

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
**“Control Difuso de Fuerza para el Robot
Manipulador Mitsubishi PA10-7CE”**

POR

Wismark Zhaid Castañón Pastrana

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

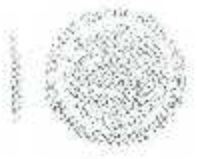
Dr. Miguel Ángel Llama Leal

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (06)-TMCIE-2017

Torreón, Coahuila, México
Junio 2017



Torreón, Coah., **13/Junio/2017**
Dependencia: DEPI/CPCIE
Oficio: DEPI/CPCIE/050/2017
Asunto: Autorización de impresión
de tesis.

C. Wismark Zhaid Castañon Pastrana
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

"Control Difuso de Fuerza para el Robot Manipulador MITSUBISHI PA10-7CE"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (06)-TMCIE-2017**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de La Laguna



ALT/ZHD





Torreón, Coah., 05/Junio/2017

DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

"Control Difuso de Fuerza para el Robot Manipulador MITSUBISHI PA10-7CE"

Desarrollado por el **C. Wismark Zhaid Castañon Pastrana**, con número de control **M1413031** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


Dr. Miguel A. Llana Leal
Asesor/Director de Tesis


Dr. Ricardo E. Campa Cocom
Comité Tutorial


Dr. Victor A. Santibañez Dávila
Comité Tutorial


Dr. José L. Meza Medina
Comité Tutorial



*Este trabajo lo dedico a mis padres, hermanos, abuelos,
a todas aquellas personas que me quieren,
a los que me apoyaron y motivaron para terminar este trabajo;
en especial a mi abuelo Chano, que dejó de acompañarme en
este mundo cuando me encontraba estudiando maestría.*

Agradecimientos

Agradezco a CONACYT por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de posgrado; a mi asesor, el Dr. Miguel Ángel Llama Leal por sus aportes y su gran paciencia; a mis maestros de maestría, de quienes aprendí conceptos teóricos pero también valores humanos; a mis compañeros de posgrado por los momentos agradables que pasamos juntos y por las experiencias académicas vividas en el transcurso de la realización de mi posgrado.

No olvido hacer un especial agradecimiento a mis padres, hermanos y abuelos, quienes siempre estuvieron apoyándome y aconsejándome para hacer lo correcto en esta etapa, y en mi vida en general.

Resumen

Muchos trabajos de investigación se han centrado en el problema de control de robots manipuladores en tareas que no involucren las fuerzas de contacto del órgano terminal del robot con su entorno. Sin embargo, muchas tareas requieren de una interacción del manipulador con los objetos que lo rodean. Para la realización correcta de estas tareas es esencial el uso de un controlador de fuerza. Generalmente, el objetivo del control durante el contacto con el entorno es regular la fuerza y el torque que el órgano terminal del manipulador ejerce sobre el entorno, mientras simultáneamente se regulan las coordenadas libres de posición y orientación (postura) del órgano terminal. Muchos trabajos se han realizado sobre este tema, en los que se presentan diversas estrategias de control; uno de los métodos más relevantes es el llamado control híbrido de fuerza/posición; este esquema tiene la ventaja de poder controlar independientemente la fuerza en direcciones restringidas por el entorno y la postura a lo largo de direcciones no restringidas.

En este trabajo se analiza e implementa el control híbrido de fuerza/posición usando un método de control con lógica difusa, ya que el control difuso provee una solución para cuando existen no linealidades, alto acoplamiento, y otras variaciones o perturbaciones del sistema. El sistema que es empleado es el robot manipulador Mitsubishi PA10-7CE, que es un robot de 7 grados de libertad (g.d.l.), pero en este trabajo sólo se utiliza como un manipulador de 6 g.d.l., equipado con un sensor fuerza/torque de 6 g.d.l. en el órgano terminal.

Abstract

Too many research works have focused on the problem of control of robot manipulators while executing tasks that do not involve the contact forces of the end-effector with the environment. However, many tasks require an interaction of the manipulator with the objects around it. For the correct performance of these tasks the use of a force controller is essential. Generally, the purpose of the control aim during the contact is to regulate the force and torque of the manipulator's end-effector over the environment, while simultaneously regulating the position and orientation (i.e. the pose) free coordinates of the manipulator's end-effector. Many works have presented on this topic, in which various control strategies are presented; one of the most relevant methods is the so-called hybrid force/position control; this scheme has the advantage of being able to independently control the force in directions constrained by the environment and the pose along unconstrained directions.

This work analyzes and implements the hybrid force/position control using a fuzzy logic control method, since the fuzzy control provides a solution for nonlinearities, high coupling, and variations or perturbations. The system employed is the Mitsubishi PA10-7CE robot manipulator, which is a robot of 7 degrees of freedom (dof), but in this work it is only used as a 6-dof manipulator, equipped with a 3-dof force/torque sensor in the end-effector.

Índice general

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Control de interacción	1
1.1.1. Clasificación de los esquemas de control con movimiento restringido	2
1.1.2. Control híbrido de fuerza/posición	3
1.2. Lógica difusa	4
1.2.1. Conjuntos difusos	5
1.2.2. Funciones de membresía	6
1.2.3. Variable lingüística	7
1.3. Sistemas de control basados en lógica difusa	8
1.3.1. Características	8
1.3.2. Estructura	9
1.4. Robot PA-10	13
1.5. Objetivos de la tesis	13
1.5.1. Objetivo general	13
1.5.2. Objetivos específicos	13
1.6. Estructura de la tesis	14
2. El robot Mitsubishi PA10-7CE	15
2.1. Dinámica del robot	16
2.2. Cinemática del robot	17
2.2.1. Cinemática directa	18
2.2.2. Cinemática inversa	19
2.3. Sensor de fuerza	20
2.3.1. Instalación del sensor de fuerza	20
3. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas	27
4. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas	31

5. Evaluación experimental	33
5.1. Control Tanh-D con compensación de gravedad	34
5.2. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas	37
5.2.1. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre esponja	39
5.2.2. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre nieve seca	46
5.2.3. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre madera	52
5.2.4. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre vidrio	58
5.3. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas	64
5.3.1. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre una esponja	65
5.3.2. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre nieve seca	72
5.3.3. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre madera	78
5.3.4. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre vidrio	84
5.4. Comparación entre los controladores híbridos	90
6. Conclusiones	92
A. Modelos y parámetros del robot PA10-7CE	94
A.1. Modelo cinemático	95
B. Parámetros del sensor de fuerza ATI Delta	104
C. Trayectorias de referencia para los controladores	107
C.1. Trayectoria de fuerza	107
C.2. Referencias de posición	108

Índice de figuras

1.1. Clasificación de controladores de compliancia activa	2
1.2. Especificación de las restricciones naturales y artificiales para la tarca de deslizamiento sobre una superficie mediante el controlador híbrido de fuerza/posición.	3
1.3. Función de membresía impulsiva	6
1.4. Función de membresía gaussiana	7
1.5. Función de membresía sigmoidal izquierda	7
1.6. Variable lingüística	8
1.7. Estructura general de un controlador difuso	9
1.8. Fusificación impulsiva	10
1.9. Máquina de inferencia max-prod	12
2.1. Estructura mecánica del manipulador Mitsubishi PA10-7CF	15
2.2. Esquema cinemático para los parámetros Denavit-Hartenberg del robot PA10 reducido a 6 g.d.l.	17
2.3. Sensor de fuerza/torque ATI Delta	20
2.4. Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-6220	21
2.5. Pantalla principal del software NIDAQmx	21
2.6. Pantalla principal del software del sensor mostrando los valores de los voltajes de las galgas del sensor	22
2.7. Valores de fuerza/torque	23
2.8. QuaRC	23
2.9. Bloque HIL_Initialize	24
2.10. Bloque HIL_Read_Analog	25
2.11. Acoplamiento entre el robot, el sensor y la herramienta de contacto.	26
3.1. Estructura original del controlador híbrido	27
3.2. Diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias fijas en espacio articular.	30
4.1. Diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias difusas en espacio articular.	32
5.1. Línea del tiempo para cada uno de los experimentos.	33

5.2. Pares y errores de posición articular del robot con el controlador Tanh-D+g.	35
5.3. Error de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador Tanh-D+g.	36
5.4. Materiales empleados como superficie de contacto.	37
5.5. Situación del marco de la tarea referida al marco de la base del robot.	38
5.6. Fuerza aplicada y error de fuerza con el control híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre esponja.	40
5.7. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre esponja.	41
5.8. Trayectorias de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre esponja.	42
5.9. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre esponja.	43
5.10. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre esponja.	44
5.11. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre esponja.	45
5.12. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre nieve seca.	46
5.13. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre nieve seca.	47
5.14. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre nieve seca.	48
5.15. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre nieve seca.	49
5.16. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre nieve seca.	50
5.17. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre nieve seca.	51
5.18. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre madera.	52
5.19. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre madera.	53
5.20. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -50$ N sobre madera.	54
5.21. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{srd} = -10$ N sobre madera.	55

5.22. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre madera.	56
5.23. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre madera.	57
5.24. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre vidrio.	58
5.25. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre vidrio.	59
5.26. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre vidrio.	60
5.27. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre vidrio.	61
5.28. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre vidrio.	62
5.29. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre vidrio.	63
5.30. Funciones de pertenencia de entrada.	64
5.31. Funciones de pertenencia de salida.	65
5.32. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre esponja.	66
5.33. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre esponja.	67
5.34. Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre esponja.	68
5.35. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre esponja.	69
5.36. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre esponja.	70
5.37. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre esponja.	71
5.38. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre nieve seca.	72
5.39. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre nieve seca.	73
5.40. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre nieve seca.	74

5.41. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre nieve seca.	75
5.42. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre nieve seca.	76
5.43. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre nieve seca.	77
5.44. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre madera.	78
5.45. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre madera.	79
5.46. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre madera.	80
5.47. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre madera.	81
5.48. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre madera.	82
5.49. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre madera.	83
5.50. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre vidrio.	84
5.51. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre vidrio.	85
5.52. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -50$ N sobre vidrio.	86
5.53. Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre vidrio.	87
5.54. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre vidrio.	88
5.55. Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre vidrio.	89
A.1. Esquema cinemático para los parámetros Denavit-Hartenberg modificados del robot PA10 reducido a 6 g.d.l.	94
C.1. Referencia de fuerza de 50 N	108
C.2. Referencia de fuerza de 10 N	108
C.3. Posición cartesiana deseada sobre el eje x	110
C.4. Velocidad cartesiana deseada sobre el eje x	110

C.5. Aceleración cartesiana deseada sobre el eje x 111

Índice de tablas

1.1. Tabla de consulta de reglas difusas	10
2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg del PA10-7CE reducido a 6 g.d.l.	18
5.1. Ganancias del controlador Tanh-D-g.	34
5.2. Parámetros de la parte de control de posición τ_p en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas.	39
5.3. Parámetros de la parte de control de fuerza τ_f en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas.	39
5.4. Parámetros fijos de la parte de control de fuerza τ_f en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas.	65
5.5. Índice de desempeño de los controladores híbridos de fuerza/posición para una fuerza deseada $\tilde{f}_{std} = -50$ N	90
5.6. Índice de desempeño de los controladores híbridos de fuerza/posición para una fuerza deseada $\tilde{f}_{std} = -10$ N	90
A.1. Parámetros Denavit-Hartenberg del PA10-7CE reducido a 6 g.d.l.	95
B.1. Características del sensor de fuerza/torque. Parte 1.	104
B.2. Características del sensor de fuerza/torque. Parte 2.	105

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad la capacidad de manejar y manipular el contacto físico entre un robot y el entorno que lo rodea es una demanda para realizar mejores y más avanzadas tareas de manipulación. A esta capacidad se le conoce como interacción del manipulador con el entorno físico en el que se trabaja.

Durante la interacción, se presenta una situación llamada movimiento restringido, que es un conjunto de restricciones ocasionadas por el entorno durante el seguimiento las trayectorias geométricas que el órgano terminal del manipulador puede seguir. En este caso la realimentación de fuerza se vuelve obligatoria para lograr un comportamiento robusto, una operación segura y confiable, cosas que muy difícilmente se pueden conseguir con un control de movimiento puro.

El estado de interacción del manipulador con su entorno puede ser descrito mediante estimaciones obtenidas a partir de las fuerzas presentes en las articulaciones del manipulador, o bien, más directamente a partir de la *fuerza de contacto*. Esta fuerza de contacto es proporcionada por un sensor de fuerza/torque montado entre el manipulador y la herramienta de manipulación del mismo.

Hasta la fecha gran cantidad de estudios se han realizado referentes al control de robots manipuladores en interacción con el entorno. Tales controladores se han clasificado en diferentes tipos según su arquitectura, y con el paso del tiempo esto ha dado paso a más y mejores investigaciones sobre el tema. En los siguientes párrafos se describe la clasificación de los controladores de interacción y se profundiza en la categoría empleada en esta tesis.

1.1. Control de interacción

La naturaleza de la interacción entre el manipulador y su entorno permite clasificar las aplicaciones robóticas en dos clases. En la primera intervienen tareas sin contacto, es decir, movimientos sin restricciones en el espacio libre. En contraste con estas tareas,

muchas aplicaciones robóticas complejas requieren que el manipulador esté mecánicamente acoplado a otros objetos. Dos categorías pueden distinguirse dentro de este tipo de tareas, la primera categoría es la dedicada a tareas esenciales de fuerza en las cuales se requiere el órgano terminal para estabilizar el contacto físico con el entorno y ejecutar un proceso específico de fuerza. En la segunda categoría el énfasis cae en el movimiento del órgano terminal, el cual se realiza sobre superficies restringidas (compliant motion).

En este trabajo traduciremos *compliance* [Mason, M. T., 1981] como *compliance* (o admitancia mecánica) que es inversa de la rigidez y que puede ser considerada como una medida de la habilidad de un manipulador para reaccionar a las fuerzas de interacción. Este término hace referencia a una variedad de diferentes métodos de control en los cuales el movimiento del órgano terminal es modificado por las fuerzas de contacto.

1.1.1. Clasificación de los esquemas de control con movimiento restringido

De acuerdo al tipo de compliance los esquemas se pueden clasificar como:

- *De compliance pasiva:* En el que la posición del órgano terminal es acomodada por las propias fuerzas de contacto, debido a la compliance inherente en la estructura del manipulador, de los servos y órganos terminales con dispositivos especiales de alta compliance.
- *De compliance activa:* En donde el ajuste es realizado a través de un lazo de realimentación de fuerza, con el fin de lograr una reacción del robot, ya sea a través del control de interacción de fuerza o generando una tarea con una compliance muy específica.

En esta tesis sólo resulta de interés el esquema de compliance activa. En la figura 1.1 se muestran algunos esquemas de control que involucren compliance activa.



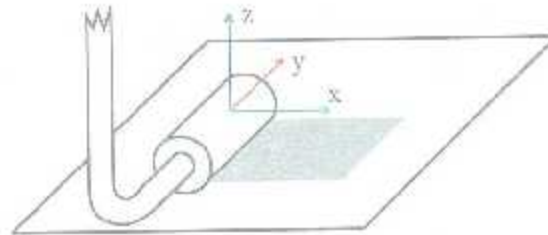
Figura 1.1: Clasificación de controladores de compliance activa

En esta tesis se estudia particularmente el control híbrido de fuerza/posición.

1.1.2. Control híbrido de fuerza/posición

Esta metodología de control está basada en la teoría de control de fuerza y posición propuesta por Mason [Mason, M. T., 1981], dependiendo de las características mecánicas y geométricas del problema de contacto. Esta metodología de control distingue dos conjuntos de restricciones entre el movimiento del robot y las fuerzas de contacto. El primer conjunto contiene las llamadas restricciones naturales, que se presentan debido a la geometría de la tarea. El otro conjunto de restricciones, llamadas como restricciones artificiales, está dado por las características asociadas a la realización de la tarea especificada, i. e. las restricciones son especificadas respecto a un marco, llamado marco de restricción. Por ejemplo, en una tarea de contacto en donde se realiza un deslizamiento sobre una superficie se acostumbra adoptar el marco de restricción cartesiano de la forma en que se muestra en la figura 1.2. Suponiendo un contacto idealmente rígido y sin fricción entre el órgano terminal y la superficie, es obvio que las restricciones naturales limitan el movimiento del órgano terminal en la dirección del eje z , así como las rotaciones alrededor de los ejes x y y .

Las restricciones artificiales, impuestas por el controlador, se introducen con el fin de especificar la tarea que será realizada por el robot con respecto al marco de restricción. Estas restricciones particionan los posibles grados de libertad (g.d.l.) de movimiento cartesiano en aquellos que deben ser controlados en posición y en aquellos que deben ser controlados en fuerza, con el fin de realizar la tarea encomendada.



Restricciones Naturales		Restricciones Artificiales	
$v_z = 0$	$F_z = 0$	$v_x = V$	$F_x = 0$
$\omega_x = 0$	$F_y = 0$	$v_y = 0$	$M_x = 0$
$\omega_y = 0$			$M_y = 0$
	$M_z = 0$		$\omega_z = 0$

Figura 1.2: Especificación de las restricciones naturales y artificiales para la tarea de deslizamiento sobre una superficie mediante el controlador híbrido de fuerza/posición.

En la implementación de un control híbrido de fuerza/posición es esencial introducir dos matrices booleanas S y \bar{S} en los lazos de realimentación con el fin de filtrar las fuerzas y desplazamientos sensados en el órgano terminal, los cuales son inconsistentes con el modelo de contacto de la tarea. La primera es llamada matriz de selección de compliancia y de acuerdo con las restricciones artificiales especificadas el i -ésimo elemento diagonal de esta matriz tiene el valor de 1 si el i -ésimo g.d.l. con respecto al marco de la tarea tiene que ser controlado en fuerza y el valor de 0 si es controlado en posición. La segunda matriz es la matriz de selección para los g.d.l. que son controlados en posición; el i -ésimo elemento diagonal de esta matriz tiene el valor de 1 si el i -ésimo g.d.l. con respecto al marco de la tarea tiene que ser controlado en posición y el valor de 0 si es controlado en fuerza.

Para especificar una tarea de contacto híbrida los siguientes conjuntos de información tienen que ser definidos:

- Posición y orientación del marco de la tarea.
- Especificar las direcciones controladas en posición y fuerza con respecto al marco de la tarea (matriz de selección).
- Especificar la posición y fuerza deseada con respecto al marco de la tarea.

Una vez que la tarea de contacto es especificada, el siguiente paso es seleccionar el algoritmo de control apropiado.

1.2. Lógica difusa

Desde hace años se han estudiado gran cantidad de soluciones para la creación de controladores en sistemas altamente no lineales. Una de las soluciones que brotaron de estos estudios es aplicar sistemas de control difuso que ofrecen un método adecuado para el control de los sistemas anteriormente mencionados vía información heurística, aplicando un lenguaje natural para la cuantificación, razonamiento e inferencia de este tipo de información.

El concepto de lógica difusa fue introducido por primera vez en 1965 por el profesor Lofti A. Zadeh [Zadeh L.A., 1965] como alternativa para describir conjuntos en los que existe vaguedad o incertidumbre y, en consecuencia, no se pueden definir fácilmente.

La lógica difusa o teoría de conjuntos difusos es una herramienta matemática basada en grados de membresía que permite modelar información que contiene ambigüedad, imprecisión e incertidumbre, al medir el grado en que un evento ocurre, empleando para esto una base de conocimiento o razonamiento humano.

Comúnmente en la teoría de conjuntos se emplea la lógica binaria para determinar si un elemento pertenece o no a un conjunto: por ejemplo, los números 1, 2, 3, ... pertenecen

al conjunto de los números enteros positivos, y por otro lado no pertenecen al conjunto de los números enteros negativos. Sin embargo, en el mundo real no siempre es posible determinar un único criterio de pertenencia.

Basado en lo anterior se pueden crear sistemas basados en lógica difusa que pueden modelar un sistema no lineal basándose en conocimientos previos sin necesidad de una amplia descripción matemática. Así como se pueden modelar sistemas, de igual forma se puede diseñar controladores utilizando lógica difusa para calcular una salida de control adecuada teniendo en cuenta el conocimiento y experiencia sobre el sistema a controlar.

En este apartado se abordan conceptos y definiciones acerca de lógica difusa que sirven como apoyo para el análisis y desarrollo de este trabajo de tesis.

1.2.1. Conjuntos difusos

Se dice, por definición, que un conjunto es una colección de objetos que pueden ser tratados como una sola entidad y cumplen con determinadas características o condiciones.

Si U el universo de discurso, i.e. el conjunto que contiene todos los elementos o valores en un determinado contexto, con elementos de U expresados por x . Sea A un conjunto dado, tal que $A \in U$, los elementos que forman parte del conjunto A se dan a conocer con la expresión

$$x \in A$$

Un conjunto también se puede definir y expresar como una función de membresía $\mu_A(x)$, o función de pertenencia, definida como $\mu_A(x) : A \in U \rightarrow [0, 1]$. Esta función de membresía asigna un valor de pertenencia en A para cada elemento x en el intervalo $[1, 0]$.

En un conjunto clásico, la función de membresía sólo puede tomar los valores 0, 1 y puede caracterizarse como

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

En un conjunto difuso, la función de pertenencia puede tomar cualquier valor dentro del intervalo $[0, 1]$, este valor es conocido como grado de pertenencia o grado de membresía. Entonces, un conjunto difuso $A \in U$ puede ser representado como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico x y su valor de pertenencia $\mu_A(x)$ que representa el grado en el que el elemento x pertenece al conjunto difuso A , esto es

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$$

1.2.2. Funciones de membresía

Una función de membresía $\mu_A(x)$ puede tomar diferentes formas según se adecue al sistema que se quiera describir. Entre las formas más comunes están las descritas por funciones de membresía impulsivas, triangulares, pseudo-trapezoidales y gaussianas [Nguyen H. et al., 2003]. En las siguientes líneas se describen las funciones de membresía utilizadas en este trabajo de investigación.

Función de membresía impulsiva

Esta función también es llamada función singleton por su denominación en inglés y se muestra en la figura 1.3. Está denotada por δ y tiene como parámetro a x . Está definida por la expresión

$$\delta(x; \bar{x}) = \begin{cases} 1, & x = \bar{x} \\ 0, & x \neq \bar{x} \end{cases}$$

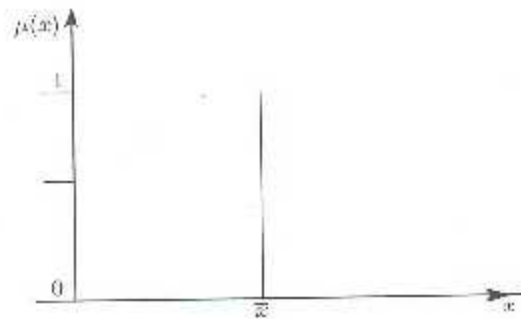


Figura 1.3: Función de membresía impulsiva

Función de membresía gaussiana

La función de membresía gaussiana $G : U \rightarrow [0, 1]$ mostrada en la figura 1.4 tiene dos parámetros μ y σ y está dada por la expresión

$$G(x; \mu, \sigma) = e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

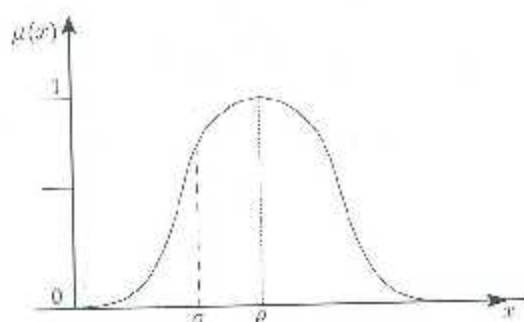


Figura 1.4: Función de membresía gaussiana

Función de membresía sigmoïdal

La función de membresía sigmoïdal $\Upsilon : U \rightarrow [0, 1]$ puede ser derecha o izquierda y se crea a partir de la función gaussiana. Por ejemplo la función de membresía sigmoïdal izquierda de la figura 1.5 está descrita por

$$\Upsilon(x; \rho, \sigma) = \begin{cases} 1, & x < \rho \\ e^{-\left(\frac{x-\rho}{\sigma}\right)^2}, & x \geq \rho \end{cases}$$

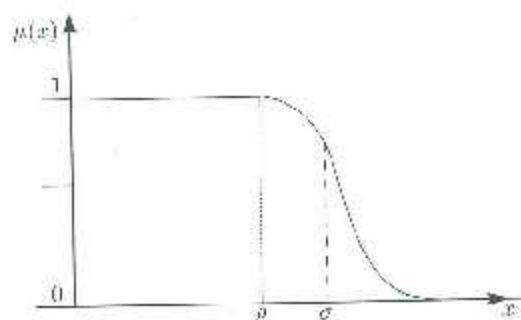


Figura 1.5: Función de membresía sigmoïdal izquierda

1.2.3. Variable lingüística

Se llama variable lingüística a toda aquella variable que puede adquirir palabras del lenguaje natural como sus valores. Estas variables permiten expresar en términos matemáticos todos aquellos conceptos vagos del lenguaje natural que se quieran expresar de dicha manera.

Una variable lingüística es definida por los siguientes parámetros:

- X representa el nombre de la variable lingüística,

- T es el conjunto de valores lingüísticos que la variable X puede tomar
- U es el universo de discurso de la variable.
- M es una regla semántica que relaciona cada valor lingüístico en T con un conjunto difuso en U .

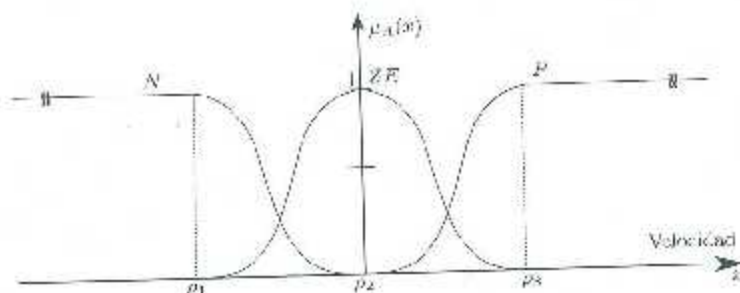


Figura 1.6: Variable lingüística

Por ejemplo en la figura 1.6, la variable lingüística está definida por los siguientes parámetros; $X = \text{Velocidad}$, $T = \{N, ZE, P\}$, $U = [p_1, p_2, p_3]$ donde p_1, p_2, p_3 son los parámetros de soporte que definen las funciones de pertenencia de cada conjunto difuso. Finalmente, M relaciona los valores lingüísticos de T con cada función de pertenencia mostrada.

1.3. Sistemas de control basados en lógica difusa

Los controladores difusos se edifican partiendo de un conjunto de reglas difusas basadas en el conocimiento previo del sistema de control y en la experiencia de operadores y expertos. Una regla difusa está expresada por

SI x es A ENTONCES y es B

a la primera parte de las reglas lingüísticas se le conoce como antecedente, premisa o condición, mientras que la segunda parte de las reglas se denomina consecuente, conclusión o acción.

1.3.1. Características

Las características que describen a un controlador que está basado en lógica difusa son las siguientes:

- Ofrecen una salida de manipulación de acuerdo a la variable de entrada.
- Son tolerantes a datos imprecisos y parámetros no modelados.

- Pueden modelar sistemas no lineales.
- Los controladores pueden basarse en la experiencia de operadores o expertos.
- Se pueden combinar con otras técnicas de control clásicas.
- Requieren más tiempo de cálculo.
- Poseen demasiados parámetros de configuración.

1.3.2. Estructura

La estructura de un controlador difuso se compone de tres partes (Figura 1.7), la parte de fusificación, la parte de la base de reglas y deducción, y por último la parte de defusificación.

