

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Análisis de configuración de propulsores para el
posicionamiento dinámico de un vehículo marino de
superficie

Autor: Marta Salvago Ocete

Tutor: Ángel Rodríguez Castaño

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Análisis de configuración de propulsores para el posicionamiento dinámico de un vehículo marino de superficie

Autor:

Marta Salvago Ocete

Tutor:

Ángel Rodríguez Castaño

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Grado: Análisis de configuración de propulsores para el posicionamiento dinámico de un vehículo marino de superficie

Autor: Marta Salvago Ocete

Tutor: Ángel Rodríguez Castaño

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron tanto a crecer como persona como a alcanzar mis logros. A mi familia, amigos y mi equipo, por estar siempre cuando fue necesario.

Gracias.

Resumen

Este proyecto que se muestra a continuación describe el proceso llevado a cabo para dar solución al problema de Thruster Allocation para Posicionamiento Dinámico en navíos. Para ello, se ha procedido a aplicar distintos algoritmos en diversos escenarios repetidas veces, con intención de averiguar cuál de ellos proporciona una solución más eficiente en cuanto a precisión en alcanzar las fuerzas demandadas, el ruido rechazado, el consumo del combustible y la fatiga de empuje y ángulo de los propulsores.

Abstract

This project describes the process of solving the problem of Thruster Allocation for Dynamic Positioning in marine vessels. To solve it, some different algorithms have been applied in various simulations on different scenes, with the intention of discovering which solution gives better results related to accuracy, rejected noise, fuel consumption and fatigue.

Índice

Agradecimientos	19
Resumen	21
Abstract	23
Índice	24
Índice de Tablas	26
Índice de Figuras	28
1 Introducción	32
1.1 <i>Objetivos</i>	32
1.2 <i>Antecedentes</i>	32
1.3 <i>Metodología</i>	33
1.4 <i>Organización de la memoria</i>	34
1.5 <i>Grados de libertad de un buque</i>	34
1.6 <i>Tipos de actuadores de un buque</i>	35
1.7 <i>Singularidades</i>	35
2 Modelo del barco y configuración de propulsores	37
2.1 <i>Modelo del barco</i>	37
2.2 <i>Modelo de los actuadores</i>	38
2.3 <i>Matriz de configuración para el modelo M1</i>	38
2.4 <i>Matriz de configuración extendida para el modelo M1</i>	39
2.5 <i>Limitación de fuerzas y pares aplicables</i>	40
2.6 <i>Representación de fuerzas alcanzables</i>	41
2.7 <i>Representación de valores singulares</i>	47
3 Distribución de fuerzas en propulsores	50
3.1 <i>Planteamiento del problema</i>	50
3.2 <i>Azimutales constantes</i>	51
3.3 <i>Azimutales variables</i>	52
4 Resultado y simulaciones	54
4.1 <i>Resultados para α constante</i>	54
4.1.1 <i>Test consigna</i>	55
4.1.2 <i>Escenario 1</i>	57
4.1.3 <i>Escenario 2</i>	60
4.2 <i>Resultados para α variable</i>	62
4.2.1 <i>Test consigna</i>	63
4.2.2 <i>Escenario 1</i>	70
4.2.3 <i>Escenario 2</i>	77
4.3 <i>Resultados para solución mixta</i>	84
4.3.1 <i>Test consigna</i>	84
4.3.2 <i>Escenario 1</i>	91

4.3.3	Escenario 2	98
4.4	<i>Comparativa</i>	105
4.4.1	Test consigna	105
4.4.2	Escenario 1	107
4.4.3	Escenario 2	109
5	Conclusiones	112
	Referencias	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Definición de actuadores y variables de control	35
Tabla 2–1. Ubicación de los propulsores	37
Tabla 4–1. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida	105
Tabla 4–2. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s	105
Tabla 4–3. Resultados evaluador para Test Consigna	106
Tabla 4–4. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida	107
Tabla 4–5. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s	107
Tabla 4–6. Resultados evaluador para Escenario 1	108
Tabla 4–7. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida	109
Tabla 4–8. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s	109
Tabla 4–9. Resultados evaluador para Escenario 2	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de control de un sistema de Posicionamiento Dinámico	33
Figura 1-2. Grados de libertad de un buque	34
Figura 1-3. Grados de libertad en cada plano de un buque	35
Figura 2-1. Distribución de los propulsores en el buque	37
Figura 2-2. Soluciones para $M = 20e6$	42
Figura 2-3. Soluciones para $M = 15e6$	43
Figura 2-4. Soluciones para $M = 10e6$	43
Figura 2-5. Soluciones para $M = 5e6$	44
Figura 2-6. Soluciones para $M = 0$	45
Figura 2-7. Soluciones para $M = -5e6$	45
Figura 2-8. Soluciones para $M = -10e6$	46
Figura 2-9. Soluciones para $M = -15e6$	47
Figura 2-10. Representación de valores singulares	47
Figura 2-11. Representación de valores singulares	48
Figura 2-12. Representación de valores singulares	49
Figura 4-1. Referencia frente a posición y rumbo	55
Figura 4-2. Error de posición y rumbo	55
Figura 4-3. Fuerzas y momentos	56
Figura 4-4. RPM y ángulos de los azimutales	57
Figura 4-5. Referencia frente a posición y rumbo	57
Figura 4-6. Error de posición y rumbo	58
Figura 4-7. Fuerzas y momentos	58
Figura 4-8. RPM y ángulos de los azimutales	59
Figura 4-9. Referencia frente a posición y rumbo	60
Figura 4-10. Error de posición y rumbo	61
Figura 4-11. Fuerzas y momentos	61
Figura 4-12. RPM y ángulos de los azimutales	62
Figura 4-13. Configuración propulsores azimutales	62
Figura 4-14. Referencia frente a posición y rumbo	63
Figura 4-15. Error de posición y rumbo	63
Figura 4-16. Fuerzas y momentos	64
Figura 4-17. RPM y ángulos de los azimutales	65
Figura 4-18. Referencia frente a posición y rumbo	65

Figura 4-19. Error de posición y rumbo	66
Figura 4-20. Fuerzas y momentos	66
Figura 4-21. RPM y ángulos de los azimutales	67
Figura 4-22. Referencia frente a posición y rumbo	68
Figura 4-23. Error de posición y rumbo	68
Figura 4-24. Fuerzas y momentos	69
Figura 4-25. RPM y ángulos de los azimutales	69
Figura 4-26. Referencia frente a posición y rumbo	70
Figura 4-27. Error de posición y rumbo	71
Figura 4-28. Fuerzas y momentos	71
Figura 4-29. RPM y ángulos de los azimutales	72
Figura 4-30. Referencia frente a posición y rumbo	73
Figura 4-31. Error de posición y rumbo	73
Figura 4-32. Fuerzas y momentos	74
Figura 4-33. RPM y ángulos de los azimutales	74
Figura 4-34. Referencia frente a posición y rumbo	75
Figura 4-35. Error de posición y rumbo	75
Figura 4-36. Fuerzas y momentos	76
Figura 4-37. RPM y ángulos de los azimutales	77
Figura 4-38. Referencia frente a posición y rumbo	77
Figura 4-39. Error de posición y rumbo	78
Figura 4-40. Fuerzas y momentos	78
Figura 4-41. RPM y ángulos de los azimutales	79
Figura 4-42. Referencia frente a posición y rumbo	80
Figura 4-43. Error de posición y rumbo	80
Figura 4-44. Fuerzas y momentos	81
Figura 4-45. RPM y ángulos de los azimutales	81
Figura 4-46. Referencia frente a posición y rumbo	82
Figura 4-47. Error de posición y rumbo	83
Figura 4-48. Fuerzas y momentos	83
Figura 4-49. RPM y ángulos de los azimutales	84
Figura 4-50. Referencia frente a posición y rumbo	84
Figura 4-51. Error de posición y rumbo	85
Figura 4-52. Fuerzas y momentos	85
Figura 4-53. RPM y ángulos de los azimutales	86
Figura 4-54. Referencia frente a posición y rumbo	87
Figura 4-55. Error de posición y rumbo	87
Figura 4-56. Fuerzas y momentos	88
Figura 4-57. RPM y ángulos de los azimutales	88

Figura 4-58. Referencia frente a posición y rumbo	89
Figura 4-59. Error de posición y rumbo	89
Figura 4-60. Fuerzas y momentos	90
Figura 4-61. RPM y ángulos de los azimutales	91
Figura 4-62. Referencia frente a posición y rumbo	91
Figura 4-63. Error de posición y rumbo	92
Figura 4-64. Fuerzas y momentos	92
Figura 4-65. RPM y ángulos de los azimutales	93
Figura 4-66. Referencia frente a posición y rumbo	94
Figura 4-67. Error de posición y rumbo	94
Figura 4-68. Fuerzas y momentos	95
Figura 4-69. RPM y ángulos de los azimutales	95
Figura 4-70. Referencia frente a posición y rumbo	96
Figura 4-71. Error de posición y rumbo	97
Figura 4-72. Fuerzas y momentos	97
Figura 4-73. RPM y ángulos de los azimutales	98
Figura 4-74. Referencia frente a posición y rumbo	98
Figura 4-75. Error de posición y rumbo	99
Figura 4-76. Fuerzas y momentos	99
Figura 4-77. RPM y ángulos de los azimutales	100
Figura 4-78. Referencia frente a posición y rumbo	101
Figura 4-79. Error de posición y rumbo	101
Figura 4-80. Fuerzas y momentos	102
Figura 4-81. RPM y ángulos de los azimutales	102
Figura 4-82. Referencia frente a posición y rumbo	103
Figura 4-83. Error de posición y rumbo	103
Figura 4-84. Fuerzas y momentos	104
Figura 4-85. RPM y ángulos de los azimutales	105

1 INTRODUCCIÓN

EL objetivo de este proyecto es, haciendo uso de diversos métodos de control, dar solución al problema del Posicionamiento Dinámico mediante algoritmos de asignación de control (Control Allocation). Es decir, dadas unas fuerzas exigidas (F_x , F_y y M), saber qué fuerzas hay que aplicar de manera óptima en cada propulsor y cómo distribuir las para acercarnos lo máximo posible a los valores exigidos.

Es necesario mencionar que se trata de un problema en el que tenemos más grados de libertad que ecuaciones: los propulsores de túnel, que se tomarán como una sola fuerza, más cada propulsor azimutal y su ángulo, suman un total de 5 grados de libertad. Por otro lado, se tienen tres ecuaciones, las del vector tau (F_x , F_y y M). En problemas de este tipo, se obtienen múltiples soluciones, y hay que escoger una de ellas. Esto es de lo que se encarga el Control Allocation, de todas las soluciones posibles, escoger la distribución más óptima según unos criterios. En este caso, es importante destacar que vamos a realizar el control del modelo en 2 dimensiones.

Para dar solución a dicho problema, se va a hacer uso de 3 métodos distintos de control, y se observará para cada método, cuanto se acerca el resultado que proporciona el algoritmo de control a los valores de F_x , F_y y M requeridos previamente, y también se considerarán otros factores, como la fatiga en el empuje y ángulo o el consumo de los propulsores.

1.1 Objetivos

Es importante destacar que se está trabajando con un sistema sobreactuado, es decir, hay más grados de libertad que variables sobre las que actuar. Los grados de libertad con los que se cuenta son cada uno de los propulsores de túnel, más los dos propulsores azimutales con sus respectivos ángulos. Sin embargo, como ecuaciones solo se tienen las 3 del vector de fuerzas tau.

El método que se va a aplicar se utiliza para el problema de Posicionamiento Dinámico, el cual consiste en mantener la posición y rumbo de un barco, haciendo uso de sus sistemas de propulsión. El objetivo es, que haciendo uso del Thruster Allocation, se asignen las fuerzas demandadas por el sistema de control a cada propulsor de manera eficiente. El concepto de eficiencia se puede abordar de dos formas distintas: la eficiencia en cuanto a un consumo de combustible eficiente o la eficiencia en cuanto a la precisión. Cuando se exige a los propulsores que proporcionen fuerzas muy elevadas, el consumo de combustible crece considerablemente, por lo que se busca repartir esa distribución de fuerzas. Por otra parte, hay que considerar la eficiencia en cuanto a la precisión del posicionamiento del barco. En el método que se va a proponer en los apartados posteriores, se mostrará que es configurable el objetivo de eficiencia entre ambos.

1.2 Antecedentes

Dyanime Positioning (DP) o Posicionamiento Dinámico es una técnica usada en el ámbito marítimo cuyo principal objetivo es el de mantener el buque, equipado con tecnología DP, en una posición exacta mediante hélices, propulsores y demás sistemas.

El sistema de posicionamiento dinámico vio la luz en la década de los años '60, pero no fue hasta finales de los '70 y principios de los '80 cuando empezó a utilizarse con frecuencia. En la actualidad, el posicionamiento dinámico se utiliza en buques y plataformas offshore.

En la práctica un barco no puede mantener una posición completamente estática en el mar y mantener la posición deseada, lo que refleja los límites de la capacidad del sistema. Por eso un sistema de Posicionamiento Dinámico eficiente es aquel que alcanza estas metas con el mínimo consumo de carburantes y que tolera diversos tipos de errores

Es importante recalcar la diferencia entre el Posicionamiento Dinámico y el seguimiento de trayectorias, puesto que este último se encarga de distribuir la fuerza entre los propulsores del navío mediante algoritmos de control, con objetivo de realizar una trayectoria determinada previamente. Este hecho implica que el modelo de comportamiento dinámico del barco es distinto para Posicionamiento Dinámico y para seguimiento de trayectorias a causa de la hidrodinámica. Es decir, el buque se verá afectado de manera distinta por el agua a bajas velocidades (DP) que a velocidades más elevadas siguiendo una trayectoria determinada (seguimiento de trayectorias).

Se muestra a continuación el diagrama de bloques del sistema de control para un buque.

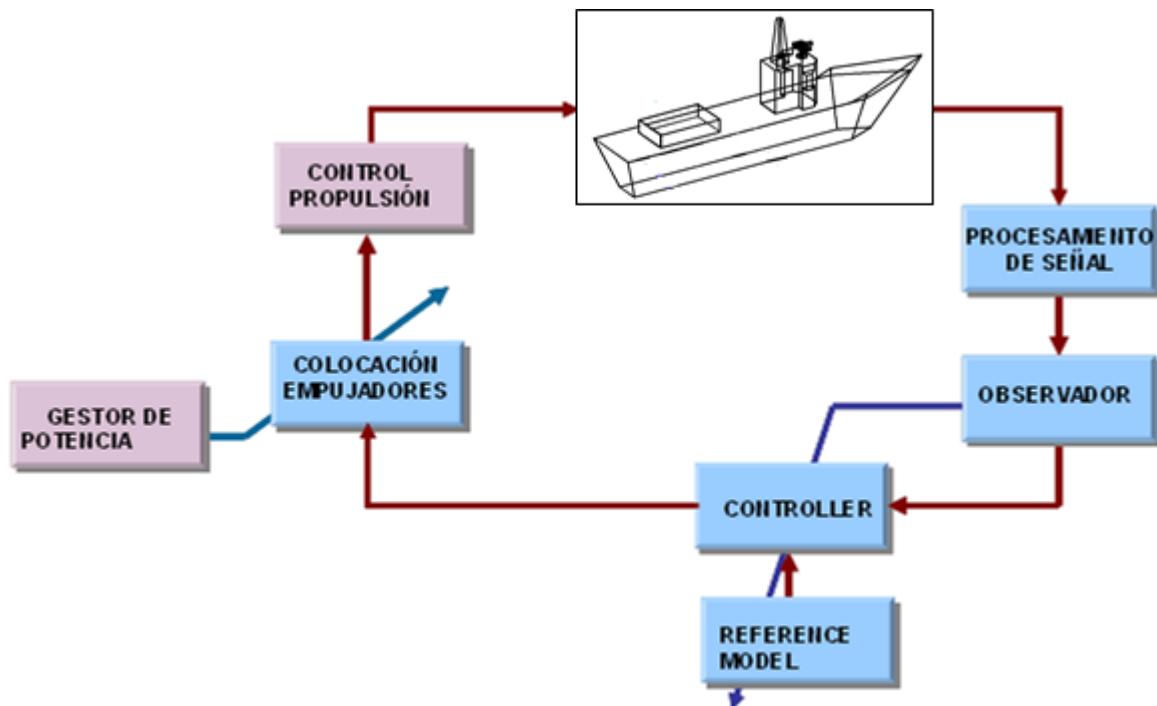


Figura 1-1. Esquema de control de un sistema de Posicionamiento Dinámico.

Tanto el bloque de gestor de potencia como el de control de propulsión no van a ser utilizados en este proyecto, puesto que ambos se encuentran ya presentes dentro del simulador. No se va a hacer uso del control de propulsión puesto que se considera que las rpm de los propulsores tienen una dinámica de primer orden.

Todos los detalles del modelo necesarios para el desarrollo del proyecto se encuentran en el capítulo 2 sección 1 del mismo.

1.3 Metodología

Para la resolución del problema que abarca este proyecto se ha seguido el siguiente procedimiento. En primer lugar, se ha realizado un estudio analítico del problema, estudiando el modelo del buque, de los actuadores y las restricciones de las fuerzas.

Tras el estudio analítico del problema, se ha trabajado en el entorno de trabajo Matlab y Simulink, en los que se han programado los distintos algoritmos para cada solución propuesta. Posteriormente, se ha trabajado con el simulador, en el cual se han realizado numerosas simulaciones para el estudio de los casos propuestos.

Por último, se ha procedido a hacer el análisis de los resultados, haciendo una comparativa de ellos para concluir cuál de las soluciones propuestas ofrece mejores resultados dependiendo de distintos criterios.

1.4 Organización de la memoria

La memoria se ha organizado en 6 apartados. El primer apartado es de carácter introductorio, en el segundo apartado se trata el modelado del buque y de los actuadores. En el tercer apartado se desarrolla el planteamiento del problema de manera analítica. Posteriormente en el cuarto apartado se muestran las simulaciones y los resultados obtenidos, de los que luego se sacarán las conclusiones, que están explicadas en el quinto apartado. Por último, el sexto apartado se corresponde con las referencias bibliográficas.

1.5 Grados de libertad de un buque

Una estructura flotante, en este caso, un buque, puede ser considerado como un sólido que está sometido a 6 grados de movimiento: 3 de traslación y 3 de rotación, como se muestra en las figuras 1-2 y 1-3.

- Movimientos de traslación:
 - En el plano horizontal, movimiento de avance-retroceso, también conocido como deriva longitudinal o surge.
 - En el plano transversal, babor estribor, también conocido como deriva lateral o sway.
 - En el plano vertical, movimiento de elevación-descenso, también conocido como heave.
- Movimientos de rotación:
 - Sobre la línea horizontal longitudinal, movimiento de balance o roll.
 - Sobre la línea horizontal transversal, movimiento de cabeceo o pitch.
 - Sobre la línea vertical, movimiento de guiñada o yaw.

Para el problema de la asignación de control para Posicionamiento Dinámico, los movimientos que se controlan son en el plano horizontal avance-retroceso (surge), guiñada (yaw) y desplazamiento lateral (sway). Por otra parte, el cabeceo, balance y elevación son movimientos que no pueden ser controlados por el Posicionamiento Dinámico.

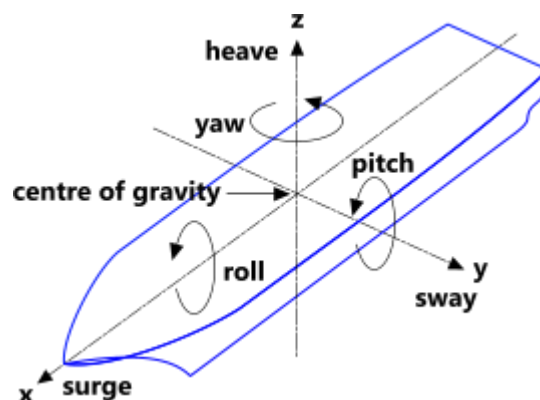


Figura 1-2. Grados de libertad en un buque.

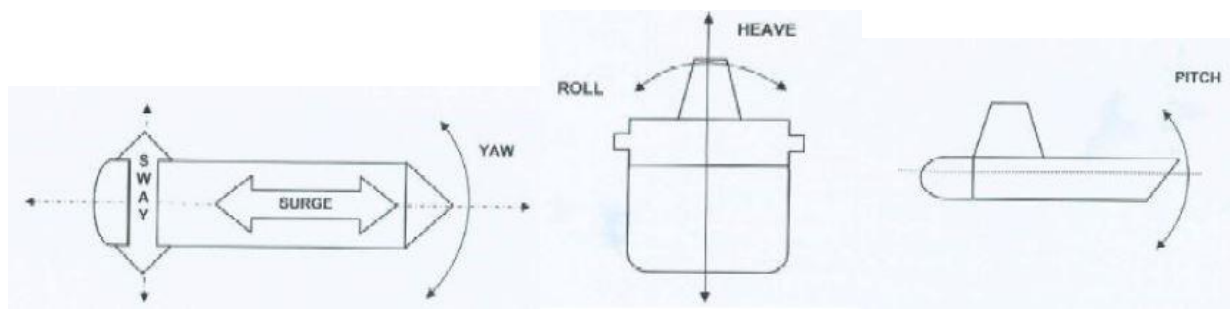


Figura 1-3. Grados de libertad en cada plano de un buque.

1.6 Tipos de actuadores de un buque

En buques, los actuadores más comunes son las hélices principales, los propulsores de túnel, los propulsores azimutales, timones de popa, estabilizadores, superficies de control y reactores de agua. Se adjunta una tabla con los tipos de actuadores y las variables que controlan:

Tabla 1-1. Definición de actuadores y variables de control.

Actuador	u (variable de control)	α (variable de control)	f^T (vector de fuerzas)
Hélices principales (longitudinal)	Pitch y rpm	-	$[F, 0, 0]$
Propulsores de túnel (transversal)	Pitch y rpm	-	$[0, F, 0]$
Propulsores azimutales	Pitch y rpm	Ángulo	$[F\cos\alpha, F\sin\alpha, 0]$
Timones de popa	Ángulo	-	$[0, F, 0]$
Estabilizadores	Ángulo	-	$[0, 0, F]$

En el buque en el se va a enfocar el proyecto, sólo utilizamos dos tipos de actuadores: los propulsores de túnel y los azimutales.

- Propulsores de túnel: Son propulsores transversales que van a través del casco del buque. El propulsor está montado dentro de un tubo transversal y produce una fuerza F_y en la dirección del eje y. Este tipo de actuador sólo es efectivo a velocidades bajas, lo que limita su uso a maniobras a velocidades bajas y posicionamiento dinámico.
- Propulsores azimutales: Son aquellos propulsores que pueden rotar un ángulo α alrededor del eje z y que producen fuerzas F_x y F_y . El uso de propulsores azimutales en posicionamiento dinámico es interesante puesto que este tipo de propulsores puede producir fuerzas en diferentes direcciones, conduciendo el problema a un problema de control sobreactuado que puede ser optimizado.

1.7 Singularidades

Aunque este proyecto no se va a centrar en el trato de las singularidades, es importante hacer una breve explicación de en qué consisten. Las configuraciones singulares implican que el vector de fuerzas demandadas τ , no puede ser alcanzado aplicando fuerzas finitas con los propulsores.

Estas configuraciones singulares se pueden analizar matemáticamente. Si se denota como $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]^T$ al vector de las direcciones de los propulsores azimutales, se puede observar que hay una relación entre el vector T de los propulsores y el vector τ :

$$A(\alpha)T = \tau \quad (1)$$

Donde A es la matriz que depende de las posiciones de los propulsores y es función de los ángulos de los azimutales. Los valores singulares de la matriz A pueden ser considerados como las ganancias del vector T de las fuerzas y momentos τ en algunas direcciones. Un valor singular equivalente a 0 implica que hay combinaciones de surge, sway y yaw que son imposibles de obtener.

2 MODELO DEL BARCO Y CONFIGURACIÓN DE PROPULSORES

Se va a proceder a mostrar el modelo del barco que se va a utilizar para el desarrollo del trabajo y las características del mismo, en concreto de los propulsores con los que cuenta el barco. En primer lugar, se dará una breve explicación sobre el buque sobre el que se va a trabajar.

2.1 Modelo del barco

El modelo M1 representa un buque de 3599 toneladas y 82 metros de eslora que cuenta con 5 actuadores: 2 propulsores azimutales (propulsores 1 y 2) y 3 propulsores transversales o de túnel (propulsores, 3, 4 y 5). La figura 2-1 muestra la distribución de los distintos actuadores dentro del buque

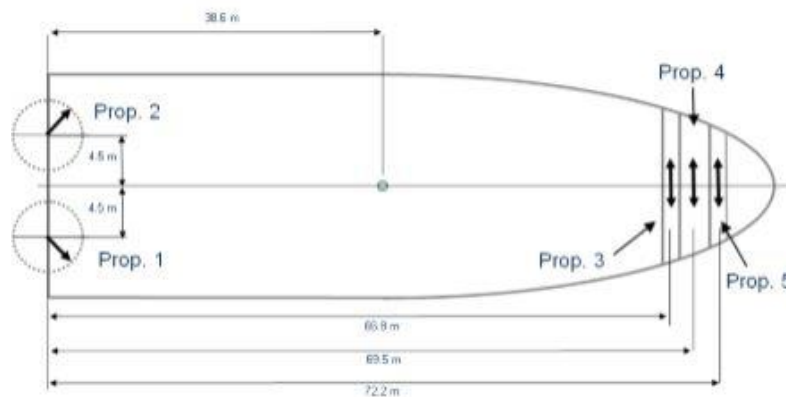


Figura 2-1. Distribución de los propulsores en el buque.

La posición de cada propulsor respecto al centro de gravedad del buque viene dada por la siguiente tabla

Tabla 2-1. Ubicación de los propulsores.

Propulsor	lx_i	ly_i
1	-38.6	4.5
2	-38.6	-4.5

3	28.2	-
4	30.9	-
5	33.6	-

Cada propulsor de túnel puede aplicar una fuerza máxima de 73330 N y una fuerza mínima de -50824 N. Por otro lado, los propulsores azimutales pueden proporcionar una fuerza máxima de 249800 N y una fuerza mínima de -173106 N.

En el caso de los propulsores de túnel, una vez se determine la fuerza a aplicar por dichos propulsores, esta se va a considerar como una única fuerza para facilitar los cálculos matriciales. Además, siempre se va a buscar mantener el máximo número de propulsores apagados, por lo que en caso de requerir una fuerza superior a la que puede proporcionar un único propulsor, se hará funcionar uno a máxima potencia y se irán encendiendo los siguientes en cascada según se requiera.

2.2 Modelo de los actuadores

Para este proyecto, se va a trabajar en Newtons en lugar de en RPM. Las fuerzas ejercidas por los propulsores $f = [u_1, \dots, u_n]^T$ se pueden expresar, suponiendo lineal su comportamiento, de la siguiente forma:

$$f = Ku \quad (2)$$

Donde $u = [u_1, \dots, u_n]^T$ es el vector de señales de entrada del actuador y K es la matriz diagonal de coeficientes de fuerzas dada por

$$K = \text{diag}[K_1, \dots, K_n], \quad K^{-1} = \text{diag}\left[\frac{1}{K_1}, \dots, \frac{1}{K_n}\right] \quad (3)$$

La fuerza ejercida por los actuadores se relaciona con la fuerza y momento aplicado al buque por la siguiente ecuación:

$$\tau = T(\alpha)Ku \quad (4)$$

donde $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_p]^T \in R^p$ es el vector de ángulos de los propulsores azimutales y $T(\alpha) \in R^{n \times r}$ es la matriz de configuración de los propulsores. En un buque equipado con r actuadores para controlar n grados de libertad la matriz de configuración de propulsores describe la geometría y localización de los actuadores.

2.3 Matriz de configuración para el modelo M1

En un buque equipado tanto con propulsores azimutales como propulsores de túnel, la matriz de configuración de los propulsores se define como

$$T(\alpha) = [t_1, \dots, t_r] \quad (5)$$

Esta es la matriz de configuración que se emplea en el algoritmo de thruster allocation con ángulo fijo y se define en base a un conjunto de vectores columnas $t_i \in R^n$. En un sistema de 3 grados de libertad (*surge*, *sway*, *yaw*) como el del modelo M1 estos vectores toman la siguiente forma

$$\text{azimutales: } t_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \\ l_{xi}\sin\alpha_i - l_{yi}\cos\alpha_i \end{bmatrix} \text{ transversales } t_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ l_{xi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Y la matriz de configuración completa para el modelo M1 queda como

$$\tau = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} = T(\alpha_1, \alpha_2) \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T(\alpha_1, \alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 & 1 & 1 & 1 \\ l_{x1}\sin\alpha_1 - l_{y1}\cos\alpha_1 & l_{x2}\sin\alpha_2 - l_{y2}\cos\alpha_2 & l_{x3} & l_{x4} & l_{x5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

En el caso de aplicación del buque modelo M1, la matriz K se considera la matriz unidad, de forma que las fuerzas u que genere el sistema de thruster allocation serán posteriormente convertidas en RPM por un bloque específico.

2.4 Matriz de configuración extendida para el modelo M1

Para la resolución del problema de thruster allocation para ángulo variable, se va a utilizar una representación alternativa de la matriz de configuración mostrada en el apartado anterior: la matriz de configuración extendida. Dado que la matriz $T(\alpha)$ es no lineal en α se plantea un problema de optimización no lineal. Para evitar esto, se va a descomponer la fuerza de los propulsores azimutales en dos fuerzas, de esta manera, el sistema a optimizar sí es lineal. Si se consideran las fuerzas generadas por un propulsor azimutal en el plano esta descomposición queda

$$F_{xi} = F_i \cos\alpha_i = K_i u_i \cos\alpha_i \quad (9)$$

$$F_{yi} = F_i \sin\alpha_i = K_i u_i \sin\alpha_i \quad (10)$$

A continuación se definen las fuerzas y momentos aplicados al buque en función del vector de fuerzas extendido f_e

$$\tau = T_e f_e = T_e f_e u_e \quad (11)$$

De esta manera la matriz de configuración extendida de 3 grados de libertad para el buque modelo M1 es la siguiente

$$\tau = \begin{bmatrix} F_x^b \\ F_y^b \\ N \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{2x} \\ u_{2y} \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$u_{1x} = u_1 \cos \alpha_1 \quad (13)$$

$$u_{1y} = u_1 \sin \alpha_1 \quad (14)$$

$$u_{2x} = u_2 \cos \alpha_2 \quad (15)$$

$$u_{2y} = u_2 \sin \alpha_2 \quad (16)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -l_{y1} & l_{x1} & -l_{y2} & l_{x2} & l_{x3} & l_{x4} & l_{x5} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Finalmente, una vez obtenidos los valores de $u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}$ se pueden obtener los valores de α_i y u_i

$$u_i = \sqrt{u_{ix}^2 + u_{iy}^2} \quad (18)$$

$$\alpha_i = \text{atan2}(u_{iy}, u_{ix}) \quad (19)$$

2.5 Limitación de fuerzas y pares aplicables

Dado que no hay ninguna limitación en las variables de control demandadas por el sistema de posicionamiento dinámico al buque es posible que estas variables no sean admisibles, es decir, que la configuración y restricciones en par y ángulos de los actuadores del buque no puedan generar dichas variables de control. Si este es el caso, el algoritmo de colocación de propulsores debe dar preferencia a la generación del par necesario, después a la aplicación de la fuerza lateral y por último a la fuerza de empuje. A continuación, se indican las restricciones de los propulsores del buque modelo M1.

$$\text{Propulsor 1: } f_1^{\max} = f_{az}^{\max}, \quad f_1^{\min} = f_{az}^{\min}, \alpha \in (-\alpha_{\max}, \alpha_{\max}), \alpha \in (180 - \alpha_{\max}, 180 + \alpha_{\max})$$

$$\text{Propulsor 2: } f_2^{\max} = f_{az}^{\max}, \quad f_2^{\min} = f_{az}^{\min}, \alpha \in (-\alpha_{\max}, \alpha_{\max}), \alpha \in (180 - \alpha_{\max}, 180 + \alpha_{\max})$$

$$\text{Propulsor 3: } f_3^{\max} = f_{tun}^{\max}, \quad f_3^{\min} = f_{tun}^{\min}$$

$$\text{Propulsor 4: } f_4^{\max} = f_{tun}^{\max}, \quad f_4^{\min} = f_{tun}^{\min}$$

$$\text{Propulsor 5: } f_5^{\max} = f_{tun}^{\max}, \quad f_5^{\min} = f_{tun}^{\min}$$

Donde

$$f_{az}^{\max} = 249800 \text{ N}$$

$$f_{az}^{\min} = -173106 \text{ N}$$

$$f_{max}^{tun} = 73330 N$$

$$f_{min}^{tun} = -50824 N$$

$$\alpha_{max} = 35^\circ$$

Como puede observarse, se considera que los propulsores no son simétricos. Cuando el propulsor gira en el sentido de las agujas del reloj produce más fuerza que cuando lo hace en sentido contrario

Para conseguir obtener una solución admisible se introducen restricciones y holguras en el planteamiento del algoritmo de colocación, de forma que los actuadores generen en el buque unas fuerzas que se acerquen todo lo posible al valor de τ pero cumpliendo con las restricciones de los propulsores. En este caso, además, se emplea una matriz de coste W (diagonal de dimensión 3x3) que permite penalizar unas magnitudes frente a otras y que, por tanto, permite dar preferencia al valor de M frente a F_y y F_x .

A su vez, también se han limitado los valores de las fuerzas demandadas F_x , F_y y M , con motivo de acotarlas y evitar posibles problemas numéricos y de convergencia cuando se aplican los métodos de optimización. Las limitaciones sobre dichas fuerzas son las siguientes:

$$F_{x,max} = -F_{x,min} = 2f_{az}^{max} = 499600 N$$

$$F_{y,max} = 3f_{tun}^{max} + 2f_{az}^{max} \sin\alpha_{max} = 506549 N$$

$$F_{y,min} = 3f_{tun}^{min} - 2f_{az}^{max} \sin\alpha_{max} = -439031 N$$

$$M_{max} = 3f_{az}^{max} \left((-l_{x1} - l_{x2}) \sin\alpha_{max} + (l_{y1} - l_{y2}) \cos\alpha_{max} \right) + f_{tun}^{max} (l_{x3} + l_{x4} + l_{x5}) \\ = 19697698 Nm$$

$$M_{min} = 3f_{az}^{max} \left((+l_{x1} + l_{x2}) \sin\alpha_{max} - (l_{y1} - l_{y2}) \cos\alpha_{max} \right) + f_{tun}^{min} (l_{x3} + l_{x4} + l_{x5}) \\ = -17614172 Nm$$

Se puede observar que a causa de esto, pueden darse soluciones que no sean admisibles aunque estén dentro del rango de las fuerzas demandadas. En el próximo apartado se mostrará de manera orientativa este suceso.

2.6 Representación de fuerzas alcanzables

Para disponer de una idea general del rango de fuerzas que son alcanzables por el navío, se ha optado por obtener varias gráficas en las que fijado un valor del momento M , se ha observado si los valores de las fuerzas longitudinal y transversal son alcanzables. El método a realizar para la obtención de las gráficas se ha basado en la resolución de la siguiente ecuación matricial

$$T(\alpha_1, \alpha_2)X = \tau \quad (20)$$

Posteriormente, se ha observado si había solución para dicho problema, y en caso afirmativo, se ha comprobado si la solución obtenida estaba dentro del rango máximo y mínimo de los propulsores azimutales y de los propulsores de túnel.

Las gráficas que se muestran a continuación se corresponden a los distintos valores de las fuerzas longitudinal y transversal demandadas para un momento fijo. Los puntos representados en azul son aquellos para los que el sistema tiene solución y las fuerzas demandadas son alcanzables. Por el contrario, los puntos representados en rojo son aquellos para los que el sistema tiene solución, pero las fuerzas no son alcanzables.

$$- M = 20e6.$$

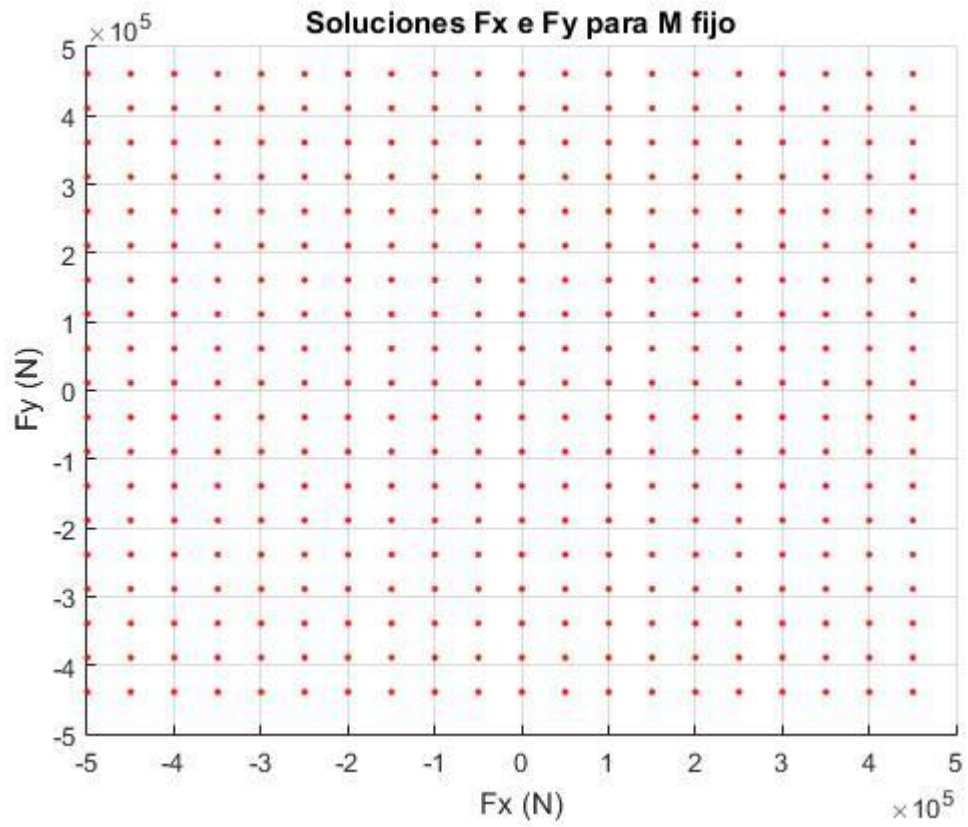


Figura 2-2. Soluciones para $M = 20e6$.

