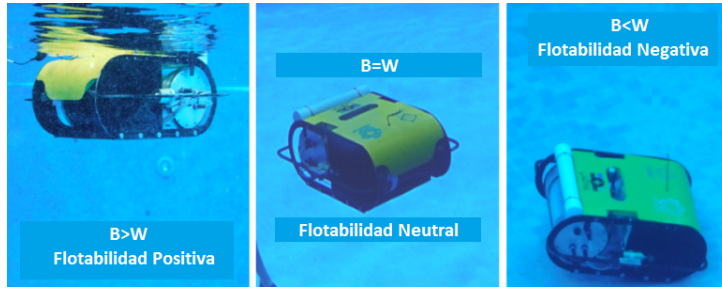


Figura 3.2: Se muestran los tres casos, flotabilidad positiva, neutra y negativa.

así:

$$F_B = - \begin{bmatrix} B \sin(\theta) \\ -B \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -B \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad F_W = - \begin{bmatrix} W \sin(\theta) \\ -W \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -W \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

donde:

$$B = \rho g V$$

$$W = mg$$

Así el vector de momentos y fuerzas restaurativas queda definido como:

$$g(\eta) = - \begin{bmatrix} F_B + F_W \\ r_g \times F_W + r_b \times F_B \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Donde:

$r_g = [x_g, y_g, z_g]^T$ es el Centro de Gravedad expresado en el b-frame.

$r_b = [x_b, y_b, z_b]^T$ es el Centro de Flotabilidad expresado en el b-frame.

Expandiendo 3.27:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_g W - z_b B) \sin \theta + (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Se elige el centro de gravedad coincidente con el centro de flotabilidad en sus coordenadas (x_g, x_b) y (y_g, y_b) para simplificar el vector de fuerzas restaurativas, y la coordenada de z_b se elige por debajo de z_g esto es:

$$z_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad z_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -z_b \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Sustituyendo 3.29:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ K_g \\ M_g \\ N_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -z_b B \cos \theta \sin \phi \\ -z_b B \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

3.2.5. Modelo de 3 GDL para un plano horizontal

El prototipo empleado para este trabajo de tesis, es estable en pitch y en roll por diseño, además este trabajo de tesis aborda el problema de navegación en un plano horizontal dadas estas consideraciones, por simplicidad se empleara un modelo reducido a tres grados para un plano horizontal.

El movimiento horizontal de un AUV se puede describir por sus componentes en surge, sway y yaw. Por lo tanto elegimos $\nu = [u, v, r]^T$ y $\eta = [n, e, \psi]^T$, esto implica que la dinámica asociada con el movimiento en heave, roll y pitch son despreciables, esto es $\omega = p = q = 0$. Además, aplicaciones de baja velocidad, esto es, vehículos posicionados de manera dinámica donde $U \approx 0$ y aplicaciones a altas velocidades son tratadas por separado.

El prototipo empleado para este trabajo de tesis esta diseñado para aplicaciones de baja velocidad, esto es con un desplazamiento menos a $2m/seg$ por lo tanto para este caso abordaremos el modelo para posicionamiento dinámico para vehículos de bajas velocidades.

3.2.6. Modelo para posicionamiento dinámico de vehículos a bajas velocidades

Para el desplazamiento horizontal de una embarcación las ecuaciones cinemáticas de movimiento, reducidas de la expresión general de 6 GDL (3.12) a una rotación principal respecto al eje z:

$$J(\eta) \stackrel{3GDL}{=} R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Como para la matriz de inercia, el damping lineal en surge esta desacoplado de sway y yaw. Esto implica que:

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

El damping lineal es una buena suposición para aplicaciones de baja velocidad ver sección 3.2.2 de [2]. De forma similar los términos de velocidad cuadráticos dados por $C(\nu)\nu$ son descartables en este caso de posicionamiento dinámico. Por tanto, un modelo que cumple bien

para este propósito es:

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (3.33)$$

$$M\dot{\nu} + D\nu = \tau \quad (3.34)$$

Donde:

$$\tau = Bu \quad (3.35)$$

Aquí B es la matriz de control que describe la configuración de los thrusters y u es el vector de entradas de control.

El modelo matemático descrito en las ecuaciones 3.33 y 3.34 se emplea en el algoritmo de localización que se muestra en el siguiente capítulo para en base a la estimación a partir de este modelo usarse como criterio para descartar uno de dos pares coordenados obtenidos a partir de medición; esto se explica mas a detalle en el siguiente capítulo.

3.3. Parámetros

Los parámetros utilizados para este modelo fueron tomados del trabajo de tesis [8] y se presentan a continuación:

$$W = 176 \quad (3.36)$$

Para la matriz de inercia,

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.37)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 17.94 & 0 & 0 \\ 0 & 17.94 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$M_A = \begin{bmatrix} 0.930 & 0 & 0 \\ 0 & 0.355 & 0 \\ 0 & 0 & 0.002 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Para la matriz de amortiguamiento hidrodinámico,

$$D = \begin{bmatrix} 29.37 & 0 & 0 \\ 0 & 29.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Localización y Navegación

Este capítulo comienza describiendo la infraestructura necesaria para la tarea de localización, posteriormente se presenta el algoritmo empleado para llevar a cabo esta tarea teniendo como salida final de este algoritmo dos pares coordenados que representan las intersecciones de una recta y un círculo. la siguiente subsección explica la forma en que se descarta uno de estos pares coordenados y se selecciona el par coordenado que representa la posición del vehículo. Posteriormente se presenta la sección correspondiente a la navegación para lo que se emplea la posición estimada a partir del algoritmo presentado en la primera sección del capítulo como retroalimentación de un control PD y se utiliza la función arco-tangente para determinar el ángulo necesario para alcanzar la posición deseada.

4.1. Localización

En esta sección se describe la metodología para llevar a cabo la localización en un plano horizontal a partir de la medición entre dos módems acústicos.

La infraestructura necesaria para llevar a cabo esta tarea consiste en un módem acústico colocado en una baliza fija de posición conocida (m_x, m_y, m_z) en el entorno acuático (esclavo), otro módem acústico montado en el vehículo que se desea localizar (maestro), un sensor de presión a bordo del vehículo para determinar la profundidad a la que se encuentra este, una unidad de medición inercial (IMU) montada sobre el vehículo y un procesador para realizar los cálculos (en este trabajo sera la computadora a bordo).

4.1.1. Algoritmo de localización

A continuación se describe paso a paso el proceso de localización:

1. Se requieren conocer las condiciones iniciales del vehículo (x_0, y_0, z_0) .
2. El módem maestro envía una cadena de datos (4 bits) por el canal acústico.
3. El módem esclavo recibe la cadena enviada por el maestro (solo si se encuentra dentro del rango operativo) y envía una cadena de datos en respuesta.

4. A partir del tiempo que tarda este ping y dado que se conoce la velocidad de propagación del sonido en el medio acuático es posible calcular la distancia entre los dos módems con un error de $\pm 10cm$ (especificaciones técnicas del módem). Esta distancia representa el radio de una esfera que acota la posición del vehículo en toda su frontera y se representara por la letra (r).

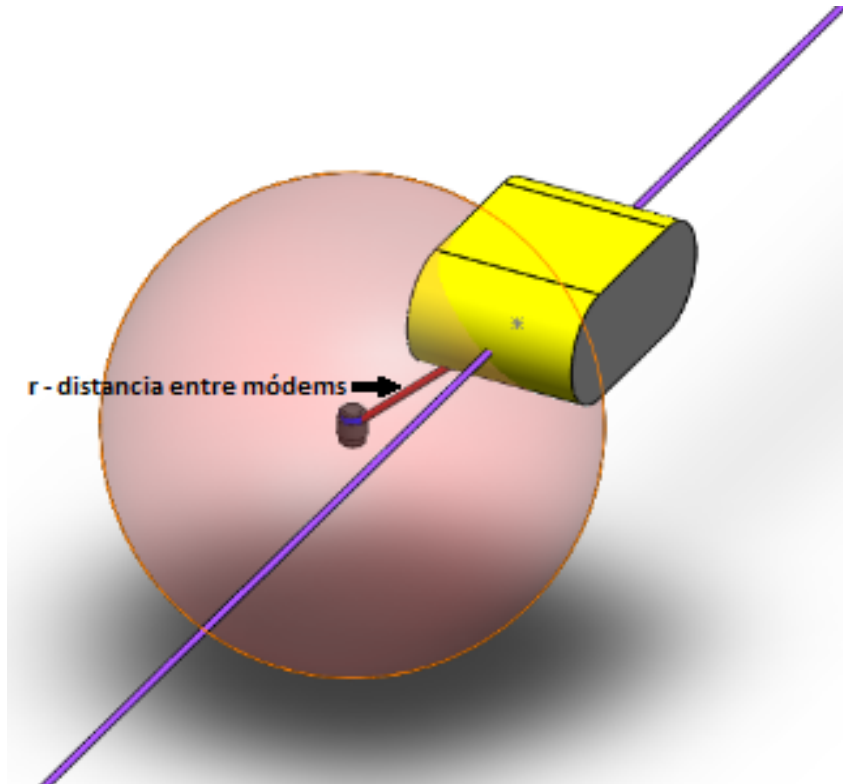


Figura 4.1: Frontera que acota la posición del vehículo a partir de la medición de distancia entre un par de módems acústicos

esta esfera queda descrita por la ecuación:

$$(x - m_x)^2 + (y - m_y)^2 + (z - m_z)^2 = r^2 \quad (4.1)$$

5. Una vez acotada la posición del vehículo por la esfera podemos integrar la medición del sensor de presión para obtener la coordenada en z y a partir de esta podemos cortar la esfera con un plano horizontal (x,y), delimitando la frontera que acota la posición de nuestro vehículo a una circunferencia.