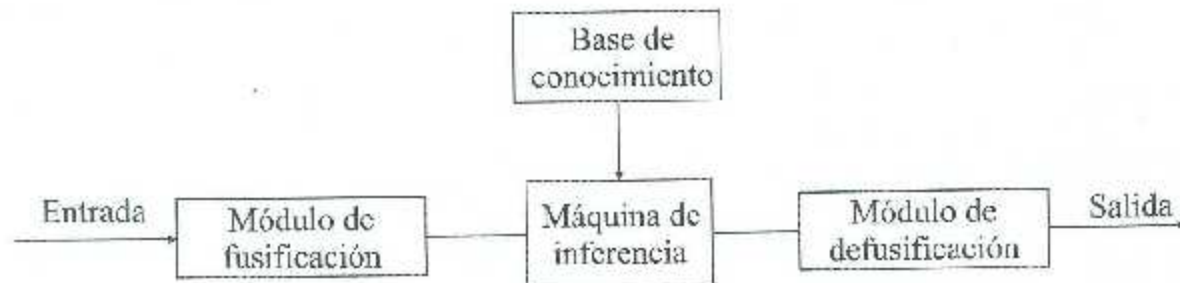


Figura 1.7: Estructura general de un controlador difuso.

Fusificación

Durante la transición de la defusificación se reciben las n variables de entrada x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) y, para cada uno de los N_i conjuntos difusos $A_i^{l_i}$ establece un grado de membresía $\mu_{A_i^{l_i}}(x_i^*)$ a los valores reales de entrada x_i^* , donde l_i es el número que indica a cada conjunto difuso de la entrada i .

Un aspecto importante al utilizar sistemas difusos es tomar en cuenta el tiempo de cómputo para realizar las operaciones en aplicaciones de tiempo real. Tomando en cuenta lo anterior un método que reduce el tiempo de cómputo es la fusificación impulsiva mostrada en la figura 1.8 y definida por

$$\mu_{A_i^{l_i}}(x_i^*) = \begin{cases} \mu_{A_i^{l_i}}(x_i^*), & x_i = x_i^* \\ 0, & x_i \neq x_i^* \end{cases}$$

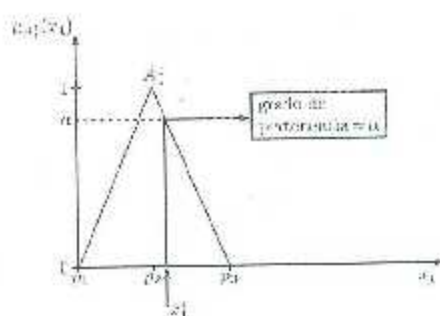


Figura 1.8: Fusificación impulsiva

Base de conocimiento y deducción

La base de reglas almacena el conocimiento y experiencia previa en el que se ha de basar un sistema difuso y constituye la relación de los valores de membresía de las entradas para asignar a la salida una función de membresía de salida. La base de reglas se construye mediante un grupo de reglas difusas del tipo SI-ENTONCES denotado por $R_c^{l_1 \dots l_n}$ y descrito por

$$R_c^{l_1 \dots l_n} : \text{SI } x_1 \text{ es } A_1^{l_1} \text{ Y } \dots \text{ Y } x_n \text{ es } A_n^{l_n} \text{ ENTONCES } y \text{ es } B^{l_1 \dots l_n} \quad (1.1)$$

donde x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) son las variables lingüísticas de entrada contenidas en $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \in U \subset \mathbb{R}^n$, la variable de salida es $y \in V \subset \mathbb{R}$, donde V es el universo de discurso de salida; los conjuntos difusos definidos en U se denotan por $A_i^{l_i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N_i$) mientras que los conjuntos de salida definidos en V estén expresados por $B^{l_1 \dots l_n}$. El número total de reglas difusas está dado por la expresión $M = \prod_{i=1}^n N_i$. Por consecuencia, mientras más conjuntos difusos de entrada se presenten, mayor será el número de reglas existentes.

El almacenamiento y visualización de la base de reglas se hace a través de tablas (matrices) llamadas *Fuzzy Associative Memory* (FAM) o tablas de consulta, como la Tabla 1.1 que almacena una base de reglas con dos entradas (x_1 y x_2) y tres funciones de membresía para cada entrada.

Tabla 1.1: Tabla de consulta de reglas difusas

$x_2 \backslash x_1$	$l_1 = 1, A_1^1$	$l_1 = 2, A_1^2$	$l_1 = 3, A_1^3$
$l_2 = 1, A_2^1$	B^{11}	B^{21}	B^{31}
$l_2 = 2, A_2^2$	B^{12}	B^{22}	B^{32}
$l_2 = 3, A_2^3$	B^{13}	B^{23}	B^{33}

Por otro lado cuando se habla de deducción, se hace referencia al proceso, en el que de

acuerdo a la base de reglas establecidas, se infiere el valor de membresía para cada función de membresía de salida. La inferencia puede entenderse como el proceso que: dada una relación difusa, establecida con anticipación, entre un conjunto difuso de entrada A y un conjunto difuso de salida B , se puede concluir cómo sería una salida B' para una nueva entrada A' .

Existen diversos métodos para realizar la deducción o inferencia, a estos diferentes métodos se les conoce como *máquinas de inferencia*. Entre las máquinas de inferencia más comunes están la máquina de inferencia max-min, que utiliza el operador AND entre las premisas de las reglas, y la máquina de inferencia max-prod que utiliza el operador producto entre las premisas de las reglas y que es más utilizado por ofrecer mayor rapidez en sus cálculos; por esta última razón, en este trabajo de investigación se emplea la máquina de inferencia max-prod.

Inferencia max-prod

Teniendo en cuenta el conjunto de reglas de la forma (1.1) con funciones de membresía de entrada $\mu_{A_i}(x_i)$ y de salida $\mu_{B_i \rightarrow \omega_i}(y)$ para toda $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U \subset \mathbb{R}^n$, $y \in V \subset \mathbb{R}$, la inferencia producto sobre entradas impulsivas se puede obtener con

$$\mu_{B'}(y) = \dots \max_{i=1}^{N_1} \dots \max_{i=N_n} [\mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y)] \quad (1.2)$$

$$= \mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y) \cup \dots \cup \mu_{B_{i_{N_1 \rightarrow \omega_{i_{N_1}}}}}(y) \quad (1.3)$$

donde

$$\mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y) = \omega \mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y) \quad (1.4)$$

y el valor escalar ω está dado por

$$\omega = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)$$

En conclusión, en este tipo de inferencia se obtienen un función $\mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y)$ que tiene semejanza a $\mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y)$ pero escalada al valor de ω . Ya que se tienen las M funciones $\mu_{B_{i_1 \rightarrow \omega_{i_1}}}(y)$ se combinan, mediante la operación unión, para obtener la salida de la máquina de inferencia $\mu_{B'}(y)$ (ver la figura 1.9).

Defusificación

En la etapa de defusificación se genera un valor escalar y^* a partir de la salida $\mu_{B'}(y)$ que genera el módulo de deducción o máquina de inferencia. Este valor y^* es la salida del controlador difuso que será aplicada al sistema a controlar. La manera de realizar la

defusificación no se limita a un solo método, en la actualidad existen diversos métodos de realizarla, entre estos métodos están: centro de área o de gravedad, promedio de centros, centro de sumas, centro del área más grande, defusificador máximo, primero del máximo, último del máximo, entre algunos otros. El centro de gravedad ofrece el valor más exacto, sin embargo, su cálculo es muy costoso; el defusificador máximo es el más rápido pero no posee gran exactitud. El defusificador que realiza los cálculos de integración de forma discreta, por lo que no consume muchos cálculos, y se aproxima muy bien al centro de gravedad es el defusificador centro promedio.

Defusificación por centro promedio

Es también conocida como defusificación por promedio de centros y es calculado por

$$\bar{y}^*(\mathbf{x}^*) = \frac{\sum_{l_1=1}^{N_1} \dots \sum_{l_n=1}^{N_n} \bar{y}^{l_1 \dots l_n} \omega_{l_1 \dots l_n}(\mathbf{x}^*)}{\sum_{l_1=1}^{N_1} \dots \sum_{l_n=1}^{N_n} \omega_{l_1 \dots l_n}(\mathbf{x}^*)}, \quad (1.5)$$

donde el centro del $l_1 \dots l_n$ -ésimo conjunto difuso en la salida a defusificar está denotado por $\bar{y}^{l_1 \dots l_n}$; la altura denotada por $\omega_{l_1 \dots l_n}$, mientras que \mathbf{x}^* es el conjunto de valores reales de entrada.

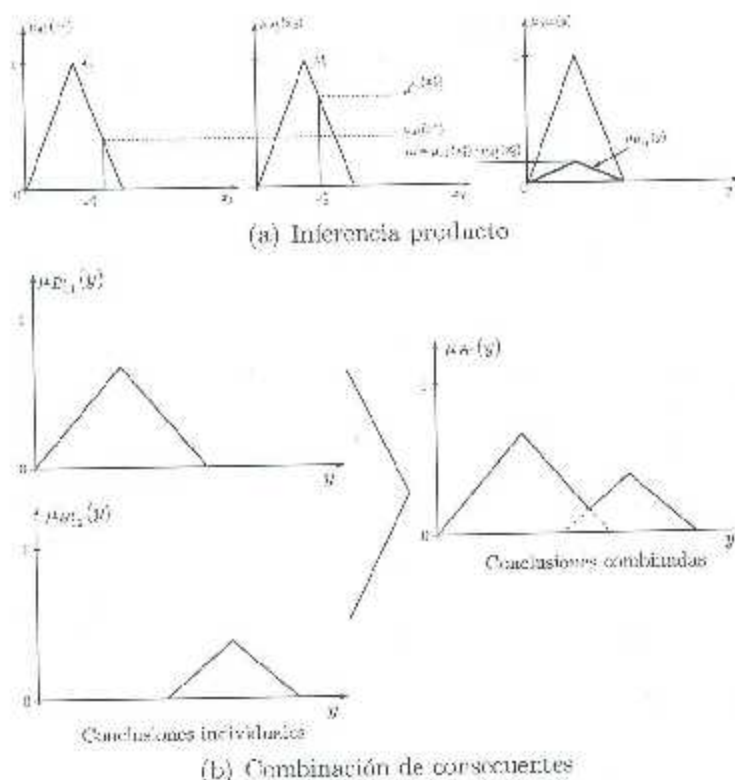


Figura 1.9: Máquina de inferencia max-prod

1.4. Robot PA-10

El robot PA-10 es un robot manipulador industrial de manufactura asiática construido por Mitsubishi Heavy Industries (MHI), que cambió por completo la visión de robots industriales convencionales [Camarillo K. et al., 2006]. El nombre del robot es acrónimo de "*Portable General-Purpose Intelligent Arm*" (Brazo Inteligente Portátil de Propósito General).

En el mercado se comercializaron dos versiones: el PA10-7CE y el PA10-6CE, con siete y seis g.d.l. respectivamente. En el laboratorio de Mecatrónica y Control de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna se cuenta con un robot PA10-7CE, por esta razón este trabajo hace referencia a ese modelo en particular; sin embargo en esta tesis el robot se trabaja como si fuera un robot de 6 g.d.l. para evitar el problema de resolución de la redundancia.

El manipulador PA10 es un robot de arquitectura abierta, por esta razón se dice que posee: (a) una estructura jerárquica con varios niveles de control; (b) una comunicación entre niveles mediante interfaces estandarizadas y (c) una interfaz abierta en el nivel más alto. Lo anterior proporciona un esquema que ofrece al investigador, operador o persona que trabaje con el robot la ventaja de no preocuparse por los niveles más bajos y sólo trabajar en la programación de tareas en el nivel más alto del sistema PA10. La programación de dichas tareas se hace a través de lenguajes de programación de bajo nivel como Visual C++ o Visual BASIC, pero también, en la actualidad se ofrecen herramientas para programar al robot en lenguajes de más alto nivel como lo es la plataforma MATLAB Simulink.

1.5. Objetivos de la tesis

1.5.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es implementar en simulación y experimentación un control de fuerza basado en lógica difusa para el robot manipulador Mitsubishi PA10-7CE.

1.5.2. Objetivos específicos

- Estudiar la teoría de controladores de fuerza para manipuladores, así como los conceptos de lógica difusa.
- Obtener los modelos necesarios para la simulación del robot manipulador.
- Realizar Simulaciones del robot manipulador.
- Diseñar un controlador difuso de fuerza.

- Simular el controlador difuso de fuerza.
- Implementar el controlador difuso de fuerza en el robot real.
- Analizar los resultados obtenidos.

1.6. Estructura de la tesis

El resto de la tesis está organizado de la siguiente forma. El capítulo 2 abarca lo referente a los modelos cinemático y dinámico del robot manipulador PA10 que son necesarios para implementar el controlador de fuerza aquí propuesto; en el capítulo 3 se plantea el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas; dentro del capítulo 4 se describen las modificaciones hechas a las leyes de control descritas en el capítulo 3 para obtener un controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas. Al inicio del capítulo 5 se hace una descripción del controlador $\text{Tanh-D}+g$, que es el encargado de posicionar al manipulador en una postura adecuada para realizar la tarea de contacto con el entorno; después en el mismo capítulo se muestran los parámetros y los resultados de todos los experimentos realizados con los diferentes controladores planteados; finalmente en el capítulo 6 se expresan las conclusiones obtenidas de este trabajo de investigación.

También se incluyen tres apéndices: el primero contiene los parámetros y modelos del robot PA10, el segundo contiene las características del sensor de fuerza ATI Delta y el último muestra las trayectorias de fuerza y de posición deseadas para las diferentes tareas establecidas.

Capítulo 2

El robot Mitsubishi PA10-7CE

El robot manipulador industrial Mitsubishi PA10-7CE es una de las versiones del "Brazo Inteligente Portátil de Propósito General" ("Portable General-Purpose Intelligent Arm") de arquitectura abierta, desarrollado por Mitsubishi Heavy Industries (MHI). Este manipulador está disponible en el Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la Laguna. Está compuesto de siete articulaciones conectadas a través de eslabones tal y como se muestra en la figura 2.1, i.e. que cuenta con 7 grados de libertad (g.d.l.). Además, cuenta con frenos electromagnéticos en cada una de las articulaciones, cuyo propósito es el de sostener el robot, no de frenarlo, ni de sostener cargas externas cuando está apagado. Los servomotores de PA10 son trifásicos, del tipo CD sin escobillas (brushless DC) y están acoplados a los eslabones por medio de transmisiones armónicas (harmonic drives).

En este trabajo se emplea este robot con sólo 6 grados de libertad, i.e. se bloquea una de las articulaciones, en este caso la articulación 3 representada por S3 en la figura 2.1.

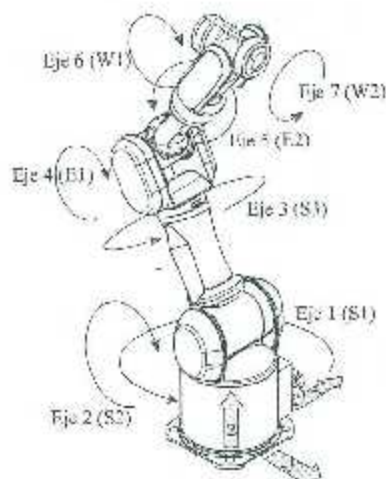


Figura 2.1: Estructura mecánica del manipulador Mitsubishi PA10-7CE

En trabajos anteriores [Ramírez C., 2008] y [Salinas A., 2011] ya se ha tratado el modelado del manipulador PA10-7CE, sin embargo por incertidumbres no resueltas al estudiar esos trabajos fue necesario obtener las expresiones que definen el modelo dinámico y cinemático del robot. En las secciones siguientes se explica de una manera concreta y simple las expresiones de modelado dinámico y cinemático que definen al manipulador PA10-7CE, trabajándolo como un manipulador de 6 g.d.l., así como la obtención de cada una de ellas. Si se desea conocer más a fondo sobre la dinámica y cinemática de manipuladores se recomienda apoyarse en textos especializados.

2.1. Dinámica del robot

La ecuación dinámica de movimiento para un manipulador de n g.d.l. en interacción con el entorno es expresada por [Vukobratovic M. et al., 2009],

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{f}_s \quad (2.1)$$

donde $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ es el vector de variables articulares; $M(\mathbf{q})$ es una matriz simétrica definida positiva de $n \times n$ denominada matriz de inercia; $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz centrífuga y de Coriolis; $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas o pares gravitacionales; $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas externas, siendo por lo regular los pares y fuerzas aplicadas por los accionadores en las articulaciones; $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{(d+m) \times n}$ es la matriz Jacobiana geométrica que relaciona las velocidades en espacio articular con las velocidades en espacio operacional; $\mathbf{f}_s \in \mathbb{R}^{d+m}$ es el vector de fuerzas y pares aplicados en el órgano terminal del manipulador, donde d es la dimensión del espacio geométrico en el que se mueve el robot y m es la dimensión del espacio vectorial que define la orientación. Con tal de evitar el problema de resolución de la redundancia del manipulador PA10-7CE nótese que, el número de grados de libertad será $n = 6$.

Las matrices $M(\mathbf{q})$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y el vector $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ fueron obtenidos mediante la herramienta HEMERO (Herramienta Matlab-Simulink para el Estudio de manipuladores y RObots móviles) [Ollero A., 2001] de una manera numérica y semi-simbólica. Su característica más significativa es que permite integrar el análisis cinemático, dinámico, diseño de sistemas de control de robots y simulación, pudiendo aplicarse tanto a robots manipuladores como a robots móviles [Craig J. J., 2006]. Las instrucciones que ofrece este paquete y que se utilizaron son

- *inertia(dyn, q)* para obtener la matriz de inercia $M(\mathbf{q})$,
- *coriolis(dyn, q, p)* para calcular la matriz centrífuga y de Coriolis,
- *gravity(dyn, q)* para obtener los elementos el vector de fuerzas o pares gravitacionales;

donde d_{dyn} es una matriz que contienen los parámetros cinemáticos y dinámicos del manipulador. Los resultados obtenidos se compararon con los resultados en [Salinas A., 2011] y se verificó que el modelo anteriormente obtenido es correcto. Por esta razón el modelo dinámico obtenido no se incluye en este trabajo pero se pueden ver en [Salinas A., 2011].

2.2. Cinemática del robot

La cinemática de robots establece las relaciones entre las diferentes variables que intervienen en el movimiento del robot, desde un punto de vista puramente geométrico. Entre los primeros puntos a considerar al estudiar un mecanismo está su estructura cinemática y el número de grados de libertad que posee.

Para la obtención de la cinemática del manipulador es necesario conocer los parámetros Denavit-Hartenberg según la convención que se desee usar. Para obtener dichos parámetros del manipulador aquí empleado se utilizó la convención de Denavit-Hartenberg descrita en [Craig J. J., 2006]. Los parámetros Denavit-Hartenberg para el robot Mitsubishi PA10 se obtuvieron con los marcos asignados en la figura 2.2 y se muestran en la tabla 2.1

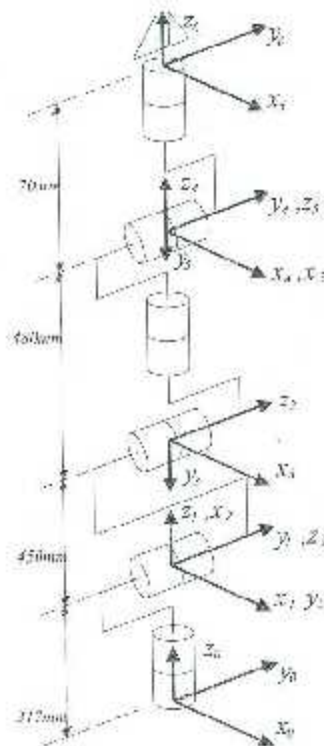


Figura 2.2: Esquema cinemático para los parámetros Denavit-Hartenberg del robot PA10 reducido a 6 g.d.l.

Tabla 2.1: Parámetros Denavit-Hartenberg del PA10-7CE reducido a 6 g.d.l

Enlabón	$a_{i-1} [m]$	$\alpha_{i-1} [rad]$	$d_i [m]$	$\theta_i [rad]$
1	0	0	0,317	q_1
2	0	$\pi/2$	0	q_2
3	0,450	0	0	q_3
4	0	$\pi/2$	0,480	q_4
5	0	$-\pi/2$	0	q_5
6	0	$\pi/2$	0,070	q_6

2.2.1. Cinemática directa

El modelo cinemático directo de posición de un robot manipulador es la relación que permite determinar el vector $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{d+1}$ de coordenadas operacionales en función de su configuración \mathbf{q} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}(\mathbf{q}) \quad (2.2)$$

donde \mathbf{h} es una función vectorial. A la ecuación (2.2) se le conoce como la ecuación cinemática directa del robot manipulador [Sciavicco L., Siciliano B., 1996]. Los componentes de la función \mathbf{h} son determinados implícitamente por el producto de matrices de transformación homogénea del manipulador

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \dots {}^{n-1}T_n \quad (2.3)$$

En general, la matriz de transformación homogénea ${}^aT_b \in SE(3) \subset \mathbb{R}^{4 \times 4}$ que describe la postura relativa del marco $Sigma_b$ con respecto al marco $Sigma_a$ y está dada por

$${}^aT_b = \begin{bmatrix} {}^aR_b & {}^ap \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \in SE(3) \subset \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad (2.4)$$

donde ${}^ap \in \mathbb{R}^3$ describe la posición y $R \in SO(3) \subset \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es una matriz que describe la orientación.

La obtención de la matriz de transformación homogénea 0T (con $n = 6$) para el robot Mitsubishi PA10-7CE se realizó mediante la herramienta HEMERO. La función utilizada de esa herramienta fue

$$fkine(dh, \mathbf{q}),$$

donde dh es una matriz con los parámetros Denavit-Hartenberg con el siguiente formato

$$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i-1} & \alpha_{i-1} & d_i & \theta_i & \sigma_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times 5},$$

donde:

- a_{i-1} , α_{i-1} , d_i , θ_i son los parámetros Denavit-Hartenberg según Craig.
- σ_i indica el tipo de articulación (toma el valor de 0 si la articulación es de rotación y un número distinto de cero si la articulación es prismática).

Los elementos de la matriz de transformación homogénea 0T_6 obtenida se muestran en el Apéndice A .

Derivando con respecto al tiempo la ecuación (2.2), se llega a:

$$\dot{\mathbf{x}} = J_A(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2.5)$$

donde $J_A(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{(6-m) \times n}$ es la matriz jacobiana analítica del robot. Dicha matriz no se calcula en este trabajo pero se puede encontrar en [Salinas A., 2011]. La jacobina geométrica es obtenida con el paquete HEMERO. En particular se hace el uso de la función

$$jacob0(dh, \mathbf{q}).$$

que corresponde a la aplicación de un método alternativo para la obtención del jacobiano del manipulador [Paul R.P., 1981]. Los elementos de la matriz jacobiana geométrica se encuentran en el Apéndice A.

2.2.2. Cinemática inversa

El modelo cinemático inverso de posición es la función inversa h^{-1} que si existe para un robot dado, permite obtener la configuración \mathbf{q} necesaria para ubicar a su órgano terminal en una postura dada \mathbf{x} :

$$\mathbf{q} = h^{-1}(\mathbf{x}) \quad (2.6)$$

De la ecuación (2.5) se desprende la expresión que caracteriza el modelo inverso de velocidad

$$\dot{\mathbf{q}} = J_A(\mathbf{q})^{-1}\dot{\mathbf{x}} \quad (2.7)$$

donde para que $J_A(\mathbf{q})^{-1}$ exista, se supone que \mathbf{x} y \mathbf{q} tienen la misma dimensión.

Las expresiones de la función h^{-1} del modelo cinemático inverso de posición se calcularon con la ayuda del software de robótica SYMORO+ y los resultados se muestran en el Apéndice A.

2.3. Sensor de fuerza

El controlador híbrido de fuerza/posición requiere de la realimentación de las fuerzas y pares presentes en el órgano terminal del robot o en la herramienta de contacto utilizada; para lograr esto se equipó el robot con un sensor de fuerza, marca ATI modelo Delta (Figura 2.3). Es un sensor de 6 grados de libertad, esto quiere decir que es capaz de adquirir las fuerzas y pares en cada uno de los ejes cartesianos ($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$).

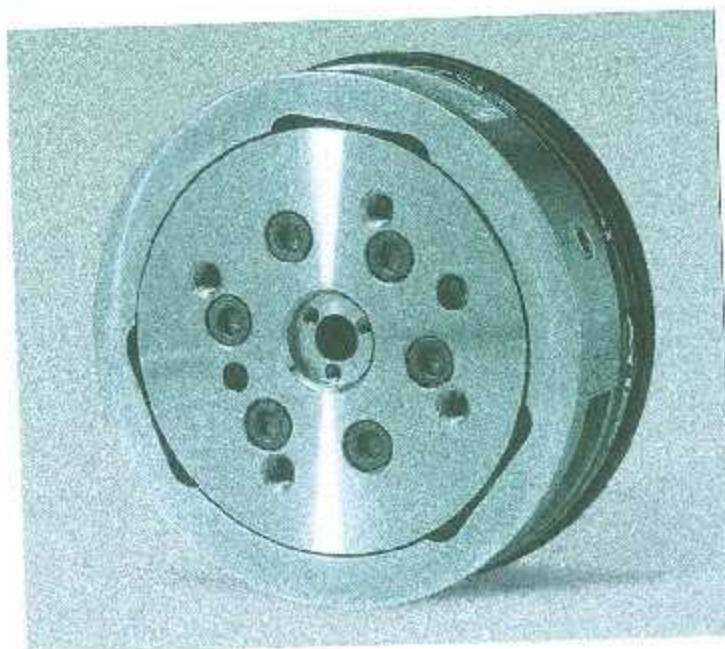


Figura 2.3: Sensor de fuerza/torque ATI Delta

Las características principales del sensor ATI Delta se muestran en el Apéndice B y para obtener mayor información técnica consultar [ATI sensors] y [ATI manual].

En el siguiente apartado se menciona la manera en que se implementó el sensor ATI Delta en el software MATLAB/Simulink con el cual se llevan a cabo los experimentos presentes en esta tesis.

2.3.1. Instalación del sensor de fuerza

Para obtener las señales que generan el sensor de fuerza/torque se montó en la computadora de control una tarjeta de adquisición de datos compatible con el sensor, dicha tarjeta fue una DAQ marca National Instrument modelo PCI-6220 (Figura 2.4); esta cuenta con 16 entradas analógicas de 16 bits.

Ya con el hardware instalado la siguiente paso fue instalar el software necesario para realizar la interfaz entre el sensor y la DAQ. Primero se instaló NIDAQmx, que es el



Figura 2.4: Tarjeta de adquisición de datos NI PCI-6220

software para controlar la tarjeta de adquisición de datos, este software contiene los drivers para la tarjeta y una interfaz gráfica que permite al usuario administrar las características de la tarjeta de adquisición de datos. La figura 2.5 muestra la pantalla principal de esta interfaz, se observa que la tarjeta fue reconocida y las señales de voltaje fueron adquiridas.