- $M = 15e6$.

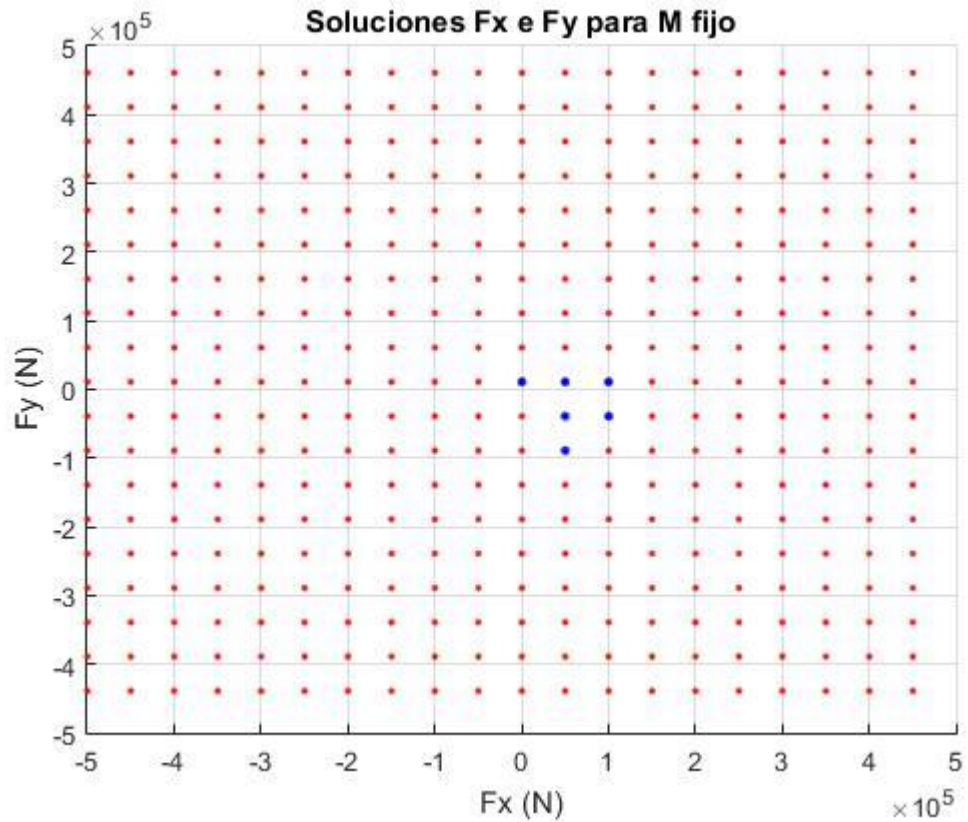


Figura 2-3. Soluciones para $M = 15e6$.

- $M = 10e6$.

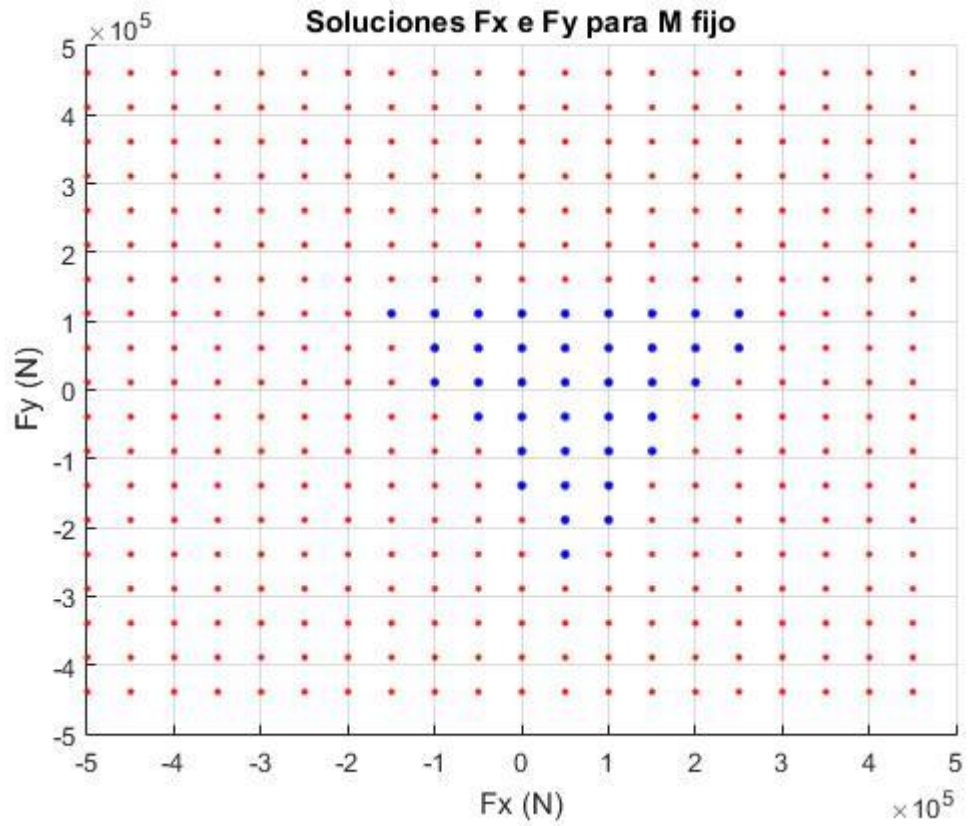


Figura 2-4. Soluciones para $M = 10e6$.

- $M = 5e6$.

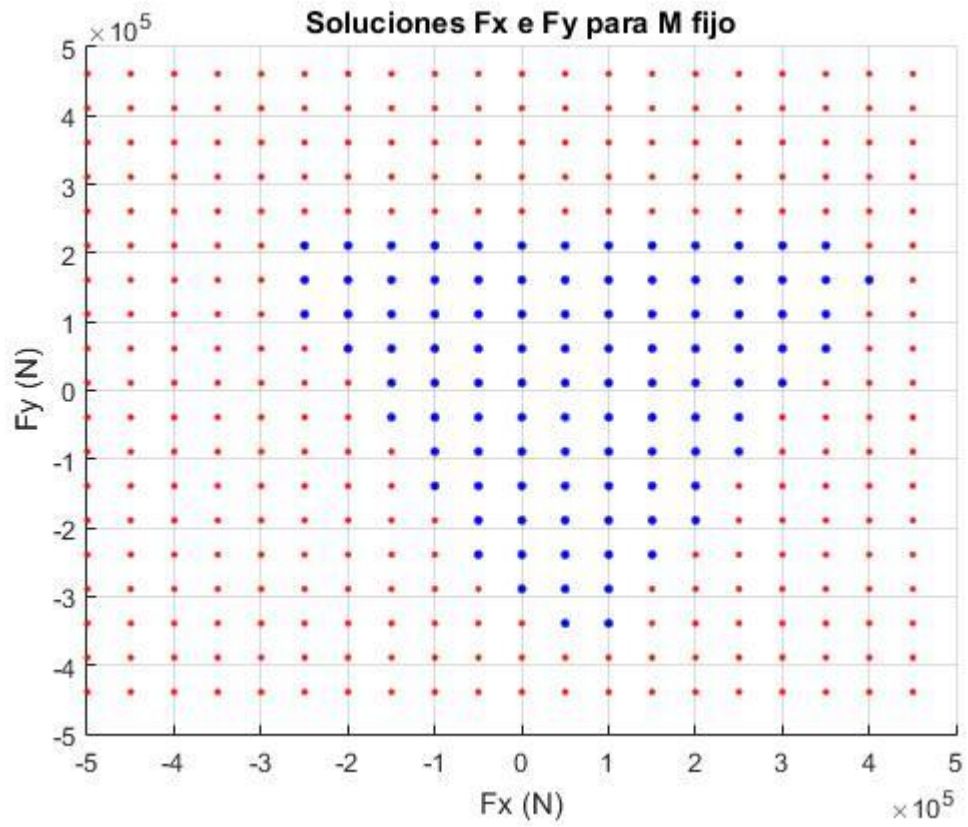


Figura 2-5. Soluciones para $M = 5e6$.

- $M=0$.

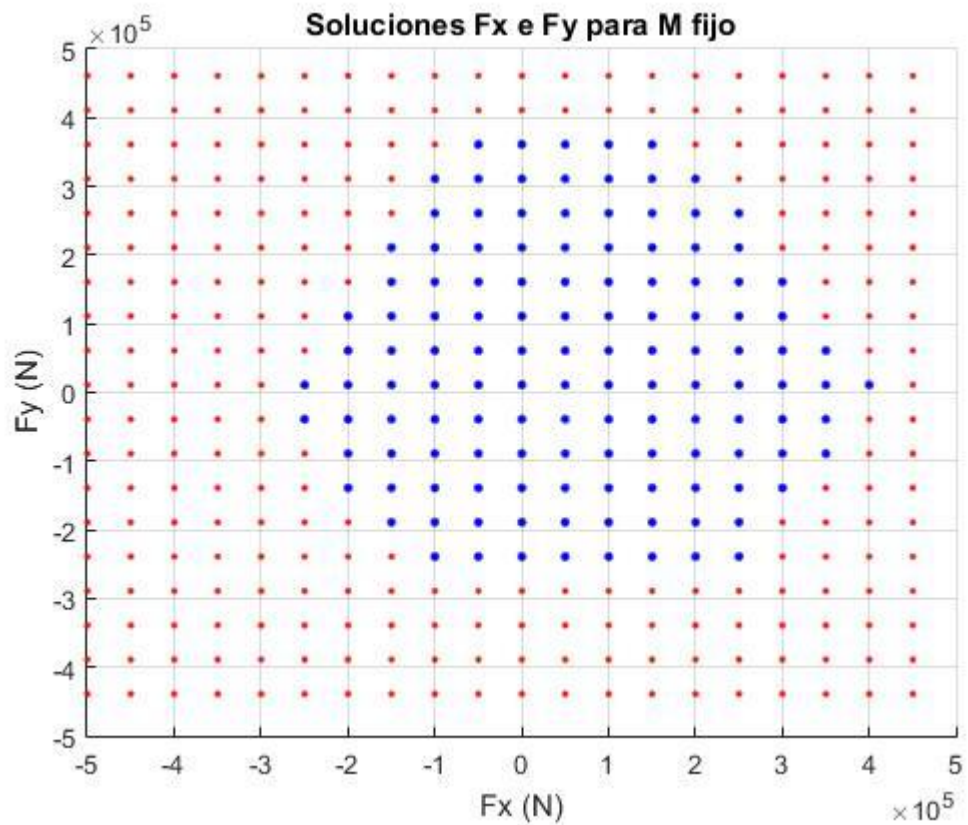


Figura 2-6. Soluciones para $M = 0$.

- $M = -5e6$.

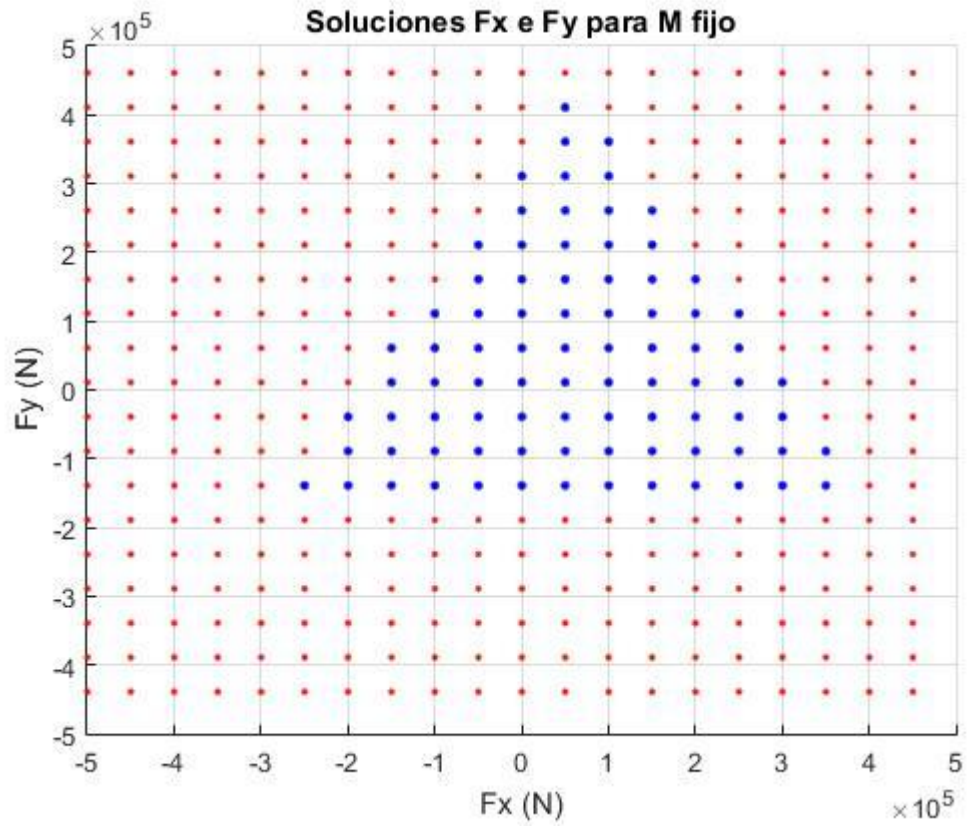


Figura 2-7. Soluciones para $M = -5e6$.

- $M = -10e6$.

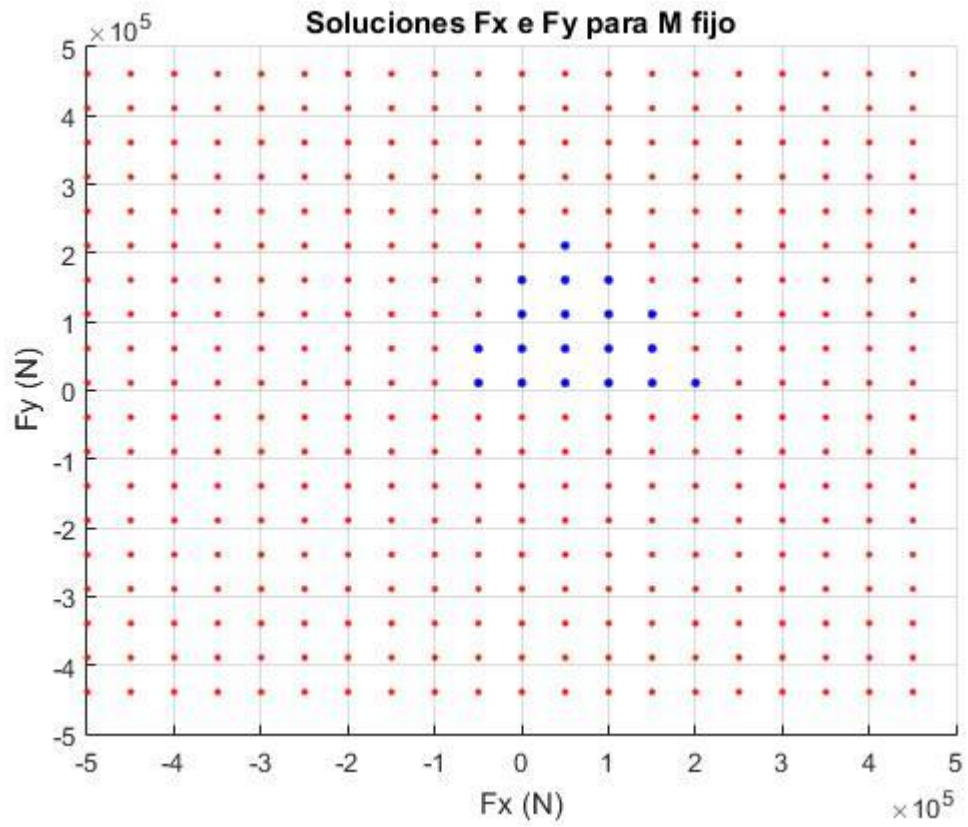


Figura 2-8. Soluciones para $M = -10e6$.

- $M = -15e6$.

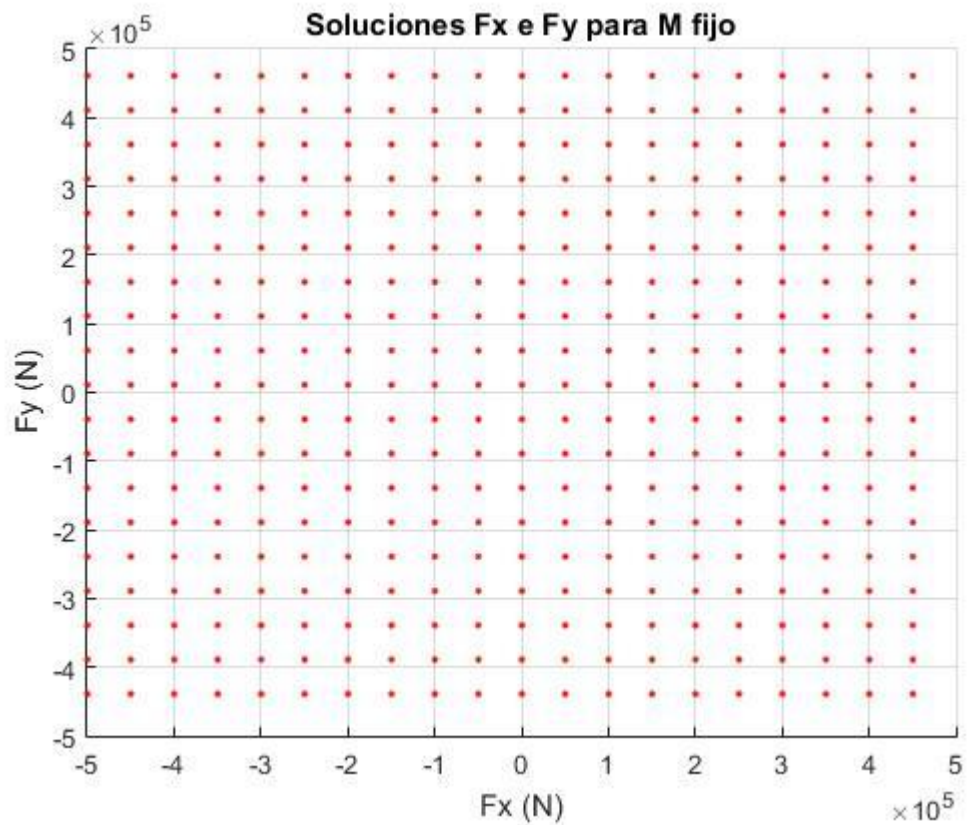


Figura 2-9. Soluciones para $M = -15e6$.

Se puede observar que en cuanto nos acercamos a los valores máximos y mínimos del rango de M , aunque el sistema tenga solución, las soluciones obtenidas van a estar siempre fuera del rango de funcionamiento de los propulsores azimutales y los propulsores de túnel de los que dispone el navío.

2.7 Representación de valores singulares

Como se ha mencionado previamente en el apartado 1.7, este proyecto no se centra en el tratamiento de las singularidades. Aún así, se considera necesario saber para qué valores de los ángulos de los azimutales, la matriz de configuración T toma valores singulares, para poder evitar ese rango de valores de manera preventiva.

De este modo, se ha buscado representar los valores singulares para los ángulos α_1 y α_2 de los propulsores azimutales mediante dos criterios distintos: El valor singular mínimo que toma la matriz de configuración T para dichos ángulos, y el valor de la relación entre dicho valor singular mínimo y el valor singular máximo.

Se muestra a continuación los resultados obtenidos utilizando distintos umbrales para los dos criterios utilizados. Los puntos en azul se corresponden con los valores singulares mínimos y los puntos representados en verde se corresponden a los de la relación entre los valores singulares mínimos y máximos.

- Umbral $s_{\min} = 0.05$ y umbral $\frac{s_{\min}}{s_{\max}} = 1e - 4$:

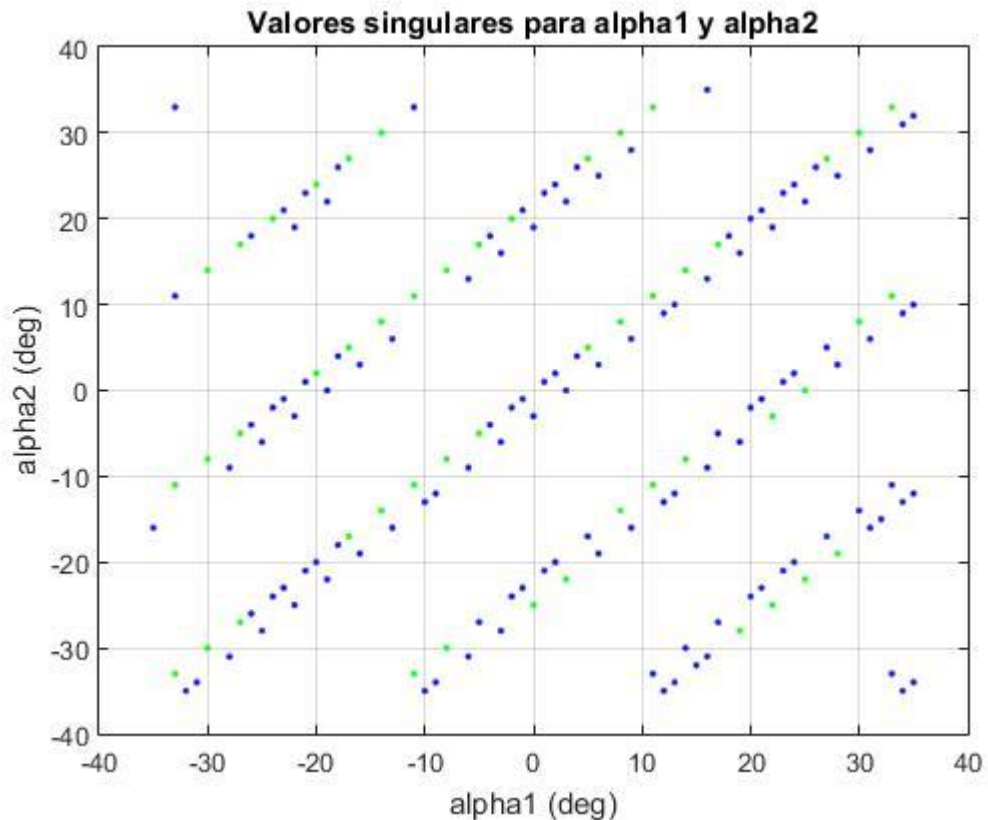


Figura 2-10. Representación de valores singulares.

- Umbral $s_{\min} = 0.1$ y umbral $\frac{s_{\min}}{s_{\max}} = 5e - 4$:

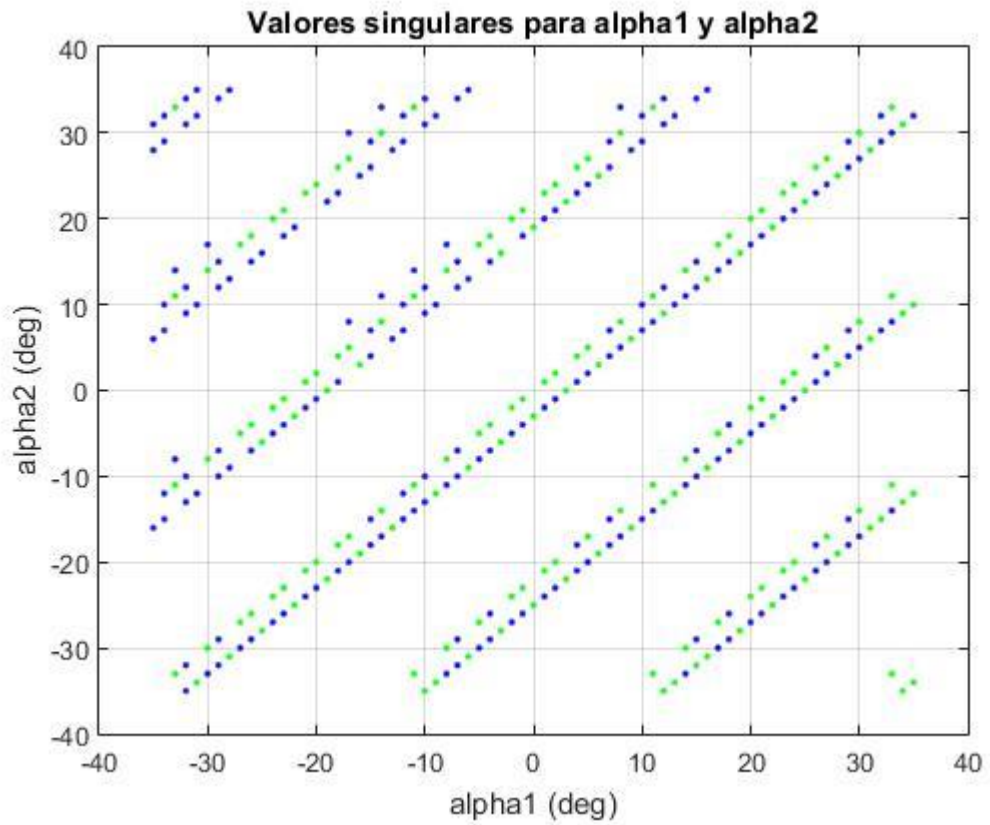


Figura 2-11. Representación de valores singulares.

- Umbral $s_{mín} = 0.25$ y umbral $\frac{s_{mín}}{s_{máx}} = 7.5e - 4$:

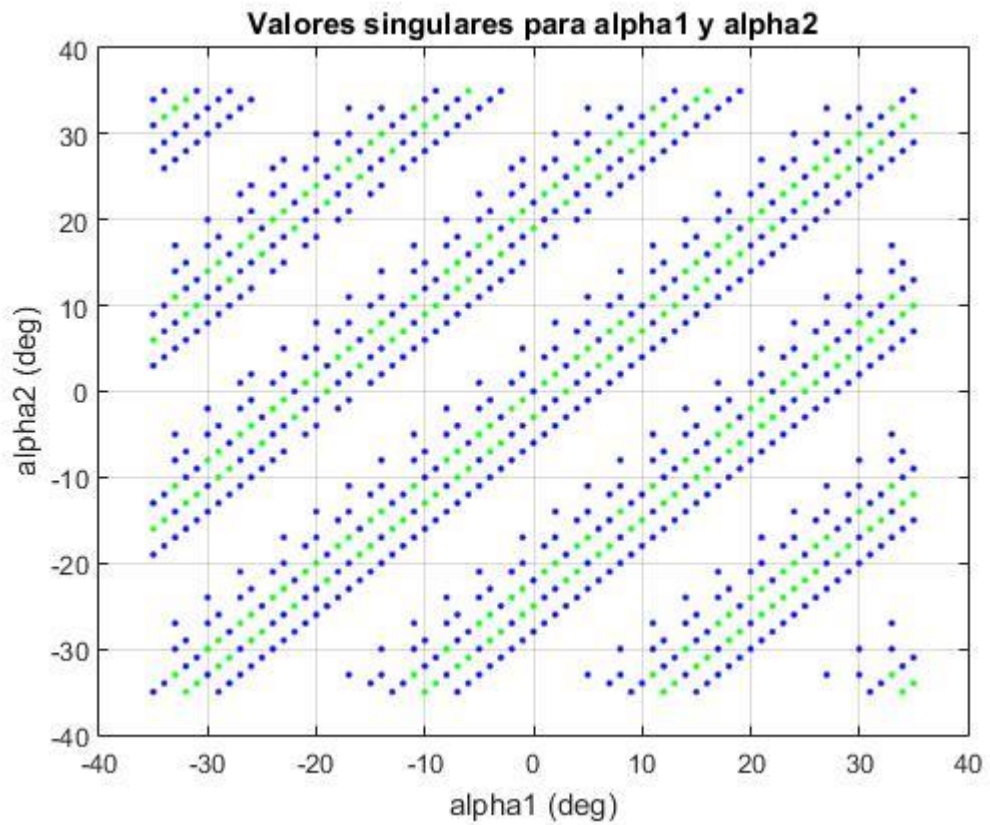


Figura 2-12. Representación de valores singulares.

3 DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS EN PROPULSORES

En este apartado, se va a proceder a explicar el algoritmo de optimización que se va a utilizar en el problema, y cómo aplicarlo según se trabaje con los ángulos de los propulsores azimutales fijos, o con los ángulos de los propulsores azimutales variables.

3.1 Planteamiento del problema

En este proyecto, se está trabajando con un sistema sobreactuado, como se ha mencionado anteriormente, hay más grados de libertad que ecuaciones. Esto implica que se van a obtener múltiples soluciones. Para resolver este problema, se va a plantear la siguiente ecuación

$$Tf = \tau + s \quad (20)$$

Donde s son las holguras que se dan en los casos en los que las fuerzas demandadas (τ) no sean alcanzables. Por tanto, hay que buscar unos vectores f y s que minimicen la función de coste J mostrada en la ecuación 21. Con ello se busca acercarse todo lo posible a las fuerzas demandadas y que las holguras tiendan a 0, resolviendo el problema de optimización sujeto a restricciones de la siguiente función de coste

$$J = \min \left\{ \frac{1}{2} (f^T W f + s^T Q s) \right\} \quad (21)$$

Sujeto a

$$\begin{aligned} Tf &= \tau + s \\ f_{\min} &\leq f \leq f_{\max} \end{aligned} \quad (22)$$

Donde f es el siguiente vector

$$f = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Los dos primeros elementos se refieren a los azimutales 1 y 2, y los tres últimos a cada propulsor de túnel. Si se observa la función a optimizar J , hay dos matrices diagonales W y Q . Con estas matrices asignamos el peso

o la importancia que tiene acercarse a las fuerzas demandadas para el caso de la matriz Q, o la importancia de cada propulsor en el caso de la matriz W. Se observa que, si en la función J se aumenta el valor de Q, se obliga a que el valor de s, es decir, las holguras, sea mínimo. De esta manera la solución dada se acercaría lo máximo posible a las fuerzas demandadas, por lo que se tendría un valor de f alto. En la realidad, un valor de f alto implica un consumo elevado, por lo que hay que encontrar una solución de compromiso. De manera análoga, si se aumentase el valor de W, esto implicaría que no habría que acercarse tanto a las fuerzas demandadas, por lo que el valor de las holguras sería significativamente mayor.

Como ejemplo, para la aplicación de posicionamiento dinámico de este proyecto estas matrices pueden tomar los siguientes valores:

$$Q = 10^4 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

De esta forma, al tener distintos valores en las diagonales de la matriz Q, se está dando mayor importancia a alcanzar el par, posteriormente a alcanzar la fuerza en el eje y, y por último la fuerza en el eje x. Es decir, se penalizan más los errores en par frente a los errores en la fuerza en el eje x. Puesto que el valor de los elementos diagonales de la matriz Q es de un orden de entre 10^4 y 10^6 veces superior a los de los elementos diagonales de la matriz W, implica que la solución que dará el algoritmo de optimización mostrado previamente de una solución con unas holguras no muy elevadas. Además, cabe destacar que, si se observan los valores de la matriz W, se puede ver que son todos iguales, de esta manera no se penaliza el uso de un propulsor frente a otro.

Por último, hay que señalar que, aunque el problema se resuelve considerando los 3 propulsores de túnel de manera independiente, pero no resulta práctico tener arrancado un propulsor si no es imprescindible. Por ello, se calcula la fuerza total que deberían dar los 3 propulsores de túnel y se van arrancando los propulsores de manera escalonada; es decir, primero se arranca un solo propulsor (el propulsor 3) hasta que satura su fuerza, si es necesaria más fuerza la genera el propulsor 4 (hasta que se sature) y por último entraría en funcionamiento el propulsor 6.

3.2 Azimutales constantes

Para el caso en el que se consideran los ángulos de los propulsores azimutales constantes, se va a utilizar como matriz T la matriz de configuración simple, mostrada previamente en el apartado 2.3

$$T(\alpha_1, \alpha_2) = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 & 1 & 1 & 1 \\ l_{x1}\sin\alpha_1 - l_{y1}\cos\alpha_1 & l_{x2}\sin\alpha_2 - l_{y2}\cos\alpha_2 & l_{x3} & l_{x4} & l_{x5} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Si se observa el fichero de Matlab ADAMalloc_fun_alpha.m proporcionado, se puede comprobar que la matriz de configuración mostrada previamente se corresponde con la matriz T. Para resolver en Matlab el problema mediante el algoritmo de optimización que se ha explicado en la sección 1 de este mismo capítulo, se va a hacer uso de la función Quadprog. Esta función toma la siguiente forma

$$J = \min \left\{ \frac{1}{2} f^t h f \right\} \quad \text{sujeito a} \quad Ax \leq b \quad (26)$$

Donde la matriz h se corresponde con la siguiente matriz

$$h = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \quad (27)$$

Y las matrices Q y W se corresponden con las indicadas en el apartado 3.1. De esta manera, el problema explicado en el apartado 3.1, se va a modificar para poder hacer uso de la función Quadprog. La restricción $Ax \leq b$ queda entonces de la siguiente forma

$$A_{eq} = [T - I_{3 \times 3}] \quad (28)$$

$$x = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ s_1 \ s_2 \ s_3]^T \quad (29)$$

$$\tau = [F_x \ F_y \ M]^T \quad (30)$$

Donde s_1, s_2 y s_3 se corresponden con las holguras obtenidas frente a las fuerzas demandadas del vector τ . De esta manera

$$[T - I_{3 \times 3}] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (31)$$

Se puede observar en el fichero de Matlab que tanto las matrices A como b son matrices que están vacías puesto que el problema que se está resolviendo no es la inecuación $Ax \leq b$, si no la ecuación $Aeqx = beq$. Esto se debe a que al introducir las holguras en el modelado del problema, éste siempre tiene, por lo que se resuelve la igualdad planteada previamente.

3.3 Azimutales variables

Para el caso de los ángulos de los propulsores azimutales variables, hay que tener en cuenta algunas variaciones. En primer lugar, la matriz T a utilizar va a ser la matriz de configuración extendida que se mostró en el apartado 2.4. Además, se va a trabajar con restricciones distintas. El planteamiento del problema sería el siguiente

$$Tf = \tau + s \quad \text{sujeto a} \quad f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (32)$$

En este caso, la resolución del problema consistirá en descomponer las fuerzas de los propulsores azimutales en F_x y F_y , y se pondrán restricciones en dichas fuerzas a cada azimutal hasta dar con una solución, mediante el mismo método utilizado para α constante mediante la función Quadprog. Una vez se encuentre con una solución, se transformará el resultado obtenido a fuerza y ángulo, como se muestra matemáticamente en el apartado 2.4 de este proyecto.

Al contrario que en el problema para ángulos fijos, para aplicar esta solución sí se resuelve la inecuación mostrada previamente en este mismo apartado, por lo que no se utilizan matrices vacías.

3.4 Solución híbrida

El planteamiento de esta tercera solución no supone ninguna complejidad añadida matemática. Por ello mismo,

no se va a proceder a mostrar el desarrollo matemático de dicha solución. El objetivo de esta solución no es más que fusionar las dos opciones planteadas previamente, de esta manera, se haría uso de las fuerzas obtenidas por el algoritmo para ángulos constantes, pero la orientación y ángulos de los propulsores azimutales se obtendrían de los ángulos obtenidos por el algoritmo de ángulos variables.

Este planteamiento se debe al hecho de que la dinámica ante cambios de orientación de los propulsores azimutales es considerablemente más lenta que la dinámica del empuje. Por tanto, cuando en un determinado instante se demandan unas rpms y un ángulo en un propulsor azimutal, las rpms se alcanzarán rápidamente mientras el propulsor varía su orientación más lentamente y, con ello, la fuerza generada no es la pretendida.

Al combinar ambos métodos se pretende que los propulsores azimutales tiendan a orientarse hacia la dirección más óptima (lentamente), pero aplicando un empuje que permita generar la fuerza demandada en ese instante de tiempo.

4 RESULTADO Y SIMULACIONES

En este capítulo se van a mostrar las distintas simulaciones que se han realizado a lo largo del desarrollo del proyecto, así como los resultados obtenidos. Para ello, se han realizado simulaciones para los 3 métodos distintos planteados (ángulo fijo, ángulo variable y solución mixta) sobre distintos escenarios. Los escenarios utilizados han sido los siguientes: En primer lugar, un escenario sin perturbaciones externas en las que el navío ha de alcanzar la posición de referencia (4, 4) y la referencia en ángulo a partir de los 300 s. Posteriormente se han simulado otros dos escenarios en los que si se simulan perturbaciones a causa del viento aplicado en distintas direcciones. Se han realizado diversas simulaciones para α variable y para la solución híbrida para observar las variaciones en la soluciones obtenidas para distintos valores de retraso en ángulo de los propulsores azimutales. Aparte de las correspondientes gráficas, también se va a considerar mediante un evaluador, que solución produce más fatiga en el empuje o en los propulsores azimutales y los valores relativos al consumo de los propulsores para cada una de las soluciones.

Para mostrar los resultados, en primer lugar se adjuntarán unas gráficas referentes a los resultados obtenidos para cada caso, y posteriormente se hará una comparación de algunas de las gráficas para las distintas soluciones empleadas y de los datos obtenidos referentes al consumo, la fatiga y otros factores a través del evaluador.

4.1 Resultados para α constante

En primer lugar, para observar el funcionamiento del algoritmo de optimización, se ha probado a requerir distintos valores de τ para unos valores fijos de los ángulos de los propulsores azimutales. Como resultado, se ha obtenido un vector que nos devuelve la fuerza a aplicar por cada propulsor, los ángulos alcanzados, y cuánto se ha alejado la solución dada a las fuerzas requeridas inicialmente.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para esta solución en los distintos escenarios simulados. Las gráficas adjuntas representan la referencia y la posición del buque, el error de posición y de rumbo, las fuerzas y momentos generados, y por último, las rpm de los distintos propulsores y los ángulos de los propulsores azimutales.

