



# CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: *CRIBAV/*

*Fecha: 27/11/2000*

*Código SubProyecto: TAP97-0607-C03-03*

TÍTULO DEL DOCUMENTO

## **REDUCCIÓN DE LA ACELERACIÓN VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120 UTILIZANDO CONTROLADORES CLÁSICOS**

**Autores:**

Eloy López

Teresa M. Rueda

Francisco Jesús Velasco

Emiliano Moyano

# CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: *CRIBAV/*

*Fecha: 27/11/2000*

*Código SubProyecto: TAP97-0607-C03-03*

TÍTULO DEL DOCUMENTO

## **REDUCCIÓN DE LA ACELERACIÓN VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120 UTILIZANDO CONTROLADORES CLÁSICOS**

**Autores:**

Eloy López

Teresa M. Rueda

Francisco Jesús Velasco

Emiliano Moyano

**Grupo:** UC

**Responsable del Grupo:** Francisco Jesús Velasco

**Responsable del Informe:** Teresa M. Rueda y Eloy López

*SubProyecto:* TAP97-0607-C03-03

*Version:* 1

**CRIBAV** 

---

**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**Lista y Filiación de Autores:**

cnplogae@lg.ehu.es

tere@teisa.unican.es

velascof@unican.es

moyanoe@unican.es

**Agradecimientos:**

**Lista de distribución:**

CRIBAV

## **Resumen:**

En este informe se presenta el diseño de diversos controladores clásicos para reducir la aceleración vertical del buque de alta velocidad TF-120 y con ello disminuir el índice de mareo (MSI). Se han sintonizado todos los controladores para que tengan un buen comportamiento en todas las condiciones de velocidad del buque (20, 30 y 40 nudos) y estados de la mar (4 y 5) estudiados. Se muestra que son varios los controladores que obtienen una reducción importante.

## **Summary:**

This report presents the design of several classical controllers to reduce the vertical acceleration of the TF-120 high-speed ship and so reduce the motion sickness incidence (MSI). All controllers have been adjusted to obtain a good performance for all conditions of ship's speed (20, 30 and 40 knots) and all SSN (4 and 5). It's shown that several controllers obtain an important reduction.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MODELO SIMULINK DEL BUQUE TF-120 .....</b>	<b>3</b>
2.1	MODELO DEL BUQUE .....	4
2.2	MODELO DE ACTUADORES .....	5
2.3	MODELO DEL PROCESO .....	6
<b>3</b>	<b>ESQUEMA DE CONTROL.....</b>	<b>6</b>
3.1	DIAGRAMA DE BLOQUES .....	6
3.2	ESPECIFICACIONES .....	8
3.3	CONTROLADORES .....	8
3.3.1	<i>Control pid</i> .....	8
3.3.1.1	Mixto .....	8
3.3.1.2	Paralelo .....	8
3.3.1.3	Serie .....	9
3.3.2	<i>Control pd</i> .....	9
3.3.2.1	Mixto .....	9
3.3.2.2	Paralelo .....	10
3.3.2.3	Serie .....	10
3.3.3	<i>Redes</i> .....	10
3.3.3.1	Primer Orden .....	10
3.3.3.2	Adelanto.....	10
3.3.3.3	Atraso-Adelanto.....	10
3.4	SINTONÍA DE LOS CONTROLADORES .....	11
<b>4</b>	<b>SIMULACIONES.....</b>	<b>13</b>
4.1	CONTROL PD .....	13
4.1.1	<i>Mixto</i> .....	13
4.1.2	<i>Paralelo</i> .....	16
4.1.3	<i>Serie</i> .....	19
4.2	CONTROL PID .....	22
4.2.1	<i>PID Mixto</i> .....	22
4.2.2	<i>PID Paralelo</i> .....	25
4.2.3	<i>PID Serie</i> .....	28
4.3	RED DE ADELANTO .....	31
4.4	RED DE ATRASO-ADELANTO .....	34
4.5	RED DE PRIMER ORDEN .....	37
4.5.1	<i>Red de primer orden (2e4)</i> .....	43
4.5.2	<i>Red de primer orden (2e5)</i> .....	45
4.5.3	<i>Red de primer orden (3e4)</i> .....	47
4.5.4	<i>Red de primer orden(3e5)</i> .....	49
4.5.5	<i>Red de primer orden(4e4)</i> .....	50
4.5.6	<i>Red de primer orden(4e5)</i> .....	52

**CRIBAV**

---

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**5 CONCLUSIONES ..... 53**

**APÉNDICE A .....57**  
MODELOS LINEALES DE LA DINÁMICA VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120.  
*Velocidad 20 nudos*  
*Velocidad 30 nudos*  
*Velocidad 40 nudos*

**APÉNDICE B .....59**  
ARCHIVO.M PRINCIPAL PARA EL ALGORITMO GENÉTICO

**APÉNDICE C .....61**  
ARCHIVOS .M PARA OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS

**BIBLIOGRAFÍA .....63**

# 1 INTRODUCCIÓN

En este informe se presenta el diseño de diferentes controladores clásicos para la reducción de la aceleración vertical del buque TF-120. Con dicha reducción se obtiene también una disminución en el índice de mareo con lo que se consigue aumentar el confort tanto de los pasajeros como de la tripulación del buque.

La sintonía de los controladores se ha realizado mediante algoritmos genéticos. Los resultados se presentan en diversas tablas indicando para cada una de ellas la reducción de la aceleración vertical y la mejora del índice de mareo. Así mismo se muestran gráficas comparativas del comportamiento del buque con y sin controlador para el movimiento de los actuadores, la aceleración vertical de heave y pitch, la aceleración vertical medida en la posición del "peor pasajero" y el índice de mareo para las condiciones de velocidad del buque 40 y estado de la mar 4.

# 2 MODELO SIMULINK DEL BUQUE TF-120

Para controlar el movimiento vertical del buque de Alta Velocidad TF-120 con diferentes controladores clásicos se ha empleado el modelo simulink desarrollado para la verificación de los controladores (MIBAV). El modelo permite realizar el control tanto en posición como en velocidad. En este documento se presentan los resultados obtenidos con control de posición.

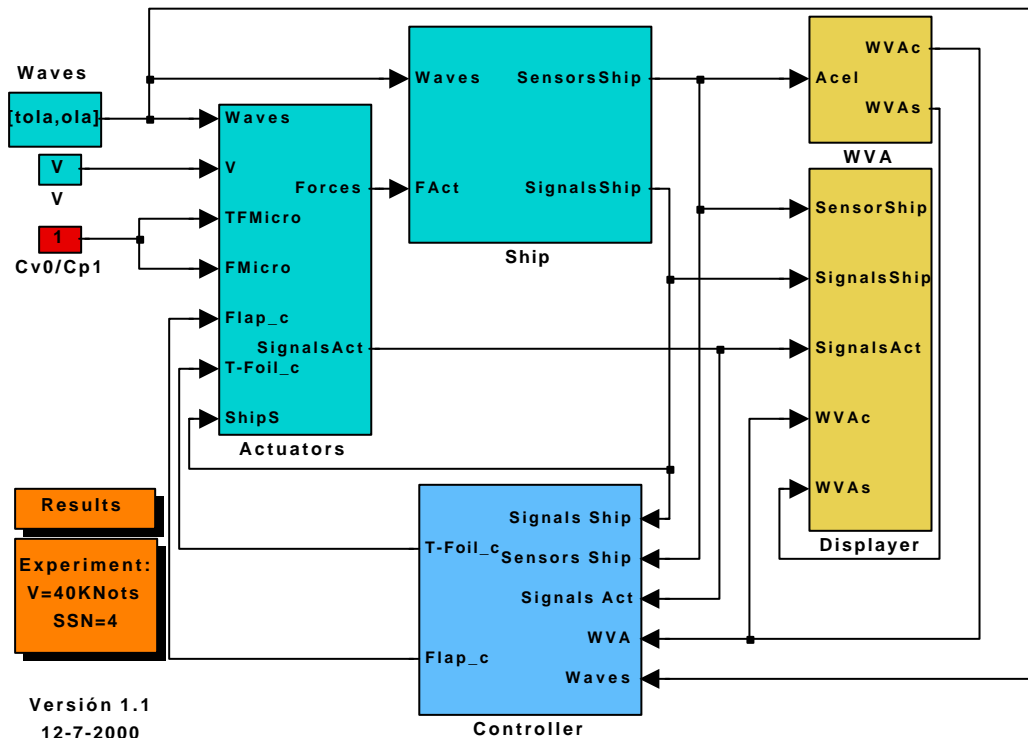


Figura 1: Modelo Simulink

## 2.1 MODELO DEL BUQUE

La dinámica vertical del buque está compuesta por varios modelos lineales continuos SISO que se identificaron a partir de los datos PRECAL [1] corregidos a proa, a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Estos modelos vienen dados por sendas funciones de transferencia que relacionan la altura de las olas con la fuerza heave y el momento pitch así como la fuerza heave con el movimiento heave y el momento pitch con el movimiento pitch (Ver apéndice A). De los actuadores también se obtienen valores de la fuerza heave y momento pitch con lo que el diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque de forma simplificada se puede expresar como:

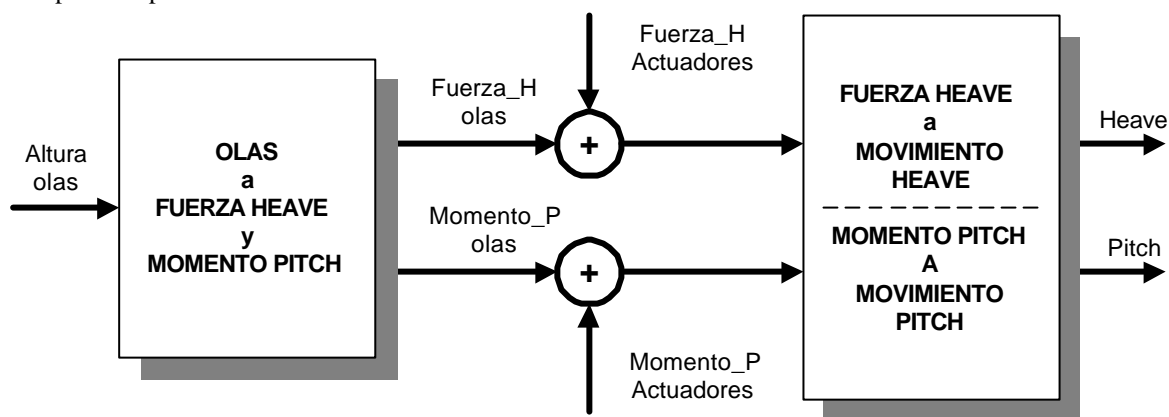


Figura 2: Modelo agrupado de la dinámica vertical del buque

Ésto se descompone en:

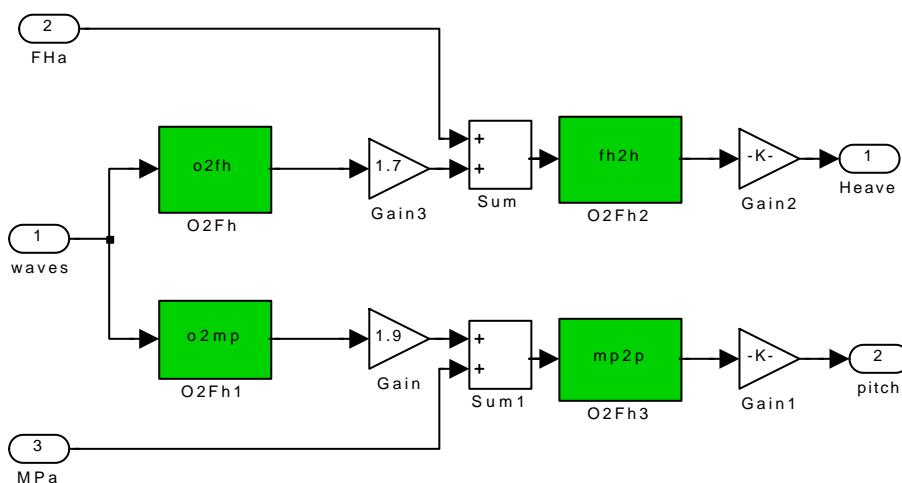


Figura 3: Modelo completo de la dinámica vertical del buque



## 2.2 MODELO DE ACTUADORES

El sistema cuenta con dos actuadores [2], un T-Foil (aletas en proa) y un Flap (alerón en popa). El modelo de estos actuadores se podría representar por el bloque siguiente que tiene como entradas las referencias en posición o velocidad del T-Foil y el flap y el heave y pitch, y como salidas la fuerza heave y el momento pitch.

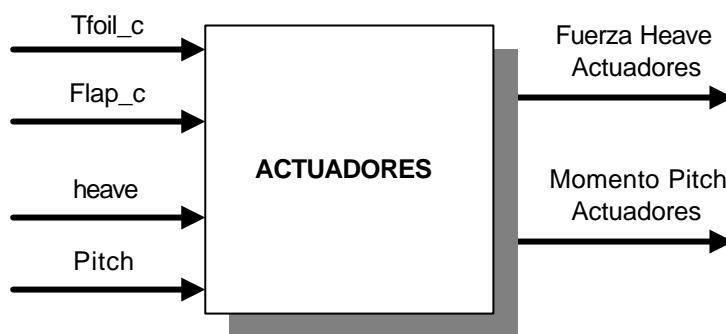


Figura 4: Modelo simplificado de actuadores

El modelo simulink diseñado para ello es:

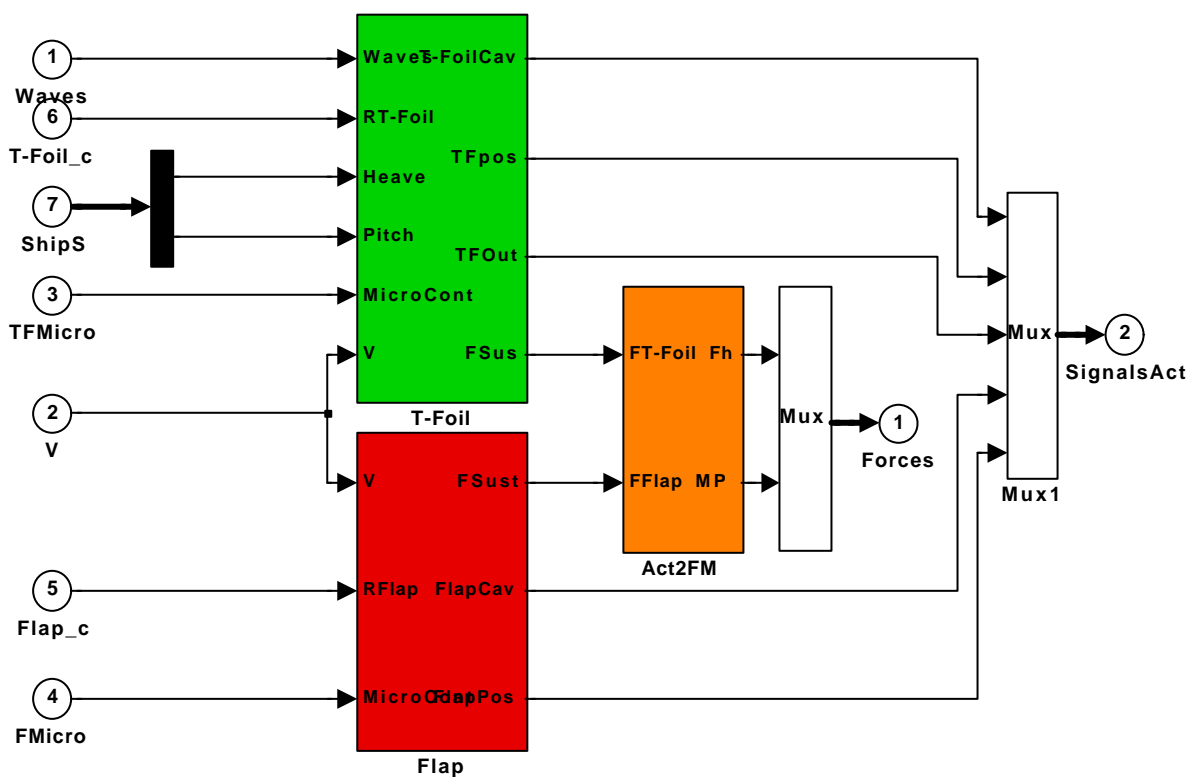


Figura 5: Modelo simulink de actuadores

## 2.3 MODELO DEL PROCESO

Con todo ello el proceso multivariable a controlar es:

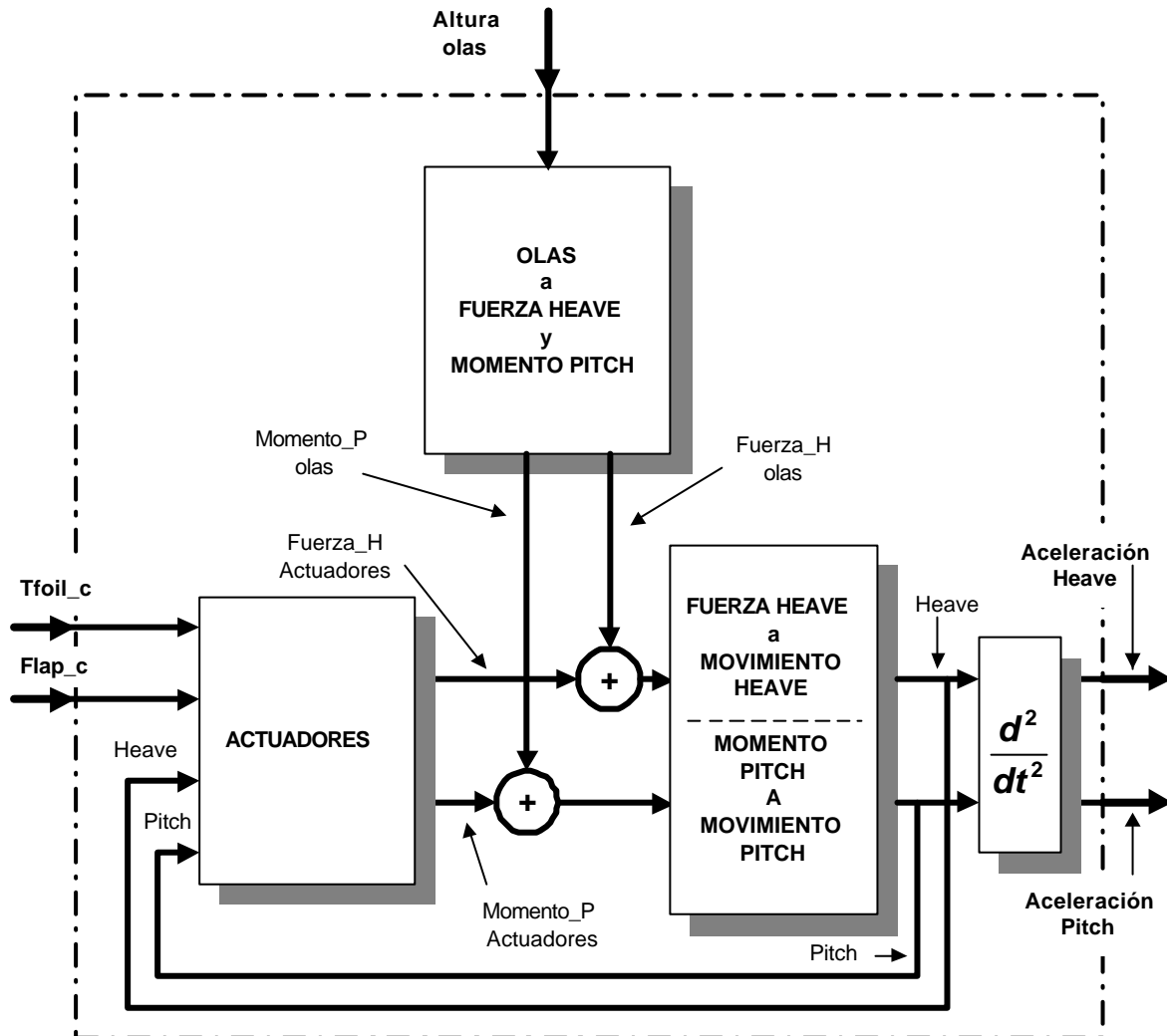


Figura 6: Modelo del proceso

## 3 ESQUEMA DE CONTROL

### 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

El sistema incluye el bloque controlador que estará compuesto por dos controladores, uno para el Flap y otro para el T\_Foil. Con ambos se controlará la aceleración vertical del buque. Como se ha comprobado [3] el sistema multivariable dado se puede tratar como dos sistemas monovariantes si se implementa una red de desacoplo adecuada, de forma que un controlador  $G_{C(F)}$  actúa sobre el flap para disminuir la aceleración en la componente de heave y otro controlador  $G_{C(TF)}$  actúa sobre el T\_Foil para disminuir la aceleración en la componente de pitch.

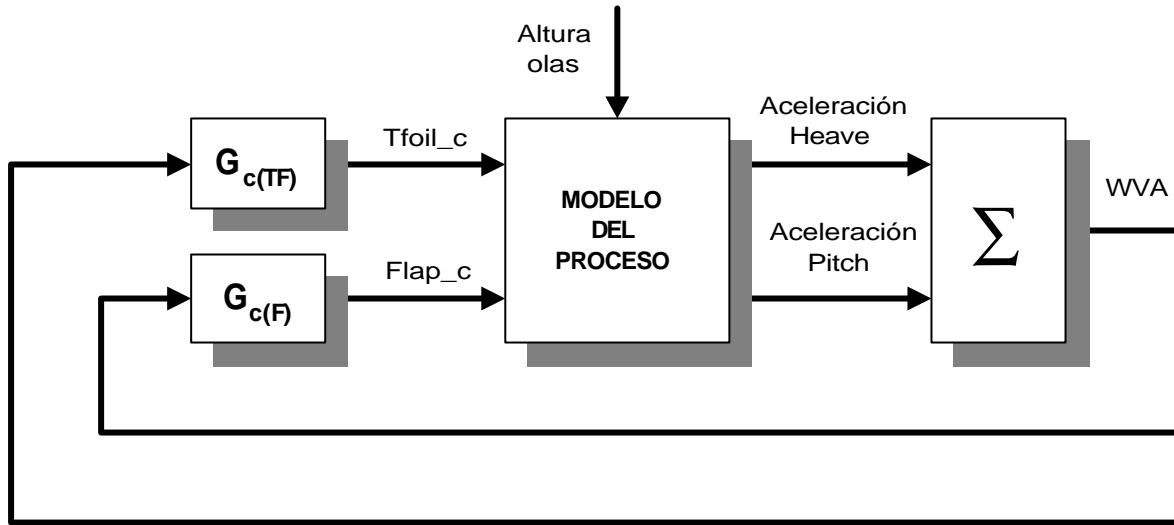


Figura 7: Esquema de control

El bloque "Modelo del Proceso" tiene como salidas las aceleraciones de heave y Pitch del c.d.g. del buque. Éstas son las entradas del bloque  $\Sigma$  que se utiliza para calcular la aceleración vertical medida a 40 metros a proa del c.d.g. En este punto está situado uno de los pasajeros de la primera fila y que soporta la mayor aceleración vertical. En la figura 8 se indica el bloque Simulink que suma las dos aceleraciones. La aceleración de Pitch se multiplica por el bloque Gain para convertir la aceleración angular en aceleración tangencial en el punto del "peor pasajero". En la variable WVA se guardan en el espacio de trabajo de Matlab los valores de las aceleraciones medidas con y sin controlador.

