



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DE POSICIÓN PARA UN  
VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE (ROV) USANDO  
BACKSTEPPING CONTROL

EDGAR ALEXANDER ALFONSO FUENTES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2014



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DE POSICIÓN PARA UN  
VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE (ROV) USANDO  
BACKSTEPPING CONTROL

EDGAR ALEXANDER ALFONSO FUENTES

Trabajo de Grado para optar al título de

Ingeniero Electrónico

Director

Ph.D. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA

Ingeniero Electricista & Electrónico, UIS

Codirectora

M.Sc. BLANCA VIVIANA MARTINEZ

Ingeniera Electrónica, UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE

TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2014



## DEDICATORIA

*Quiero dedicar este logro a Dios primero, por concederme esta oportunidad de vida, a mis Padres y hermano por su amor, comprensión y apoyo incondicional, y a todos mis familiares y amigos por su acompañamiento.*



Universidad  
Industrial de  
Santander

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía por su constante apoyo pedagógico en asesorías y consultas que fueron claves para el desarrollo de este proyecto, así mismo agradezco a M.Sc. Blanca Viviana Martínez porque su trabajo fue la base del mío.



## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	15
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	18
2.1 Marcos de Referencia .....	18
2.1.1 Marco de referencia terrestre: .....	18
2.1.2 Marco de referencia del vehículo:.....	18
2.2 Modelo Cinemático del ROV [2] .....	18
2.3 Modelo dinámico del ROV [2] .....	20
3 CONTROLADOR PID .....	22
3.1 Obtención del modelo dinámico lineal del VideoRay PRO 3 .....	22
3.2 Diseño del PID.....	23
4 CONTROLADOR <i>BACKSTEPPING</i> .....	26
4.1 <i>Backstepping</i> Control .....	26
4.2 Diseño del Controlador <i>Backstepping</i> .....	29
5 SIMULACIÓN Y RESULTADOS .....	33
5.1 Controlador PID.....	33
5.2 Controlador <i>Backstepping</i> .....	36
5.2.1 Acción de Control y Error .....	38
5.2.2 Seguimiento de Trayectoria.....	40
5.3 Perturbaciones .....	43
5.3.1 Perturbaciones Ambientales.....	43
5.3.2 Fuerzas externas.....	46
5.4 Resultados Numéricos .....	50
5.4.1 Índices de Desempeño.....	50
5.4.2 Error de Seguimiento.....	52
6 CONCLUSIONES.....	53
7 CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	54



Universidad  
Industrial de  
Santander

8 BIBLIOGRAFÍA .....	56
ANEXOS .....	58



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Marco de referencia ROV [2] .....	18
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema (29)-(30). [1][4].....	27
Figura 3. Introducción de $\phi(\eta)$ . [1][4] .....	27
Figura 4. <i>Backstepping</i> de $-\phi(\eta)$ a través del integrador. [1][4].....	28
Figura 5. Posición en <i>surge</i> control PD (P=5.0872 y D=2.666).....	33
Figura 6. Posición en <i>heave</i> control PD (P=1.8314 y D=1.60).....	34
Figura 7. Ángulo en <i>yaw</i> control PD (P=5.0872 y D=2.666). .....	34
Figura 8. Señal de control total y error en <i>surge</i> , PD + linealizador.....	35
Figura 9. Señal de control y error en <i>heave</i> , PD + linealizador.....	35
Figura 10. Señal de control y error en <i>yaw</i> , PD + linealizador. ....	36
Figura 11. Posición en <i>surge</i> control <i>Backstepping</i> . .....	37
Figura 12. Posición en <i>heave</i> Control <i>Backstepping</i> .....	37
Figura 13. Ángulo en <i>yaw</i> control <i>Backstepping</i> . .....	38
Figura 14. Señal de control y error en <i>surge</i> , controlador <i>Backstepping</i> . ....	38
Figura 15. Señal de Control y Error en <i>heave</i> , Controlador <i>Backstepping</i> .....	39
Figura 16. Señal de Control y Error en <i>yaw</i> , Controlador <i>Backstepping</i> . ....	39
Figura 17. Trayectoria 3D .....	40
Figura 18. Trayectoria plano X, Y. ....	41
Figura 19. Trayectoria Plano X, Z. ....	41
Figura 20. Respuesta del VideoRay PRO 3 ante la trayectoria deseada.....	42
Figura 21. Perturbación de la corriente marina en <i>surge</i> controlador PD+Linealizador. ....	44
Figura 22. Perturbación de la corriente marina en <i>yaw</i> PD + Linealizador. ....	44
Figura 23. Perturbación de la corriente marina en <i>yaw</i> Controlador <i>Backstepping</i> . ....	45
Figura 24. Perturbación de la corriente marina en <i>surge</i> controlador <i>Backstepping</i> . ....	45



Universidad  
Industrial de  
Santander

Figura 25. Fuerza de propulsión vs señal de control. [12] .....	46
Figura 26. Fuerzas externas en <i>surge</i> Controlador PID.....	47
Figura 27. Fuerzas Externas en <i>heave</i> Controlador PID. ....	48
Figura 28. Fuerzas externas en <i>yaw</i> Controlador PID. ....	48
Figura 29. Fuerzas Externas en <i>surge</i> Controlador <i>Backstepping</i> .....	49
Figura 30. Fuerzas externas en <i>heave</i> Controlador <i>Backstepping</i> . ....	49
Figura 31. Fuerzas externas en <i>yaw</i> Controlador <i>Backstepping</i> .....	50



Universidad  
Industrial de  
Santander

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Índices controladores <i>surge</i> .....	51
Tabla 2. Índices controladores <i>heave</i> .....	51
Tabla 3. Índices controladores <i>yaw</i> .....	51



Universidad  
Industrial de  
Santander

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Diagrama de Bloques del Linealizador.....	58
Anexo B. Diagrama de Bloques controlador PID.....	58
Anexo C. Diagrama de Bloques Controlador Backstepping.....	59
Anexo D. Simulador VideoRay PRO 3.....	60
Anexo E. Simulador Controlador PID-Linealizador.....	61
Anexo F. Simulador Controlador Backstepping.....	62
Anexo G. Controlador.m.....	63



## RESUMEN

- TITULO:** DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DE POSICIÓN PARA UN VEHÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE (ROV) USANDO *BACKSTEPPING* CONTROL.\*
- AUTOR:** Edgar Alexander Alfonso Fuentes\*\*
- PALABRAS** Backstepping, VideoRay PRO 3, seguimiento, PID, Lyapunov,
- CLAVES:** Perturbaciones, controlador.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo controlar la posición del ROV, VideoRay PRO 3, utilizando controladores MIMO tipo *Backstepping* en sus tres grados de libertad controlables (*surge*, *heave*, *yaw*), utilizando un modelo completo (cinemático y dinámico) del vehículo, implementado en Simulink/Matlab proporcionado por la magister que codirige el proyecto.

Inicialmente se hizo una revisión teórica del VideoRay PRO3, de su modelo dinámico y cinemático, de las técnicas de control *Backstepping* y PID (Proporcional, Integral, Derivativo). Luego se utilizó la técnica de linealización exacta por retroalimentación de estados y se obtuvo una versión linealizada de la dinámica del sistema. Posteriormente fue controlada utilizando un controlador PD clásico previamente diseñado a través del método de lugar geométrico de las raíces.

Posteriormente se diseñó el controlador *Backstepping* utilizando un procedimiento que buscaba obtener la representación del modelo dinámico inverso del ROV en términos de los errores de posición y velocidad, y planteando una función de Lyapunov candidata que garantizara la estabilidad global del sistema.

Finalmente se validaron en simulación los controladores PID y *Backstepping* diseñados. La validación de los resultados se hizo en ausencia y presencia de perturbaciones que pudieran afectar al ROV en su posicionamiento. Y como resultado se obtuvo que los controladores diseñados presenten un buen desempeño antes las referencias y trayectorias deseadas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph.D Rodolfo Villamizar Mejía. Codirectora: M.Sc. Blanca Viviana Martínez



## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND SIMULATION OF A CONTROLLER POSITION FOR A REMOTELY OPERATED UNDERWATER VEHICLE (ROV) USING CONTROL BACKSTEPPING\*.

**AUTHOR:** Edgar Alexander Alfonso Fuentes\*\*

**KEYWORDS:** Backstepping, VideoRay PRO 3, tracing, PID, Lyapunov, perturbations, controller.

The main objective of this degree project is to control the position of ROV VideoRay PRO 3 using MIMO Backstepping controllers type in its three controllable degrees of freedom (surge, heave, yaw) using a full (kinematic and dynamic) model of the vehicle, implemented in Simulink / Matlab provided by the magister who co-directs the project.

Initially a theoretical review of the VideoRay PRO3, its dynamic and kinematic model, techniques and Backstepping PID (Proportional, Integral, Derivative) was made. Exact linearization technique was then used for state feedback and a linearized version of the dynamics of the system is obtained. Later it was controlled using a classical PD controller previously designed by the method of root locus.

Subsequently the Backstepping controller using a procedure that sought to obtain the representation of the inverse dynamic model of the ROV in terms of position and velocity errors, and posing a Lyapunov function candidate to guarantee the global stability of the system was designed.

Finally simulation validated at the PID and Backstepping controllers designed. Validation of the results was done in the absence and presence of disturbances that may affect the ROV positioning. And as a result was obtained that the controllers designed to present a good performance under references and desired trajectories

---

\* Work of degree

\*\* Faculty of Engineering Physical-Mechanical. Engineering Electronic.  
Director PhD. Rodolfo Villamizar Mejia. M.Sc. Co-Director Viviana Blanca Martínez.



## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con [12], un ROV (acrónimo del inglés Remote Operated Vehicle) es un robot submarino no tripulado y conectado a una unidad de control en la superficie por medio de un cable umbilical encargado de transportar información en ambas direcciones. Desde superficie se envían órdenes de movimiento al equipo y mediante una cámara instalada en el vehículo se puede observar la respuesta del equipo.

Los ROVs tienen un gran campo de acción que incluye [3]: la instalación de equipos, investigaciones científicas (geología, geofísica oceanografía,...), propósitos militares (buscaminas, información táctica, armas inteligentes,...), comerciales (petróleo, gas, líneas de transmisión,...), entre otras.

Para que un ROV logre un alto desempeño son necesarios el posicionamiento de alta precisión y la capacidad de seguimiento de trayectoria; pero debido a las condiciones y medio de operación a las que está sujeto, posicionarlo en una referencia deseada sin un control en lazo cerrado se hace muy difícil.

Controlar la posición de un ROV a partir de técnicas de control en lazo cerrado implica enfrentar tres grandes retos [3]. El primero de ellos está relacionado con la no linealidad de la cinemática y dinámica del vehículo. El segundo son las fuertes perturbaciones a las que está sometido un ROV debido al medio en el que opera. Y tercero es el posible acoplamiento dinámico que existe entre sus grados de libertad [3].



Universidad  
Industrial de  
Santander

En este trabajo de grado, se muestra el diseño de un controlador MIMO usando una ley de control no lineal tipo *Backstepping* para los tres grados de libertad controlables en el vehículo submarino VideoRay PRO 3 (*surge*, *heave*, y *yaw*). Y además se ilustra el diseño de controladores PID para cada uno de los grados de libertad controlables usando un modelo previamente linealizado del vehículo.



## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los controladores pueden ser clasificados de acuerdo con los sistemas en los cuales son aplicados como lineales y no lineales [12].

Los controladores lineales han sido estudiados y aplicados en vehículos submarinos por varias décadas. Muchas investigaciones han mostrado resultados exitosos aplicando controladores PID en el control de velocidad y control de posición [6] [7].

Sin embargo, los controladores lineales presentan dos desventajas en el control de vehículos submarinos. Primero, teniendo en cuenta que la dinámica de los vehículos submarinos es de naturaleza no lineal el controlador lineal estaría diseñado para un rango de operación limitado. Esta consideración no es siempre válida para vehículos submarinos ya que estos generalmente presentan grandes rangos de operación. Segundo, en el diseño de controladores, se suele asumir que los parámetros del sistema son conocidos, pero en vehículos submarinos las incertidumbres en los parámetros del modelo y las perturbaciones tienen un gran impacto en el desempeño de los vehículos [12].

Para el desarrollo del presente proyecto, se tiene una configuración numérica implementada en Matlab/Simulink con la que es posible simular los modelos cinemático y dinámico del VideoRay Pro 3. El simulador no tiene una ley de control establecida que permita el control de posición del vehículo y el seguimiento de trayectorias. Por tal motivo, se hace necesaria la implementación de una ley de control MIMO para sistemas no lineales, que permita solucionar los problemas de diseño presentados para este tipo de sistemas.

Para el diseño del controlador, se asume que no existe acoplamiento dinámico entre los grados de libertad del VideoRay Pro 3 (*surge*, *heave*, *yaw*) y los parámetros que hacen parte del modelo dinámico del ROV se adoptaron de la literatura existente para el mismo.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

### 2.1 Marcos de Referencia

De acuerdo con [2], existen dos marcos de referencia para vehículos submarinos.

#### 2.1.1 Marco de referencia terrestre:

Su origen está ubicado en un punto arbitrario de la superficie de la tierra. Se considera inercial debido a que la rotación terrestre no afecta de forma significativa el movimiento de vehículos submarinos de baja velocidad.

#### 2.1.2 Marco de referencia del vehículo:

Sistema coordinado en movimiento. Comúnmente su origen coincide con el centro de gravedad del robot.

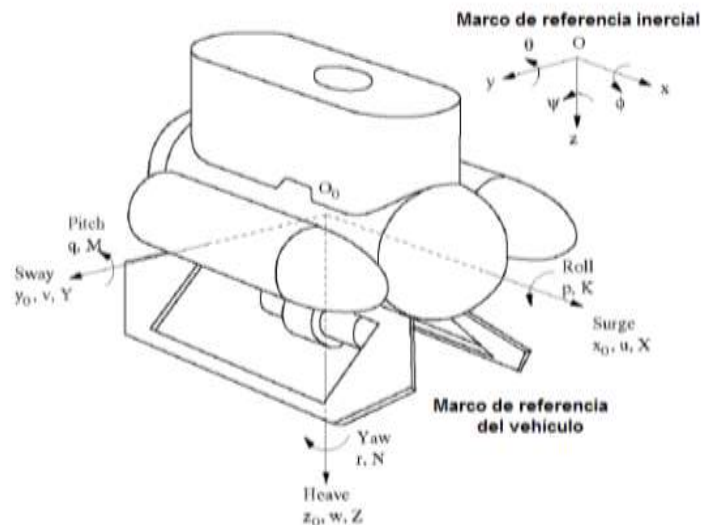


Figura 1. Marco de referencia ROV [2]

### 2.2 Modelo Cinemático del ROV [2]

Para modelar el movimiento de un vehículo submarino es necesario definir los siguientes vectores:



$n_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$  Vector de posición expresado en el sistema coordenado inercial.