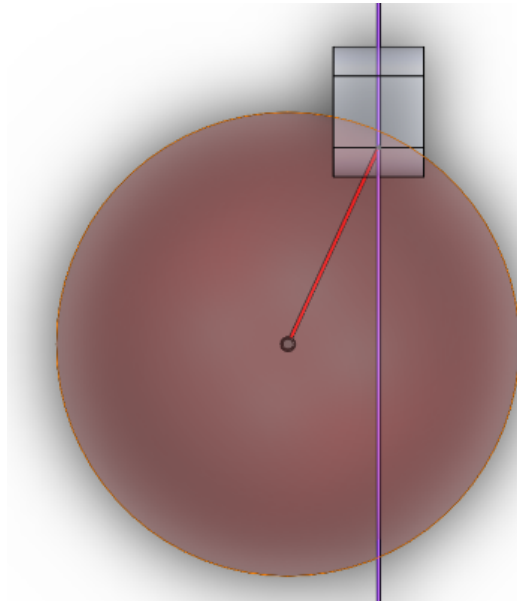


Figura 4.2: Se muestra que la esfera ha sido delimitada por un plano horizontal.

6. Se encuentra la ecuación de una recta de referencia a partir del ángulo ψ sobre el que se desplaza la embarcación.

$$y = x \tan(\psi) + B \quad (4.2)$$

7. Se substituye la ecuación 4.2 en la 4.1 y se expande.

$$x^2 + [\tan(\psi) + B]^2 + z^2 + m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 - 2xm_x - 2[\tan(\psi) + B]m_y - 2zm_z = r^2 \quad (4.3)$$

8. Se agrupan todos los términos cuyos valores pueden ser obtenidos a través de mediciones y aquellos cuyo valor conocemos ($z, m_x, m_y, m_z, r, \psi, B$)

$$\alpha = [\tan(\psi) + B]^2 + z^2 + m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 - r^2 - 2[\tan(\psi) + B]m_y - 2zm_z \quad (4.4)$$

reescribiendo:

$$x^2 + x(-2m_x) + \alpha = 0 \quad (4.5)$$

9. Se obtienen las raíces por formula general para ecuaciones de segundo grado:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.6)$$

siendo el valor de los coeficientes:

$$\begin{aligned}
a &= 1 \\
b &= -2m_x \\
c &= \alpha
\end{aligned}$$

10. Substituyendo los dos valores de las raíces en y tenemos dos pares coordenados $(\bar{x}_1, \bar{y}_1), (\bar{x}_2, \bar{y}_2)$.

4.1.2. Detección de la falsa posición

Se obtiene un delta entre la posición estimada por el modelo y la posición obtenida de la medición mediante la siguiente formula [30], la Formula 4.7, Figura 4.6:

$$\Delta_i = \sqrt{(\hat{x}_i - \bar{x}_i)^2 + (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (4.7)$$

$$i = 1, 2$$

donde:

\hat{x}, \hat{y} - representan la posición estimada del modelo
 \bar{x}, \bar{y} - representan la posición calculada a partir del módem

A partir de Δ_1 y Δ_2 se descarta aquel par coordenado que genere un resultado mayor y el otro se toma como la posición del vehículo en el plano horizontal.

4.2. Navegación

En esta sección se presenta el sistema de navegación el cual trabaja en serie con el de localización. La arquitectura de este sistema consiste en dos controladores PD en serie, donde el primero gobierna el ángulo ψ y también funciona como interruptor principal del segundo controlador (avance), esto es, mientras el ángulo ψ no se encuentre dentro del umbral definido como aceptable, el controlador para avance del vehículo no inyectará energía a los motores, esta restricción tiene como finalidad reducir la deriva que se podría generar como consecuencia de un avance con el vehículo orientado de manera incorrecta.

A continuación se describe paso a paso el proceso de navegación realizado:

1. Se capturan las condiciones iniciales (x_0, y_0)
2. El usuario captura la posición deseada en el plano horizontal (x, y) .
3. A partir de las condiciones iniciales y de la posición deseada se calcula el ángulo ψ necesario para alcanzar la referencia a partir de la función:

$$\psi_{des} = \tan^{-1}\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right) \quad (4.8)$$

4. Se realiza la medición del ángulo ψ con la central inercial.
5. Se aplica el siguiente controlador PD para regular la orientación del ángulo ψ

$$K = kp_{\psi}e_{\psi} - kd_{\psi}\dot{e}_{\psi} \quad (4.9)$$

donde:

K - Energía inyectada a los motores.

e_{ψ} - Error en ψ ($\psi_{des} - \psi$).

kp_{ψ} - Ganancia proporcional del controlador.

kd_{ψ} - Ganancia derivativa del controlador.

\dot{e}_{ψ} - Derivada temporal del error de posición en ψ .

6. El controlador de ángulo se aplica hasta entrar en la región:

$$\psi_{max} > \psi > \psi_{min} \quad (4.10)$$

donde:

- $\psi_{max} = \psi_{des} + 1.5$

- $\psi_{min} = \psi_{des} - 1.5$

7. Una vez que la orientación del vehículo entra en el umbral aceptable se activa el controlador de avance, el cual se rige por la ley de control:

$$M = kpe + kd\dot{e} \quad (4.11)$$

donde e que representa el error de posición esta dada por

$$e = \sqrt{(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2} \quad (4.12)$$

que es la magnitud de la línea recta que nos lleva a la posición deseada, esto se ilustra en la figura 4.3

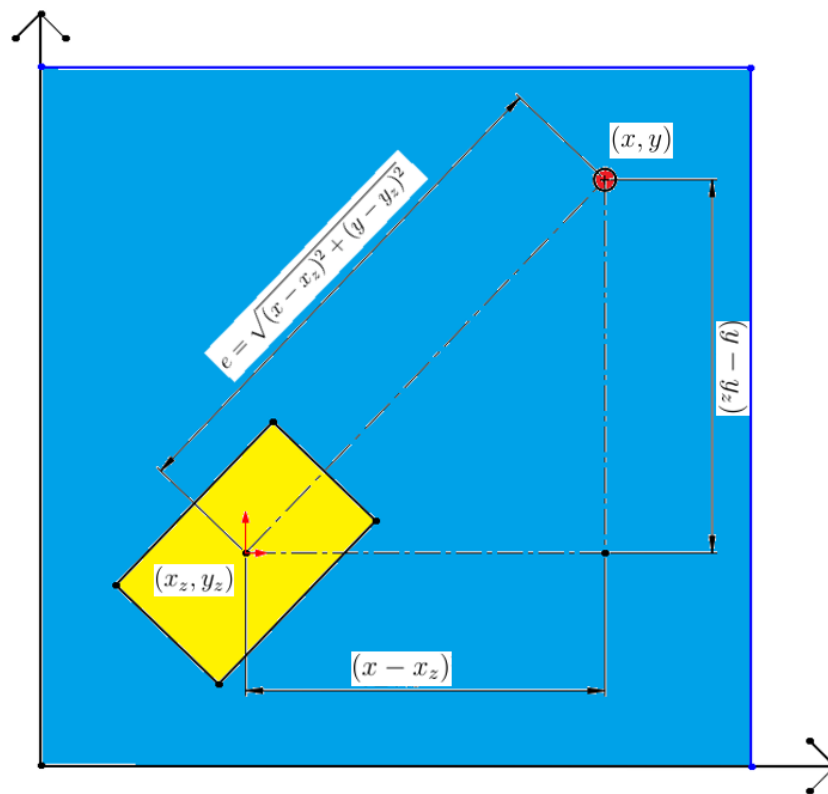


Figura 4.3: Se muestra la magnitud del error en el plano horizontal con sus componentes en el eje x y en el eje y

8. El algoritmo verifica que el vehículo se siga desplazando en una orientación dentro del umbral aceptable en ψ . Mientras la orientación del vehículo permanezca dentro de los límites de esta región el controlador de posición horizontal mantendrá el avance hasta llevar la magnitud del error de posición a un umbral cercano al cero, si en algún punto la orientación del vehículo sale de la región establecida, la salida del controlador de posición se ira a cero y el algoritmo regresara al paso 4.

El siguiente diagrama de flujo representa la evolución del algoritmo de navegación.