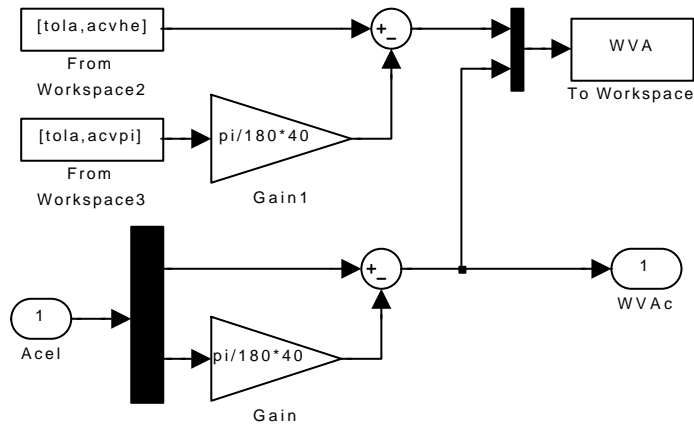


Figura 8: Diagrama de bloques para el cálculo de la WVA

### 3.2 ESPECIFICACIONES

El principal objetivo a cumplir en el diseño del controlador [4] es el aumento del confort de los pasajeros. Para cuantificarlo, se utilizará el índice de mareo MSI (Motion Sickness Incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas).

$$MSI = 100 \left( 0.5 \pm \operatorname{erf} \left( \frac{\pm \log ( | \dot{s}_3 | / g ) \pm \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right)$$

con  $| \dot{s}_3 |$ , aceleración vertical en el punto elegido (40 metros a proa del c.d.g.).

Y:

$$\mu_{MSI} = -0.819 \pm 2.32 ( \log_{10} \omega_e )^2$$

Como función de coste se tratará de minimizar la aceleración vertical en el punto del buque elegido.

### 3.3 CONTROLADORES

Se han implementado diferentes tipos de controladores clásicos para el mismo esquema de control en posición.

#### 3.3.1 CONTROL PID

##### 3.3.1.1 Mixto

El modelo simulink de un PID Mixto es el siguiente:

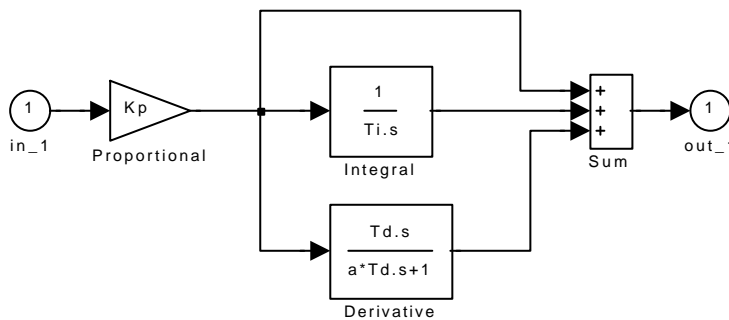


Figura 9: Estructura del regulador PID Mixto

Y la función de transferencia:

$$G_c(s) = kp \frac{a Ti Td s^2 + [Ti + (a + 1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)}$$

##### 3.3.1.2 Paralelo

El modelo simulink de un PID Paralelo es el siguiente:

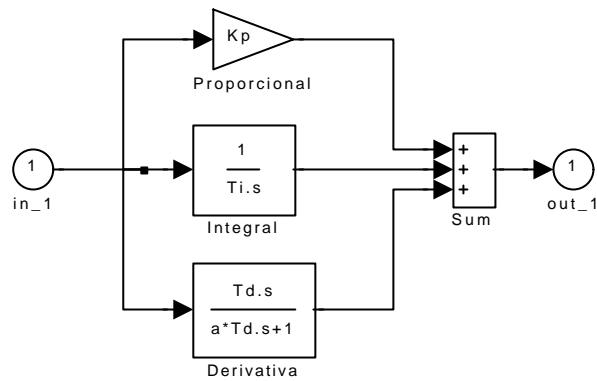


Figura 10: Estructura del regulador PID Paralelo

Y la función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{kpaTiTd s^2 + [kpTi + (a + 1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)}$$

### 3.3.1.3 Serie

El modelo simulink de un PID Serie es el siguiente:

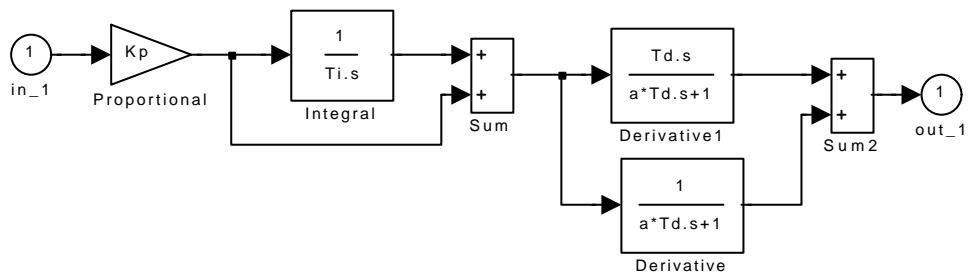


Figura 11: Estructura del regulador PID Serie

Y la función de transferencia:

$$G_c(s) = kp \frac{Ti Td s^2 + (Ti + Td) s + 1}{Ti s (a Td s + 1)}$$

## 3.3.2 CONTROL PD

### 3.3.2.1 Mixto

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = kp \frac{(a+1)Td s + 1}{aTd s + 1}$$

### 3.3.2.2 Paralelo

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = \frac{(kpa + 1)Td s + kp}{aTd s + 1}$$

### 3.3.2.3 Serie

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = kp \frac{1 + Td s}{aTd s + 1}$$

## 3.3.3 REDES

### 3.3.3.1 Primer Orden

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = kp \frac{s + z}{s + p}$$

### 3.3.3.2 Adelanto

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = kp \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}}$$

### 3.3.3.3 Atraso-Adelanto

La función de transferencia es:

$$G_c(s) = kp \frac{\left(s + \frac{1}{T1}\right)\left(s + \frac{1}{T2}\right)}{\left(s + \frac{a}{T1}\right)\left(s + \frac{1}{aT2}\right)} \quad (0.05 < a < 0.95)$$

### 3.4 SINTONÍA DE LOS CONTROLADORES

El objetivo de diseño de los controladores es maximizar la reducción de la aceleración vertical del buque que implicará también una reducción en el índice de mareo de los pasajeros. Para conseguir esta maximización se ha empleado el método de algoritmos genéticos siendo la función de coste la maximización de  $MejWVA = WVAs - WVAc$  (equivalente a minimizar  $WVAc$ ) obtenida a partir del modelo del buque Assess dentro del software MIBAV. Para maximizar el valor de los diferentes parámetros del controlador dentro de su intervalo se ha realizado el algoritmo genético que se puede ver en el diagrama de flujo de la figura 12. En el Apéndice C se incluye el algoritmo principal utilizado.

Hemos comprobado que no es más importante realizar un único algoritmo genético con muchas generaciones sino que al ser un proceso aleatorio se pueden obtener mejores resultados ejecutando repetidas veces el algoritmo aunque sea con pocas generaciones porque los valores de la función de coste obtenidos dependen en su mayor parte de la primera generación que encuentra y si ésta no es buena generar muchas poblaciones nuevas no lleva a una importante mejora de la función de coste.

La elección del modelo Assess para la búsqueda del controlador implica también que se ha encontrado en cada caso un único controlador para controlar “al mismo tiempo” los 6 casos diferentes que resultan de la combinación de las velocidades del buque 20, 30 y 40 nudos y de los estados de la mar 4 y 5. Con este método se puede cubrir de alguna forma un comportamiento aceptable para todas las condiciones posibles. La otra opción habría sido considerar el diseño de controladores independientes para cada velocidad y estado de la mar de lo que se obtendría probablemente un mejor controlador para cada caso en concreto pero al aplicar dicho controlador a otras condiciones de velocidad del buque y estado de la mar no tiene porqué ser bueno ni el mejor. Éste método se ha empleado con una Red de Primer Orden que ha sido el controlador que ha proporcionado los mejores resultados.

En las simulaciones que se presentan a continuación y que se han realizado con el modelo Bench se incluyen en una tabla los valores de la aceleración vertical y MSI obtenidos con cada controlador aplicado a las seis condiciones nombradas anteriormente, así como las gráficas para el caso de velocidad del buque 40 nudos y estado de la mar 4 que representan la posición del  $t_{foil}$  y el flap en cada instante de tiempo, una comparación entre la aceleración vertical del buque (incluye la aceleración heave y pitch) sin controlador y con controlador que se representa tanto en función del tiempo como en función de la frecuencia, y por último se compara también en otra gráfica el índice de mareo de los pasajeros dentro del buque cuando navega sin controlador y con controlador. (En el Apéndice C se pueden encontrar los archivos .m de Matlab utilizados).

Se incluyen así mismo el mapa polo\_cero de todos los controladores simulados.

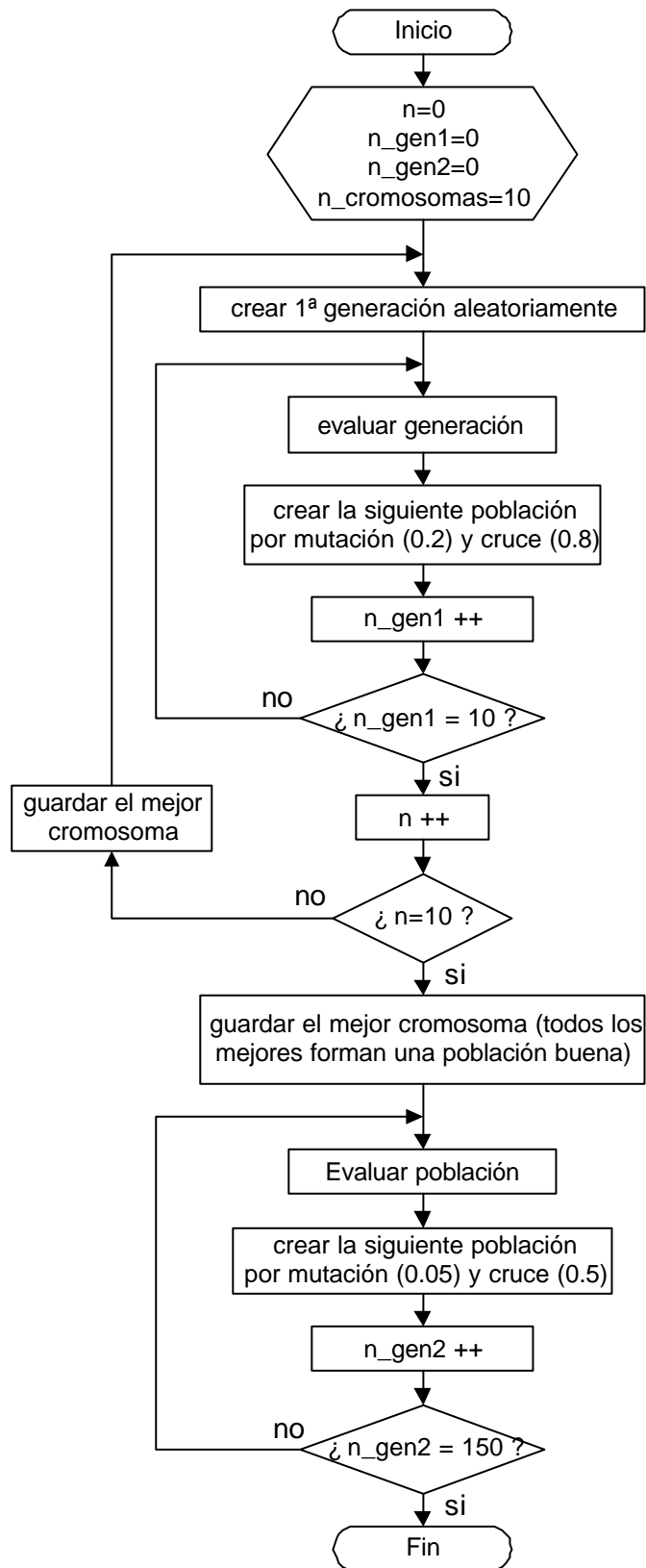


Figura 12: Diagrama de flujo del algoritmo



## 4 SIMULACIONES

### 4.1 CONTROL PD

#### 4.1.1 MIXTO

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 102.09 \frac{(0.1 + 1) * 19.29 s + 1}{0.1 * 19.29 s + 1} = 1123 \frac{s + 0.0471}{s + 0.5184}$$

$$G_{c(F)}(s) = 85.69 \frac{(0.1 + 1) * 14.58 s + 1}{0.1 * 14.58 s + 1} = 941.6 \frac{s + 0.0624}{s + 0.6859}$$

El mapa de polo-cero comparativo es:

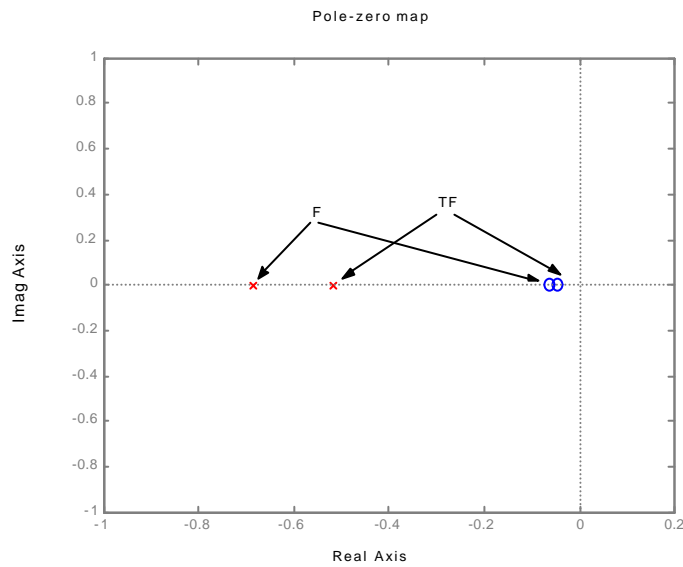


Figura 13: Mapa polo-cero del PD Mixto

Tabla 1

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.51	0.55	6.00	8.42	9.50	11.44
2e5	0.81	0.84	4.03	25.29	26.74	5.42
3e4	0.37	0.51	26.66	2.33	4.92	52.57
3e5	1.11	1.28	13.14	35.58	41.42	14.10
4e4	0.56	0.82	31.60	3.39	7.86	56.93
4e5	1.47	1.73	14.81	43.50	50.42	13.71
<b>PROMEDIOS</b>	<i>0.81</i>	<i>0.95</i>	<i>16.04</i>	<i>19.75</i>	<i>23.48</i>	<i>25.70</i>

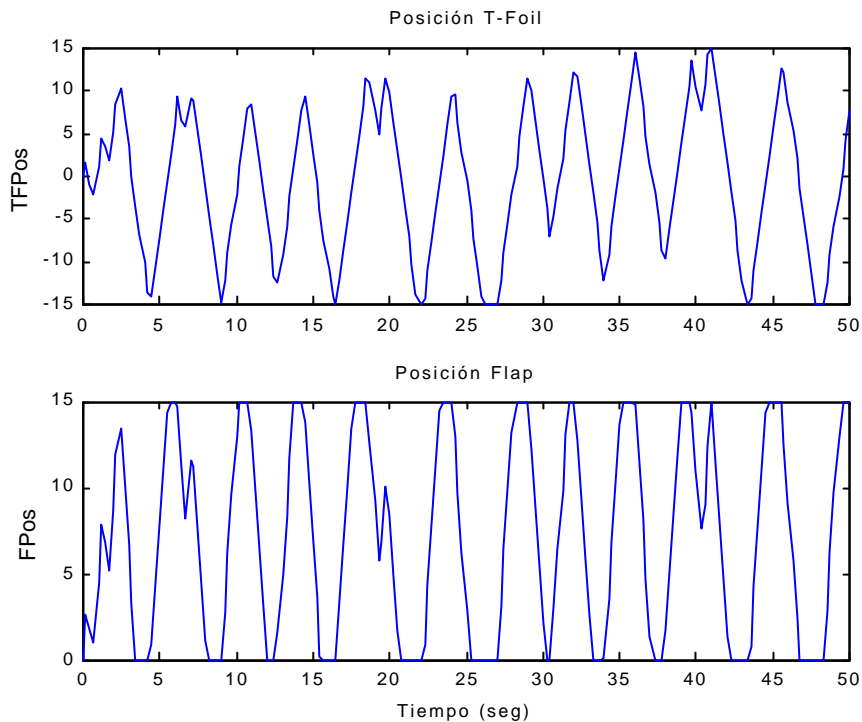


Figura 14: Posición de los actuadores

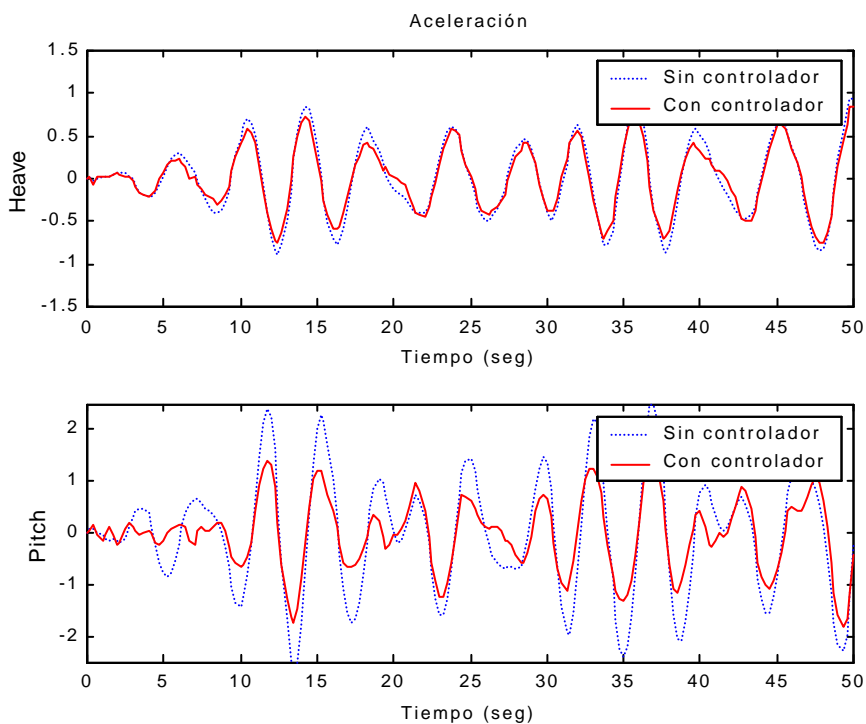


Figura 15: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

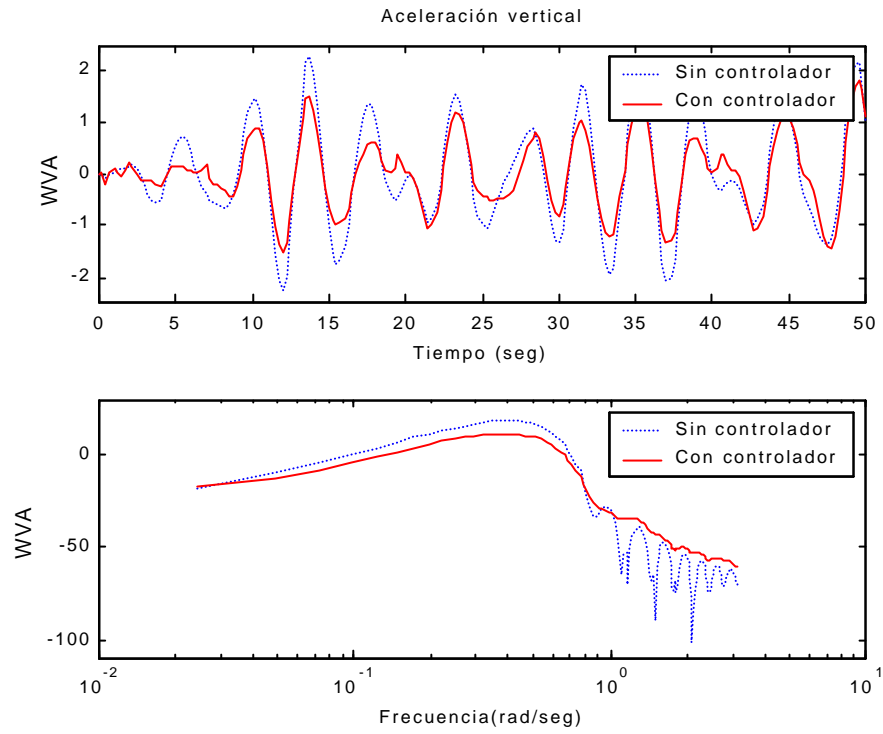


Figura 16: Serie temporal y bode de WVA

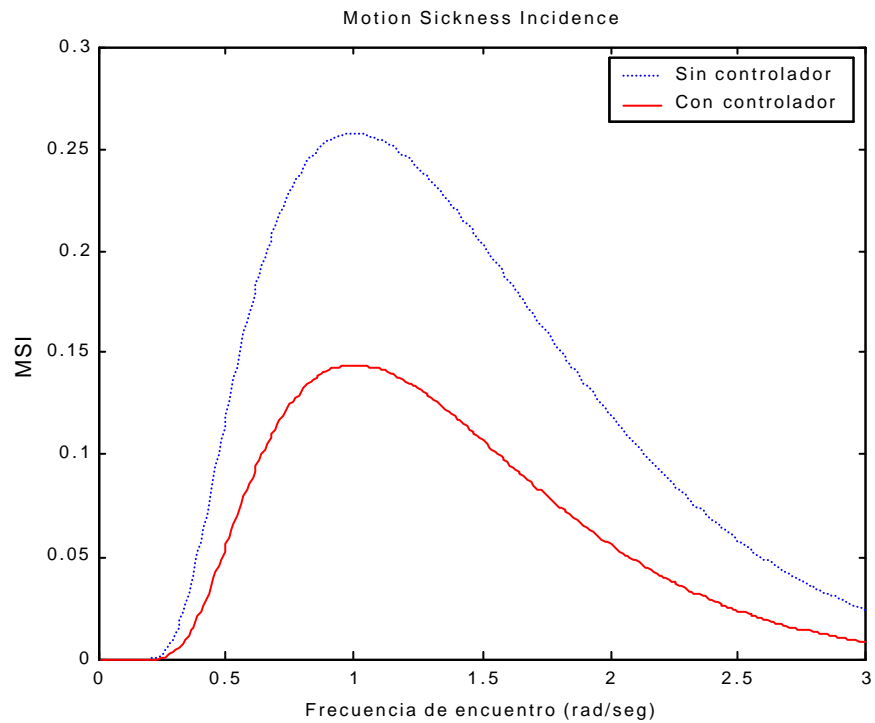


Figura 17: Índice de mareo

**4.1.2 PARALELO**

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = \frac{(149.16 * 0.1 + 1) * 0.91 s + 149.16}{0.1 * 0.91 s + 1} = 159.1538 \frac{s + 10.299}{s + 10.989}$$

$$G_{c(F)}(s) = \frac{(3.63 * 0.1 + 1) * 18.14 s + kp}{0.1 * 18.14 s + 1} = 13.6295 \frac{s + 0.1468}{s + 0.5513}$$

El mapa de polo-cero comparativo es:

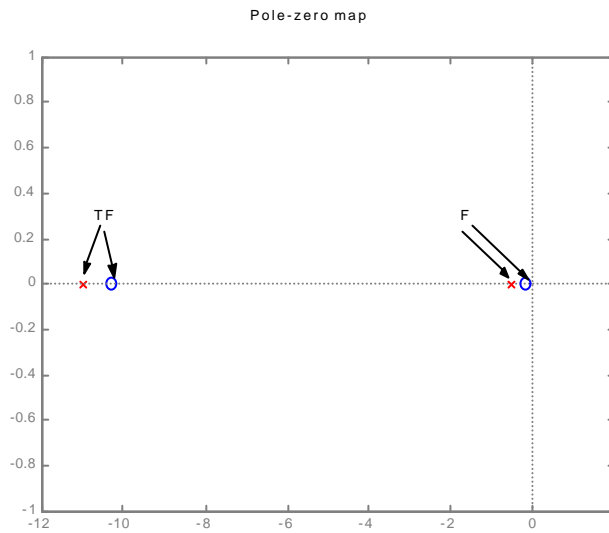


Figura 18: Mapa polo-cero del PD Mixto

Tabla 2

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI Con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.50	0.55	8.55	7.97	9.50	16.18
2e5	0.80	0.84	5.33	24.82	26.74	7.18
3e4	0.35	0.51	30.81	2.01	4.92	59.23
3e5	1.09	1.28	14.55	34.92	41.42	15.69
4e4	0.53	0.82	34.81	3.01	7.86	61.69
4e5	1.41	1.73	18.35	41.69	50.42	17.30
<b>PROMEDIOS</b>	<b>0.78</b>	<b>0.95</b>	<b>18.73</b>	<b>19.07</b>	<b>23.48</b>	<b>29.54</b>

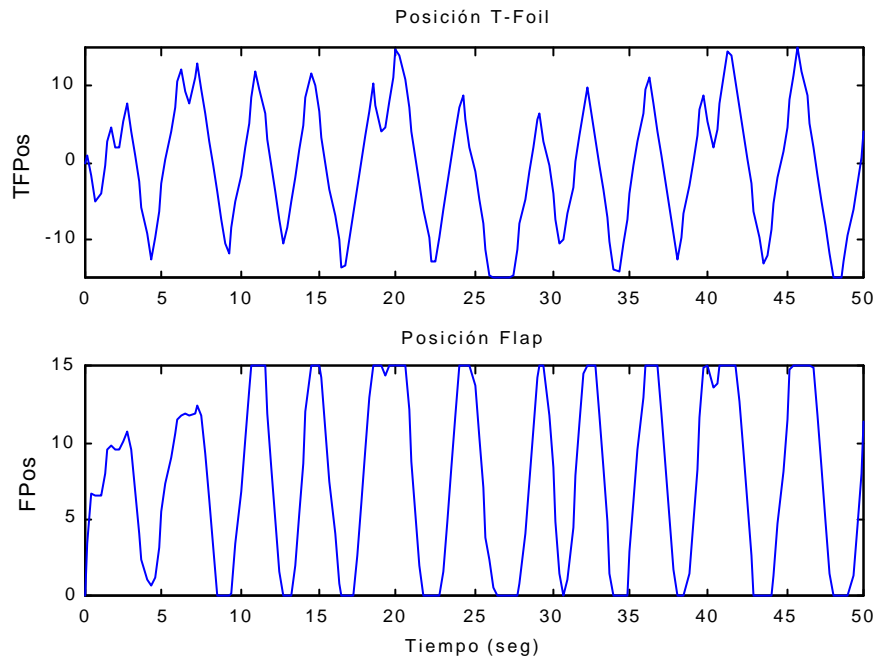


Figura 19: Posición de los actuadores

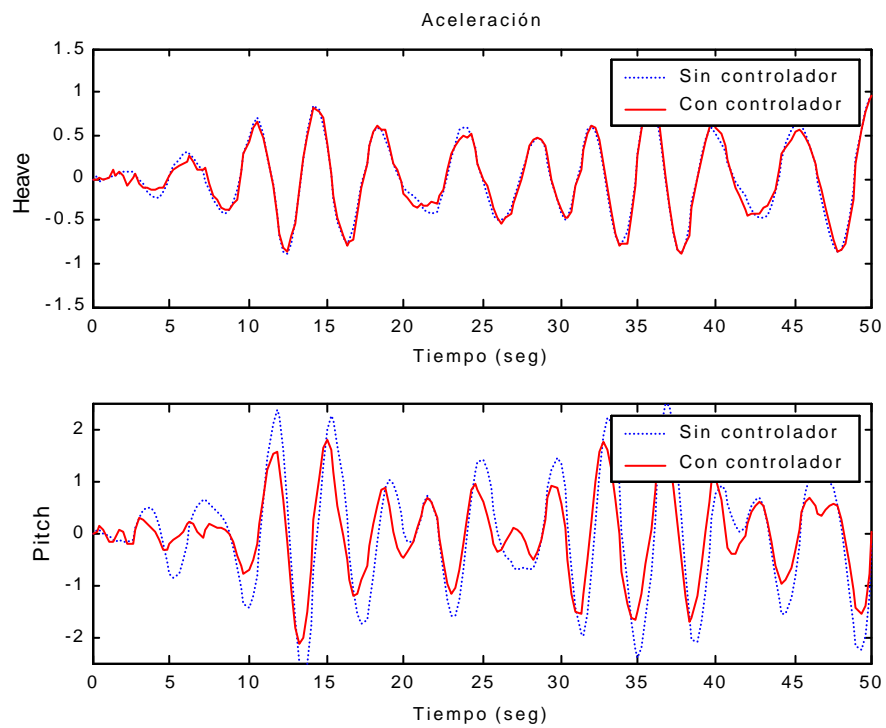


Figura 20: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

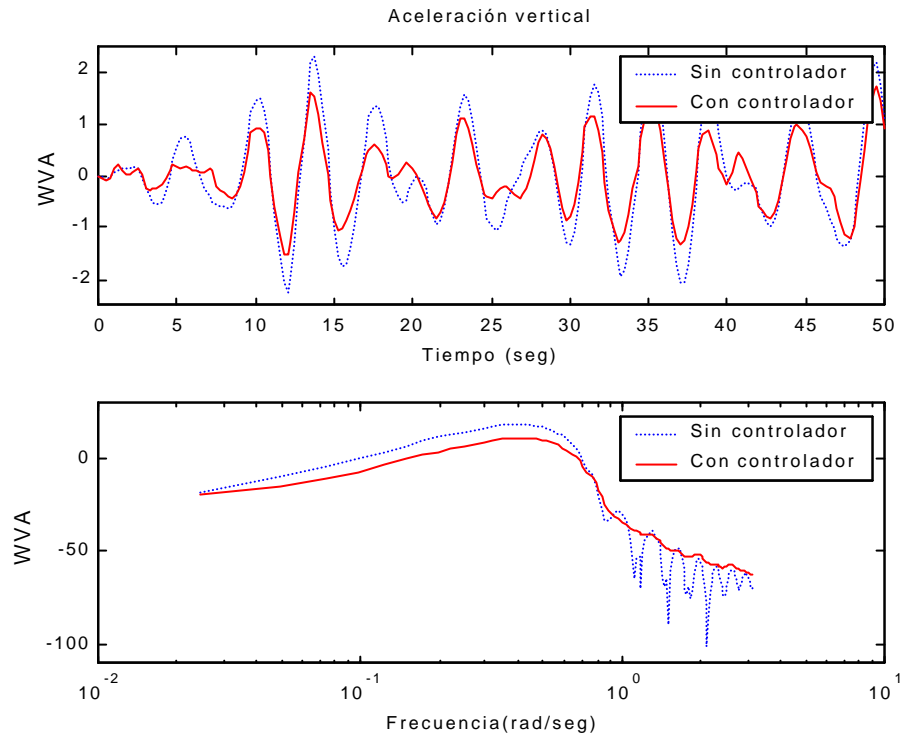


Figura 21: Serie temporal y bode de WVA

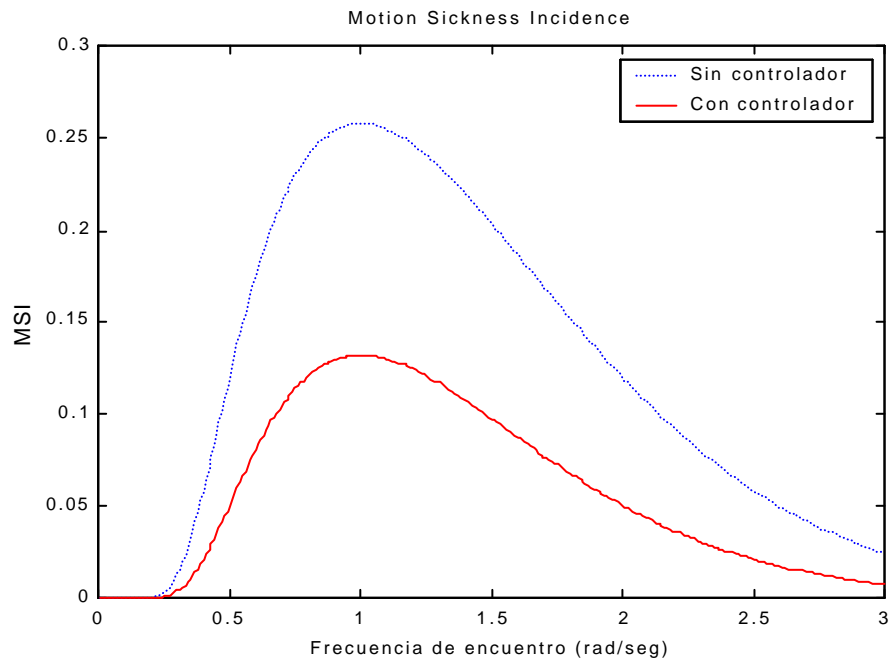


Figura 22: Índice de mareo

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**4.1.3 SERIE**

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 149.63 \frac{1 + 0.17 s}{0.1 * 0.17 s + 1} = 1496.3 \frac{s + 5.8825}{s + 58.8235}$$

$$G_{c(F)}(s) = 92.90 \frac{1 + 0.11 s}{0.1 * 0.11 s + 1} = 929 \frac{s + 9.0909}{s + 90.9091}$$

Mapa polo-cero:

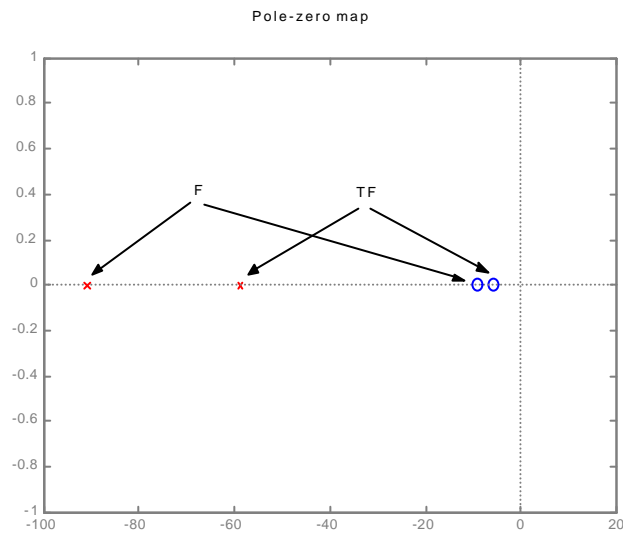


Figura 23: Mapa polo-cero del PD Mixto

Tabla 3

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI Sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.51	0.55	6.27	8.37	9.50	11.95
2e5	0.80	0.84	4.36	25.17	26.74	5.87
3e4	0.35	0.51	30.12	2.06	4.92	58.15
3e5	1.11	1.28	13.36	35.48	41.42	14.35
4e4	0.54	0.82	33.60	3.15	7.86	59.92
4e5	1.45	1.73	16.30	42.75	50.42	15.21
<b>PROMEDIOS</b>	<i>0.80</i>	<i>0.95</i>	<i>17.34</i>	<i>19.50</i>	<i>23.48</i>	<i>27.57</i>

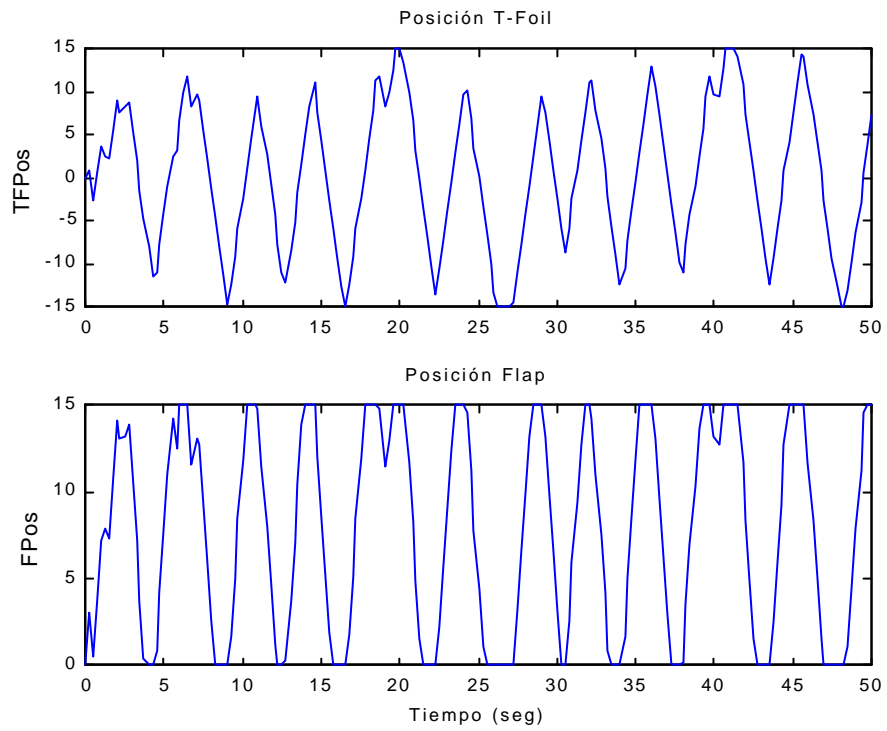


Figura 24: Posición de los actuadores

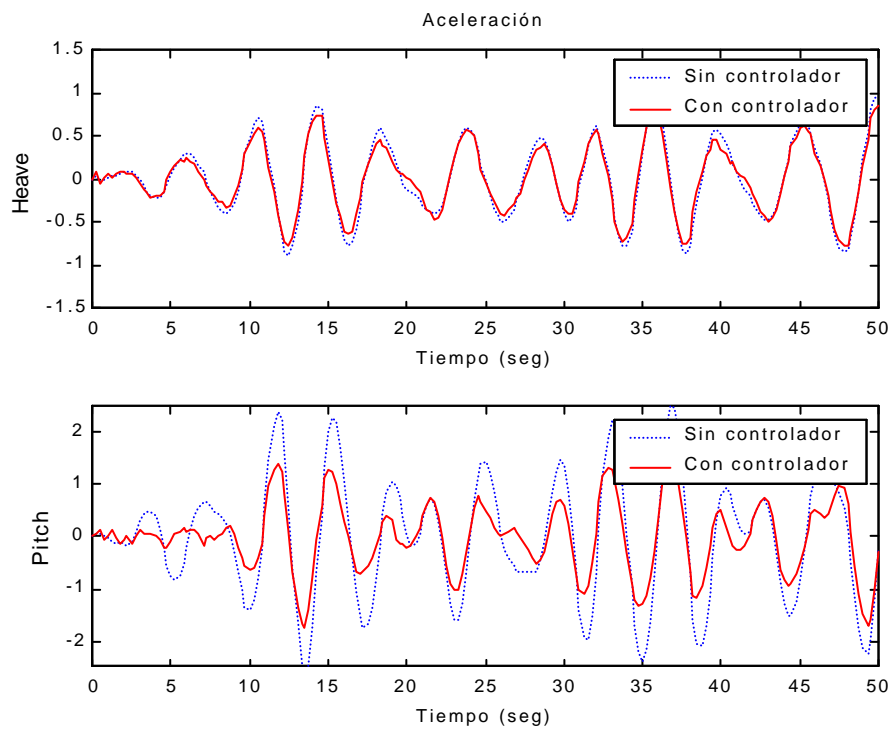


Figura 25: Serie temporal de la aceleración heave y pitch



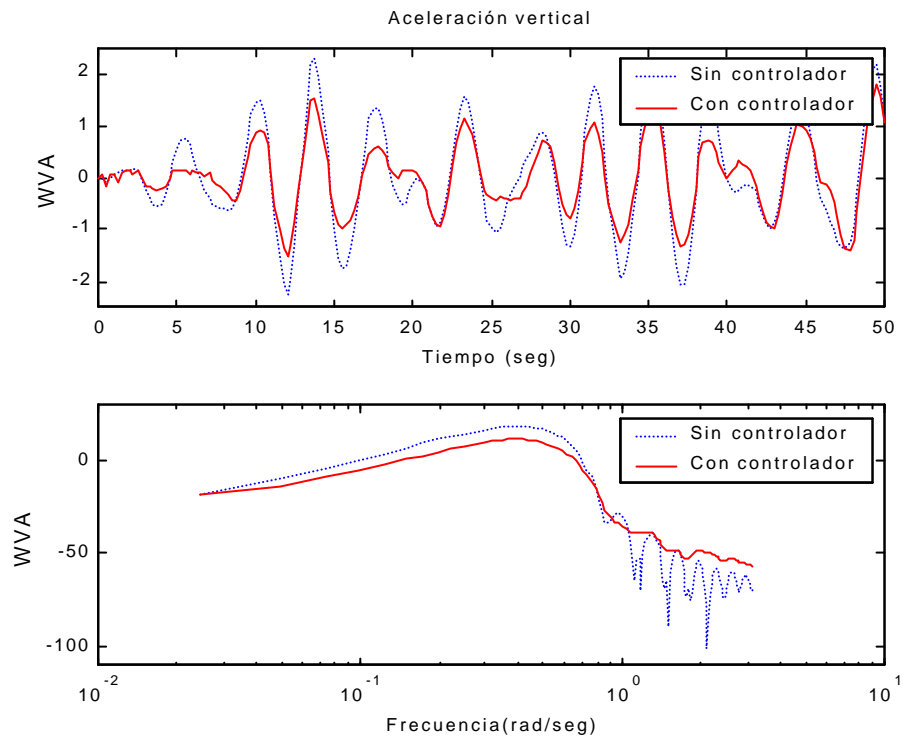


Figura 26: Serie temporal y bode de WVA

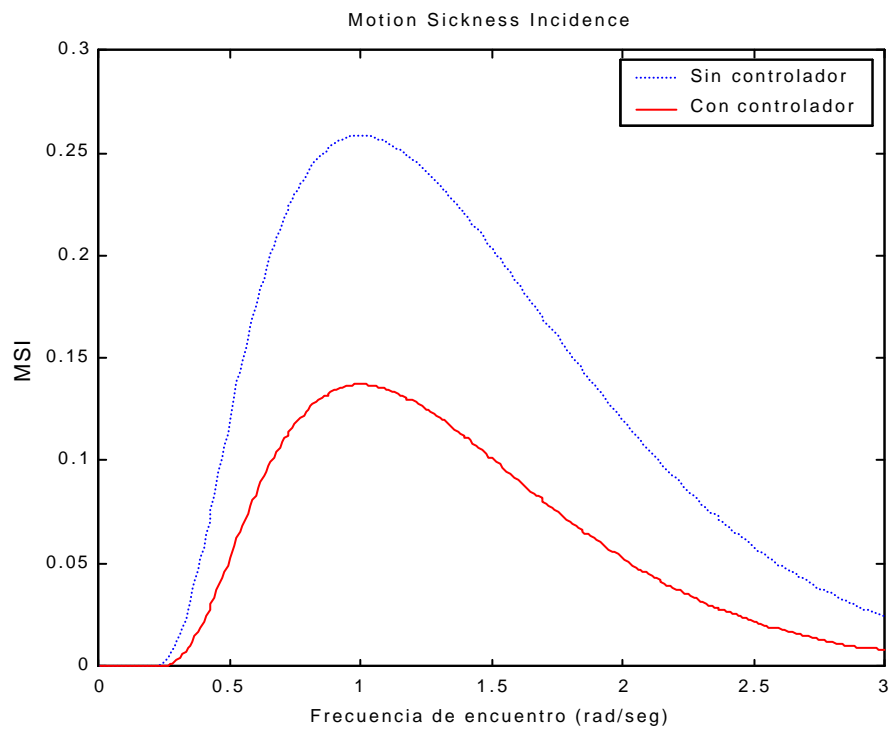


Figura 27: Índice de mareo

## 4.2 CONTROL PID

### 4.2.1 PID MIXTO

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 51.57 \frac{0.1 * 0.09 * 5.18 s^2 + [0.09i + (0.1 + 1) * 5.18]s + 1}{0.09 s (0.1 * 5.18 s + 1)} = 50.8842 \frac{(s + 125.6531)(s + 0.1730)}{s(s + 1.9305)}$$

$$G_{c(F)}(s) = 17.32 \frac{0.1 * 63.02 * 16.11 s^2 + [63.02 + (0.1 + 1) * 16.11]s + 1}{63.02 s (0.1 * 16.11 s + 1)} = 17.3192 \frac{(s + 0.7827)(s + 0.0126)}{s(s + 0.6207)}$$

Mapa polo-cero:

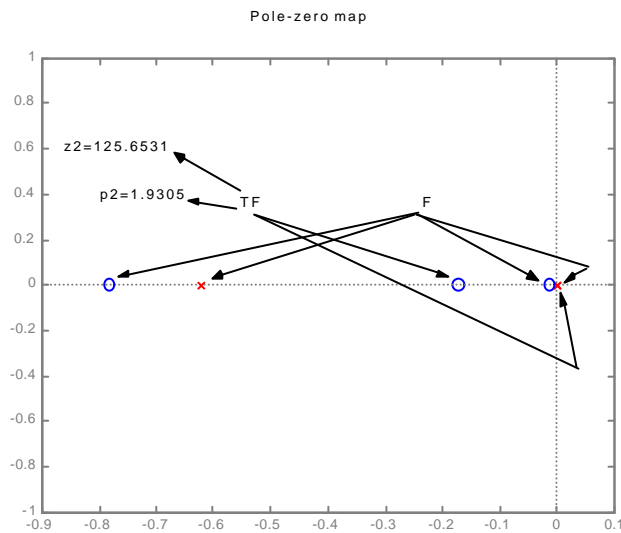


Figura 28: Mapa polo-cero del PID Mixto

Tabla 4

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.49	0.55	10.32	7.65	9.50	19.45
2e5	0.79	0.84	5.56	24.74	26.74	7.49
3e4	0.36	0.51	29.18	2.13	4.92	56.67
3e5	1.11	1.28	13.21	35.55	41.42	14.18
4e4	0.53	0.82	35.34	2.95	7.86	62.44
4e5	1.43	1.73	17.52	42.12	50.42	16.45
<b>PROMEDIOS</b>	<i>0.78</i>	<i>0.95</i>	<i>18.52</i>	<i>19.19</i>	<i>23.48</i>	<i>29.45</i>