$n_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}$  Vector de orientación expresado en el sistema coordenado inercial.

$v_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$  Vector de velocidad lineal expresado en el marco de referencia del vehículo.

$v_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$  Vector de velocidad angular expresado en el marco de referencia del vehículo.

La evolución de la posición y orientación del robot se describen a través de la siguiente ecuación cinemática:

$$\dot{n} = Jv \quad (1)$$

Donde,

$$n = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}; v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} J_1 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & (-c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi) & (s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi) \\ c\theta s\psi & (c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi) & (-s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi) \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_2 = \left(\frac{1}{c\theta}\right) \begin{bmatrix} c\theta & s\phi s\theta & c\phi s\theta \\ 0 & c\phi c\theta & -s\phi c\theta \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

c: Coseno s: Seno



### 2.3 Modelo dinámico del ROV [2]

La expresión que representa el movimiento de un cuerpo rígido en el espacio vacío es:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau \quad (5)$$

Donde,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

M: Masa del vehículo.

$$r_{CG} = [x_G \quad y_G \quad z_G] \quad (7)$$

Está definido como el vector de distancia al centro de gravedad.  $I_o$ , tensión de Inercia, está definida por la siguiente ecuación:

$$I_o = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$C_{RB}$  Es la matriz de fuerzas centrípetas y coriolis, y no tiene una representación definida.

$\tau$  Es el vector de fuerzas y momentos resultantes



$$\tau_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Cuando se estudian vehículos submarinos es necesario tener en cuenta las fuerzas hidrodinámicas generalizadas, es decir las fuerzas y momentos causados por la presencia de fluidos.

- Fuerzas inducidas por radiación: Contribución de masa adicional y amortiguamiento hidrodinámico.
- Fuerza de restauración. Gravedad y empuje (flotabilidad).
- Perturbaciones ambientales.

Incluyendo las fuerzas hidrodinámicas generalizadas y la acción del cable, la ecuación de describe la dinámica de un ROV [2] es:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(n) = \tau_c + \tau_{cable} + \tau_{prop} \quad (11)$$

$M = M_{RB} + M_A$  Matriz de inercia y masa adicional.

$C(v) = C_{RB} + C_A$  Matriz de fuerza centrípeta y coriolis, y de masa adicional.

$D(v)$  Matriz de amortiguamiento hidrodinámico.

$g(n)$  Vector de fuerzas de restauración: gravedad y empuje

$\tau_c$  Vector de fuerzas y momentos causados por las corrientes oceánicas.

$\tau_{cable}$  Vector de fuerzas y momentos causados por el cable o tether.

$\tau_{prop}$  Vector de fuerzas y momentos resultantes que actúan sobre el vehículo.



### 3 CONTROLADOR PID

El diseño de controladores PID clásicos, tiene como punto de partida una versión linealizada del modelo dinámico del sistema. Para el presente caso, tal versión linealizada se obtiene a partir de la implementación en la realimentación de un bloque linealizador, tal que dicho bloque cancele la parte no lineal del sistema. A partir del sub-modelo lineal que se obtiene al aplicar el bloque linealizador, se diseñó el controlador PID mediante la técnica del lugar geométrico de las raíces.

#### 3.1 Obtención del modelo dinámico lineal del VideoRay PRO 3

Para obtener una versión linealizada del modelo dinámico del VideoRay PRO 3, se utilizó la técnica de linealización exacta por retroalimentación de estados [1], [4]. Esta es una técnica de control que permite obtener una versión lineal del sistema retroalimentando negativamente de las no linealidades presentes en el modelo, con el fin de que estas sean canceladas.

El modelo dinámico del ROV [2] está descrito por la siguiente ecuación:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(n) = \tau_c + \tau_{cable} + \tau_{prop} \quad (12)$$

Haciendo:

$$\tau_c + \tau_{cable} + \tau_{prop} = \tau \quad (13)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(n) = \tau \quad (14)$$

Ahora bien, una ley de control adecuada para linealizar el sistema, mediante el uso de retroalimentación de estados, está dado por:

$$\tau = Mu + C(v)v + D(v)v + g(n) \quad (15)$$

Donde  $u$  constituye una nueva entrada “auxiliar o virtual”, que es la ley de control que se obtiene a partir del diseño del PID, mientras que el bloque linealizador corresponde a:



$$C(v)v + D(v)v + g(n) \quad (16)$$

que es el término que se añade negativamente para cancelarlos de la ecuación 14. Por tanto, una vez implementado el bloque linealizador, se obtiene el siguiente modelo dinámico lineal:

$$M\dot{v} = Mu \quad (17)$$

Dado que  $M$  es invertible, se llega finalmente a que:

$$\dot{v} = u \quad (18)$$

La ecuación 18 es lineal y muestra que la aceleración en el marco de referencia del vehículo es igual a la entrada de control “virtual”.

Expresado en términos de la posición del vehículo se tiene que:

$$n = \iint u \quad (19)$$

Donde  $n$  representa la posición en el marco de referencia del vehículo.

### 3.2 Diseño del PID

Una técnica muy utilizada encontrada en la literatura para el seguimiento en AUVs y ROVs [5][6] [7] es el control PD.

El diseño del controlador PD (Proporcional-Derivativo) se realizó por medio del lugar geométrico de la raíces, y se implementó como función en MATLAB (controlador.m). La función requiere como entrada un tiempo de establecimiento y un sobrepico para calcular el valor de las constantes P, I, D (La constante I, integral, por defecto es cero).

Con el valor de sobrepico se calcula un valor de factor de amortiguamiento ( $\zeta$ ) y de frecuencia ( $\omega_n$ ) de acuerdo a la siguiente ecuación [8], [9]:



$$\zeta = \sqrt{\frac{(\log(sp))^2}{\pi^2 + (\log(sp))^2}} \quad (20)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta * T_s} \quad (21)$$

Donde  $sp$  es el sobrepico y  $T_s$  es el tiempo de establecimiento deseado.

Con este valor de  $\zeta$  y  $\omega_n$  se calculó un par de polos deseados.

$$s_{1,2} = \zeta * \omega_n \pm j * \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (22)$$

Se calcula el valor de la planta ya linealizada en este polo deseado.

$$\frac{1}{s^2} |_{s_{1,2}} = MAG \angle ANG \quad (23)$$

Donde  $MAG$  representa la magnitud y  $ANG$  el ángulo al evaluarla en el polo deseado.

El diseño por el lugar geométrico de las raíces exige que al evaluar la planta en el polo deseado se tiene que cumplir que:

$$MAG \angle ANG = 1 \angle \pm 180^\circ \quad (24)$$

La función de transferencia del controlador PD es de la forma [8], [9]:

$$K(s + a) \quad (25)$$

Con lo cual se calcula primero el valor de  $a$  que adicione la fase necesaria para llevar el sistema a  $180^\circ$  y después el valor de  $K$  que hace llevar el sistema a un valor de  $MAG$  igual a 1

En Simulink el bloque PID interpreta en controlador como:

$$PID = P + Ds + \frac{I}{s} \quad (26)$$



Según lo planteado se tiene que:

$$P = K * a \quad (27)$$

$$D = K \quad (28)$$



## 4 CONTROLADOR *BACKSTEPPING*

*Backstepping* puede resolver problemas de estabilización, seguimiento y control robusto bajo condiciones menos restrictivas que las encontradas en otros métodos [10]. Con esta estrategia de control, se busca tener un error de seguimiento a una trayectoria deseada muy pequeño, pese a la presencia de incertidumbres paramétricas y la no linealidad del modelo [11].

### 4.1 *Backstepping* Control

De acuerdo con [1] y [4].

Considere el sistema

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi \quad (29)$$

$$\dot{\xi} = u \quad (30)$$

Donde  $\eta \in R^n$ ,  $\xi \in R$  son los estados y  $u \in R$  es la entrada de control. Las funciones  $f: D \rightarrow R^n$  y  $g: D \rightarrow R^n$  son suaves en un dominio  $D \subset R^n$  que contiene a  $\eta = 0$ , y  $f(0) = 0$ .

Se quiere diseñar un control por retroalimentación de estados que establezca el origen  $\eta = 0$ , y  $\xi = 0$ .

El sistema (29)-(30) puede pensarse como la conexión en cascada de dos componentes, como se ve en el Figura 2. La primera componente es (29), con  $\xi$  como entrada, y la segunda es el integrador (30).

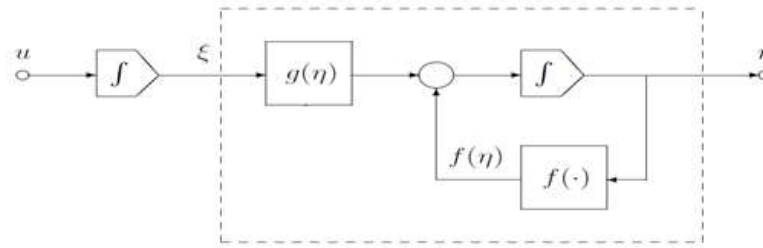


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema (29)-(30). [1][4]

Supóngase que se sabe que la componente (29) puede estabilizarse con un control suave  $\xi = \phi(\eta)$  con  $\phi(0) = 0$ , vale decir, el origen de

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) \quad (31)$$

Es asintóticamente estable. Más aún, supongamos que se conoce una función de Lyapunov  $V(\eta)$  (suave, definida positiva) que satisface.

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} [\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] \leq -W(\eta), \quad \forall \eta \in D \quad (32)$$

Donde  $W(\eta)$  es definida positiva. Sumando y restando  $g(\eta)\phi(\eta)$  al lado derecho de (29), se obtiene la representación equivalente

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) + g(\eta)[\xi - \phi(\eta)] \quad (33)$$

$$\dot{\xi} = u \quad (34)$$

Que se muestra en la Figura 3.

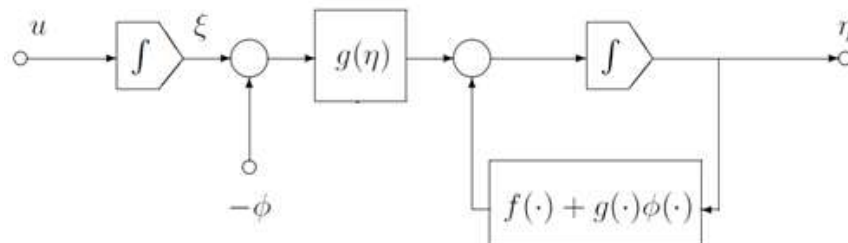


Figura 3. Introducción de  $\phi(\eta)$ . [1][4]



Con el cambio de variable

$$z = \xi - \phi(\eta), \quad v = u - \phi(\eta) \quad (35)$$

Se obtiene el sistema

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) + g(\eta)z \quad (36)$$

$$\dot{z} = v \quad (37)$$

Que se muestra en la Figura 4.

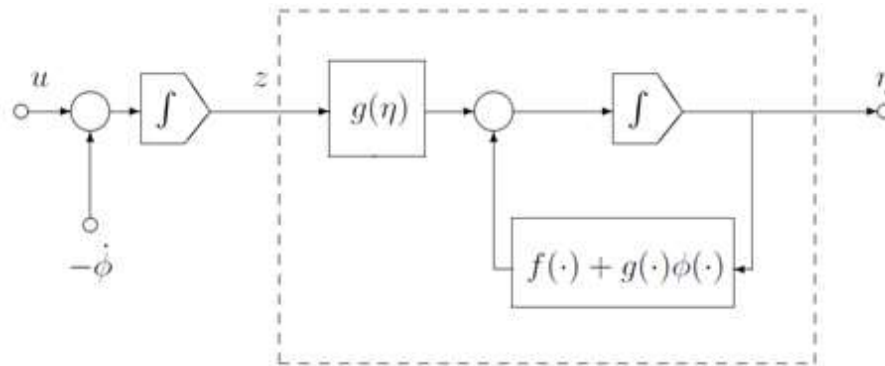


Figura 4. *Backstepping* de  $-\dot{\phi}(\eta)$  a través del integrador. [1][4]

Nótese que, como  $f, g, y \phi$  son conocidas, podemos calcular la derivada  $\dot{\phi}$  usando la expresión

$$\dot{\phi} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} [ f(\eta) + g(\eta)\xi ] \quad (38)$$

El sistema (36)-(37) tiene la misma estructura del sistema original, pero ahora la componente  $\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) + g(\eta)z$  tiene un punto asintóticamente estable en el origen cuando su entrada es cero. Esta característica va a ser explotada en el diseño de un control  $v$  que estabilice todo el sistema.

Considérese como candidata a función de Lyapunov (39)



$$V_a(\eta, z) = V(\eta) + \frac{1}{2}z^2 \quad (39)$$

Cuya derivada a lo largo de las trayectorias de (36)-(37) satisface

$$\dot{V}_a = \frac{\partial v}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + \frac{\partial v}{\partial \eta} g(\eta)z + zv \leq -W(\eta) + \left[\frac{\partial v}{\partial \eta} g(\eta) + v\right]z. \quad (40)$$

Eligiendo

$$v = -\frac{\partial v}{\partial \eta} g(\eta) - kz, k > 0 \quad (41)$$

Se obtiene

$$\dot{V}_a \leq -W(\eta) - kz^2 \quad (42)$$

Que muestra que el origen  $\eta = 0, z = 0$  es asintóticamente estable. Como  $\phi(0) = 0$ , se concluye que el origen  $\eta = 0, \xi = 0$  es asintóticamente estable. Sustituyendo las expresiones de  $v, z$  y  $\phi$ , se obtiene el control en retroalimentación de estados

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial v}{\partial \eta} g(\eta) - k[\xi - \phi(\eta)] \quad (43)$$

## 4.2 Diseño del Controlador *Backstepping*

El procedimiento que se presenta a continuación, busca obtener otra representación del modelo dinámico inverso del ROV, con el fin de obtener una señal de control virtual ( $y$ ) y otra real ( $u$ ). Esta última será la integral de la señal virtual de control que estabilizará el sistema. La forma general que se utiliza para aplicar el control *Backstepping* es [1,11]:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)y, \quad f(0) = 0 \quad (44)$$

$$\dot{y} = u \quad (45)$$

Donde  $x$  y  $y$  son los estados y  $u$  es la entrada de control.