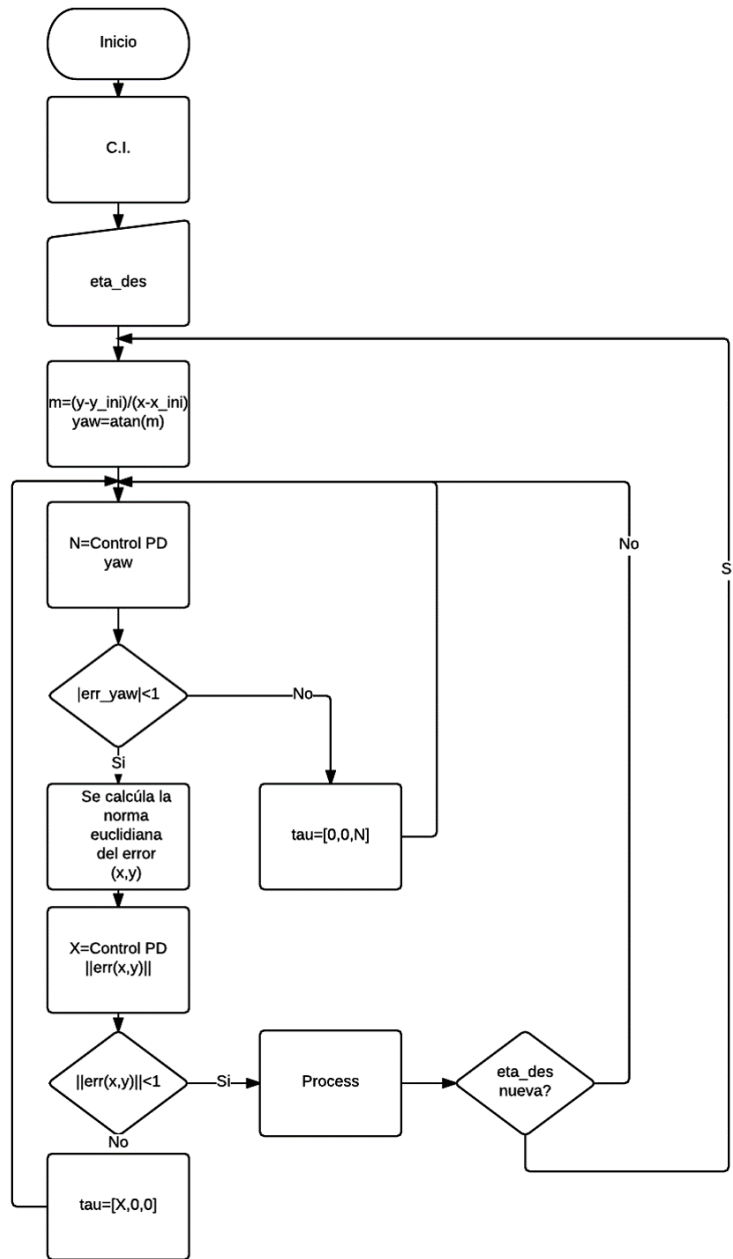


Figura 4.4: Diagrama de flujo del algoritmo de navegación

4.2.1. Prueba de estabilidad del controlador

El presente apartado muestra al lector la prueba de estabilidad del controlador PD implementado en el algoritmo de navegación.

Se utiliza el modelo reducido para navegación en plano horizontal dado por:

$$M\dot{\nu} + D\nu = \tau + \omega\dot{\eta} = R(\psi)\eta \quad (4.13)$$

$$M = M^T > 0$$

$$D > 0$$

Donde:

$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$\nu = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}$$

$$\tau = -R^T(\psi)\tau_{PD}$$

Se propone la ley de control:

$$\tau_{PD} = K_P e(t) + K_D \dot{e}(t) \quad (4.14)$$

Donde:

$$e(t) = \eta(t) - \eta_d$$

η_d - posición deseada

$$\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$$

Dado que la posición deseada es una referencia constante:

$$\dot{\eta}_d = 0$$

Por lo tanto:

$$\dot{e} = \dot{\eta}$$

Respecto a las ganancias:

$$K_P = K_P^T > 0$$

$$K_D = K_D^T > 0$$

Reescribiendo τ :

$$\tau = -R^T(\psi)[K_P e(t) + K_D \dot{e}(t)] \quad (4.15)$$

Reescribiendo el sistema en lazo cerrado:

$$M\dot{\nu} + D\nu = -R^T(\psi)[K_P e(t) + K_D \dot{e}(t)] \quad (4.16)$$

Reagrupando y substituyendo \dot{e} :

$$M\dot{\nu} + D\nu = -R^T(\psi)K_P e(t) - R^T(\psi)K_D R^T(\psi)\nu \quad (4.17)$$

Se propone:

$$K_{dd} = R^T(\psi)K_D R(\psi) \quad (4.18)$$

Se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}\nu(t)^T M\nu(t) + \frac{1}{2}e(t)^T K_P e(t) \quad (4.19)$$

Derivando con respecto al tiempo y dadas las consideraciones:

$$M = M^T > 0 \text{ y } K_P = K_P^T > 0$$

$$\dot{V} = \nu^T M\dot{\nu} + \dot{e}^T K_P e \quad (4.20)$$

Substituyendo \dot{e} :

$$\dot{V} = \nu^T M\dot{\nu} + \nu^T R^T(\psi)K_P e \quad (4.21)$$

Despejando y substituyendo $\dot{\nu}$:

$$\dot{V} = \nu^T [-D\nu + kdd\nu - R^T(\psi)K_P e + R^T(\psi)K_P e] \quad (4.22)$$

Reduciendo y despejando:

$$\dot{V} = -\nu^T [-D + kdd]\nu \quad (4.23)$$

Dado que $D > 0$ y $kpp > 0$ se demuestra que es Localmente estable.

Empleando el teorema de La Salle dado que el sistema es autónomo:

$$\omega = [\nu = 0 \in \mathbb{R}^{n \times 1}, e \in \mathbb{R}^{n \times 1} \mid \dot{\nu} = 0] \quad (4.24)$$

Sistema original

$$M\dot{\nu} + (D + kdd)\nu + R^T(\psi)kpe = 0 \quad (4.25)$$

Cuando:

$$\nu = 0 \text{ y } \dot{\nu} = 0$$

$$R^T(\psi)kpe = 0 \quad (4.26)$$

$$e = 0 \quad (4.27)$$

Se concluye que el punto de equilibrio es unico y por lo tanto es globalmente, asintoticamente estable.

4.3. Pruebas de simulación

En esta sección se muestran simulaciones implementadas en MATLAB Simulink tomando como modelo dinámico a (3.34) y como modelo cinemático a (3.33). Las simulaciones realizadas son las correspondientes al algoritmo de localización y de navegación.

4.3.1. Simulación del algoritmo de localización

Los parámetros de simulación para esta prueba se muestran a continuación:
Condiciones iniciales del vehículo.

$$C.I. = \begin{bmatrix} 500 \\ 500 \\ - \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Posición del módem esclavo.

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 500 \\ -100 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Coefficientes de amortiguamiento hidrodinámico:

Para la simulación de este algoritmo se considero que el vehículo se desplazaba a velocidad aleatoria con distribución uniforme de 0 a 1m/seg. . Se estima la posición en x y en y a partir de la distancia entre el módem y el vehículo (radio).

Este radio se obtiene a partir de:

$$r(n) = \left\| \begin{bmatrix} m_x - x(n) \\ m_y - y(n) \end{bmatrix} \right\| + w_r(n) \quad (4.30)$$

Donde:

$r(n)$ - medición del módem acústico en el instante n .

m_x y m_y - representan las coordenadas del modem en el plano horizontal.

$x(n)$ y $y(n)$ - Son las coordenadas del vehículo que se deslaza a velocidad aleatoria de distribución uniforme entre 0 y 1 m/s $v[n]$ entre el instante n y $n+1$.

$w_r(n)$ es el ruido en la medición en el instante n .

4.3.2. Caracterización del sensor

En este apartado se muestra como se caracterizo el sensor (*módem acústico*) para simulación. a partir de 80 muestras con lo que se obtuvo la varianza del sensor con la formula:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.31)$$

donde:

n - es el numero de muestras.

\bar{x} - es la media aritmética.

x_i - es la i -ésima muestra

La figura 4.5 muestra las mediciones del sensor a una distancia de 60 cm durante un minuto, estas mediciones fueron las empleadas para caracterizar el sensor.

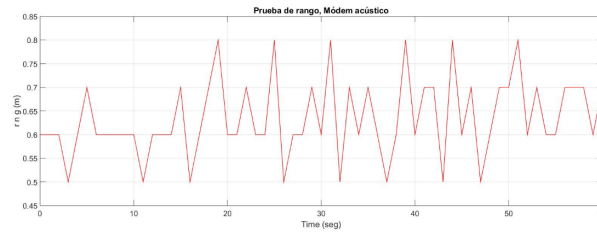


Figura 4.5: Se muestran los datos obtenidos en un tiempo de 1 minuto.