4.1.1 Test consigna

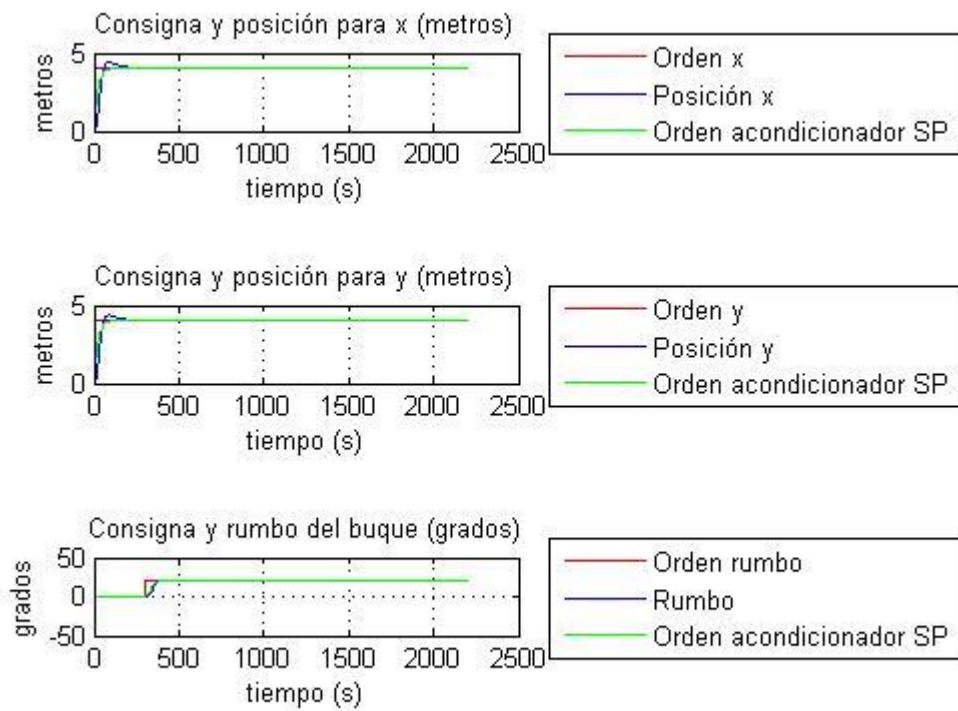


Figura 4-1. Referencia frente a posición y rumbo.

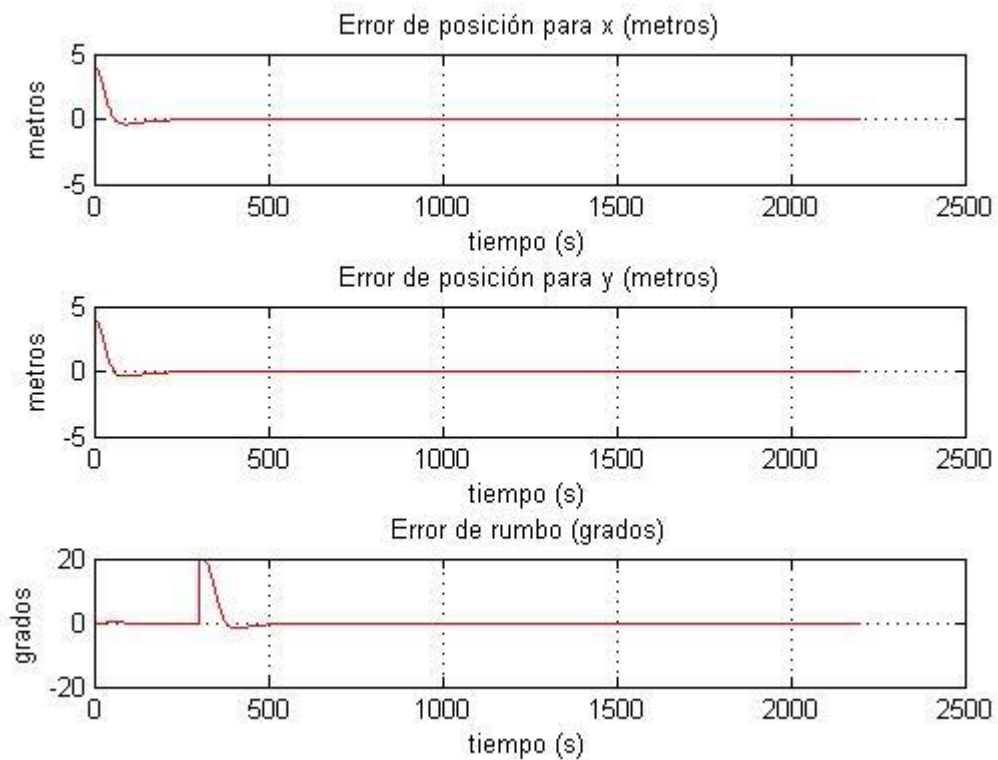


Figura 4-2. Error de posición y rumbo.

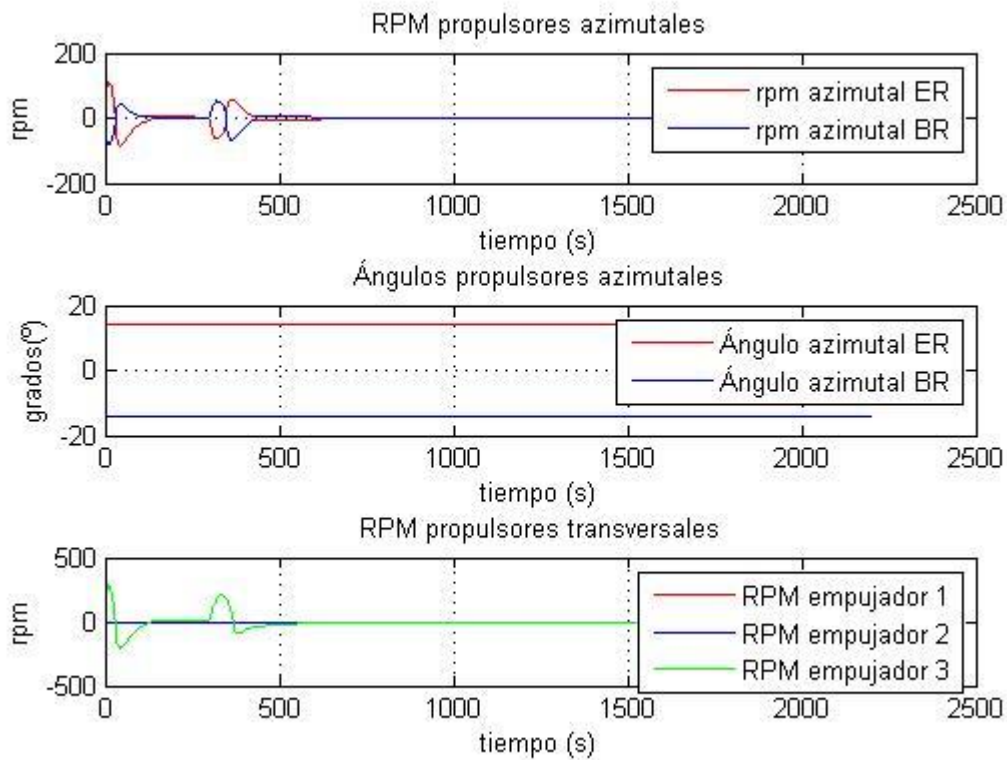
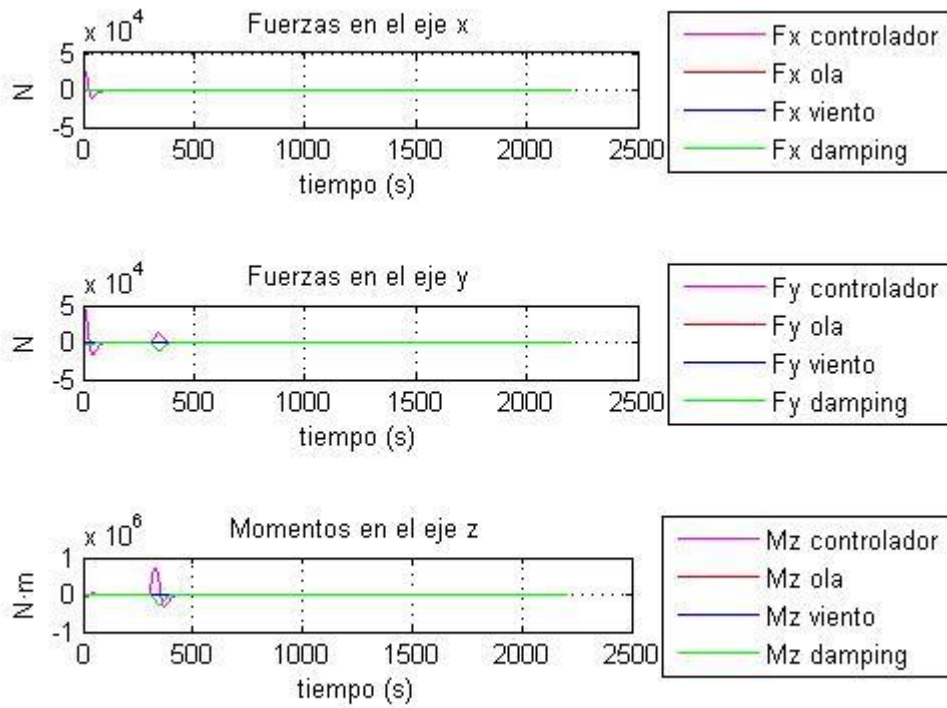


Figura 4-4. RPM y ángulos de los azimutales.

4.1.2 Escenario 1

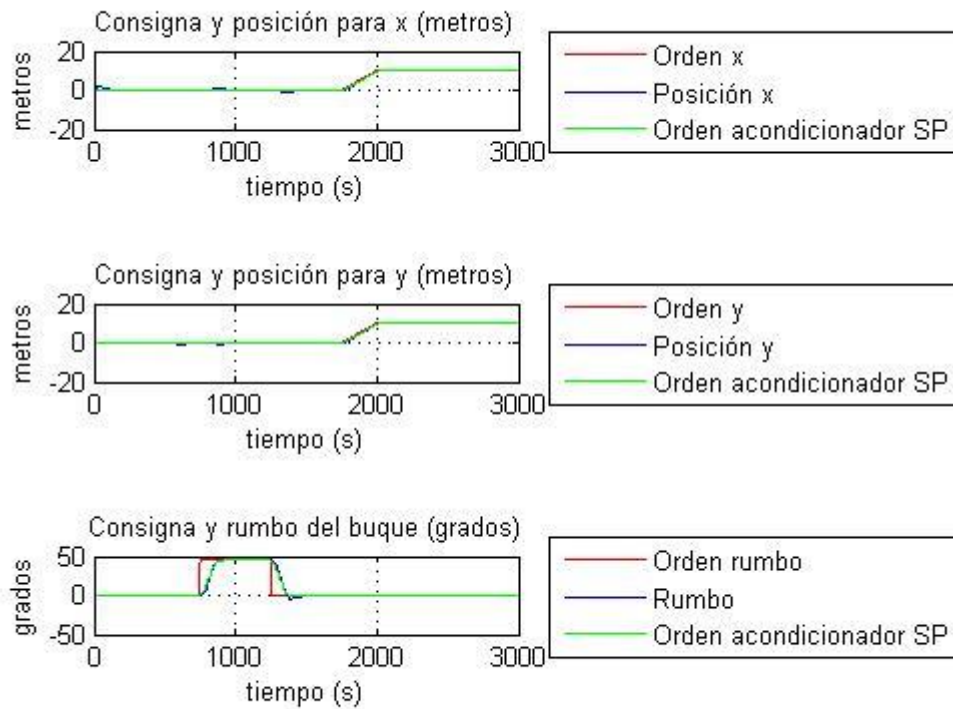


Figura 4-5. Referencia frente a posición y rumbo.

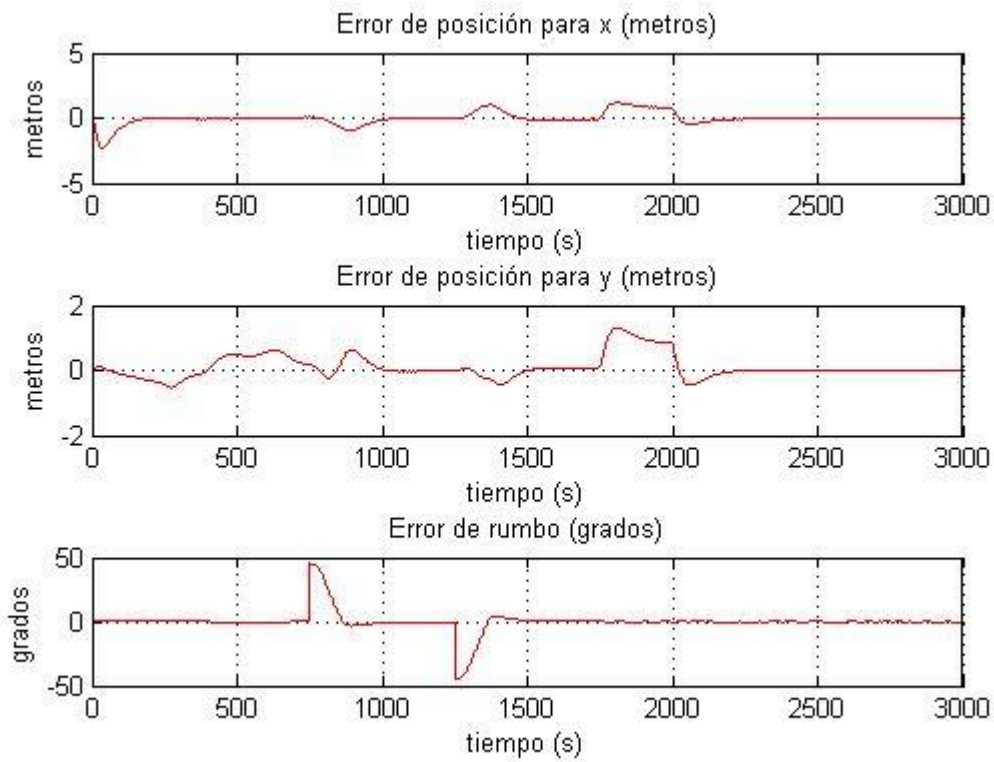


Figura 4-6. Error de posición y rumbo.

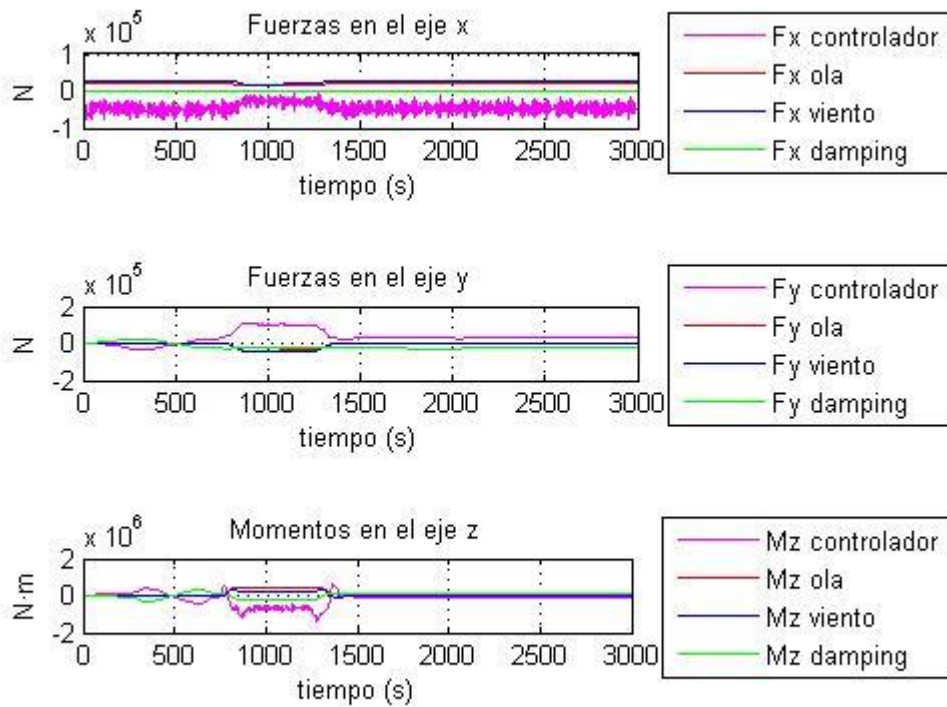


Figura 4-7. Fuerzas y momentos.

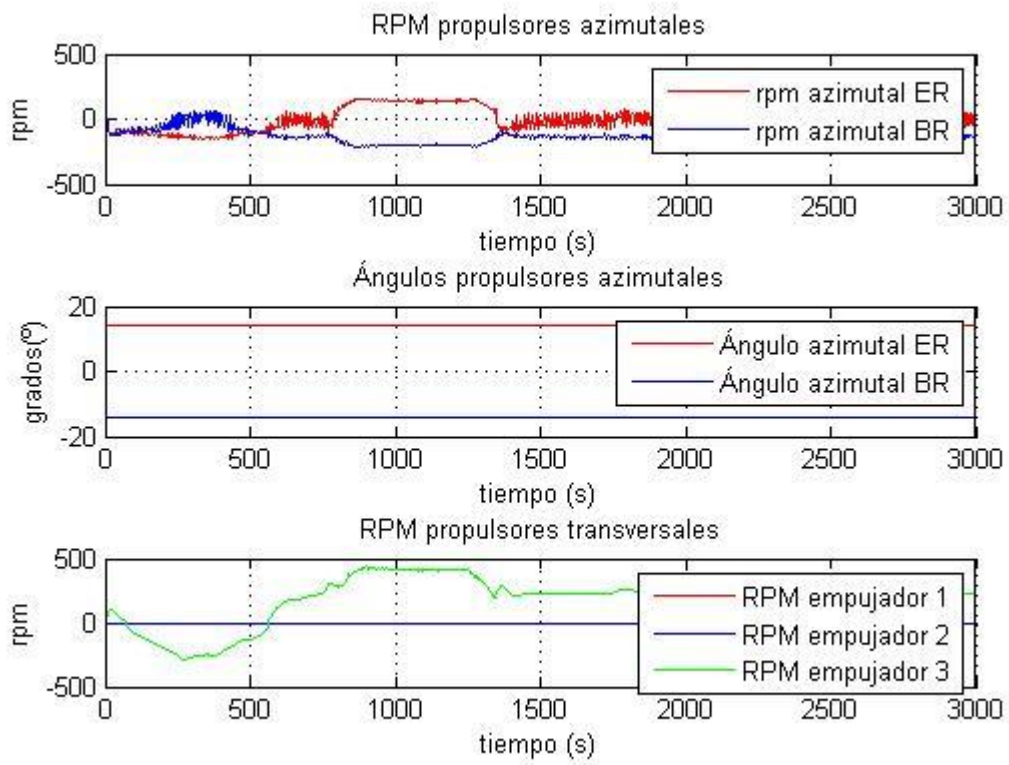


Figura 4-8. RPM y ángulos de los azimutales.

4.1.3 Escenario 2

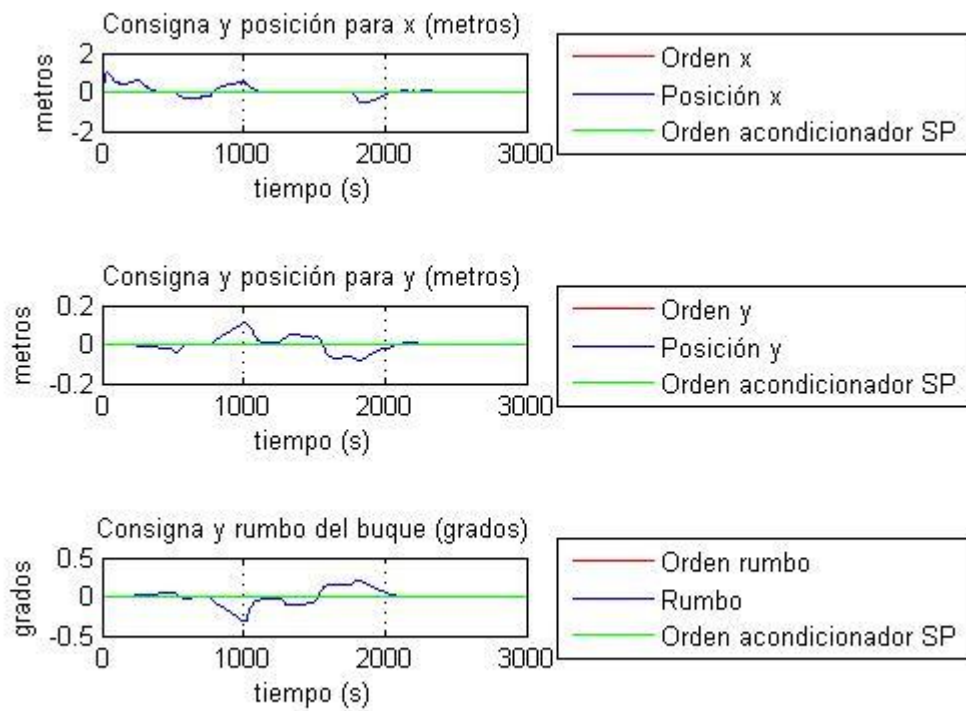


Figura 4-9. Referencia frente a posición y rumbo.

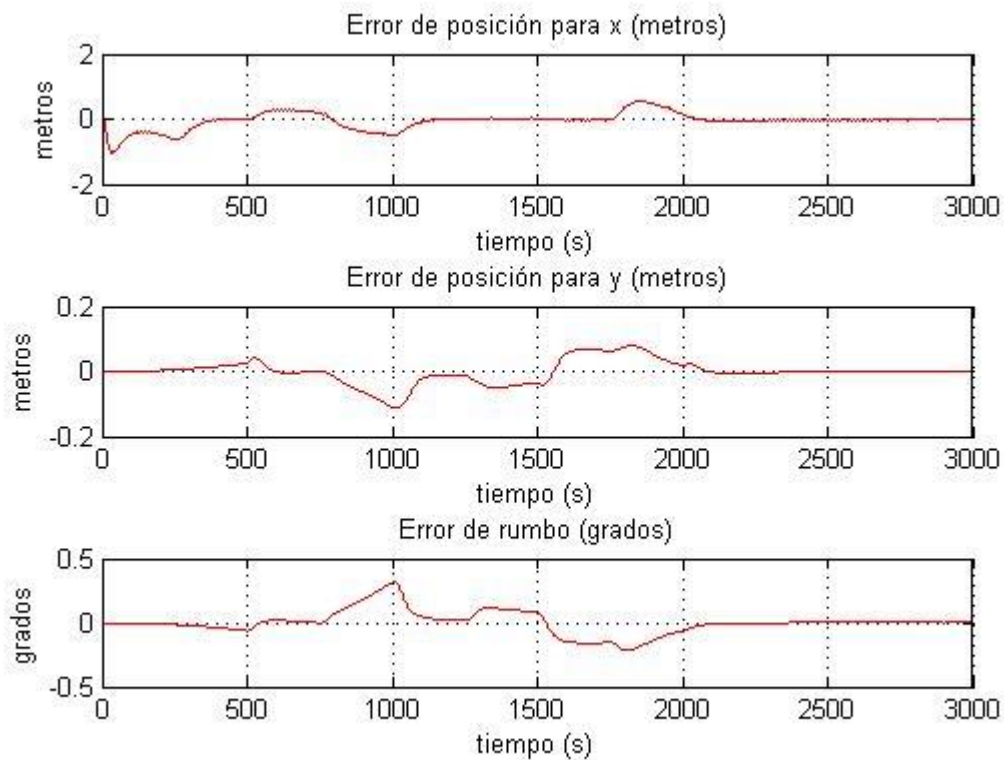


Figura 4-10. Error de posición y rumbo.

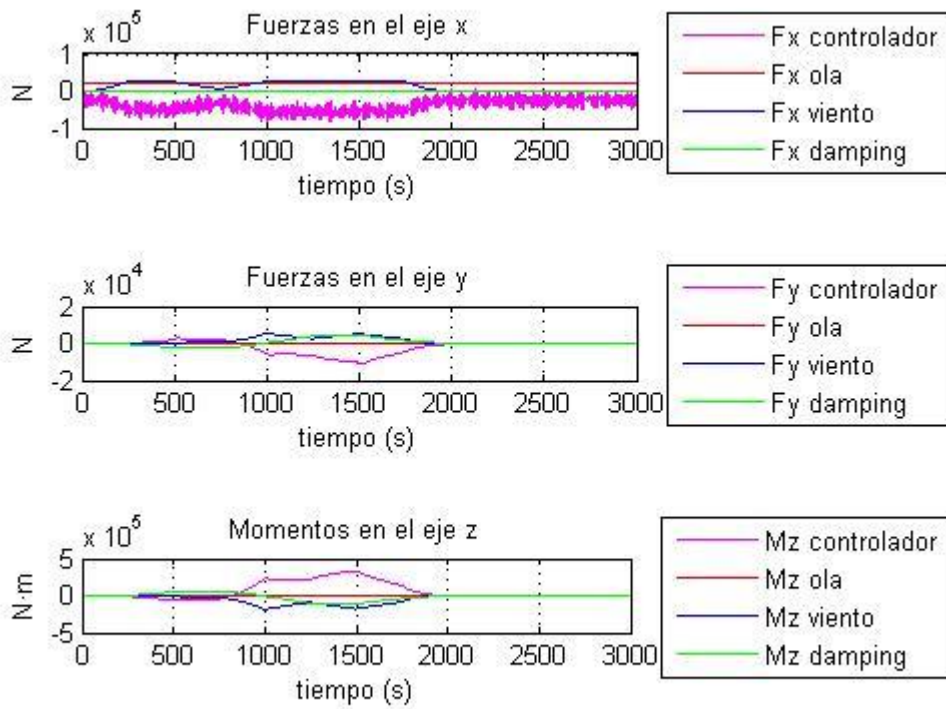


Figura 4-11. Fuerzas y momentos.

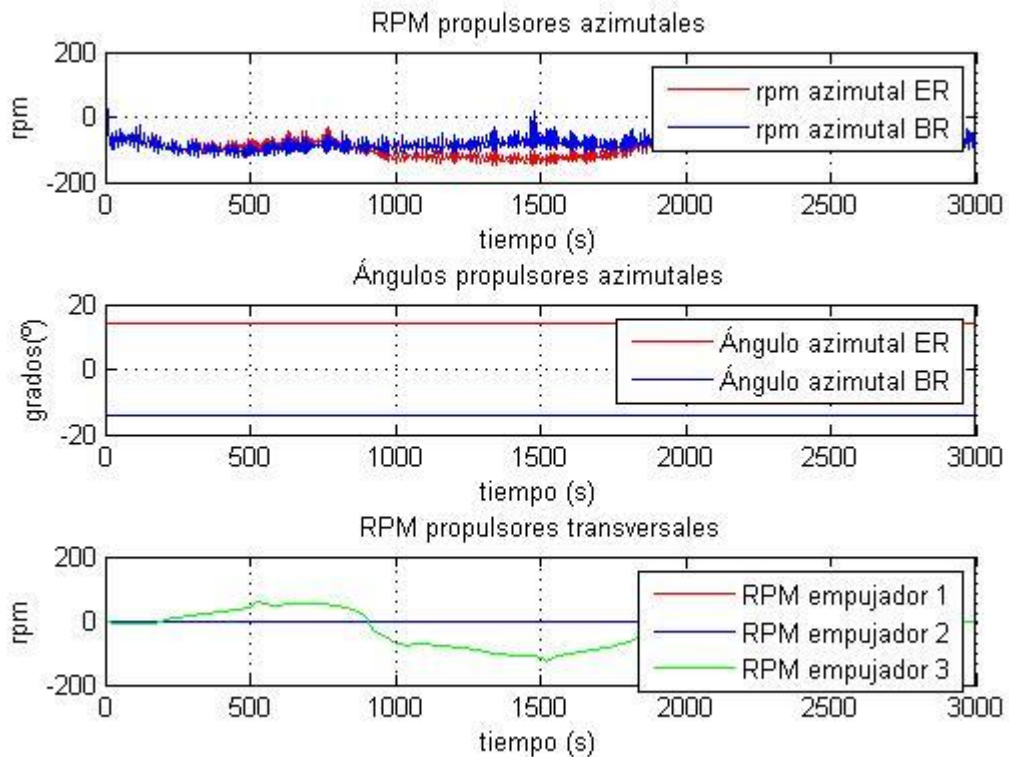


Figura 4-12. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2 Resultados para α variable

Al igual que para el caso de α constante, se ha procedido a realizar diversas simulaciones en los escenarios indicados anteriormente. Tanto para el caso de α variable como para el caso de la solución mixta, se ha querido observar el efecto del retraso en los propulsores. Por tanto, se han realizado 3 simulaciones distintas, considerando que el retraso en el ángulo de los propulsores azimutales toma los valores de 10, 30 y 60 segundos.

Hay que considerar que el algoritmo que se ha utilizado para resolver este problema, daba cuatro posibles soluciones. Para el estudio que abarca este proyecto, solo se va a utilizar una de las soluciones, en la que ambos propulsores azimutales se encuentran mirando hacia delante. Escoger únicamente esta configuración se debe a que la comparativa con los resultados obtenidos para α constante solo son útiles para dicha configuración. Si se contemplasen los 4 posibles casos, sería necesario hacerlo también para la solución de α constante, todo esto implicaría la realización de numerosas simulaciones y por tanto, complicaría y extendería lo que abarca el Proyecto.

A continuación, se muestra una representación del área de las posibles soluciones que se van a considerar para ambos propulsores azimutales.

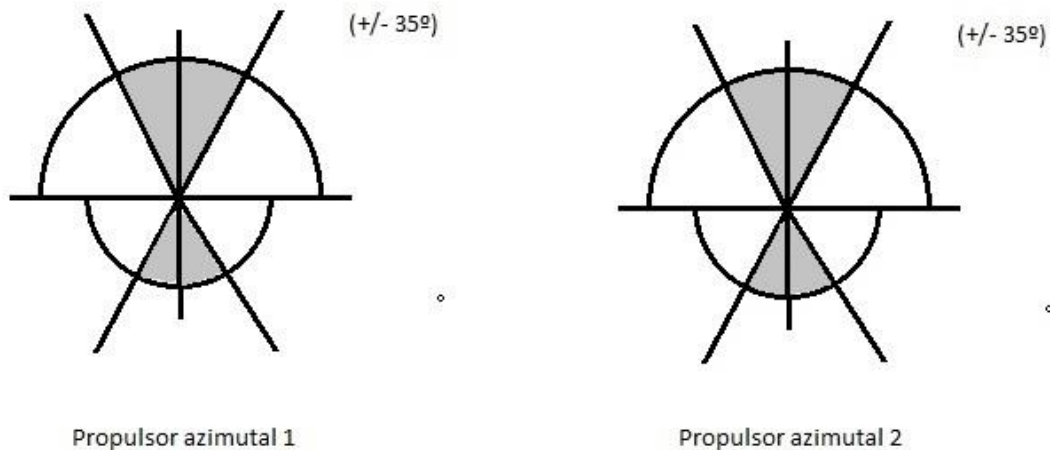


Figura 4-13. Configuración propulsores azimutales.

Como se puede observar, el área que ocupa la parte negativa es menor que la positiva puesto que, como se mencionó en los apartados iniciales, se penalizan las rpm negativas.

4.2.1 Test consigna

4.2.1.1 Retardo de 10 s

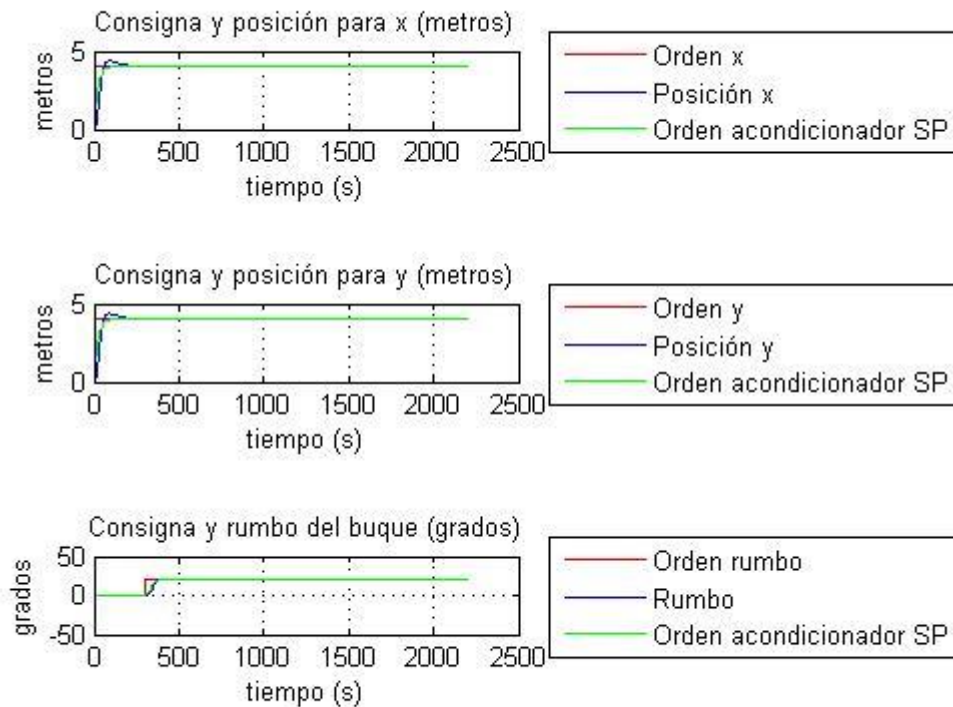


Figura 4-14. Referencia frente a posición y rumbo.

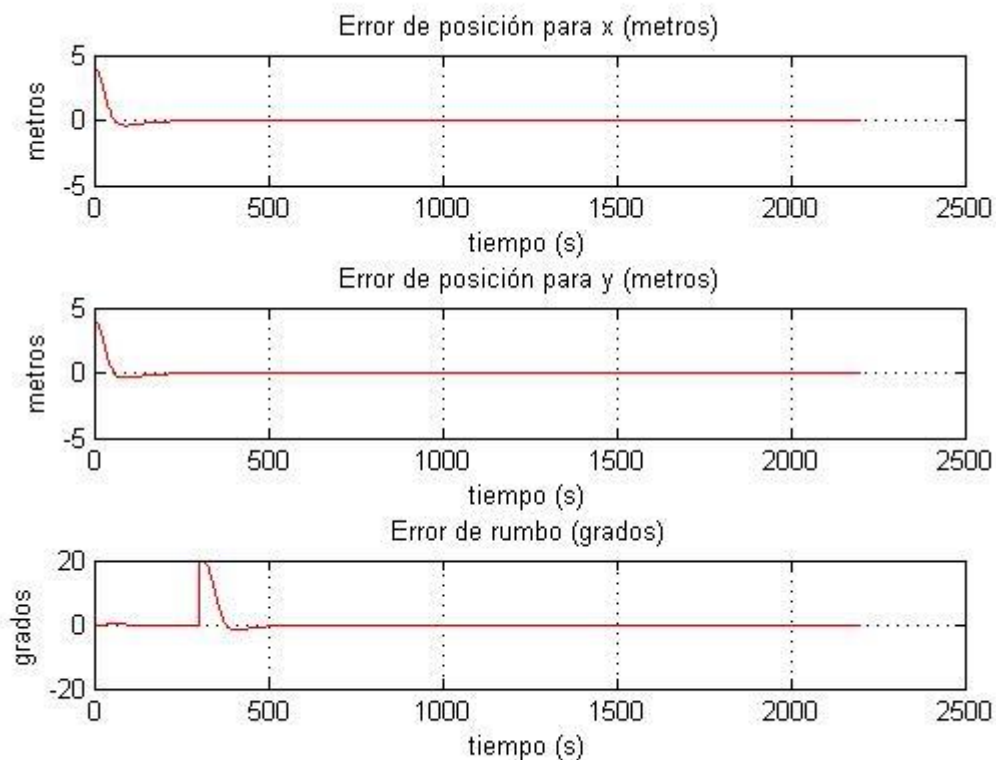


Figura 4-15. Error de posición y rumbo.

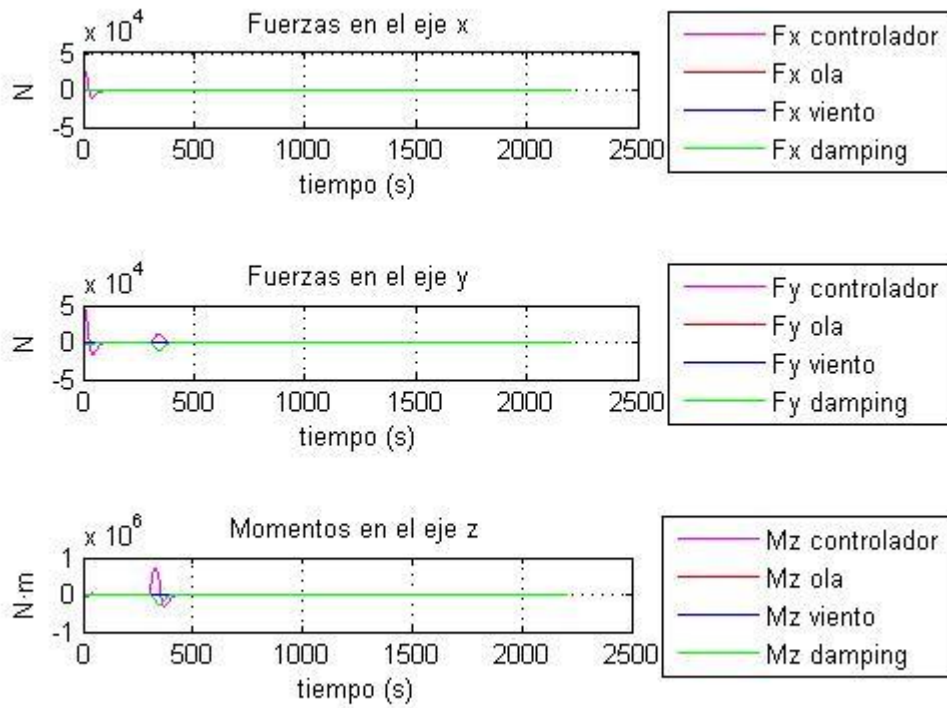


Figura 4-16. Fuerzas y momentos.