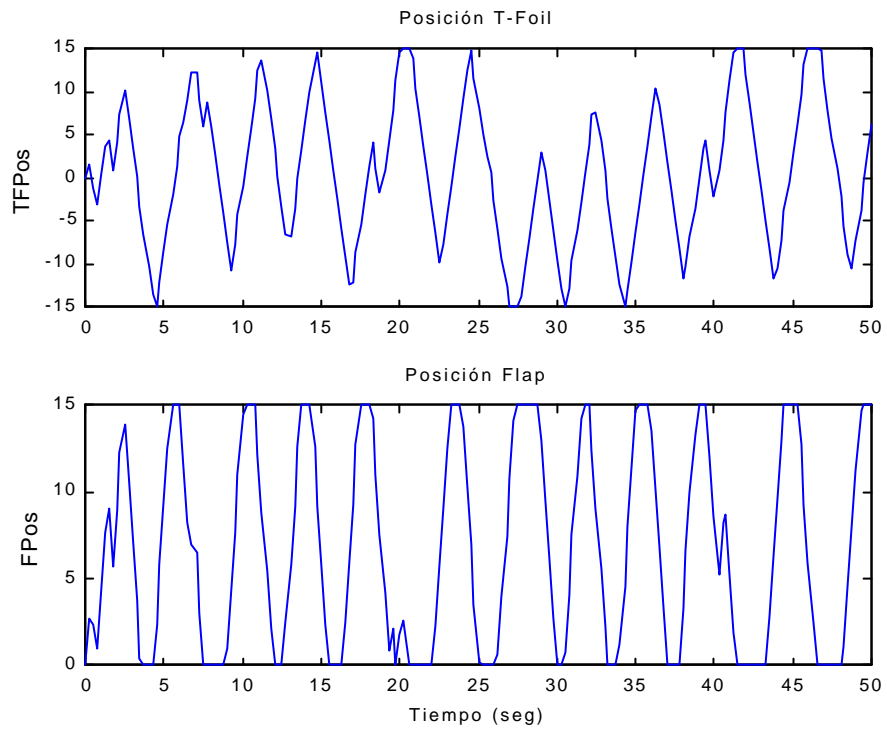


Figura 29: Posición de los actuadores

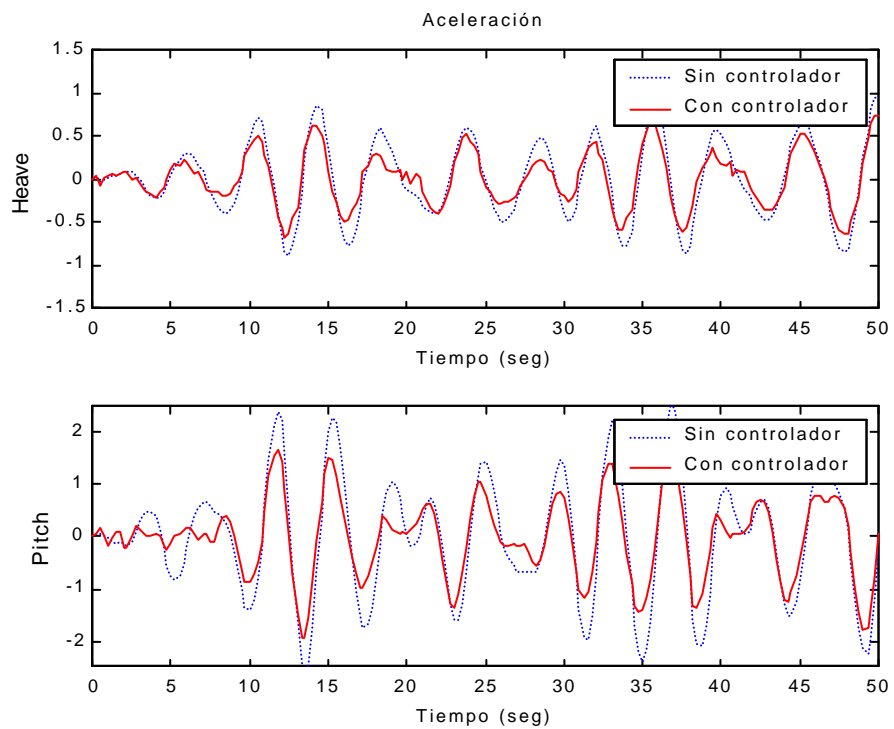


Figura 30: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

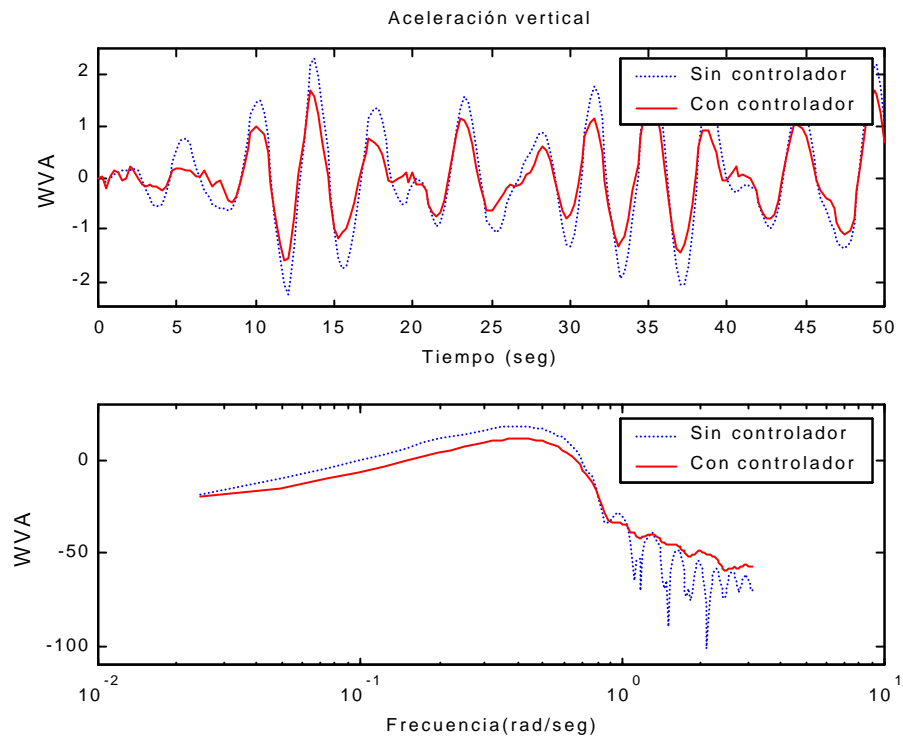


Figura 32: Serie temporal y bode de WVA

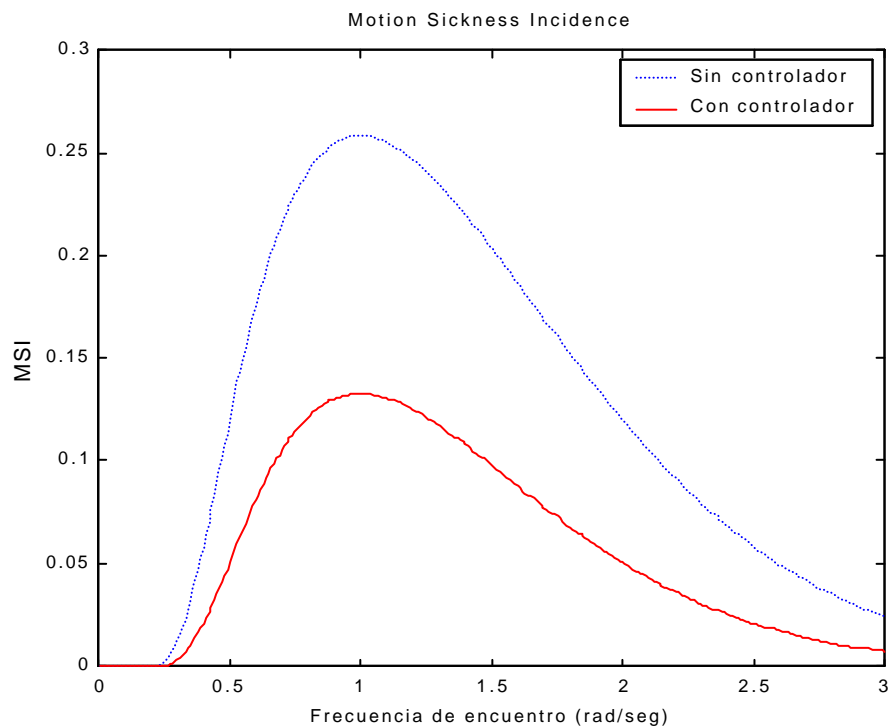


Figura 33: Índice de mareo

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**4.2.2 PID PARALELO**

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = \frac{71.97 * 0.1 * 0.02 * 14.59s^2 + [71.97 * 0.02 + (0.1 + 1) * 14.59]s + 1}{0.02s(0.1 * 14.59s + 1)} = 71.9671 \frac{(s + 8.2702)(s + 0.0576)}{s(s + 0.6854)}$$

$$G_{c(F)}(s) = \frac{51.67 * 0.1 * 23.15 * 16.85s^2 + [51.67 * 23.15 + (0.1 + 1) * 16.85]s + 1}{23.15s(0.1 * 16.85s + 1)} = 51.67 \frac{(s + 0.6018)(s + 0.0008)}{s(s + 0.5935)}$$

Mapa polo-cero:

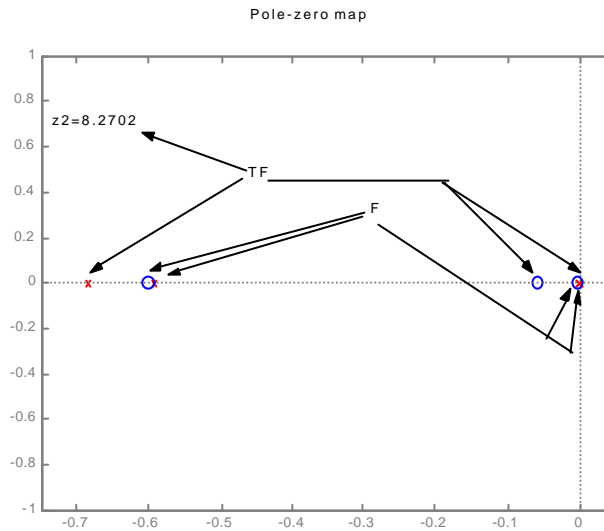


Figura 34: Mapa polo-cero del PID Paralelo

Tabla 5

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.50	0.55	8.58	7.96	9.50	16.25
2e5	0.79	0.84	5.74	24.67	26.74	7.74
3e4	0.35	0.51	30.29	2.05	4.92	58.43
3e5	1.10	1.28	13.79	35.28	41.42	14.83
4e4	0.54	0.82	34.45	3.05	7.86	61.16
4e5	1.44	1.73	16.77	42.51	50.42	15.68
<b>PROMEDIOS</b>	<i>0.79</i>	<i>0.95</i>	<i>18.27</i>	<i>19.25</i>	<i>23.48</i>	<i>29.0</i>

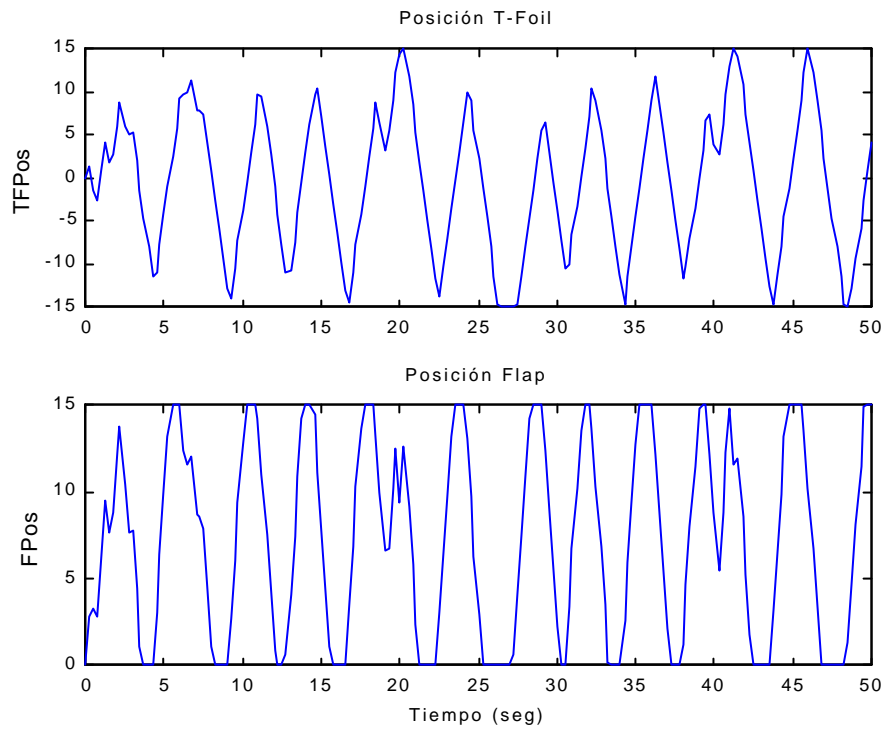


Figura 35: Posición de los actuadores

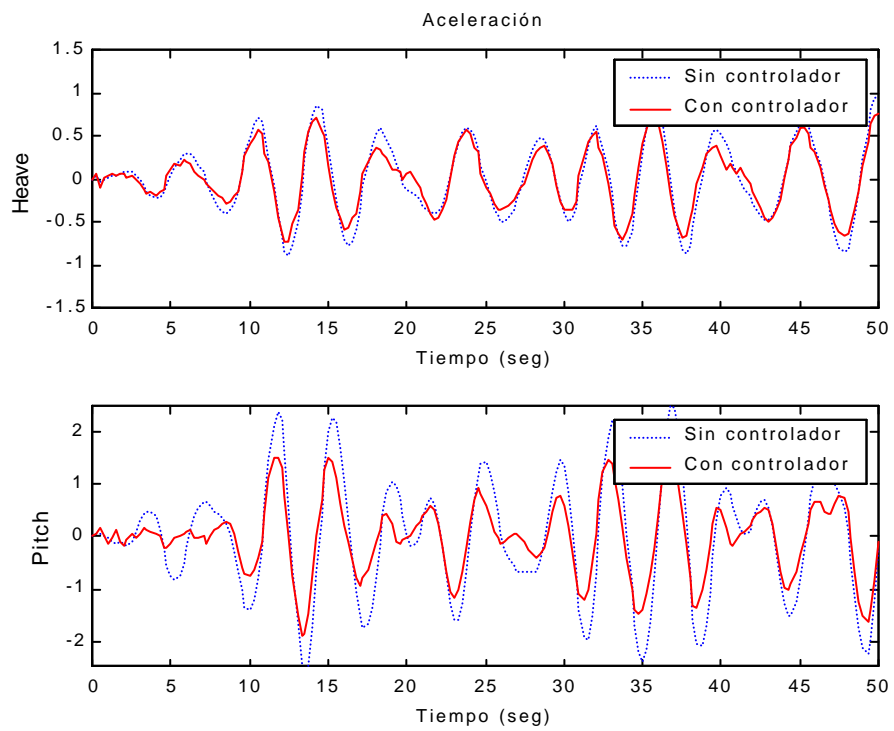


Figura 36: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

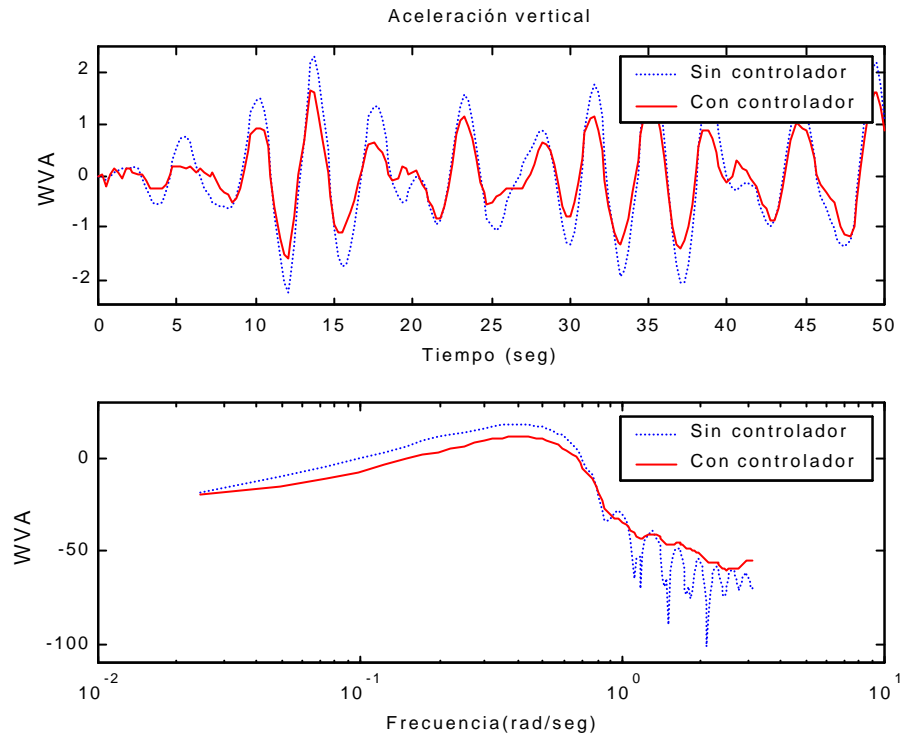


Figura 37: Serie temporal y bode de WVA

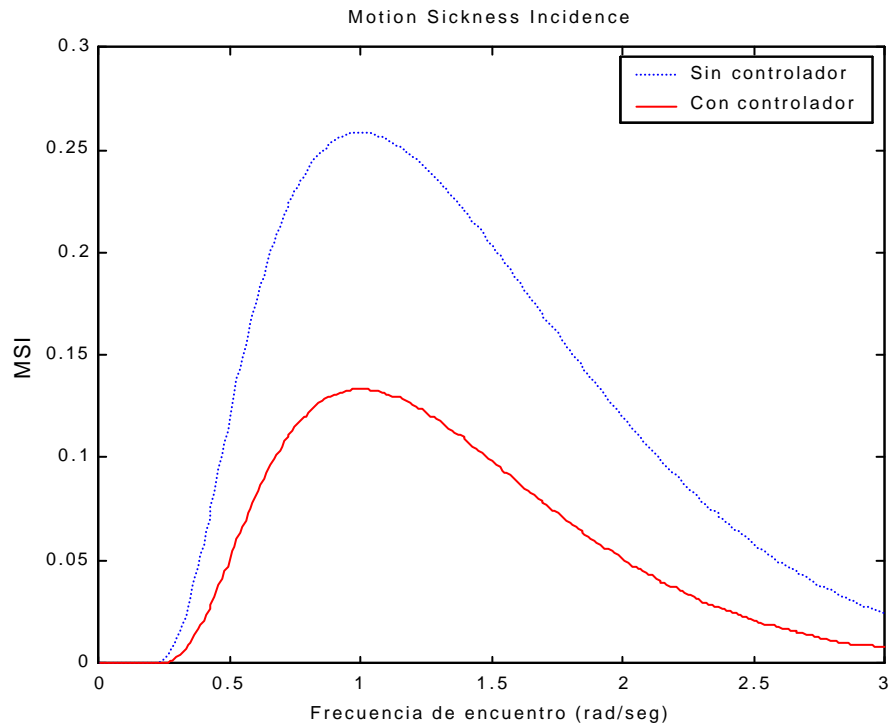


Figura 38: Índice de mareo

# CRIBAV

## CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

### 4.2.3 PID SERIE

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 60.93 \frac{2.09 * 11.71 s^2 + (2.09 + 11.71) s + 1}{2.09 s (0.1 * 11.71 s + 1)} = 609.3 \frac{(s + 0.4785)(s + 0.0854)}{s(s + 0.8540)}$$

$$G_{c(F)}(s) = 45.01 \frac{0.02 * 1.01 s^2 + (0.02 + 1.01) s + 1}{0.02 s (0.1 * 1.01 s + 1)} = 450.1 \frac{(s + 50)(s + 0.9901)}{s(s + 9.901)}$$

Mapa polo-cero:

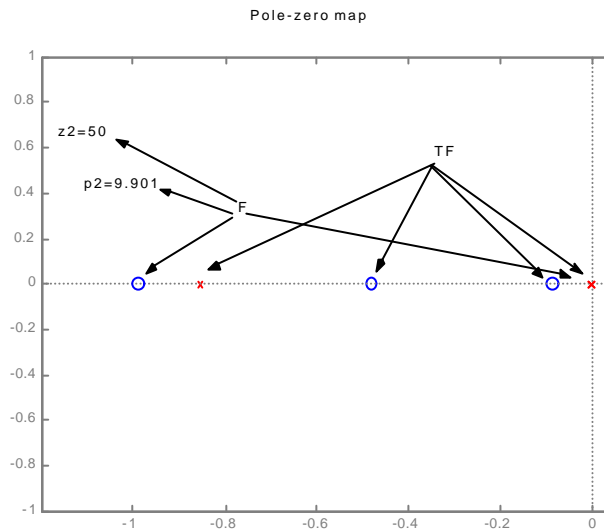


Figura 39: Mapa polo-cero del PID Serie

Tabla 6

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.50	0.55	7.85	8.09	9.50	14.90
2e5	0.80	0.84	4.84	25.00	26.74	6.52
3e4	0.35	0.51	29.75	2.09	4.92	57.57
3e5	1.09	1.28	14.56	34.92	41.42	15.70
4e4	0.53	0.82	35.61	2.92	7.86	62.83
4e5	1.42	1.73	17.78	41.99	50.42	16.71
<b>PROMEDIOS</b>	0.78	0.95	18.40	19.17	23.48	29.04