4.3.3. Resultados de simulación para el algoritmo de localización

En la figura 4.6, los círculos representan la medición del módem acústico en los diferentes instantes de tiempo, la línea negra es la trayectoria seguida por el vehículo, los puntos azules son los pares coordenados descartados y los rojos representan corresponden a la posición del vehículo medida en en plano horizontal

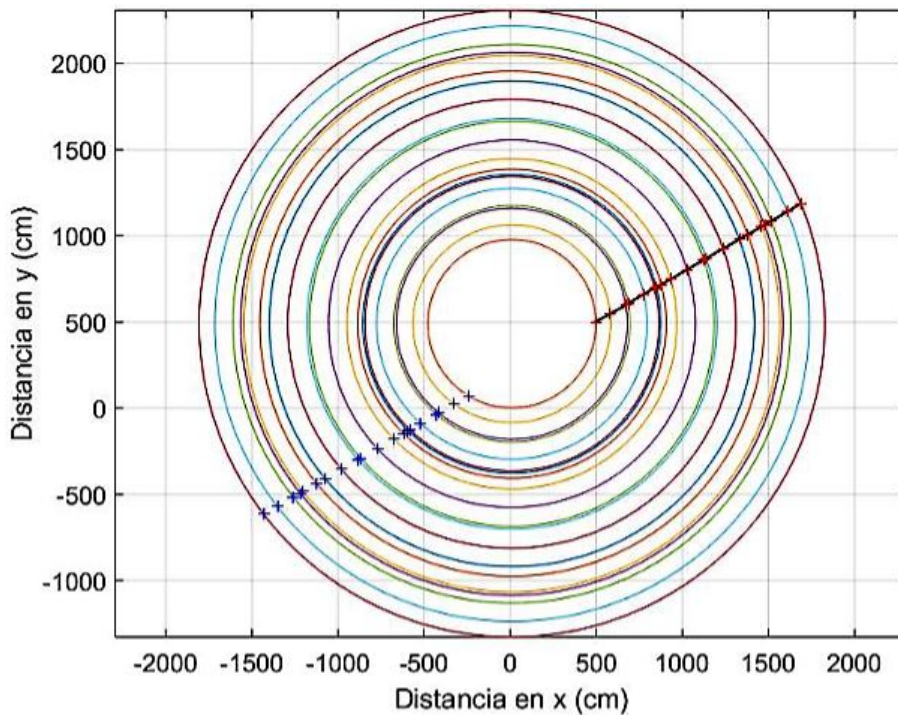


Figura 4.6: Fusión de datos entre las mediciones del sensor y la estimación del modelo

En la figura 4.7 se muestran los resultados de simulación para el algoritmo de navegación.

4.4. Simulación del algoritmo de navegación

En esta sección se describen las pruebas de simulación llevadas a cabo para validar la funcionalidad del algoritmo de navegación.

Los parámetros de simulación para esta prueba se describen a continuación:

Condiciones iniciales del vehículo:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1m \\ 2m \\ 90^\circ \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Posición del módem fijo:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5m \\ 0.5m \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Posición deseada:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1m \\ 2m \\ 90^\circ \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Se emplea un controlador PD en orientación descrito por:

$$K = kp_\psi e_\psi - kd_\psi \dot{e}_\psi \quad (4.35)$$

donde:

K - Energía inyectada a los motores.

e_ψ - Error en ψ ($\psi_{des} - \psi$).

kp_ψ - Ganancia proporcional del controlador.

kd_ψ - Ganancia derivativa del controlador.

\dot{e}_ψ - Derivada temporal del error de posición en ψ .

con:

$$kp_\psi = 3$$

$$kd_\psi = 0.65$$

Se emplea un controlador PD en avance descrito por:

$$M = kpe + kd\dot{e} \quad (4.36)$$

donde e que representa el error de posición esta dada por

$$e = \sqrt{(x - x_z)^2 + (y - y_z)^2} \quad (4.37)$$

4.4.1. Resultados de simulación para el algoritmo de navegación

En la figura 4.7 se muestra la orientación en ψ de color rojo la cual va de 90° a la referencia de 39.6° empleando el controlador descrito por la ecuación (4.35). Una vez que la orientación alcanza la referencia comienza el control de avance descrito por (4.36), las líneas azul y verde representan la posición en x y en y respectivamente y se observa que alcanzan la referencia en 51 segundos.

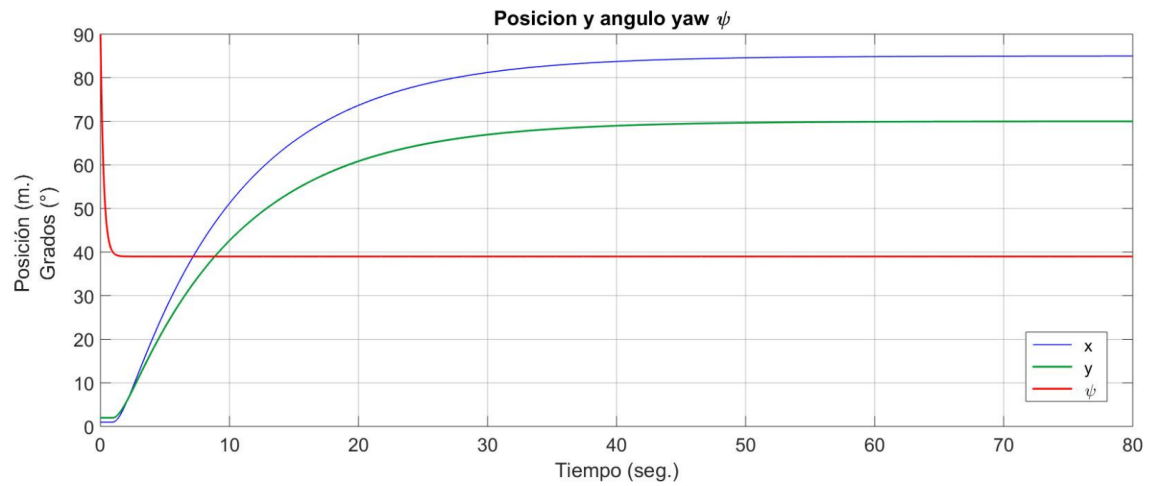


Figura 4.7: Simulación del algoritmo de Navegación

Pruebas experimentales

En esta sección muestran los resultados experimentales obtenidos de las pruebas realizadas para validar los algoritmos de navegación y localización presentados en el capítulo 4, Las pruebas experimentales se llevaron a cabo utilizando el prototipo descrito en la sección 2

5.1. Control PD en ψ

La finalidad de este experimento es la de mantener el ángulo ψ del vehículo dentro de una región igual a $referencia \pm 2^\circ$ mediante un controlador PD.

La figura 5.1 muestra la energía suministrada a los motores derechos por el controlador PD.

Esta prueba se realizó en la fosa para clavados del IPN sede Zacatenco
Para esta parte se empleó la función de saturación:

$$DutyCycle = 100, \quad \text{para } DutyCycle > 100$$

$$DutyCycle = DutyCycle, \quad \text{para } 100 > DutyCycle > 5$$

$$DutyCycle = 5, \quad \text{para } DutyCycle < 5$$

Esta función tiene como objetivo que los valores de ciclo de trabajo suministrados por el controlador no se encuentren por debajo o encima del rango operativo de los drivers de los motores.

La figura 5.2 muestra los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del control PD en ψ con parámetros $K_p = 3$ y $K_d = 0.65$ en presencia de perturbaciones.

Se observa que el vehículo alcanza un ángulo en ψ , 6 grados por debajo de la referencia, esto se debe principalmente a que el umbral se establece en $referencia \pm 2^\circ$ y al error en estado estacionario. Esto se podría compensar usando otro tipo de controlador, pero para fin de validar el algoritmo de navegación el controlador PD mostrado es suficiente.

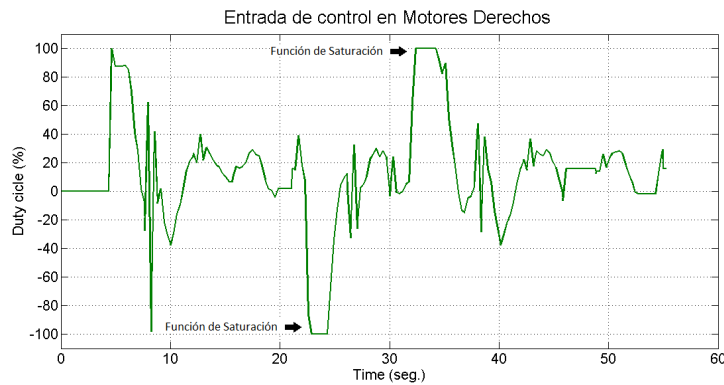


Figura 5.1: Se muestra la energía inyectada por el controlador PD, en los motores derechos, el ciclo de trabajo negativo representa un giro invertido del motor.

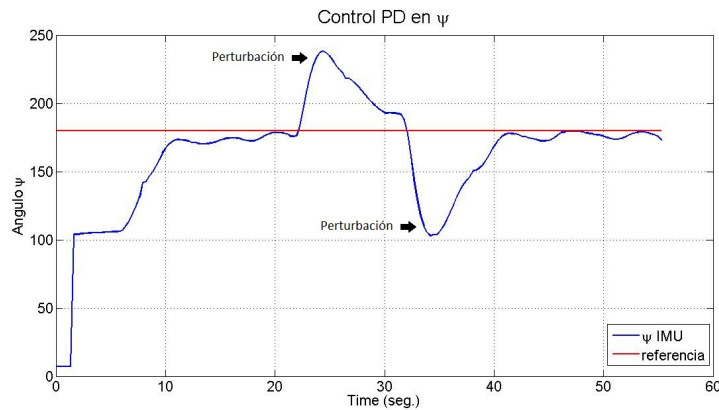


Figura 5.2: Se muestra el comportamiento del controlador PD en ψ con ganancias $k_p = 3$ y $k_d = 0.65$ con perturbaciones aplicadas en $t=22$ seg. y en $t=31$ seg.