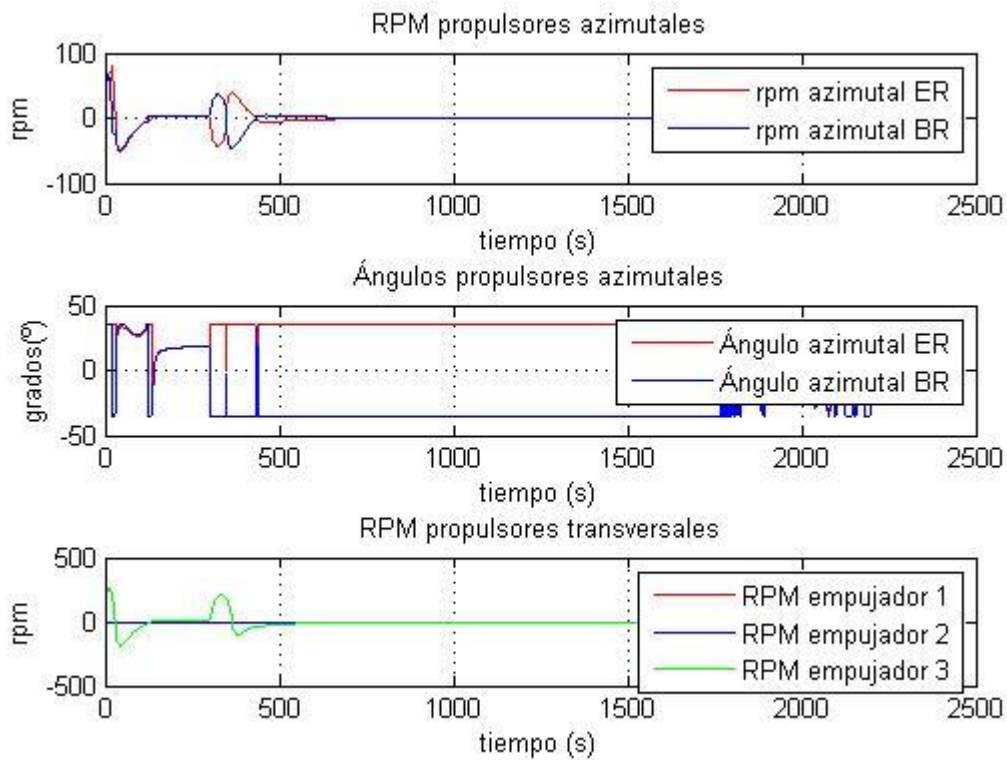


Figura 4-17. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.1.2 Retardo de 30 s

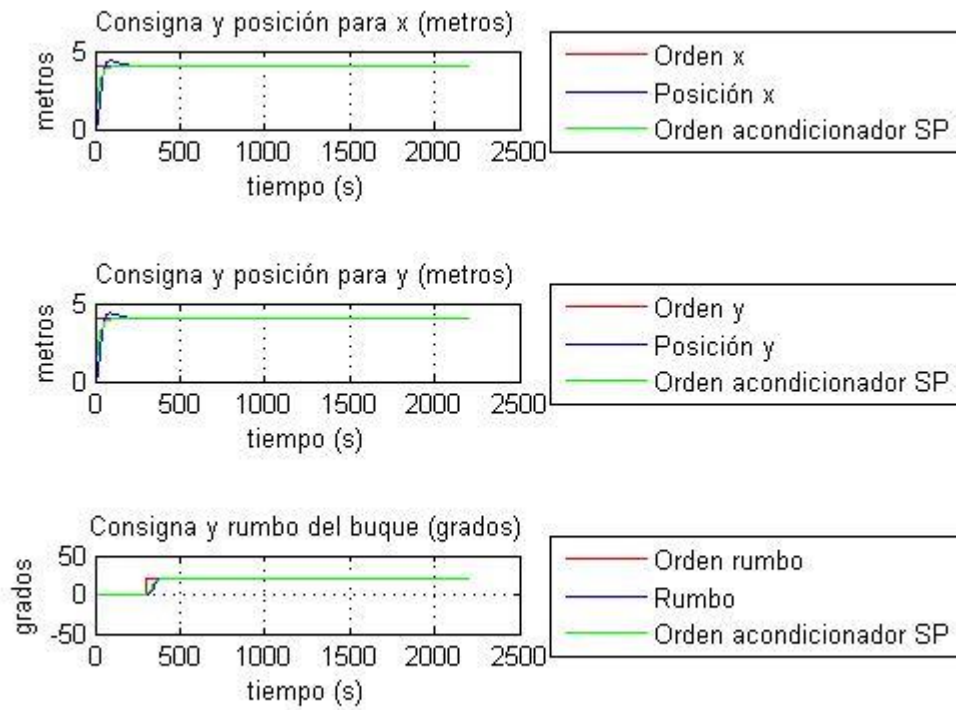


Figura 4-18. Referencia frente a posición y rumbo.

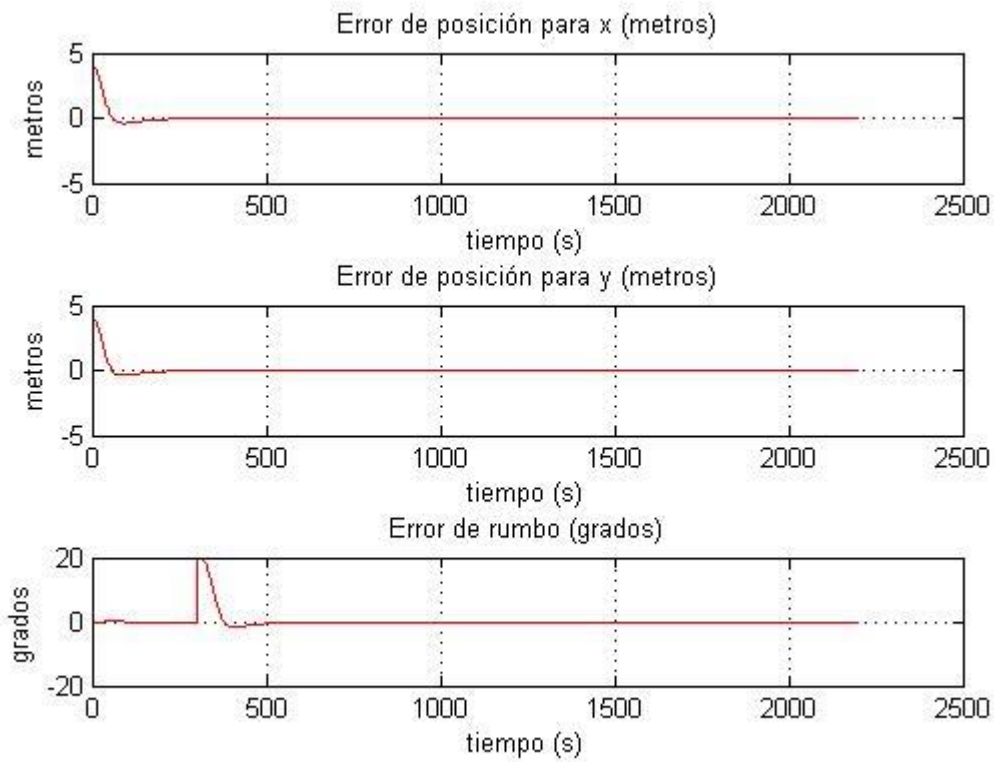


Figura 4-19. Error de posición y rumbo.

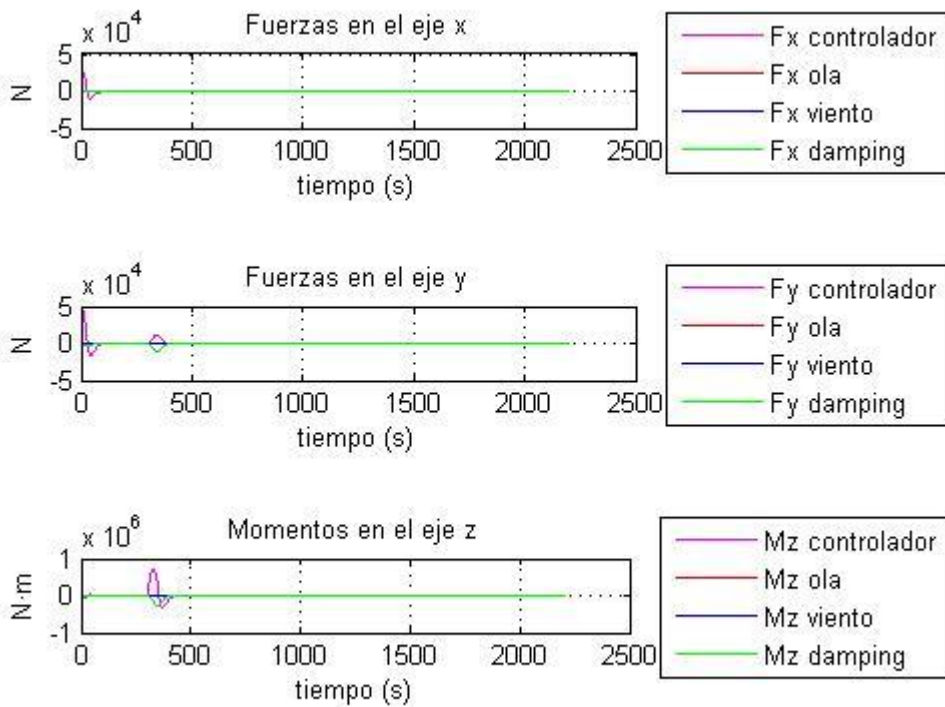


Figura 4-20. Fuerzas y momentos.

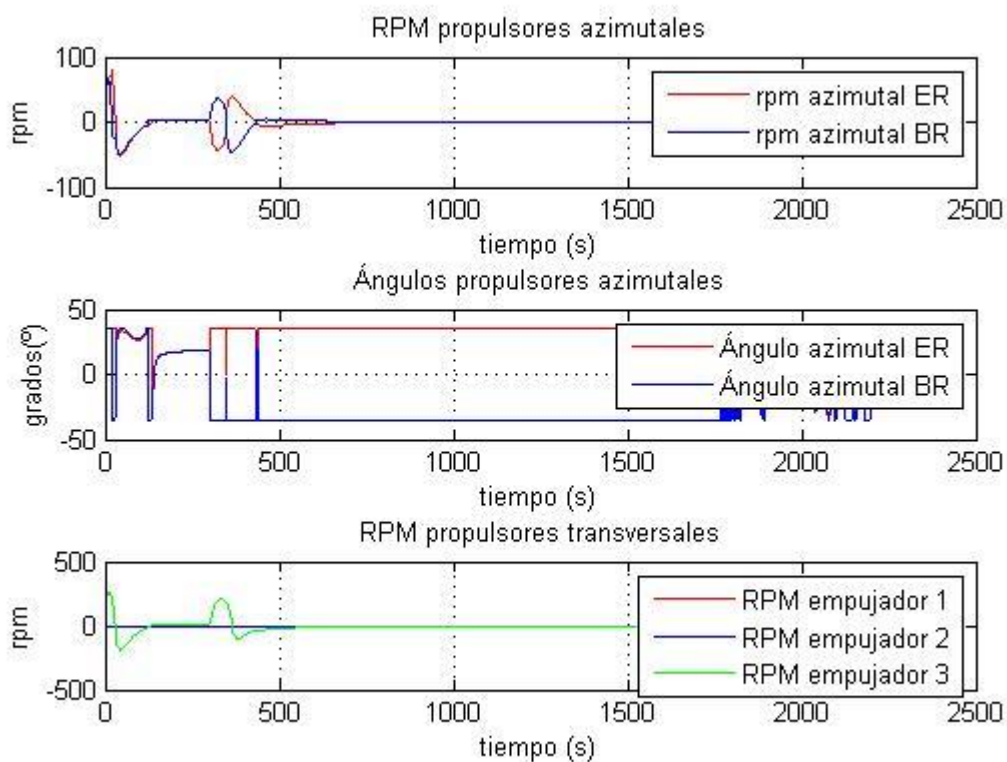


Figura 4-21. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.1.3 Retardo de 60 s

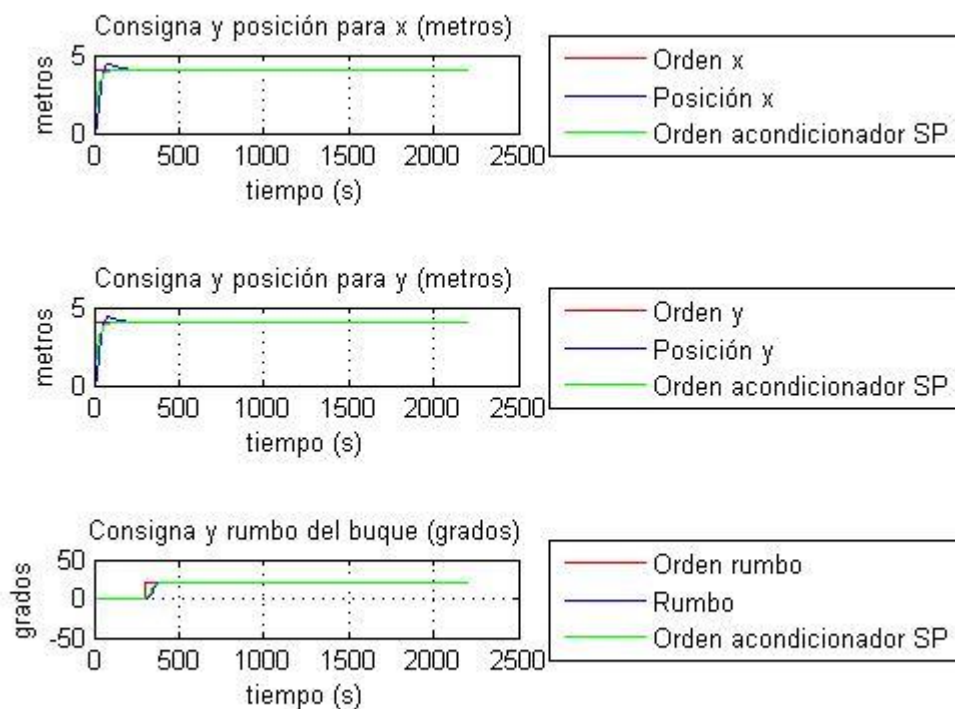


Figura 4-22. Referencia frente a posición y rumbo.

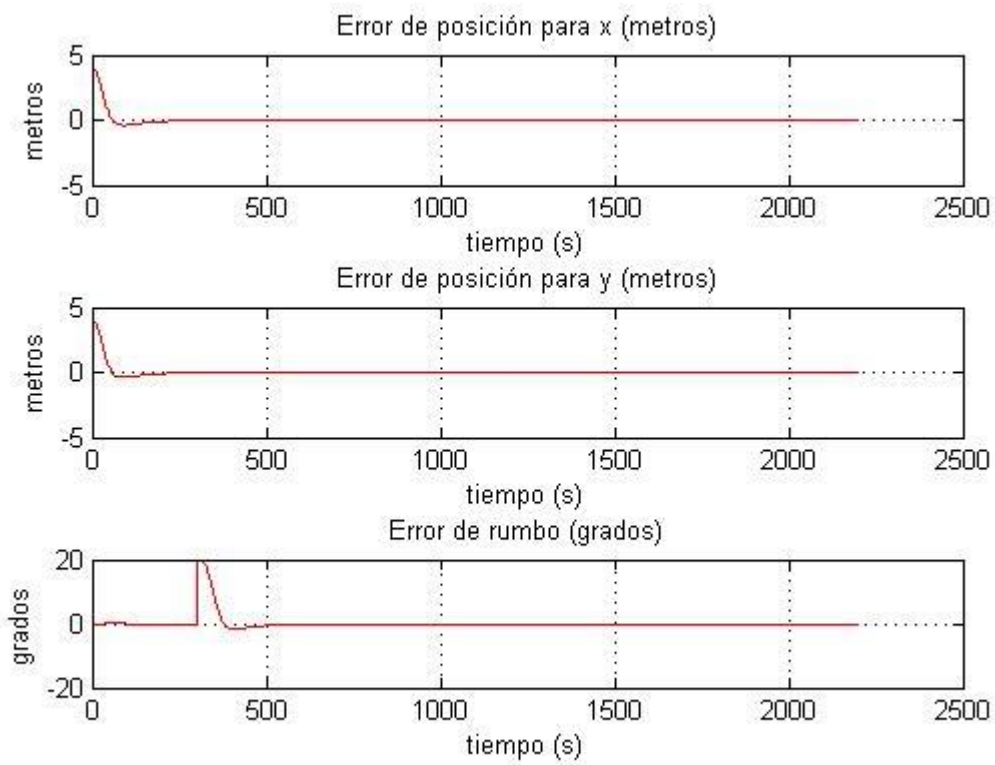


Figura 4-23. Error de posición y rumbo.

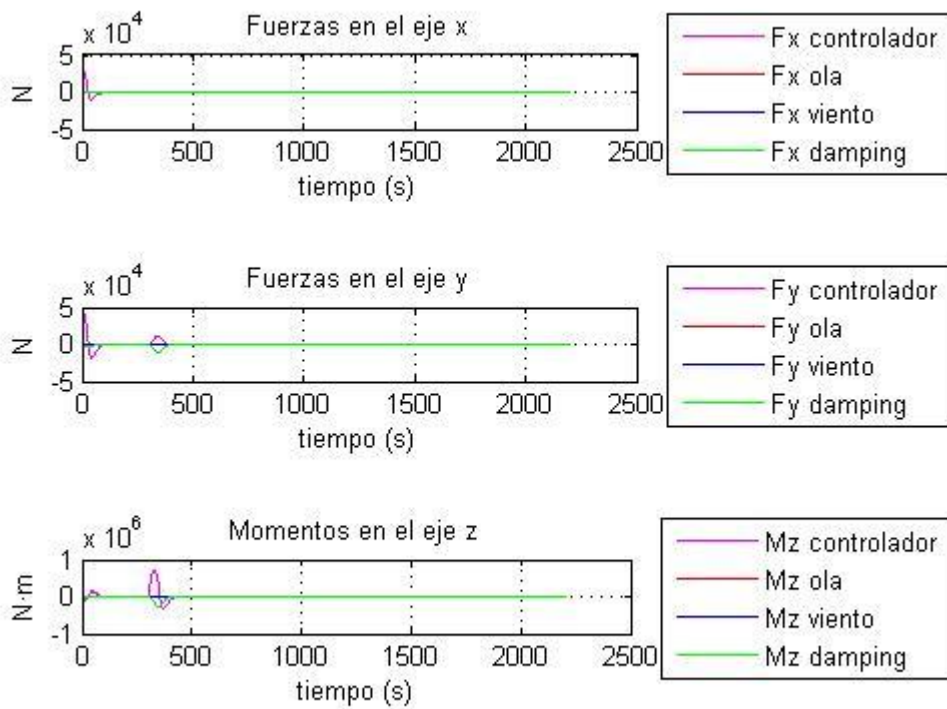


Figura 4-24. Fuerzas y momentos.

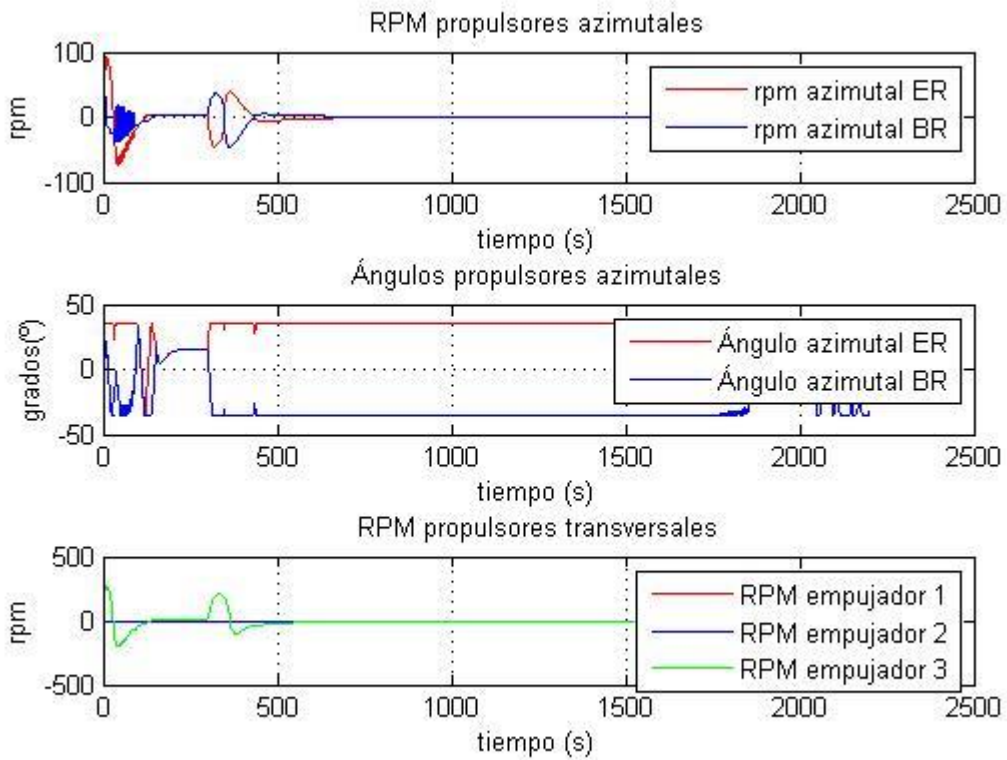


Figura 4-25. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.2 Escenario 1

4.2.2.1 Retardo de 10 s

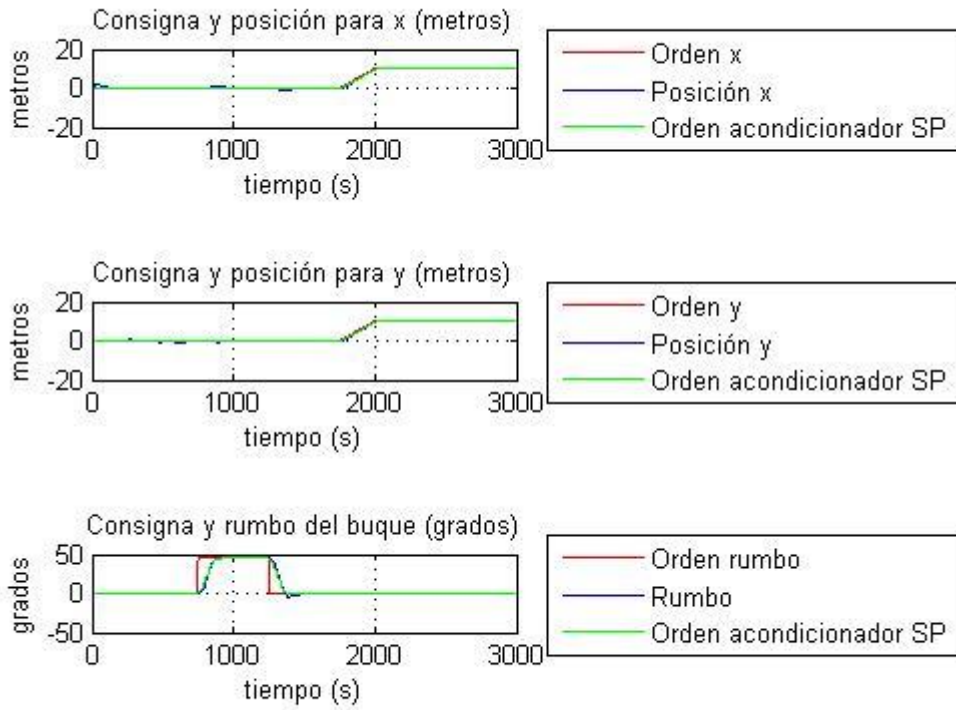


Figura 4-26. Referencia frente a posición y rumbo.

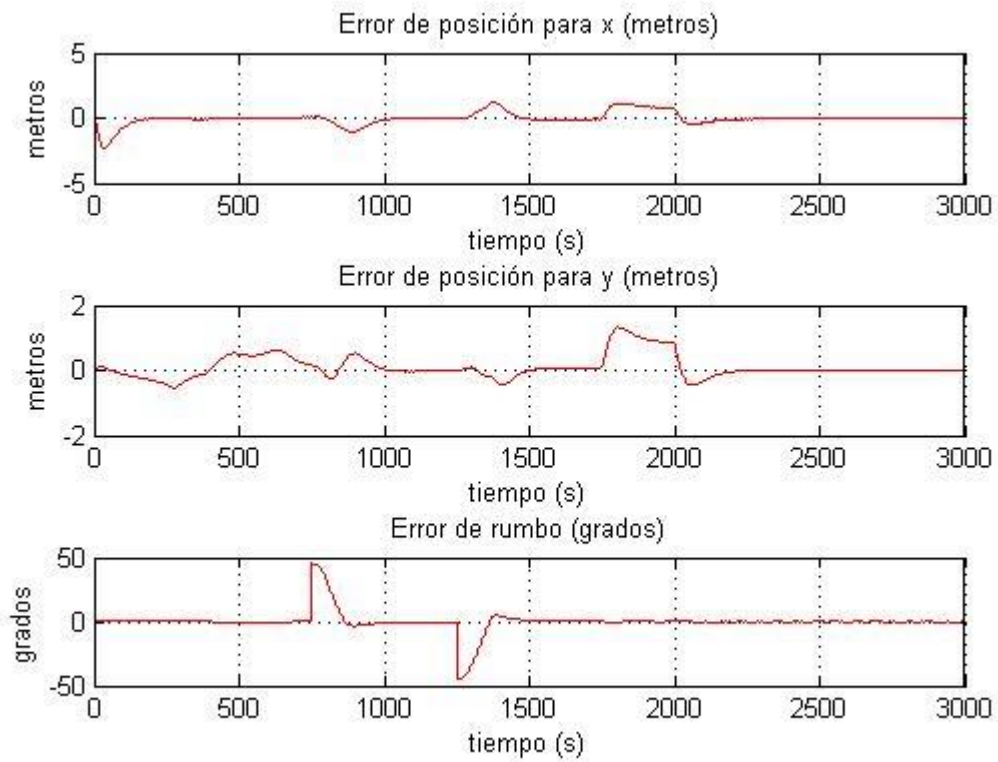


Figura 4-27. Error de posición y rumbo.

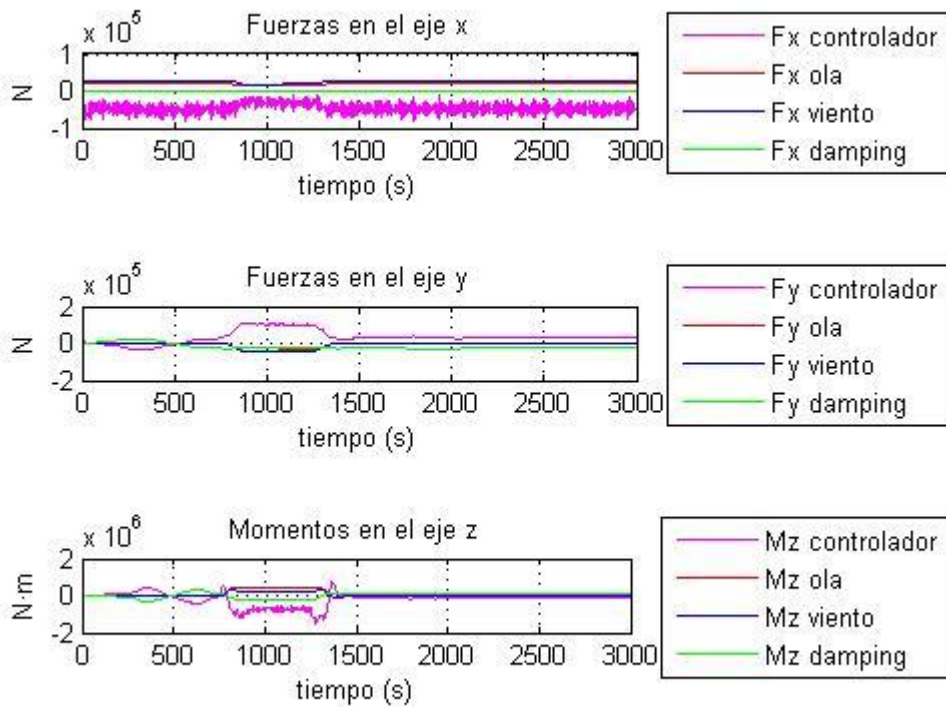


Figura 4-28. Fuerzas y momentos.

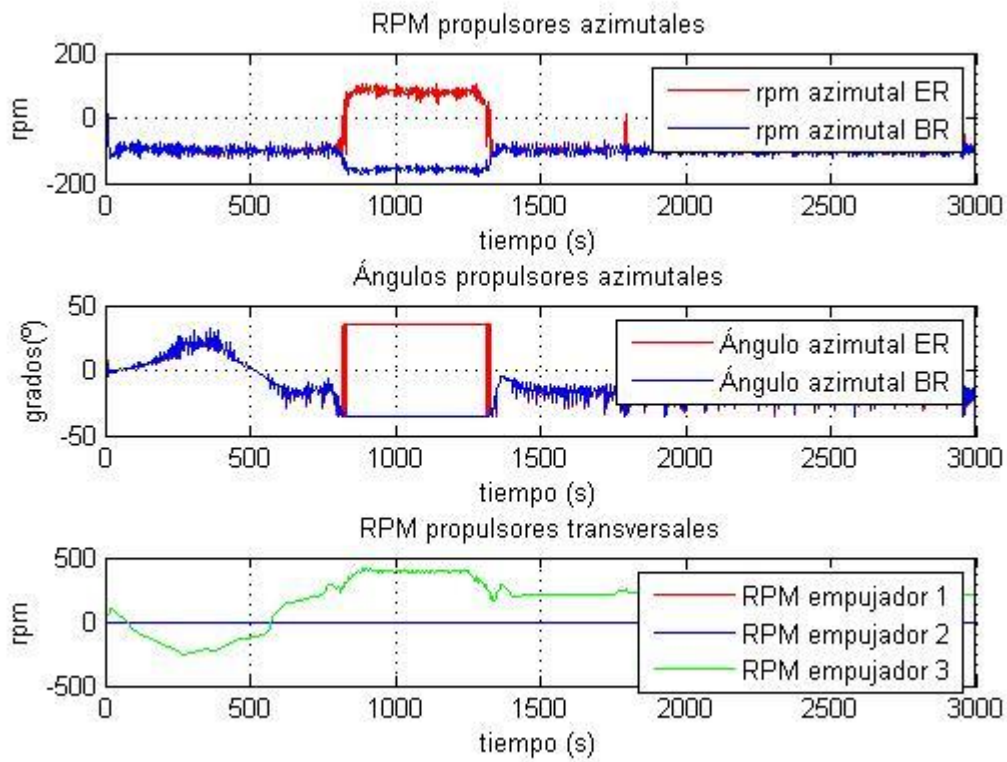


Figura 4-29. RPM y ángulos de los propulsores.

4.2.2.2 Retardo de 30 s

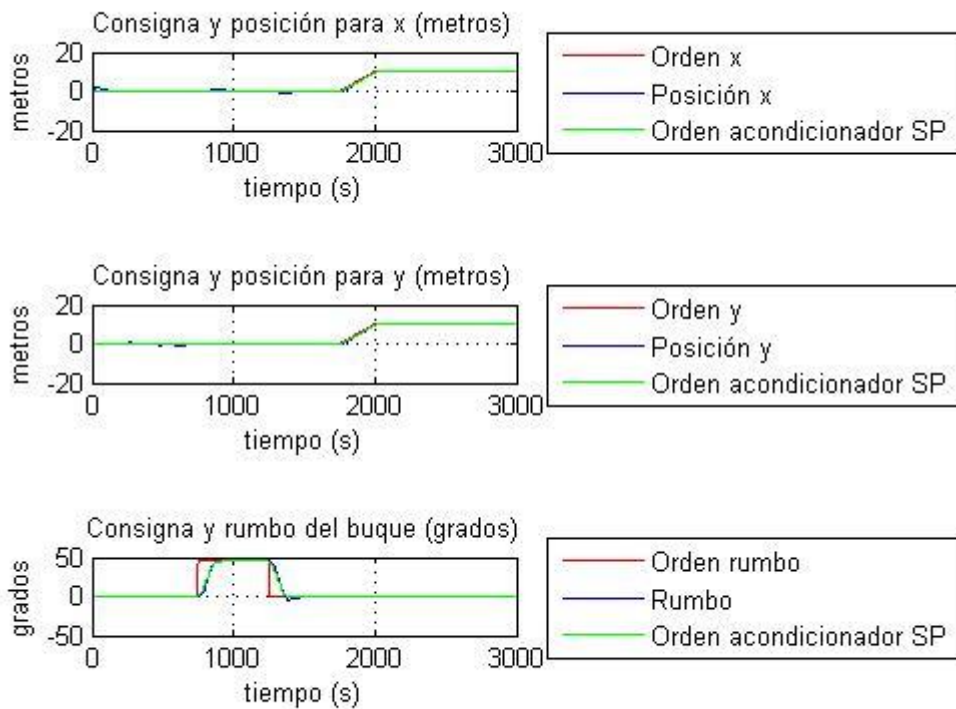


Figura 4-30. Referencia frente a posición y rumbo.

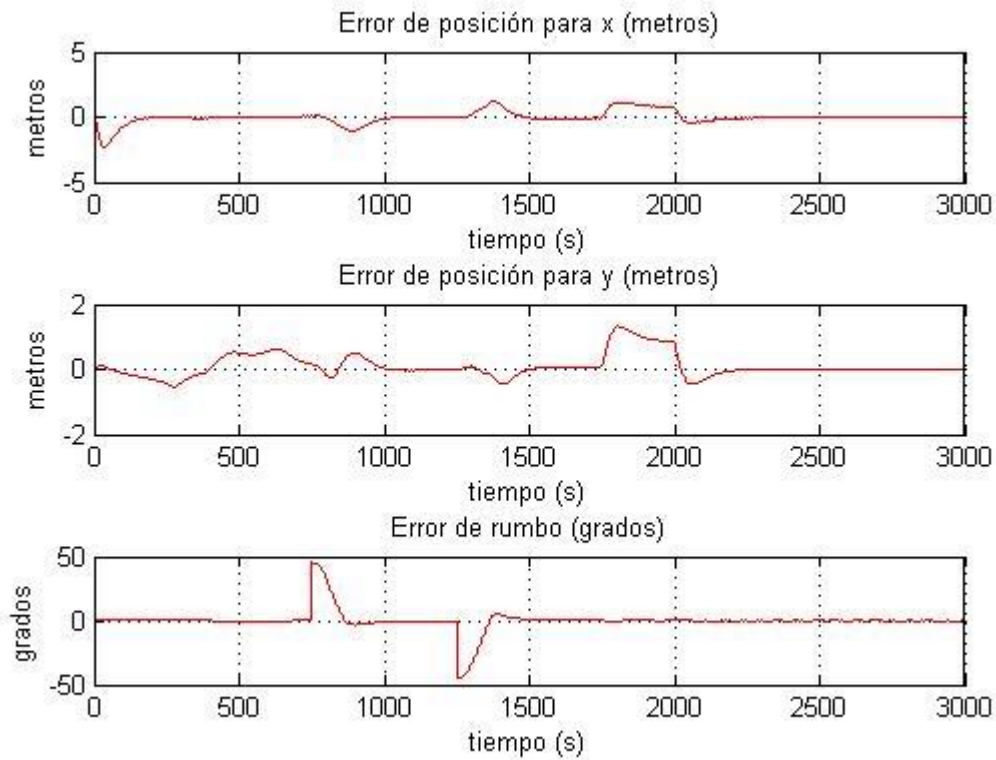


Figura 4-31. Error de posición y rumbo.

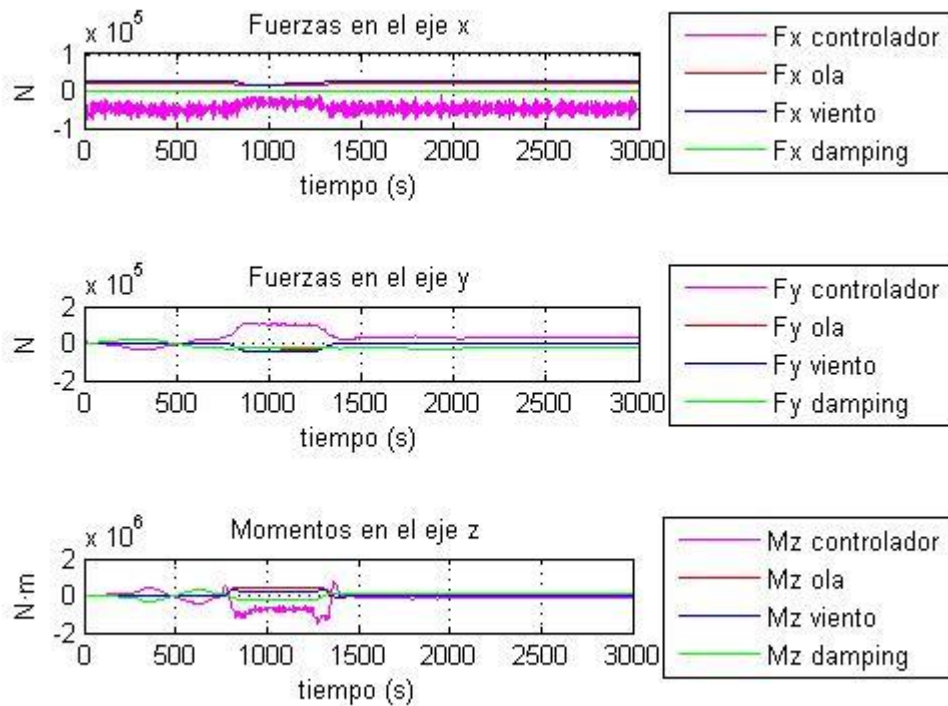


Figura 4-32. Fuerzas y momentos.