Partiendo de que la señal de control virtual será el error de posición en el marco de referencia del vehículo se tiene que:

$$e = p - p_d \quad (46)$$

$$\dot{e} = \dot{p} - \dot{p}_d \quad (47)$$

Donde  $p_d$  y  $\dot{p}_d$  son los vectores de posición y velocidad deseadas respectivamente. De acuerdo con Spong [13][14], se define el vector de corrección de velocidad como:

$$x = \dot{e} - \sigma = \dot{e} + Ke \quad (48)$$

Donde  $K$  es una matriz diagonal definida positiva, para obtener una combinación lineal entre  $e$ ,  $\dot{e}$  y  $x$ .

Derivando  $\dot{e}$  se llega a:

$$\ddot{e} = \ddot{p} - \ddot{p}_d \quad (49)$$

Derivando  $x$  se tiene que:

$$\dot{x} = \ddot{e} + K\dot{e} \quad (50)$$

$\ddot{p}$  es la aceleración expresada en el sistema de referencia del ROV. La ecuación dinámica que describe el comportamiento del vehículo es:

$$\tau = M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(n) \quad (51)$$

Donde  $\dot{v}$  representa la aceleración en el sistema de referencia del vehículo, es decir:

$$\ddot{p} = \dot{v} \quad (52)$$

Despejando  $\dot{v}$  de la ecuación dinámica del ROV se llega a:



$$\ddot{p} = \dot{v} = M^{-1}(\tau - C(v)v - D(v)v - g(n)) \quad (53)$$

Sustituyendo  $\ddot{p}$  y  $\dot{e}$  en la ecuación 36, se tiene que:

$$\dot{x} = M^{-1}(\tau - (C(v) + D(v))v - g(n)) - \ddot{p}_d + Kx - K^2e \quad (54)$$

Despejando  $\dot{e}$  de la ecuación 48, se llega a:

$$\dot{e} = -Ke + x \quad (55)$$

Estas dos últimas ecuaciones tienen la forma general que se utiliza para aplicar Control *Backstepping* [1], [11]. Donde la señal virtual de control es  $e$ .

Para obtener la ley de control que establezca el sistema representado por el par de ecuaciones antes descritas, se selecciona en primera instancia una función de Lyapunov [1] candidata,  $V_a$  (definida positiva), con la cual se espera demostrar la estabilidad asintótica del sistema.

$$V_a = \frac{1}{2}x^T Mx + \frac{1}{2}e^T Ke \quad (56)$$

Derivando la ecuación candidata de Lyapunov se obtiene:

$$\dot{V}_a = x^T M\dot{x} + e^T K\dot{e} \quad (57)$$

$$\dot{V}_a = x^T(\tau - C(v)v + D(v)v - g(n) - M\ddot{p}_d + MKx - MK^2e) + e^T K(x - Ke) \quad (58)$$

Con el fin de garantizar la estabilidad asintótica del sistema en lazo cerrado, se define la ley de control como:

$$\tau = M\ddot{p}_d + C(v)v + D(v)v + g(n) - MKx - ke \quad (59)$$

Se obtiene:

$$\dot{V}_a = x^T(-MK^2e - Ke) + e^T K(x - Ke) \quad (60)$$



$$\dot{V}_a = -x^T MK^2 e - x^T Ke + e^T Kx - e^T K^2 e \quad (61)$$

Aplicando la norma a cada uno de los sumandos y las propiedades de norma de matrices a cada uno de estos, se tiene:

$$\dot{V}_a = -x^T MK^2 e - \|x^T Ke\| + \|e^T Kx\| - e^T K^2 e$$

$$\dot{V}_a \leq -x^T MK^2 e - \|x^T\| \|Ke\| + \|e^T\| \|Kx\| - e^T K^2 e$$

$$\dot{V}_a \leq -MK^2 \|x^T\| \|e\| - K^2 \|e\|^2 < 0$$

Como  $\dot{V}_a$  es definida negativa, luego la ley de control propuesta

$$\tau = M\ddot{p}_d + C(v)v + D(v)v + g(n) - MKx - ke \quad (62)$$

Hace que el sistema sea globalmente estable según el teorema de estabilidad de Lyapunov [1], [14].

## 5 SIMULACIÓN Y RESULTADOS

### 5.1 Controlador PID

Para validar el desempeño del controlador PD se especificaron como condiciones de desempeño dinámico del sistema sobrepico del 10 por ciento y tiempo de establecimiento dentro del 2% de 3 segundos, tanto para el grado de libertad *surge*, como *yaw* del ROV. A partir de tales condiciones y usando el modelo dinámico lineal obtenido en (19), se obtuvo un controlador PD con ganancias de  $P=5.0872$  y  $D=2.666$ . Para el grado de libertad *heave* se planteó un sobrepico de 10 por ciento con un tiempo de establecimiento de 5 segundos, con lo que se obtuvo un PD de ganancias  $P=1.8314$  y  $D=1.60$ .

Planteando el vector de referencia  $[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \pi/4]$  se obtuvieron las respuestas dinámicas presentadas en las figuras 5, 6 y 7, incluyendo el bloque linealizador.

Figura 5. Posición en *surge* control PD ( $P=5.0872$  y  $D=2.666$ ).

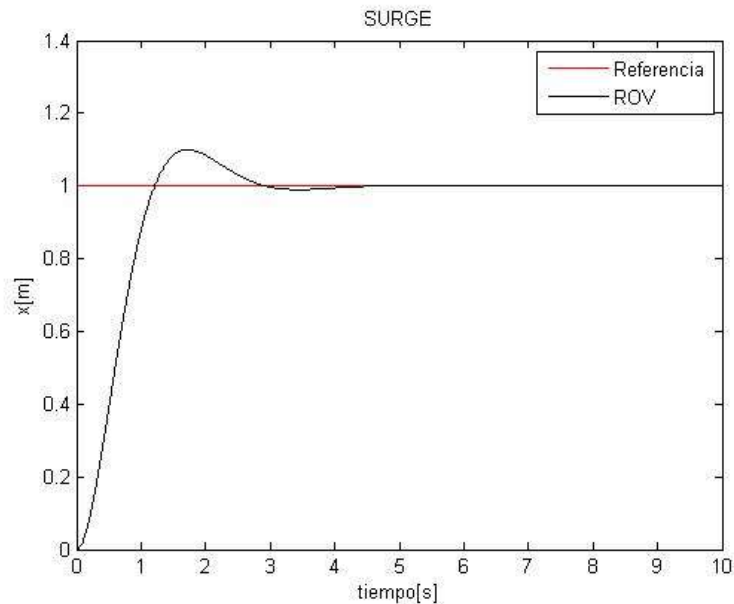




Figura 6. Posición en *heave* control PD ( $P=1.8314$  y  $D=1.60$ ).

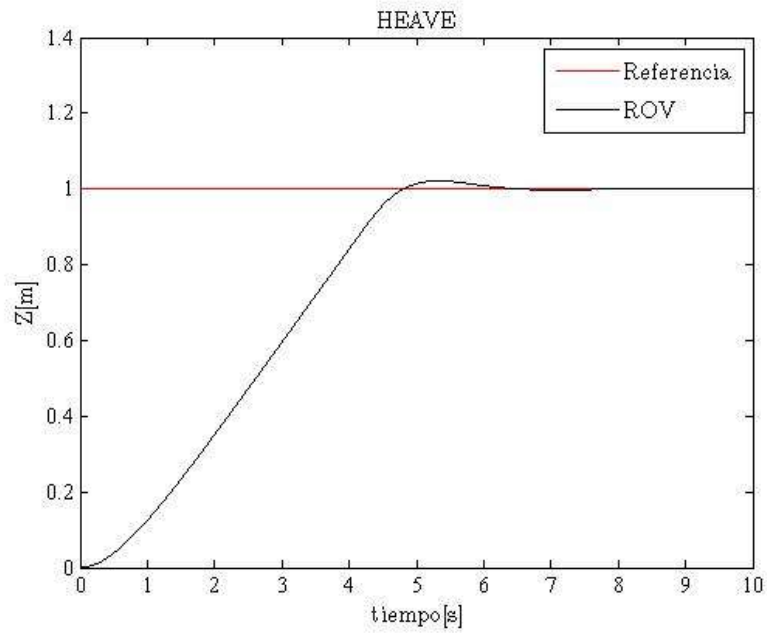
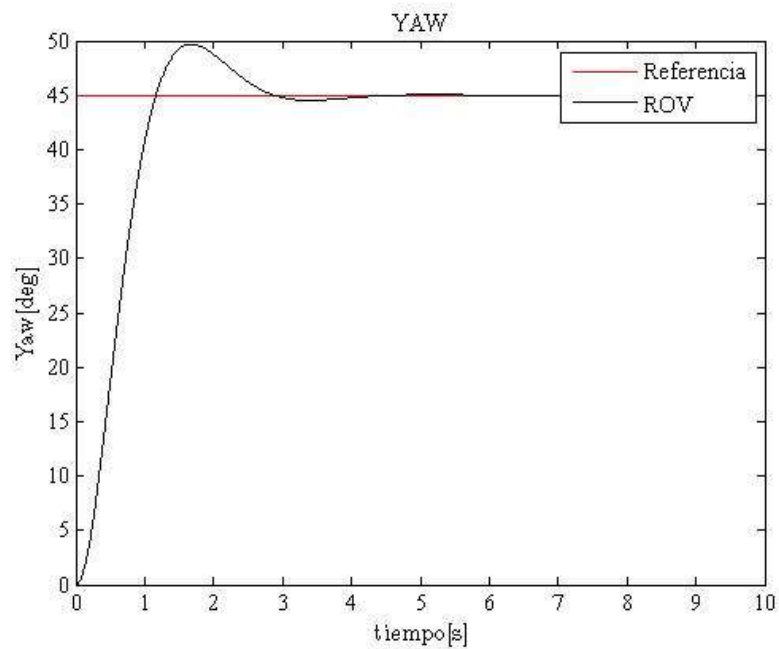


Figura 7. Ángulo en *yaw* control PD ( $P=5.0872$  y  $D=2.666$ ).



La señal de control total (controlador PD + bloque linealizador) y la señal de error, para cada uno de los grados de libertad controlables del VideoRay PRO 3, se presentan en las figuras 8, 9 y 10.

Figura 8. Señal de control total y error en *surge*, PD + Linealizador.

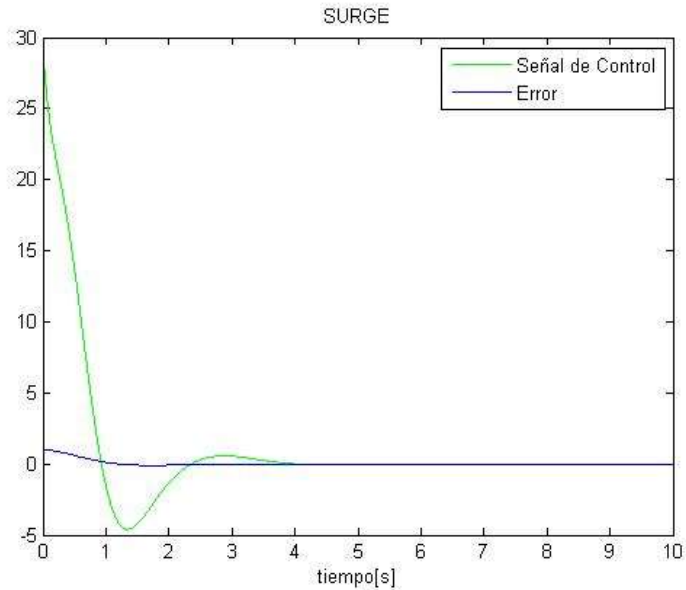


Figura 9. Señal de control y error en *heave*, PD + Linealizador.

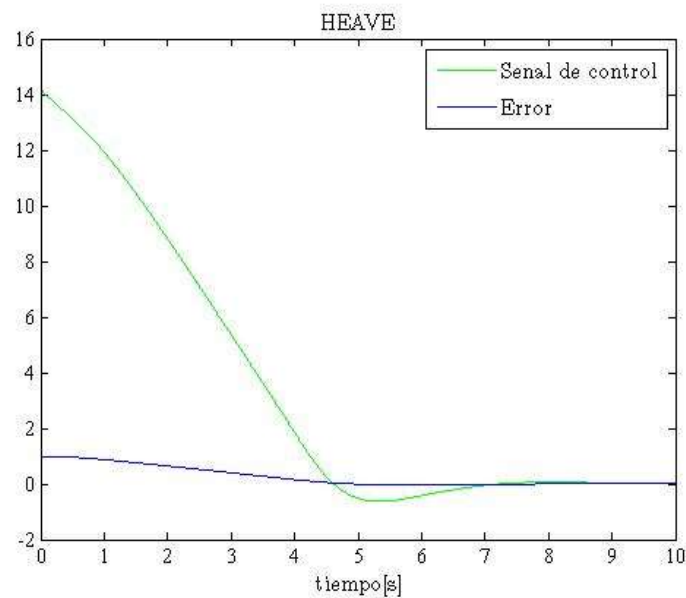
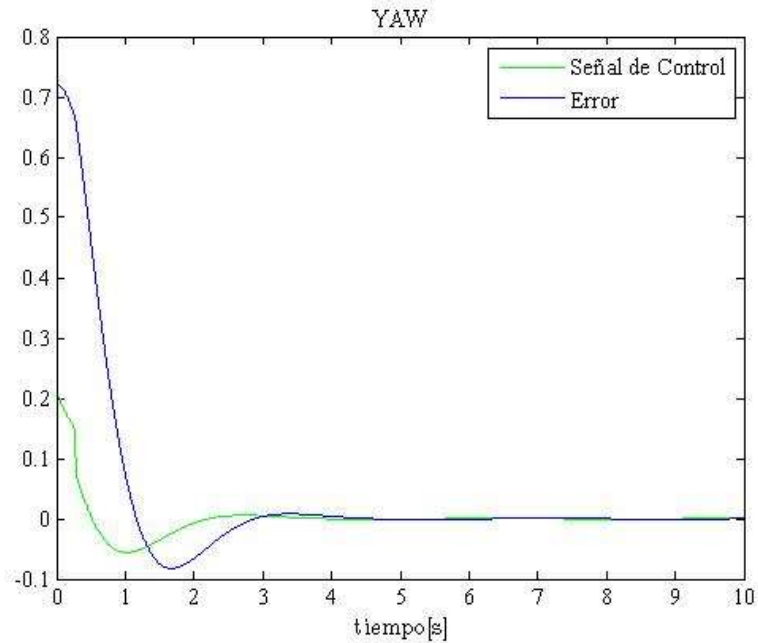




Figura 10. Señal de control y error en yaw, PD + Linealizador.