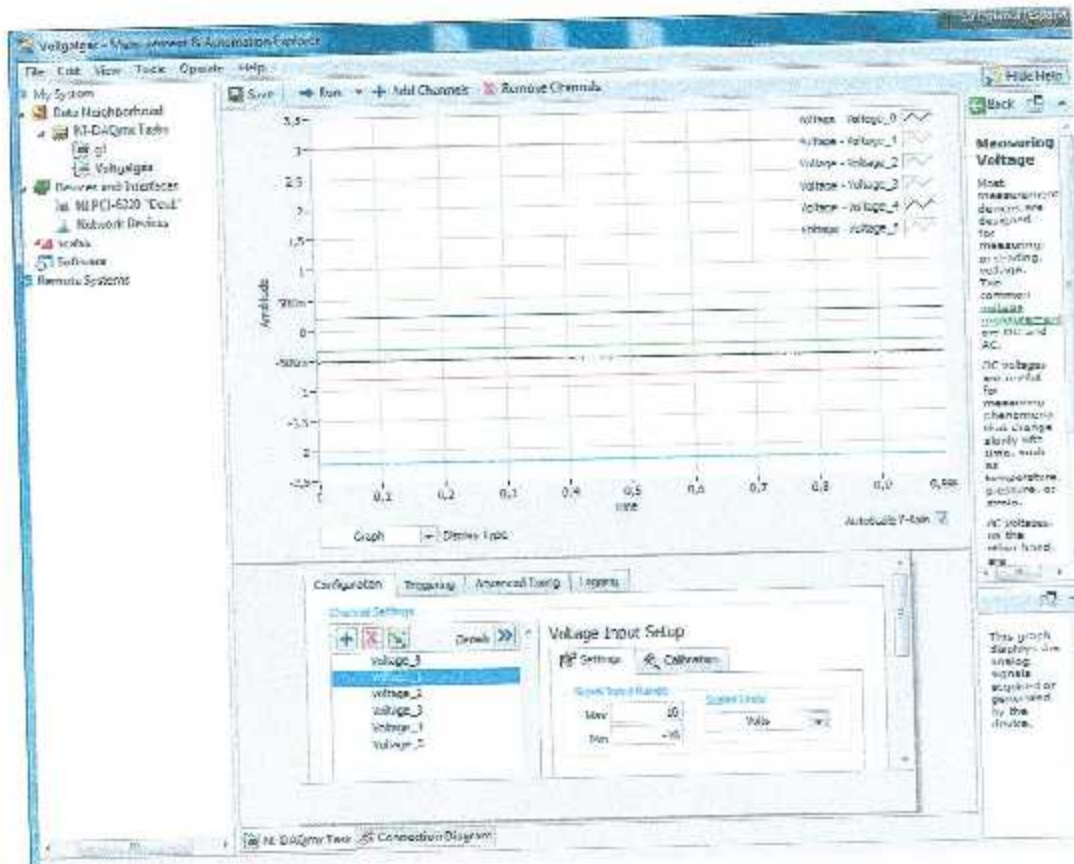


Figura 2.5: Pantalla principal del software NIDAQmx

Posteriormente se instaló el software proporcionado por el fabricante del sensor de fuerza para visualizar gráficamente las señales adquiridas por la DAQ. Es importante mencionar que este software reconoce e interactúa automáticamente con el controlador de la DAQ. En la figura 2.6 se muestran las gráficas que representan los valores de las señales que están siendo enviadas por el sensor; dichas señales no son señales de fuerza/torque, son voltajes obtenidos por las galgas que componen al sensor.

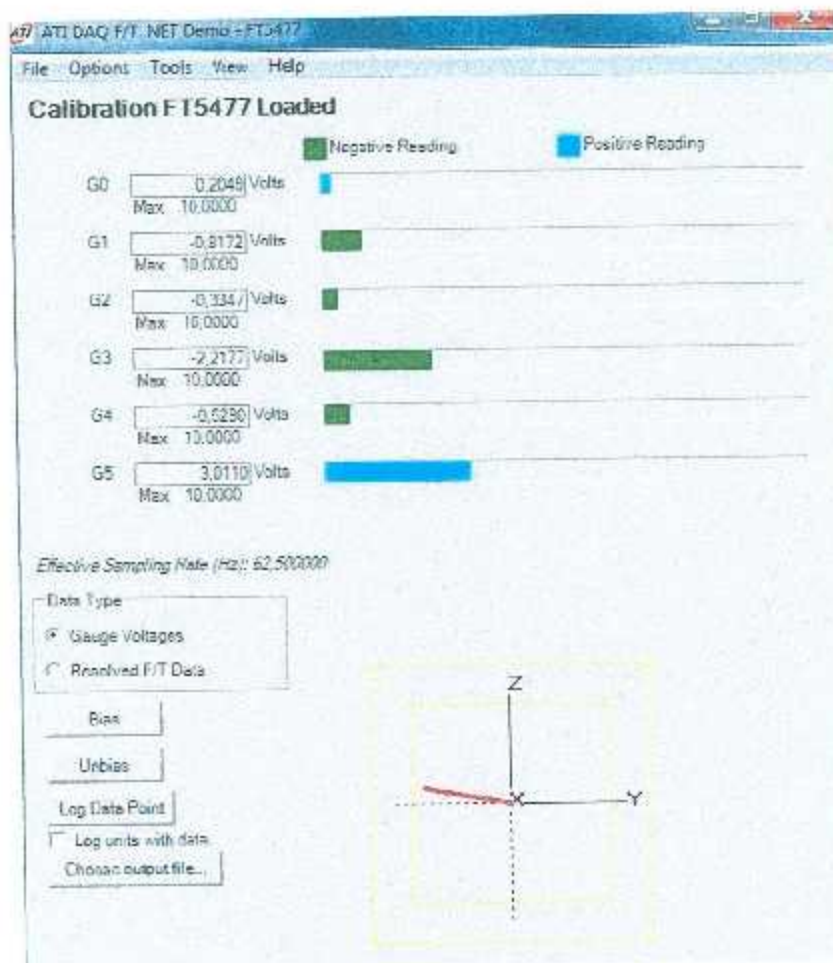


Figura 2.6: Pantalla principal del software del sensor mostrando los valores de los voltajes de las galgas del sensor

La transformación de estos valores de voltaje a valores de fuerza/torque se realiza en este programa introduciendo un archivo de calibración proporcionado por el fabricante. La figura 2.7 muestra los valores de fuerzas y torques correspondientes a los voltajes de la figura 2.6. Nótese que para este caso se selecciona "Resolved F/T Data" en el selector "Data Type" de la pantalla.

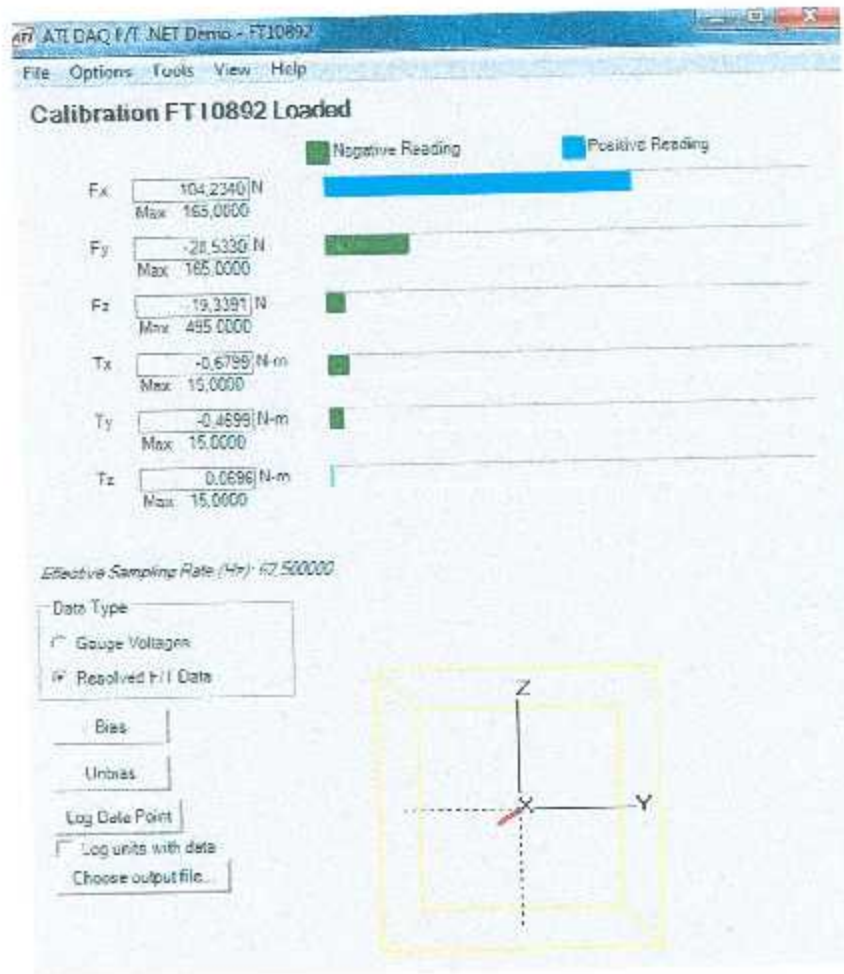


Figura 2.7: Valores de fuerza/torque

La siguiente tarea fue leer las señales adquiridas por la DAQ dentro del entorno de MATLAB/Simulink. Investigando, se encontró que el paquete QuaRC de la empresa Quanser (figura 2.8) con el cual se controla el robot PA10 desde MATLAB/Simulink contiene algunas funciones para adquisición de datos y que además son compatibles con la DAQ empleada.



Figura 2.8: QuaRC

Dentro del entorno de Simulink que es donde se programa el controlador se introduce el bloque correspondiente a la herramienta *HTL_Initialize* (Figuras 2.9a y 2.9b) que asocia

un nombre a una tarjeta de adquisición de datos en particular. El nombre especificado en el parámetro *Board name* es el nombre de la tarjeta, en el parámetro *Board type* se selecciona el modelo de la tarjeta de adquisición de datos a asociar. Otro bloque que se coloca en el programa del controlador es *HIL_Read_Analog* (Figuras 2.10a y 2.10b) que lee los canales analógicos especificados durante el tiempo de ejecución del programa.

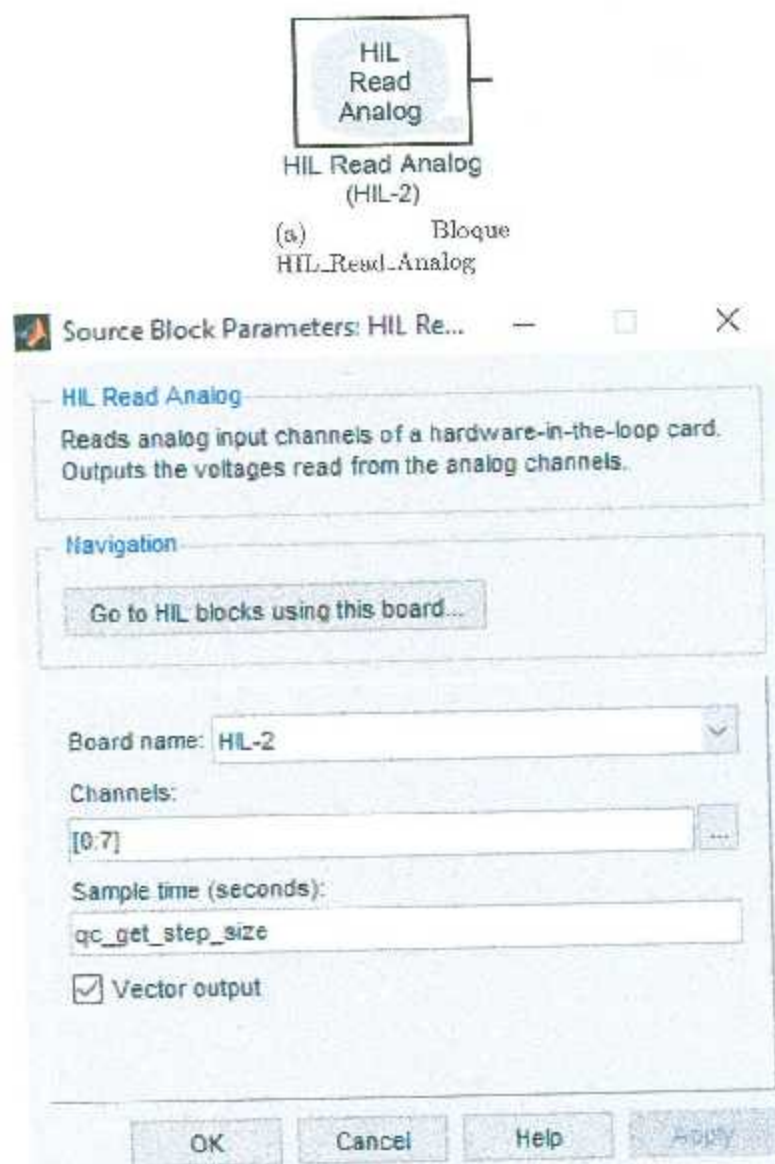


HIL Initialize
(a) Bloque
HIL_Initialize



(b) Parámetros del bloque HIL_Initialize

Figura 2.9: Bloque: HIL_Initialize



(b) Parámetros del bloque HIL_Read_Analog

Figura 2.10: Bloque HIL_Read_Analog

Ya con las señales de los voltajes leídos por la DAQ dentro del entorno de MATLAB/Simulink, éstas se convierten a valores de fuerza/torque. Esta conversión se realiza de manera muy sencilla en el software de ATI en el que sólo se selecciona un archivo de conversión. Estudiando, se encontró que para hacer la conversión de los valores de voltaje enviados por el sensor a valores equivalentes de fuerza/torque. Dicha conversión está dada por la expresión

$$f_s = M_T v_c + c_0 \quad (2.8)$$

donde M_T es una matriz de transformación 6×6 proporcionada en el archivo de calibración del sensor (Se encuentra en el Apéndice B), $v_e \in \mathbb{R}^6$ es el vector que contiene los voltajes enviados por cada galga en el sensor y $c_o \in \mathbb{R}^6$ es un vector de compensaciones que está proporcionado en el archivo de calibración del sensor.

Físicamente, el sensor de fuerza ATI Delta se montó sobre la base para colocar la herramienta que tiene el último eslabón del robot Mitsubishi PA10. Sobre el sensor se colocó una herramienta de contacto diseñada en [Salinas A., 2011] para disminuir lo mayor posible la fricción entre ésta y la superficie. La Figura 2.11 muestra como está hecho el acoplamiento mecánico entre el robot, el sensor y la herramienta de contacto.

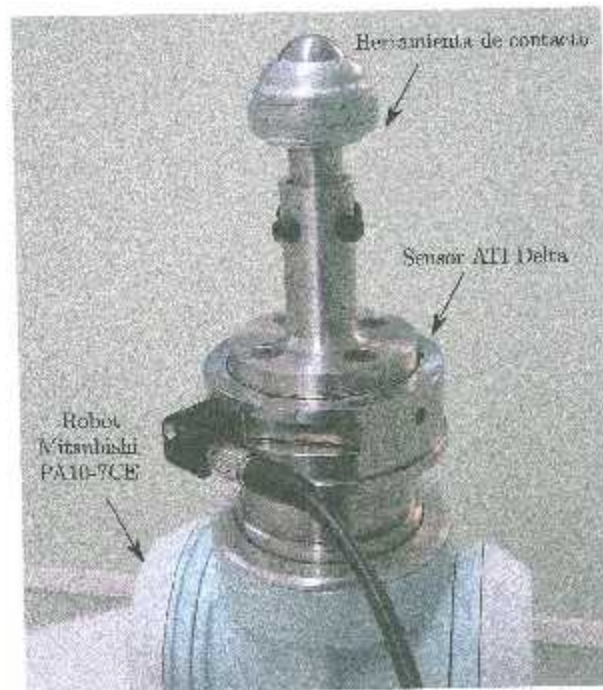


Figura 2.11: Acoplamiento entre el robot, el sensor y la herramienta de contacto.

Capítulo 3

Control híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas

En la literatura se encuentra una amplia colección de trabajos acerca de diferentes y muy variados algoritmos de control híbrido de fuerza/posición, sin embargo, destaca el método propuesto en [Craig J. J., Raibert M. II., 1979] el cual es la base del algoritmo utilizado en este trabajo de investigación.

El diagrama a bloques del método de la propuesta anteriormente citada se muestra en la figura 3.1; contiene dos lazos de control en paralelo con leyes de control y realimentación independiente para cada uno. El primer lazo, es el lazo de control de posición y hace uso de la información adquirida por los sensores de posición en cada articulación del robot, y el lazo restante, es el lazo de fuerza que utiliza la información recolectada por el sensor

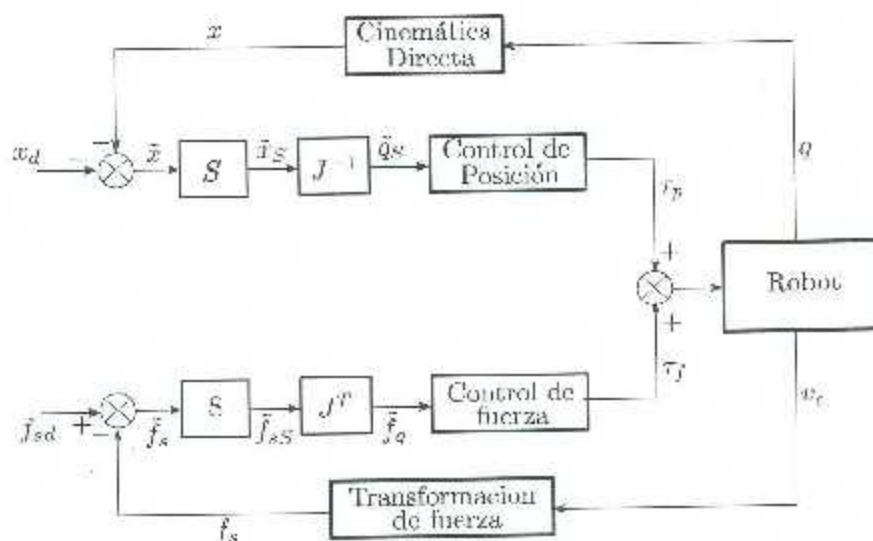


Figura 3.1: Estructura original del controlador híbrido

de fuerza montado en el órgano terminal del robot. La idea principal de este método de control híbrido es utilizar dos leyes de control independientes asignadas a cada g.d.l. en el espacio de la tarea, pero que ambos controladores cooperan sincronizadamente en el control de cada una de las articulaciones del robot manipulador.

En las direcciones controladas en fuerza los errores de posición son puestos a cero al multiplicarse por el complemento ortogonal de la matriz de selección (matriz de selección de posición) definida como $\bar{S} = I - S$. Esto significaría que la parte del control de posición no interfiere con el lazo de control de fuerza. Sin embargo, ése no es el caso real. La naturaleza del espacio articular del controlador del robot resulta en el acoplamiento de los lazos de control de posición y de fuerza, los cuales habían sido previamente matemáticamente desacoplados en el marco de la tarea.

Se utiliza una ley de control de posición tipo PD con matrices de ganancias $k_p \in \mathbb{R}^{(d-m) \times (d-m)}$ y $k_v \in \mathbb{R}^{(d-m) \times (d-m)}$ y la ley de control de fuerza consiste en una acción proporcional e integral PI con sus respectivas matrices de ganancias $k_{pf} \in \mathbb{R}^{(d+m) \times (d+m)}$ y $k_{if} \in \mathbb{R}^{(d-m) \times (d+m)}$, así como de una parte de realimentación de la fuerza deseada en el lazo de fuerza, entonces la ley de control puede ser escrita en espacio operacional como

$$\tau_x = \tau_{fx} + \tau_{px} \quad (3.1)$$

donde el par de control de la parte de posición está dado por

$$\tau_{px} = k_p \bar{S} \tilde{x} + k_v \bar{S} \dot{\tilde{x}} \quad (3.2)$$

y para el lazo de fuerza como

$$\tau_{fx} = k_{pf} S \tilde{f}_s + k_{if} S \int_0^t \tilde{f}_s dt + f_{sd} \quad (3.3)$$

donde $\tau_x \in \mathbb{R}^6$ es el vector de pares de control, k_p , k_v , k_{pf} y k_{if} son las matrices diagonales de ganancias de control de 6×6 , \tilde{x} es el vector resultante de la diferencia entre el vector de postura operacional deseada $x_d \in \mathbb{R}^{d+m}$ y el vector de postura operacional actuales $x \in \mathbb{R}^{d+m}$, $\dot{\tilde{x}} \in \mathbb{R}^{d+m}$ es el vector de errores de velocidad en espacio operacional, $\tilde{f}_s \in \mathbb{R}^{d+m}$ es el vector obtenido por la diferencia entre el vector de fuerzas de contacto deseadas $f_{sd} \in \mathbb{R}^{d+m}$ y el vector de fuerzas instantáneo $f_s \in \mathbb{R}^{d+m}$.

Un problema que se presenta en esta formulación es una inestabilidad dinámica en la parte del control de fuerza debido a efectos de ganancia elevada de la retroalimentación de la señal del sensor de fuerza que es causada cuando se presenta una alta rigidez en el entorno, efectos dinámicos no modelados causados por el brazo y la elasticidad del sensor. Para solucionar este problema se ha introducido el modelo dinámico del manipulador en la ley de control. En [Shin K. G., Lee C. P., 1985] se formula un control híbrido de fuerza/posición en el que se utiliza el modelo cinemático del robot en la ley de control, cuya expresión está dada por

$$\tau_x = M_x(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}}^* + C_x(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) - \mathbf{g}_x(\mathbf{x}) + S\mathbf{f}^* \quad (3.4)$$

donde $\ddot{\mathbf{x}}^*$ es la aceleración equivalente de control

$$\ddot{\mathbf{x}}^* = \ddot{\mathbf{x}}_d + k_v\dot{\mathbf{x}} + k_p\bar{\mathbf{x}} \quad (3.5)$$

y $\mathbf{f}^* \in \mathbb{R}^6$ es el vector generado por la ley de control seleccionada para la parte del lazo de fuerza.

Para evitar rebotes y minimizar los sobreimpulsos durante la transición se agrega un término de amortiguamiento activo en la parte del control de fuerza [Khatib O., 1987],

$$\tau_{fx} = S\mathbf{f}^* - M_x(\mathbf{x})S k_{vf}\dot{\mathbf{x}} \quad (3.6)$$

donde el término k_{vf} es la matriz diagonal con ganancias de amortiguamiento cartesiano. En [Bona B., Indri M., 1992] se propone modificar la ley de control para posición como

$$\tau_{px} = M_x(\mathbf{x})\bar{S} [\ddot{\mathbf{x}}^* - M_x^{-1}(\mathbf{x})(S\mathbf{f}^* - \mathbf{f}_s)] + C_x(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{g}_x(\mathbf{x}) \quad (3.7)$$

siendo $M_x^{-1}(\mathbf{x})(S\mathbf{f}^* - \mathbf{f}_s)$ un término agregado para compensar el acoplamiento entre los lazos de control de fuerza y posición, así como las perturbaciones en el controlador de posición debidas a la fuerza de reacción.

Hasta ahora las leyes de control se han manejado en espacio operacional, sin embargo en [Zhang H., Paul R., 1985] se propone una transformación del espacio cartesiano a espacio articular transformando las matrices de selección S y \bar{S} dadas en espacio cartesiano a espacio articular como

$$S_q = J^{-1}S J \quad (3.8)$$

y

$$\bar{S}_q = J^{-1}\bar{S} J \quad (3.9)$$

donde J es el jacobino geométrico. Con estas transformaciones se obtienen las ley de control equivalente en espacio articular como

$$\tau = \tau_f + \tau_p \quad (3.10)$$

siendo

$$\tau_f = S_q \mathbf{f}_c^* - M(q)S_q K_{vf}\dot{\mathbf{q}} \quad (3.11)$$

$$\tau_p = M(q)\bar{S}_q [\ddot{\mathbf{q}}^* - M(q)^{-1}(S_q \mathbf{f}_c^* - J^T \mathbf{f}_s)] + C(q, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{g}(q) \quad (3.12)$$

donde

$$\ddot{\mathbf{q}}^* = \ddot{\mathbf{q}}_d + K_v \dot{\tilde{\mathbf{q}}} + K_p \tilde{\mathbf{q}} \quad (3.13)$$

y

$$\mathbf{f}_c^* = K_{pf} J^T \tilde{\mathbf{f}}_s + K_{if} J^T \int_0^t \tilde{\mathbf{f}}_s dt \quad (3.14)$$

$M(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^n$ son los componentes dinámicos articulares del manipulador; $\tilde{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de diferencias entre el vector de posiciones articulares deseadas $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$ y el vector de posiciones articulares instantáneas $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$; $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales de ganancias para el alzo de control de posición y $K_{pf} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_{if} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $K_{vf} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices diagonales de ganancias para el lazo de control de fuerza en espacio articular.

El diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias fijas en espacio articular se muestra en la figura 3.2.

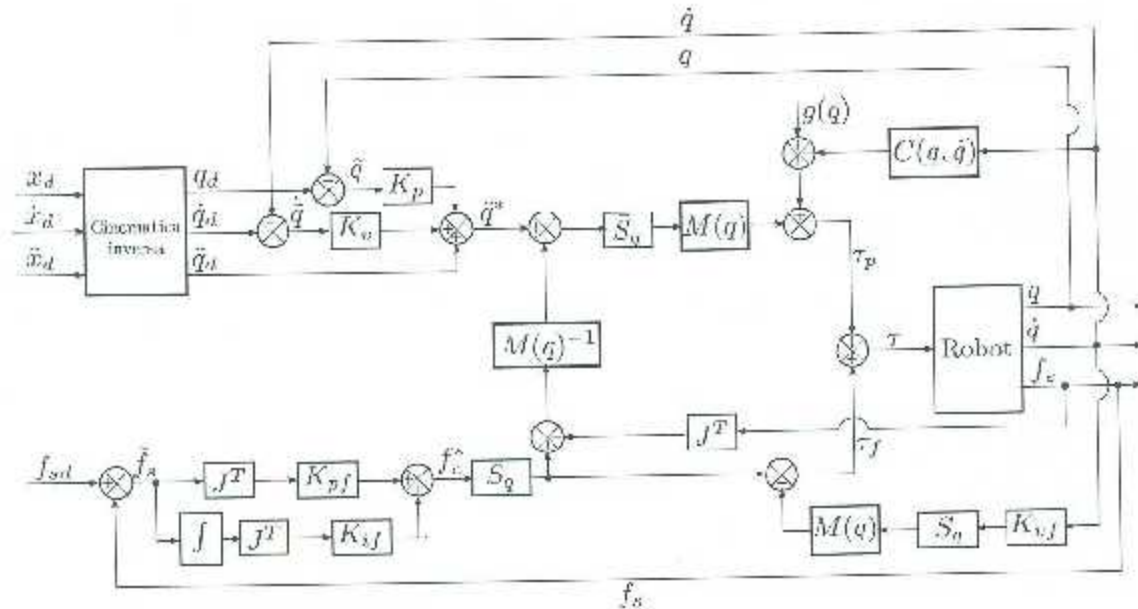


Figura 3.2: Diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias fijas en espacio articular.

Capítulo 4

Control híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas

Basados en los resultados de experimentación con la ley de control expresada por (3.10)-(3.14) se observó que el rendimiento de control varía dependiendo la rigidez del entorno de contacto, por lo que para mejorar el rendimiento de una superficie a otra era necesario resintonizar algunas ganancias de control. Con el fin de de adaptar y/o mejorar el rendimiento de control a varias condiciones de contacto, es necesario re-sintonizar las ganancias de control de fuerza [Shih-Tin L., Ang-Kiong H., 1998]. Durante los experimentos para sintonización del control híbrido de fuerza/posición los resultados mostraron que el sistema muestra sensibilidad al cambiar la rigidez del material de contacto, lo que provoca la necesidad de variar las ganancias de control en el lazo de fuerza para obtener un rendimiento bueno en el control. Los experimentos muestran que la ganancia con más sensibilidad es K_{pf} comparada con K_{vf} y K_{if} . Por esta razón, se propone que sólo la ganancia K_{pf} se supervise de manera difusa y K_{vf} y K_{if} se configuren con un valor constante.

El diseño del control difuso propuesto se basa en las leyes de control de las ecuaciones (3.10)-(3.14) con la diferencia que se plantea un sistema difuso supervisorio para la ganancia de control \hat{K}_{pf} en el lazo de control de fuerza, donde ahora la ganancia está dada por las funciones $\hat{K}_{pf}(x)$. Con estos cambios en el lazo de control de fuerza la ecuación (3.14) queda

$$\dot{f}_e^* = \hat{K}_{pf}(x)J^T \ddot{f}_e - K_{if}J^T \int_0^t \ddot{f}_e dt \quad (4.1)$$

Se establece el sistema difuso $\hat{K}_{pf}(x)$ similar al presentado en 1.5 con solo una entrada, $x_1 = \dot{f}_{sz}$ y además una única salida, i.e., \overline{y}_1^1 , se definen N_1 conjuntos difusos A_1^i ($i = 1, 2, \dots, N_1$) para la entrada x_1 que están descritos individualmente por una función de membresía $\mu_{x_1^i}(x_1)$, y para las funciones de membresía de cada una de las salidas se asigna una función de tipo impulsiva.