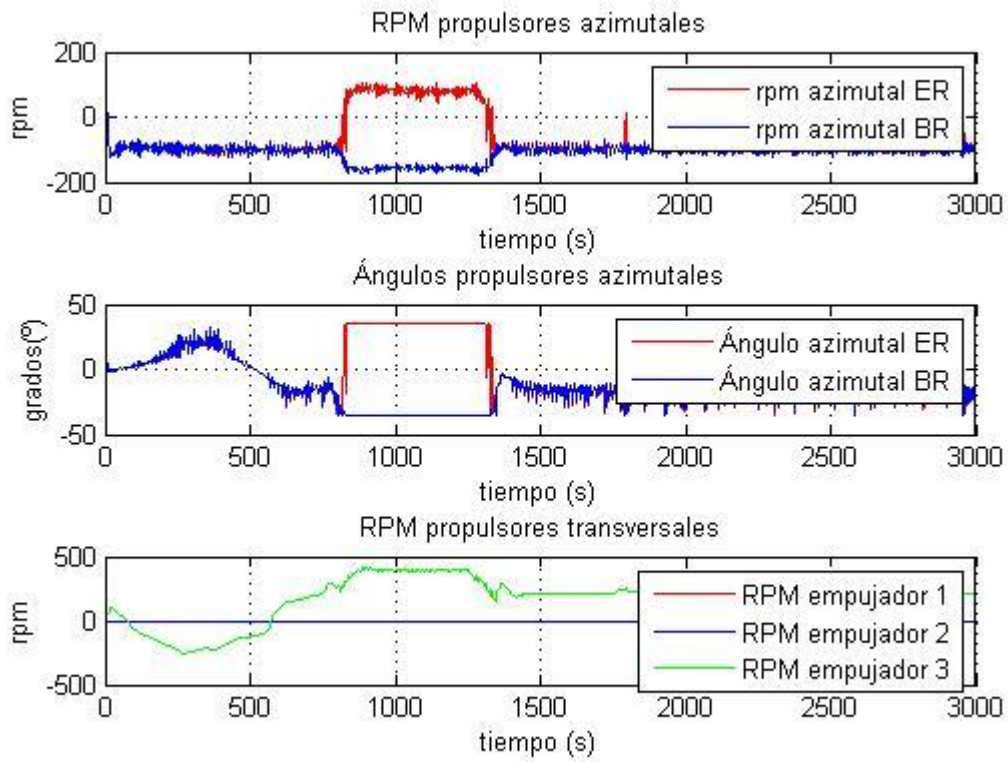


Figura 4-33. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.2.3 Retardo de 60 s

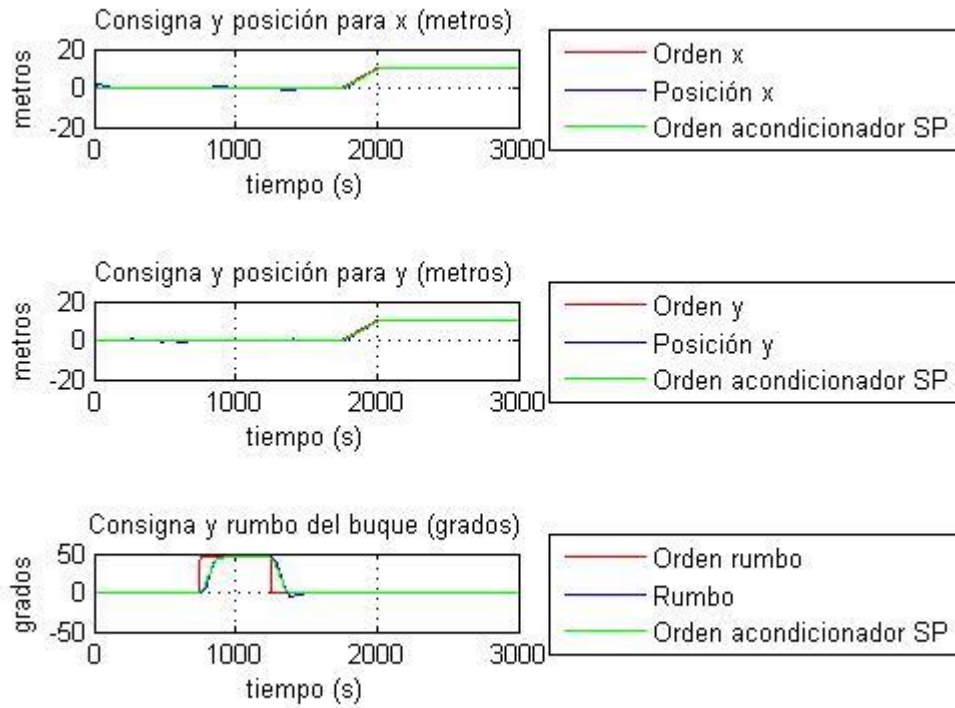


Figura 4-34. Referencia frente a posición y rumbo.

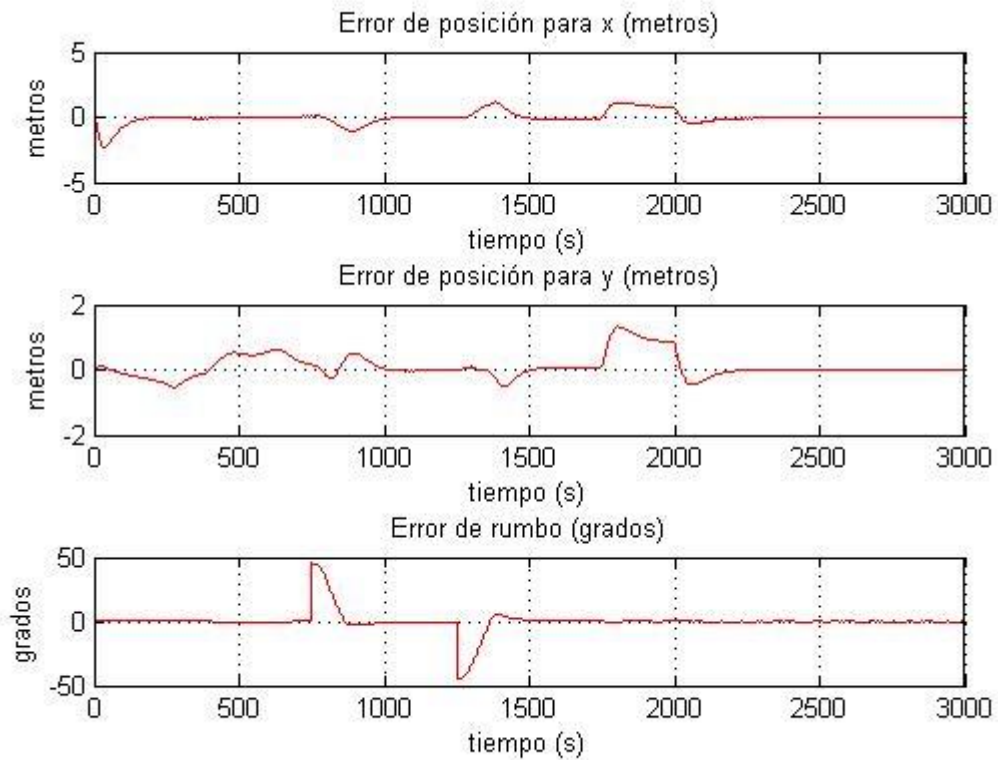


Figura 4-35. Error de posición y rumbo.

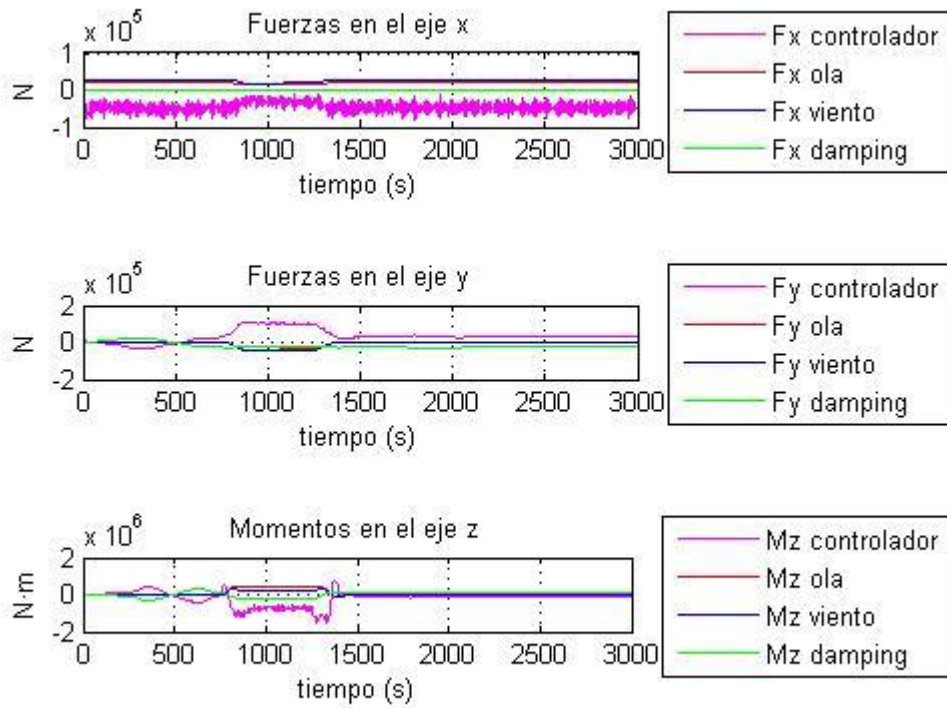


Figura 4-36. Fuerzas y momentos.

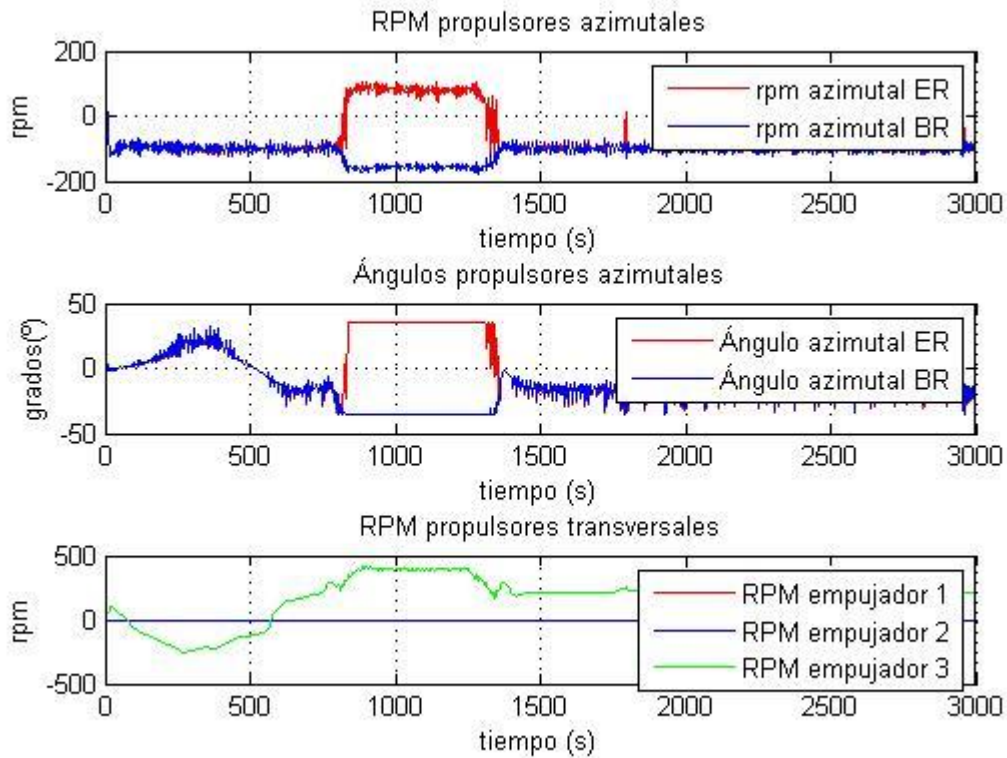


Figura 4-37. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.3 Escenario 2

4.2.3.1 Retardo de 10 s

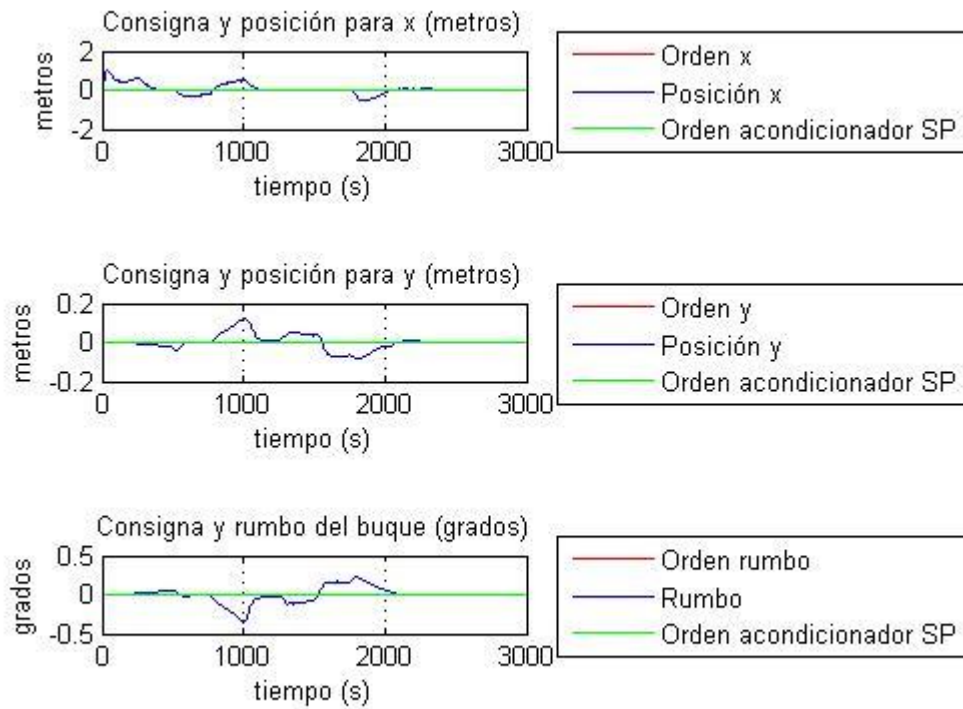


Figura 4-38. Referencia frente a posición y rumbo.

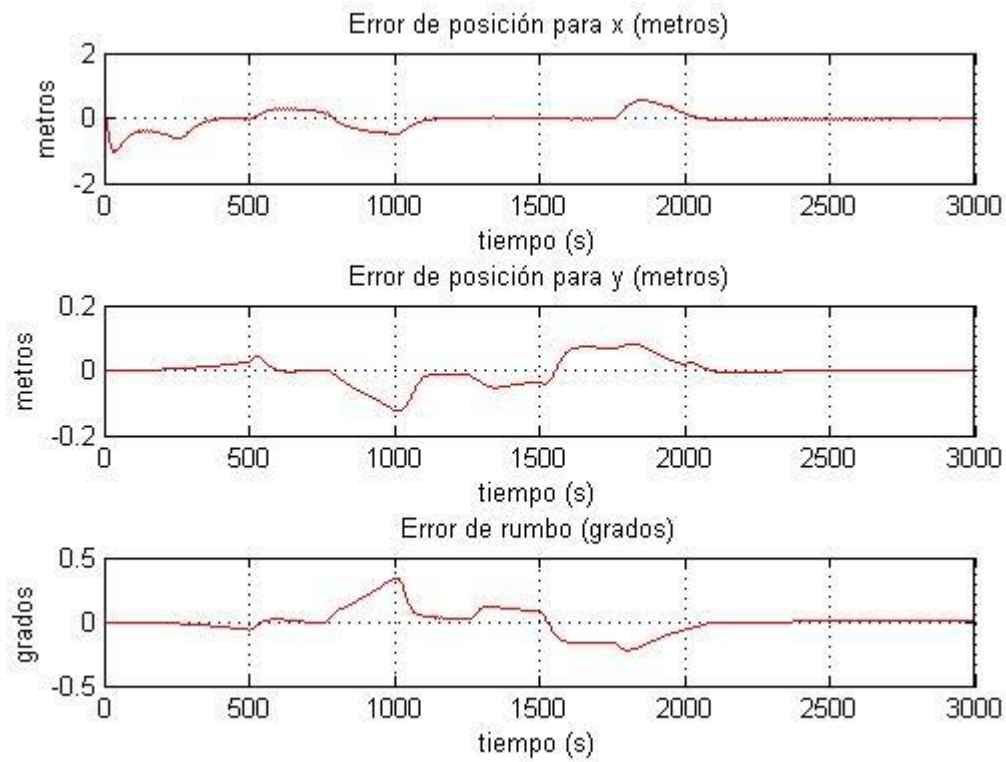


Figura 4-39. Error de posición y rumbo.

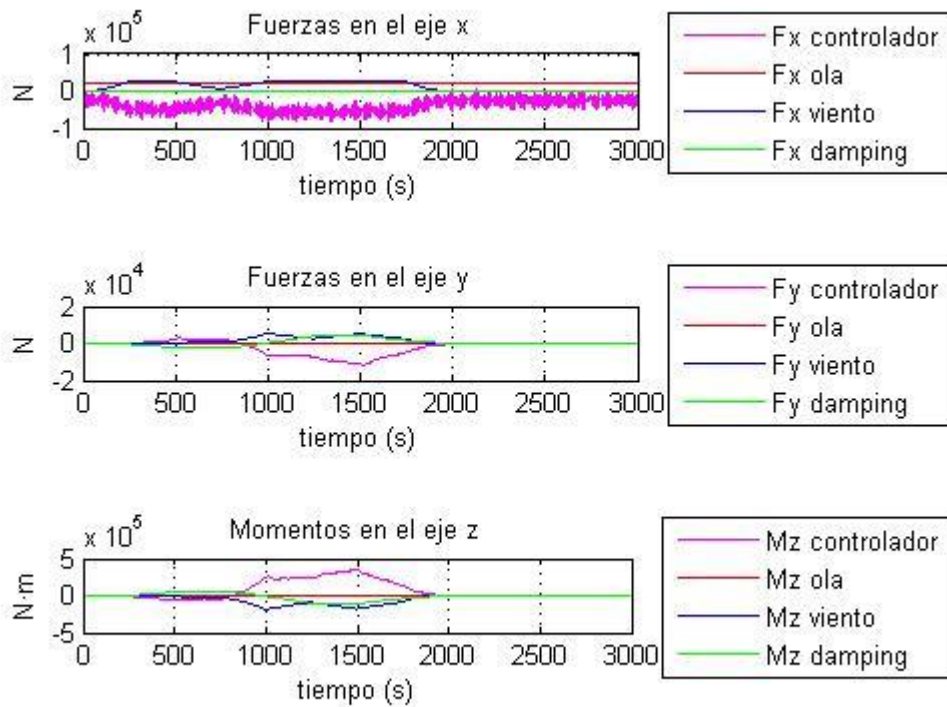


Figura 4-40. Fuerzas y momentos.

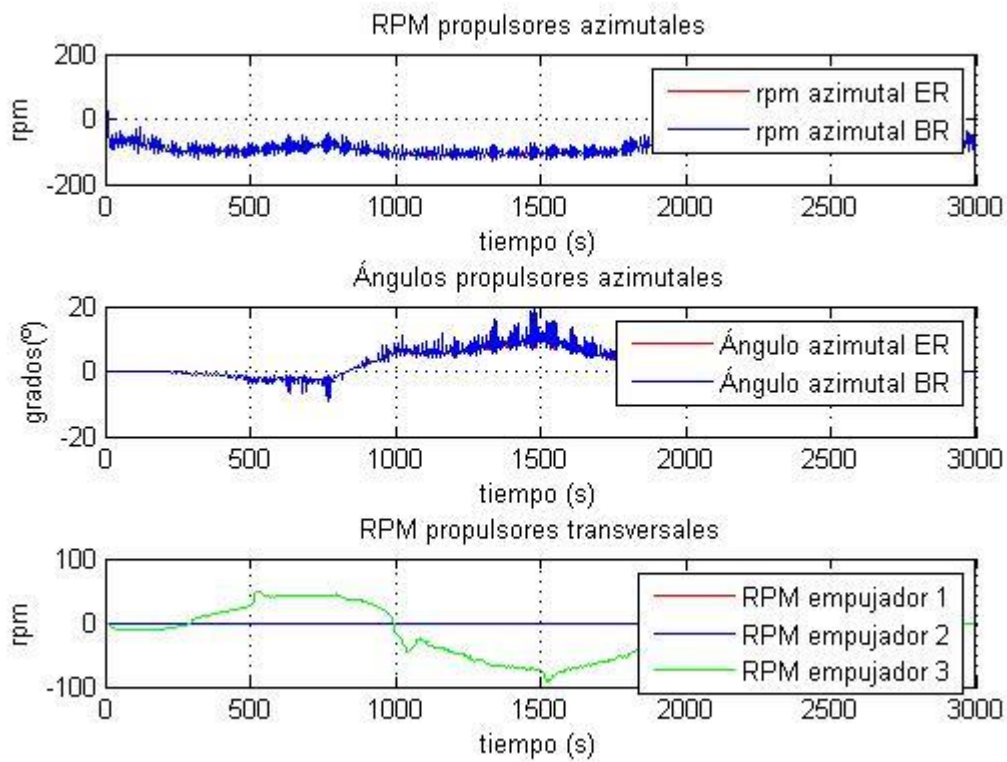


Figura 4-41. RPM y ángulos de los azimutales.

4.2.3.2 Retardo de 30 s

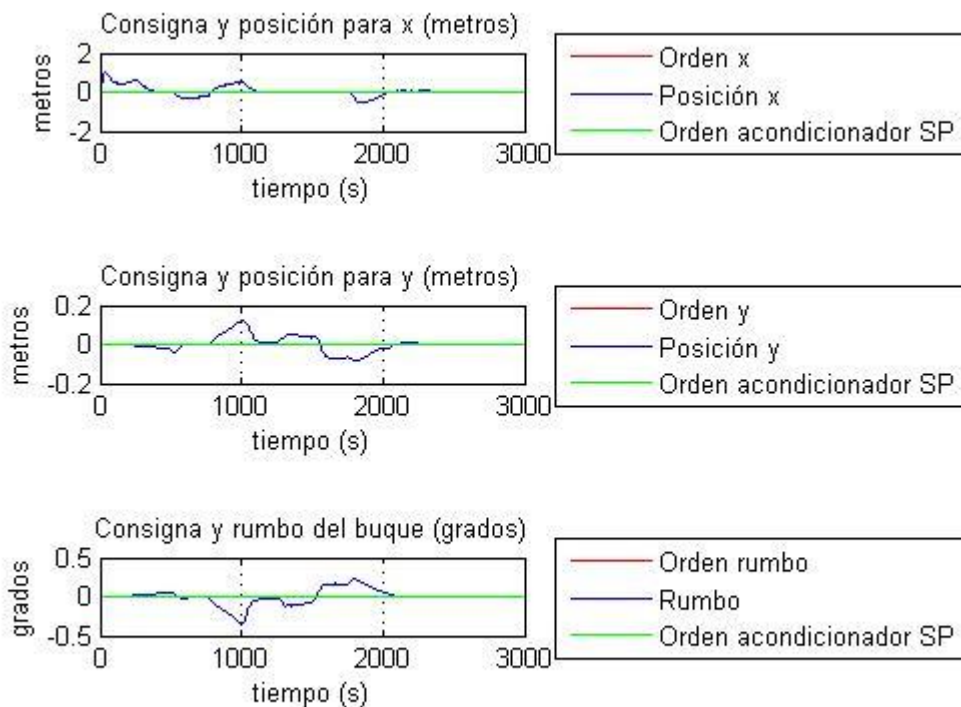


Figura 4-42. Referencia frente a posición y rumbo.

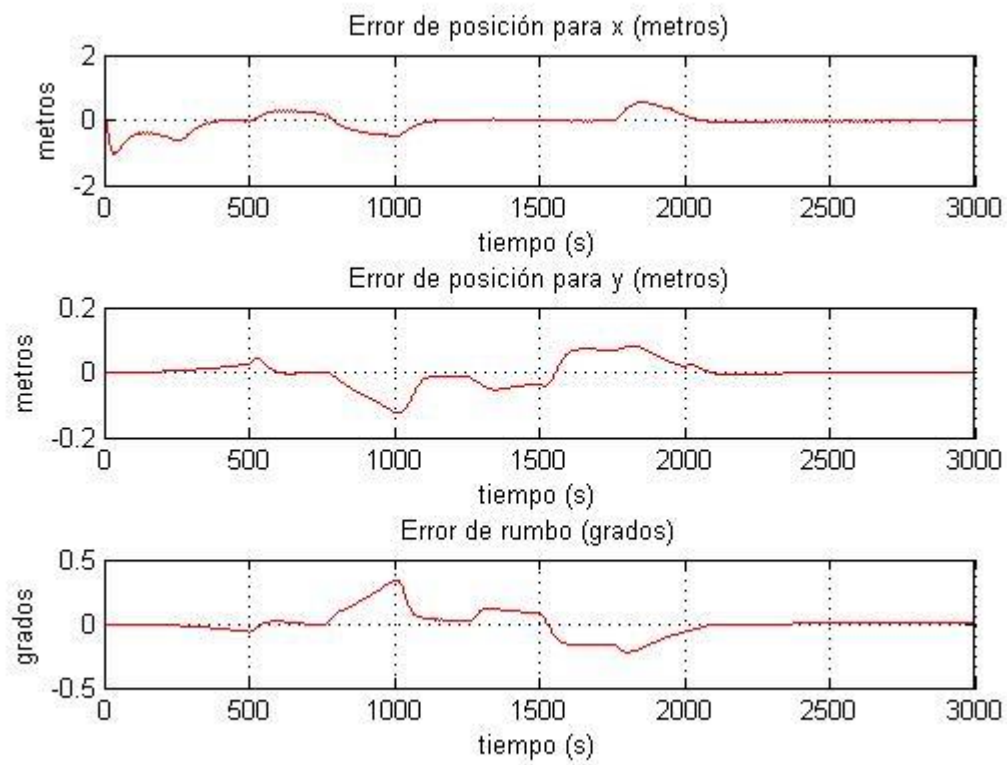


Figura 4-43. Error de posición y rumbo.

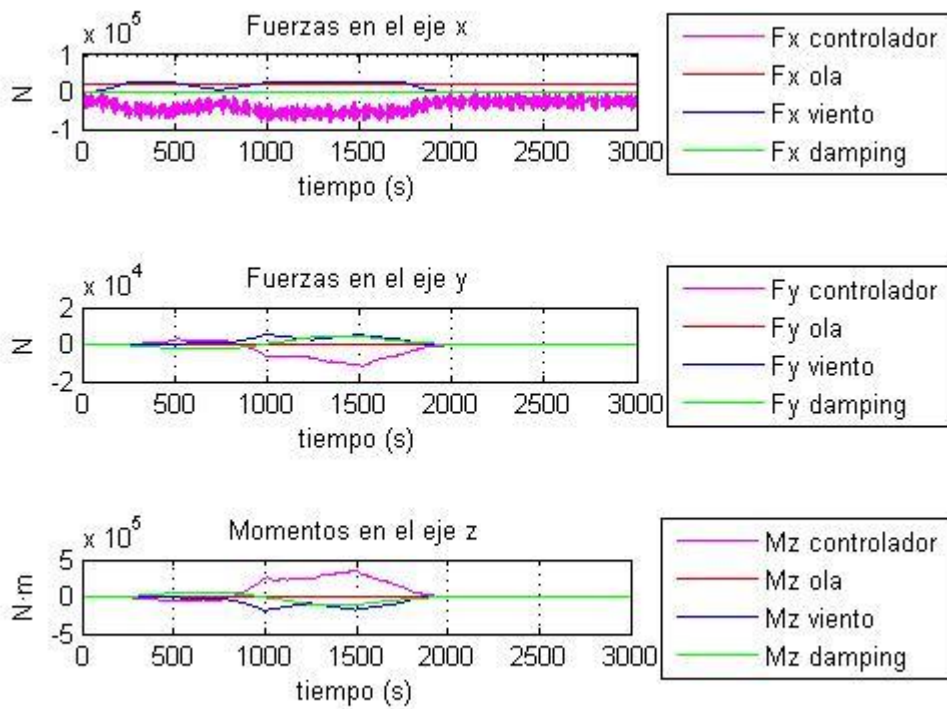


Figura 4-44. Fuerzas y momentos.

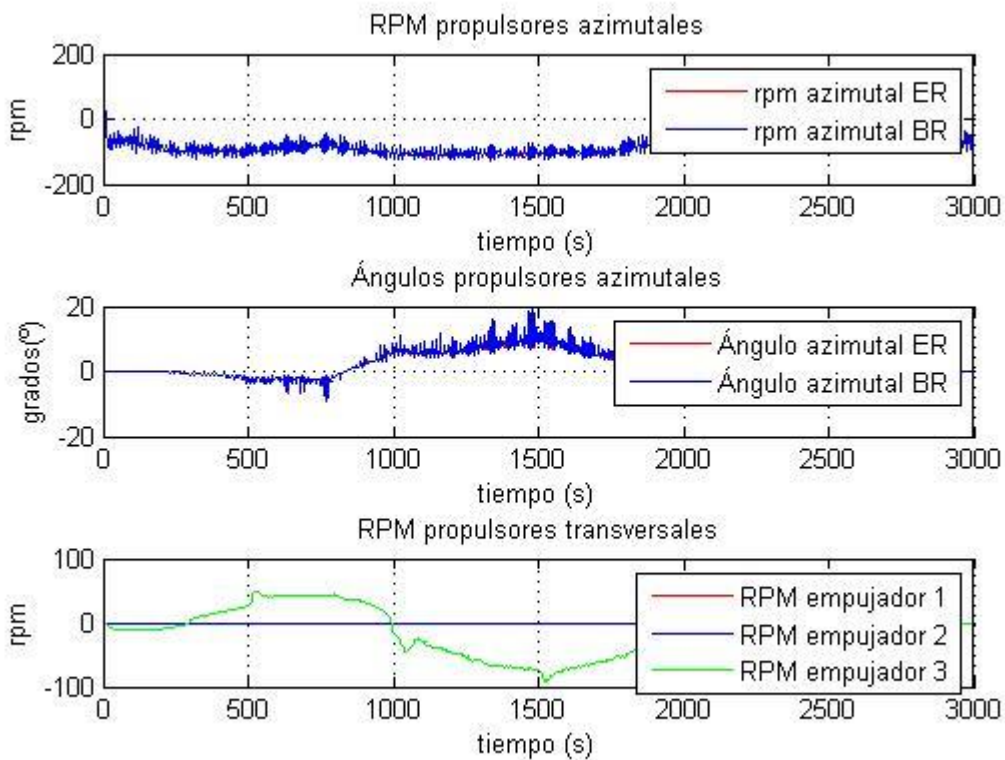


Figura 4-45. RPM y ángulos de los propulsores.

4.2.3.3 Retardo de 60 s

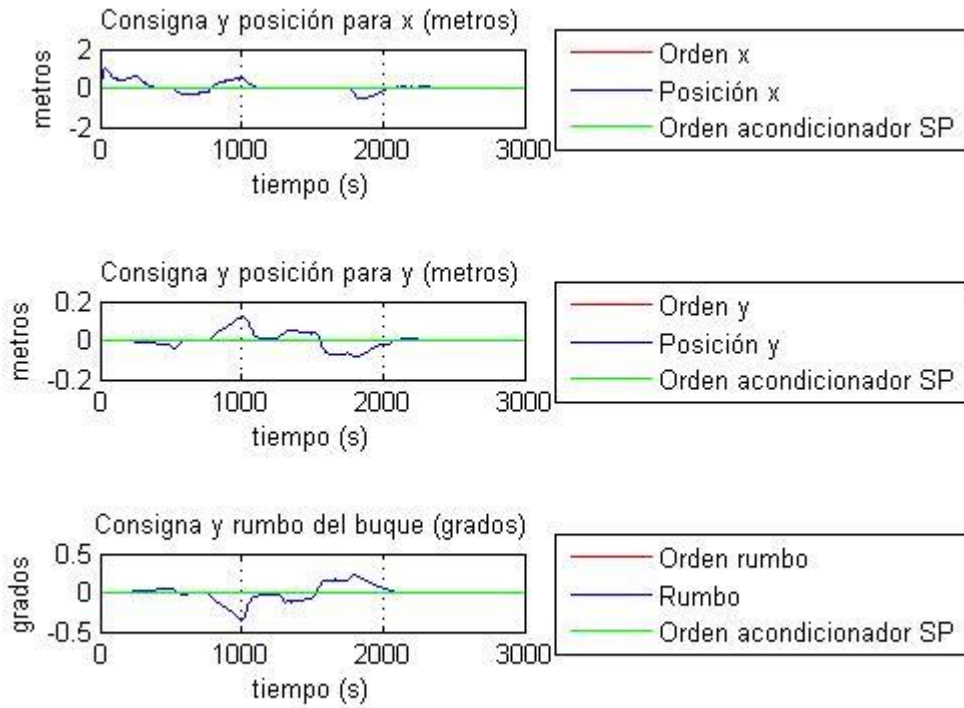


Figura 4-46. Referencia frente a posición y rumbo.

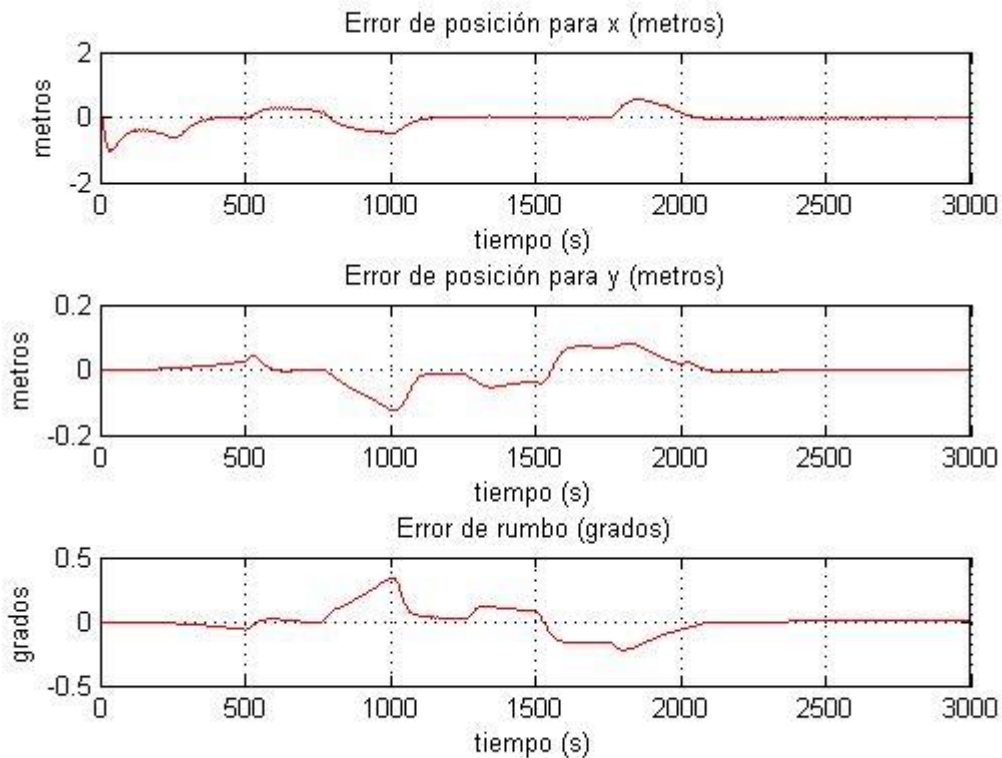


Figura 4-47. Error de posición y rumbo.

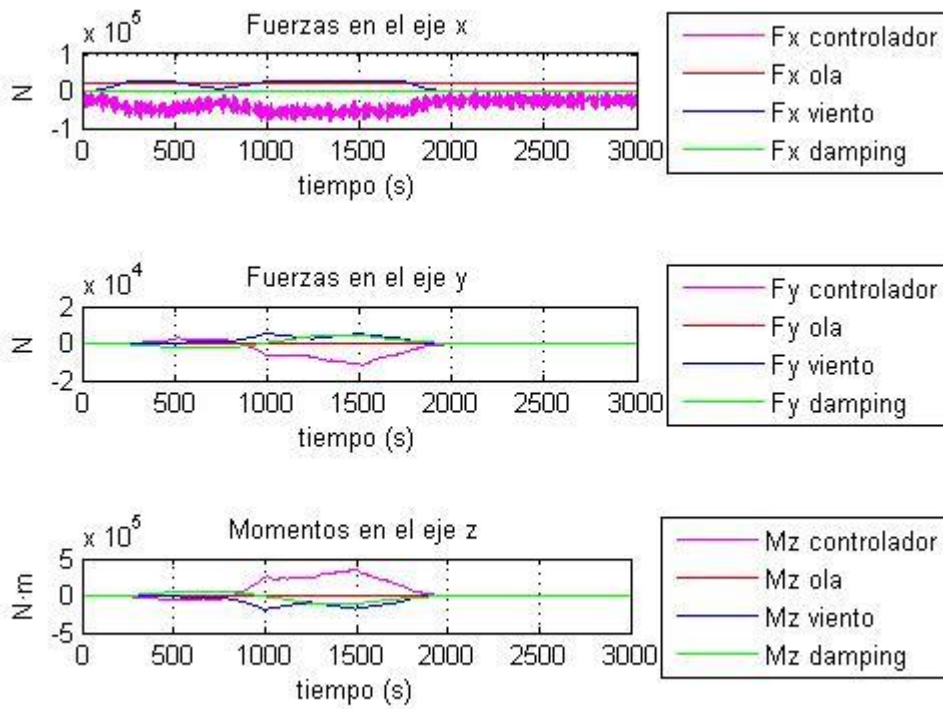


Figura 4-48. Fuerzas y momentos.