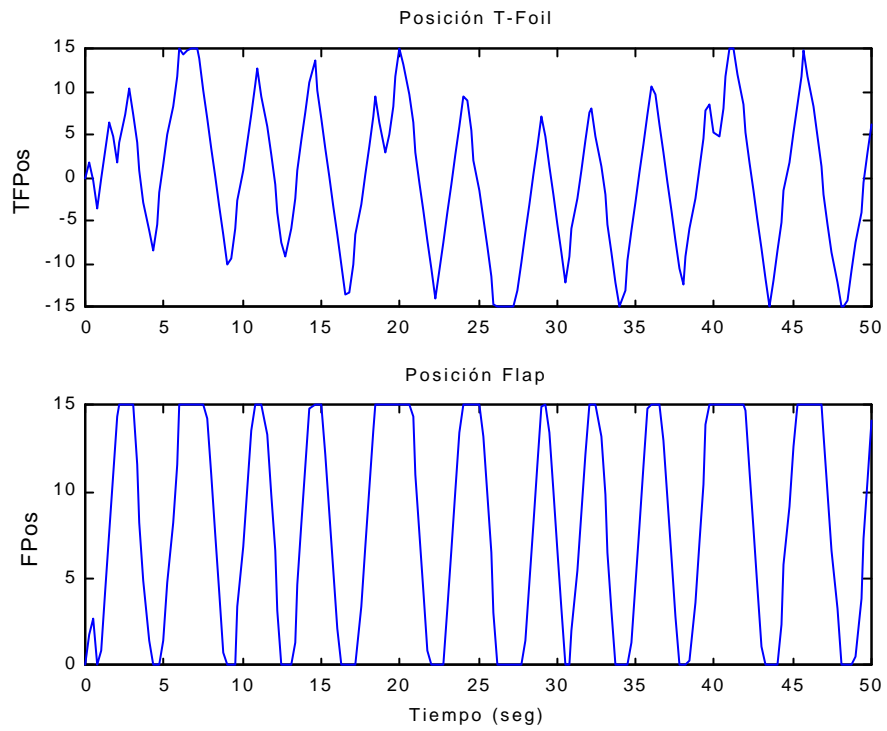


Figura 40: Posición de los actuadores

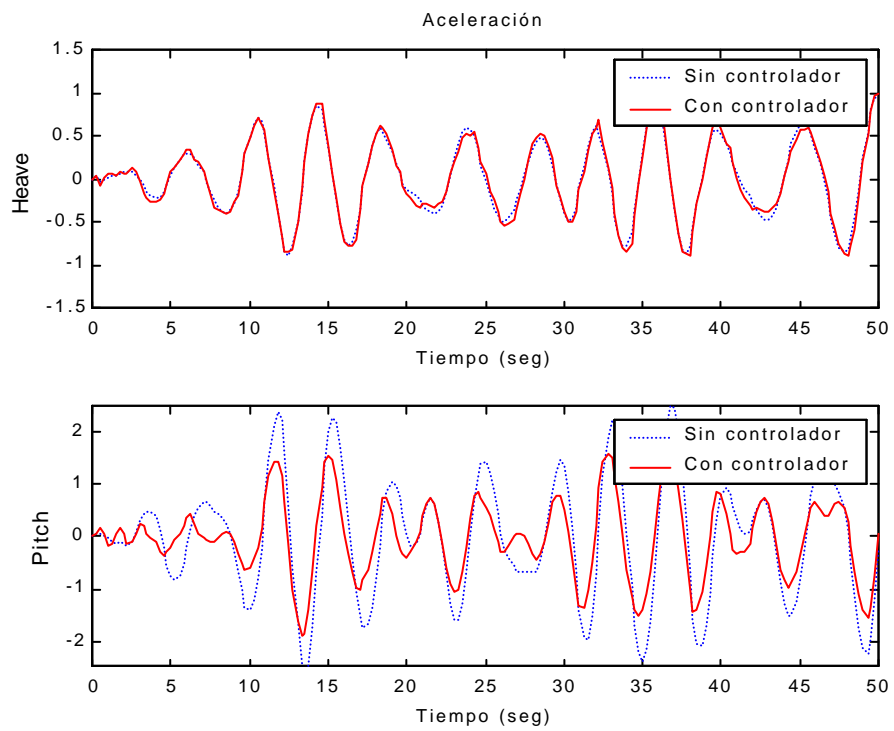


Figura 41: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

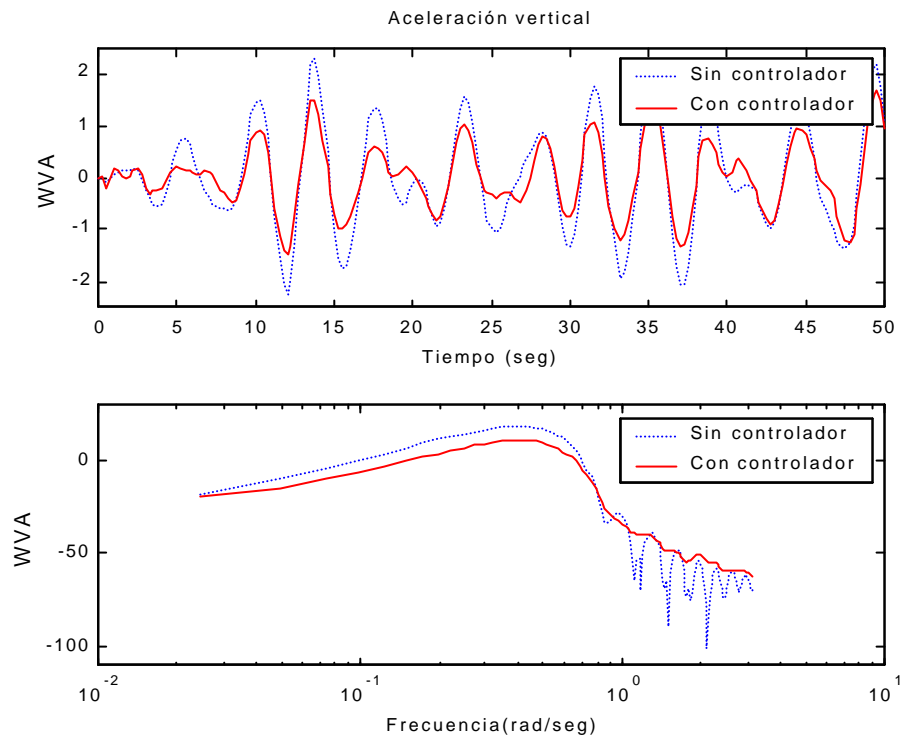


Figura 42: Serie temporal y bode de WVA

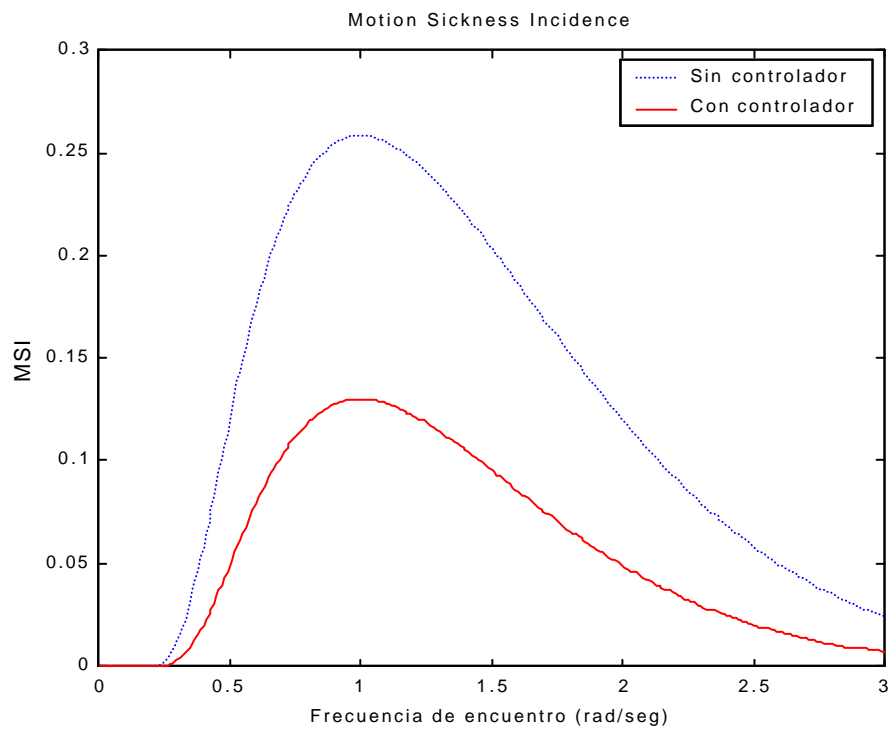


Figura 43: Índice de mareo

### 4.3 RED DE ADELANTO

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 149.30 \frac{s + \frac{1}{18.94}}{s + \frac{1}{0.65 * 18.94}} = 149.30 \frac{s + 0.0527}{s + 0.0812}$$

$$G_{c(F)}(s) = 59.63 \frac{s + \frac{1}{13.25}}{s + \frac{1}{0.86 * 13.25}} = 59.63 \frac{s + 0.0754}{s + 0.0877}$$

Mapa polo-cero:

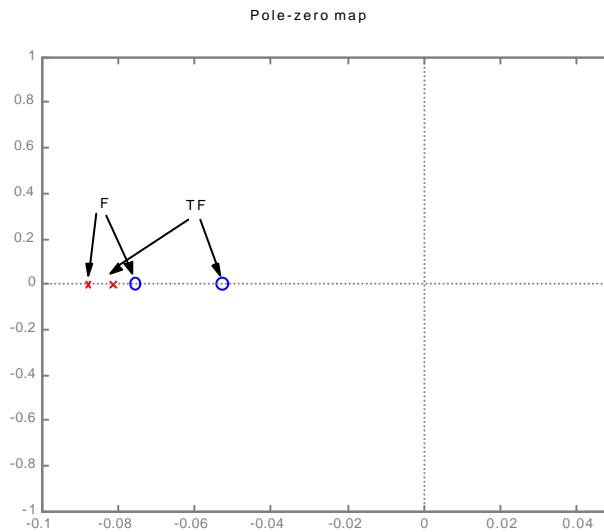


Figura 44: Mapa polo-cero de la Red de Adelanto

Tabla 7

EXPERIMENTO	WVA Con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.51	0.55	7.06	8.23	9.50	13.42
2e5	0.80	0.84	4.74	25.04	26.74	6.38
3e4	0.35	0.51	30.20	2.05	4.92	58.28
3e5	1.11	1.28	13.64	35.35	41.42	14.66
4e4	0.54	0.82	34.48	3.05	7.86	61.21
4e5	1.43	1.73	17.18	42.30	50.42	16.10
<b>PROMEDIOS</b>	0.79	0.95	17.88	19.34	23.48	28.34

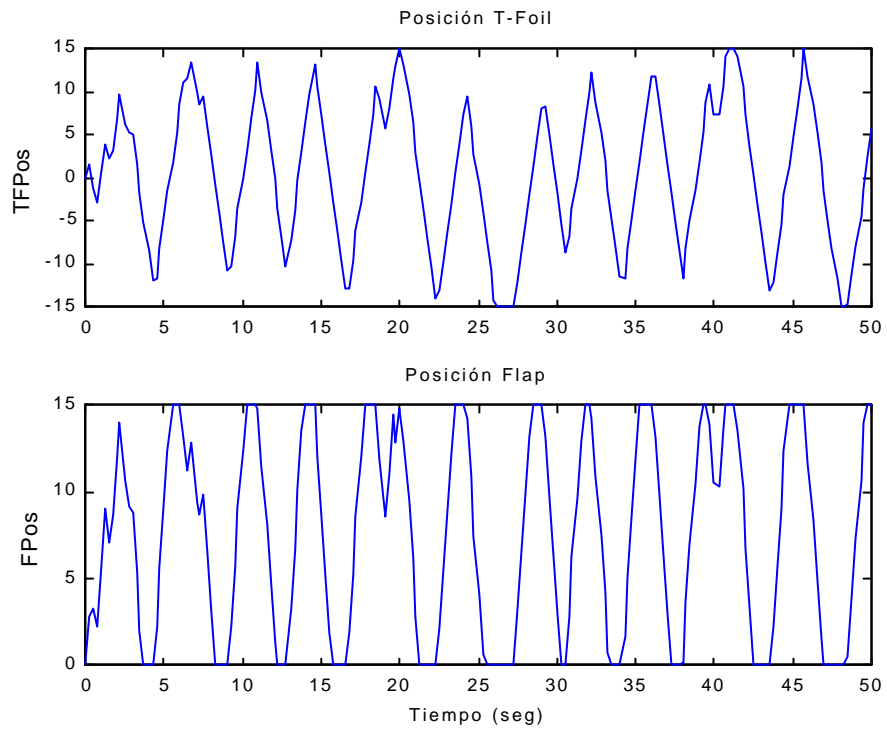


Figura 45: Posición de los actuadores

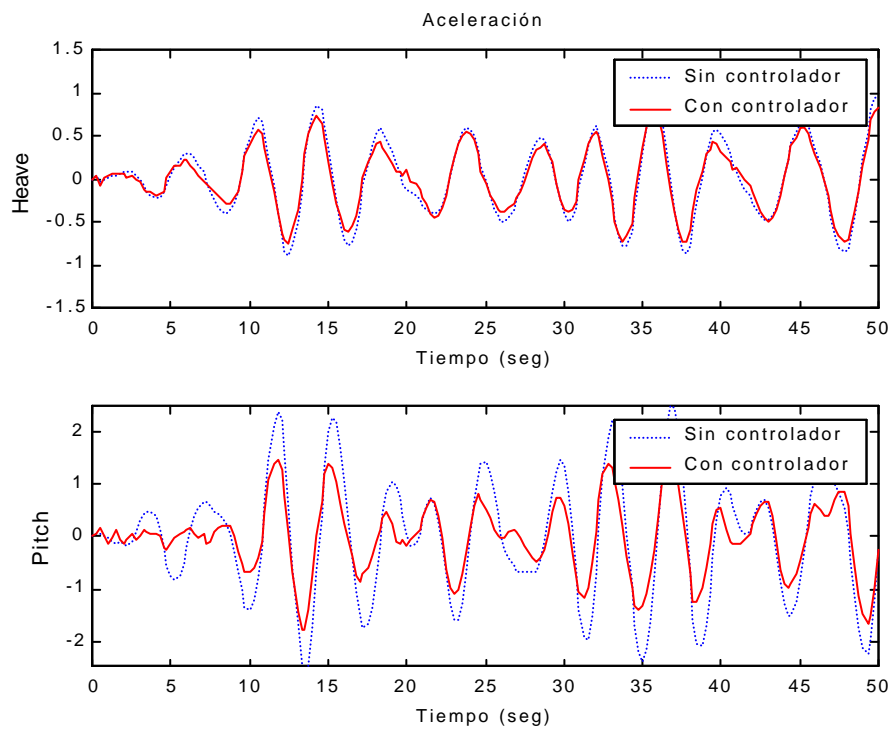


Figura 46: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

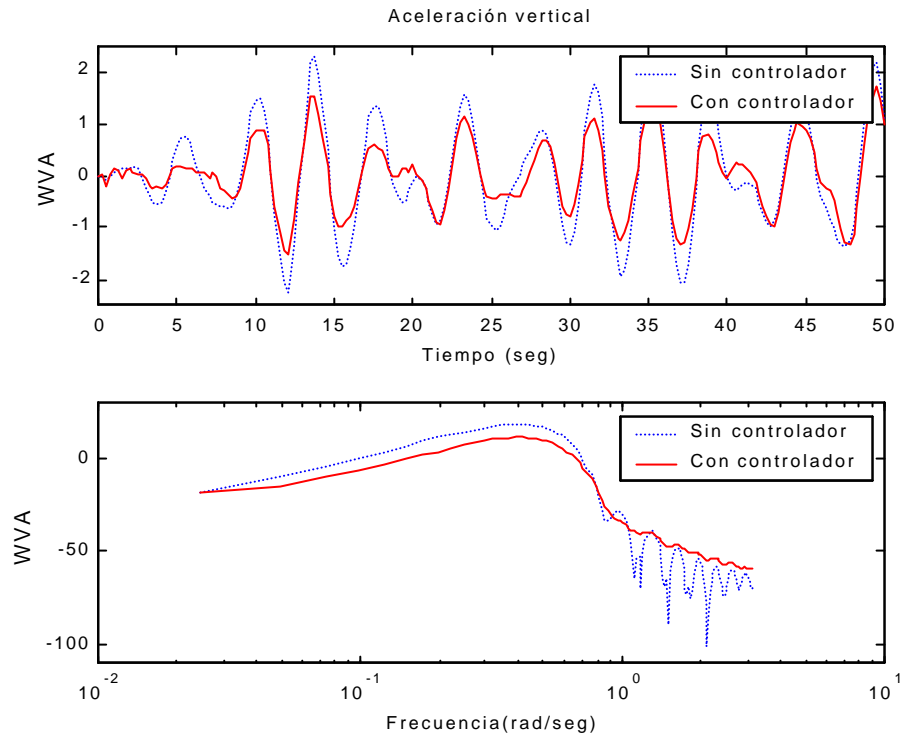


Figura 47: Serie temporal y bode de WVA

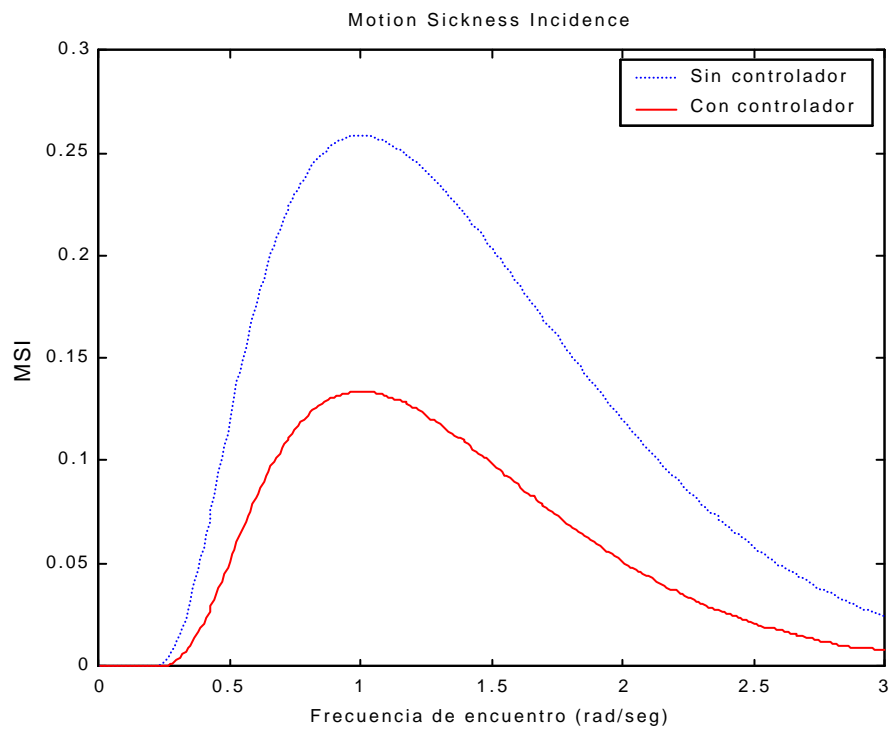


Figura 48: Índice de mareo

### 4.4 RED DE ATRASO-ADELANTO

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 133.11 \frac{\left(s + \frac{1}{11.06}\right) \left(s + \frac{1}{9.61}\right)}{\left(s + \frac{0.85}{11.06}\right) \left(s + \frac{1}{0.85 * 9.61}\right)} = 133.11 \frac{(s + 0.0904)(s + 0.10405)}{(s + 0.0768)(s + 0.1224)}$$

$$G_{c(F)}(s) = 148.42 \frac{\left(s + \frac{1}{0.30}\right) \left(s + \frac{1}{0.03}\right)}{\left(s + \frac{0.16}{0.30}\right) \left(s + \frac{1}{0.16 * 0.03}\right)} = 148.42 \frac{(s + 3.33)(s + 33.33)}{(s + 0.533)(s + 208.33)}$$

Mapa polo-cero:

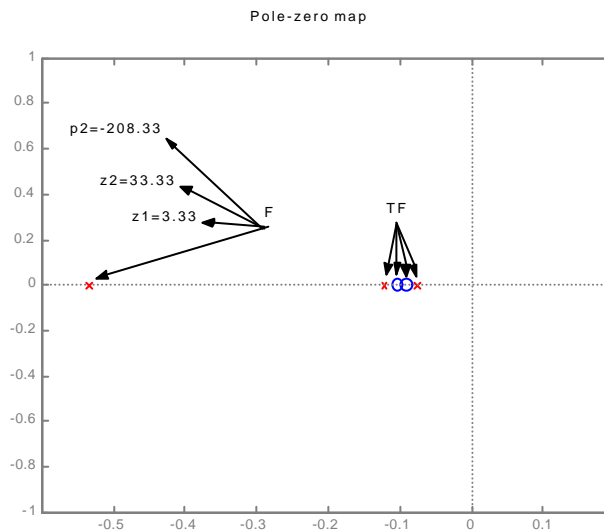


Figura 49: Mapa polo-cero de la Red de Atraso-Adelanto

Tabla 8

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.51	0.55	7.55	8.14	9.50	14.33
2e5	0.80	0.84	4.80	25.01	26.74	6.45
3e4	0.35	0.51	30.60	2.02	4.92	58.91
3e5	1.09	1.28	14.61	34.89	41.42	15.76
4e4	0.52	0.82	36.61	2.81	7.86	64.24
4e5	1.41	1.73	18.60	41.57	50.42	17.55
<b>PROMEDIOS</b>	0.78	0.95	18.79	19.08	23.48	29.54

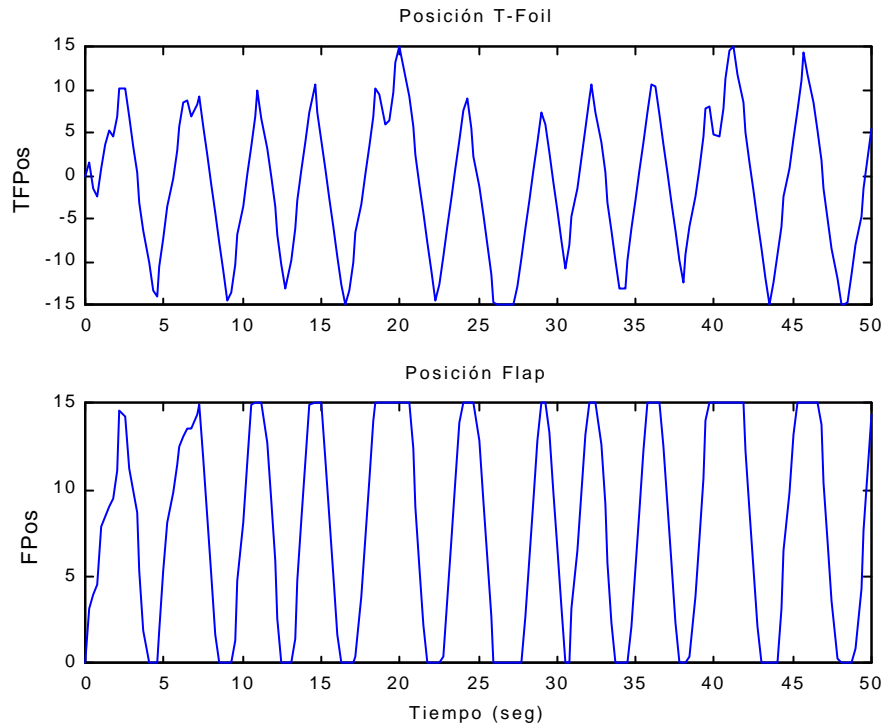


Figura 50: Posición de los actuadores

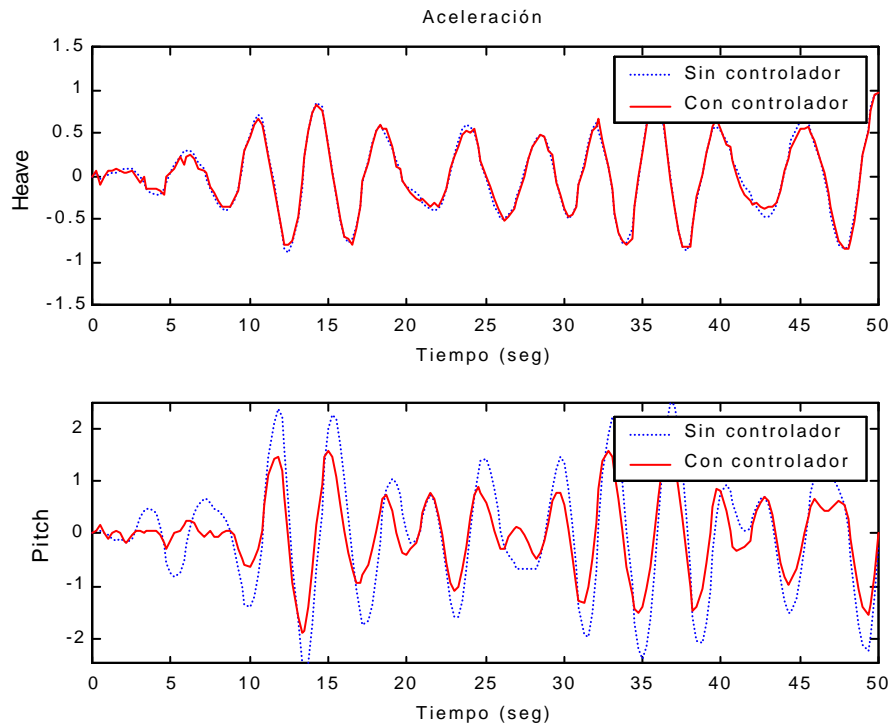


Figura 51: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

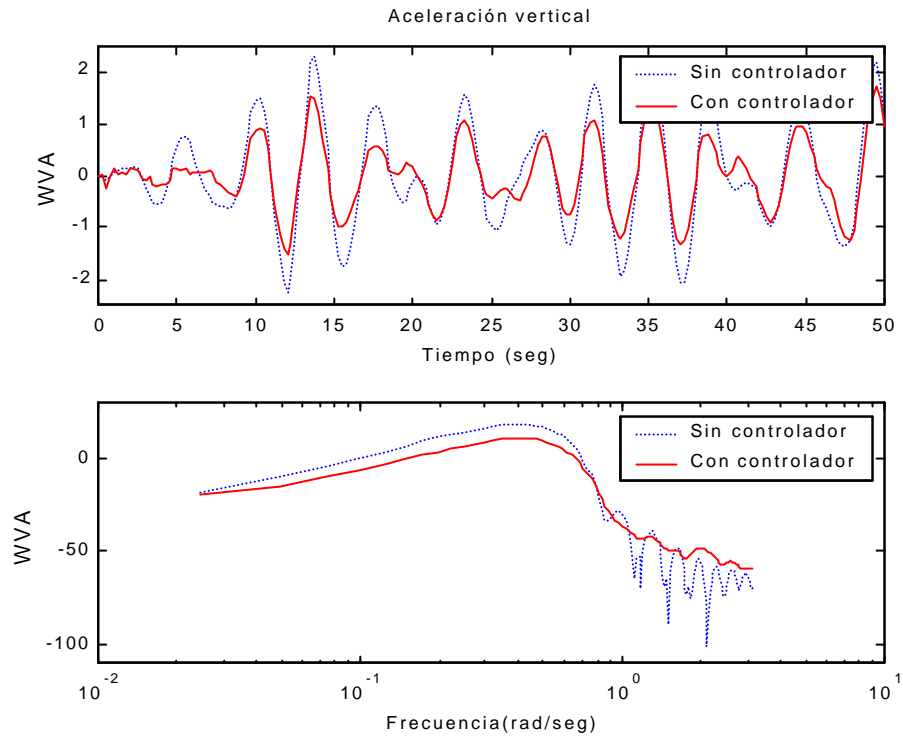


Figura 52: Serie temporal y bode de WVA

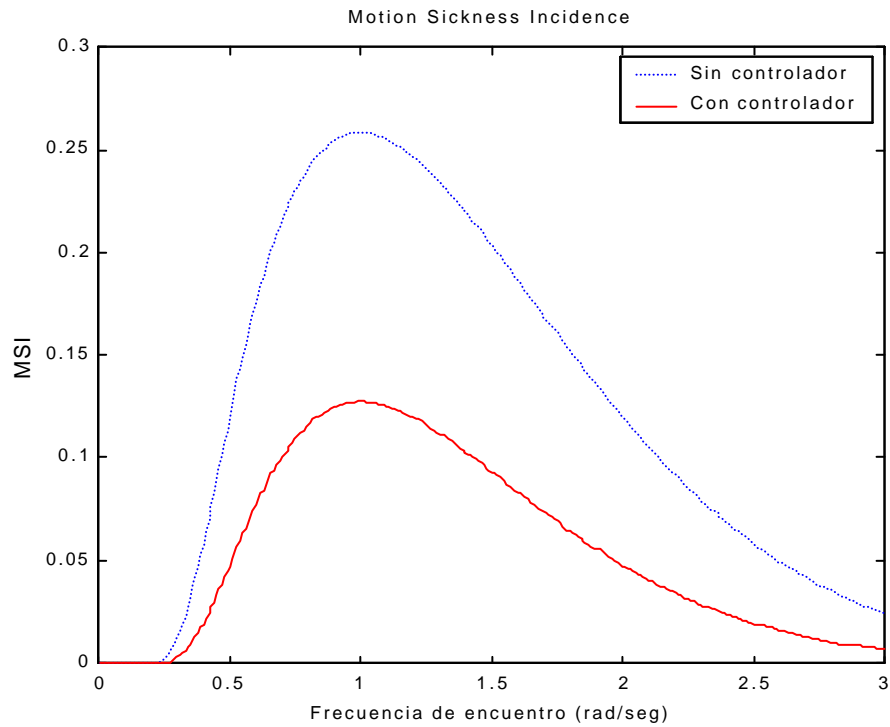


Figura 53: Índice de mareo



## 4.5 RED DE PRIMER ORDEN

Para los controladores dados por las siguientes funciones de transferencia los resultados obtenidos se presentan en la tabla y gráficas adjuntas.