5.2. Validación del algoritmo de navegación

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas experimentales que se llevaron a cabo para validar el algoritmo de navegación y consisten en el seguimiento de una serie de *waypoints* por el prototipo.

Navegación en un circuito triangular

Esta prueba se llevo a cabo navegando a través de tres waypoints para completar un circuito triangular. Esto se realizo con la finalidad de poder apreciar de mejor manera los errores causados por deriva, incertidumbres no modeladas y consideraciones del modelo. Esto se aprecia de mejor manera debido a que se navega en diferentes orientaciones durante el circuito.

Otro cambio en esta prueba es que tanto el control de orientación como el control de avance se ejecutan en paralelo a diferencia de la prueba anterior donde ambos controles se ejecutaban en serie.

La metodología para llevar a cabo este experimento se describe a continuación:

- Se coloca una boya con un módem acústico fija en $(x = 5.5m, y = 0.5m, z = -1m)$.

- El vehículo parte de condiciones iniciales $(x_0 = 7.5m, y_0 = 1.0m, z = 0.0)$.

- Navega hasta el waypoint A localizado en $(x = 3.3m, y = 3.7m, z = 0m)$.

- Una vez alcanzada la referencia el vehículo almacena estas coordenadas como su nueva condición inicial.

- El vehículo navega hasta el waypoint B ubicado en $(x = 7.8m, y = 6.0m, z = 0.0)$

- El vehículo regresa a su posición inicial en $(x = 7.5m, y = 1.0m, z = 0.0m)$.

Una vez terminado el recorrido se toman mediciones para determinar el error en ambos ejes (x,y).

La imagen 5.3 muestra al lector de manera gráfica la prueba propuesta para la validación del algoritmo realizando un recorrido triangular de 3 waypoints, los círculos rojos representan los waypoint A y B así como el punto de partida que es el mismo que el destino final del recorrido, el círculo café representa la baliza fija con el módem acústico esclavo, la distancia entre Waypoint es de 5 metros entre ellos, y la prueba se realizó en la fosa de clavados de las instalaciones de la alberca del IPN.

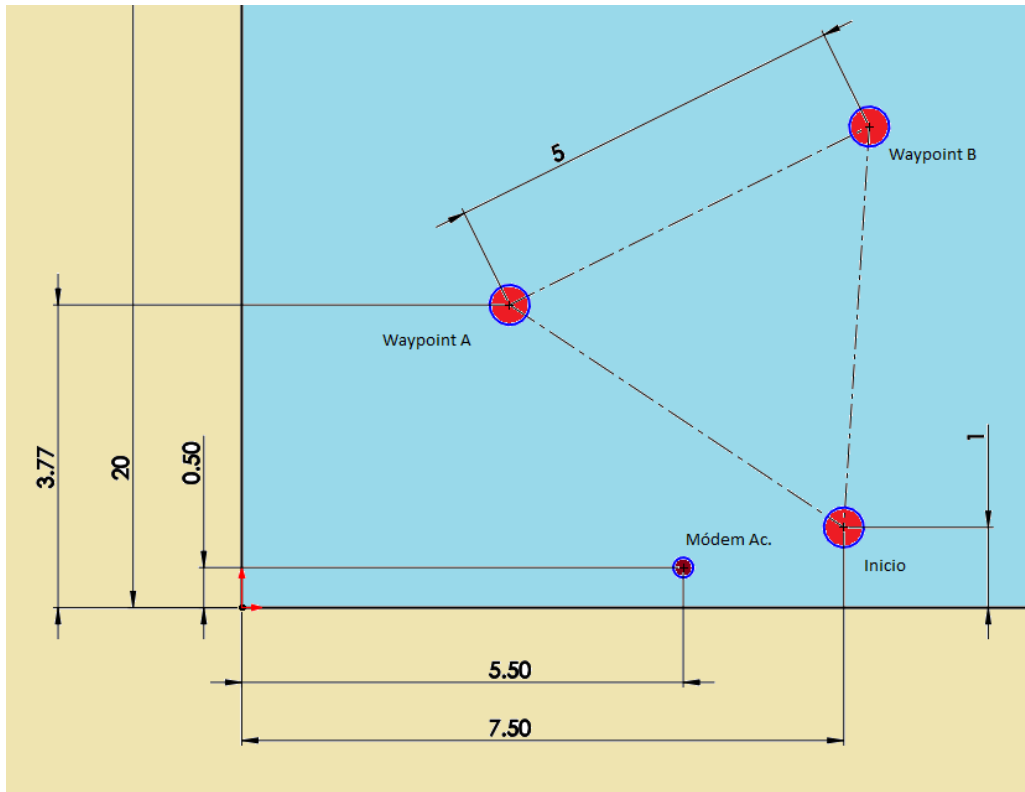


Figura 5.3: En esta imagen se describe gráficamente la prueba de navegación del circuito triangular.

Resultados de la prueba

La siguiente imagen muestra el submarino en sus condiciones iniciales ($5.5m, 1.0m$), se resalta en color rojo el circuito propuesto para la validación del algoritmo de navegación y se muestra la ubicación de los waypoints A y B.

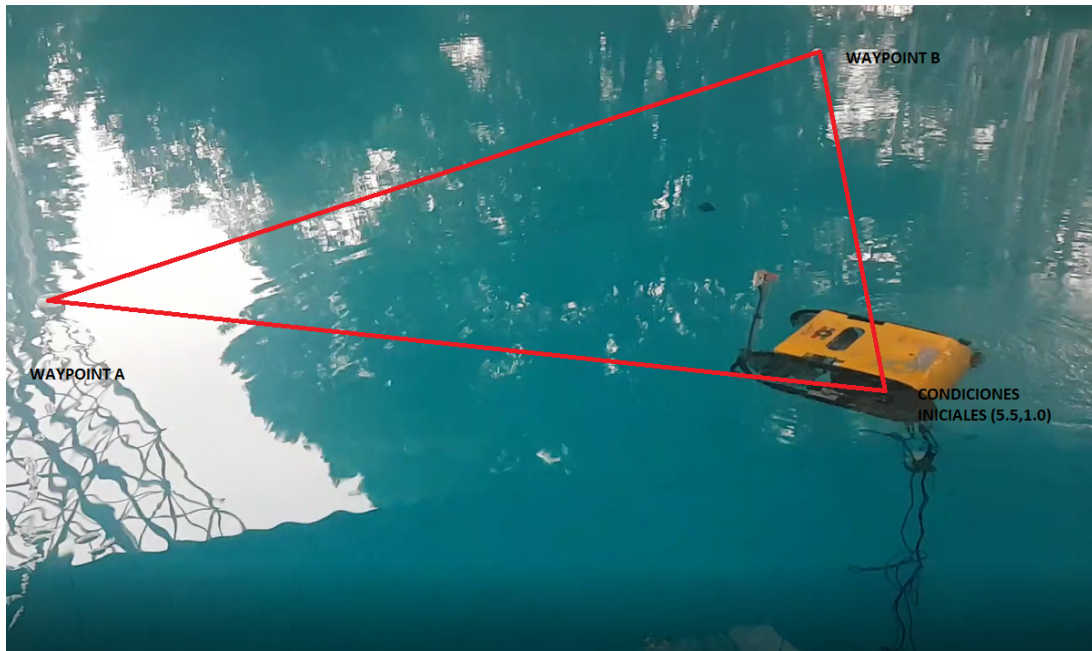


Figura 5.4: Circuito triangular propuesto para la validación del algoritmo de navegación.

La gráfica mostrada en la figura 5.5 muestra la evolución de la prueba de navegación del circuito triangular; en los primeros 3 segundos de la gráfica se observa que la distancia entre los módems permanece constante, este tiempo es el que le toma al submarino alcanzar la referencia de orientación para dirigirse hacia la referencia deseada, esta referencia se calcula mediante la función arco tangente mencionada en el capítulo 4. Una vez alcanzada la referencia se observa como la distancia entre los módems comienza a cambiar. a partir de esta distancia y suponiendo que el vehículo se traslada sobre la línea recta proyectada a partir de las condiciones iniciales y el ángulo ψ_{des} se calcula su posición en (x,y) la cual se muestra mas adelante en la figura 5.9.

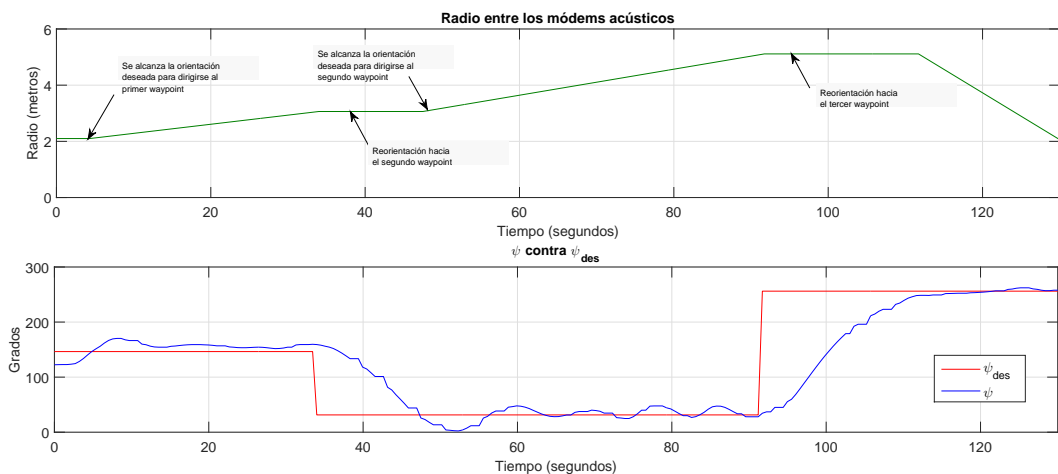


Figura 5.5: Se muestra la evolución de la prueba de navegación

La figura 5.6 muestra la norma de la estimación de posición del prototipo a partir de la

medición entre los módems en color azul y en color rojo muestra la norma de la posición del Waypoint A.