## 5.2 Controlador *Backstepping*

Para validar el comportamiento del controlador *Backstepping* se simuló para el mismo vector de referencia  $[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \pi/4]$  y las mismas especificaciones de diseño. Para tal caso en la matriz  $K$ , definida positiva y diagonal, se obtuvo un valor de 3 en las componentes de su diagonal. Los resultados de simulación se presentan en las figuras 11, 12 y 13.



Figura 11. Posición en *surge* control *Backstepping*.

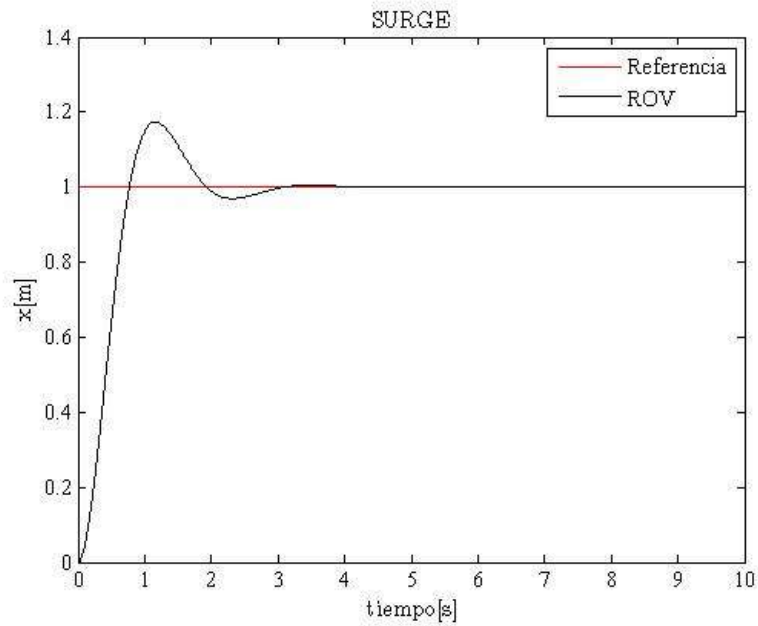


Figura 12. Posición en *heave* Control *Backstepping*.

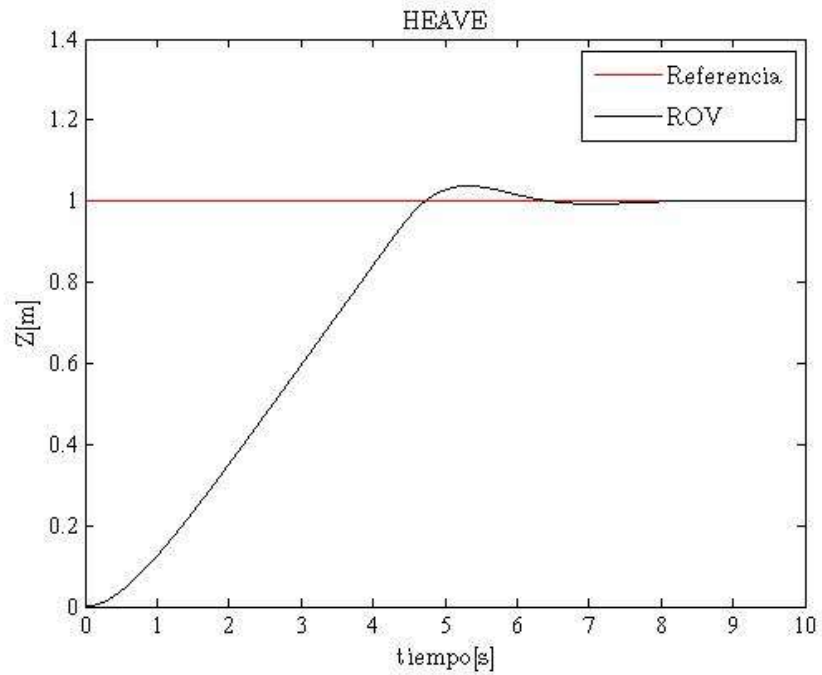
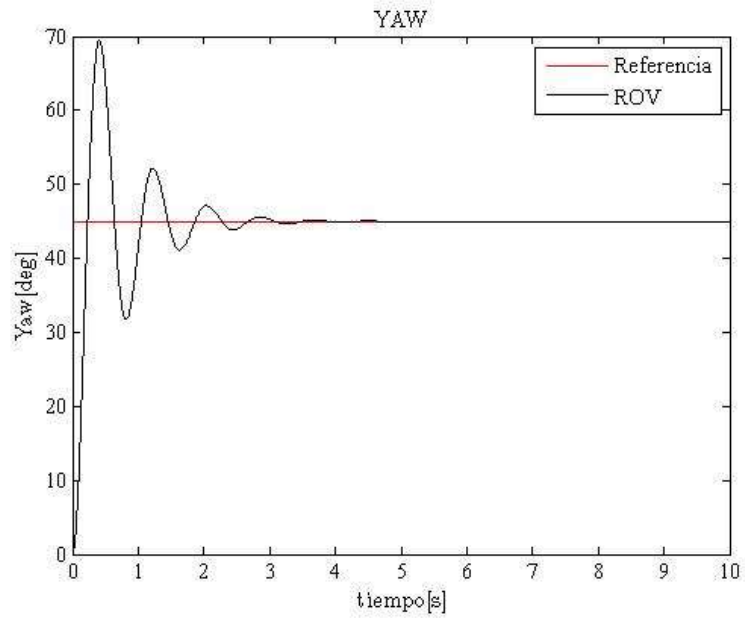


Figura 13. Ángulo en *yaw* control *Backstepping*.



### 5.2.1 Acción de Control y Error

La señal de control y el error calculados para cada uno de los grados de libertad controlables del VideoRay PRO 3 se presentan en las figuras 14, 15 y 16.

Figura 14. Señal de control y error en *surge*, controlador *Backstepping*.

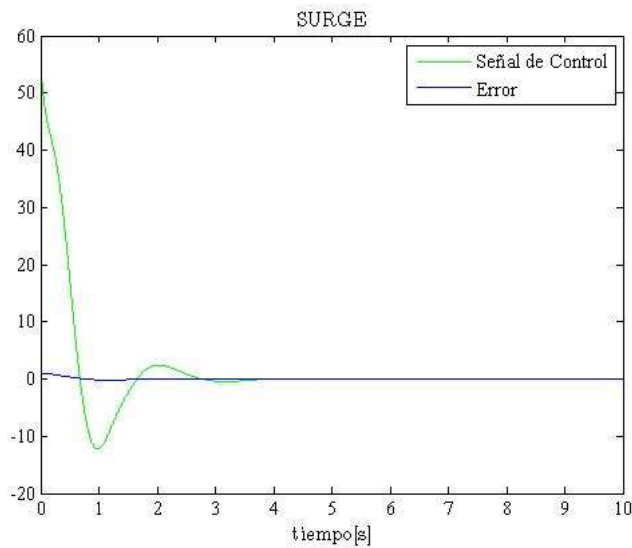




Figura 15. Señal de Control y Error en *heave*, Controlador *Backstepping*.

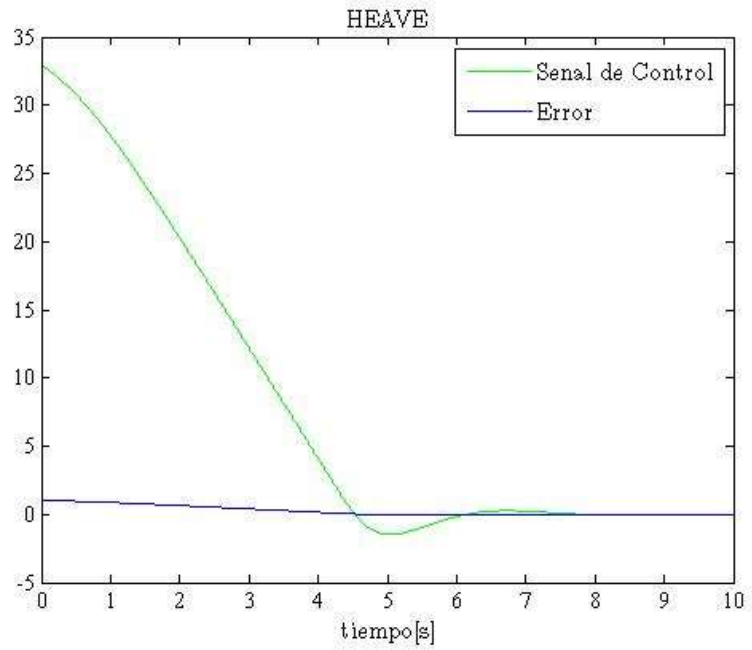
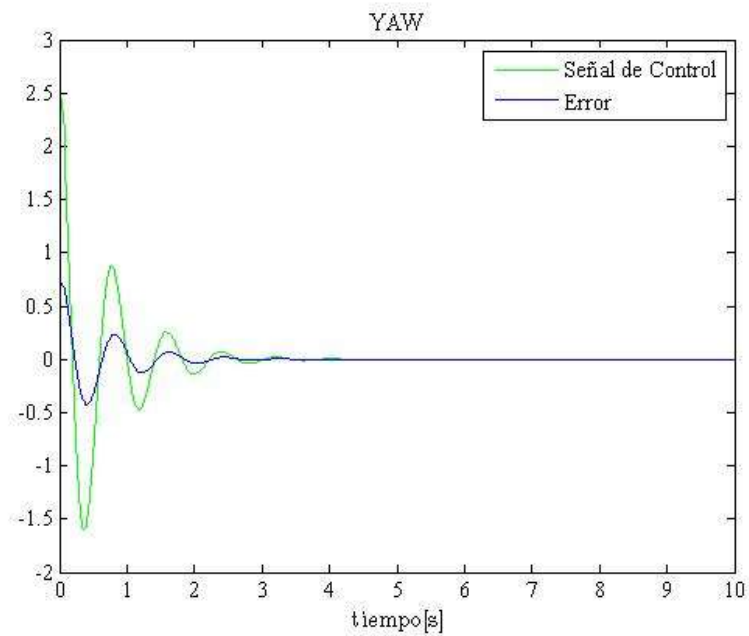


Figura 16. Señal de Control y Error en *yaw*, Controlador *Backstepping*.



### 5.2.2 Seguimiento de Trayectoria

Se diseñó una trayectoria para que el VideoRay PRO 3 la siguiera, utilizando el controlador *Backstepping*. Se recalculó la matriz  $K$ , obteniéndose los siguientes valores:

$$K = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (63)$$

Con el controlador *Backstepping* obtenido, se priorizan el control de los grados de libertad *yaw* y *heave*, y por último se controla *surge*.

La trayectoria deseada y la trayectoria seguida por el ROV se presentan en las figuras 17, 18 y 19.

Figura 17. Trayectoria 3D

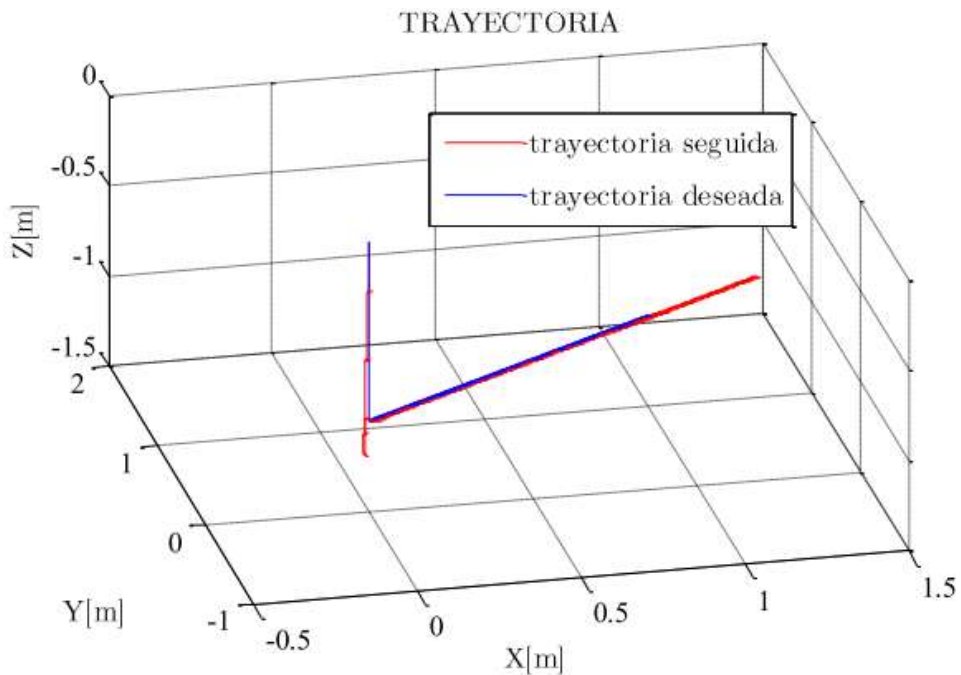




Figura 18. Trayectoria plano X, Y.