$$G_{c(TF)}(s) = 130.66 \frac{s + 14.74}{s + 11.09}$$

$$G_{c(F)}(s) = 22.61 \frac{s + 2.60}{s + 0.17}$$

Mapa polo-cero:

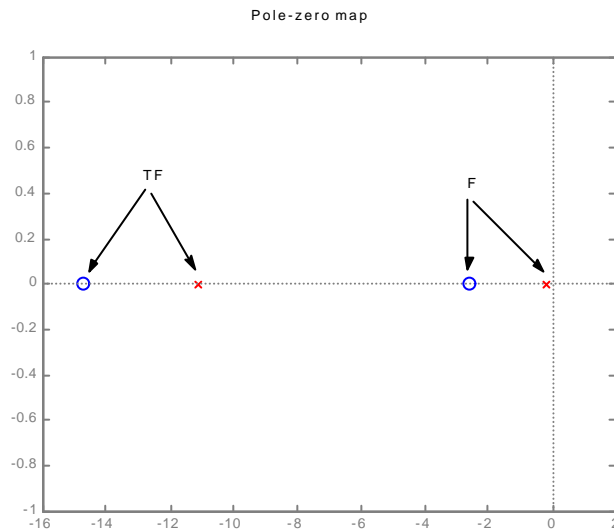


Figura 54: Mapa polo-cero de la Red de Primer Orden

Tabla 9

EXPERIMENTO	WVA con Controlador	WVA sin Controlador	Mejora WVA (%)	MSI con Controlador	MSI sin Controlador	Mejora MSI (%)
2e4	0.50	0.55	8.15	8.03	9.50	15.45
2e5	0.80	0.84	5.20	24.87	26.74	7.00
3e4	0.35	0.51	31.49	1.95	4.92	60.27
3e5	1.09	1.28	14.74	34.83	41.42	15.91
4e4	0.52	0.82	36.98	2.77	7.86	64.77
4e5	1.41	1.73	18.76	41.48	50.42	17.72
<b>PROMEDIOS</b>	<i>0.78</i>	<i>0.95</i>	<i>19.22</i>	<i>18.99</i>	<i>23.48</i>	<i>30.19</i>

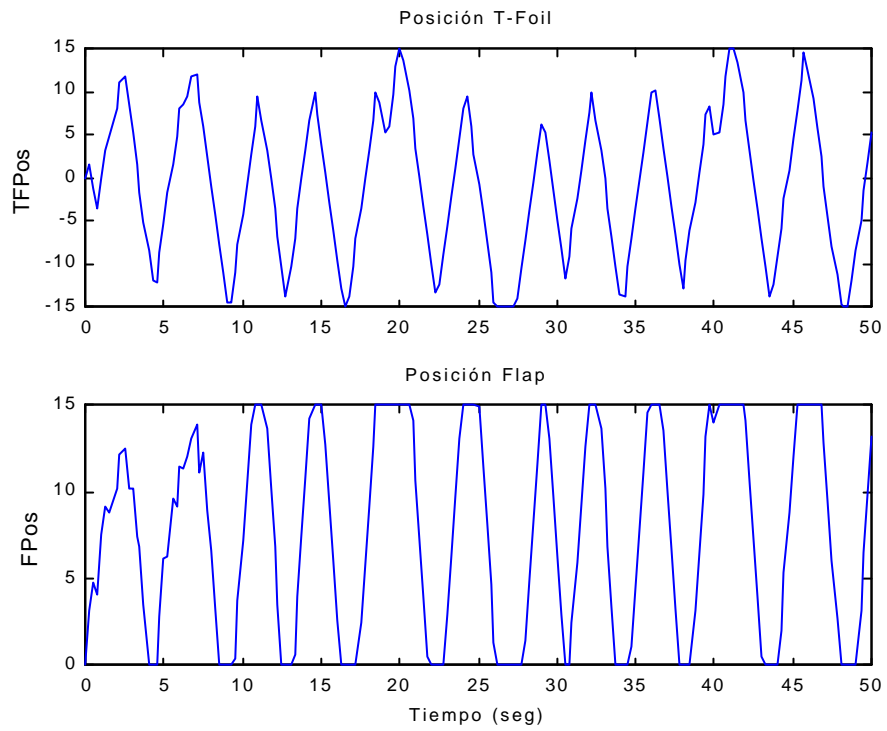


Figura 55: Posición de los actuadores

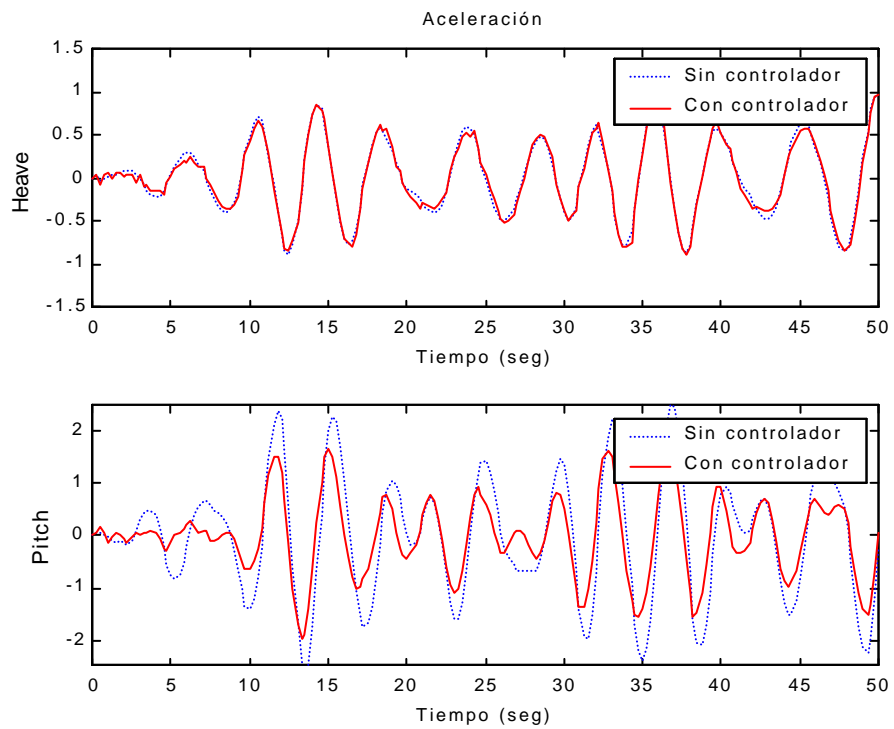


Figura 56: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

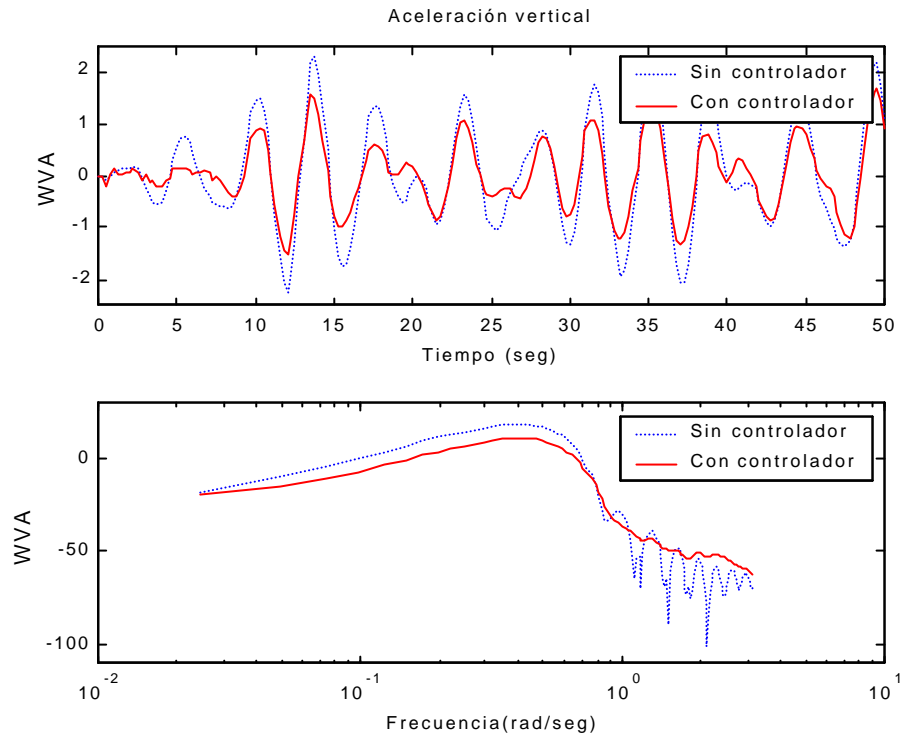


Figura 57: Serie temporal y bode de WVA

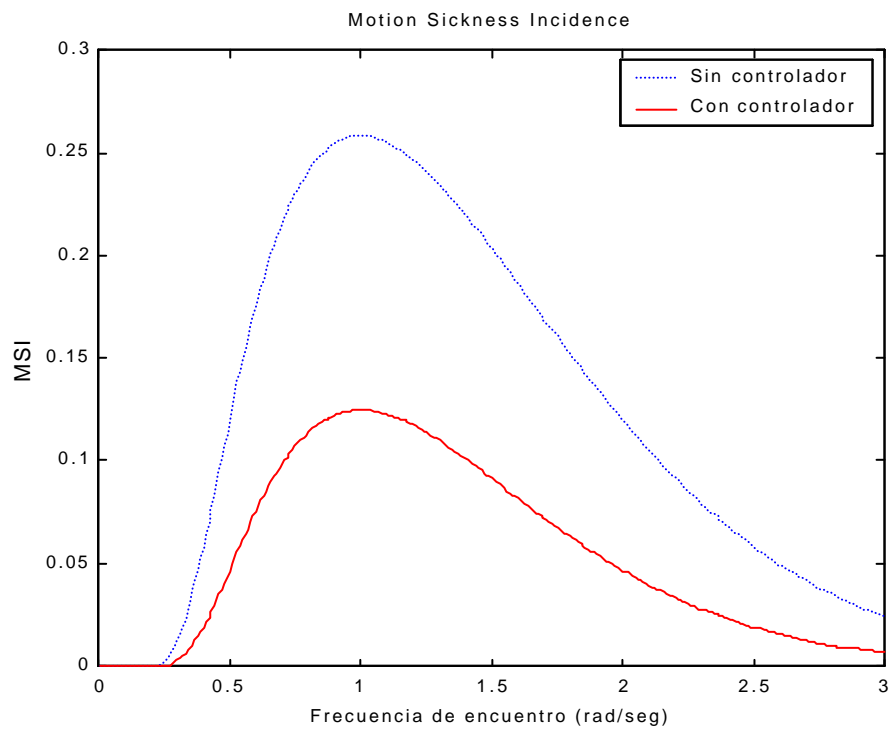


Figura 58: Índice de mareo

**CRIBAV**

**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En todos los casos anteriores como ya se mencionó previamente se ha diseñado un único controlador para los casos posibles de estados de la mar y velocidad del buque posibles.

Para una red de primer orden se ha probado a diseñar controladores independientes para cada caso posible y así establecer si es posible emplear un único controlador como se hizo previamente o si por el contrario hay que ajustarlo de otra forma.

Los resultados obtenidos en estos casos se presentan en la tabla adjunta y las gráficas.

*Tabla 10*

<b>EXPERIMENTO</b>	kpt zt pt kpf zf pf	<b>WVA con Control</b>	<b>WVA sin Control</b>	<b>Mejora WVA (%)</b>	<b>MSI con Control</b>	<b>MSI sin Control</b>	<b>Mejora MSI (%)</b>
2e4	138.19 19.93 1.98 129.36 5.07 0.005	0.4913	0.5466	10.1196	7.6898	9.5028	19.0787
2e5	77.06 1.6 0.05 126.05 3.74 0.01	0.7870	0.8408	6.4022	24.4304	26.7402	8.6380
3e4	121 15.44 9.58 31.83 3.8 0.05	0.3417	0.5051	32.3459	1.8906	4.9204	61.5762
3e5							
4e4	134.05 17.44 11.11 26.05 2.12 0.07	0.5131	0.8175	37.2419	2.7417	7.8626	65.1307
4e5							

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Se puede hacer un estudio comparativo de la situación de los polos y ceros en todos los casos, para el T\_Foil y el Flap: (all se refiere al caso del regulador diseñado minimizando la media de las aceleraciones de los 6 casos)