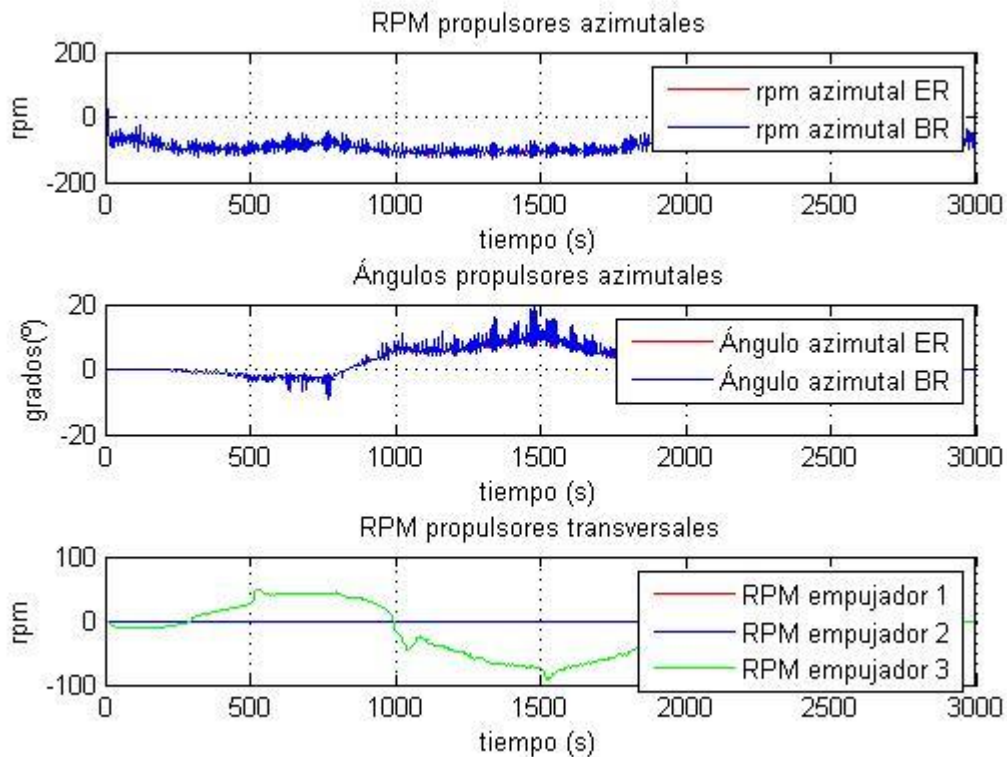


Figura 4-49. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3 Resultados para solución mixta

La última solución que se plantea para resolver el problema de Thruster Allocation, no es más que una fusión de las dos soluciones mostradas previamente. Se busca, por tanto, obtener del algoritmo de α constante únicamente las fuerzas de los distintos propulsores, y del algoritmo de α variable, los ángulos de los propulsores azimutales. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

4.3.1 Test consigna

4.3.1.1 Retardo de 10 s

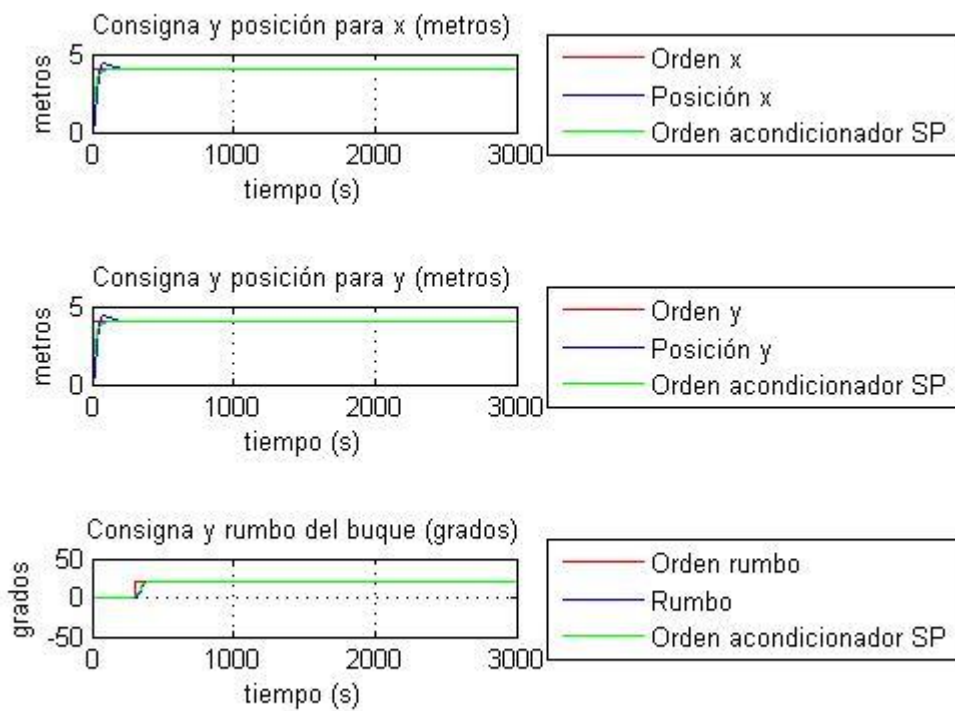


Figura 4-50. Referencia frente a posición y rumbo.

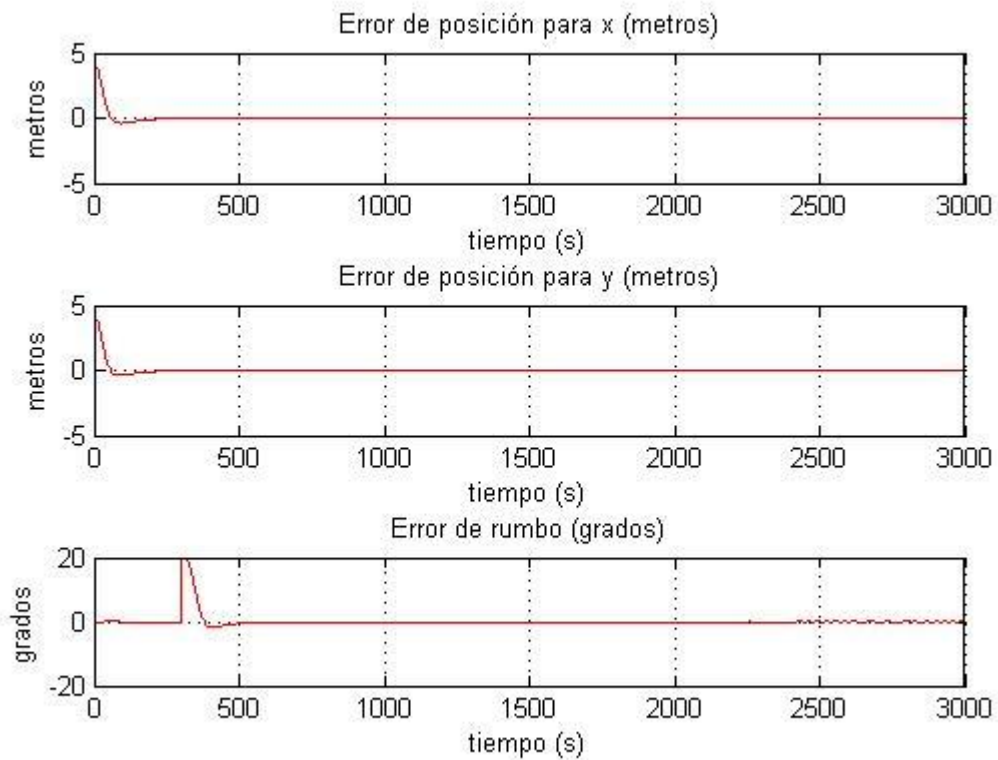


Figura 4-51. Error de posición y rumbo.

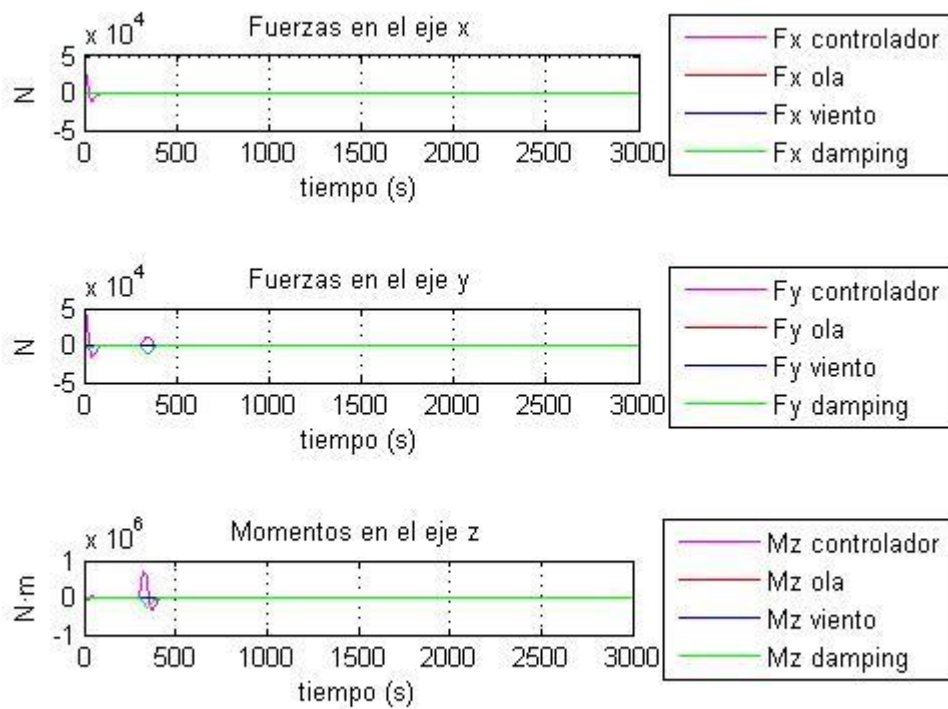


Figura 4-52. Fuerzas y momentos.

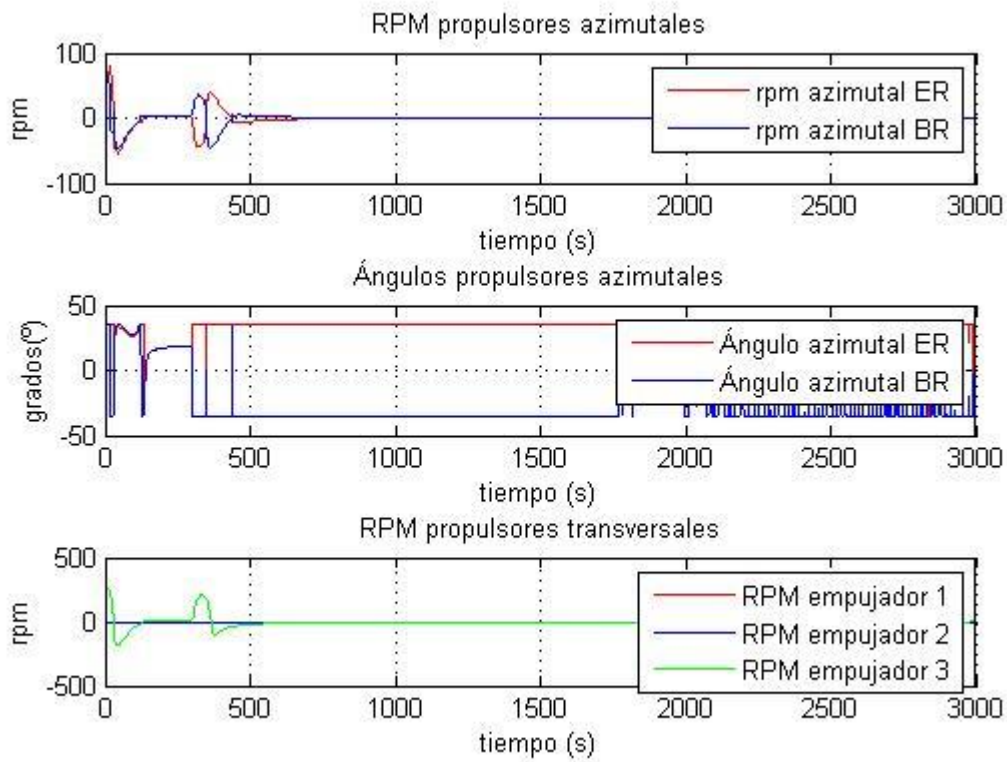


Figura 4-53. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.1.2 Retardo de 30 s

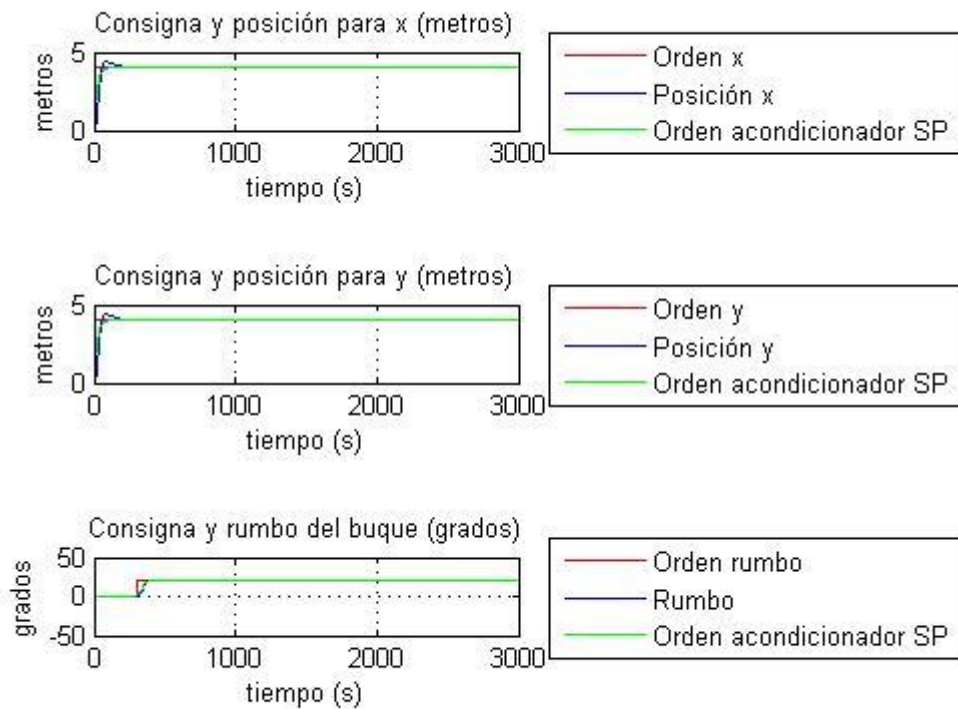


Figura 4-54. Referencia frente a posición y rumbo.

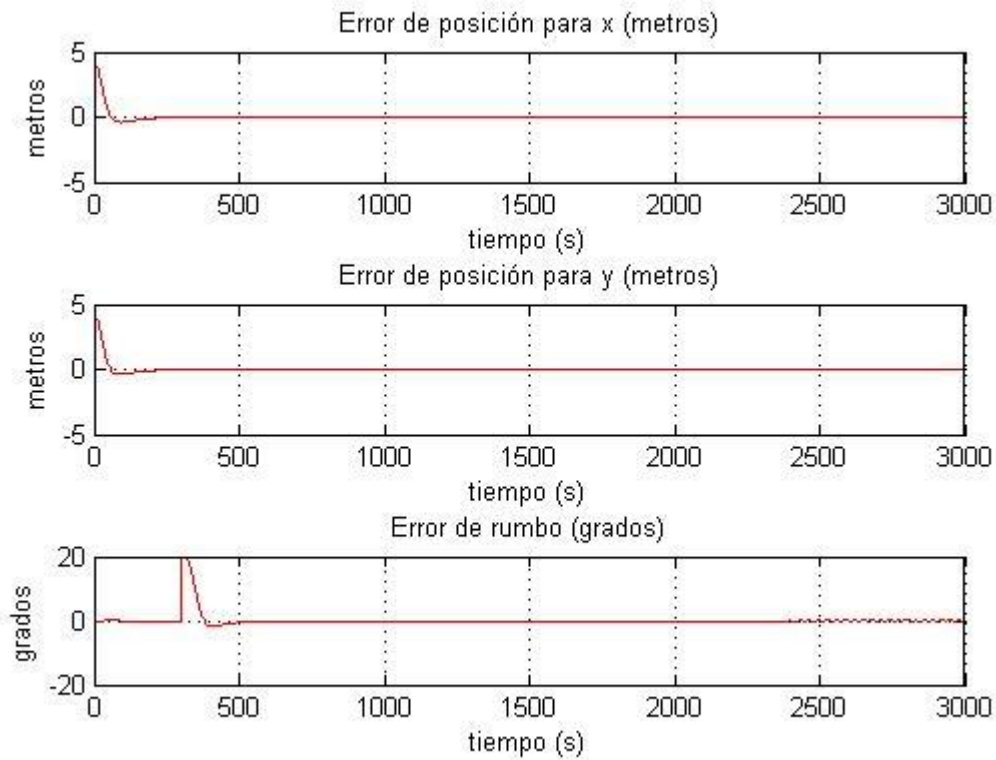


Figura 4-55. Error de posición y rumbo.

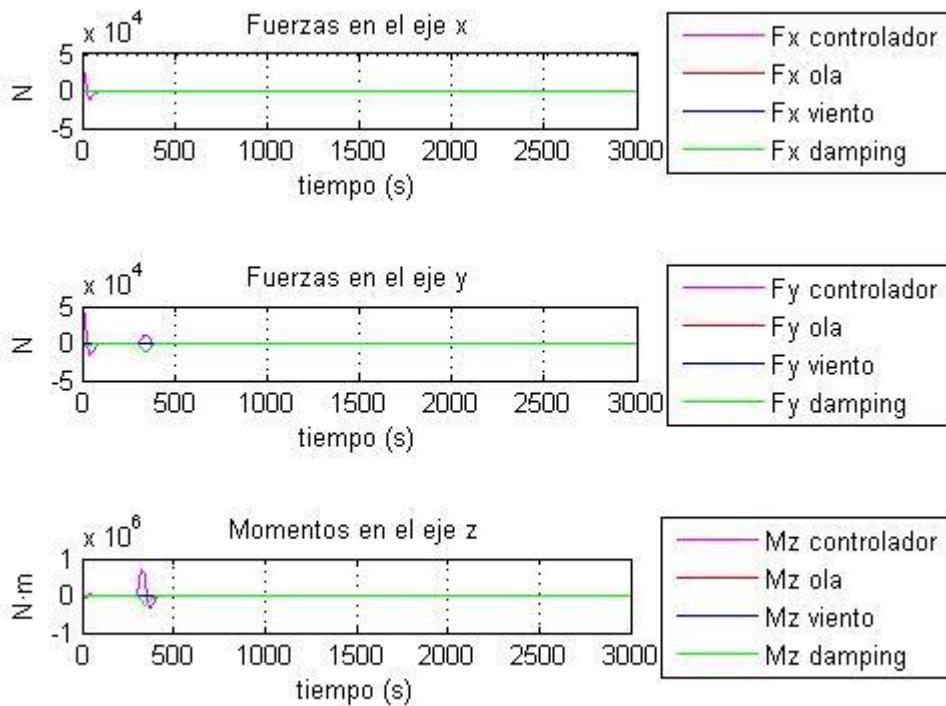


Figura 4-56. Fuerzas y momentos.

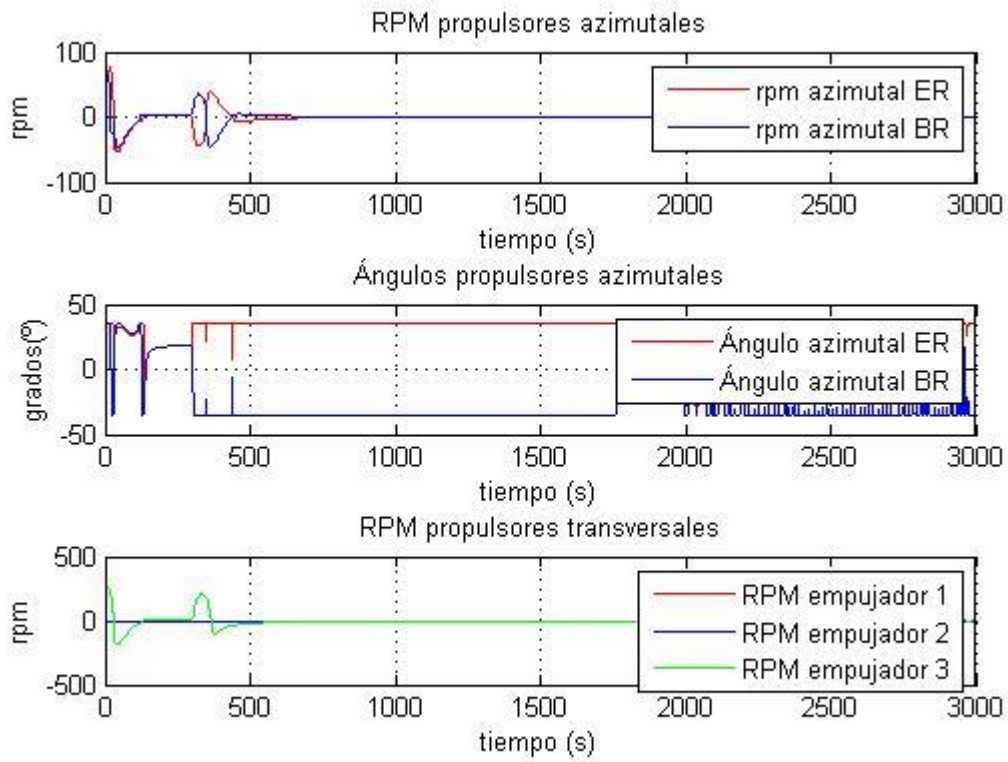


Figura 4-57. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.1.3 Retardo de 60 s

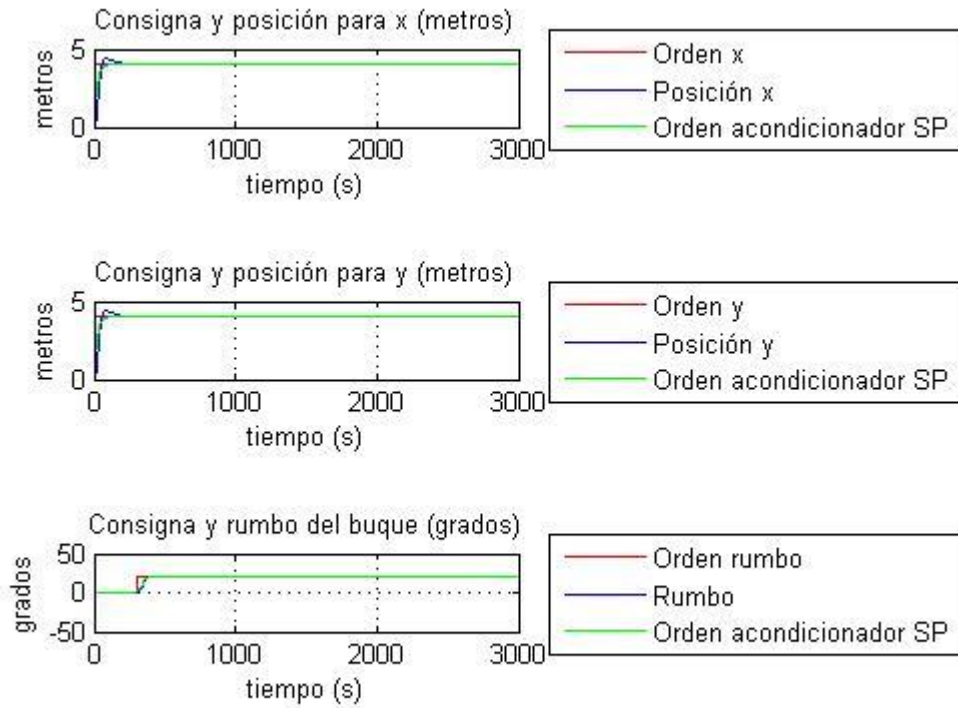


Figura 4-58. Referencia frente a posición y rumbo.

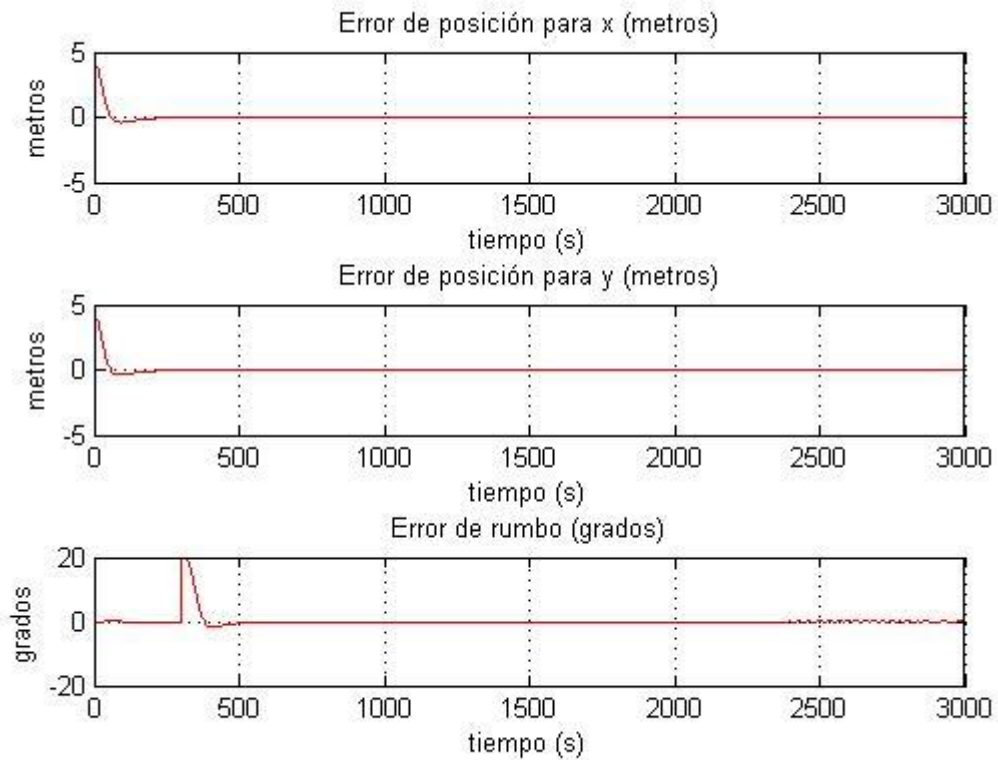


Figura 4-59. Error de posición y rumbo.

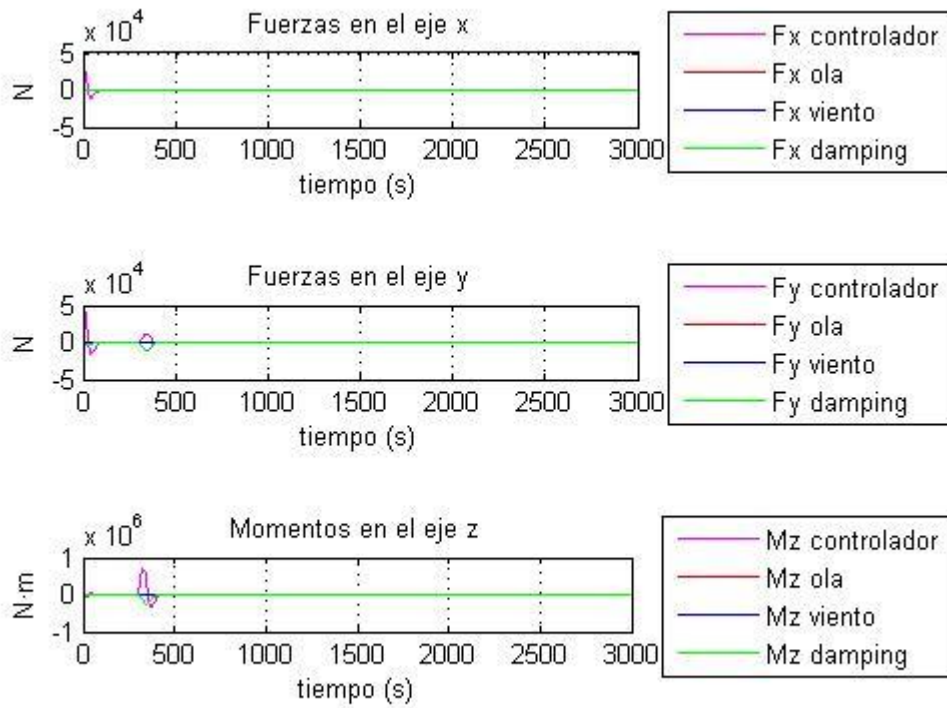


Figura 4-60. Fuerzas y momentos.

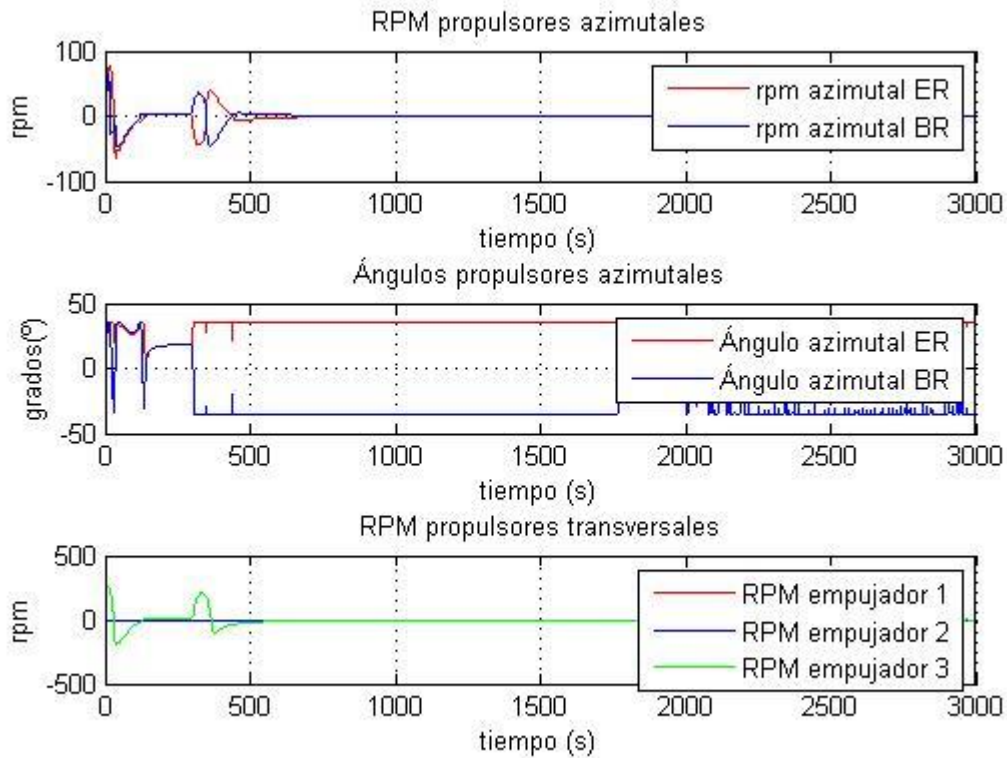


Figura 4-61. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.2 Escenario 1

4.3.2.1 Retardo de 10 s

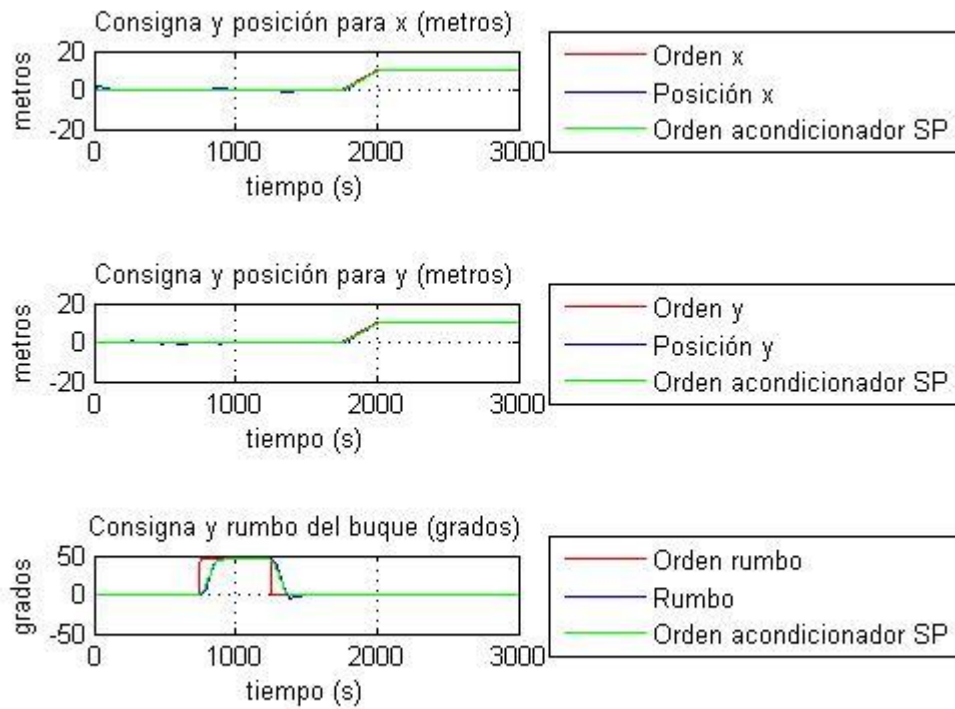


Figura 4-62. Referencia frente a posición y rumbo.

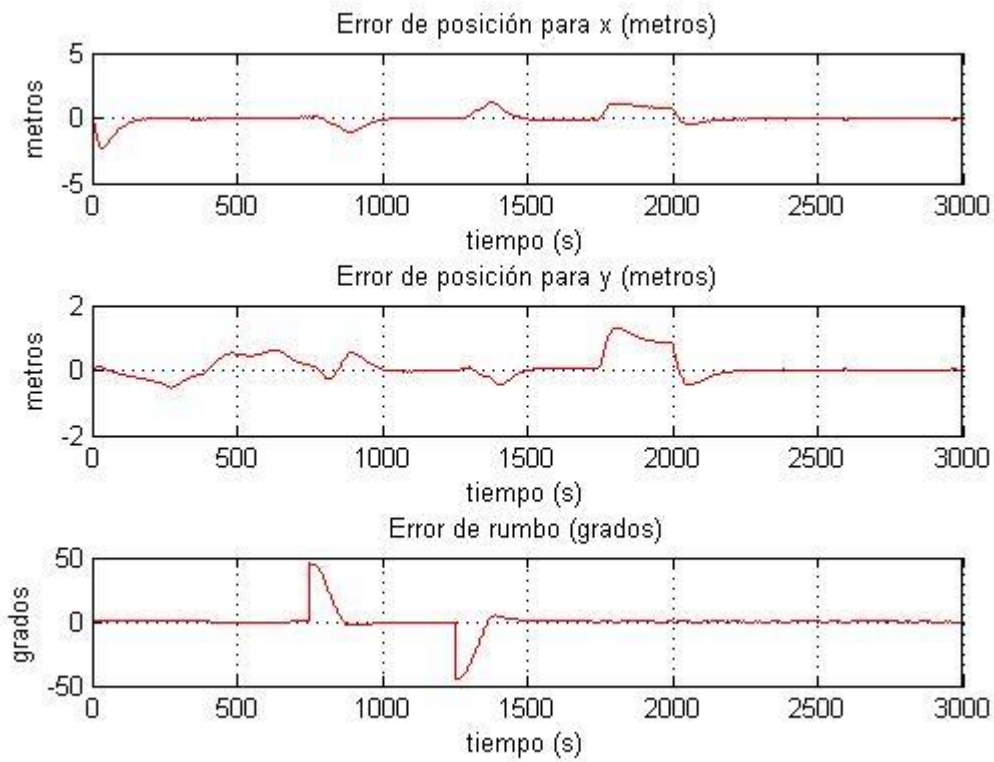


Figura 4-63. Error de posición y rumbo.

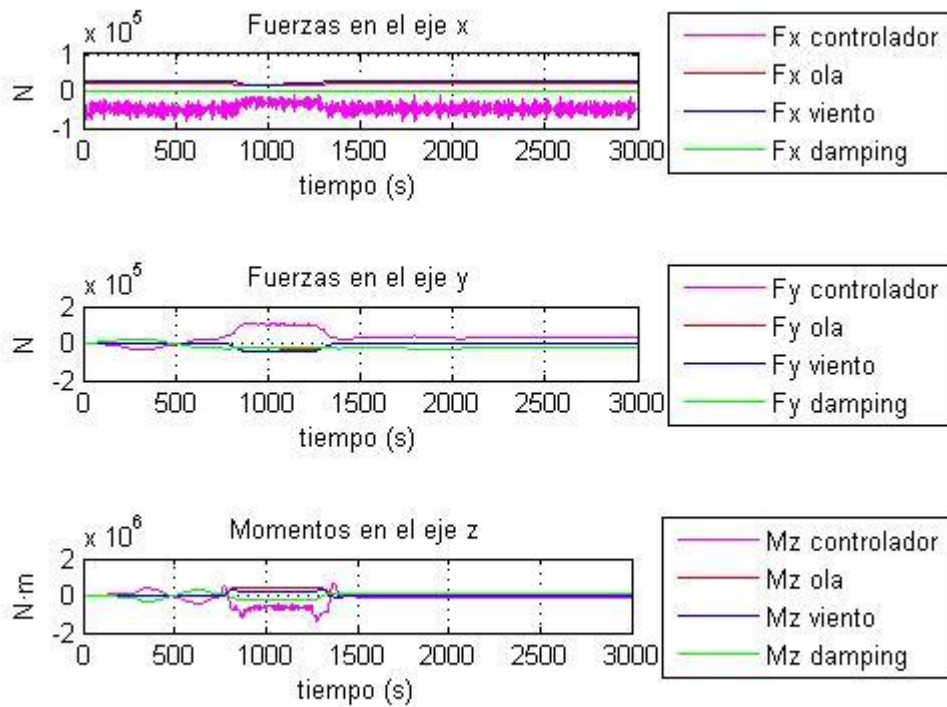


Figura 4-64. Fuerzas y momentos.