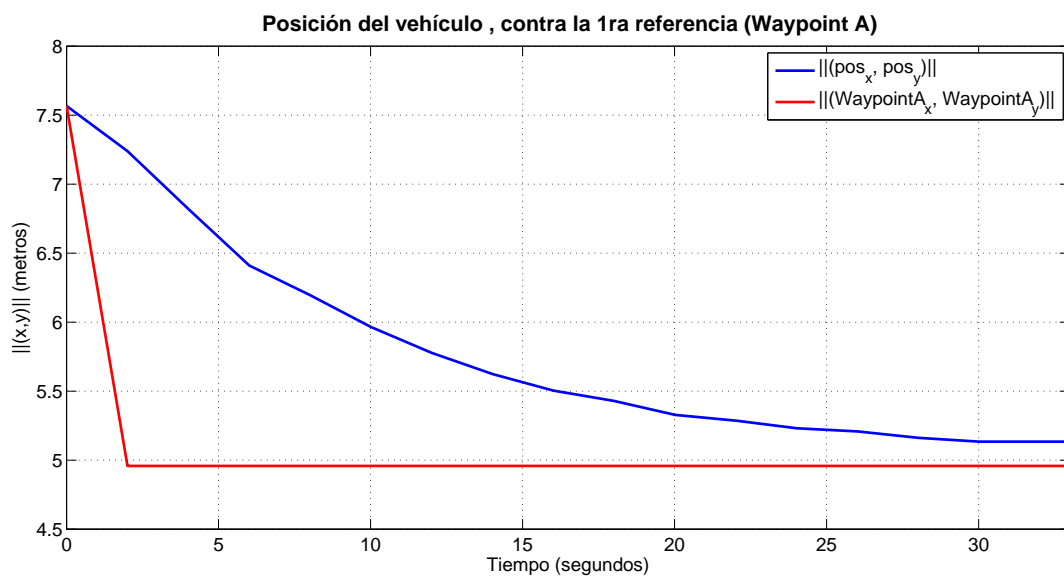


Figura 5.6: Norma de la posición del vehículo contra norma de la posición del Waypoint A

La figura 5.7 muestra el prototipo durante la prueba del circuito triangular, en el segundo 40 el vehículo ya alcanzó el waypoint A y se está reorientando para dirigirse al waypoint B, si se observa este instante de tiempo en la gráfica de la figura 5.5 que muestra la evolución de la prueba, se nota que el cambio del radio medido entre los módems acústicos permanece constante entre el segundo 37 y el segundo 43 aproximadamente, esto es debido a que el vehículo se encuentra girando sobre su propio eje y es por esto que no existe variación en la distancia entre los dos módems; esto se debe a que el algoritmo posee una restricción que restringe el avance hasta que se haya alcanzado una región de $\pm 4^\circ$ del $\psi_{deseado}$.

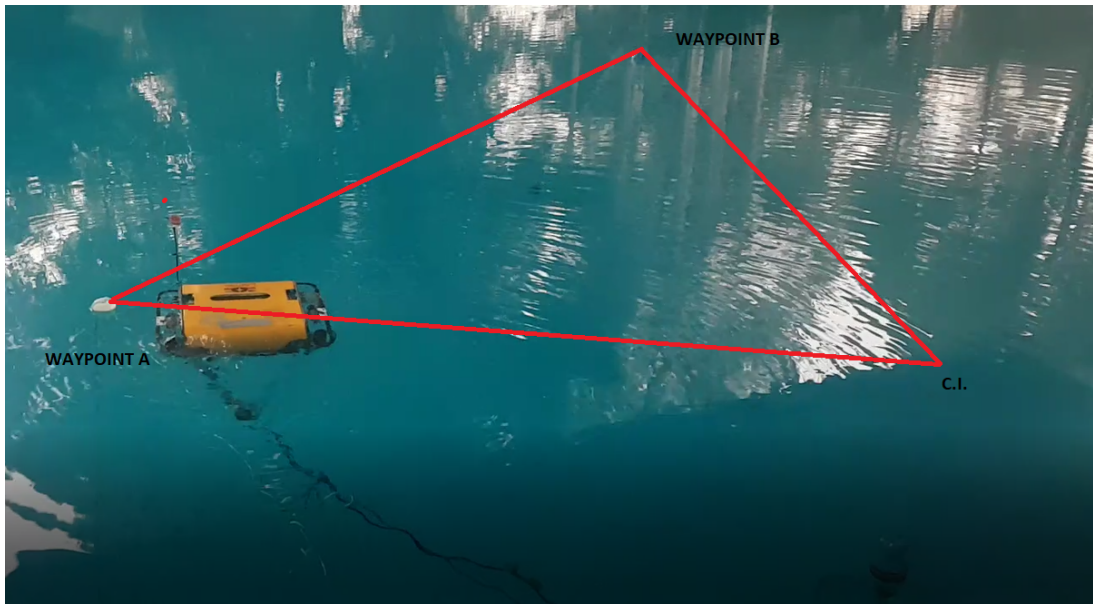


Figura 5.7: Se muestra el prototipo reorientándose hacia el waypoint B.

La figura 5.8 muestra la norma de la estimación de posición del prototipo a partir de la medición entre los módems en color verde y en color rojo muestra la norma de la posición del Waypoint B.

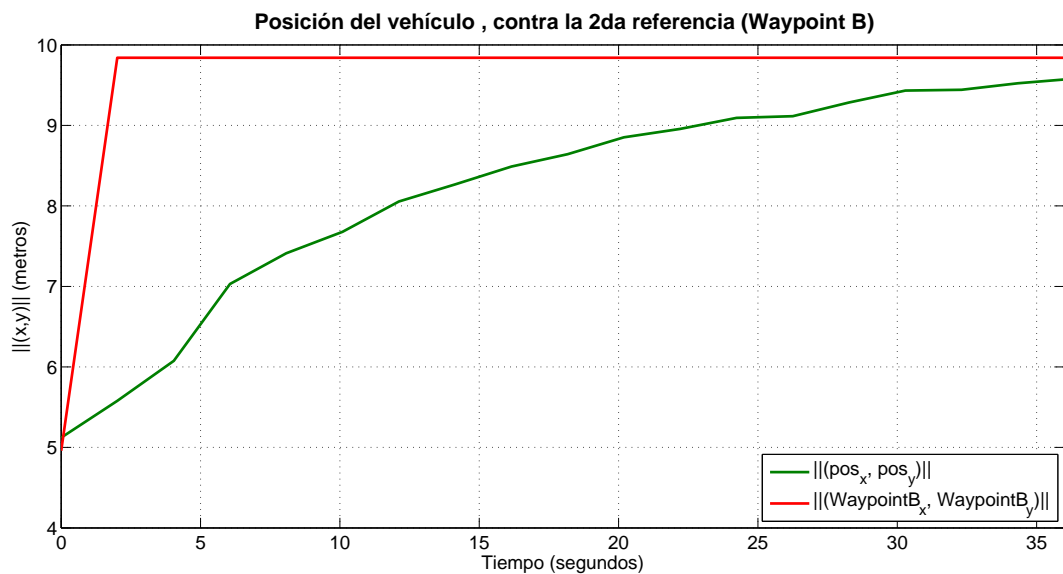


Figura 5.8: Norma de la posición del vehículo contra norma de la posición del Waypoint A

La imagen 5.9 muestra el recorrido propuesto para la navegación en color azul contra la estimación de posición calculada a partir de la distancia entre los módems asumiendo que el vehículo mantiene la trayectoria recta restringida por el ángulo ψ_{des} .