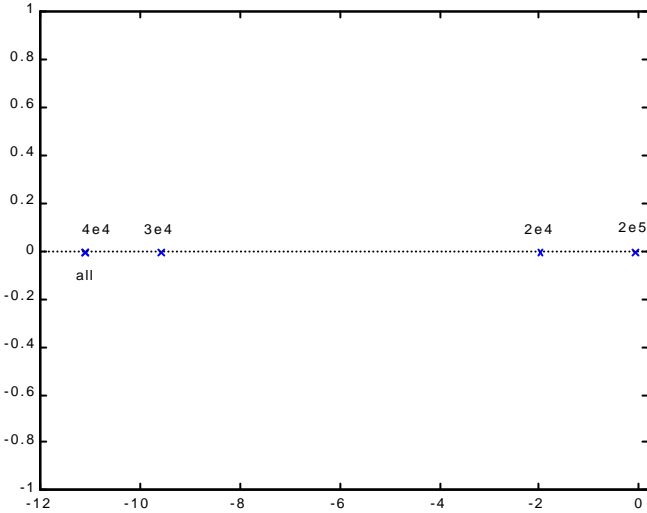


Figura 59: Mapa de polos de  $G_c(TF)$

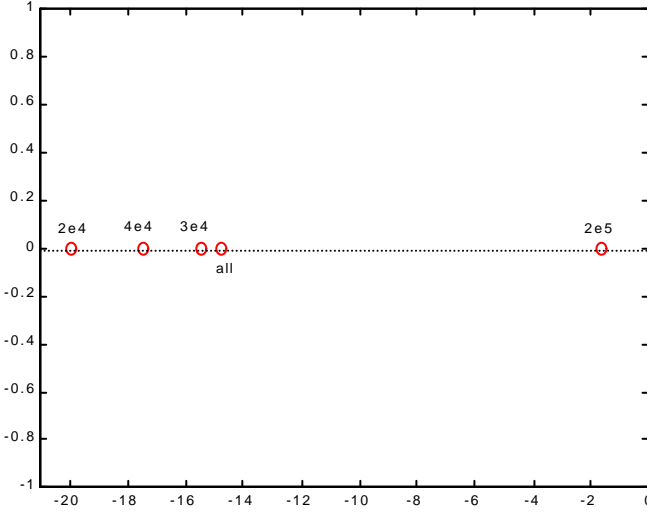


Figura 60: Mapa de ceros de  $G_c(TF)$

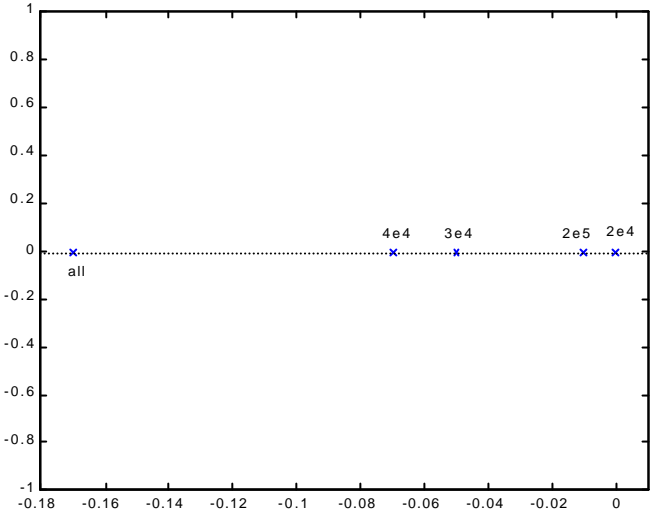


Figura 61: Mapa de polos de  $G_c(F)$

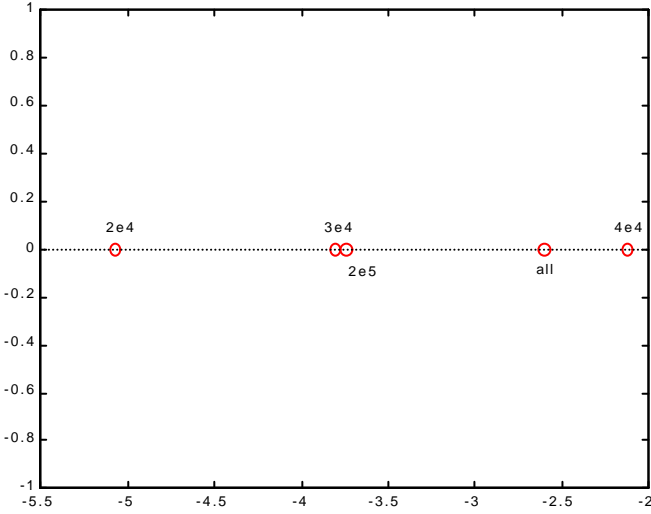


Figura 62: Mapa de ceros de  $G_c(F)$

### 4.5.1 RED DE PRIMER ORDEN (2E4)

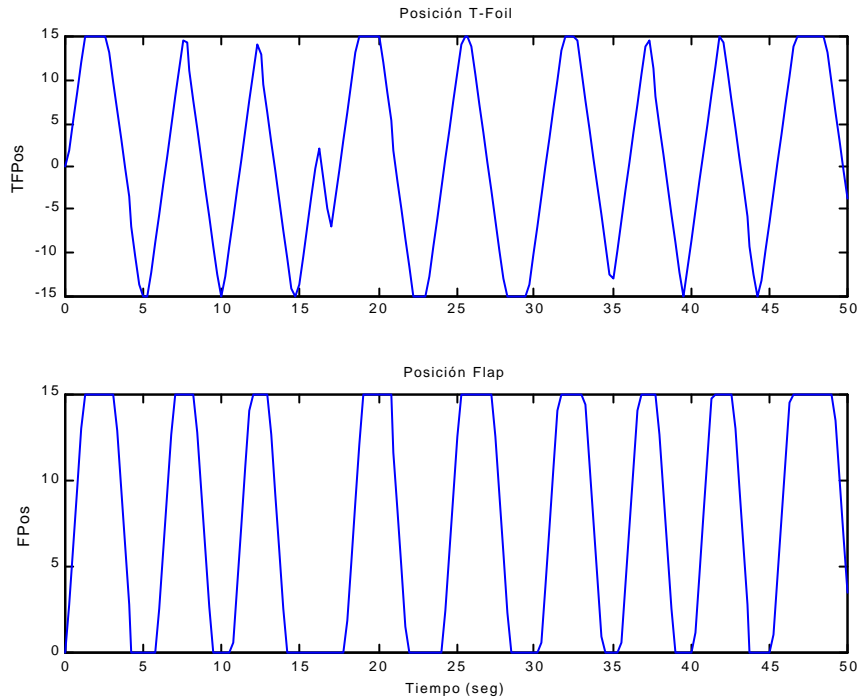


Figura 63: Posición de los actuadores

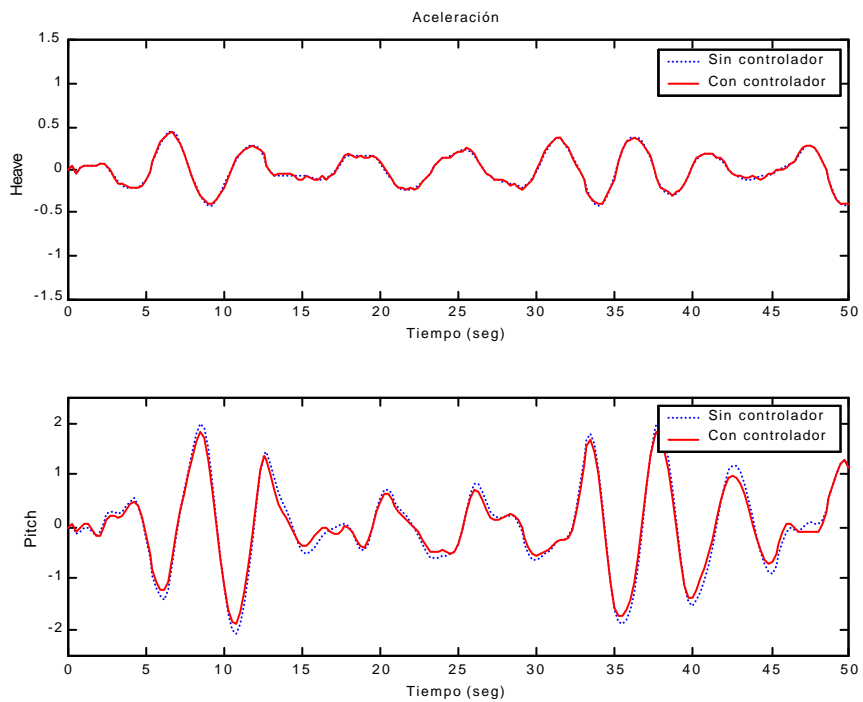


Figura 64: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

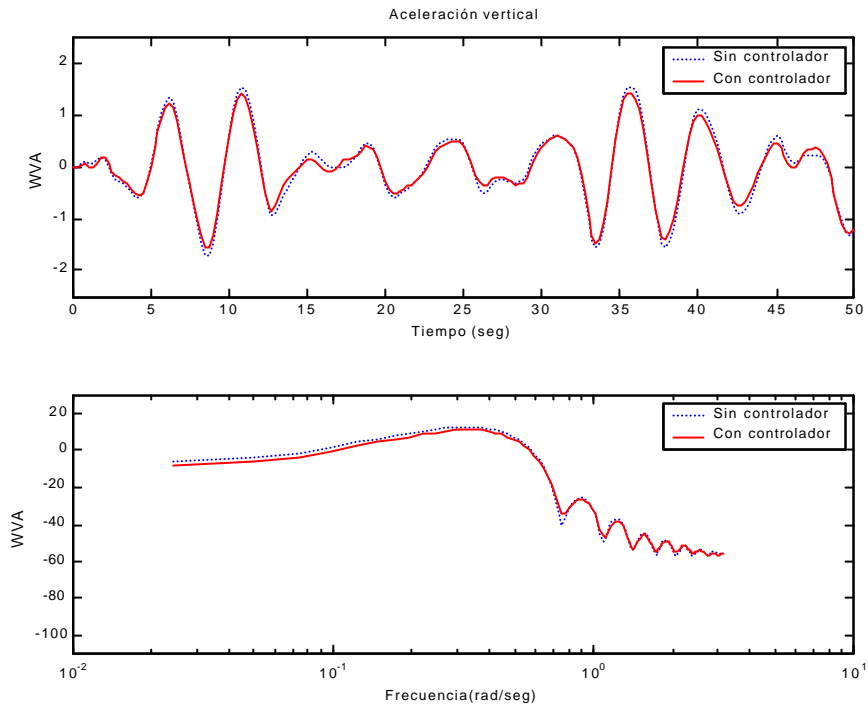


Figura 65: Serie temporal y bode de WVA

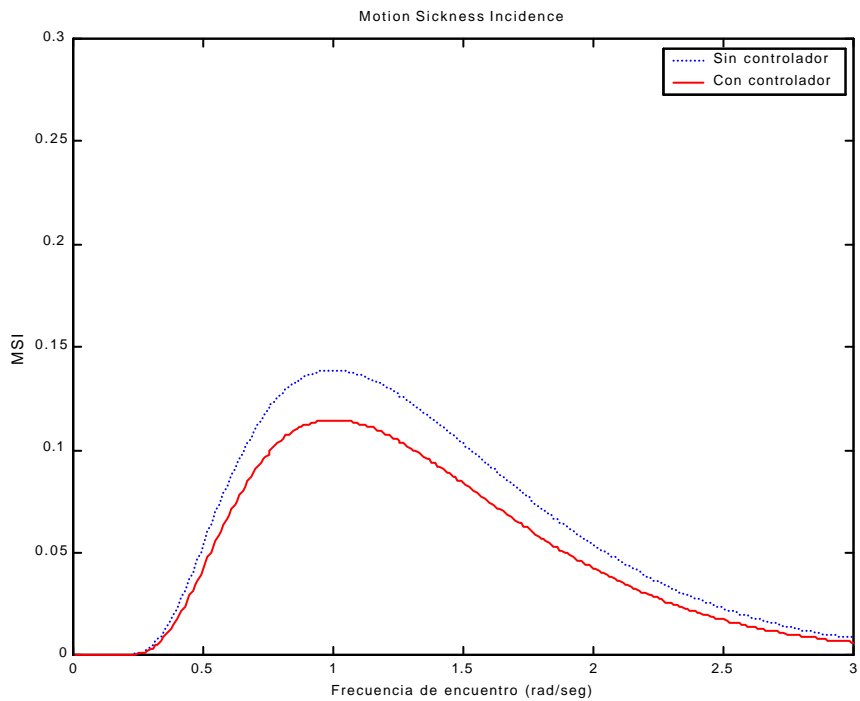


Figura 66: Índice de mareo



### 4.5.2 RED DE PRIMER ORDEN (2E5)

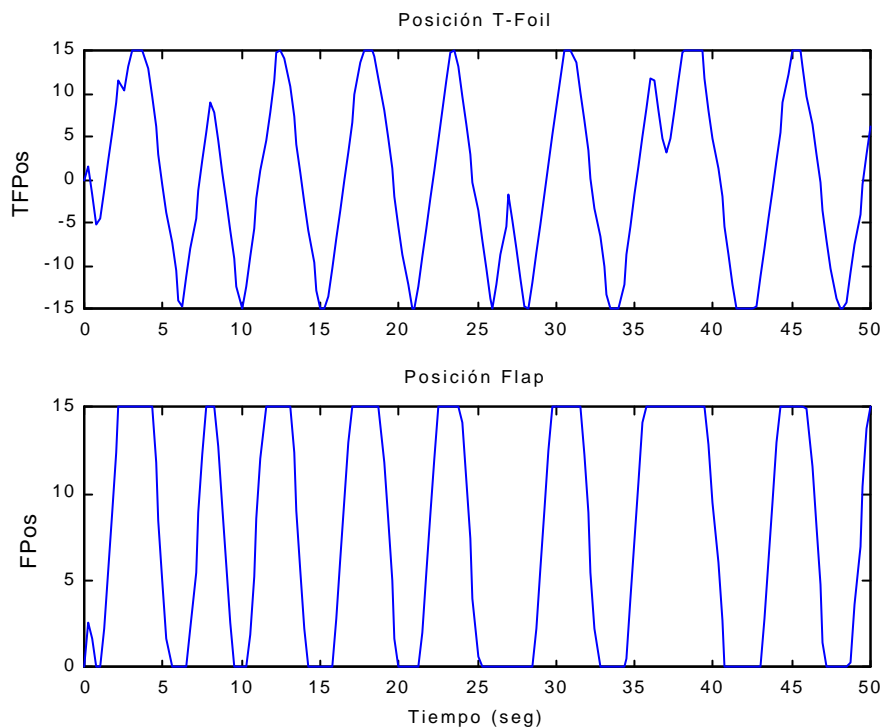


Figura 67: Posición de los actuadores

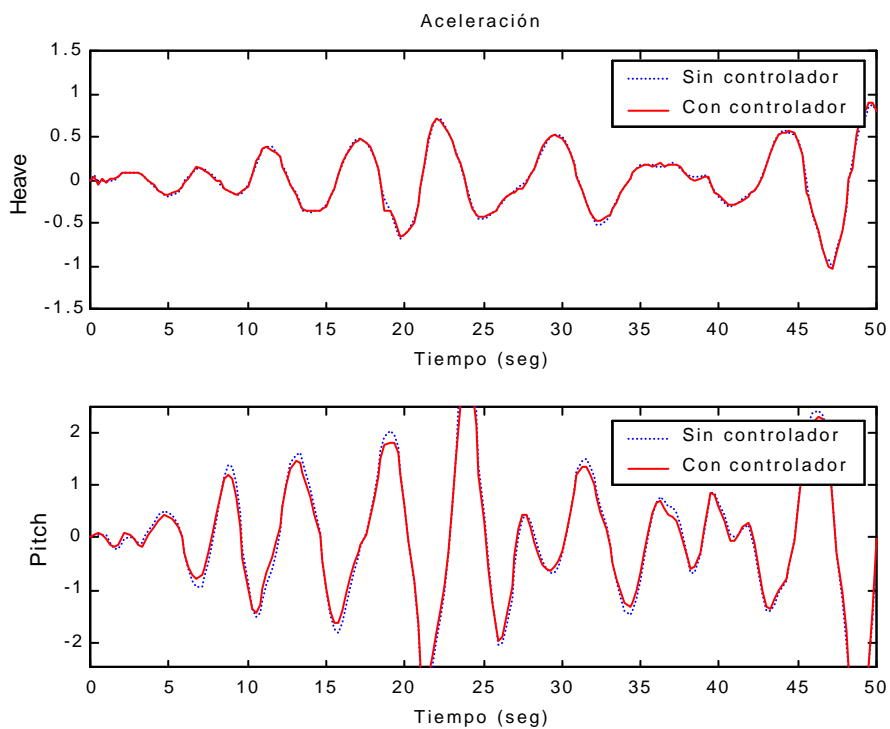


Figura 68: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

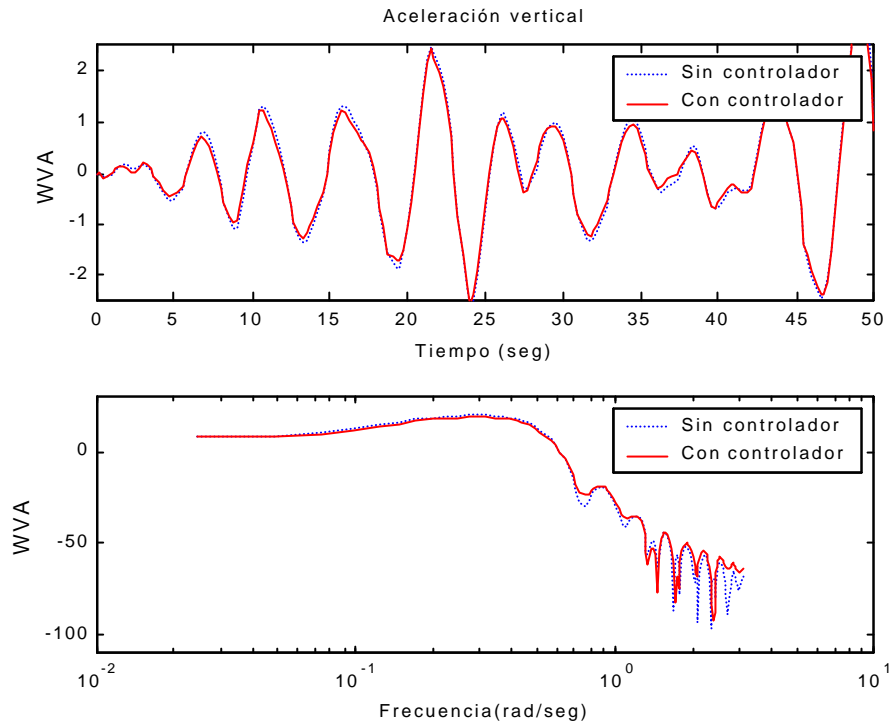


Figura 69: Serie temporal y bode de WVA

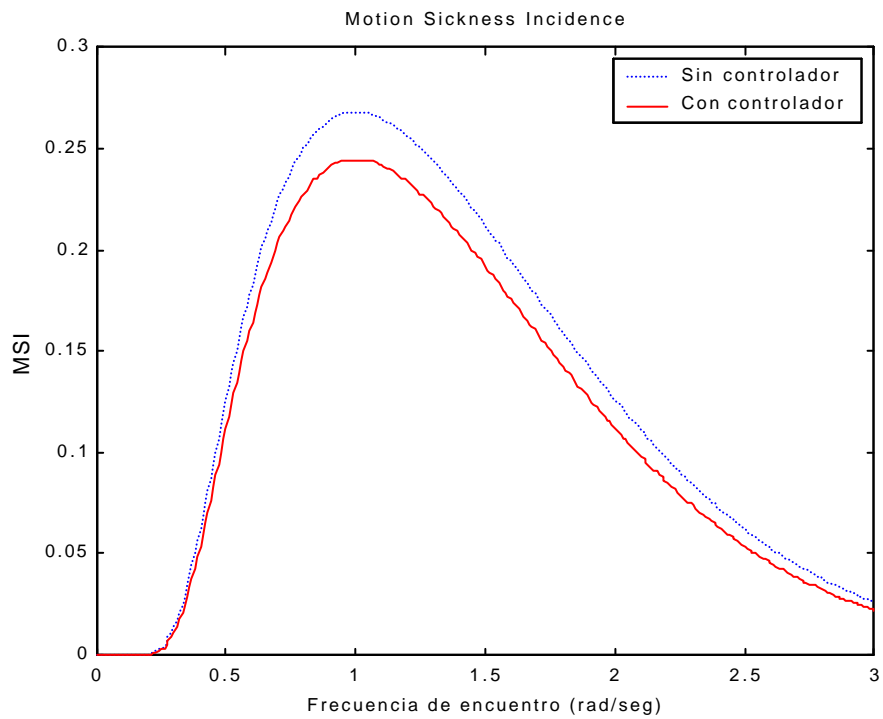


Figura 70: Índice de mareo

### 4.5.3 RED DE PRIMER ORDEN (3E4)

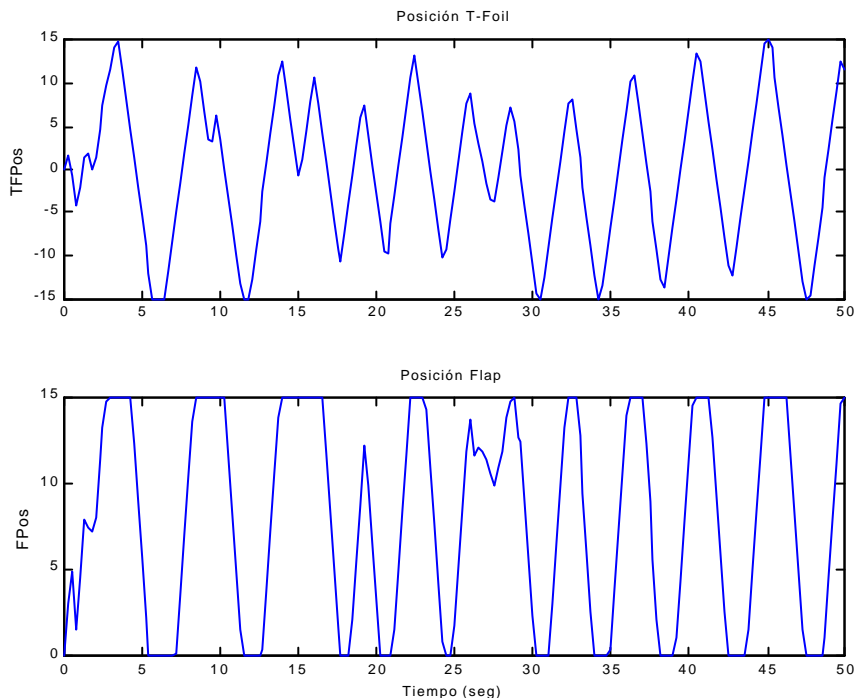


Figura 71: Posición de los actuadores

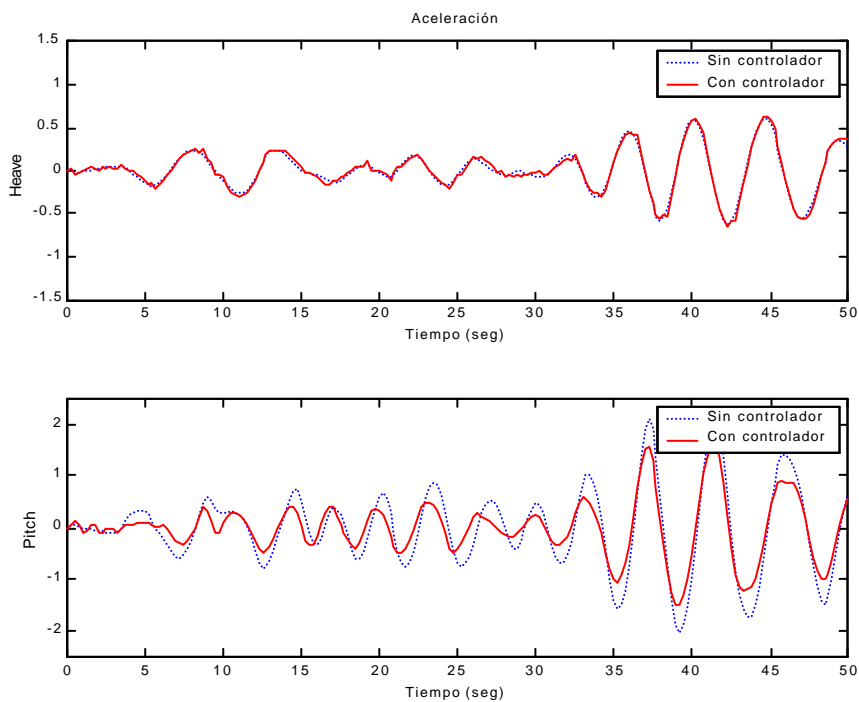


Figura 72: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

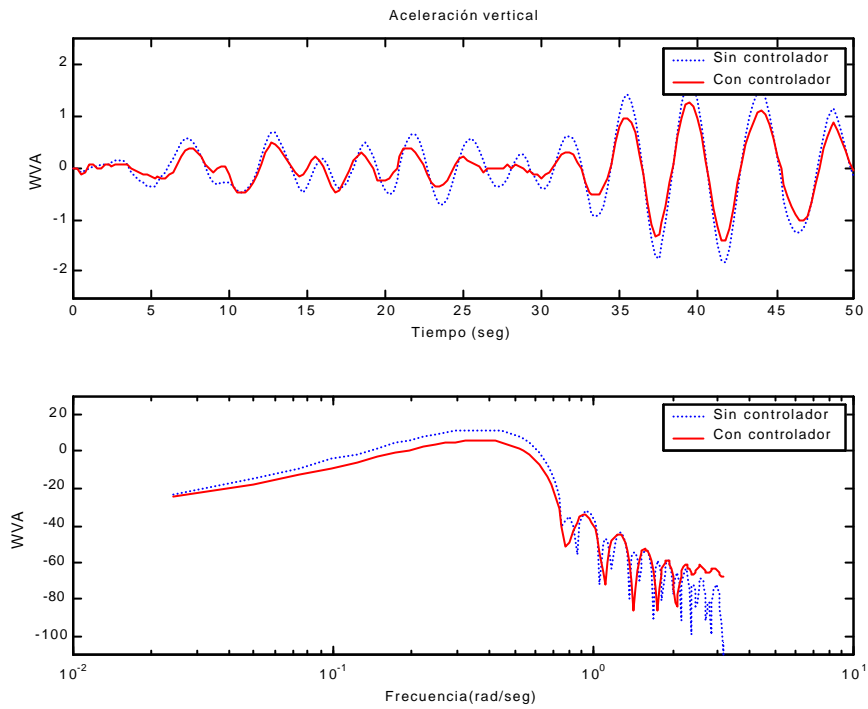


Figura 73: Serie temporal y bode de WVA

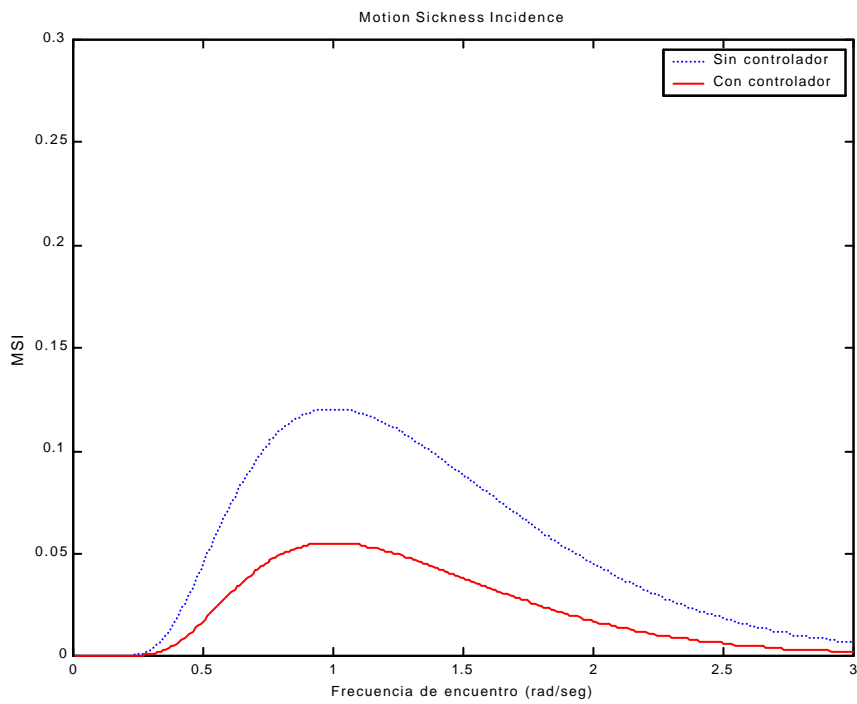


Figura 74: Índice de mareo

# **CRIBAV**

---

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

## **4.5.4 RED DE PRIMER ORDEN(3E5)**

### 4.5.5 RED DE PRIMER ORDEN(4E4)

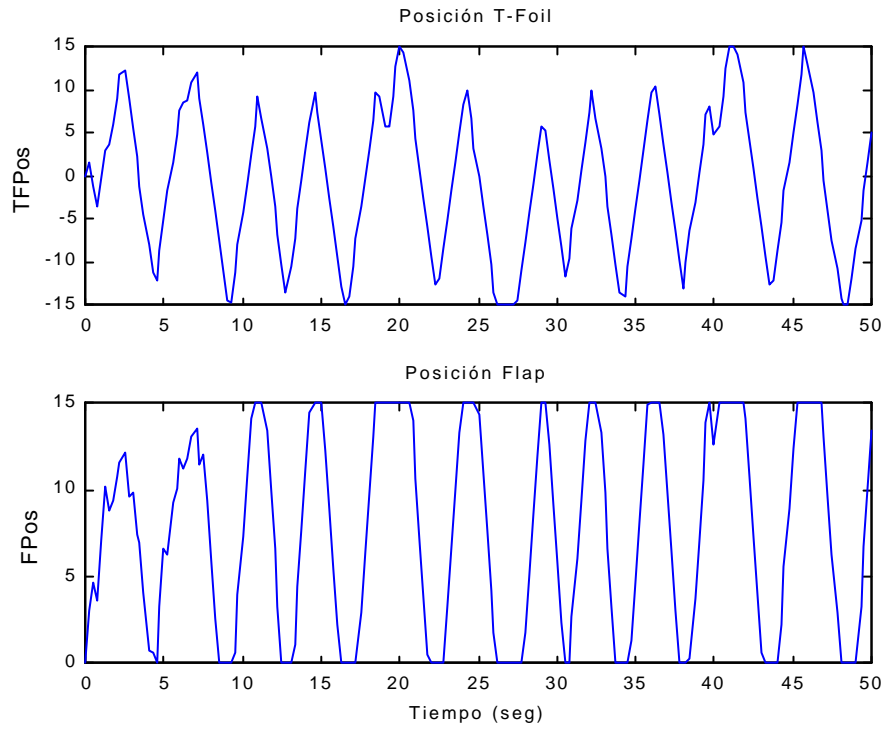


Figura 79: Posición de los actuadores

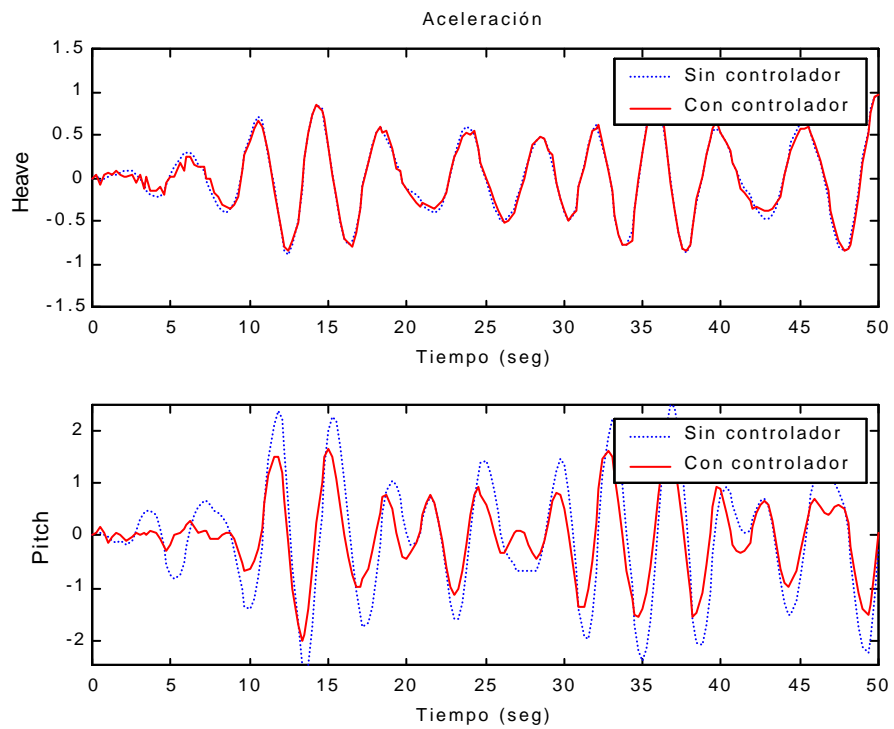


Figura 80: Serie temporal de la aceleración heave y pitch

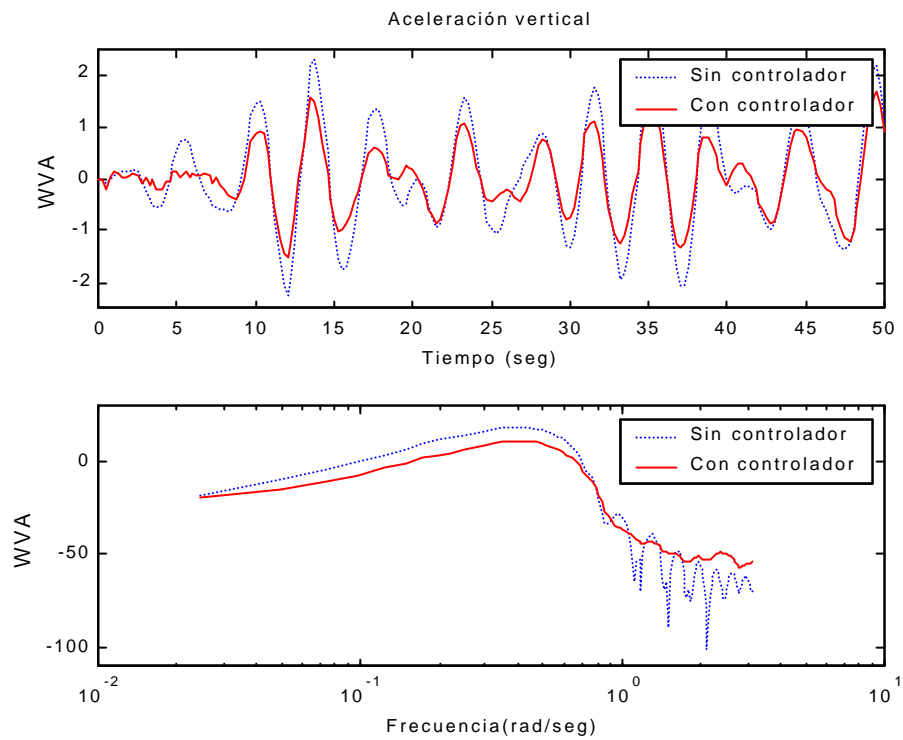


Figura 81: Serie temporal y bode de WVA

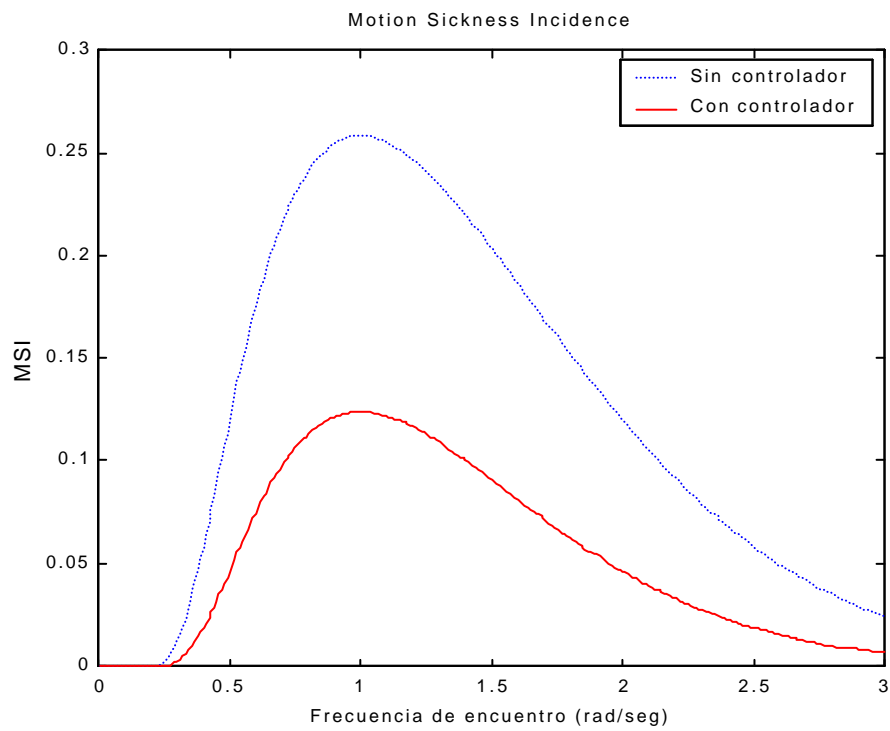


Figura 82: Índice de mareo

**CRIBAV** 

---

  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**4.5.6 RED DE PRIMER ORDEN(4E5)**



## 5 CONCLUSIONES

Observando las gráficas obtenidas en todas las simulaciones del caso 4e4, se constata que no existe mucha diferencia en el movimiento y saturación de los actuadores con unos controladores u otros. También se aprecia que la mayor disminución en la aceleración vertical del buque se debe a la reducción de la aceleración de pitch. En algunos casos la disminución en la aceleración de heave es prácticamente inapreciable. En los diagramas de Bode se observa una disminución de la amplitud en todo el rango de frecuencias y una disminución de la variación de la amplitud para frecuencias cercanas y superiores a 1 rad/seg.

Se presenta en la Tabla 11 un resumen de los resultados obtenidos con los controladores estudiados. En ella se puede apreciar que la mejor reducción de la aceleración vertical y MSI se produce para la Red de Primer Orden. Se obtienen también buenos resultados con una Red de Atraso-Adelanto.

Aunque con los controladores PID se alcanza también una reducción del MSI buena y mejor que con los controladores PD Mixto y Serie, el PD Paralelo consigue unos mejores resultados sin el posible problema de la saturación integral.

La posición de los polos y ceros del controlador PD Paralelo es muy similar a la obtenida para la Red de Primer Orden.

También se puede apreciar lo siguiente:

En la red de atraso-adelanto se pueden cancelar los polos y ceros del controlador del T\_foil y eliminar el polo y cero alejados del controlador del Flap, resultando como controlador:

$$G_{c(TF)}(s) = 130.11$$

$$G_{c(F)}(s) = 148.42 \frac{s + 3.33}{s + 0.533}$$

En el controlador PD Paralelo se puede cancelar el polo y cero del controlador del T\_foil, resultando:

$$G_{c(TF)}(s) = 159.15$$

$$G_{c(F)}(s) = 13.68 \frac{s + 0.147}{s + 0.551}$$

En la red de adelanto se pueden cancelar los polos y ceros tanto del controlador del T\_Foil como del Flap, resultando:

$$G_{c(TF)}(s) = 149.3$$

$$G_{c(F)}(s) = 59.63$$

Utilizando estos parámetros se obtienen mejoras de la aceleración vertical WVA ligeramente inferiores a las obtenidas con las de los controladores de la Tabla 11.

*Tabla 11*

CONTROL	K (TF)	Ceros (TF)	Polos (TF)	K (F)	Ceros (F)	Polos (F)	Mejora Promedio WVA (%)	Mejora Promedio MSI (%)
PD Mixto	1123	- 0.047	- 0.518	941.6	- 0.0624	- 0.686	16.04	25.7
PD Paralelo	159.15	- 10.30	- 10.99	13.63	- 0.147	- 0.551	18.73	29.54
PD Serie	1496.3	- 5.882	- 58.823	929	- 9.091	- 90.91	17.34	27.57
PID Mixto	50.8842	- 125.65 - 0.173	0 -1.93	17.32	- 0.783 - 0.0126	0 - 0.621	18.52	29.45
PID Paralelo	71.967	- 8.27 - 0.057	0 -0.685	51.67	- 0.602 - 0.001	0 - 0.5936	18.27	29
PID Serie	609.3	- 0.478 - 0.085	0 - 0.854	450.1	- 50 - 0.99	0 - 9.901	18.40	29.04
Red adelanto	149.30	- 0.053	- 0.0812	59.63	- 0.0754	- 0.0877	17.88	28.34
Red at-ad	133.11	- 0.09 - 0.104	- 0.077 - 0.1224	148.42	- 3.33 - 33.33	- 0.533 - 208.33	18.79	29.54
Red 1 <sup>er</sup> orden	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	19.22	30.19

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos con la Red de Primer Orden ajustada con los mismos valores (mv) para todas las velocidades del buque y estados de la mar y los obtenidos cuando se sintoniza la red específicamente para cada caso.

Debido a que en todas las simulaciones se obtienen los mejores resultados para las condiciones 4e4 y 3e4 estos casos tienen el mayor peso en la función de coste promedio y por ello los controladores ajustados de forma específica para dichas condiciones tienen unos valores de los parámetros muy parecidos. En cualquier caso, la mejora obtenida con los controladores sintonizados específicamente no es muy importante comparada con la del controlador ajustado con los mismos valores para todos los casos.

*Tabla 12*

EXPER	K (TF)	Ceros (TF)	Polos (TF)	K (F)	Ceros (F)	Polos (F)	Mejora WVA (%)	Mejora MSI (%)
2e4 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	8.15	15.45
2e4	104.92	- 18.07	- 2.04	71.32	- 5.02	- 0.11	10.1196	19.0787
2e5 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	5.20	7
2e5	77.06	- 1.6	- 0.05	126.05	- 3.74	- 0.01	6.4022	8.6380
3e4 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	31.49	60.27
3e4	121	- 15.44	- 9.58	31.83	- 3.8	- 0.05	32.3459	61.5762
3e5 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	14.74	15.91
3e5								
4e4 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	36.98	64.77
4e4	134.05	- 17.44	- 11.11	26.05	- 2.12	- 0.07	37.2419	65.1307
4e5 mv	130.66	- 14.74	-11.09	22.61	- 2.60	- 0.17	18.76	17.72
4e5								

## APÉNDICE A

### MODELOS LINEALES DE LA DINÁMICA VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120.

A continuación se presentan las funciones de transferencia correspondientes a los modelos del buque de los bloques Simulink obtenidos [1] para las velocidades de 20, 30 y 40 nudos que relacionan la altura de olas con la fuerza heave (o2fh), altura de olas con momento pitch (o2mp), fuerza heave con movimiento heave (fh2h) y momento pitch con movimiento pitch (mp2p).

#### VELOCIDAD 20 NUDOS

$$G_{o2fh}(s) = \frac{0.08994 s^3 - 0.02932 s^2 + 0.3828 s - 0.07297}{s^4 + 0.8817 s^3 + 1.276 s^2 + 0.3534 s + 0.07297}$$

$$G_{fh2f}(s) = \frac{0.4398 s^2 - 0.7838 s + 3.109}{s^2 + 0.513 s + 3.109}$$

$$G_{o2mp}(s) = \frac{-0.09496 s^3 + 0.08845 s^2 - 0.421 s}{s^4 + 2.541 s^3 + 3.86 s^2 + 3.524 s + 1.244}$$

$$G_{mp2p}(s) = \frac{-3.396 s^2 + 19.64 s + 0.3134}{s^3 + 1.558 s^2 + 2.794 s + 1.096}$$

#### VELOCIDAD 30 NUDOS

$$G_{o2fh}(s) = \frac{0.083 s^3 + 0.01143 s^2 + 0.6376 s - 0.1224}{s^4 + 1.147 s^3 + 1.776 s^2 + 0.6162 s + 0.1224}$$

$$G_{fh2h}(s) = \frac{0.3418 s^2 - 0.4964 s + 2.841}{s^2 + 0.4563 s + 2.841}$$

$$G_{o2mp}(s) = \frac{-0.09747 s^3 + 0.09297 s^2 - 0.7033 s}{s^4 + 2.881 s^3 + 5.251 s^2 + 5.407 s + 2.057}$$

$$G_{mp2p}(s) = \frac{-2.654 s^2 + 17.65 s + 0.4575}{s^3 + 1.297 s^2 + 2.964 s + 1.118}$$

VELOCIDAD 40 NUDOS