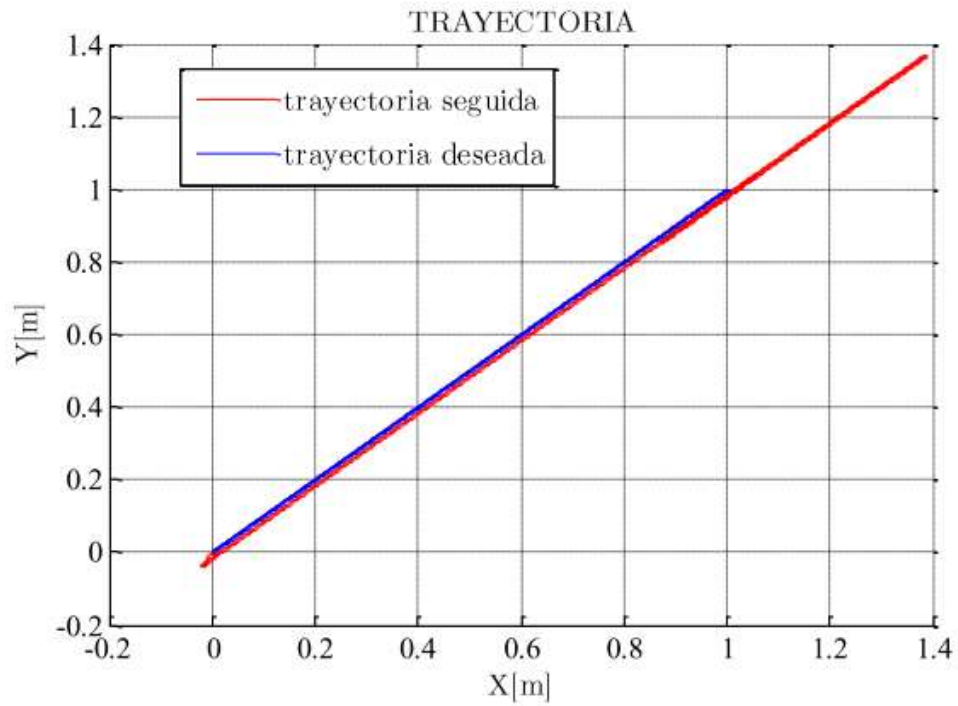
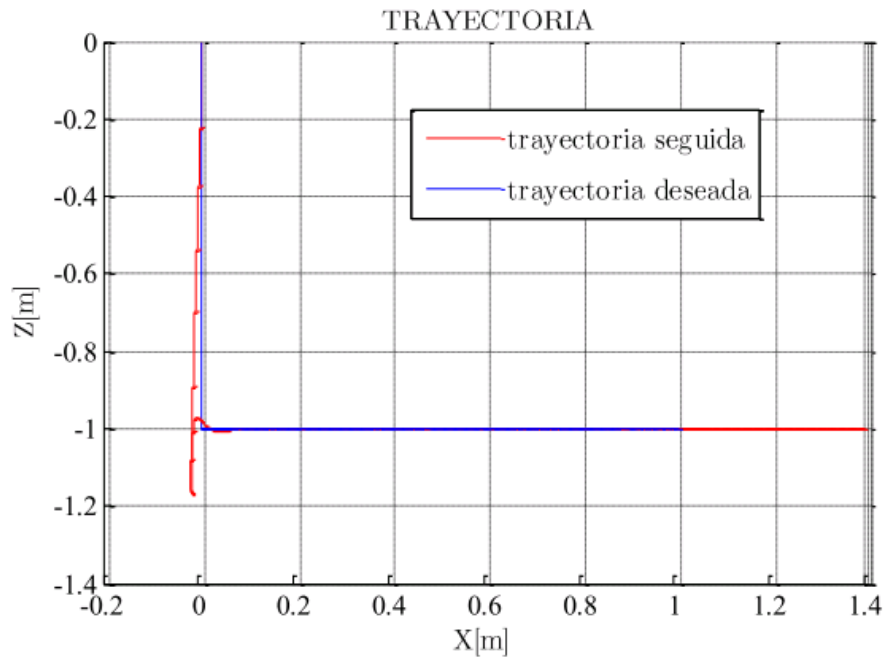


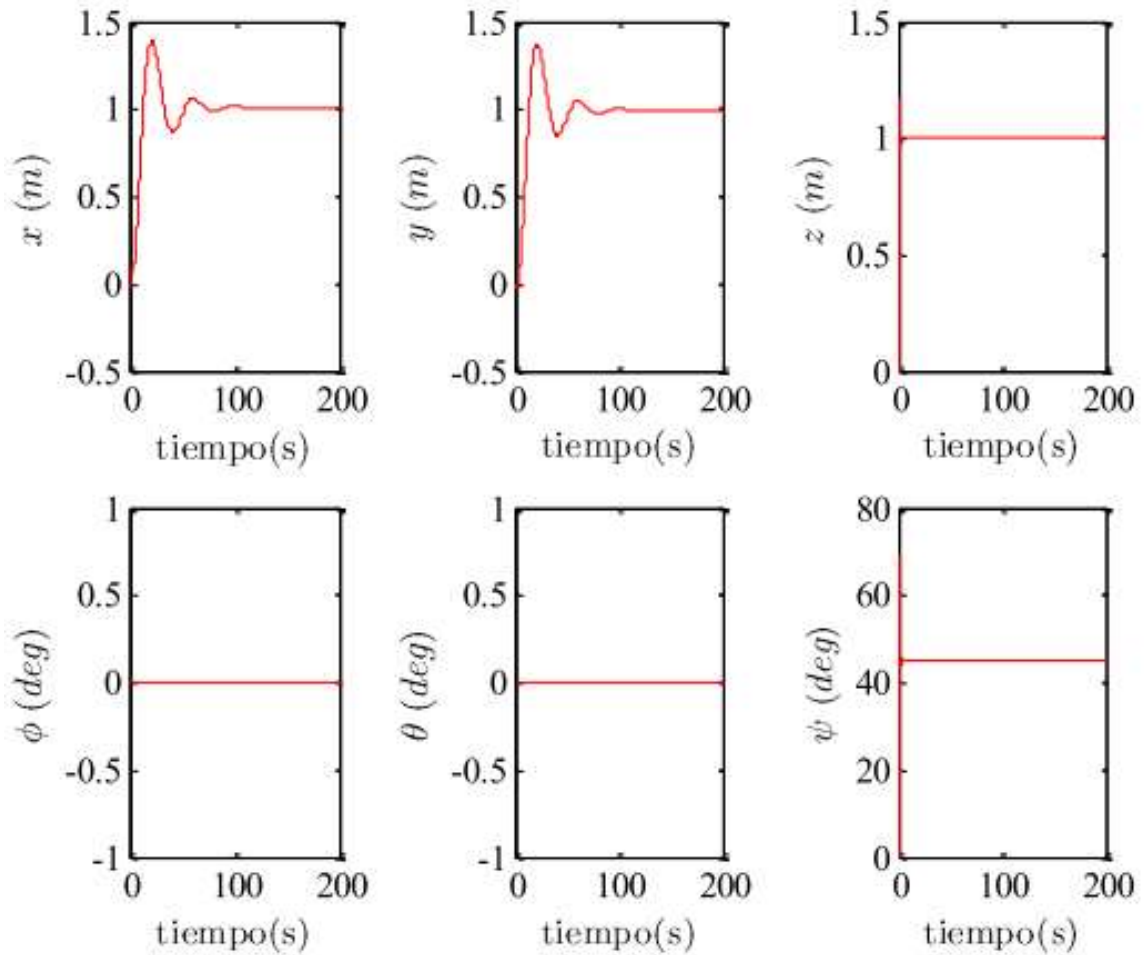
Figura 19. Trayectoria Plano X, Z.





El comportamiento de los 6 grados de libertad del VideoRay PRO 3 ante la trayectoria deseada, usando control *Backstepping*, se presenta en la figura 20.

Figura 20. Respuesta del VideoRay PRO 3 ante la trayectoria deseada.





## 5.3 Perturbaciones

### 5.3.1 Perturbaciones Ambientales

Según [2], en el modelado de vehículos marítimos las perturbaciones ambientales son las fuerzas y momentos causados por el viento, las olas y las corrientes. En el caso de vehículos sumergibles que operan lejos de la superficie del mar, sólo se tiene en cuenta el efecto de las corrientes [2]:

$$V_c = [u_c \ v_c \ w_c \ 0 \ 0 \ 0] \quad (64)$$

Asumiendo que la corriente es constante e irrotacional, el efecto de la misma puede ser incluido en la ecuación dinámica del ROV:

$$\dot{V}_c = 0 \quad (65)$$

$$v_r = v - V_c \quad (66)$$

$$\dot{v}_r = \dot{v} \quad (67)$$

$$\tau = M\dot{v} + C(v)v_r + D(v)v_r + g(n) \quad (68)$$

Donde  $v_r$  es la velocidad del vehículo resultante, incluyendo velocidades de la corriente marina.

De acuerdo con [12], considerando la corriente marina en la dirección de *surge* con un valor entre 0.1 y 0.5 [m/s] se obtuvieron, tanto para el controlador PID, como *Backstepping*, los resultados presentados en las figuras 21 a 24.



Figura 21. Perturbación de la corriente marina en *surge* controlador PD+Linealizador.

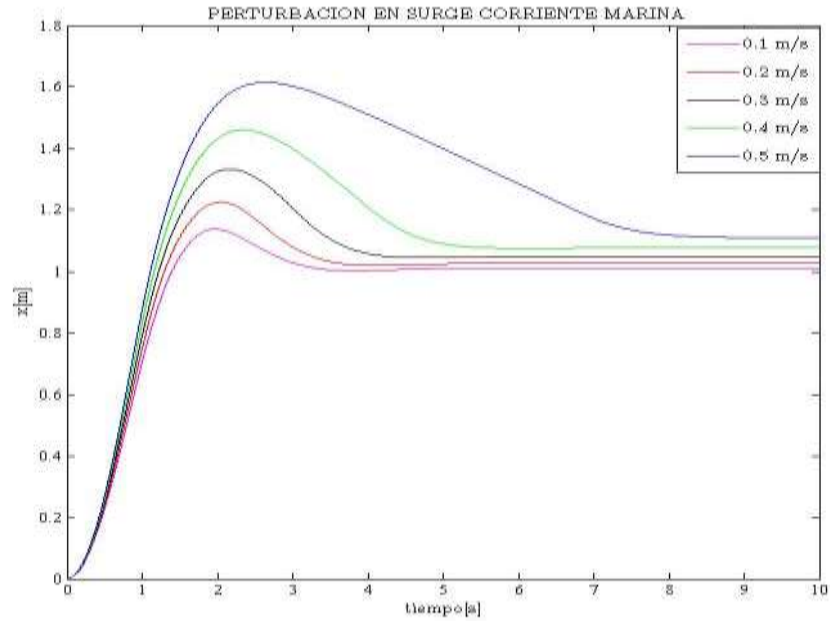


Figura 22. Perturbación de la corriente marina en *yaw* PD + Linealizador.

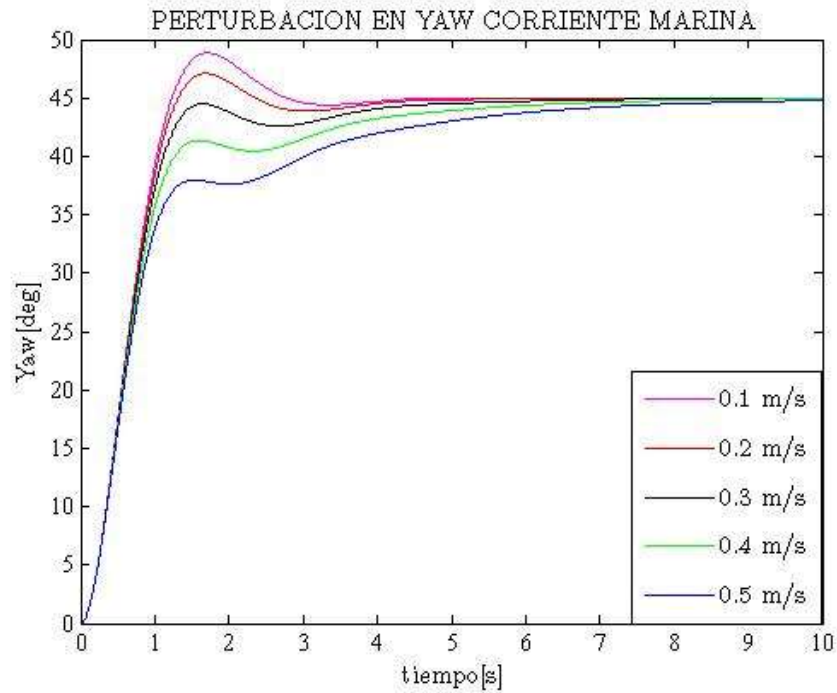


Figura 23. Perturbación de la corriente marina en yaw Controlador *Backstepping*.