Se puede establecer que el sistema se edifique a partir del conjunto de N_1 reglas difusas SI-ENTONCES con la forma

$$\text{SI } x_1 \text{ es } A_1^1 \text{ ENTONCES } \hat{K}_{pf}(x) \text{ es } \bar{y}_1^1.$$

Si se emplean entradas con funciones de membresía del tipo gaussianas, además de usar inferencia producto y se defusifica con promedio de centros el sistema pueden ser descrito por

$$\hat{K}_{pf}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \bar{y}_1^i \left(\mu_{A_1^i}(x_1) \right)}{\sum_{i=1}^{N_1} \left(\mu_{A_1^i}(x_1) \right)}, \quad (4.2)$$

dónde \bar{y}_1^1 y \bar{y}_2^1 son tomados como parámetros de las funciones impulsivas de salida y pueden ser encapsulados dentro del vector $\theta_1 \in \mathbb{R}^{N_1}$, i.e., $\theta_1 = [\bar{y}_1^1, \dots, \bar{y}_1^{N_1}]^T$.

El diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias difusas en espacio articular se muestra en la figura 4.1.

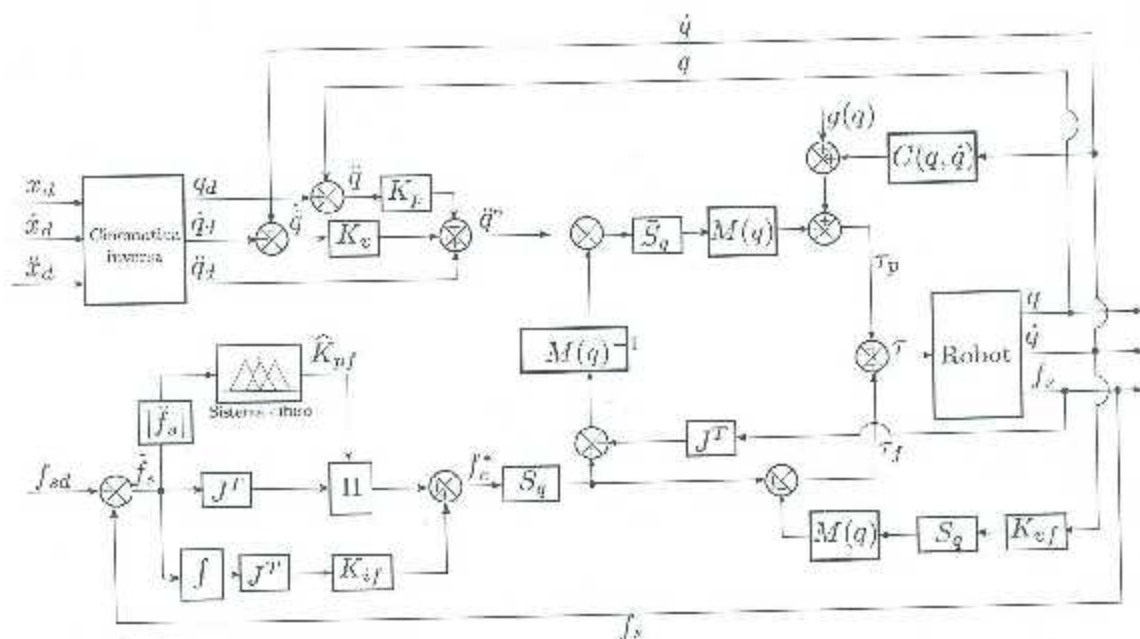


Figura 4.1: Diagrama a bloques del controlador híbrido con ganancias difusas en espacio articular.

Capítulo 5

Evaluación experimental

La evaluación experimental de los controladores descritos en capítulos anteriores se realizó en el robot manipulador Mitsubishi PA10-7CE que se encuentra en el laboratorio de Mecatrónica y Control perteneciente a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna.

Los controladores fueron programados en el entorno de diseño y simulación *Simulink* de MATLAB. Se utilizaron herramientas de software proporcionadas por la empresa QUARC, las cuales proporcionan una manera sencilla de realizar una comunicación entre el sistema de control interno del robot PA10-7CE y el entorno *Simulink*, logrando así obtener fácilmente las señales de las posiciones y velocidades articulares del robot y enviar las señales de control en modo par al manipulador. Asimismo, se pueden leer las señales de voltaje proporcionadas por el sensor de Fuerza ATI Delta y utilizarlas dentro de *Simulink*.

Algo importante que mencionar, es que todas las pruebas experimentales se realizaron con un periodo de muestreo de 5 ms. Debido a la naturaleza de algunos controladores empleados, este tiempo de muestreo fue el adecuado para implementar todos los algoritmos numéricos demandados por el sistema. Es importante aclarar que en el caso de las variables articulares los resultados mostrados en las gráficas se expresan en grados, mientras que en los programas de MATLAB esas mismas variables se manejaron radianes.

El tiempo total en el que se realiza un experimento se divide en dos partes: la primer parte es la de posicionamiento, donde se emplea un controlador Tanh-D con compensación

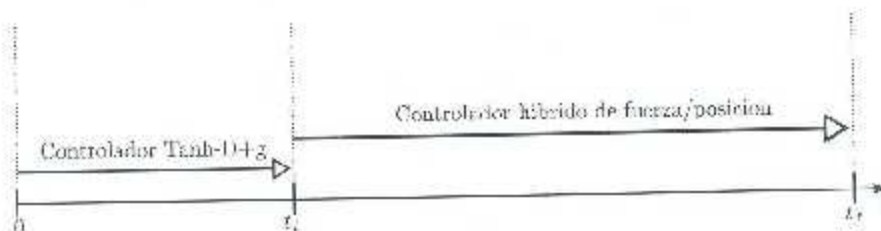


Figura 5.1: Línea del tiempo para cada uno de los experimentos.

de gravedad para llevar al robot a una configuración para realizar el contacto con una superficie; la segunda parte, a partir de un tiempo t_1 , donde se emplea el controlador híbrido de fuerza/posición (una línea del tiempo se muestra en la figura 5.1).

5.1. Control Tanh-D con compensación de gravedad

Se dedica un apartado al controlador Tanh-D con compensación de gravedad (Tanh-D+g) debido a que este controlador es el que se encarga de llevar al robot a una configuración adecuada para realizar la tarea de contacto sobre la superficie y también de llevar al robot a su configuración inicial (casa) al terminar la tarea.

El control Tanh-D+g en modo par es descrito por la expresión [Ramírez C., 2008],

$$\tau = K_p \tanh(\Lambda(q_d - q)) - K_v \dot{q} + g(q) \quad (5.1)$$

donde τ es el vectores de pares articulares aplicados al robot; q y \dot{q} son los vectores de posiciones y velocidades articulares aplicados al robot, q_d es el vector de posiciones articulares deseadas, $g(q)$ es el vector de pares gravitacionales del robot; K_p , K_v , Λ son matrices diagonales con las ganancias de control y la función vectorial $\tanh(x)$ con $x \in \mathbb{R}^n$ es tal que $\tanh(x) = [\tanh(x_1) \ \tanh(x_2) \ \dots \ \tanh(x_n)]^T \in \mathbb{R}^n$.

Las referencias deseadas para la postura en espacio operacional para posicionar el externo final del robot están dadas por $x_d = [-0.15\text{m} \ 0.55\text{m} \ 0.769\text{m} \ 180^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$ que corresponden a las referencias deseadas para la fase de posicionamiento según las referencias en el apéndice C; y las coordenadas articulares para satisfacer esta postura según la cinemática inversa son $q_d = [105.25^\circ \ 11.57^\circ \ 77.11^\circ \ 0^\circ \ 91.33^\circ \ -74.74^\circ]^T$. Los valores de las ganancias de control utilizadas en este controlador se dan a conocer en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Ganancias del controlador Tanh D+g.

Articulación	K_p [Nm]	Λ [1/rad]	K_v [Nm/rad]
1	50	51.56	40
2	60	85.94	60
3	30	85.94	50
4	8	57.29	5
5	10	114.59	7
6	8	57.29	5

Los errores de posición $\tilde{q} = q_d - q$ con respecto al tiempo así como los pares articulares generados por la ley de control se muestran en la figura 5.2. La transición del error de cada variable operacional se muestran en la figura 5.3. Es importante aclarar que los errores de posición son tomados teniendo como condición inicial la posición de casa del manipulador como en la figura 2.2.

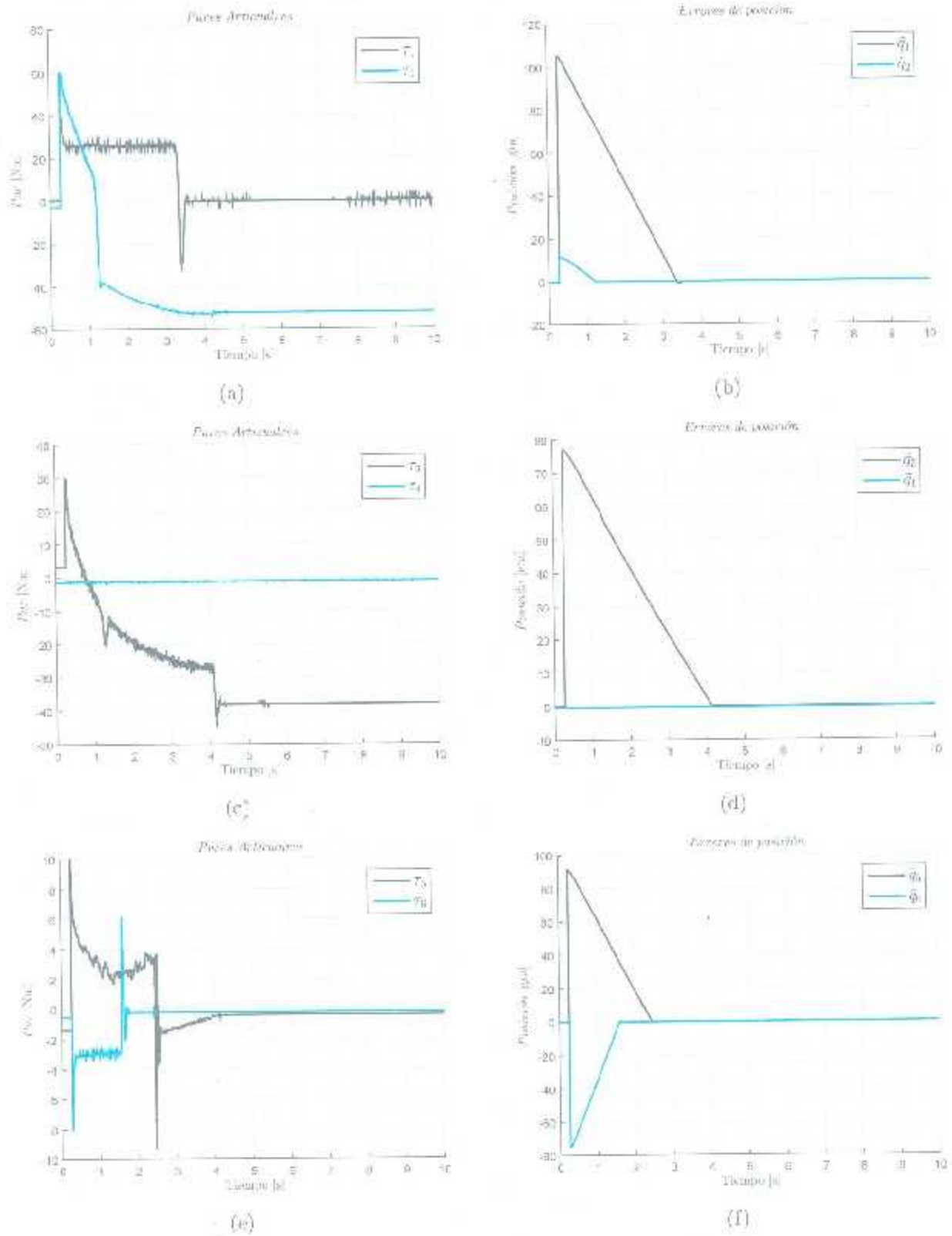


Figura 5.2: Pares y errores de posición articular del robot con el controlador Tanh-D+g.

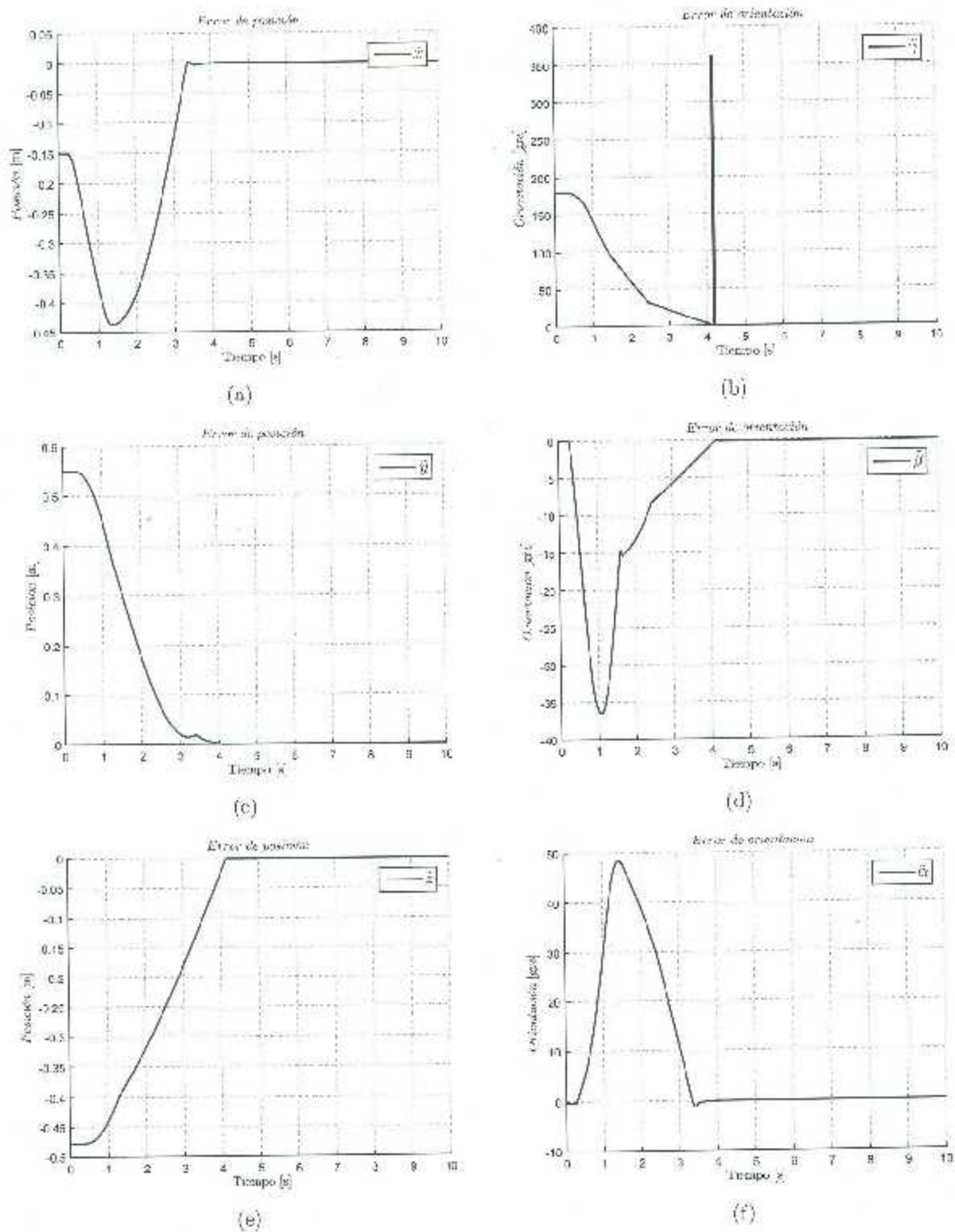


Figura 5.3: Error de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador Tanh-D+g.

5.2. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas

El controlador de fuerza/posición descrito por las expresiones (3.10)-(3.14) se probó en el robot Mitsubishi PA10-7CF considerando una tarea de movimiento en línea recta del órgano terminal estando en contacto con una superficie. Se seleccionaron diferentes materiales, con diferentes grados de rigidez, para colocarlos como superficies de contacto. Los materiales seleccionados con un coeficiente de rigidez K_c grande, y que presentan mayor resistencia a deformarse, fueron una tabla de madera con espesor de $3/4$ in, y un de vidrio con espesor de $1/4$ in; los materiales con un coeficiente de rigidez K_c bajo, y que tienden a deformarse con mayor facilidad al aplicarles fuerzas de menor magnitud, fueron un bloque de nieve seca y una esponja. En la Figura 5.4 se muestran los materiales seleccionados.

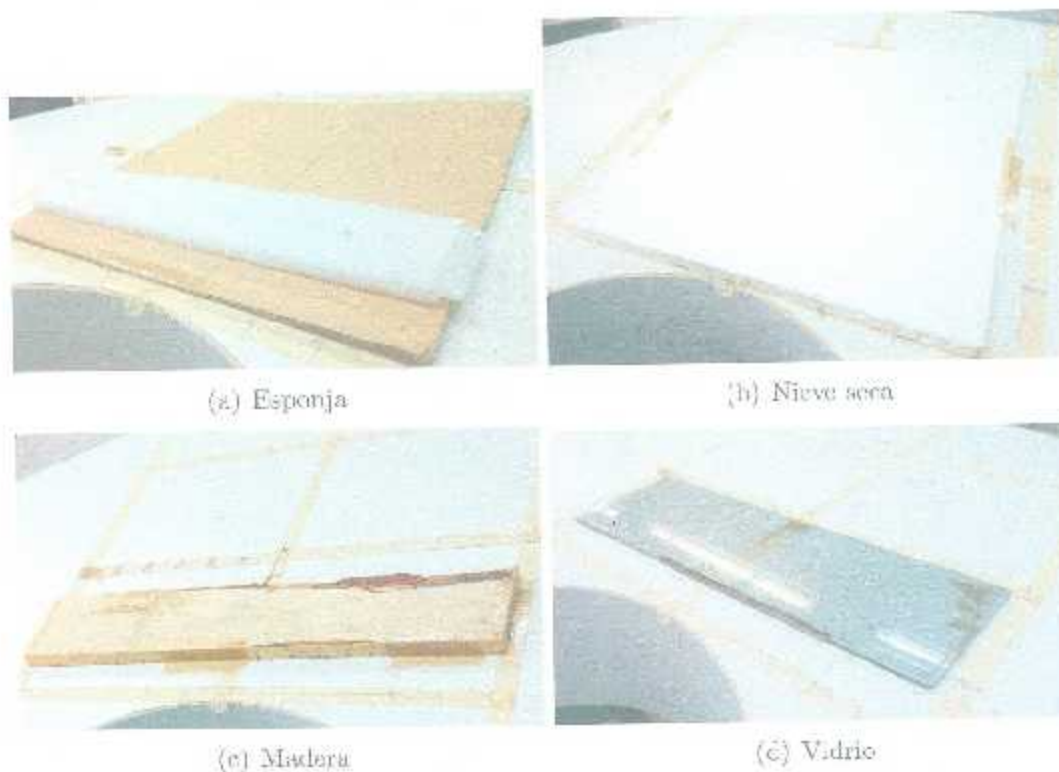


Figura 5.4: Materiales empleados como superficie de contacto.

La tarea a realizar consiste en aplicar una fuerza deseada f_{end} sólo sobre el eje z del marco de la tarea Σ_t (marco asociado a donde se realiza el contacto) y que coincide en orientación con el marco de la base del robot Σ_0 (marco de referencia del robot), con el marco del último eslabón Σ_n y con el marco del órgano terminal Σ_h (ver la figura 5.5), mientras se realiza una labor de seguimiento de una línea recta sobre el eje x del marco de la tarea. Las trayectorias deseadas de fuerza y de posición se muestran en el Apéndice C. Tomando esto en cuenta la matriz de selección para el lazo de control de fuerza queda

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

y la matriz de selección para el lazo de control de posición es

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

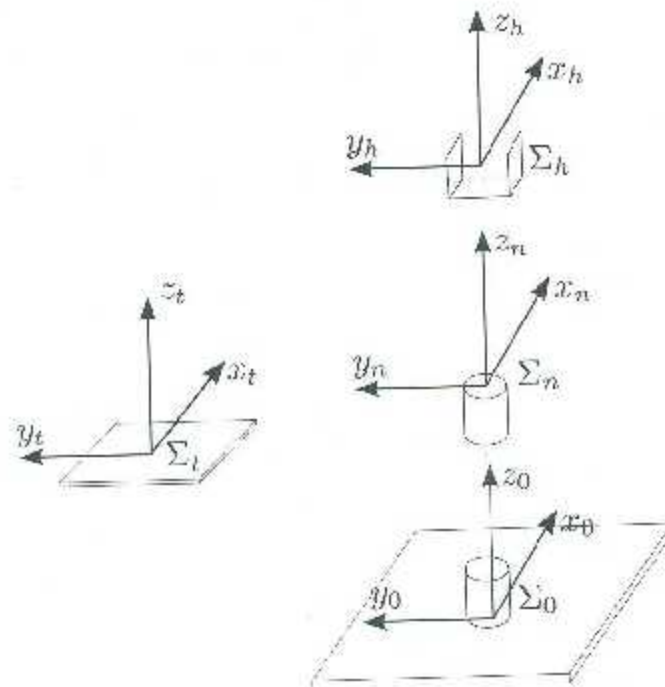


Figura 5.5: Situación del marco de la tarea referida al marco de la base del robot.

Los valores de los parámetros para las matrices diagonales de ganancias de la ley de control correspondiente a la parte de control de posición τ_p se muestran en la tabla 5.2, mientras que los valores que se asignaron a las ganancias de control en la ley de control de fuerza τ_f se presentan en la tabla 5.3. Los valores de estas últimas ganancias fueron los mismos para cada una de las articulaciones. Los valores de los parámetros se mantuvieron sin alteraciones durante las pruebas en las diferentes superficies de contacto.

Tabla 5.2: Parámetros de la parte de control de posición τ_p en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas.

Articulación	K_{pp} [1/terts ²]	K_{vp} [1/s]
1	1250	100
2	1750	15
3	2750	12.5
4	500	10
5	500	200
6	2500	9000

Tabla 5.3: Parámetros de la parte de control de fuerza τ_f en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias fijas.

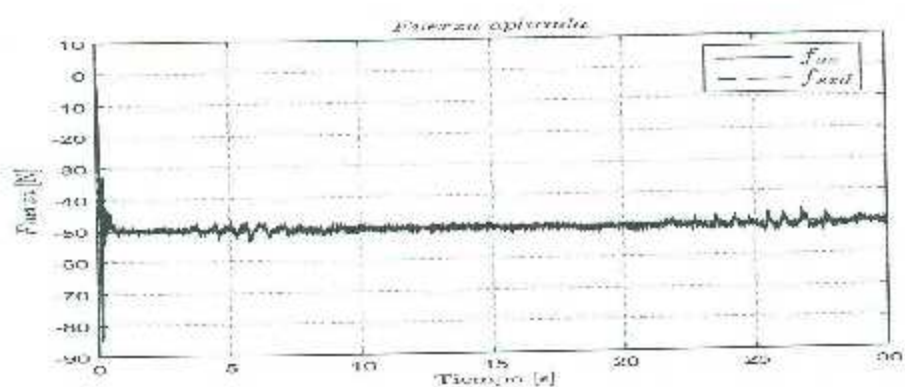
	K_{pf}	K_{vf} [1/rad]	K_{if}
Valor	0.1	0.1	3

Los resultados de experimentación arrojados por este controlador con los diversos tipos de superficies de contacto se muestran en las subsecciones siguientes.

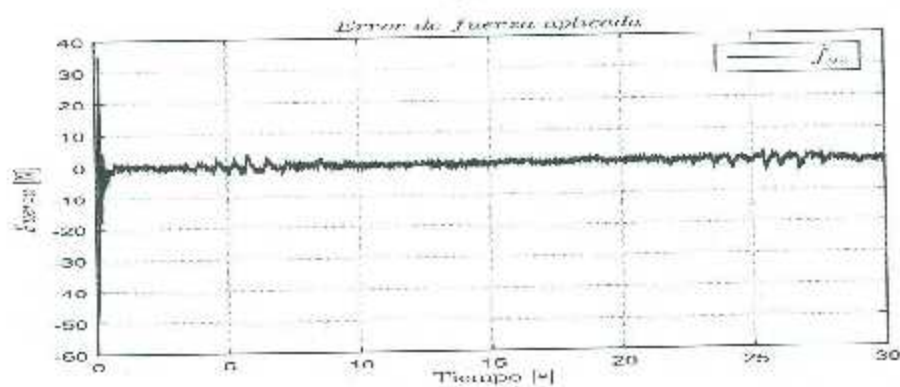
5.2.1. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre esponja

Los experimentos con el controlador híbrido con ganancias fijas se realizaron sobre diferentes materiales y con diferentes referencias de fuerza deseada f_{sda} . En este apartado se muestran los resultados de las diferentes variables de interés al aplicar el controlador sobre el manipulador PA10 interactuando con una esponja como la de la figura 5.4(a). En la primera parte (figuras 5.5 a 5.8) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z \hat{f}_{sz} , los errores y desplazamientos de posición de cada variable cartesiano (x , y , z) y los errores y desplazamientos de orientación según los ángulos *RPY* (rotación de γ sobre el eje x , luego rotación de β sobre el eje y , finalmente rotación de α sobre el eje z) al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (figuras 5.9 a 5.11) se encuentran los resultados de esas mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N



(a)



(b)

Figura 5.6: Fuerza aplicada y error de fuerza con el control híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{dsd} = -50$ N sobre esponja.

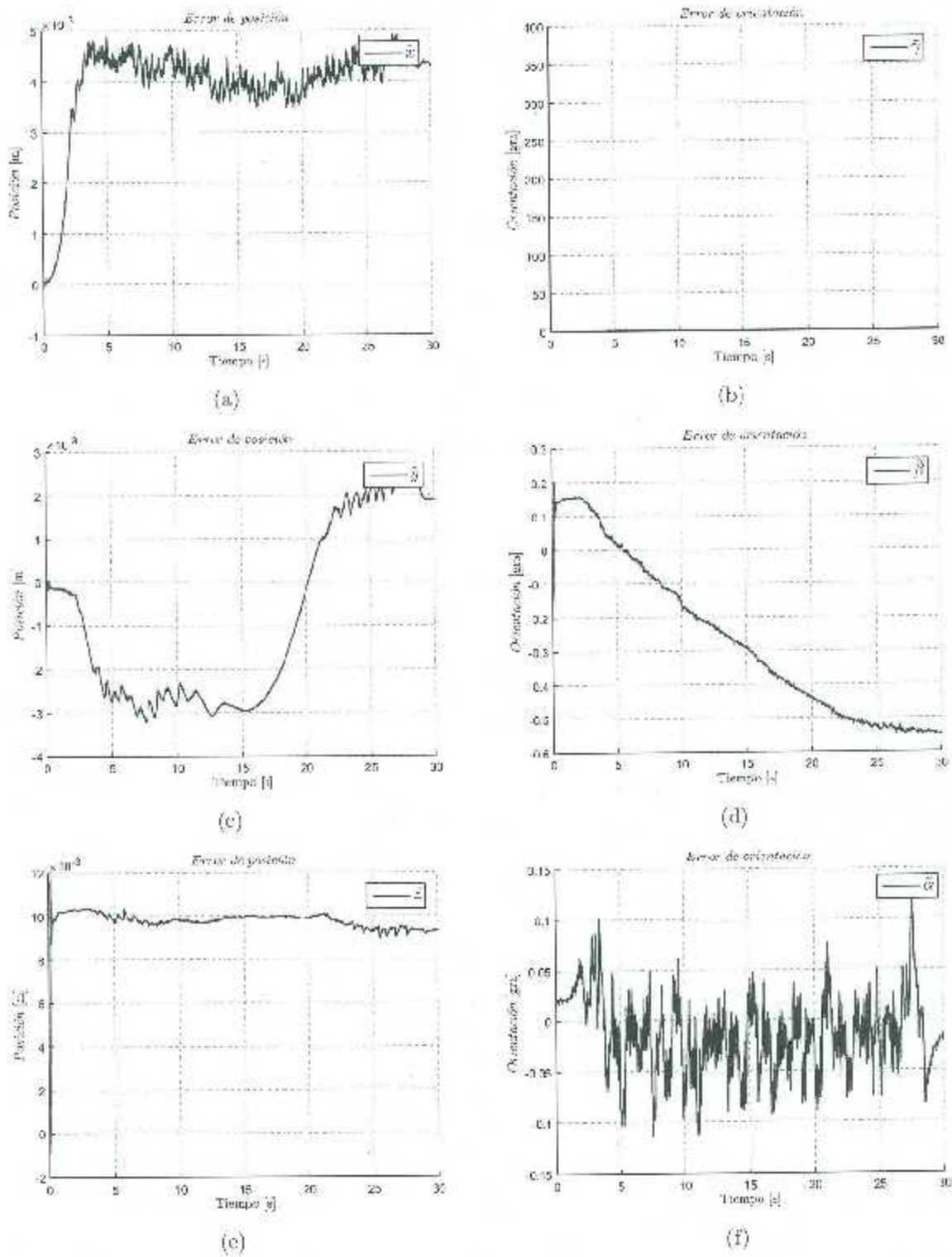


Figura 5.7: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{desd} = -50$ N sobre esponja.