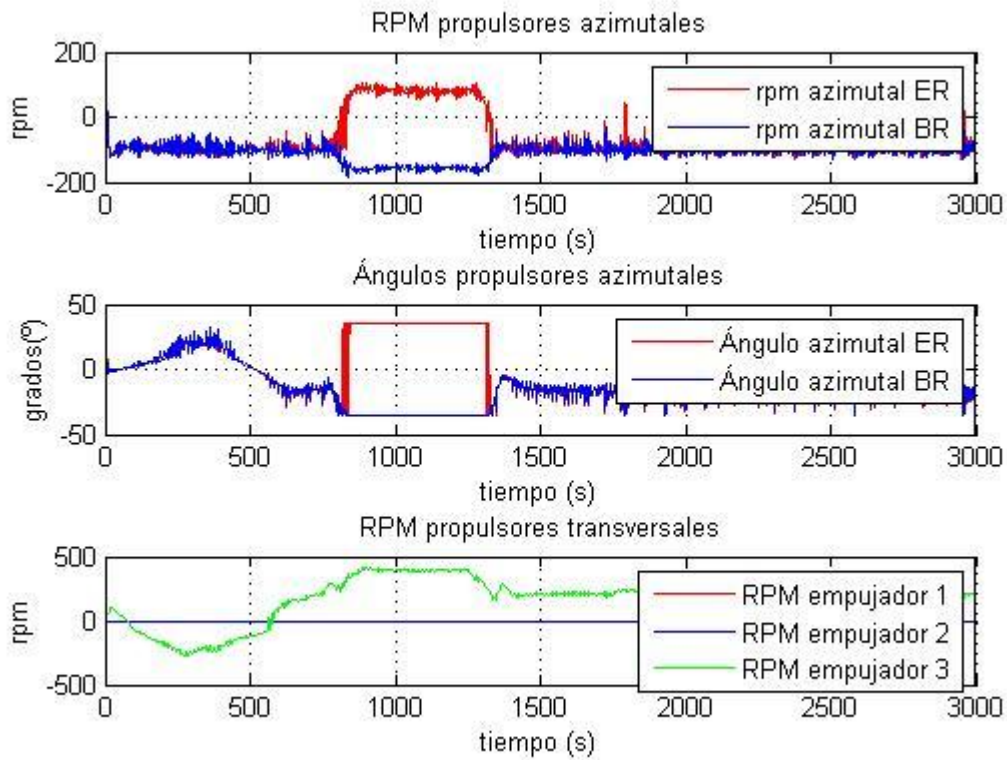


Figura 4-65. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.2.2 Retardo de 30 s

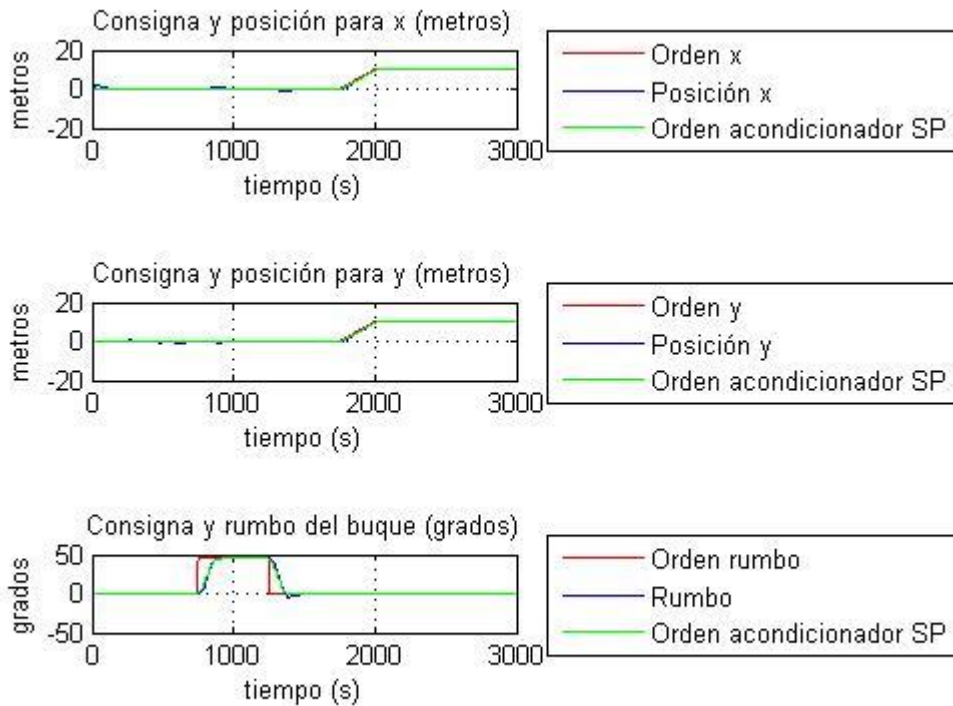


Figura 4-66. Referencia frente a posición y rumbo.

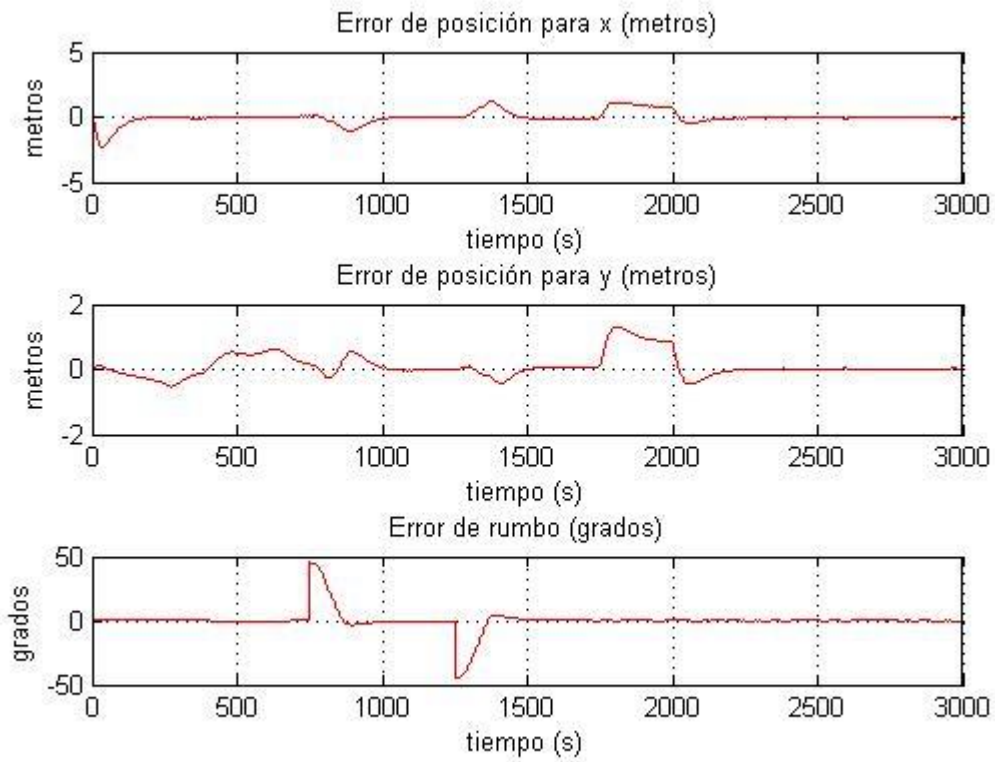


Figura 4-67. Error de posición y rumbo.

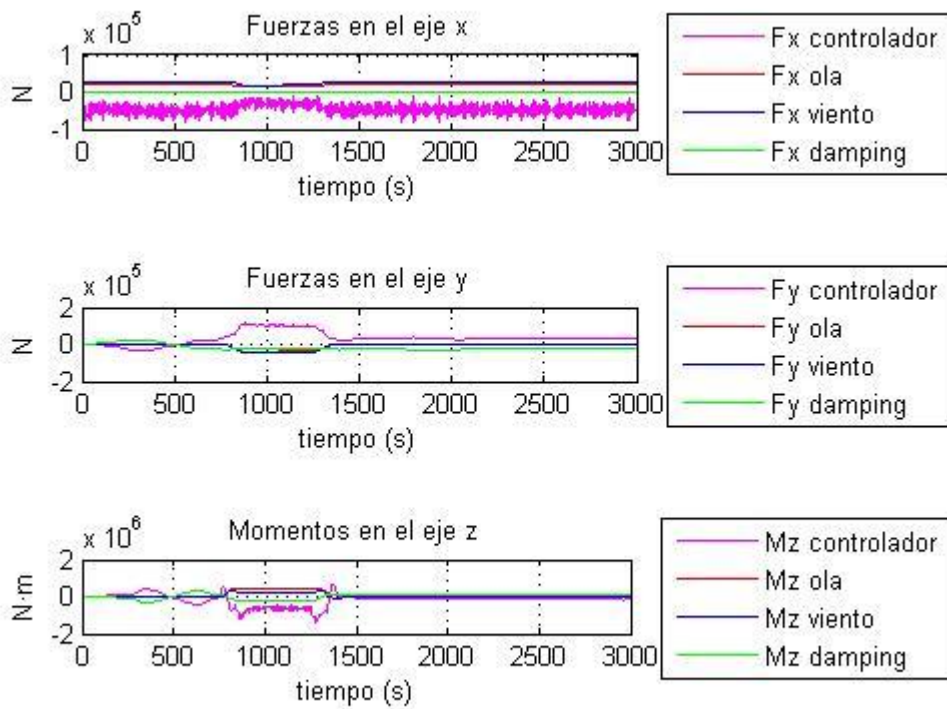


Figura 4-68. Fuerzas y momentos.

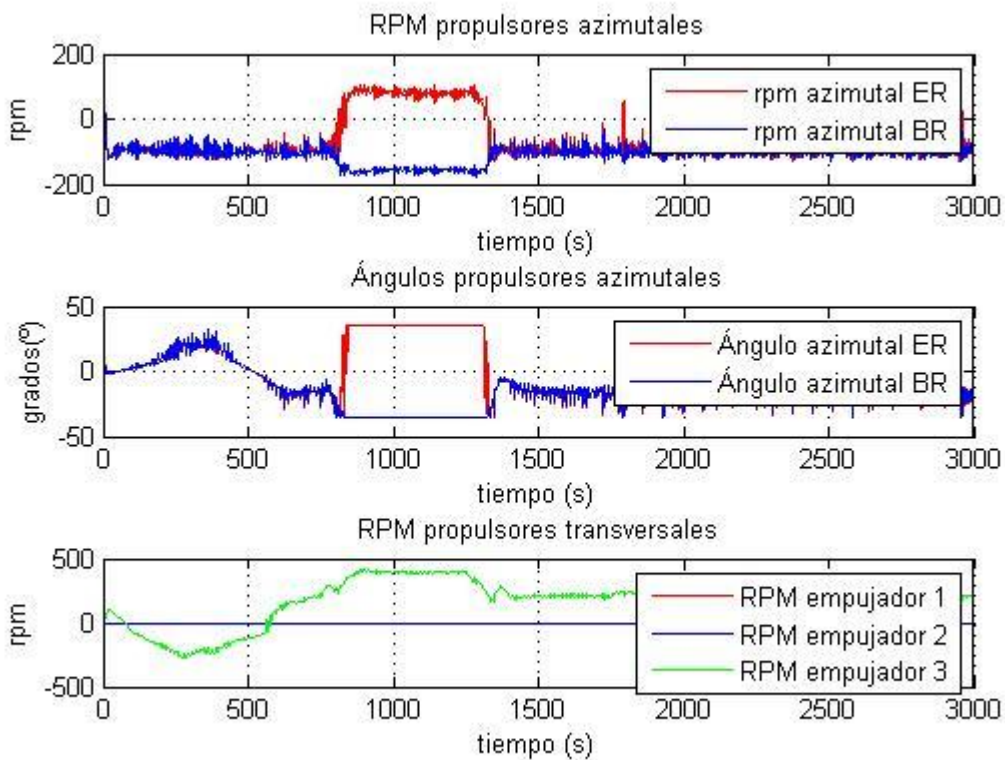


Figura 4-69. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.2.3 Retardo de 60 s

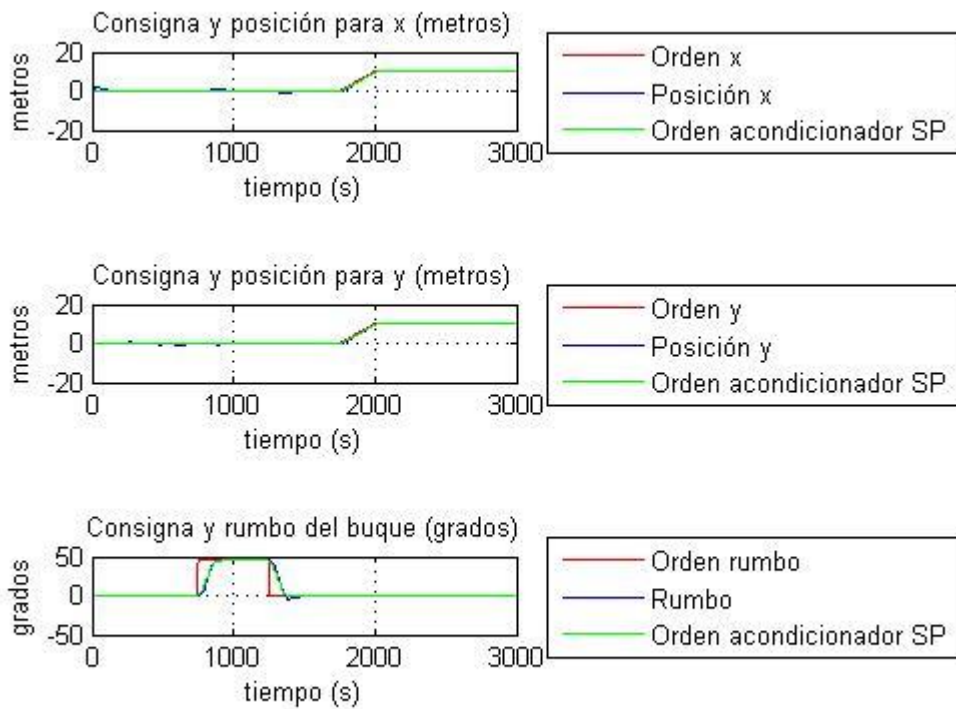


Figura 4-70. Referencia frente a posición y rumbo.

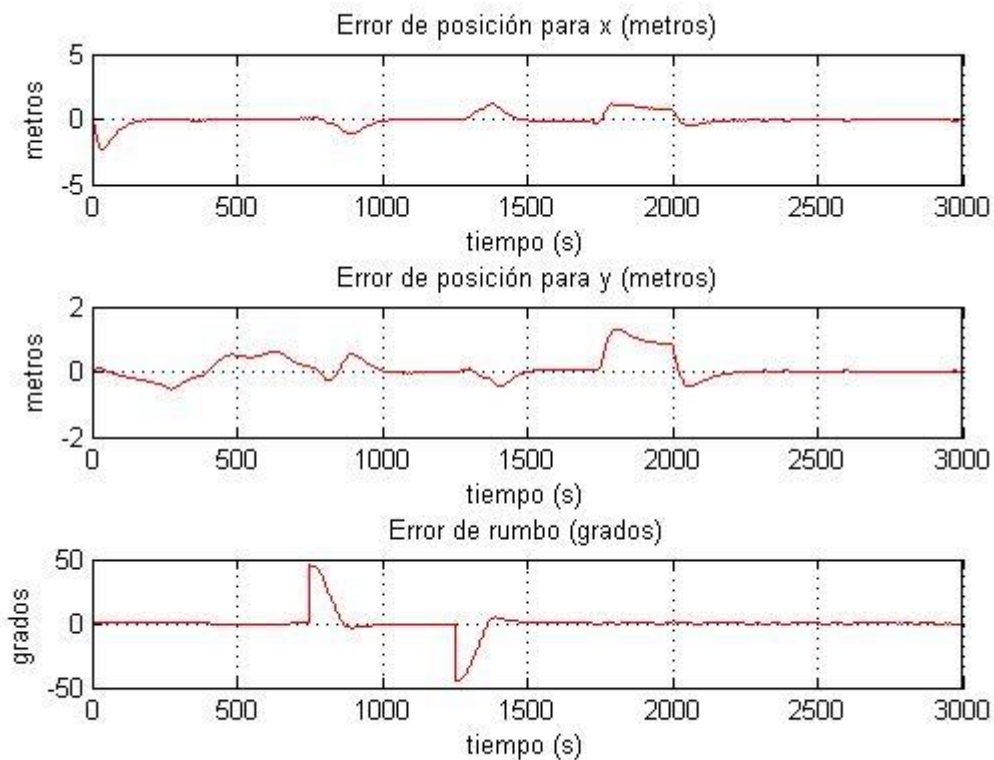


Figura 4-71. Error de posición y rumbo.

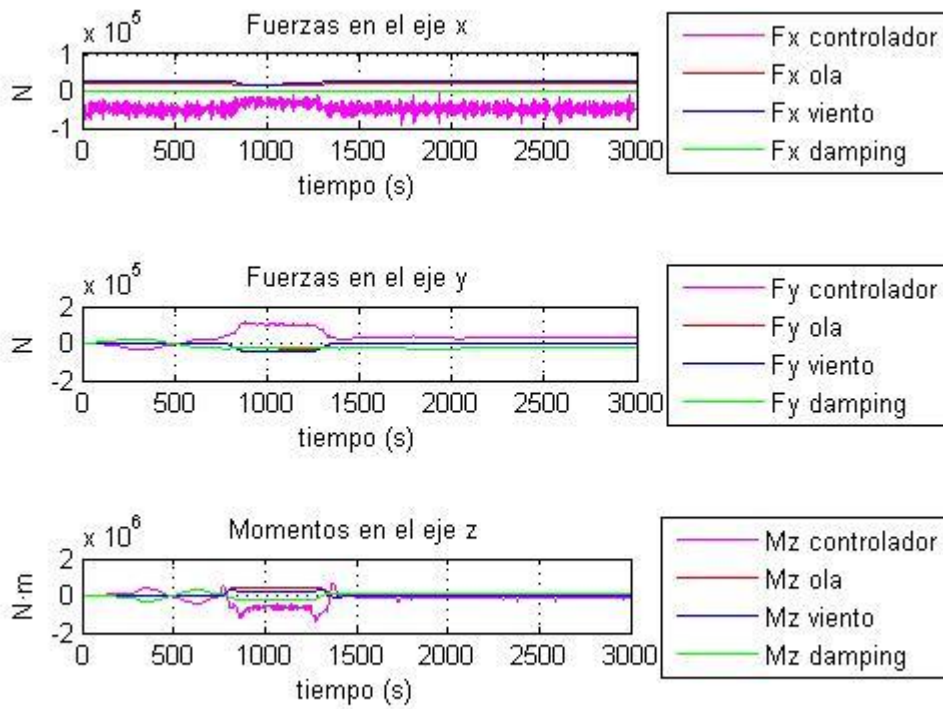


Figura 4-72. Fuerzas y momentos.

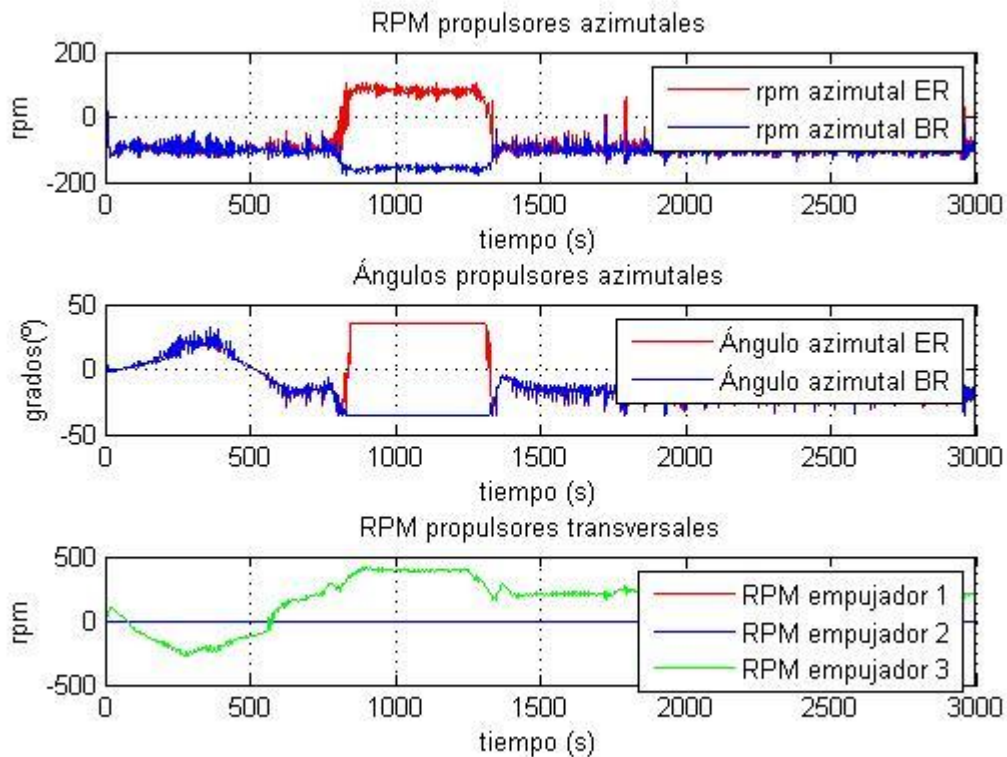


Figura 4-73. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.3 Escenario 2

4.3.3.1 Retardo de 10 s

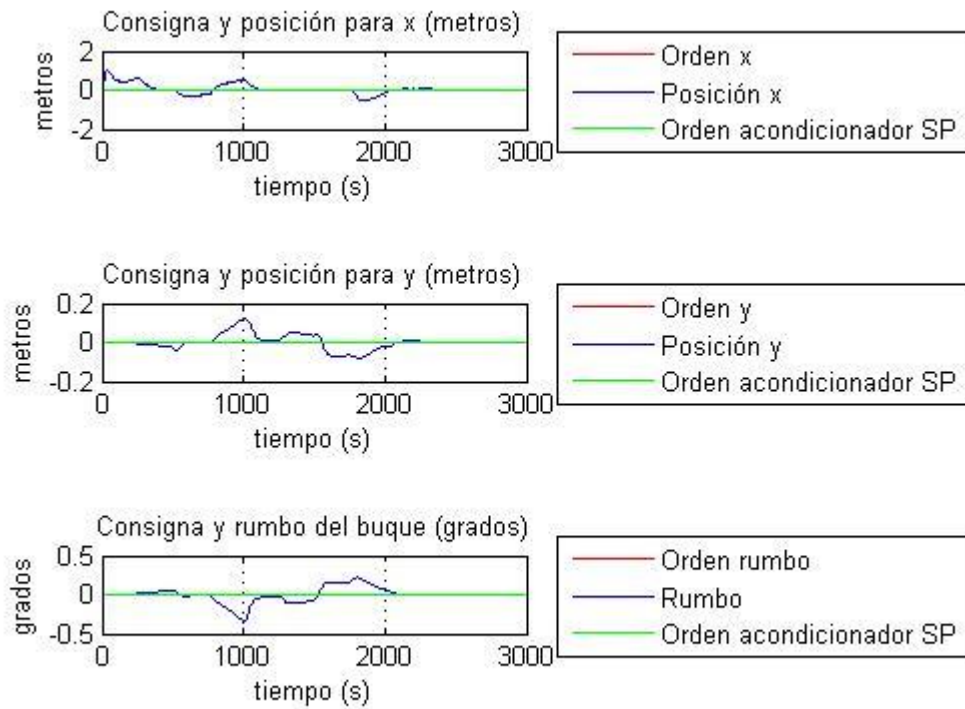


Figura 4-74. Referencia frente a posición y rumbo.

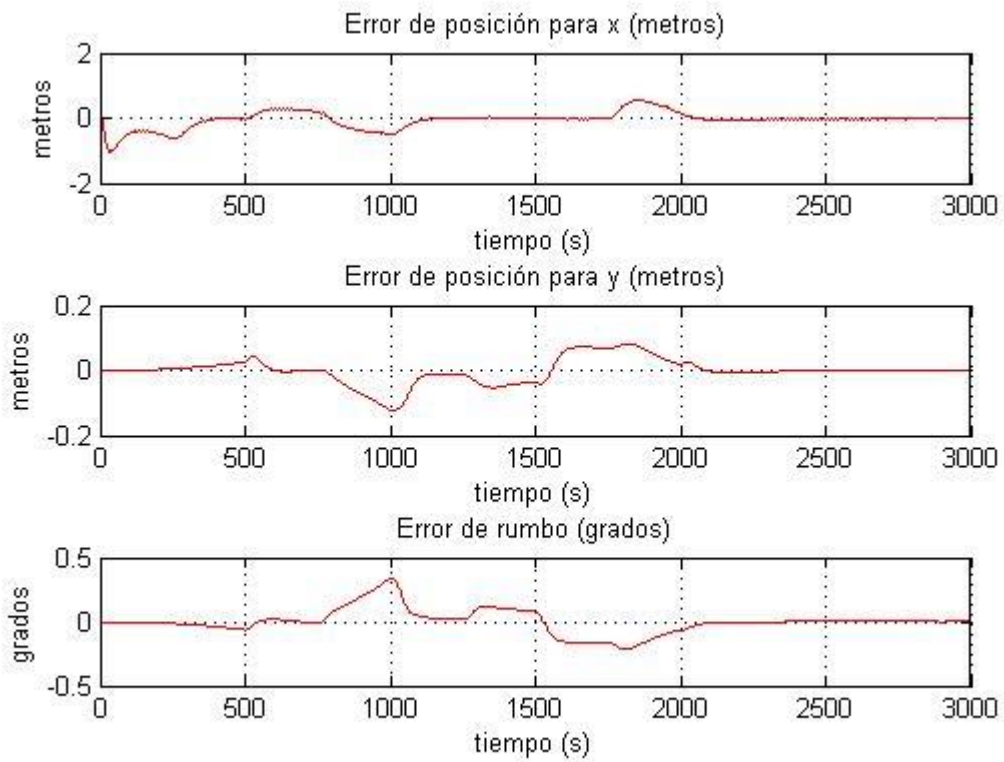


Figura 4-75. Error de posición y rumbo.

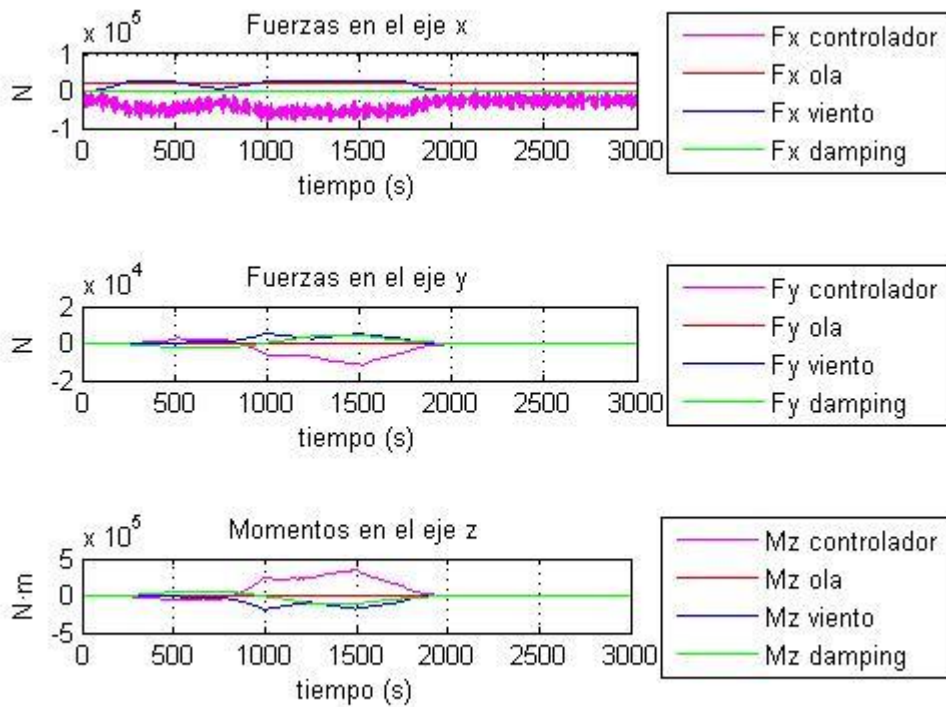


Figura 4-76. Fuerzas y momentos.

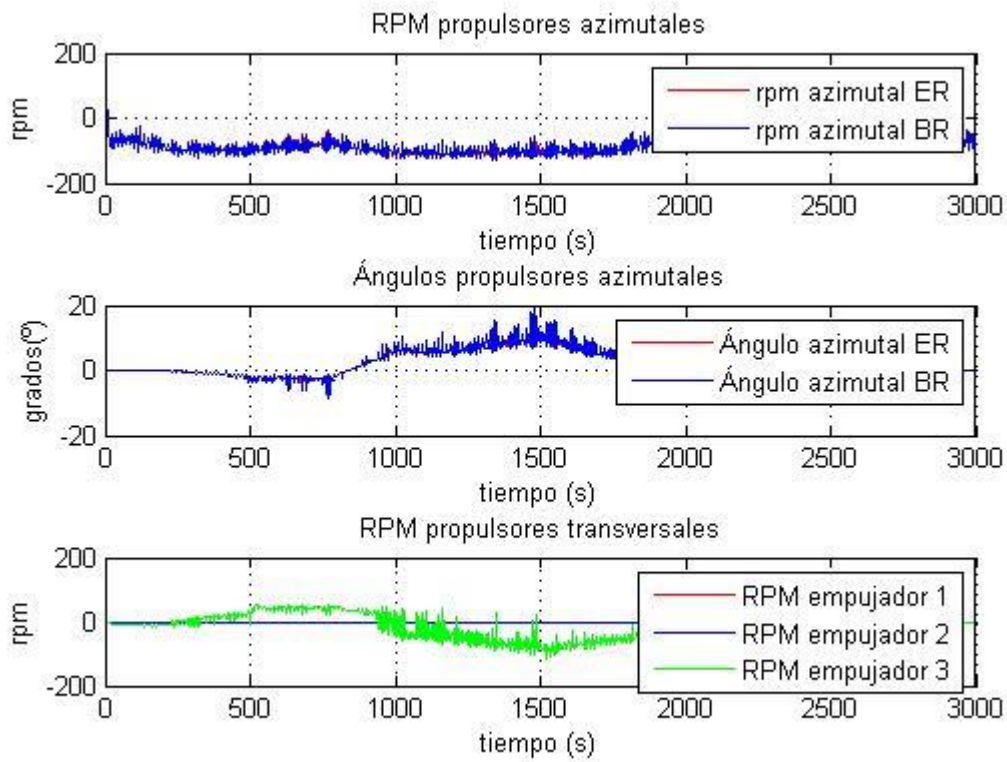


Figura 4-77. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.3.2 Retardo de 30 s

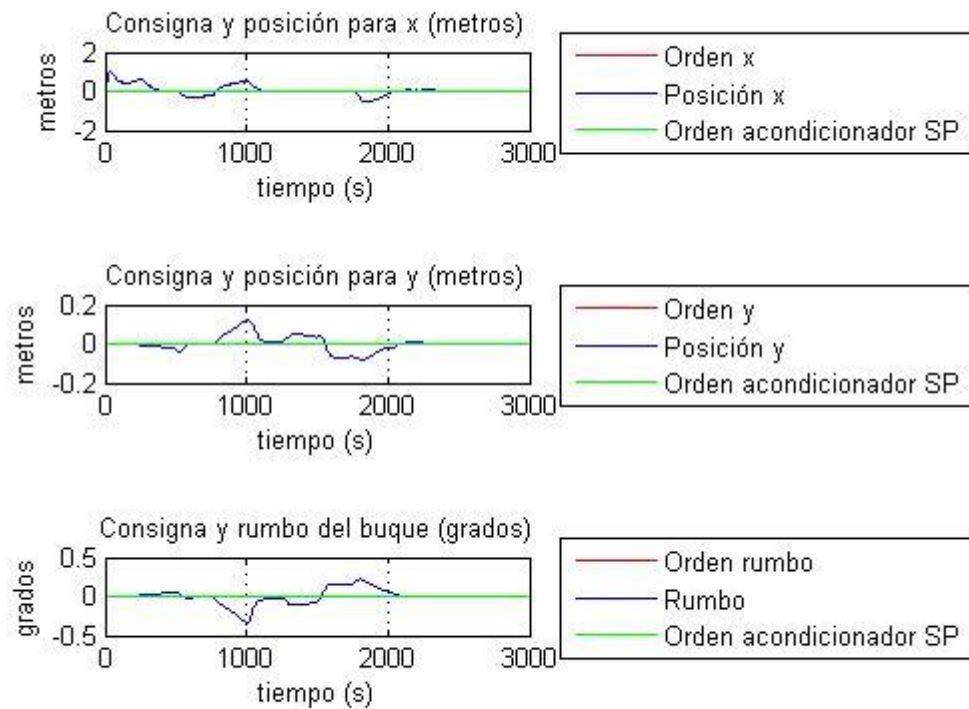


Figura 4-78. Referencia frente a posición y rumbo.

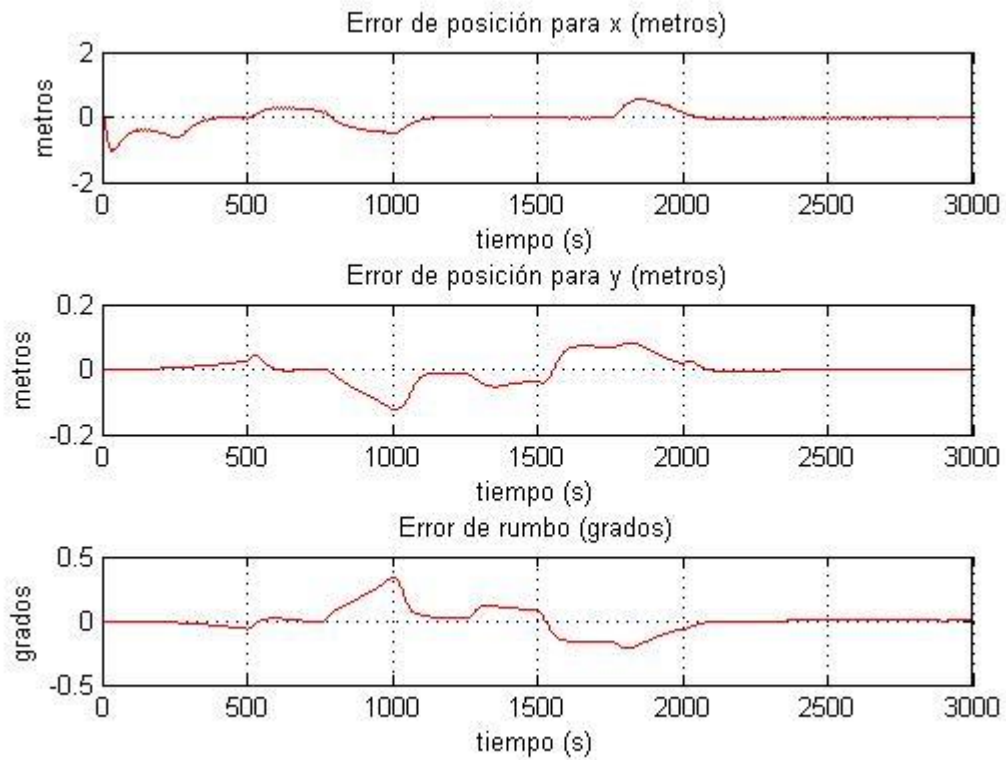


Figura 4-79. Error de posición y rumbo.

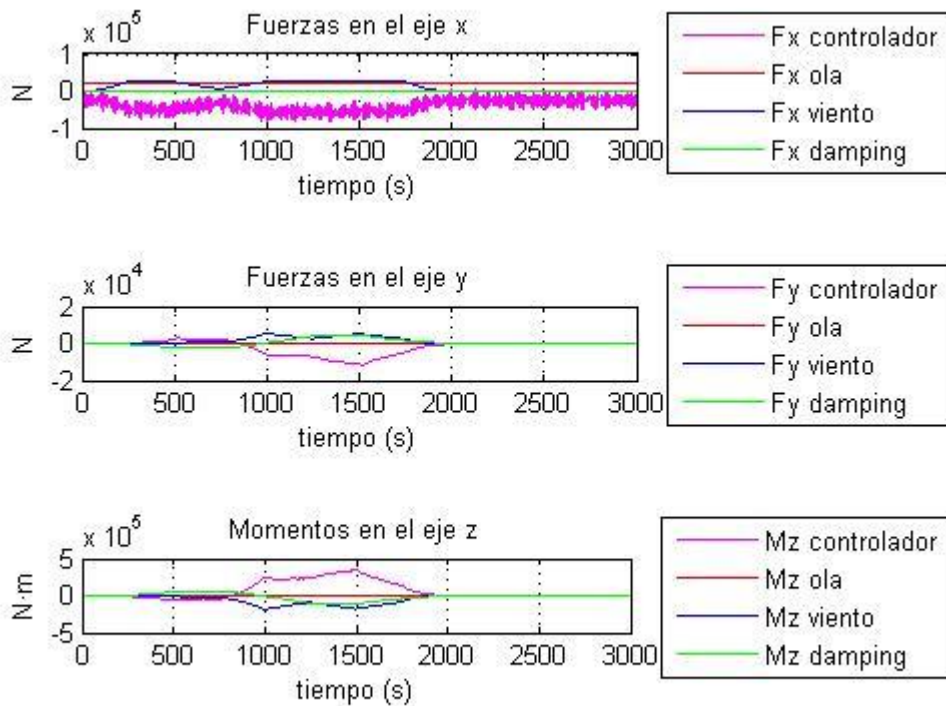


Figura 4-80. Fuerzas y momentos.

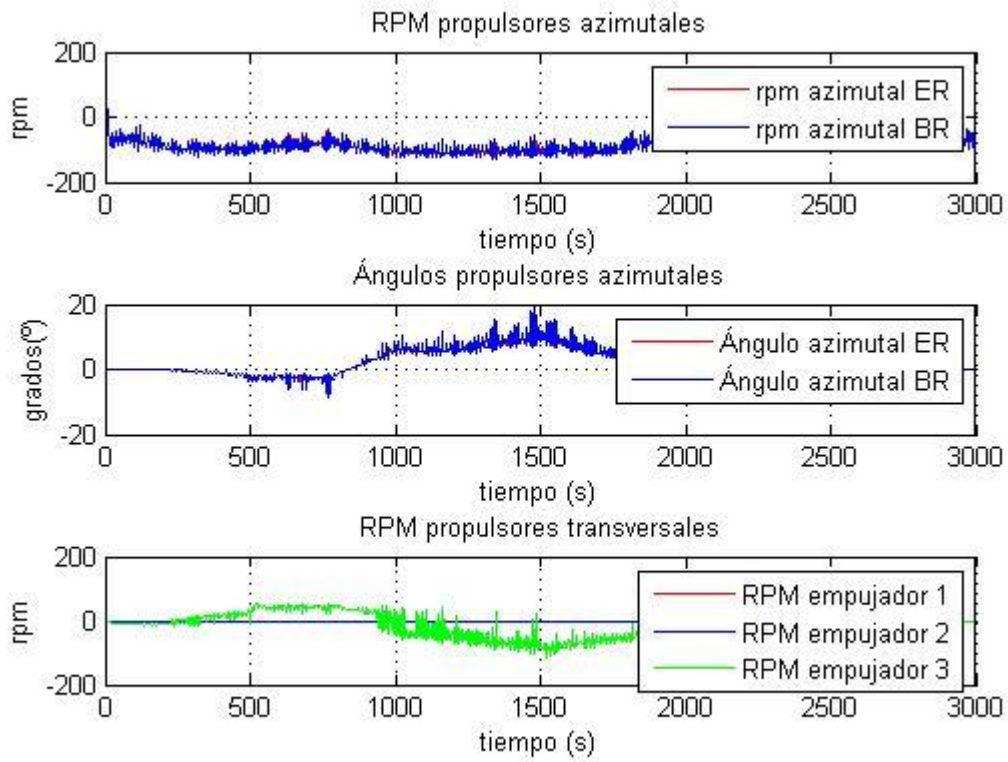


Figura 4-81. RPM y ángulos de los azimutales.