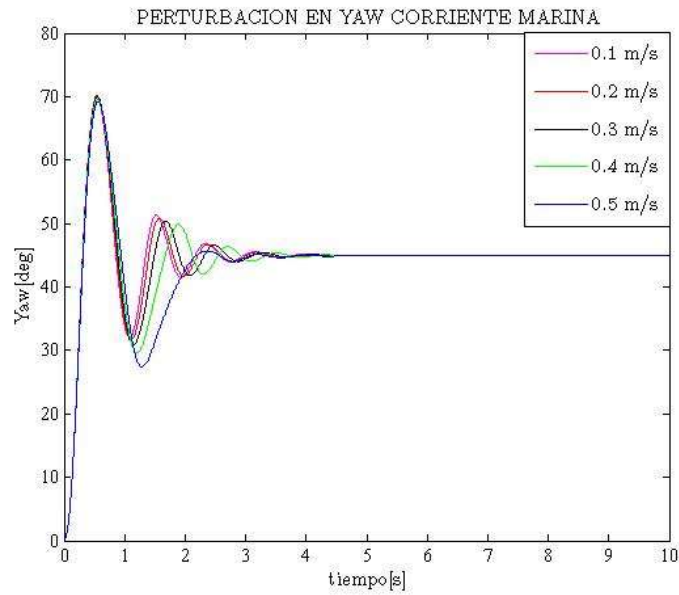
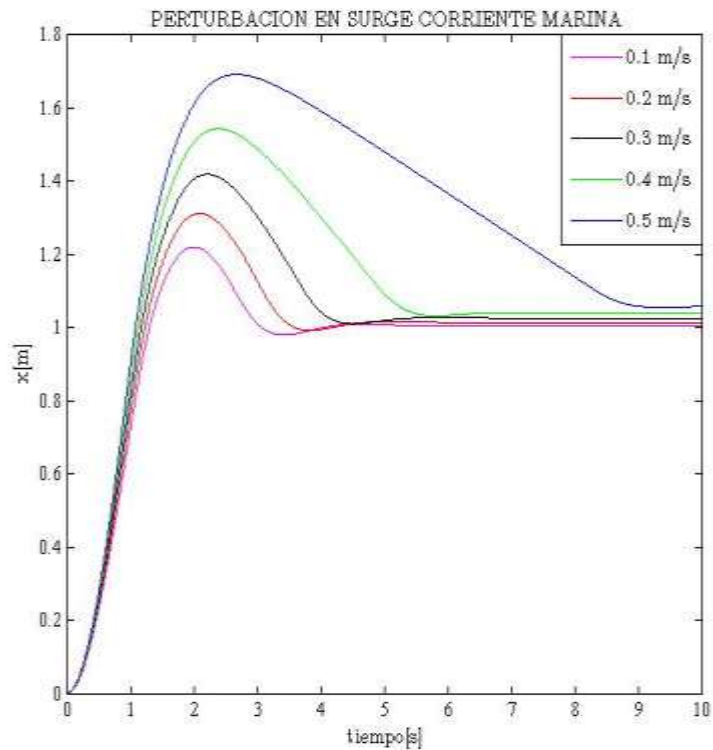


Figura 24. Perturbación de la corriente marina en surge controlador *Backstepping*.





### 5.3.2 Fuerzas externas

Se consideran como fuerzas externas las fuerzas y momentos ejercidos por el cable o *tether* que comunica al ROV con la superficie.

Se consideraron fuerzas externas con valores en Newton (N) que estuvieran en el rango de operación de los propulsores que tiene el vehículo.

El VideoRay PRO 3 tiene 3 propulsores [2][12]: *port*, *starboard* y *vertical*.

De acuerdo con [12], los propulsores *port/starboard* del VideoRay PRO 3 presentan la siguiente curva de Fuerza vs Señal de control:

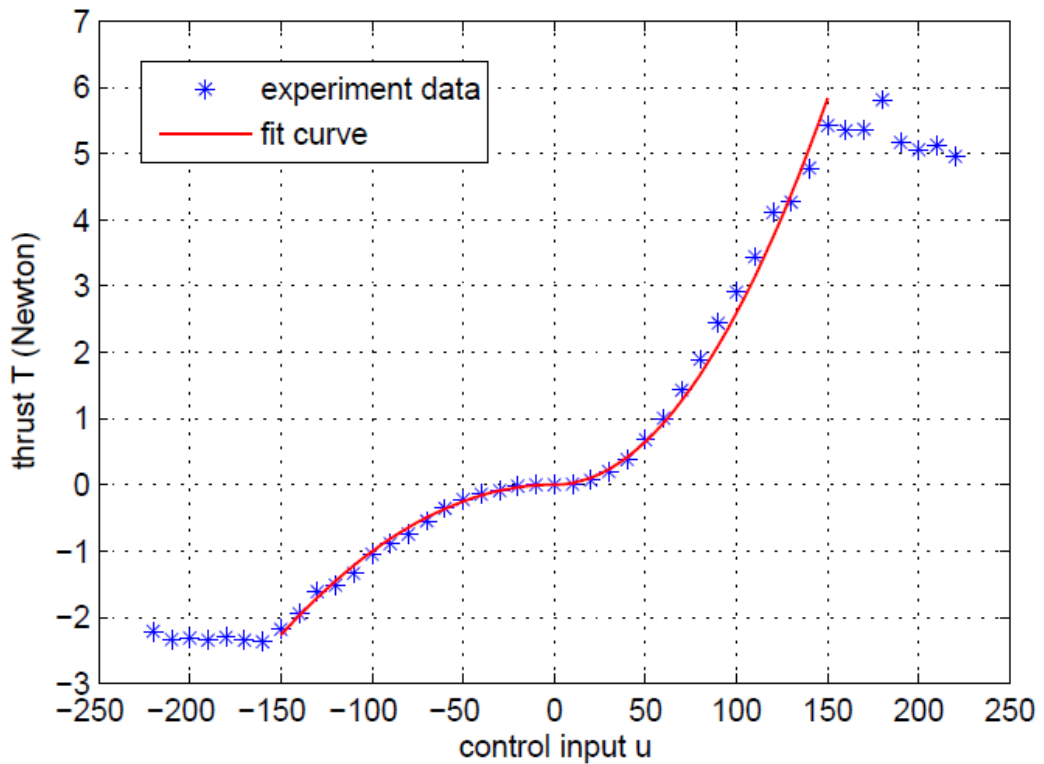


Figura 25. Fuerza de propulsión vs señal de control. [12]

Lo cual quiere decir que los propulsores *port/starboard* entregan un rango limitado de fuerza comprendido entre  $-2.26$  [N] y  $5.83$  [N] [12]. Según [2], vertical posee un rango de fuerzas comprendido entre  $-1.69$  [N] y  $2.67$  [N].

Los resultados de las simulaciones para el controlador PD se presentan en las figuras 26, 27, 28.

Figura 26. Fuerzas externas en *surge* Controlador PID.

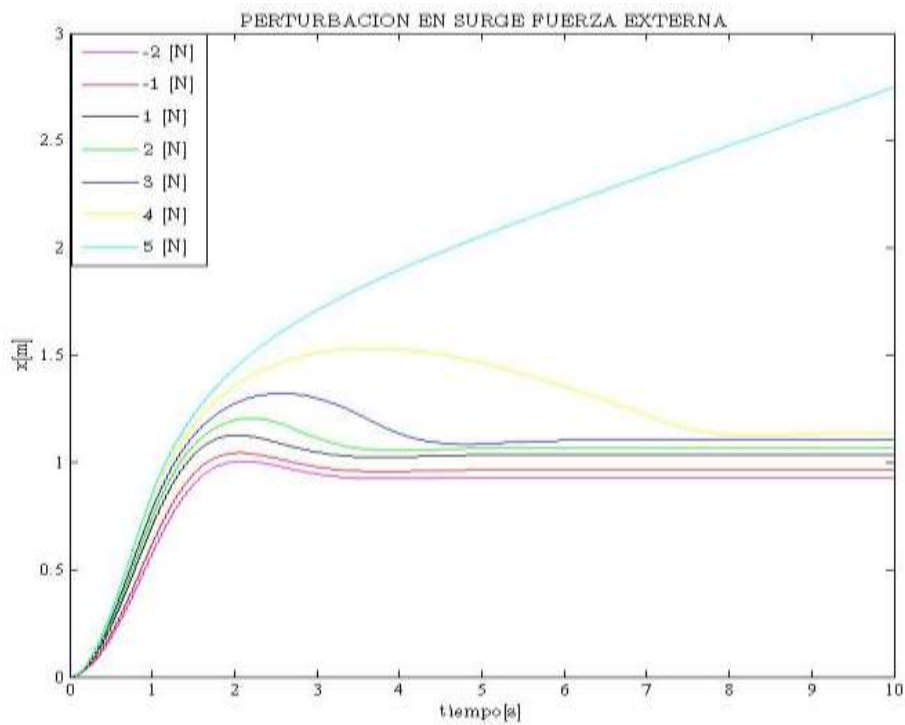


Figura 27. Fuerzas Externas en *heave* Controlador PID.

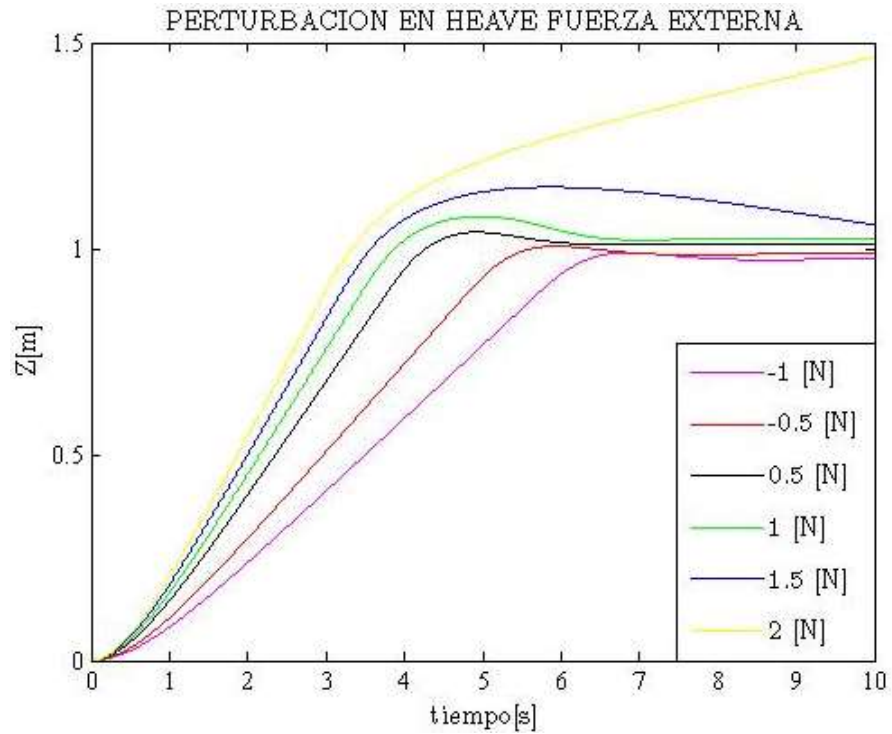
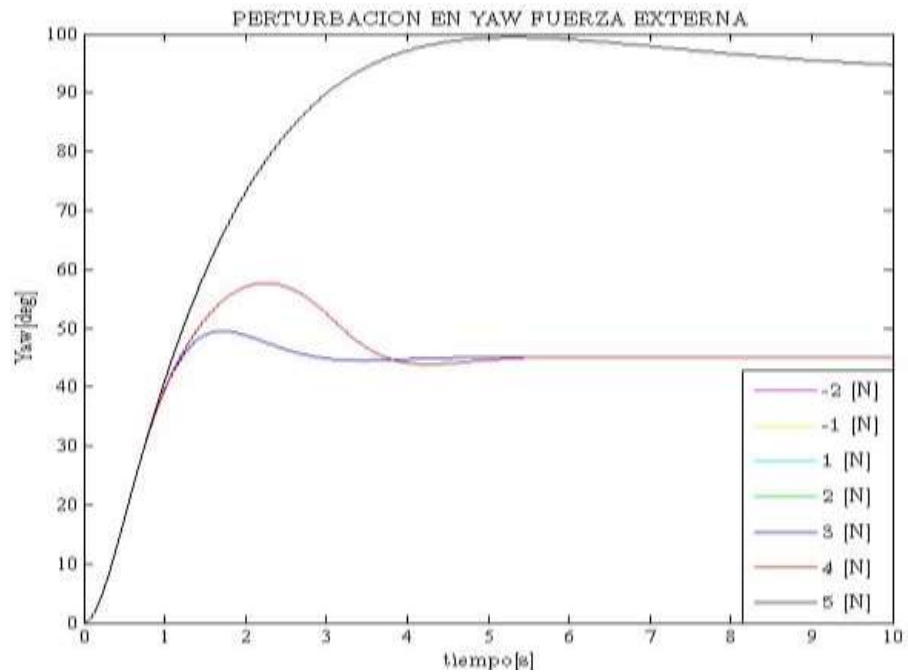


Figura 28. Fuerzas externas en *yaw* Controlador PID.



Los resultados de las simulaciones para el controlador *Backstepping* pueden verse en las Figuras 29, 30,31.

Figura 29. Fuerzas Externas en *surge* Controlador *Backstepping*.

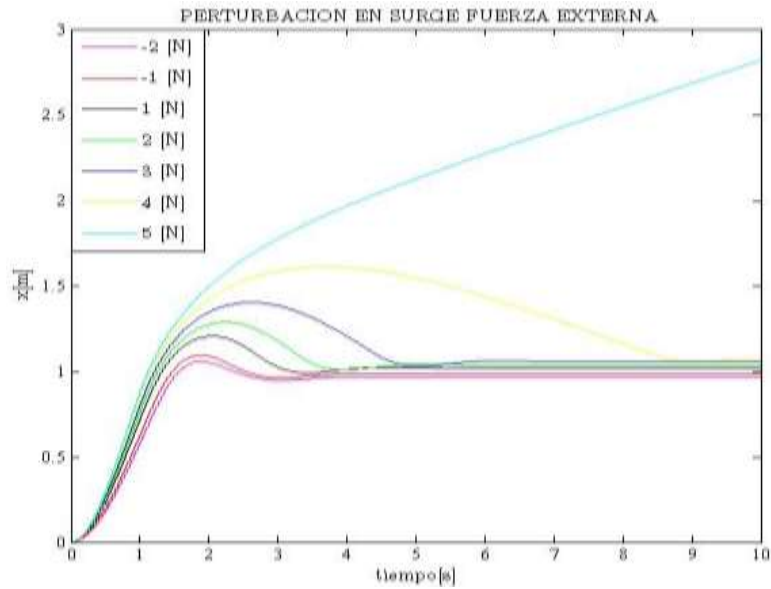


Figura 30. Fuerzas externas en *heave* Controlador *Backstepping*.