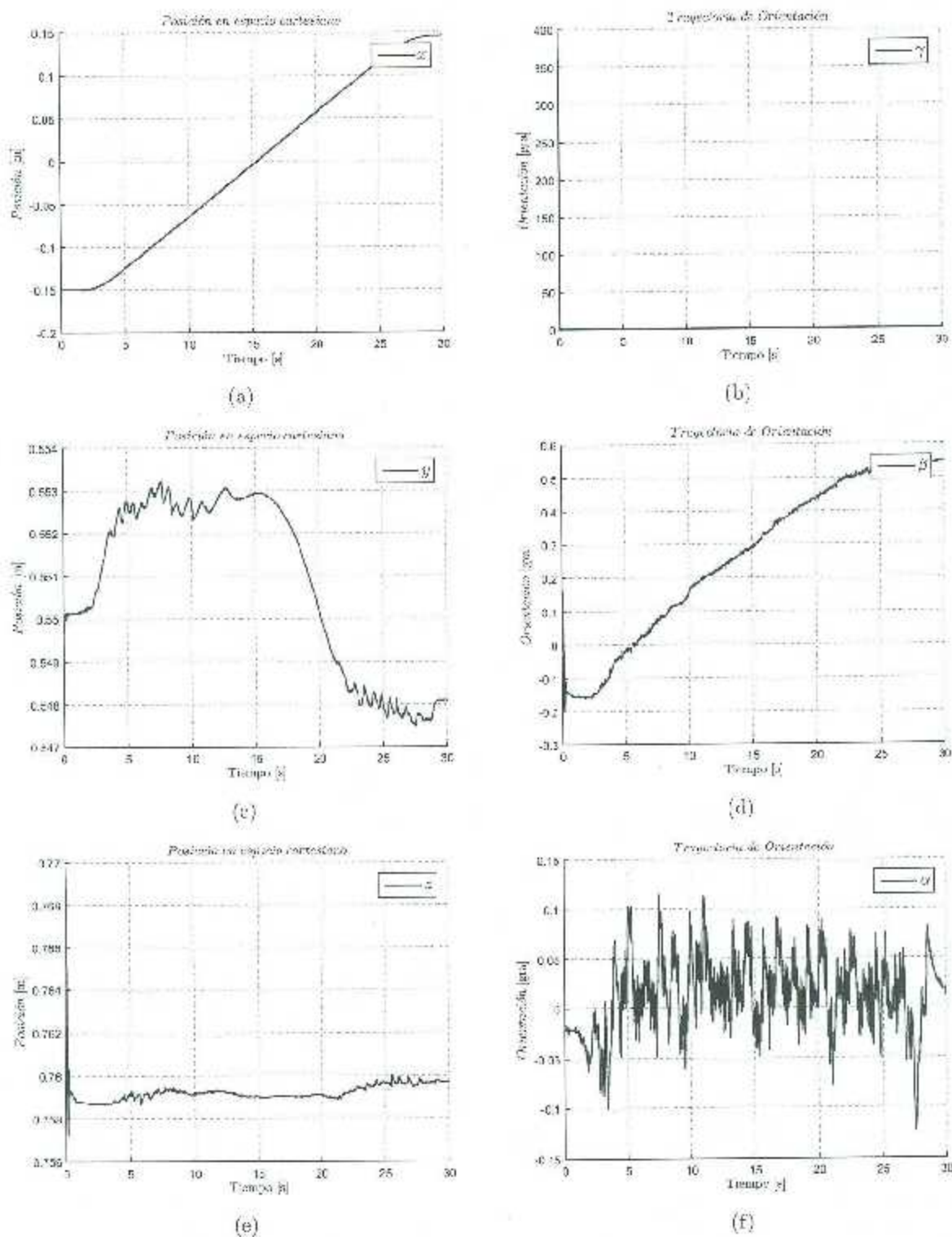
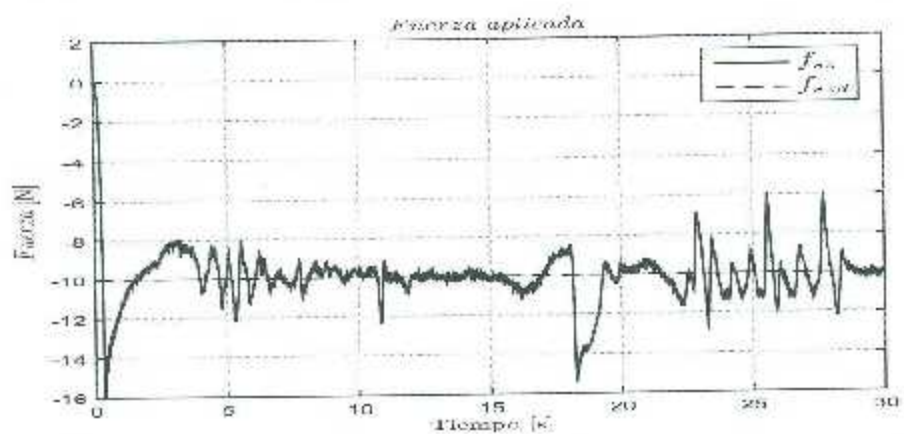
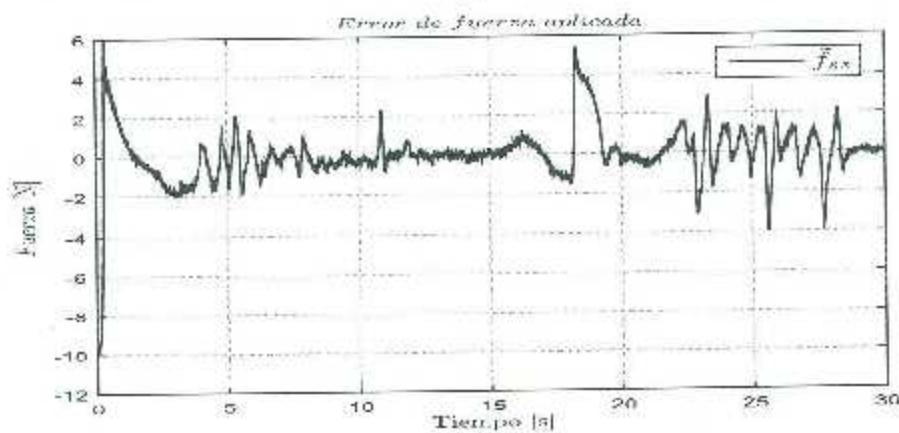


Figura 5.8: Trayectorias de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{des} = -50$ N sobre esponja.

Fuerza deseada de -10N



(a)



(b)

Figura 5.9: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{dsd} = -10$ N sobre esponja.

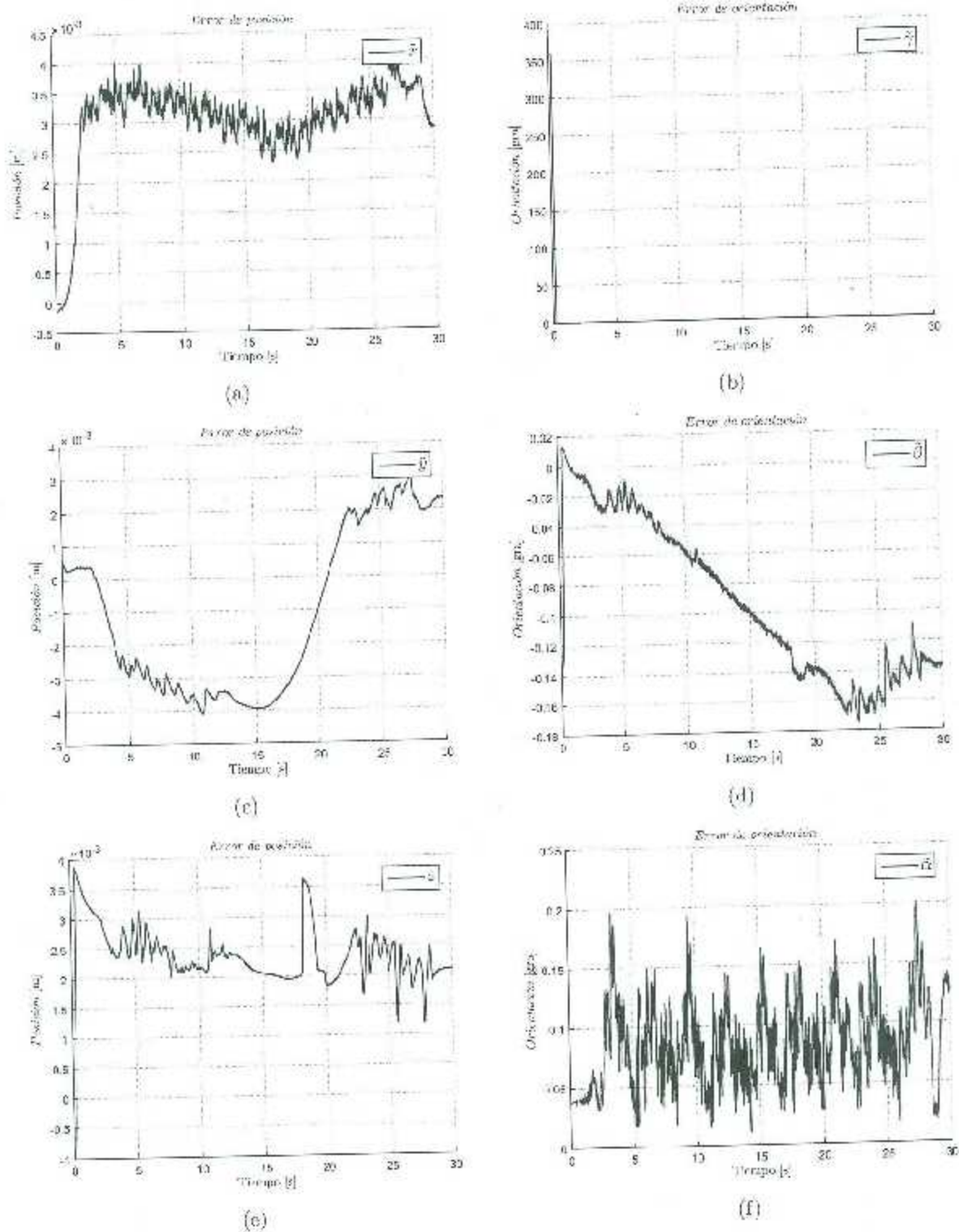
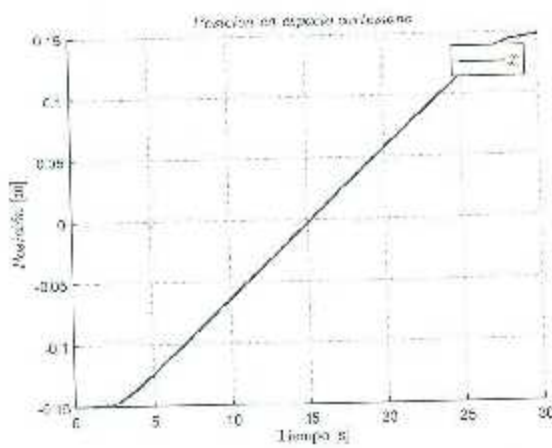
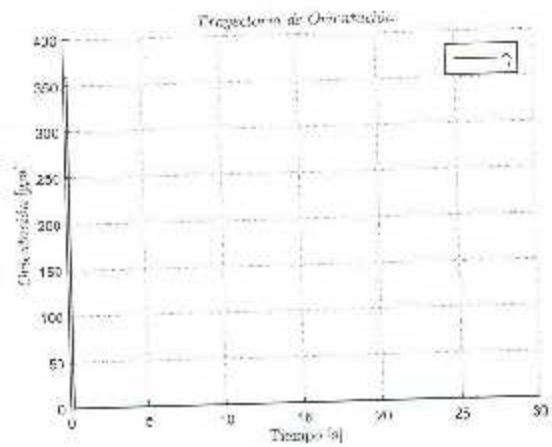


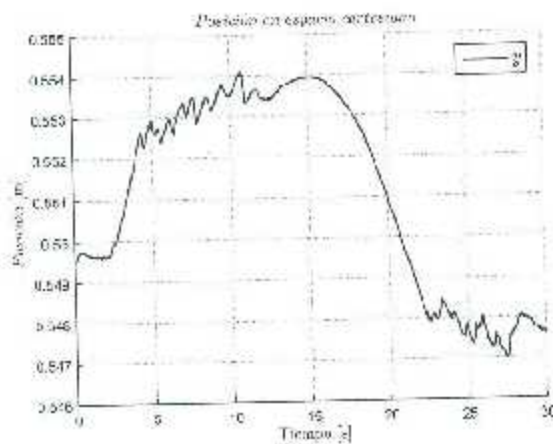
Figura 5.10: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{des} = -10$ N sobre esponja.



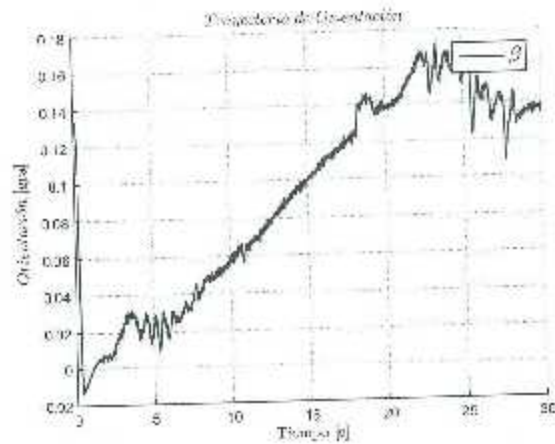
(a)



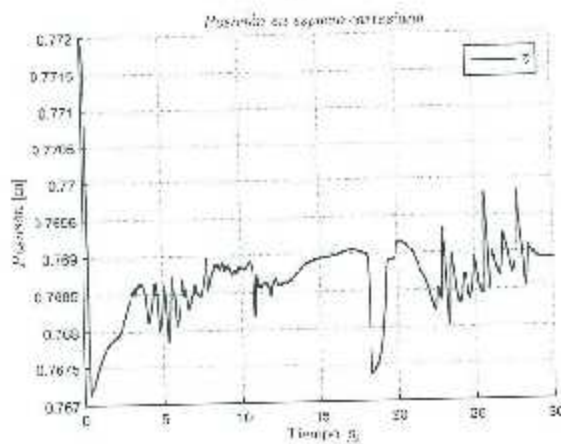
(b)



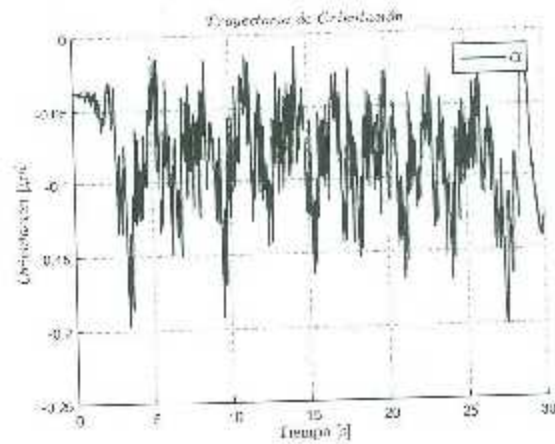
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.11: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{desd} = -10$ N sobre esponja.

5.2.2. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre nieve seca

En las siguientes figuras se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias fijas con el manipulador PA10 en interacción con una superficie de nieve seca como la de la figura 5.4 (b). En la primera parte (figuras 5.12 a 5.14) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z , f_{sz} , los errores de postura en coordenadas operacionales y los desplazamientos en coordenadas operacionales al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (figuras 5.15 a 5.17) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50 N

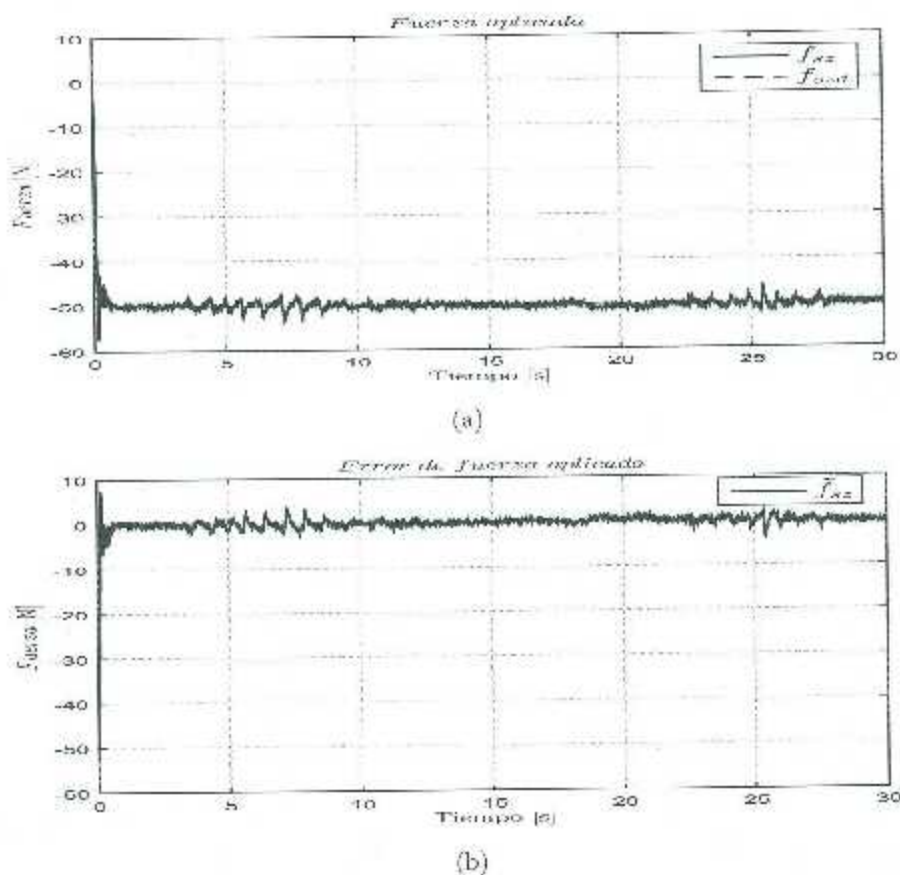


Figura 5.12: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre nieve seca.

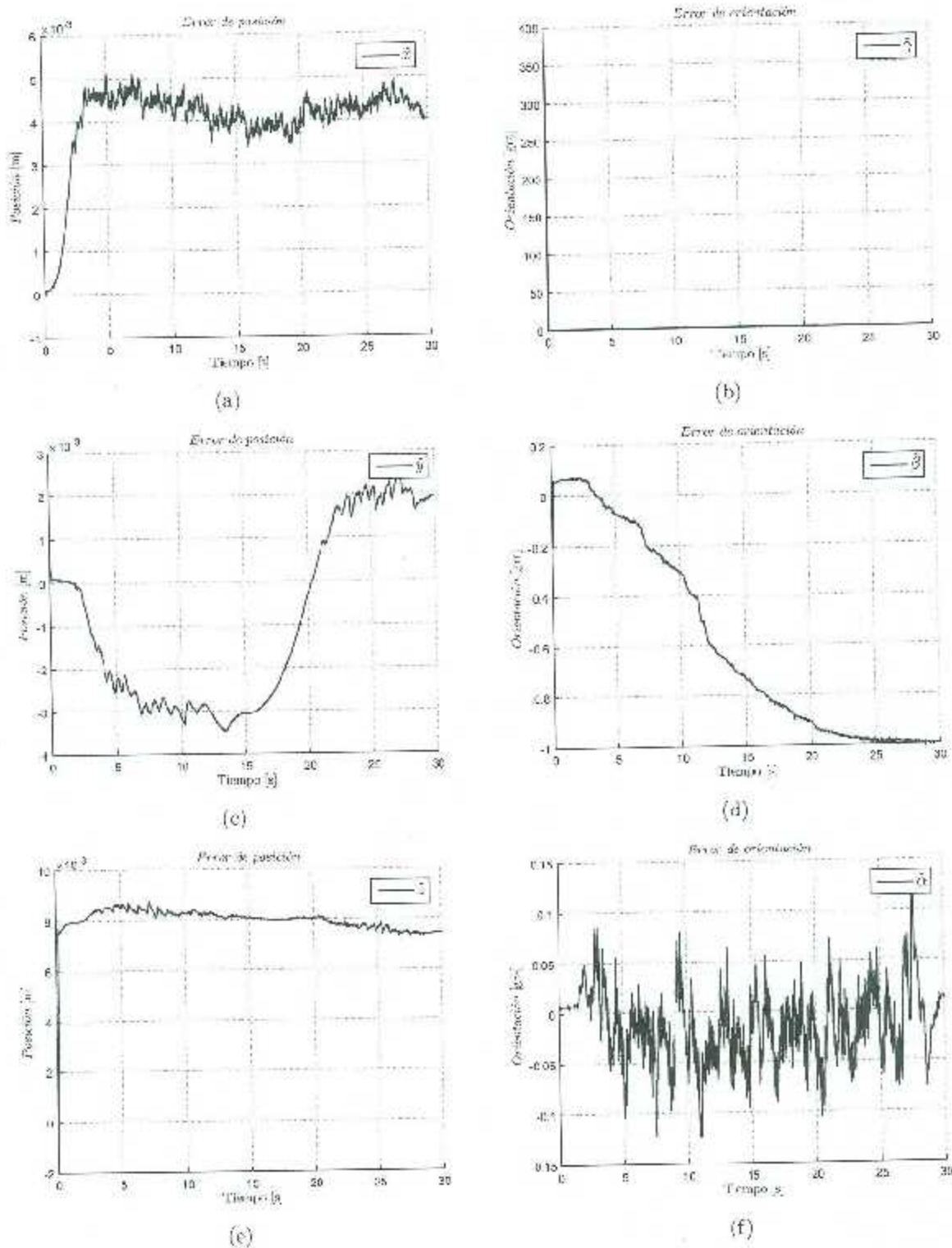


Figura 5.13: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{\text{desea}} = -50$ N sobre nieve seca.

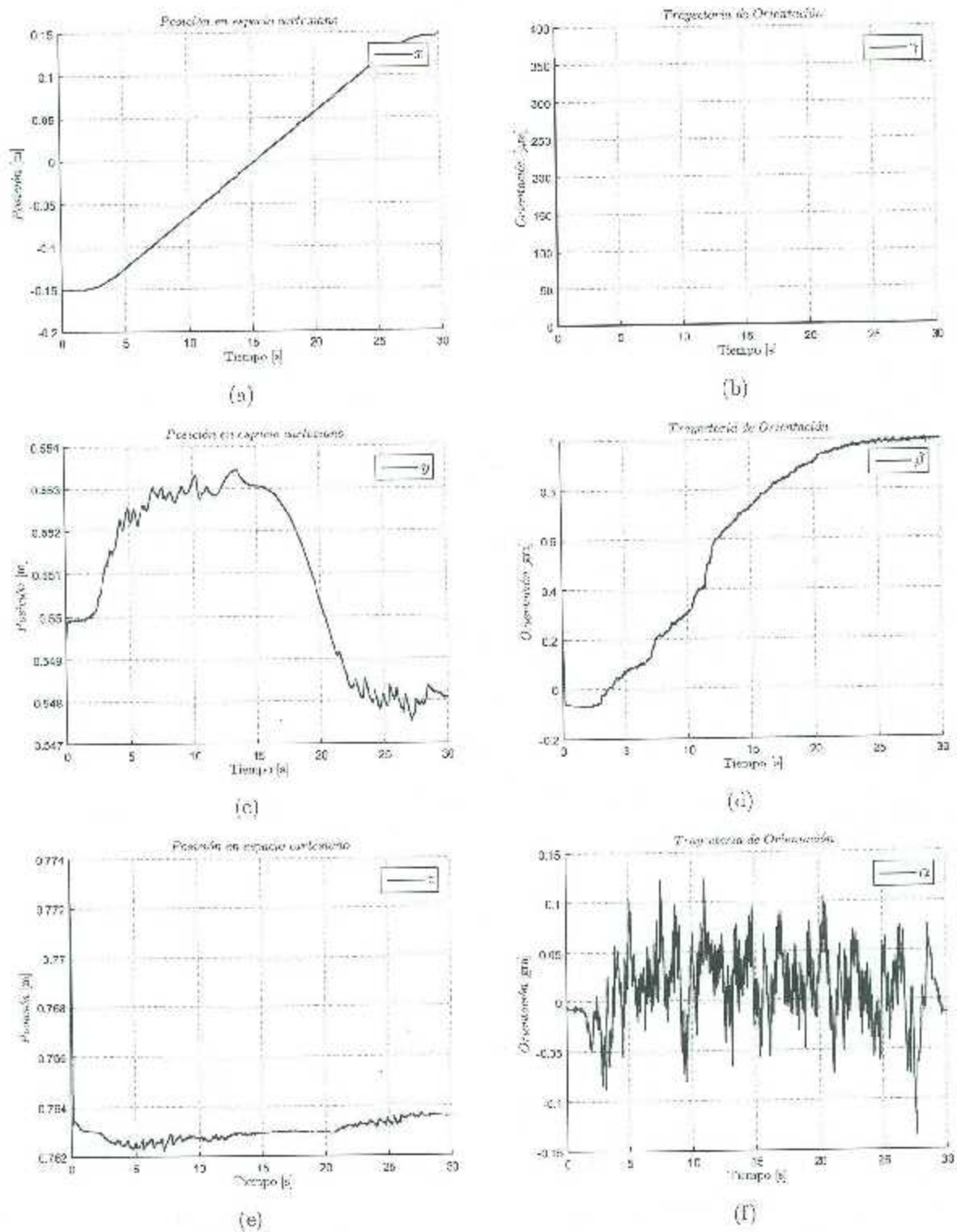


Figura 5.14: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $F_{desd} = -50$ N sobre nieve seca.