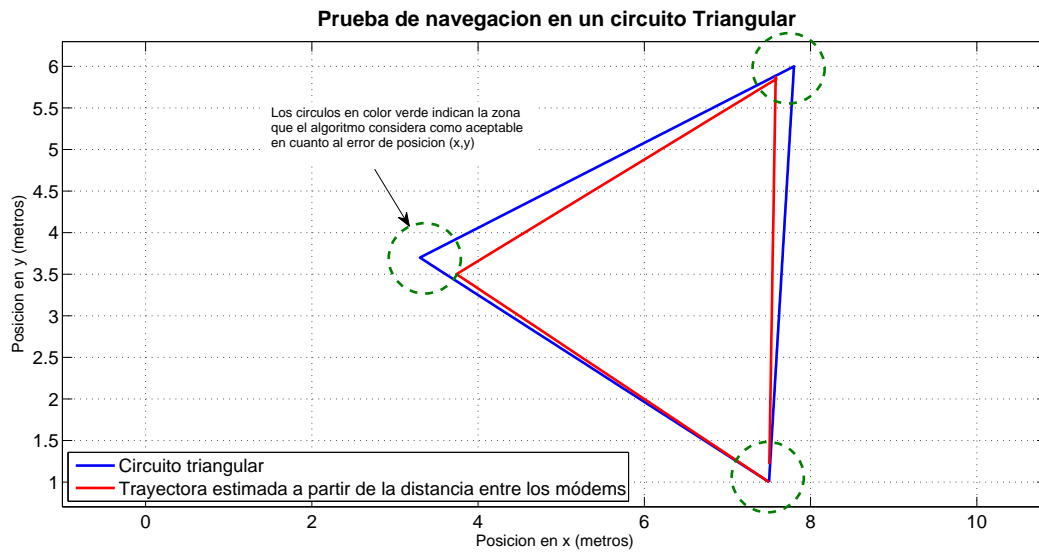


Figura 5.9: Gráfica comparativa entre el circuito propuesto para la prueba de navegación y la trayectoria estimada a partir de las mediciones entre los módems

La figura 5.10 muestra la norma de la estimación de posición del prototipo a partir de la medición entre los módems en color azul y en color rojo muestra la norma de la posición de las Condiciones Iniciales.

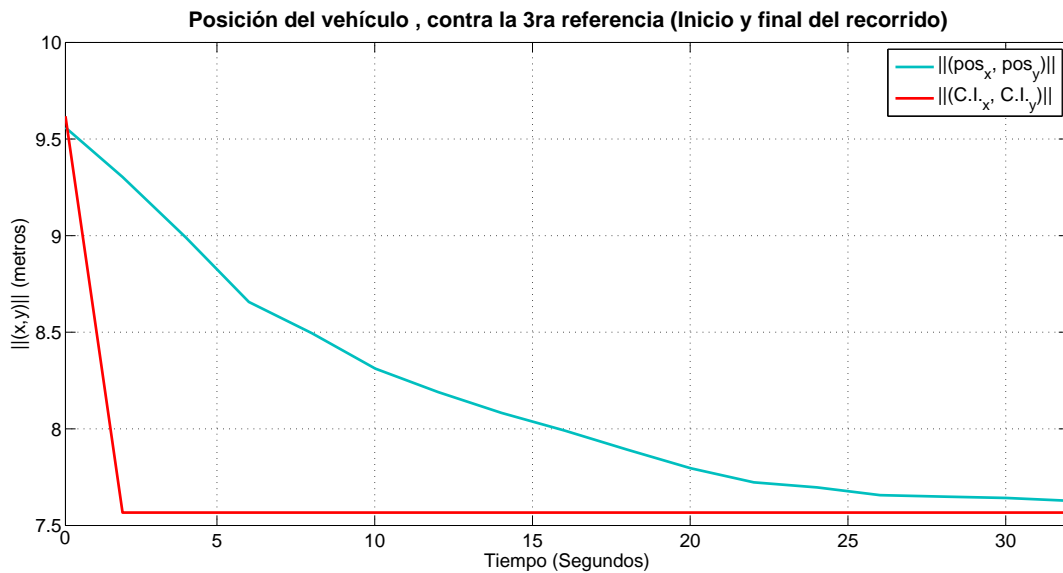


Figura 5.10: Norma de la posición del vehículo contra norma de la posición de las Condiciones Iniciales

La imagen 5.11 muestra el vehículo al final del recorrido.

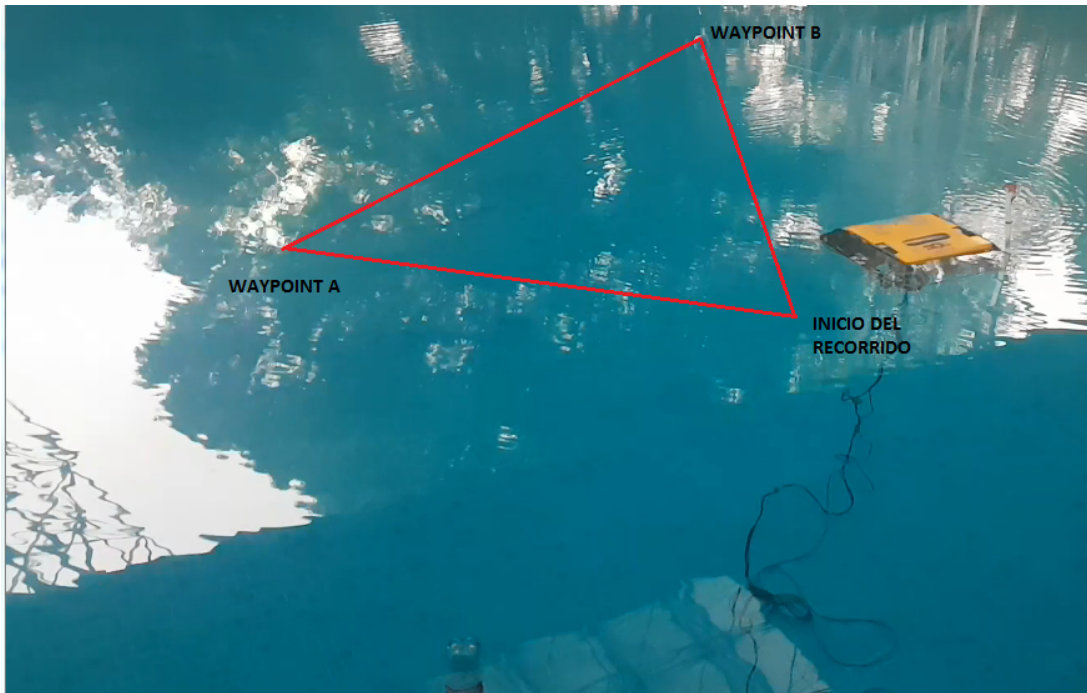


Figura 5.11: Se muestra el prototipo reorientándose hacia el waypoint B.

Se observa que existe un error en los ejes x e y mediante la medición entre la posición final del vehículo y la posición inicial se determina que el error en el eje x es de 40cm y el error en el eje y 20cm. Este error es debido a 3 factores principales que se listan a continuación:

- Para la navegación se está empleando un controlador PD. En la ausencia de un término integral existe un pequeño error en estado estacionario.
- El vehículo no está actuado para desplazamientos laterales, sin embargo las perturbaciones externas pueden generar este desplazamiento. El algoritmo funciona asumiendo que el vehículo avanza sobre una trayectoria recta de proa a popa y calcula la posición en base a la intersección entre el círculo que se genera de la distancia entre los módems con la recta infinita proyectada hacia el frente del vehículo; sin embargo si existe un desplazamiento lateral el vehículo avanzará sobre una trayectoria recta paralela a la supuesta por el algoritmo así que la posición calculada en base a la distancia entre los módems tendrá un cierto error proporcional al desplazamiento lateral que se presente.
- Dado que se asume que existe un error en estado estacionario el cambio entre un destino y otro se lleva a cabo cuando el vehículo entra en una región aceptable acotada por un error de ± 3 por lo que el vehículo puede no alcanzar una referencia puntual si no una región cercana a ella acotada por el error mencionado.

Análisis de resultados y Trabajo futuro

6.1. Análisis de resultados

- En comparación con la localización utilizando un DVL la localización por balizas acústicas mostró una ventaja con respecto al primero en aplicaciones donde el fondo, así como las superficies reflectantes se encuentran a mucha distancia del vehículo. dado que los sensores DVL utilizan un corrimiento de efecto doppler para calcular la distancia se necesitaría un DVL de mucha potencia (lo que incrementa significativamente el costo) para que los rayos alcancen el fondo, este no es un problema en la localización por balizas acústicas, de echo la ausencia de superficies reflectantes mejora el funcionamiento de este tipo de arquitecturas.
- El análisis por heurística de las pruebas de navegación en un circuito con tres waypoints mostró un error por deriva e incertidumbres no modeladas de $\pm 0.45m$.

Este error se podría disminuir considerablemente agregando un tercer módem a la arquitectura sin embargo esto podría llegar a reducir el tiempo de respuesta debido a la necesidad de conmutar entre las dos mediciones y evitar las incertidumbres por corrimiento doppler.

Esto nos lleva a concluir que la integración de un tercer módem a la arquitectura depende de varios factores.

1. Existencia de otras mediciones que se puedan integrar al algoritmo para evitar un tercer módem.
2. Si se trata de una aplicación de monitorio o de interacción. en las primeras podrían existir otros datos para integrarse al algoritmo que llevarían disminuir el error. En las segundas por otra parte la precisión podría llegar a jugar un papel mas relevante lo que haría la integración del tercer módem mas importante.
3. Otros factores que influyen en el error que se presenta son el echo de que para el algoritmo de navegación se empleo un controlador PD, la ausencia de una parte integral nos deja con un pequeño error en estado estacionario. Este error nos obliga a poner discos de región en el algoritmo para pasar de una referencia a otra ya que una restricción de una referencia puntual para cambiar a la siguiente posición deseada provocaba que el prototipo no siguiera con el circuito propuesto pues nunca alcanzaba la referencia debido al error en estado estacionario mencionado.