$$G_{o2fh}(s) = \frac{0.06675 s^3 + 0.1022 s^2 + 0.9042 s - 0.189}{s^4 + 1.34 s^3 + 2.266 s^2 + 0.867 s + 0.189}$$

$$G_{fh2h}(s) = \frac{0.2667 s^2 - 0.5098 s + 3.053}{s^2 + 0.4692 s + 3.053}$$

$$G_{o2mp}(s) = \frac{-0.0763 s^3 + 0.03032 s^2 - 0.9249 s}{s^4 + 3.029 s^3 + 6.194 s^2 + 6.854 s + 2.706}$$

$$G_{mp2p}(s) = \frac{-2.104 s^2 + 16.44 s + 0.6906}{s^3 + 1.203 s^2 + 3.155 s + 1.334}$$

## APÉNDICE B

### ARCHIVO.M PRINCIPAL PARA EL ALGORITMO GENÉTICO

```
% Archivo al_ge.m
% E. López y T. Rueda
% Octubre 2000

% DISEÑO DEL CONTROLADOR PD ÓPTIMO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

% DEFINICIÓN DE VARIABLES

global kpt kpf Tdt Tdf ola tola o2fh mp2p fh2h o2mp V heave acvhe acvpi pitch medhe medpi tfm ...
WVAc WVAs MejWVA MSic MSIs MejMSI TiempoTFout CavitacionTF CavitacionFL IndiceTotal;

n_generaciones = 10; % Número de generaciones de cromosomas
n_cromosomas = 10; % N° de cromosomas en cada generación
prob_cruzar = 0.8; % Probabilidad de cruce
prob_mutar = 0.2; % Probabilidad de mutación
n_var = 4; % N° de variables (kpt,Tdt,kpf,Tdf)
rango = [0, 150; 0, 20; 0, 150; 0, 20]; % Rango de variación

% Calcular la longitud del string binario que satisfaga la precisión requerida para la optimización.
% Se emplea para ello la fórmula:  $(b-a)10^p=2^m-1$ 
% Siendo a y b los valores extremos del rango de variación de las variables, p la precisión deseada y m la longitud
% del string binario necesario para la optimización.
% Para  $p=2$ ,  $m=12$ 
%  $m=48$ ;
% Cada cromosoma (solución potencial) está representado por un string binario de m (48) bits, correspondiendo
% 12 a cada variable (hay 4)
n_bit = 12; % N° de bits de cada variable (cte. del controlador)

objetivo = 'Barco'; % Simular barco_2.mdl para optimizar la elección
% del controlador según la función de coste

% Inicialización de variables para almacenar resultados
mejores = zeros(n_generaciones, 1);
medios = zeros(n_generaciones, 1);
peores = zeros(n_generaciones, 1);

% Abrir el archivo optim1.txt para archivar valores
fid = fopen('optim.m','w'); % Modo texto

% Creación de la primera población
string_1=n_bit*n_var; % Longitud del cromosoma
poblacion = rand(n_cromosomas, string_1) > 0.5; % > es función lógica,
% se obtiene una matriz de n_cromosomas*string_1 valores 0 o 1

% COMIENZO DEL PROCESO CÍCLICO DE ALGORITMOS GENÉTICOS
for i = 1:n_generaciones;

% Para simular el controlador en el modelo del barco se debe convertir cada cromosoma a valor decimal
ctecontrol=[];
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
vble=[];
for j=1:n_cromosomas
    vble=[bit2num(poblacion(j,1:n_bit),rango(1,:)), ...
        bit2num(poblacion(j,n_bit+1:2*n_bit),rango(2,:)), ...
        bit2num(poblacion(j,2*n_bit+1:3*n_bit),rango(3,:)), ...
        bit2num(poblacion(j,3*n_bit+1:n_var*n_bit),rango(4,:))];
    ctecontrol=[ctecontrol;vble];
end

% Evaluar el controlador
fcoste = evalpoblacion(n_cromosomas,ctecontrol, objetivo);

% Guardar los valores de algunas fcostes
mejores(i) = max(fcoste);
medios(i) = mean(fcoste);
peores(i) = min(fcoste);

vble=[ctecontrol fcoste'];

% Guardar el valor de los parámetros del controlador y la mejor reducción de la aceleración en cada
% generación en el archivo optim.txt
[mejor, indice] = max(fcoste);

fprintf(fid,'Generación %i: ', i);
fprintf(fid,'(%f, %f, %f, %f)=%f\n', ...
        bit2num(poblacion(indice, 1:n_bit), rango(1,:)), ...
        bit2num(poblacion(indice, n_bit+1:2*n_bit), rango(2,:)), ...
        bit2num(poblacion(indice, 2*n_bit+1:3*n_bit), rango(3,:)), ...
        bit2num(poblacion(indice, 3*n_bit+1:4*n_bit), rango(4,:)), ...
        mejor);
fprintf(fid,'\n kpt          Tdt      kpf          Tdf      fcoste: \n');
for j=1:n_cromosomas
    fprintf(fid,'\n %f      %f %f %f %f',...
            vble(j,:));
end
fprintf(fid,'\n \n');

% Generar la siguiente población tras realizar la correspondiente selección, cruce y mutación
poblacion = nextpoblacion(poblacion, fcoste, prob_cruzar, prob_mutar);

end % (del for)

% Cerrar el archivo de datos
fclose(fid);
```

## APÉNDICE C

### ARCHIVOS .M PARA OBTENCIÓN DE LAS GRÁFICAS

#### GRAF.M

% Archivo graf.m para dibujar todas las gráficas necesarias

```
figure(1)
subplot(2,1,1),plot(tout,TFPos(:,2))
title('Posición T-Foil')
ylabel('TFPos')
axis([0,50,-15,15])

subplot(2,1,2),plot(tout,FPos(:,2))
title('Posición Flap')
xlabel('Tiempo (seg)')
ylabel('FPos')
axis([0,50,0,15])

figure(2)
subplot(2,1,1),plot(tout,Aheave(:,1), 'b:',tout,Aheave(:,2), 'r-')
title('Aceleración')
xlabel('Tiempo (seg)')
ylabel('Heave')
axis([0,50,-1.5,1.5])
legend('Sin controlador','Con controlador')

subplot(2,1,2),plot(tout,Apitch(:,1), 'b:',tout,Apitch(:,2), 'r-')
xlabel('Tiempo (seg)')
ylabel('Pitch')
axis([0,50,-2.5,2.5])
legend('Sin controlador','Con controlador')

figure(3)
subplot(2,1,1),plot(tout,WVA(:,2), 'b:',tout,WVA(:,3), 'r-')
title('Aceleración vertical')
xlabel('Tiempo (seg)')
ylabel('WVA')
axis([0,50,-2.5,2.5])
legend('Sin controlador','Con controlador')

modulo_bode

mareo
```

#### MODULO\_BODE.M

% Archivo modulo\_bode.m para calcular a partir de las series temporales de % las aceleraciones de heave y  
% pitch la respuesta frecuencial del modelo del barco.

% Se estima el espectro a partir de la serie temporal guardada en las variables SAheave, SApitch y WVA durante  
% la simulación

```
AMs=spa(WVA(:,2)); % Aceleración vertical media sin controlador
AMc=spa(WVA(:,3)); % Aceleración vertical media con controlador
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
% Se generan los valores de una función frecuencial (módulo, fase y frecuencia) a partir del espectro
[wAMs,ampAMs,phasAMs]=getff(AMs);
[wAMc,ampAMc,phasAMc]=getff(AMc);

% Se dibuja el módulo de la respuesta frecuencial (la fase no porque siempre vale cero ya que la función spa no
% genera valores de fase
subplot(2,1,2),semilogx(wAMs,20*log10(ampAMs),'b:',wAMc,20*log10(ampAMc),'r-')
legend('Sin controlador','Con controlador')
xlabel('Frecuencia(rad/seg)')
ylabel('WVA')
axis([0.01,10,-110,30])
```

## MAREO.M

```
% Archivo mareo.m para calcular el índice de mareo y obtener la gráfica tanto del sistema sin controlador como
% del sistema con controlador. Se parte de las variables ProWVAc y ProWVAs
```

```
% Función de mareo para el barco con controlador
a=ProWVAc;
w=0.01:0.01:3;
m=-0.819+2.32*(log10(w)).^2;
I=(-log10(a/9.8)+m)/0.4/sqrt(2);
msic=[];
for i=1:size(I,2),
    if I(i)>=0,
        msic=[msic,0.5-0.5*abs(erf(I(i)))];
    else
        msic=[msic,0.5+0.5*abs(erf(I(i)))];
    end
end
```

```
% Función de mareo para el barco sin controlador
a=ProWVAs;
w=0.01:0.01:3;
m=-0.819+2.32*(log10(w)).^2;
I=(-log10(a/9.8)+m)/0.4/sqrt(2);
msis=[];
for i=1:size(I,2),
    if I(i)>=0,
        msis=[msis,0.5-0.5*abs(erf(I(i)))];
    else
        msis=[msis,0.5+0.5*abs(erf(I(i)))];
    end
end
```

```
% La reducción del MSI en tanto por ciento del sistema con controlador respecto al sistema sin controlador es:
% reduccion_msi=((msis -msic)/msis)*100
```

```
% Se representa gráficamente el MSI del sistema sin controlador y con controlador
figure(4)
plot(w,msis,'b:',w,msic,'r-')
title('Motion Sickness Incidence')
legend('Sin controlador','Con controlador')
xlabel('Frecuencia de encuentro (rad/seg)')
ylabel('MSI')
axis([0,3,0,0.3])
```



## **BIBLIOGRAFÍA**

[1] CRIBAV-00-02

J. Aranda, J. M. De la Cruz, B. De Andrés, J. M. Díaz, S. Esteban, J. M. Girón, L. Grau, J. A. López, P. Ruipérez.

Identificación de modelos lineales continuos para la dinámica vertical del buque TF-120 (mediante algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales). 1999.

[2] CRIBAV-01-03

S. Esteban, J. M. Girón, J. M. De la Cruz.

Modelado de actuadores. 1999.

[3] CRIBAV-02-03

J. Aranda, J. M. De la Cruz, J. M. Díaz, P. Ruipérez

Disminución del índice de mareo mediante un control PD sobre heave y pitch en el buque TF-120.

[4] CRIBAV-01-04

J. M. De la Cruz.

Evaluación. 2000.