Fuerza deseada de -10N

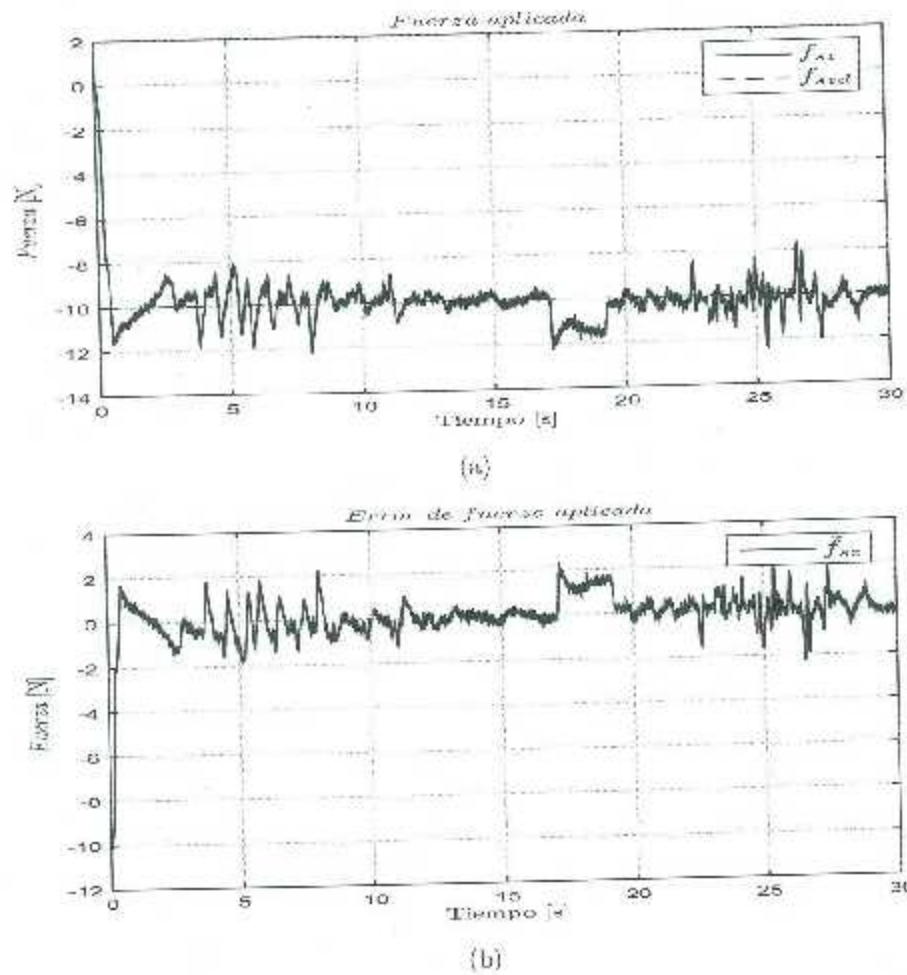


Figura 5.15: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{dtd} = -10$ N sobre nieve seca.

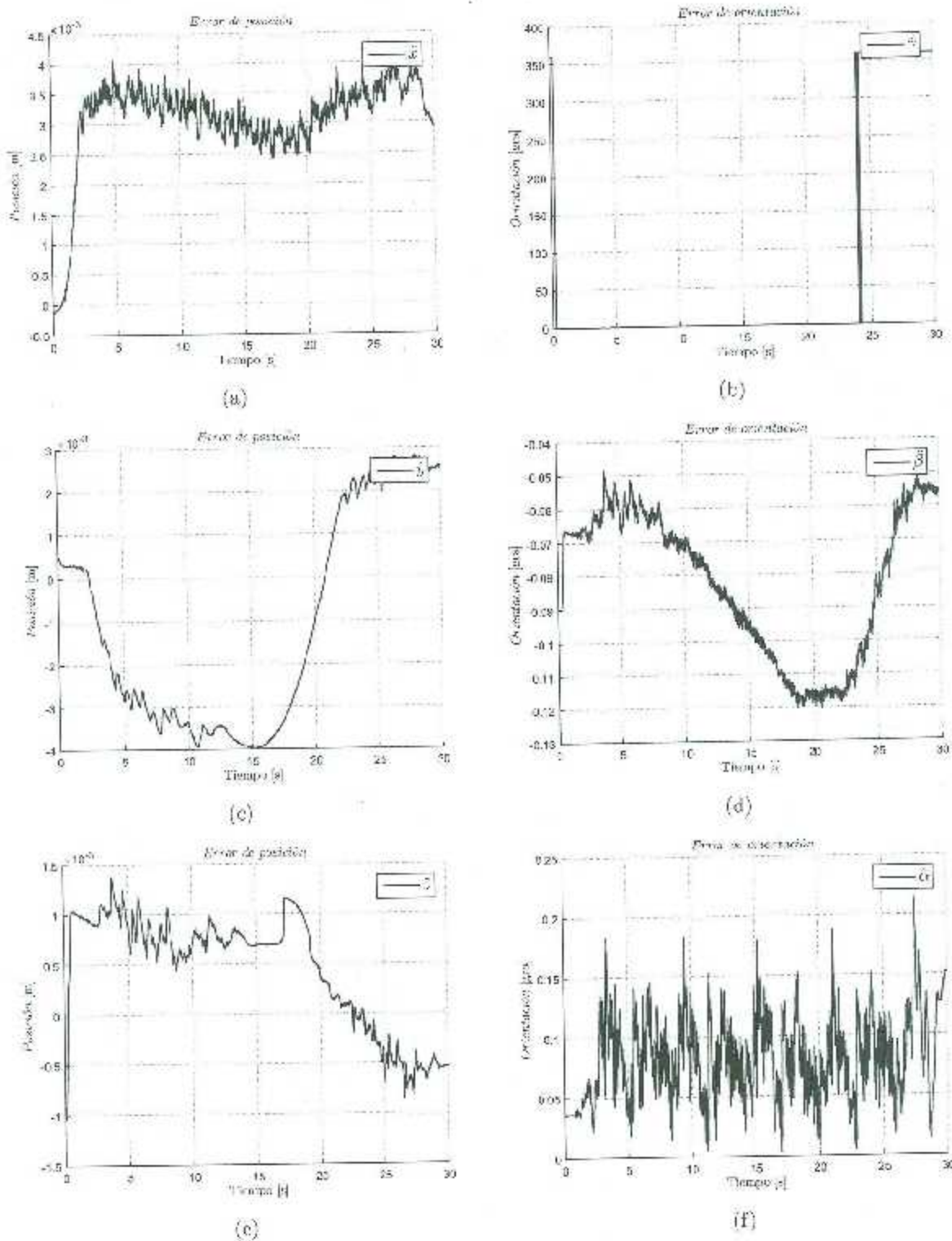


Figura 5.16: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{desd} = -10$ N sobre nieve seca.

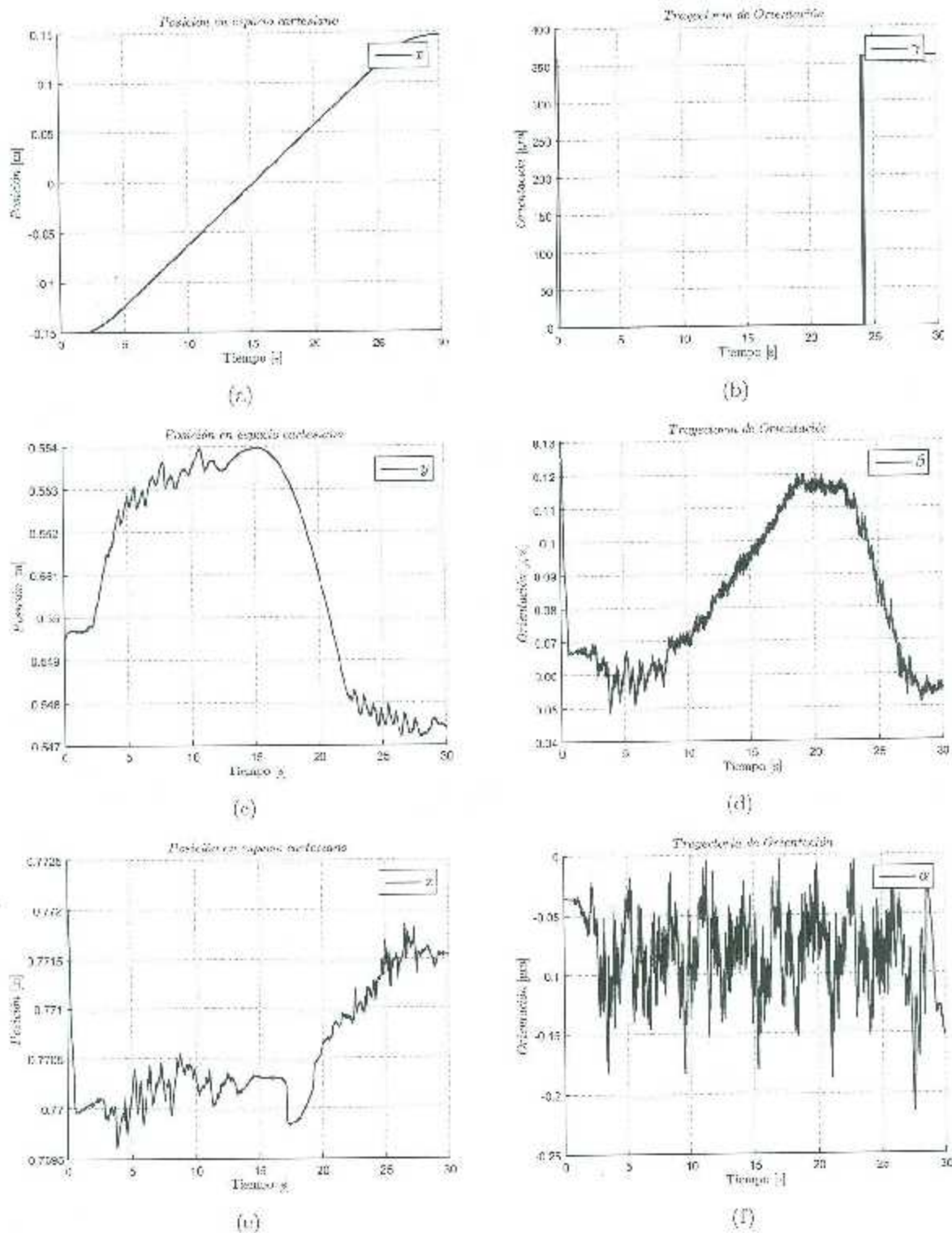


Figura 5.17: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza descada $f_{std} = -10$ N sobre nieve seca.

5.2.3. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre madera

Enseguida se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias fijas aplicado al manipulador PA10 en interacción con una superficie de madera como la de la figura 5.4 (c). En la primera parte (figuras 5.18 a 5.20) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z \tilde{f}_{sz} , los errores y desplazamientos de posición de cada variable cartesiana (x , y , z) y los errores y desplazamientos de orientación según los ángulos *RPY* (rotación de γ sobre el eje x , luego rotación de β sobre el eje y , finalmente rotación de α sobre el eje z) al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (figuras 5.21 a 5.23) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N

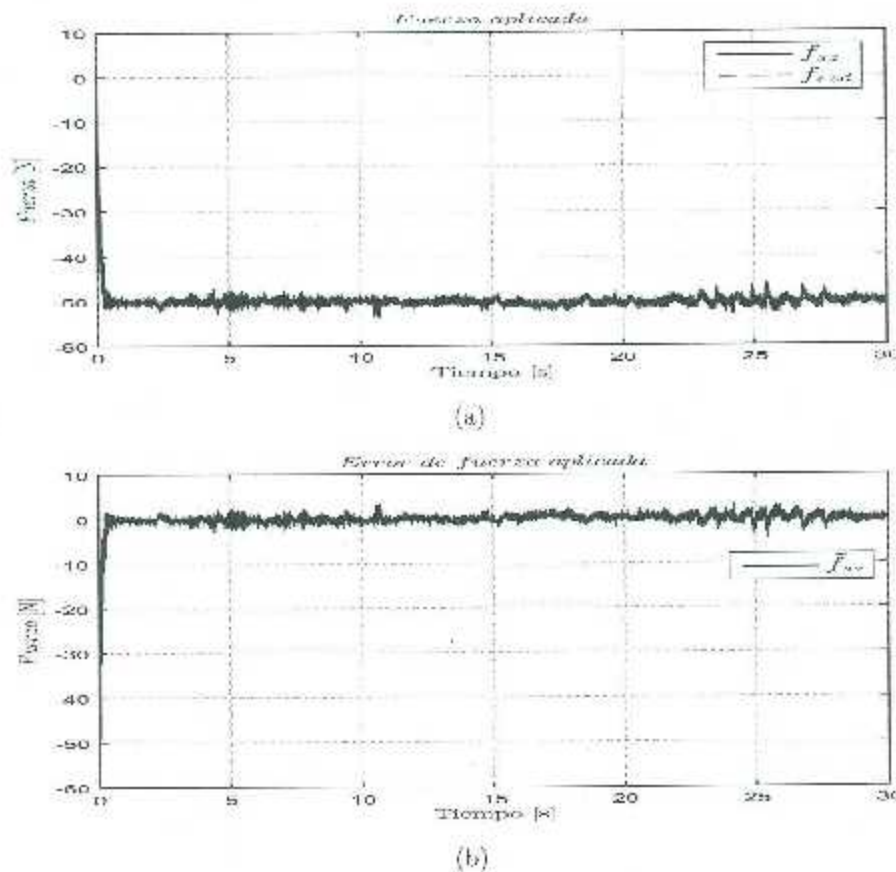


Figura 5.18: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{szd} = -50$ N sobre madera.

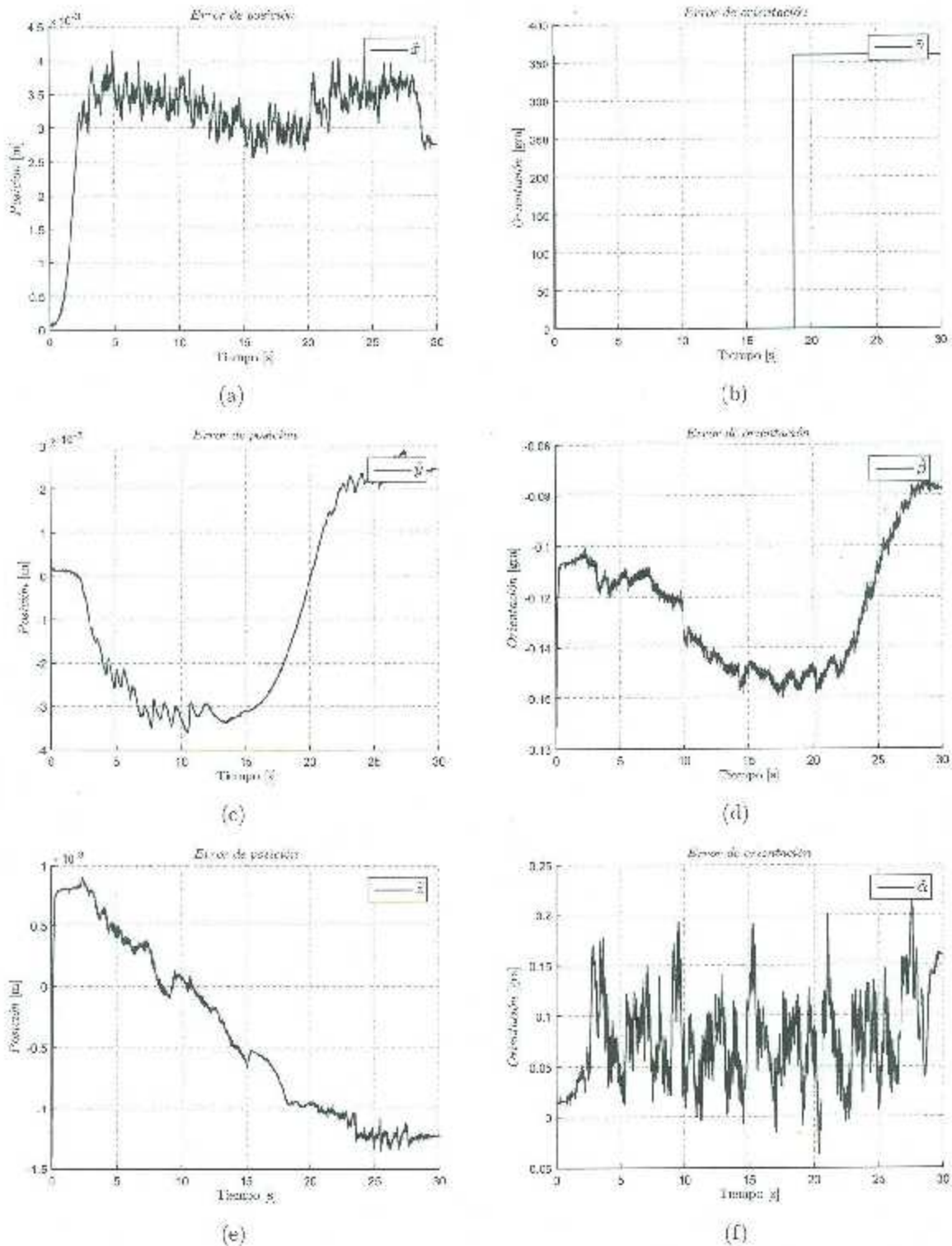


Figura 5.19: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{end} = -50$ N sobre madera.

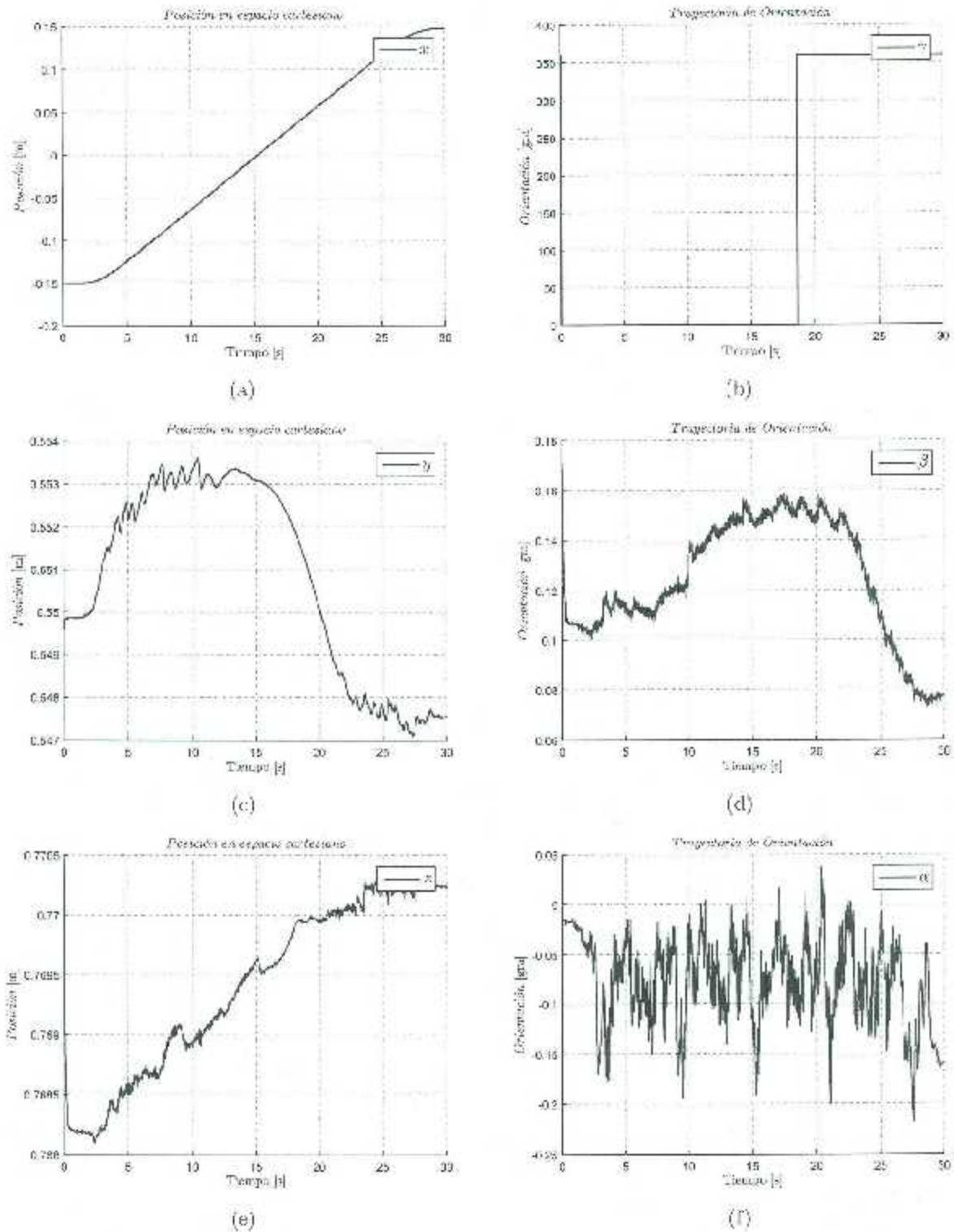
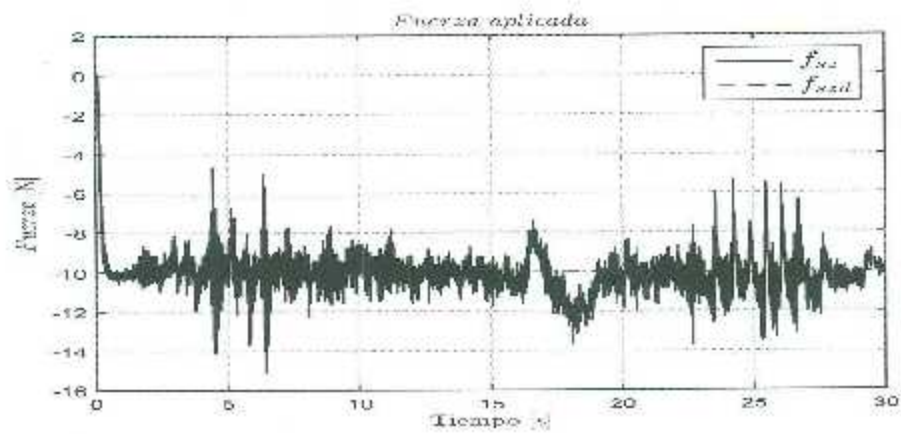
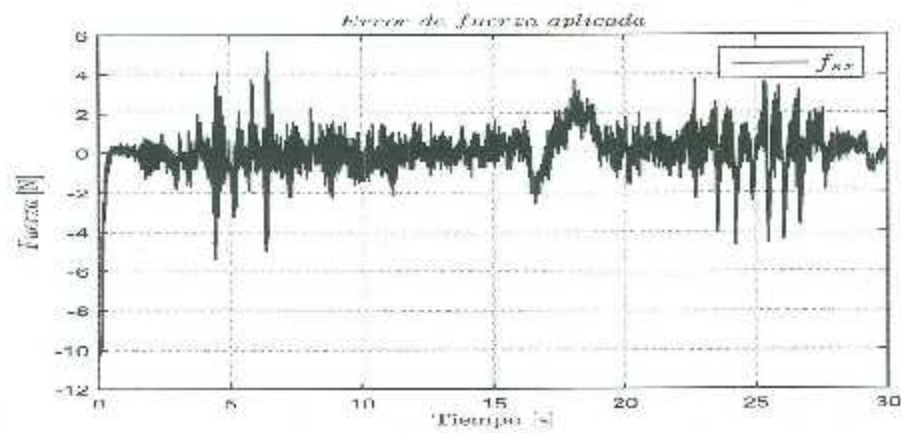


Figura 5.20: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{\text{des}} = -50$ N sobre madera.

Fuerza deseada de -10N



(a)



(b)

Figura 5.21: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{dtd} = -10$ N sobre madera.

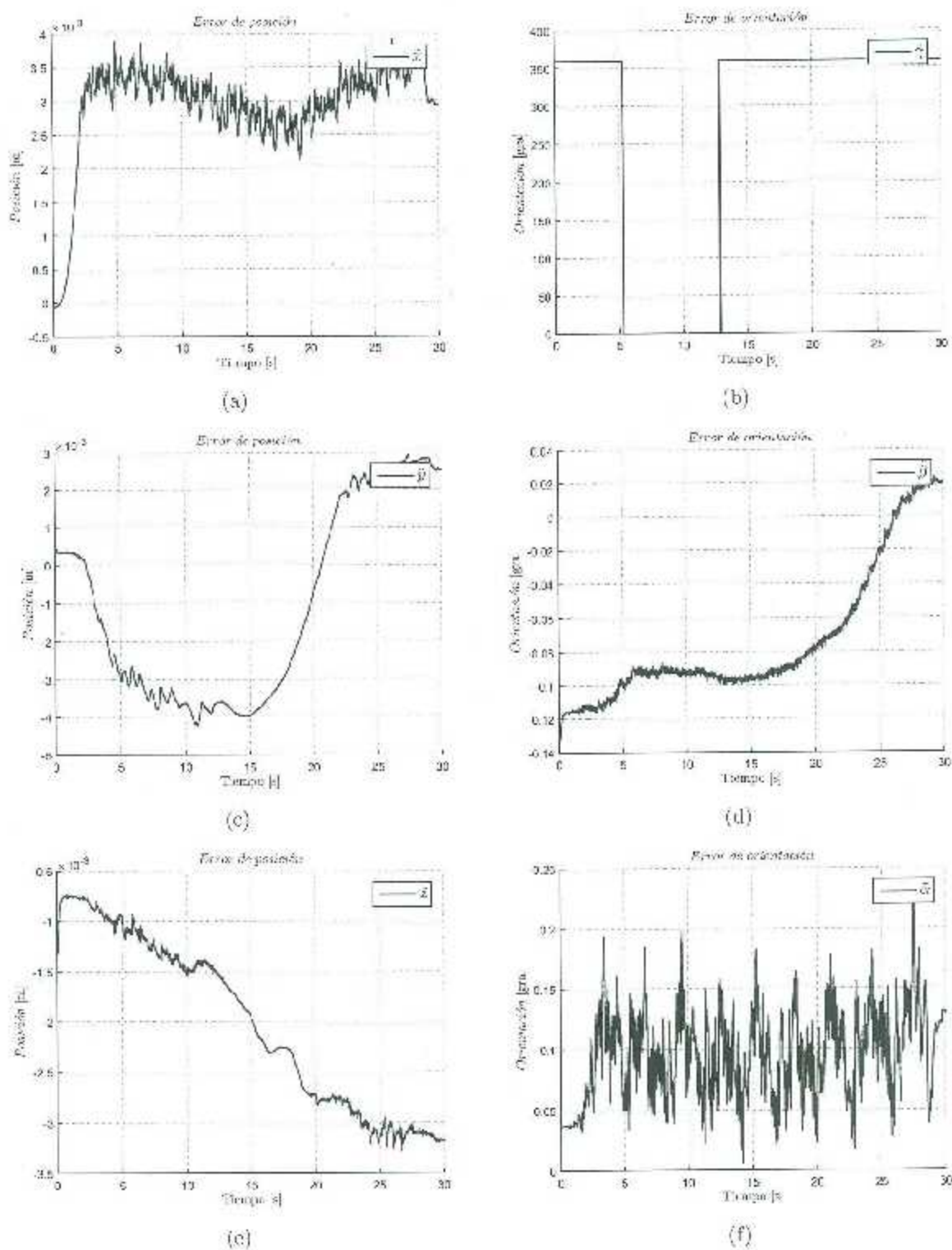


Figura 5.22: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{s,d} = -10$ N sobre madera.