4.3.3.3 Retardo de 60 s

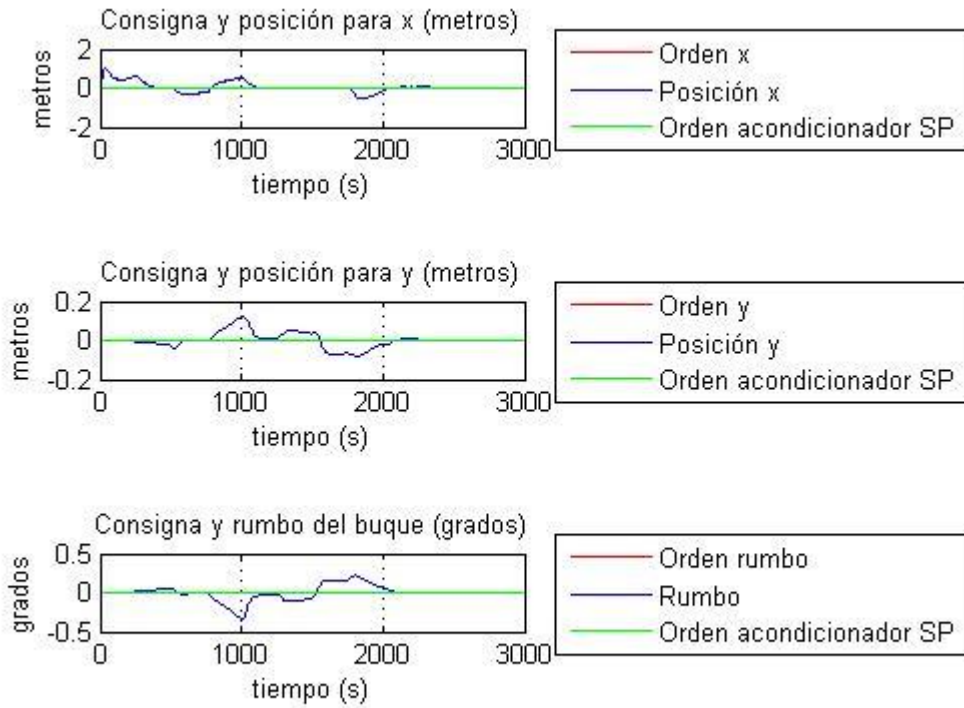


Figura 4-82. Referencia frente a posición y rumbo.

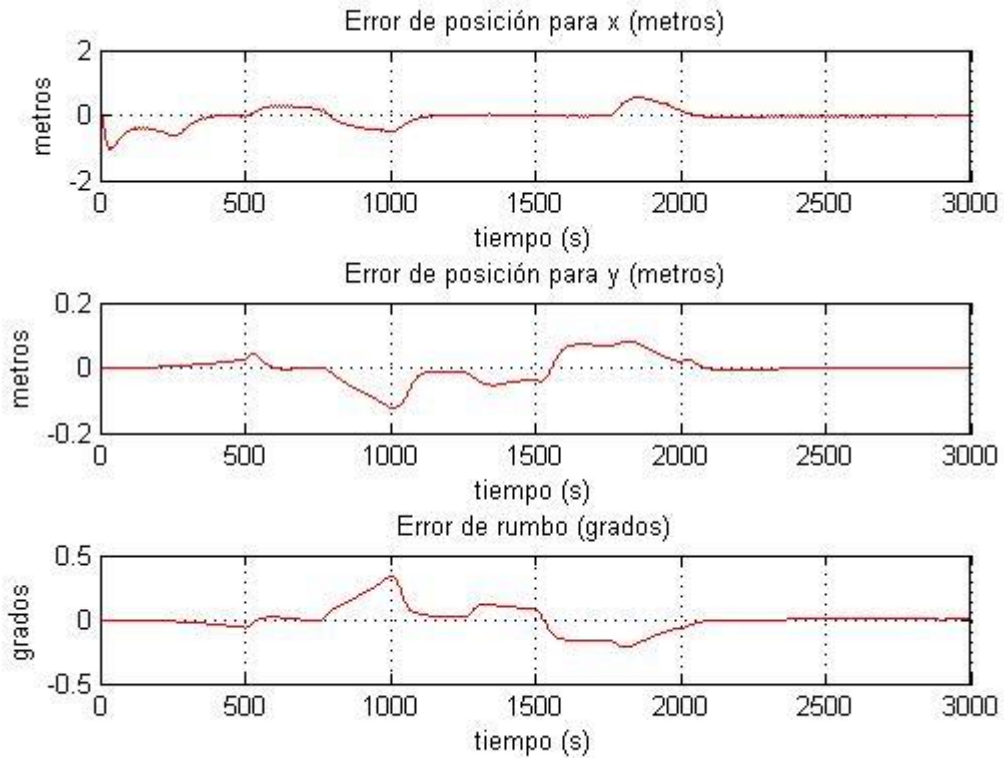


Figura 4-83. Error de posición y rumbo.

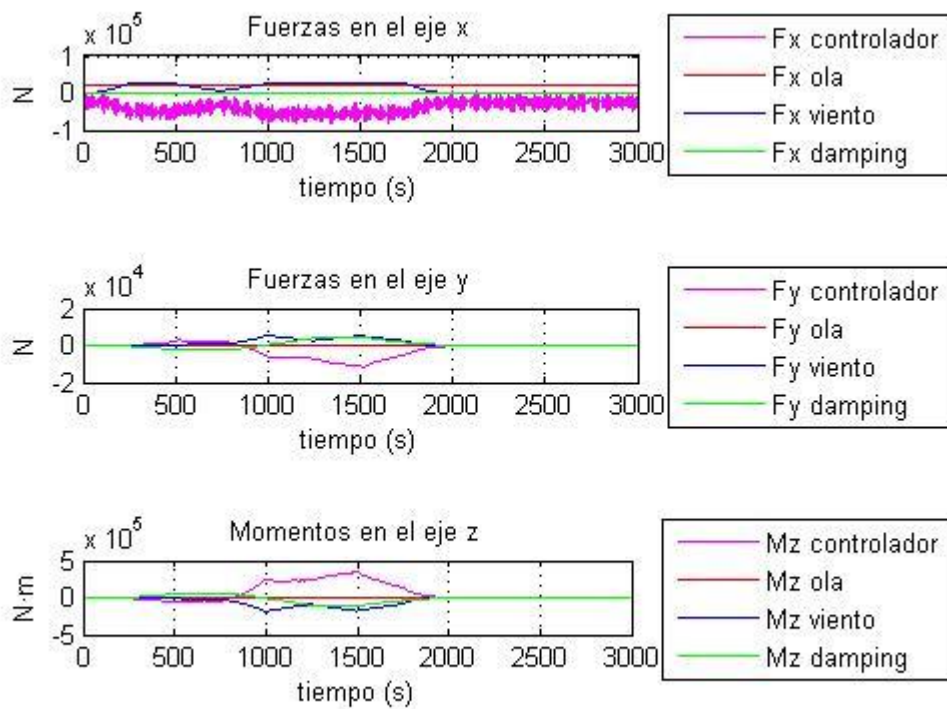


Figura 4-84. Fuerzas y momentos.

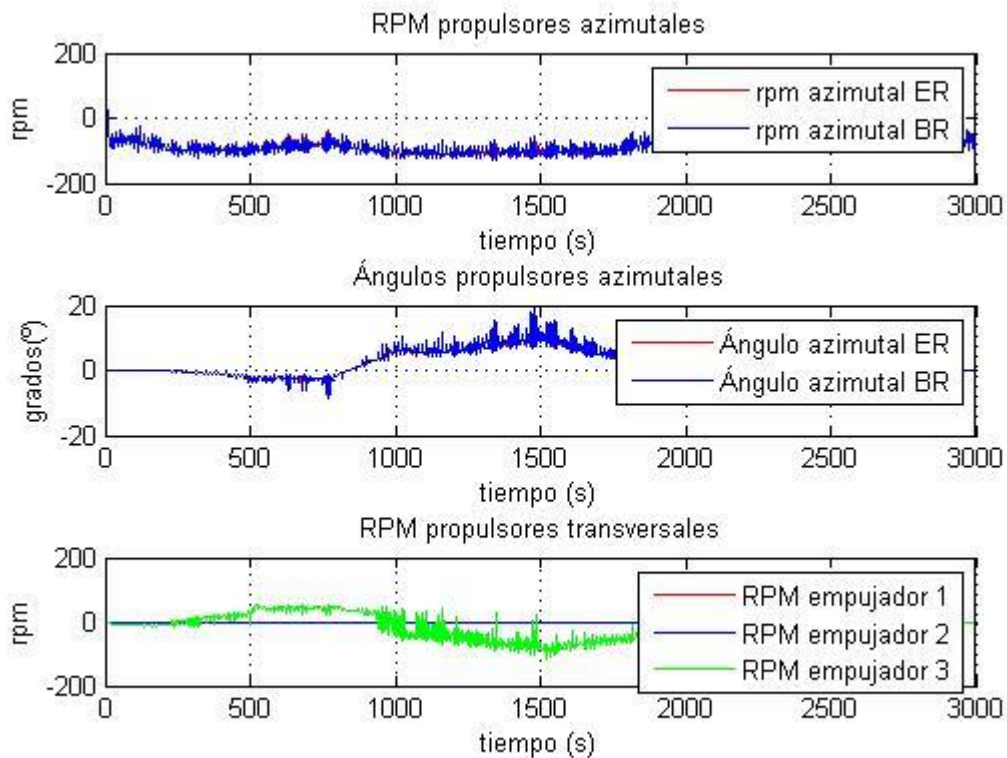


Figura 4-85. RPM y ángulos de los azimutales.

4.4 Comparativa

A continuación, se va a realizar una comparación entre las distintas soluciones propuestas para cada escenario simulado. Además, se va a mostrar una tabla comparando los valores relativos a los errores en posición y rumbo, el consumo de los propulsores y la fatiga en ángulo y empuje para cada caso.

4.4.1 Test consigna

Tabla 4-1. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida.

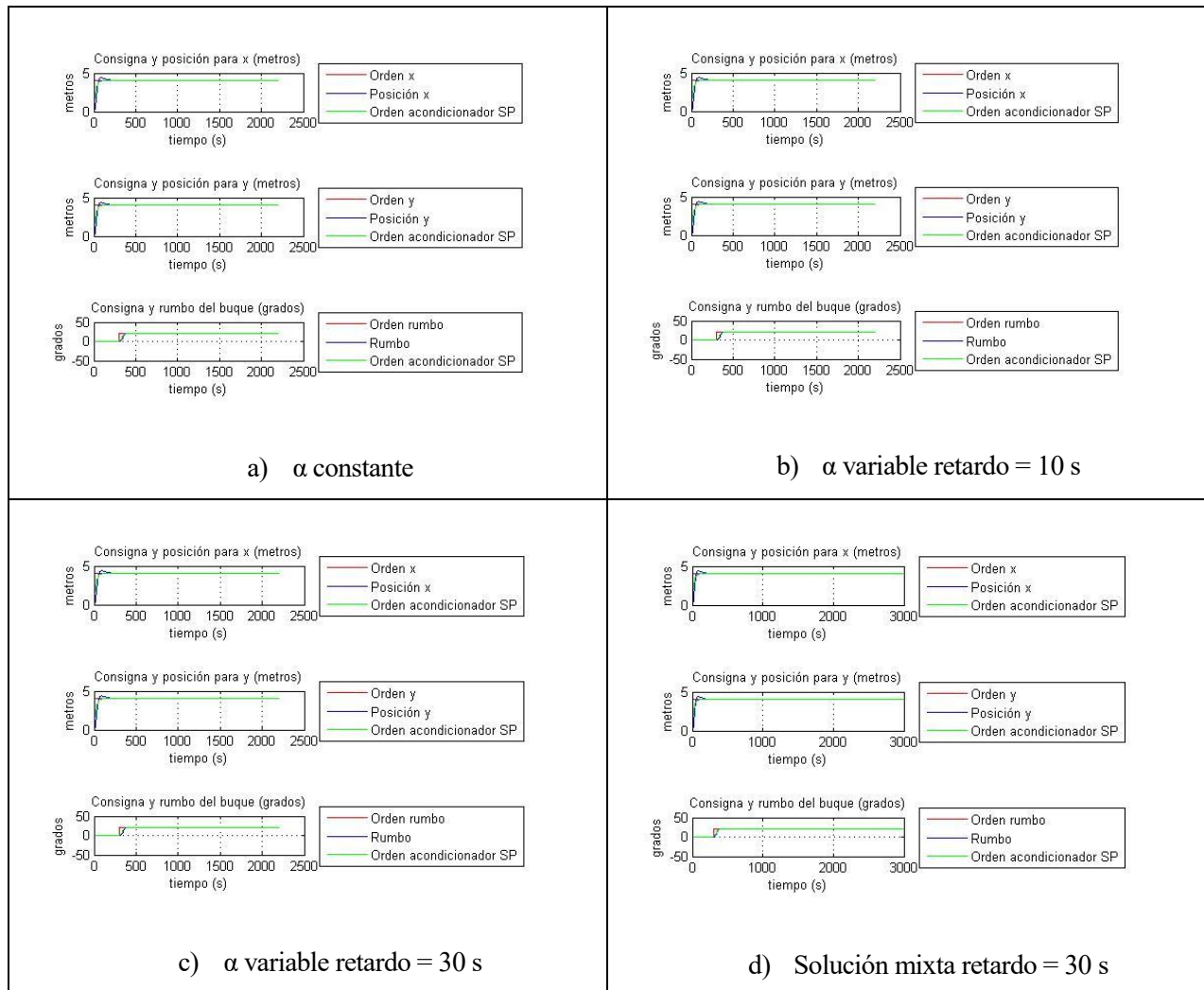


Tabla 4-2. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s.

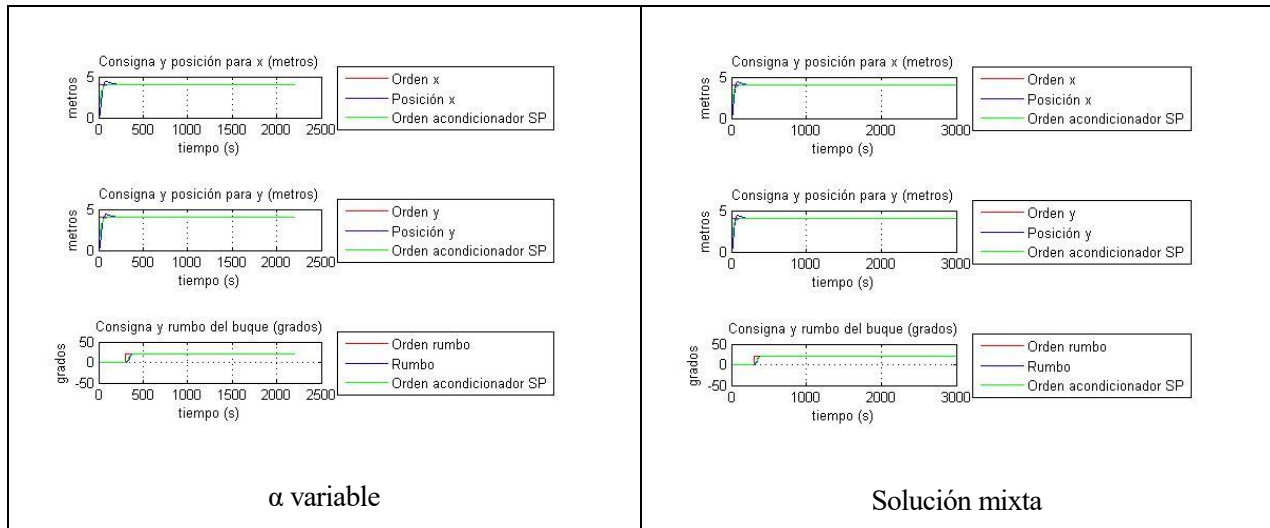


Tabla 4-3. Resultados evaluador para Test Consigna.

	α cte	α variable r = 10s	α variable r = 30s	α variable r = 60s	Sol mixta r = 10s	Sol mixta r = 30s	Sol mixta r = 60s
Eabs posición	0.10883	0.10877	0.10878	0.10866	0.079764	0.079762	0.079768
Eabs rumbo	0.52037	0.52057	0.52085	0.52819	0.38156	0.38157	0.38163
Ecuad posición	0.36835	0.36834	0.36843	0.36856	0.27011	0.27011	0.27014
Ecuad rumbo	7.1419	7.1518	7.1523	7.1575	5.2406	5.2406	5.2406
Ruido rechazado	0	0	0	0	0	0	0
Cmedio total	0.00030273	0.00012753	0.00012848	0.00015919	9.3549e-005	9.4037e-005	9.7479e-005
Cmedio PODs	0.00022222	5.7319e-005	5.8127e-005	8.516e-005	4.2014e-005	4.2452e-005	4.5375e-005
Cmedio empujadores	8.0508e-0.05	7.0211e-005	7.0349e-005	7.4031e-005	5.1535e-005	5.1585e-005	5.2103e-005
Fatiga empuje	1.2491	1.1198	1.1214	1.7294	0.86831	0.82961	0.84252
Fatiga ángulo	0.0014935	2.2826	1.7874	1.0514	2.7525	1.6449	1.0743

Como se mencionó previamente, el objetivo de este proyecto era la distribución de los propulsores de un navío de manera eficiente, y se comentó que se iba a considerar la eficiencia desde dos puntos de vista: la eficiencia en cuanto a la precisión y la eficiencia en cuanto al consumo de combustible.

De esta manera, observando las tablas mostradas previamente, se puede concluir que, en cuanto a precisión, el algoritmo de la solución híbrida ofrece mejores resultados, mientras que las otras dos soluciones ofrecen resultados muy similares en cuanto a los errores en posición y rumbo. En cuanto al consumo, de la misma manera, el algoritmo de la solución híbrida presenta un consumo menor, seguido de la solución para ángulos variables. Considerando también la fatiga de los propulsores, en cuanto al empuje la solución que produce menor fatiga es nuevamente la solución híbrida. Para la fatiga en ángulo, el algoritmo para ángulos fijos ofrece mejor resultado, mientras que las otras dos soluciones proporcionan soluciones muy similares.

4.4.2 Escenario 1

Tabla 4-4. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida.

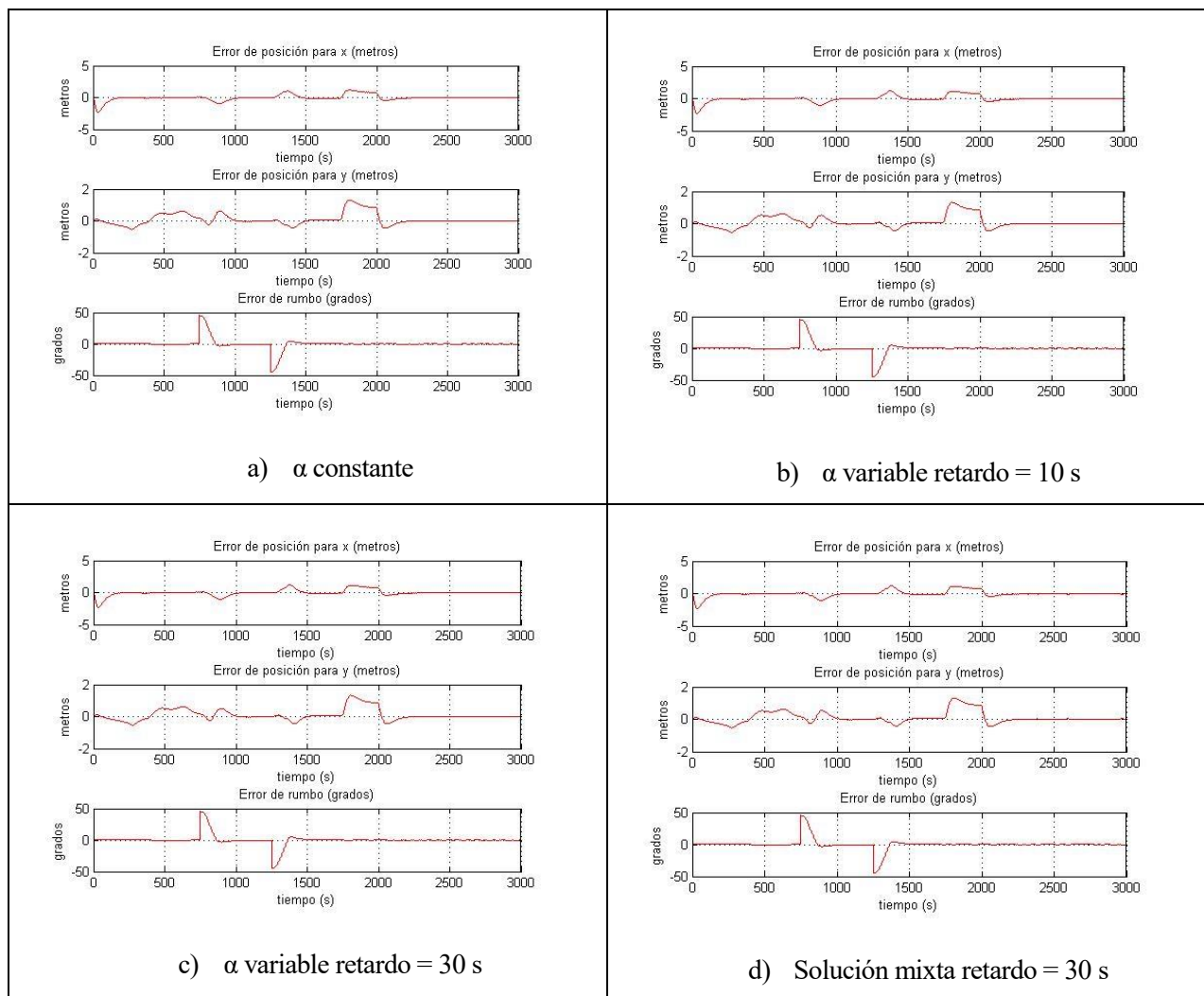


Tabla 4-5. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s.

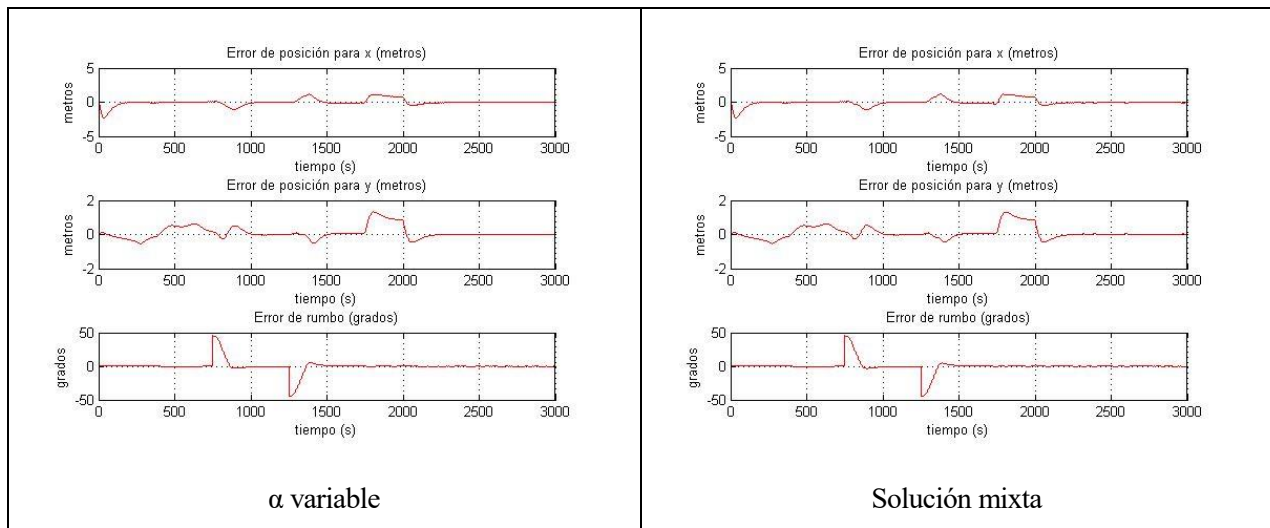


Tabla 4-6. Resultados evaluador para Escenario 1.

	α cte	α variable $r = 10s$	α variable $r = 30s$	α variable $r = 60s$	Sol mixta $r = 10s$	Sol mixta $r = 30s$	Sol mixta $r = 60s$
Eabs posición	0.36278	0.36688	0.36673	0.36744	0.36697	0.36706	0.37015
Eabs rumbo	2.4419	2.4549	2.4582	2.4741	2.4508	2.4518	2.4625
Ecuad posición	0.31783	0.32241	0.32209	0.32216	0.32157	0.32169	0.32451
Ecuad rumbo	75.2279	75.4009	75.4477	75.6105	75.3745	75.3742	75.4035
Ruido rechazado	14.8691	14.6231	14.6219	14.6244	14.6373	14.6379	14.6367
Cmedio total	0.051111	0.02302	0.02306	0.023129	0.023479	0.023538	0.02366
Cmedio PODs	0.044341	0.017855	0.017893	0.01796	0.018293	0.01835	0.018468
Cmedio empujadores	0.0067706	0.0051647	0.0051667	0.0051685	0.0051859	0.0051879	0.005192
Fatiga empuje	16.068	10.4889	10.585	10.7514	16.863	16.7933	17.184
Fatiga ángulo	0.0010952	2.8527	2.7775	2.7151	2.7734	2.6675	2.5759

Como ya se ha mencionado previamente, este escenario cuenta con distintas velocidades de corriente en diferentes direcciones, por lo que los resultados varían considerablemente respecto con los obtenidos en las

simulaciones en el escenario del Test de Consigna.

En lo referente a la precisión, los tres algoritmos presentan errores del mismo orden con valores muy cercanos. En cuanto al consumo, la solución para ángulos variables y la solución híbrida muestran el menor consumo, con apenas diferencias. Sin embargo, la menor fatiga en empuje la presenta el algoritmo de ángulos variables. De la misma manera que en el caso anterior, para la solución de ángulos fijos la fatiga en ángulo es considerablemente menor, lo cual es lógico puesto que en los otros casos los ángulos de los propulsores azimutales están variando constantemente.

4.4.3 Escenario 2

Tabla 4-7. Comparación para α constante, α variable y solución híbrida.

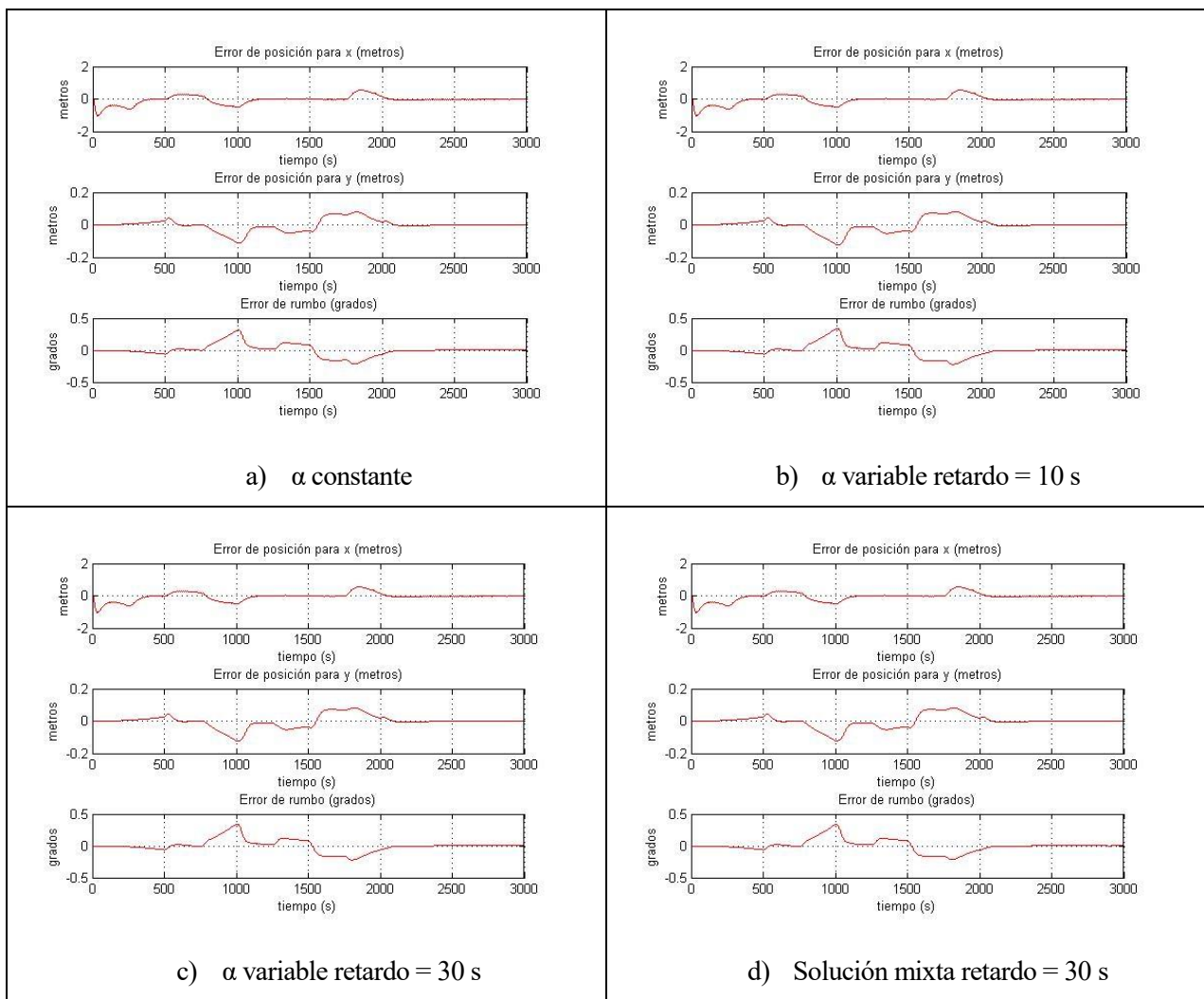


Tabla 4-8. Comparación α variable y solución híbrida para retardo de 60 s.

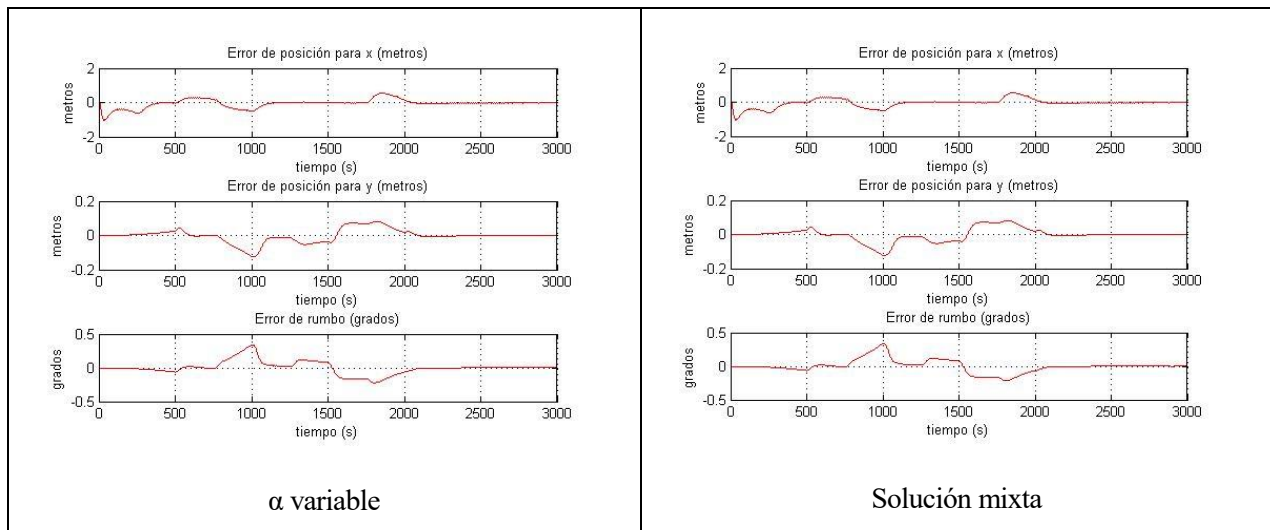


Tabla 4-9. Resultados evaluador para Escenario 2.

	α cte	α variable r = 10s	α variable r = 30s	α variable r = 60s	Sol mixta r = 10s	Sol mixta r = 30s	Sol mixta r = 60s
Eabs posición	0.17292	0.17364	0.17364	0.17364	0.17353	0.17353	0.17354
Eabs rumbo	0.053784	0.055966	0.055966	0.055966	0.054995	0.054995	0.054995
Ecuad posición	0.057048	0.057432	0.057432	0.057432	0.057386	0.057386	0.057387
Ecuad rumbo	0.0077794	0.0086507	0.0086505	0.0086503	0.0083621	0.0083616	0.0083609
Ruido rechazado	22.219	22.1215	22.1215	22.1215	22.1225	22.1225	22.1225
Cmedio total	0.0080355	0.0070399	0.0070399	0.0070399	0.0070658	0.0070658	0.0070657
Cmedio PODs	0.0080227	0.0070372	0.0070372	0.0070372	0.0070624	0.0070624	0.0070624
Cmedio empujadores	1.2833e-005	2.7273e-006	2.7273e-006	2.7273e-006	3.3693e-006	3.3693e-006	3.3693e-006
Fatiga empuje	12.5246	12.0222	12.0232	12.0247	15.344	15.3419	15.3417
Fatiga ángulo	0.0010952	0.60506	0.59742	0.59374	0.56894	0.56188	0.55854

La comparativa de los resultados obtenidos para este escenario da lugar a conclusiones similares a las obtenidas en el escenario anterior, puesto que se trata de dos escenarios en los que hay distintas velocidades de viento y cambios en la dirección del mismo, por lo que el comportamiento de los algoritmos es parecido en ambos casos.

En cuanto a la precisión, las tres soluciones propuestas ofrecen resultados con apenas variaciones, por lo que no se discierne en cual de los tres es mejor. Respecto al consumo, el algoritmo para ángulos variables ofrece el menor consumo, seguido de la solución mixta, que ofrece un consumo del mismo orden. Por último, en lo referente a la fatiga, la menor fatiga de empuje la ofrece de nuevo la solución de ángulos variables. En cuanto a la fatiga en ángulo, para el algoritmo de ángulos constantes la fatiga es considerablemente menor, y para las otras dos soluciones toma valores muy cercanos.

5 CONCLUSIONES

En este capítulo, por último, se van a comentar las conclusiones finales obtenidas tras la realización del proyecto, haciendo un análisis global de los resultados obtenidos, ya comentados previamente en el apartado 4 de este proyecto.

Como ya se explicó en los primeros apartados, el objetivo del proyecto era la distribución óptima o eficiente de los propulsores de un vehículo marino de superficie para posicionamiento dinámico. Para ello, se presentó el modelo del navío con el que se iba a proceder a trabajar y se plantearon tres posibles soluciones. Es importante destacar, que como se ha ido comentando a lo largo del proyecto, muchos de los parámetros de las ecuaciones pueden ser cambiados según sea el objetivo del proyecto, como es el caso de las matrices Q y W .

Una vez realizadas las numerosas simulaciones en distintos entornos, se puede concluir que dependiendo del entorno en el que se esté, y dependiendo de que tipo de eficiencia se busque, una solución ofrece mejores resultados.

Se ha podido comprobar que, para un escenario ideal, como es el Test de Consigna, la última solución planteada, la solución híbrida, ofrece resultados considerablemente mejores en cuanto a precisión y consumo.

Sin embargo, en los otros escenarios en los que se han realizado las simulaciones, que plantean un entorno más realista, se ha concluido que, en cuanto a la eficiencia desde el punto de vista de la precisión, es decir, cuanto se acerca la solución obtenida a las fuerzas demandadas, las tres soluciones propuestas ofrecen mínimas diferencias, con errores del mismo orden y con cifras muy cercanas. En cuanto a la eficiencia desde el punto de vista del consumo, el algoritmo para ángulos variables y la solución híbrida ofrecen menor consumo. También cabe destacar, que estos dos últimos algoritmos producen mayor fatiga en los propulsores azimutales a causa de que deben estar variando su orientación constantemente. Aun así, para el algoritmo de ángulos variables, este aumento de la fatiga de los propulsores azimutales implica que la fatiga que sufren el resto de propulsores se ven reducida.

Finalmente, se espera que las observaciones realizadas en este proyecto puedan servir de referencia para otros modelos o nuevas simulaciones, en las que se varíen los pesos de las matrices mencionadas anteriormente o se puedan considerar el resto de las posibles configuraciones de los propulsores azimutales.

REFERENCIAS

Optimal Constrained Control Allocation in Marine Surface Vessels with Rudders – Tor A. Johansen, Thomas P. Fuglseth, Petter Tøndel, Thor I. Fossen.

Fossen, T. (2002). Marine control systems. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics.

Kenneth A. Bordignon and Wayne C. Durham. "Closed-form solutions to constrained control allocation problem", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 18, No. 5 (1995), pp. 1000-1007.

WAYNE C. DURHAM. "Constrained control allocation", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 16, No. 4 (1993), pp. 717-725.

Durham, W. (1994). Constrained control allocation - Three-moment problem. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 17(2), pp.330-336.

Durham, W. (1994). Attainable moments for the constrained control allocation problem. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 17(6), pp.1371-1373.

Johansen, T. and Fossen, T. (2013). Control allocation—A survey. Automatica, 49(5), pp.1087-1103.

Sørdalen, O. (1997). Optimal thrust allocation for marine vessels. Control Engineering Practice, 5(9), pp.1223-1231.