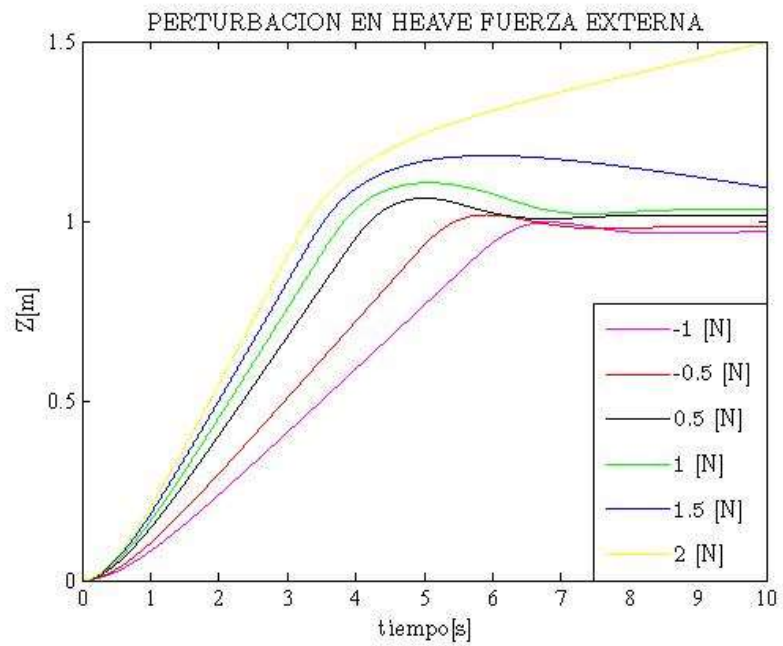
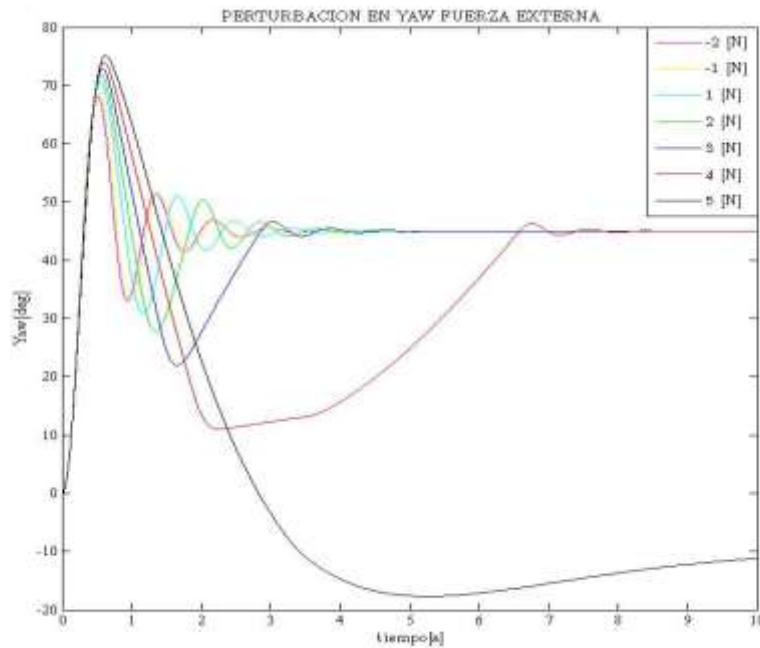




Figura 31. Fuerzas externas en yaw Controlador *Backstepping*.



## 5.4 Resultados Numéricos

### 5.4.1 Índices de Desempeño

Utilizando como criterio de desempeño para los controladores diseñados los índices ISE, IAE, ITAE e ISU los cuales están definidos como [15][16]:

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (69)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (70)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t * e(t) dt \quad (71)$$

$$ISU = \int_0^{\infty} u(t)^2 dt \quad (72)$$

Donde,  $e$  es la señal de error y  $u$  es la señal de control de los controladores diseñados sin la presencia de perturbaciones.



Para iguales especificaciones de diseño en cada uno de los grados de libertad controlables se obtienen los resultados presentados en las tablas 1 a 3.

Tabla 1. Índices controladores *surge*.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PID</b>	<b><i>BACKSTEPPING</i></b>
ISE	0.6210	0.6051
IAE	0.9134	0.9059
ITAE	0.6195	0.5639
ISU	362.99	819.36

Tabla 2. Índices controladores *heave*.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PID</b>	<b><i>BACKSTEPPING</i></b>
ISE	1.8783	1.8780
IAE	2.6570	2.6294
ITAE	4.5369	4.3576
ISU	384.64	1876.1

Tabla 3. Índices controladores *yaw*.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PID</b>	<b><i>BACKSTEPPING</i></b>
ISE	0.2772	0.1582
IAE	0.5653	0.4282
ITAE	0.3573	0.2962
ISU	0.11	1.7442



Universidad  
Industrial de  
Santander

### 5.4.2 Error de Seguimiento

Observando el valor final de la trayectoria deseada y la trayectoria seguida con el controlador *Backstepping* se llegó en cada grado de libertad a:

*Surge*,

$$\%Error = \frac{1 - 0.98}{1} * 100 = 2\% \quad (73)$$

*Heave*,

$$\%Error = \frac{1 - 1}{1} * 100 = 0\% \quad (74)$$

*yaw*,

$$\%Error = \frac{45 - 44}{45} * 100 = 2.22\% \quad (75)$$

Finalmente se obtuvo tener un error promedio al seguimiento de la trayectoria de:

$$\%Error \text{ promedio} = \frac{2.22 + 2 + 0}{3} = 1.4\% \quad (76)$$



## 6 CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se observó cómo los controladores diseñados, PID-Linealizador y *Backstepping*, efectivamente controlan la posición de cada uno de los grados de libertad controlables (*Surge*, *Heave*, *yaw*) del VideoRay PRO 3.

Además, se pudo observar como el controlador MIMO tipo *Backstepping* efectivamente sigue una trayectoria deseada con un error de seguimiento muy pequeño, inferior al 2%.

De acuerdo con los índices ISE, IAE, ITAE calculados, el controlador *Backstepping* diseñado presenta un mejor desempeño para cada uno de los grados de libertad controlables del VideoRay PRO3 con respecto al controlador PID diseñado.

En términos del esfuerzo de control se encontró que el controlador *Backstepping* exige un mayor esfuerzo de control, es decir, un mayor gasto energético. Sin embargo para el sistema en mención, VideoRay PRO3, no existe una limitación en la potencia de la señal de control ya que este es un sistema con fuente de alimentación externa, por medio de un cordón umbilical.

Tanto el controlador PD + bloque linealizador, como el controlador *Backstepping*, son robustos a las perturbaciones ejercidas por las corrientes marinas con velocidades entre 0.1 m/s y 0.5 m/s. En cuanto a las perturbaciones ejercidas por fuerzas externas en los grados de libertad *surge* y *yaw*, los dos tipos de controladores son robustos ante fuerzas inferiores a 4 [N], mientras que, en el grado de libertad *heave* lo son hasta 1.5 [N]. Con fuerzas externas superiores el sistema presenta una respuesta inestable.



## 7 CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] H. K. Khalil. Nonlinear Systems. Prentice-Hall, 2nd edition, 1996.
- [2] Martínez Viviana, “Planteamiento de la arquitectura computacional e instrumentación para la navegación inercial asistida de un vehículo operado remotamente “Maestría en ingeniería electrónica, Escuela de ingenierías eléctrica electrónica y de telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2012.
- [3] Kangwu Zhu, LinyiGu, “A MIMO Nonlinear Robust Controller for Work-Class ROVs Positioning and Trajectory Tracking Control”. Chinese Control and Decision Conference, 2011.
- [4] Seron Maria Martha, “Sistemas No Lineales, Notas de Clase”, Universidad Nacional de Rosario. Primer cuatrimestre del 2000.
- [5] García Daniel, Ricardo Morales, Nicolás García, “Efectos de la no Linealidad del modelo Dinámico en el Control de un Robot Submarino”.
- [6] Chanop Silpa-Anan. “Autonomous Underwater Robot: Vision and Control”. Master’s thesis. Australian National University, February 2001.
- [7] Louis Andrew Gonzalez. Design, Modelling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle. Thesis. University of Western Australia, 2004.
- [8] Ogata, Katsuhiko. Ingenieria De Control Moderna. 4ta Ed. Madrid: Prentice Hall. Págs. 965, 2003.



[9] Richard C. Dorf & Robert H. Bishop. *Sistemas de Control Moderno*, 10ma Edición – 1999.

[10] Krstić M., Sun J., and Kokotović V., (1996). Robust control of nonlinear systems with input unmodeled dynamics. En: *IEEE Transaction on Automatic Control*. Vol. 41 (6), pp. 913-920.

[11] Mosquera Leyton, Víctor Hugo; Vivas Albán, Óscar Andrés. *Control Backstepping De Un Robot Scara Con Incertidumbre Paramétrica*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 22, núm. 1, junio, 2012, pp. 107-122. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia

[12] W. Wang and C. Clark, “Modeling and simulation of the videoray pro III underwater vehicle,” in *OCEANS 2006-Asias Pacific*, 2006.

[13] Spong M., (1992). On the robust control of robot manipulators. En: *IEEE Transaction on Automatic Control*. Vol. 37 (11), pp. 668-672.

[14] Burkan R., and Uzmay I., (2005). Logarithmic based robust control approach to parametric uncertainty for control of robot manipulators, En: *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. Vol. 15 (10), pp. 427 - 436.

[15] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, *Modern Control Systems 10th Edition*, Pearson Prentice Hall, 2005.

[16] O’ Dwyer, A., *The Estimation and Compensation of Processes with Time Delays*, Ph.D. Thesis, School of Electronic Engineering, Dublin City University, 1996.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

BURKAN R., and UZMAY I., (2005). Logarithmic based robust control approach to parametric uncertainty for control of robot manipulators, En: *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. Vol. 15 (10), pp. 427 - 436.

CHANOP Silpa-Anan. “Autonomous Underwater Robot: Vision and Control”. Master’s thesis. Australian National University, February 2001.

GARCÍA Daniel, Ricardo Morales, Nicolás García, “Efectos de la no Linealidad del modelo Dinámico en el Control de un Robot Submarino”.

GONZALEZ Louis Andrew. *Design, Modelling and Control of an Autonomous Underwater Vehicle*. Thesis. University of Western Australia, 2004.

KANGWU Zhu, LINYIGU, “A MIMO Nonlinear Robust Controller for Work-Class ROVs Positioning and Trajectory Tracking Control”. *Chinese Control and Decision Conference*, 2011.

KHALIL H. K. *Nonlinear Systems*. New York: Prentice-Hall, 2nd edition, 1996.

KRSTIĆ M., SUN J., and KOKOTOVIĆ V., (1996). Robust control of nonlinear systems with input unmodeled dynamics. En: *IEEE Transaction on Automatic Control*. Vol. 41 (6), pp. 913-920.

MARTÍNEZ Viviana, “Planteamiento de la arquitectura computacional e instrumentación para la navegación inercial asistida de un vehículo operado remotamente “Maestría en ingeniería electrónica, Escuela de ingenierías eléctrica electrónica y de telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2012.



MOSQUERA Leyton, Víctor Hugo; Vivas Albán, Óscar Andrés. Control *Backstepping* De Un Robot Scara Con Incertidumbre Paramétrica. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 22, núm. 1, junio, 2012, pp. 107-122. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia

O' DWYER, A., The Estimation and Compensation of Processes with Time Delays, Ph.D. Thesis, School of Electronic Engineering, Dublin City University, 1996.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería De Control Moderna. 4ta Ed. Madrid: Prentice Hall. Págs. 965, 2003.

RICHARD C. Dorf & Robert H. Bishop. Sistemas de Control Moderno, 10ma Edición – 1999.

RICHARD C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern Control Systems 10th Edition, Pearson Prentice Hall, 2005.

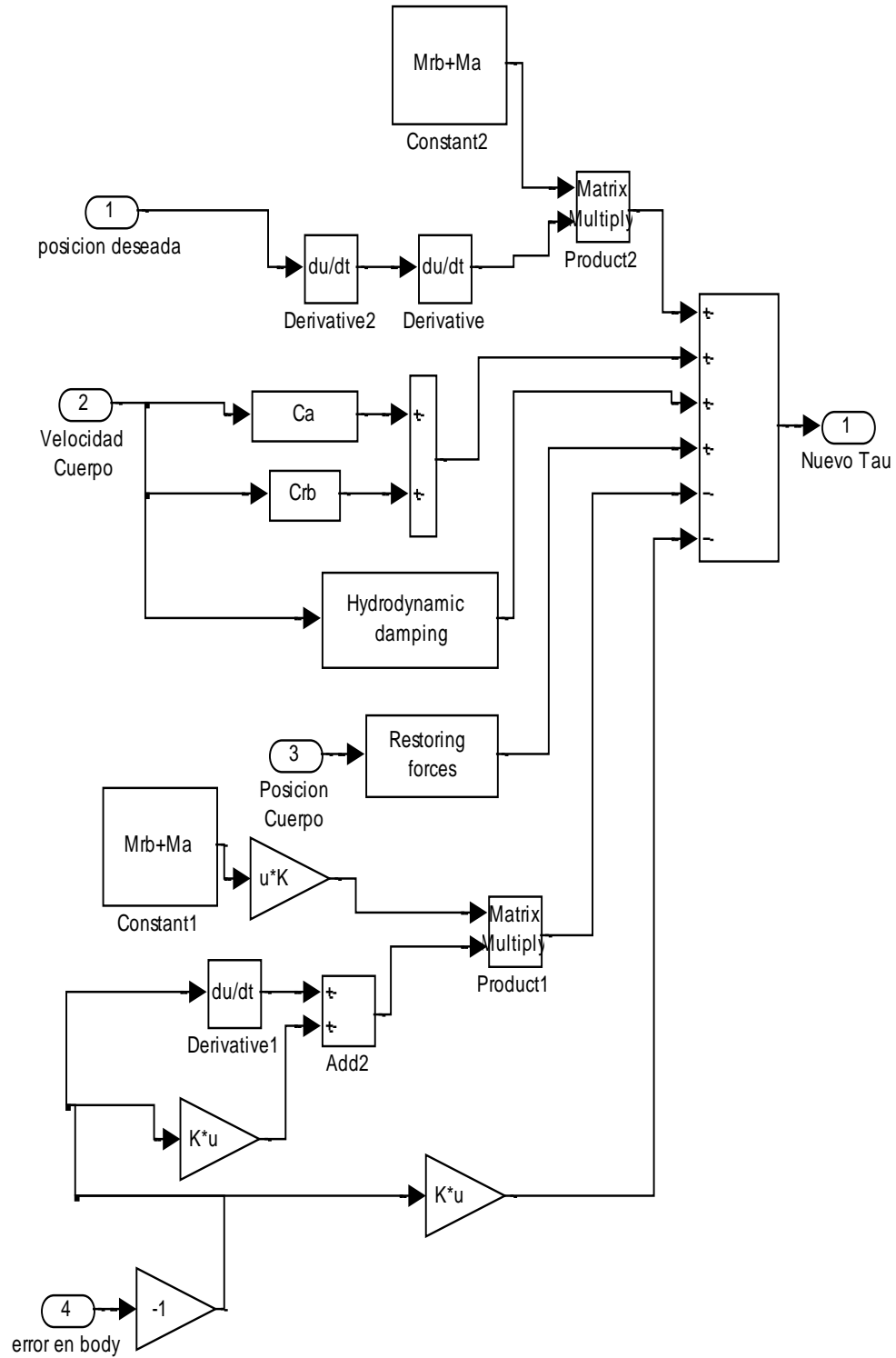
SERON Maria Martha, “Sistemas No Lineales, Notas de Clase”, Universidad Nacional de Rosario. Primer cuatrimestre del 2000.