6.2. Trabajo Futuro

- Con los resultados obtenidos de las pruebas de navegación se valida el algoritmo y se propone como medio de localización para implementación de controles mas robustos.
- Integrar un tercer módem acústico a la arquitectura de localización para disminuir el error por deriva.
- Integrar un GPS a la baliza acústica fija para que el vehículo pueda localizarse con respecto al marco inercial terrestre, usando la funcionalidad de transmisión de datos del módem para integrar la medición del GPS al algoritmo.

DIMENSIONES GENERALES

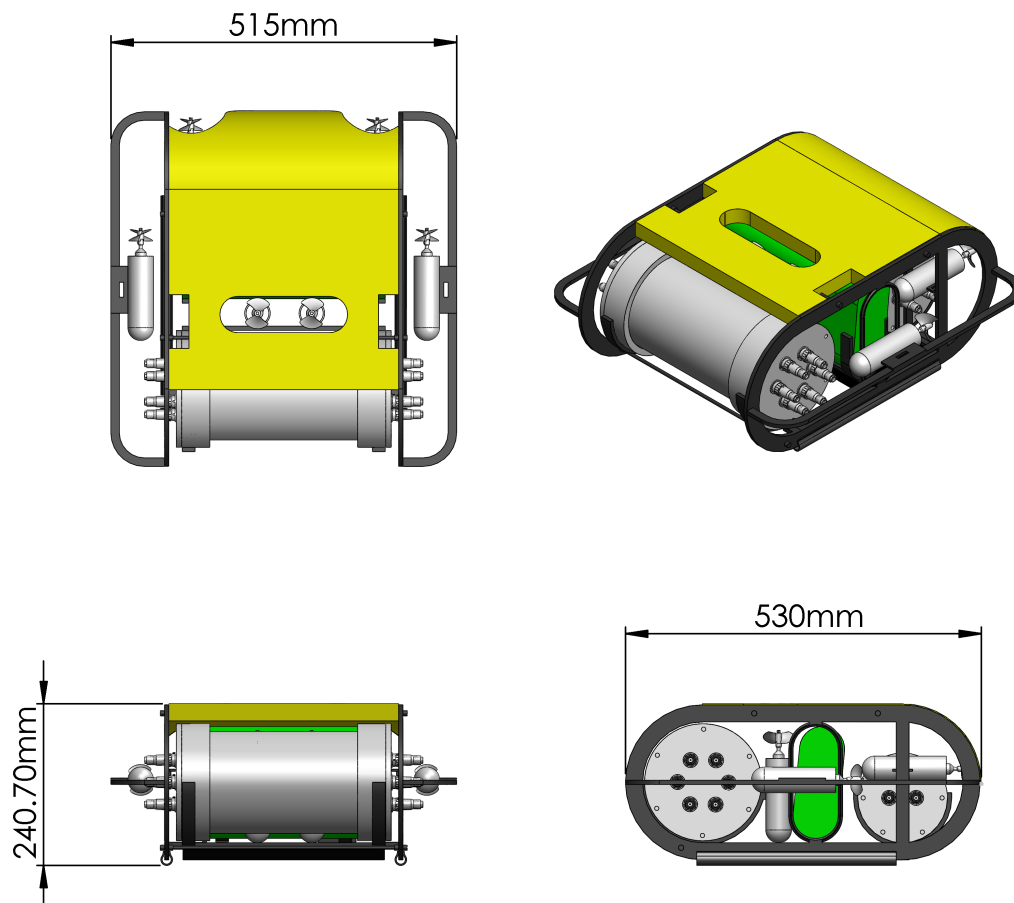


Figura 7.1: Muestra las dimensiones generales del equipo

Bibliografía

- [1] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. IN: *Technical and Research Bulletin* No. 1-5.
- [2] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, Norway, Second edition, 1999.
- [3] Thor I. Fossen. *Marine control systems guidance, navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.
- [4] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley, 2011.
- [5] Curtin, t., Bellingham, j., Catipovic, j., and Webb, D. *Autonomous oceanographic sampling networks*. *Oceanography*,6 (3), 1993.
- [6] Micron Modem. *Product Manual*, Tritech
- [7] *Researchers to test new ALTEX AUV in the Arctic Ocean*.
http://www3.mbari.org/news/news_releases/2001/oct1_altex.html
consultado: Febrero 2017.
- [8] E. Campos. *Design, Modeling and control of AUV's using artificial vision*. Université Montpellier II, 2014.
- [9] Liam, P., Sajad, S., Mae, S., and Howard, L. *AUV Navigation and Localization: A Review*. IEEE, *Journal of oceanic engineering*, Vol. 39, No. 1, 2014.

- [10] Sing S., Grund M., Bingham B., Eustice R., Singh H., and Lee F. *Underwater acoustic navigation with the WHOI Micro-Modem*. IEEE, OCEANS 2006, 18-21 Sept. 2006.
- [11] E. Dolores Antonio Y. *Pilotaje autónomo de un mini-submarino con visión artificial*. CINVESTAV-DCA, 2012.
- [12] Joshua Grady Graver. *Underwater Gliders: Dynamics, control and design*. Mechanical and Aerospace Engineering, May 2005.
- [13] Webb, D. C., Simonetti, P. J. and Jones, C. P., *SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Enviromental Energy*. Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No.4, 2001 pp. 447-452, Special Issue on Autonomous Ocean-Sampling Networks.
- [14] Eriksen, C. C., Osse, T. J., Light, R. D., Wen, T., Lehman, T.W., Sabin, P. L., Ballard, J. W. and Chiodi, A. M. *Seaglider; A Long-Range Autonomous Underwate Vehicle for Oceanographic Research*. Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No.4, 2001 pp. 424-436, Special Issue on Autonomous Ocean-Sampling Networks.
- [15] Serman, J., Davis, R. w., Owens, W. B. andValdes, J. *"The Autonomous Underwater Glider "Spray"*. Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No.4, 2001 pp. 437-446, Special Issue on Autonomous Ocean-Sampling Networks.
- [16] Jones, C., Webb, D., Glenn, S., Schofield, O., Kerfoot, J., Kohut, J., Roarty, H., Aragon, D., Haldeman, C., Haskin, T. and Kahl, A. *"Slocum Glider Extending the Endurance"*. The 16th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST09) Durham, NH, August 23-26 2009.
- [17] Nina Mahmoudian. *Efficient motion planning and control for underwater gliders* Virginia Polytechnic Institute Blacksburg, Virginia, September 2009.
- [18] E. Campos M. *Auto-localización de un mini-submarino utilizando la visión por computadora* CINVESTAV-DCA, 2010.
- [19] Informe técnico *Dispositivo dinámico autónomo submarino planeador para la observación marina* Enero 2010.
- [20] L. Jaulin *Nonlinear bounded-error state estimation of continuous-time systems*. Automatica, vol. 38, no 6, 2002.

- [21] García García, J. J. *Desarrollo de una herramienta informática para la simulación dinámica de vehículos submarinos no tripulados*. 2013.
- [22] J. V. N. de Sousa, A. R. L. de Macedo, W. F. de Amorim Junior, and A. G. B. de Lima. *Numerical analysis of turbulent fluid flow and drag coefficient for optimizing the auv hull design* Open Journal of Fluid Dynamics, 2014.
- [23] Presterio, T. *Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle* Tesis Doctoral. Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 2001
- [24] N.E. Leonard y J.G. Graver. *Model-based feedback control of autonomous underwater gliders*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, Special Issue on Autonomous Ocean Sampling Networks, 26(4) : 633 645; Oct 2001
- [25] H. Lamb. *Hydrodynamics* Cambridge University Press. 1932.
- [26] B.Etkin *Dynamics of Flight* John Wiley and Sons. New York and London, 1959.
- [27] R. Ortiz P. *Identificación de parámetros hidrodinámicos de un vehículo submarino tipo Glider* Universidad Politécnica de Pachuca, Abril 2016.
- [28] Valério D., & Da Costa, J. S. *Tuning of fractional PID controllers with Ziegler-Nichols-type rules* Signal Processing 86.10 (2006).
- [29] Instituto Oceanográfico Woods Hole <https://www.whoi.edu/main/slocum-glider> septiembre de 2016.
- [30] R. Kelly, V. Santibáñez *Control de Movimiento de Robots Manipuladores* Prentice Hall, 2003.
- [31] submarinos subnacho http://subnacho.blogspot.mx/2011_08_01_archive.html Septiembre de 2016.
- [32] Follow the Glider <http://followtheglider.socib.es/estudiantes/comofunciona/> septiembre de 2016.
- [33] Los primeros buceadores de la historia <http://irreductible.naukas.com/2008/05/10/galeria-de-personajes-irreductibles-los-primeros-buceadores-de-la-historia/> septiembre de 2016.
- [34] J. N. Newman. *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Massachusetts, 1977.
- [35] Darley trusted worldwide since 1908 <http://www.darley.com/robotics-products/product/bluefin-spray-glider> septiembre de 2016.
- [36] AUV System Spec Sheet <http://auvac.org/platforms/view/160> septiembre de 2016.
- [37] Robert D. Blevins. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. Kreiger Publishing, Florida, 1979.
- [38] Evo Logics <https://www.evologics.de/en/products/glider/index.html> Marzo de 2017.

- [39] Mini-submarino Alvin <http://www.cienciahistorica.com/mini-submarino-alvin/> Marzo de 2017.
- [40] Implosión de robot submarino <http://www.actualidadgadget.com/implosion-de-robot-submarino/> Marzo de 2017.