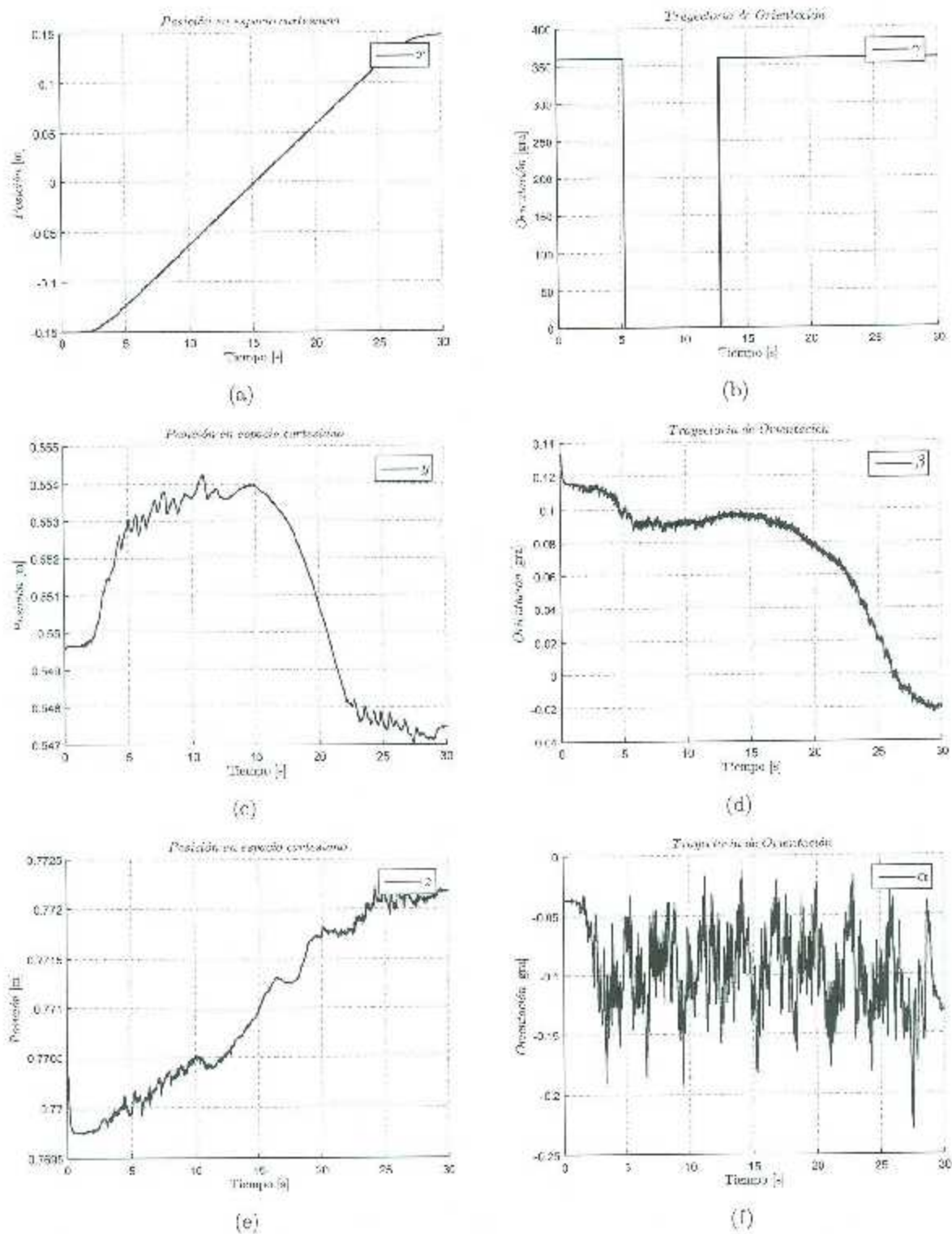


Figura 5.23: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{zcd} = -10$ N sobre madera.

5.2.4. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre vidrio

En este apartado se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias fijas aplicado al manipulador PA10 en interacción con una superficie de vidrio como la de la figura 5.4 (d). En la primera parte (figuras 5.24 a 5.26) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z f_{sz} , los errores de postura en coordenadas operacionales y los desplazamientos en coordenadas operacionales al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (figuras 5.27 a 5.29) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N

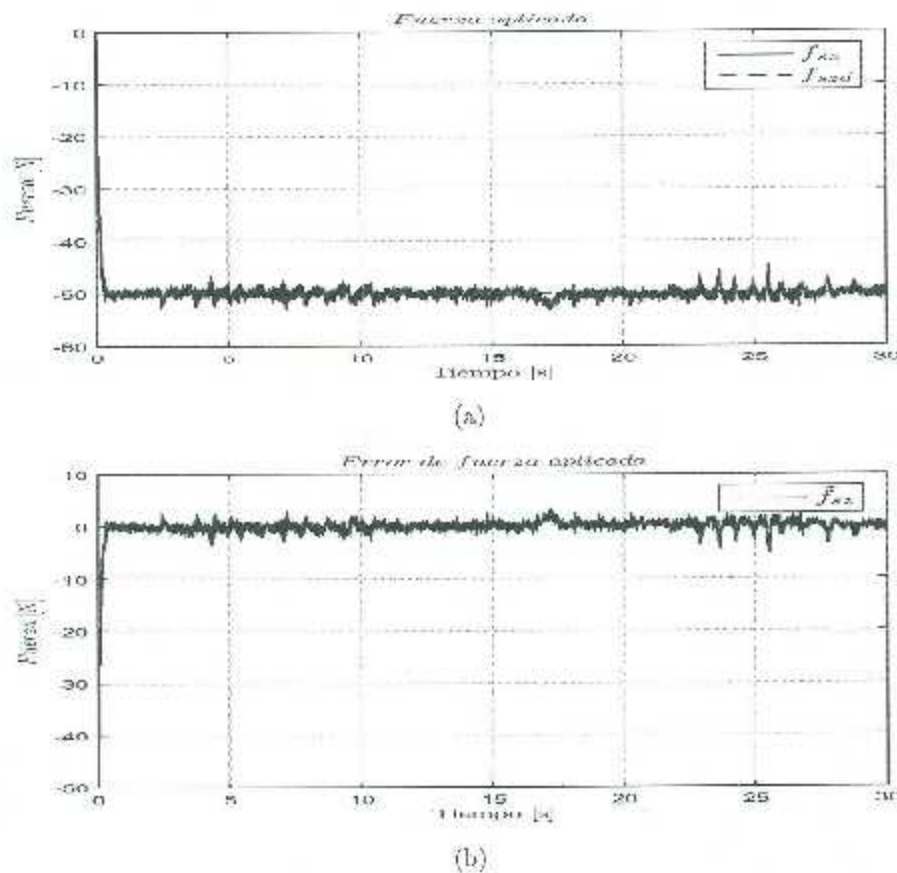


Figura 5.24: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{sd} = -50$ N sobre vidrio.

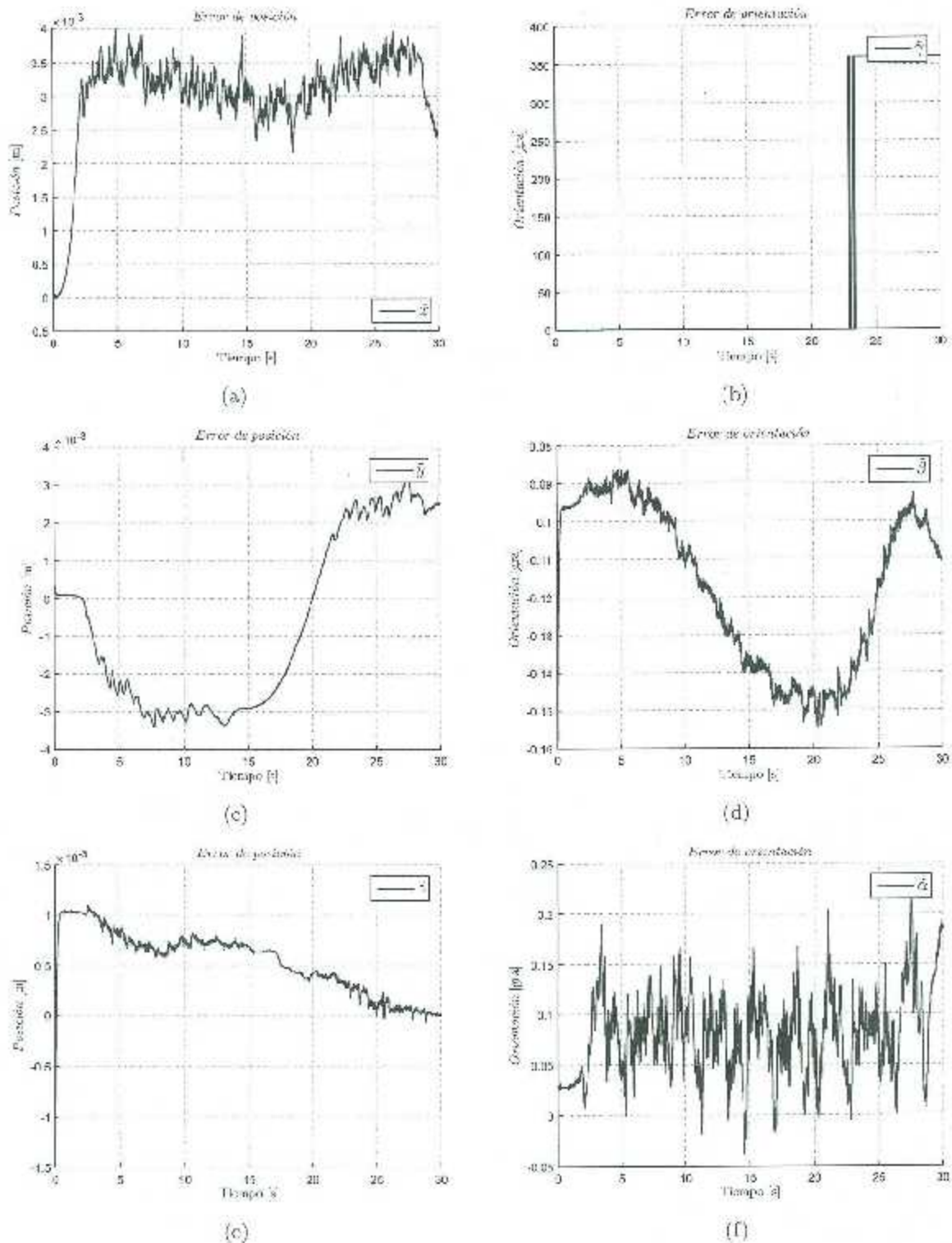


Figura 5.25: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{\text{dtd}} = -50$ N sobre vidrio.

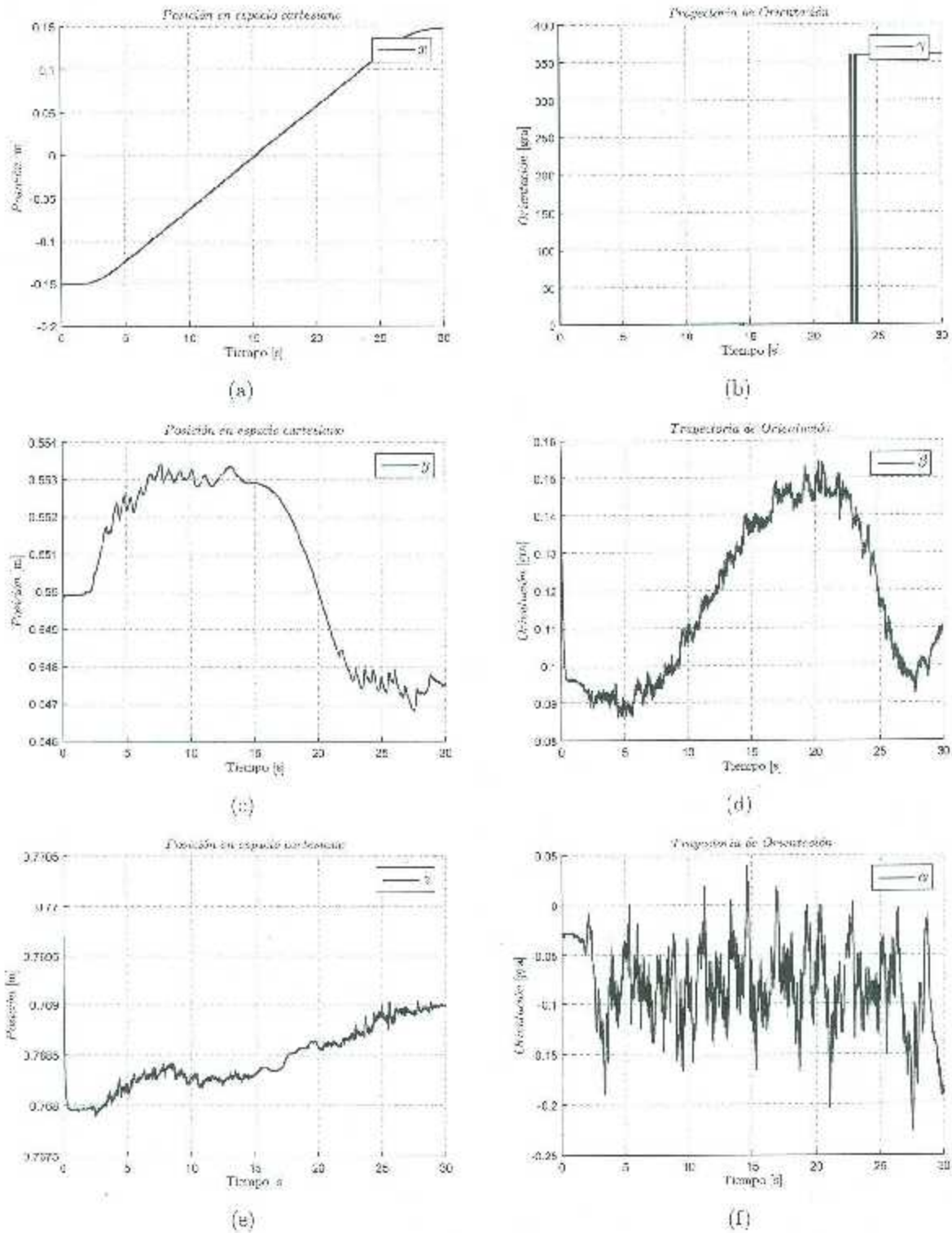
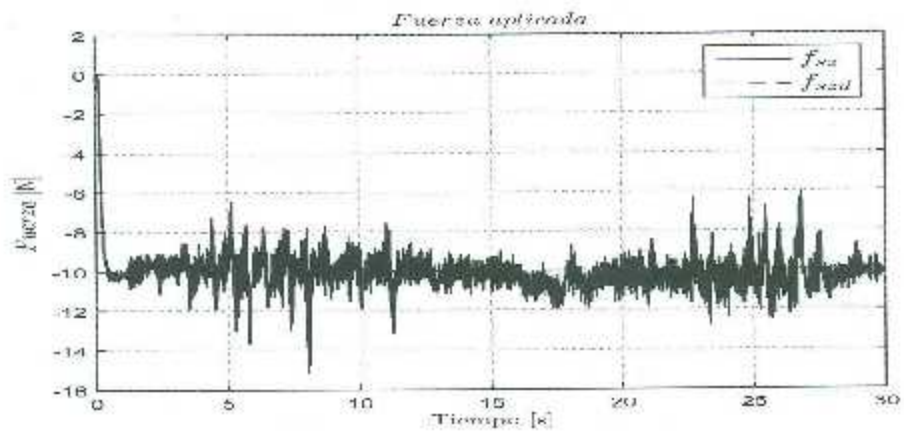
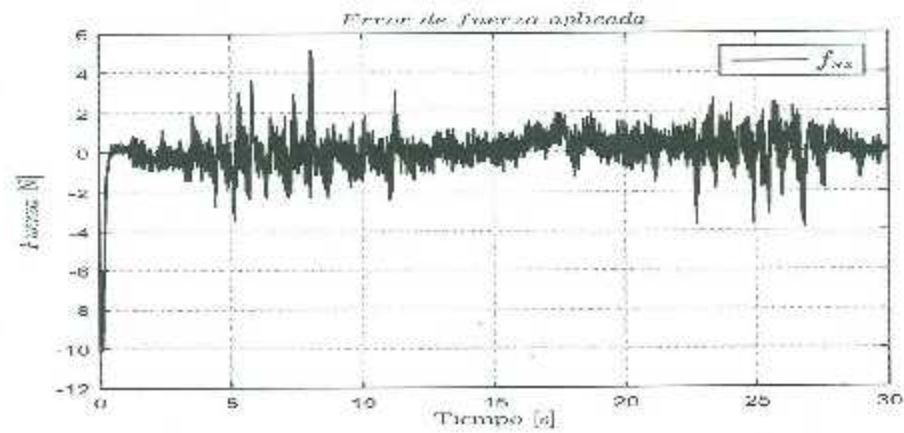


Figura 5.26: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{\text{des}} = -50$ N sobre vidrio.

Fuerza deseada de -10N



(a)



(b)

Figura 5.27: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{dad} = -10$ N sobre vidrio.

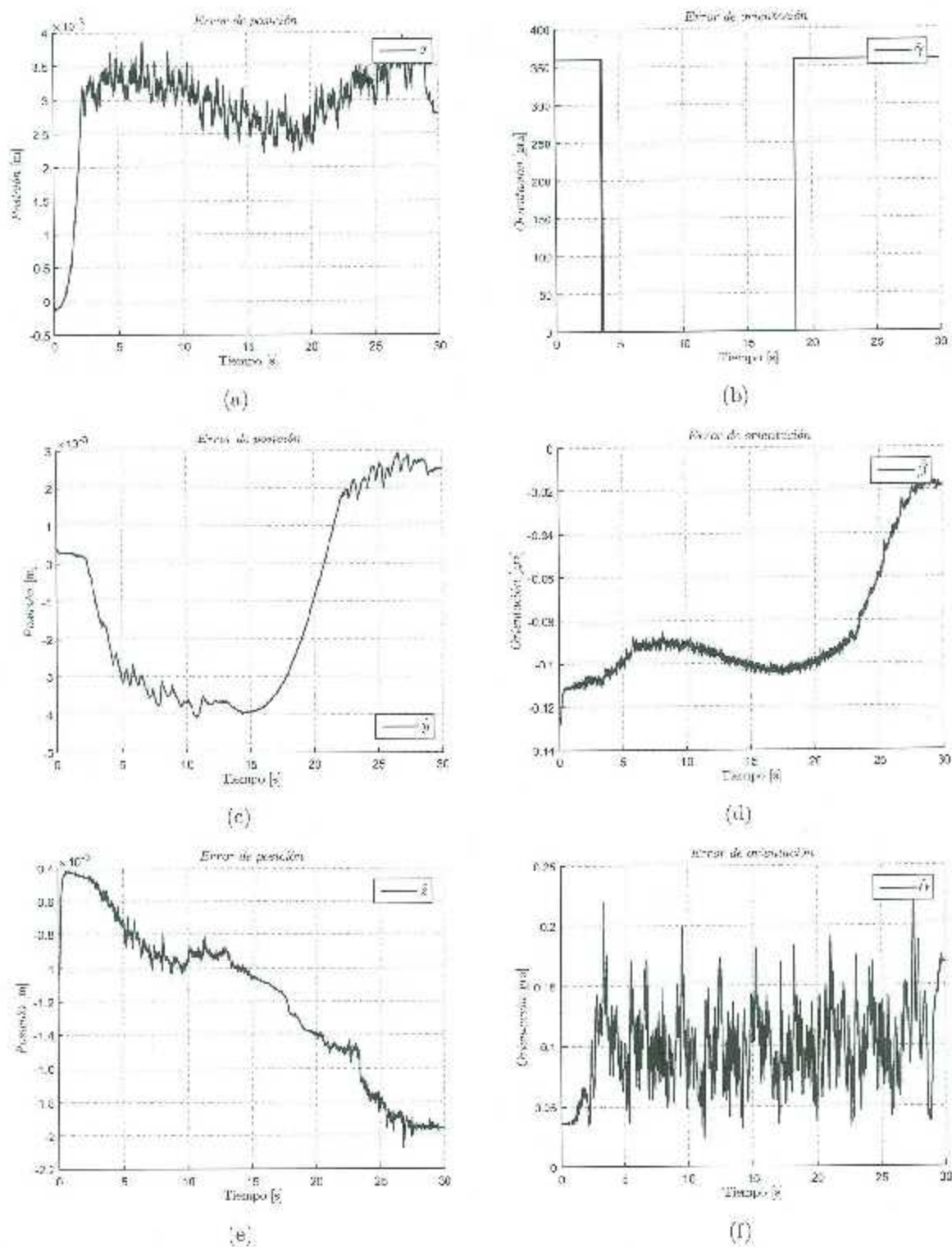


Figura 5.28: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{x \rightarrow d} = -10$ N sobre vidrio.

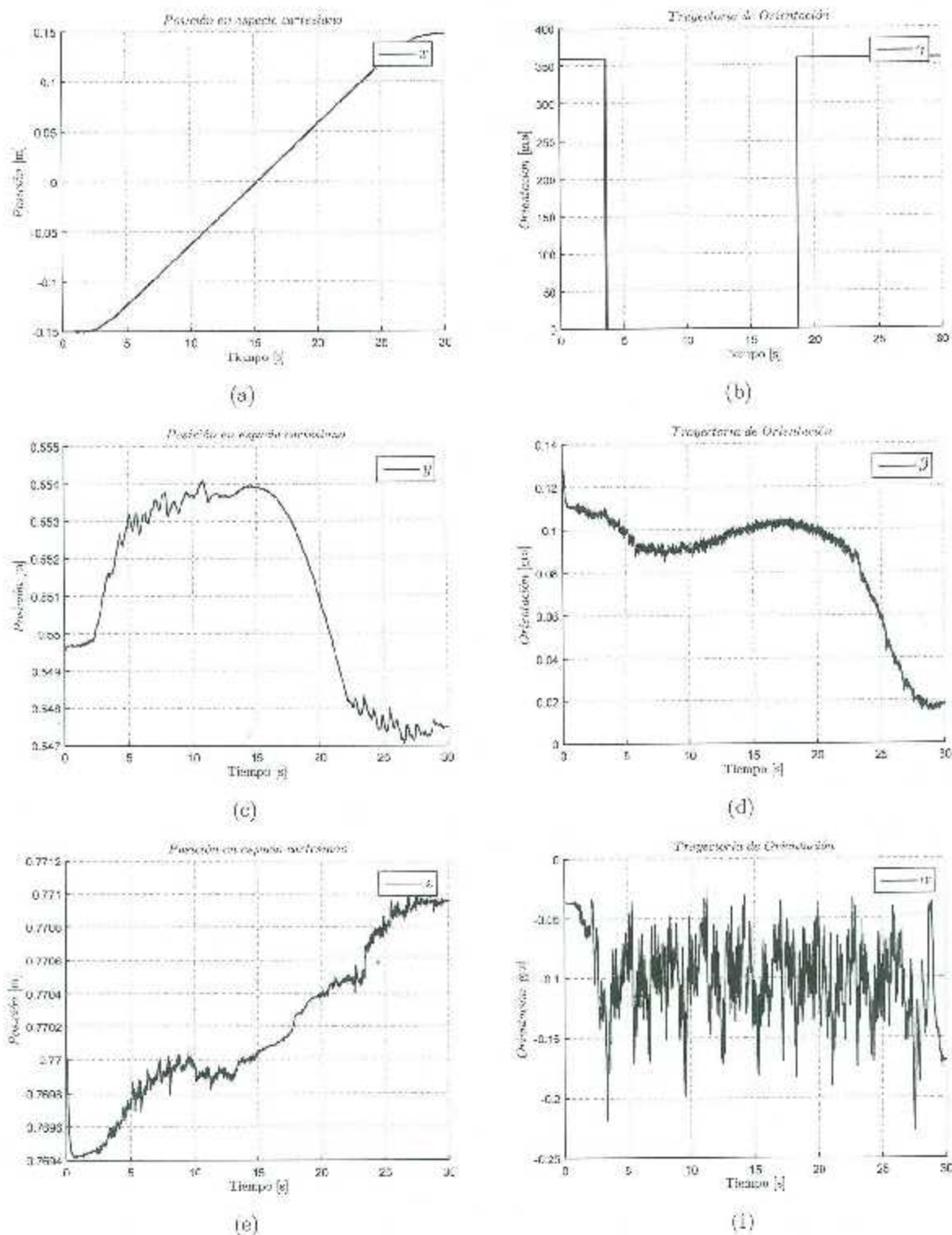


Figura 5.29: Desplazamientos de cula variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias fijas para una fuerza deseada $f_{desea} = -10$ N sobre vidrio.

5.3. Control híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas

Este controlador, expresado por las ecuaciones (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) y (4.1) se probó bajo las mismas condiciones descritas para el controlador con ganancias fijas. Las matrices de selección son las mismas que en (5.2) y (5.3). Los valores de la matriz diagonal de ganancias para el lazo de control de posición también están dados por la tabla 5.2, la diferencia radica en que se aplica un sistema difuso para ajustar la ganancia K_{pf} de control del lazo de fuerza.

Para aproximar la ganancia a través del sistema difuso $K_{pf}(x)$, éste recibe una entrada $x_1 = |\dot{f}_{s2}|$ con un universo de discurso particionado en $N_1 = 3$ conjuntos difusos: $A_1^1 = EFP$ (*Error Fuerza Pequeño*), $A_1^2 = EFM$ (*Error Fuerza Mediano*), $A_1^3 = EFG$ (*Error Fuerza Grande*), se emplea una función gaussiana, una de tipo sigmoidal derecha y una de tipo sigmoidal izquierda, como se muestra en la figura 5.30

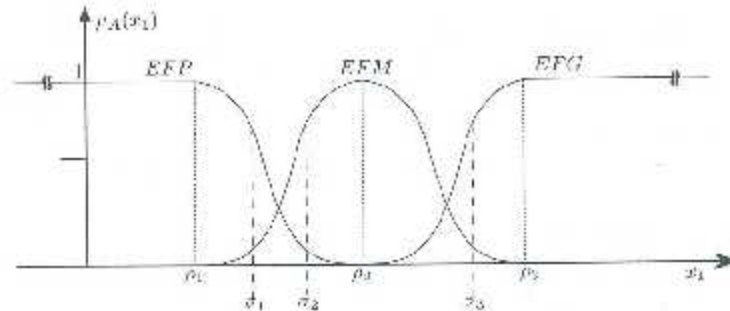


Figura 5.30: Funciones de pertenencia de entrada.

Las particiones de los universos de discurso, utilizando la notación $\rho_{A_1} = \{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$, fueron seleccionadas como

$$\rho_{|\dot{f}_{s2}|} = \{0.5, 2, 4\}[\text{N}]$$

y las desviaciones estándar como

$$\sigma_{|\dot{f}_{s2}|} = \{-6, 0.5, 3\}[\text{N}]$$

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema difuso consta de funciones impulsivas para la salida. El universo de discurso de salida también es particionado en 3 funciones impulsivas: K_{pf} (*Ganancia K_{pf} Pequeña*), K_{pm} (*Ganancia K_{pf} Mediana*) y K_{pg} (*Ganancia K_{pf} Grande*), como en la figura 5.31, donde cada parámetro θ corresponde a la posición de las funciones impulso. Tomando la notación $\theta_{K_{pf}} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ las particiones del universo de discurso de salida fueron seleccionadas como

$$\theta_{K_{pf}} = \{0.1, 0.15, 0.2\}$$

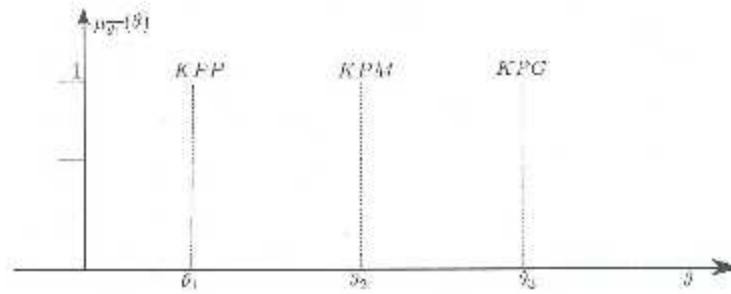


Figura 5.31: Funciones de pertenencia de salida

Como sólo se tiene una entrada con 3 funciones de pertenencia, entonces sólo se tiene $N_1 = 3$, i.e., se tienen 3 reglas difusas descritas por las expresiones

SI $|\tilde{f}_{sz}|$ es *EFP* ENTONCES $K_{\theta f}(x)$ es *KPG*

SI $|\tilde{f}_{sz}|$ es *EPM* ENTONCES $K_{\theta f}(x)$ es *KPM*

SI $|\tilde{f}_{sz}|$ es *EPG* ENTONCES $K_{\theta f}(x)$ es *KPP*

Los valores asignados a las dos ganancias restantes del lazo de control se muestran en la Tabla 5.4.