SPONG M., (1992). On the robust control of robot manipulators. En: IEEE Transaction on Automatic Control. Vol. 37 (11), pp. 668-672.

W. WANG and C. CLARK, “Modeling and simulation of the videoray pro III underwater vehicle,” in OCEANS 2006-Asias Pacific, 2006.



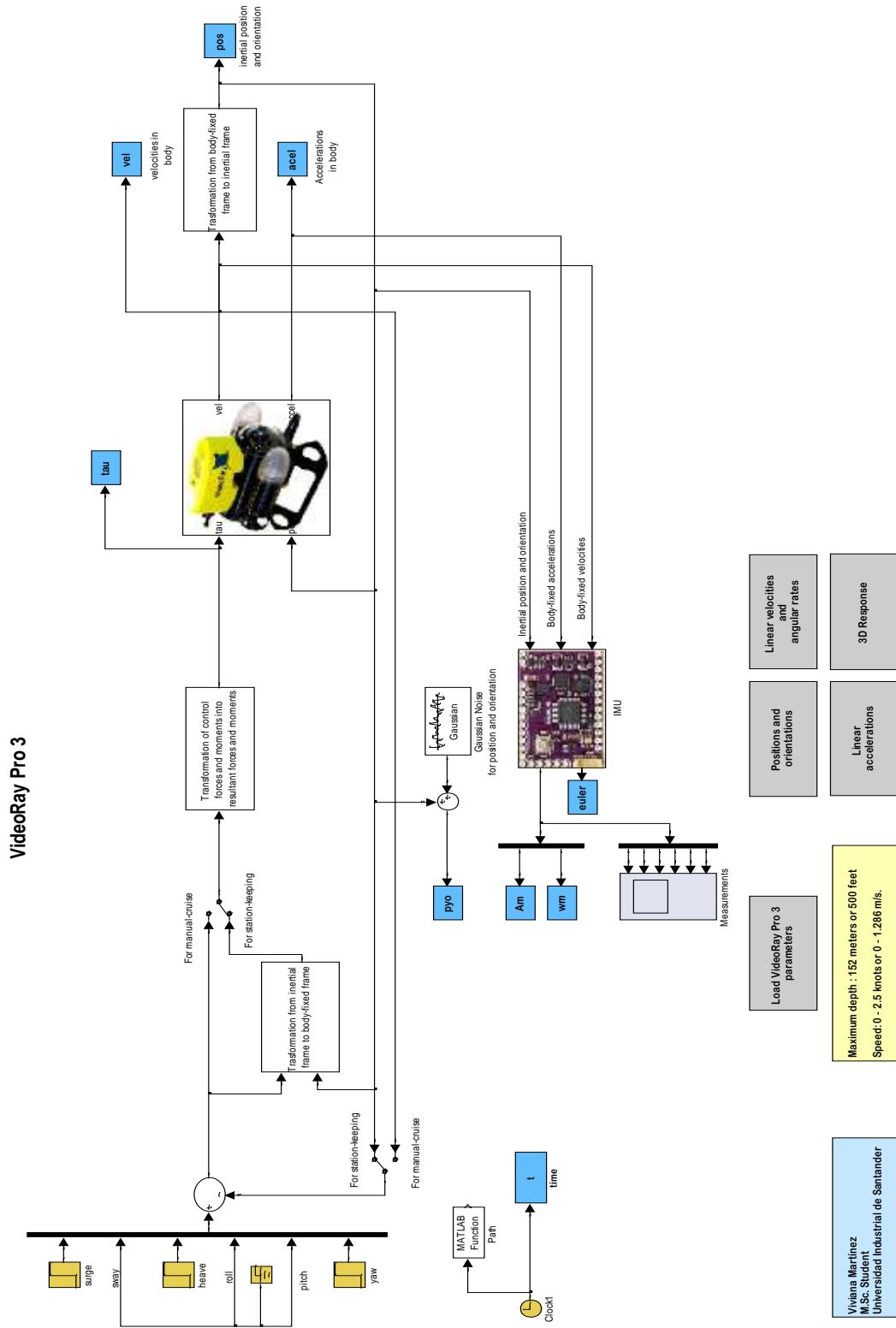
Anexo C. Diagrama de Bloques Controlador Backstepping.



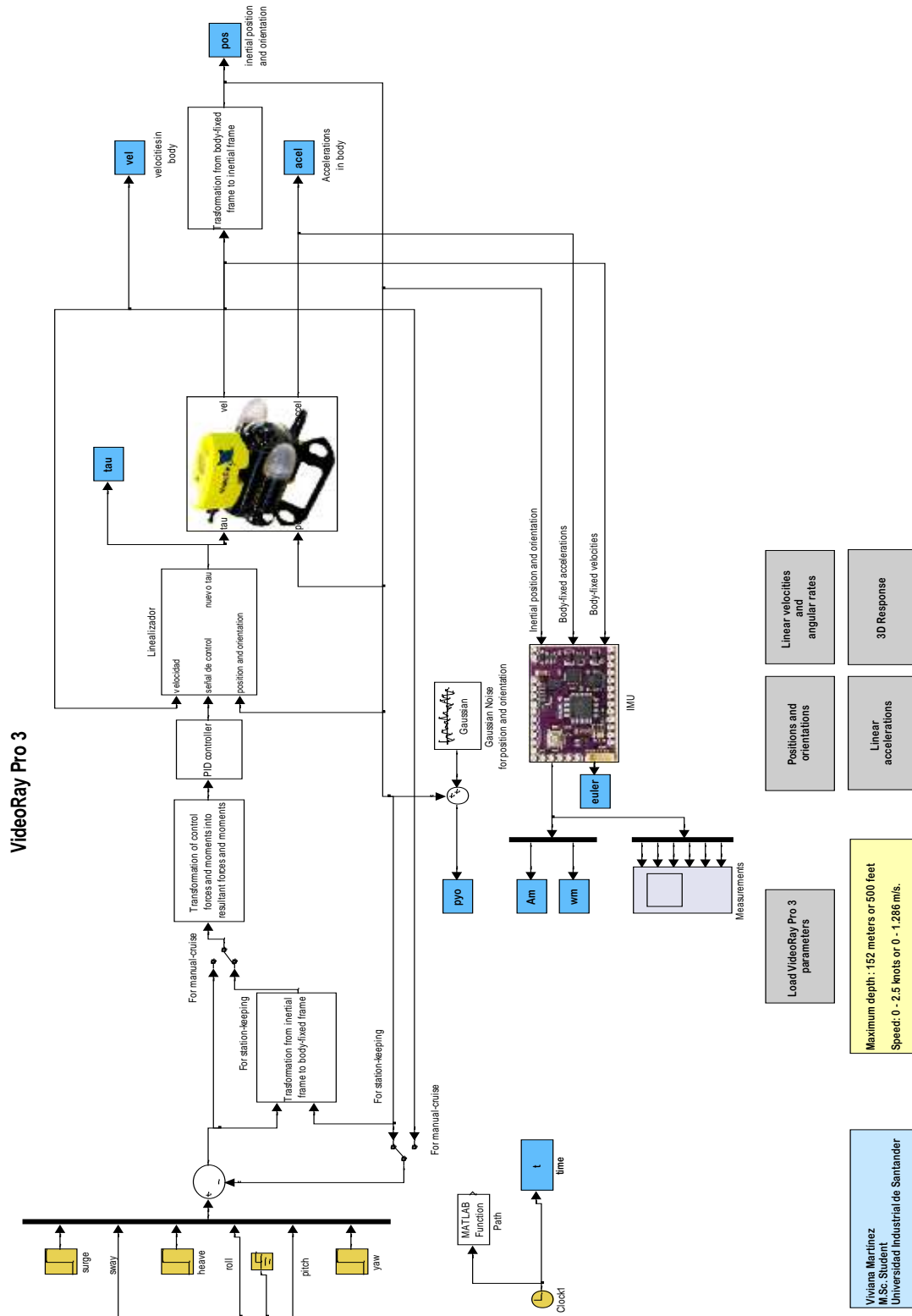


Universidad Industrial de Santander

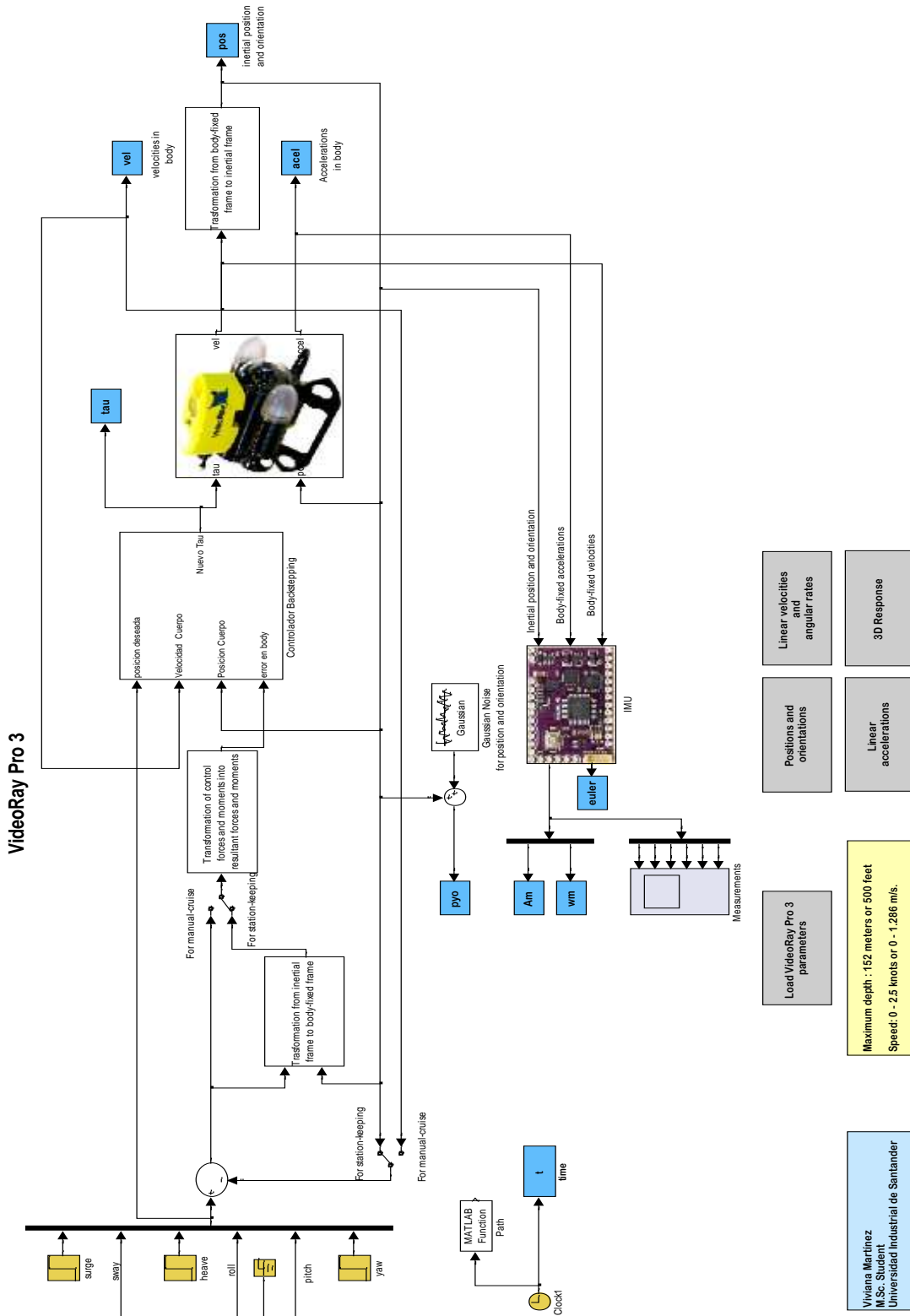
Anexo D. Simulador VideoRay PRO 3



Anexo E. Simulador Controlador PID-Linealizador



Anexo F. Simulador Controlador Backstepping.





Universidad  
Industrial de  
Santander

## Anexo G. Controlador.m

```
function [P,I,D] = controlador(ts,sp)
%CONTROLADOR Summary of this function goes here
% Funcion controlador la cual recibe los parametros de ts, tiempo de
% establecimiento, y sp, sobrepico.
% Detailed explanation goes here
zita=sqrt((log(sp))^2/((pi)^2+(log(sp))^2));
wn=4/(zita*ts);
wd=wn*sqrt(1-(zita)^2);
polo1=4/ts+j*wd;
polo2=4/ts-j*wd;
pd=[polo1 polo2];
s=tf('s');
system=1/s/s;
polos=pole(system);
if polos'==pd
    P=1;
    I=0;
    D=0;
else
s=polo1; system=1/(s^2); mag=abs(system);
phase=atand(imag(system)/real(system));
alfa=(imag(s)/(tand(-phase))-real(s));
a=abs((s+alfa)*system);
ma=1/a;
P=-ma*alfa; D=ma; I=0;
end
end
```