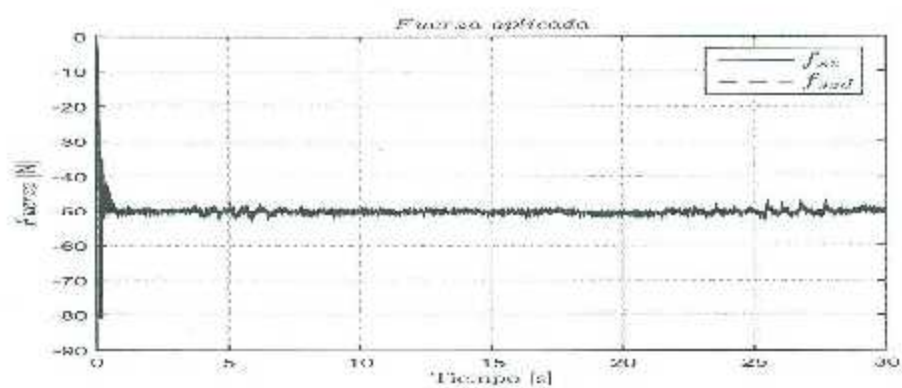
Tabla 5.4: Parámetros fijos de la parte de control de fuerza τ_f en el controlador híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas.

	K_{vf} [1/rad]	K_{if}
Valor	0.1	3

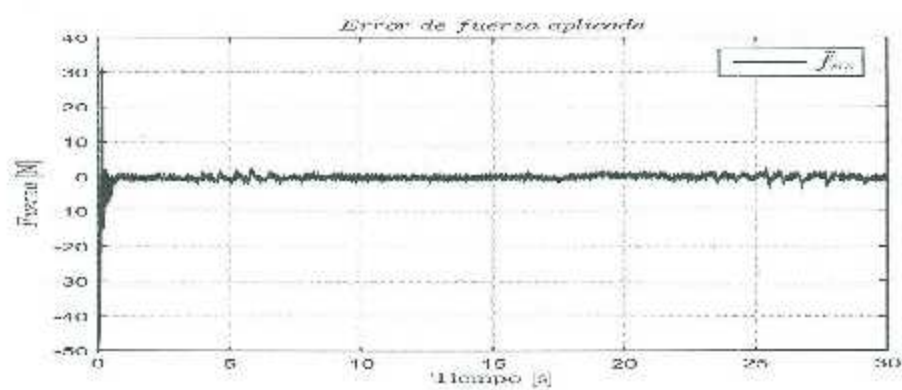
5.3.1. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre una esponja

Los experimentos en el robot PA10 con el controlador híbrido con ganancias difusas se realizaron sobre diferentes materiales y con dos diferentes referencias de fuerza deseada. En esta subsección se muestran los resultados de las diferentes variables de interés al aplicar el controlador sobre el manipulador PA10 en interacción con una superficie de esponja como la de la figura 5.4 (a). En la primera parte (figuras 5.32 a 5.34) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z \tilde{f}_{sz} , los errores y desplazamientos de posición de cada variable cartesiana (x , y , z) y los errores y desplazamientos de orientación según los ángulos *RPY* (rotación de γ sobre el eje x , luego rotación de β sobre el eje y , finalmente rotación de α sobre el eje z) al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte 5.35 a 5.37) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N



(a)



(b)

Figura 5.32: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dsd} = -50$ N sobre esponja.

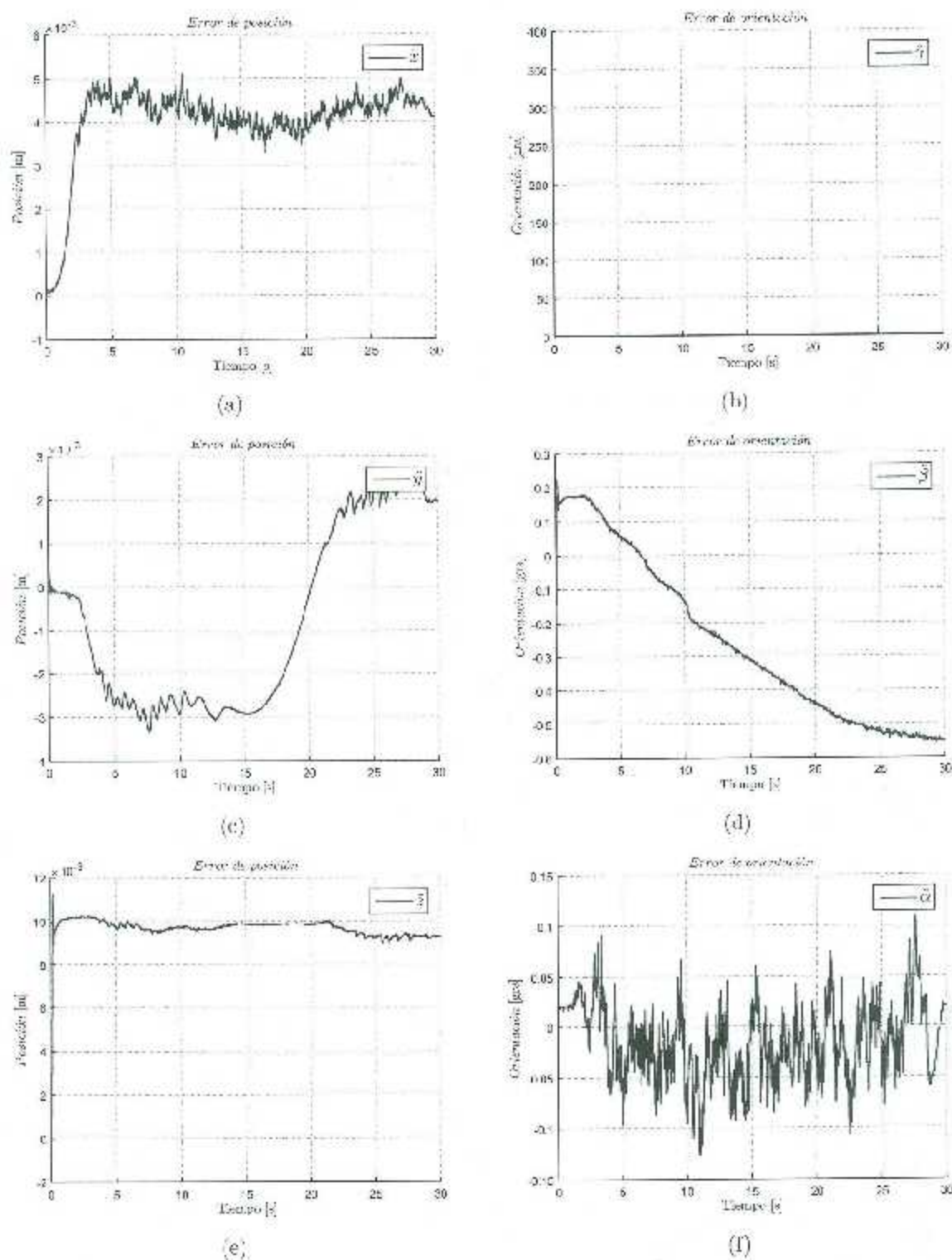


Figura 5.33. Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{sca} = -50$ N sobre esponja.

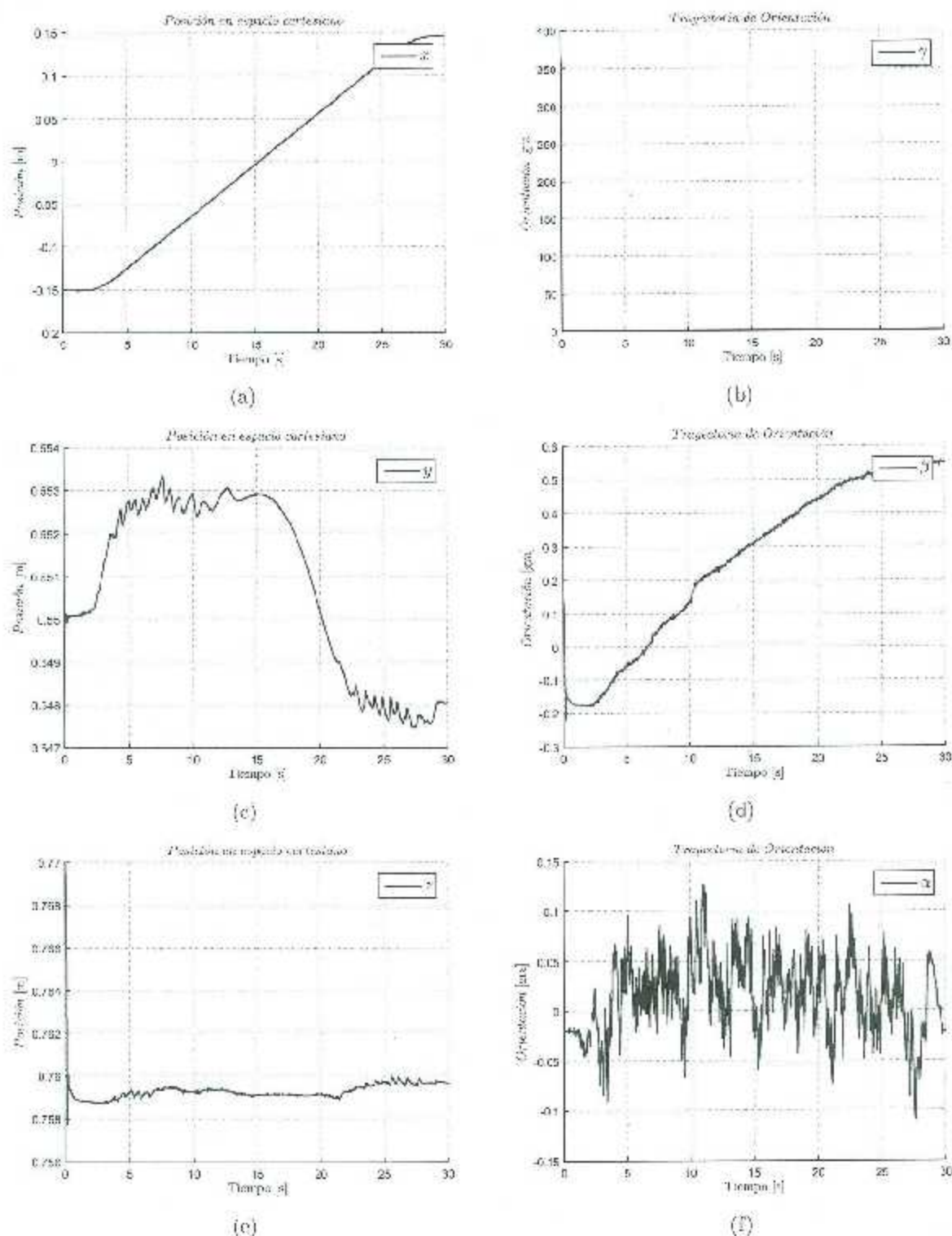


Figura 5.34: Desplazamientos de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{\text{deseada}} = -50$ N sobre esponja.

Fuerza deseada de -10N

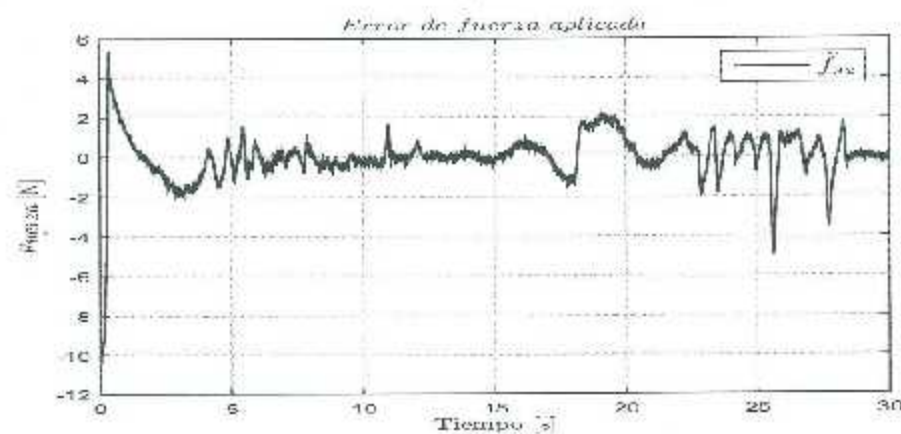
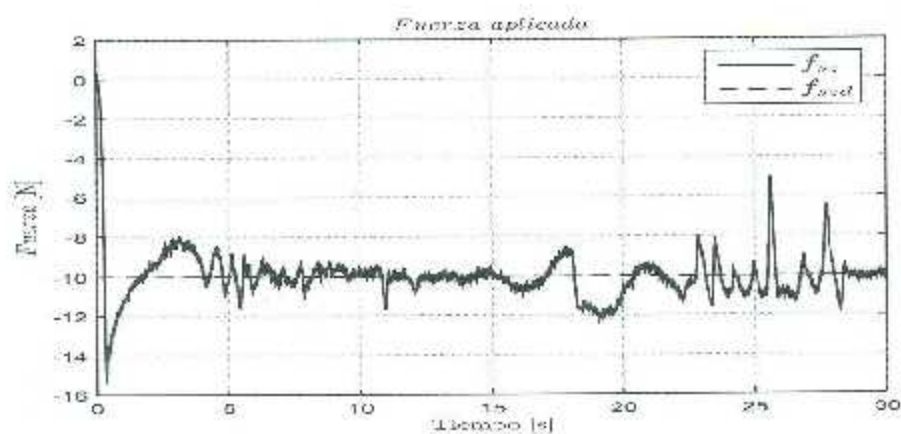


Figura 5.35: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dsd} = -10$ N sobre esponja.

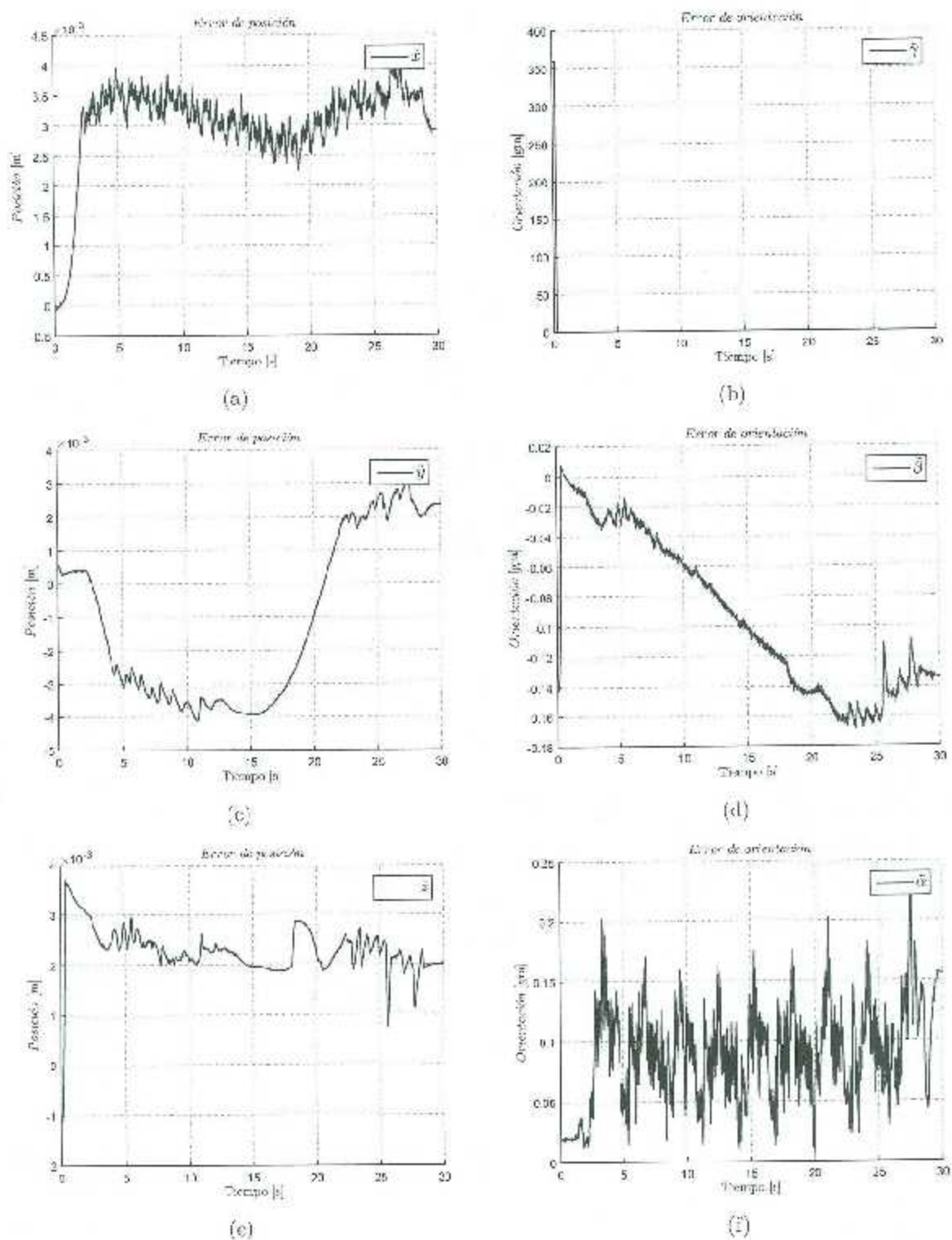


Figura 5.36: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre esponja.

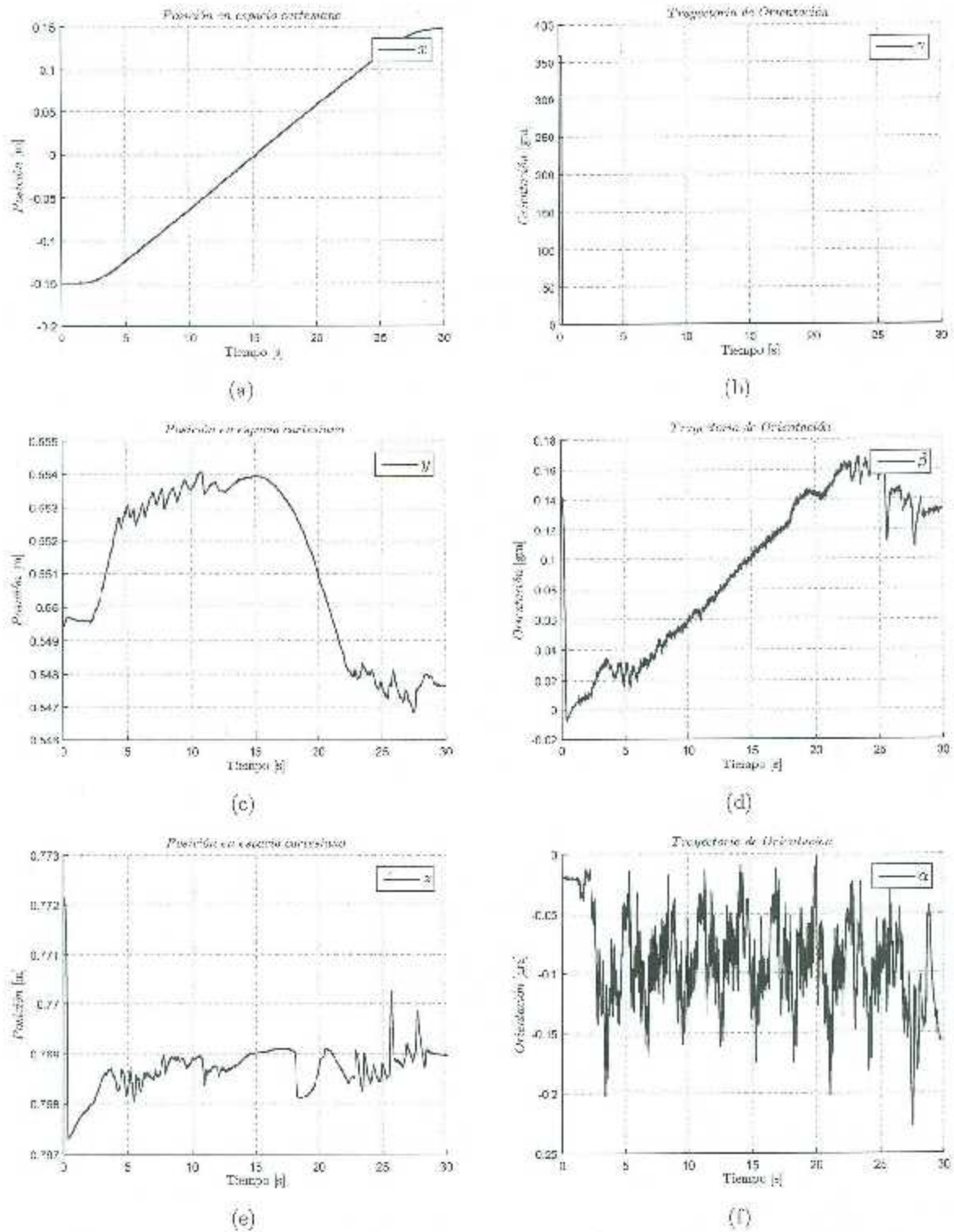


Figura 5.37: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza descada $F_{esd} = -10$ N sobre esponja.

5.3.2. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre nieve seca.

Enseguida se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias difusas aplicado al manipulador PA10 en interacción con una superficie de nieve seca como la de la figura 5.4(b). En la primera parte (5.38 a 5.40) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z f_{ez} , los errores de postura en coordenadas operacionales y los desplazamientos en coordenadas operacionales al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (5.41 a 5.43) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N

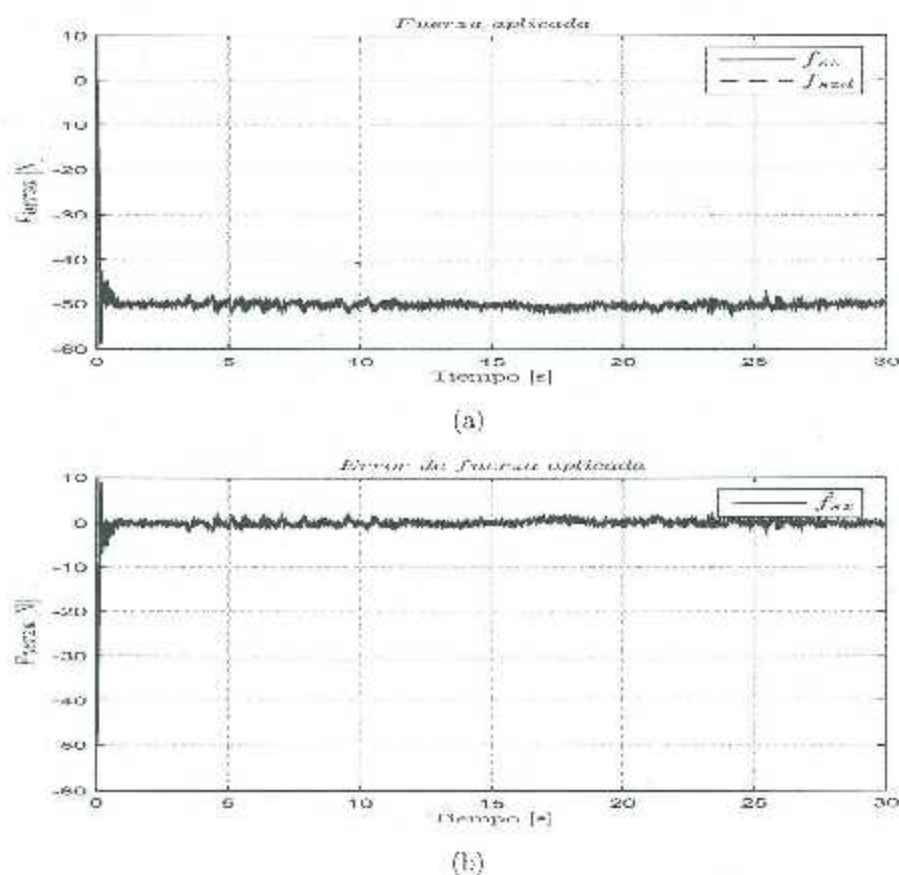


Figura 5.38: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{sd} = -50$ N sobre nieve seca.

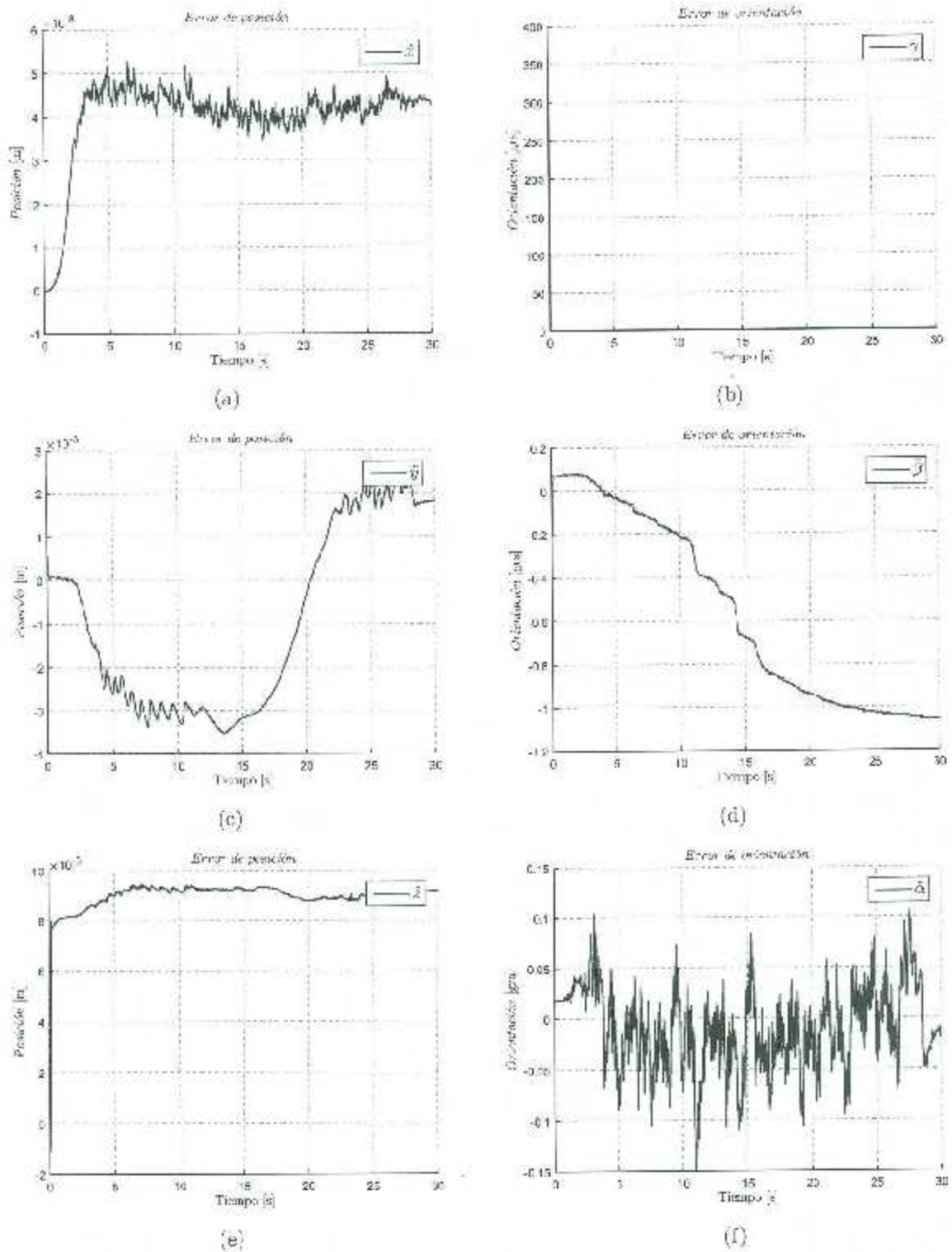


Figura 5.39: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{desd} = -50$ N sobre nieve seca.

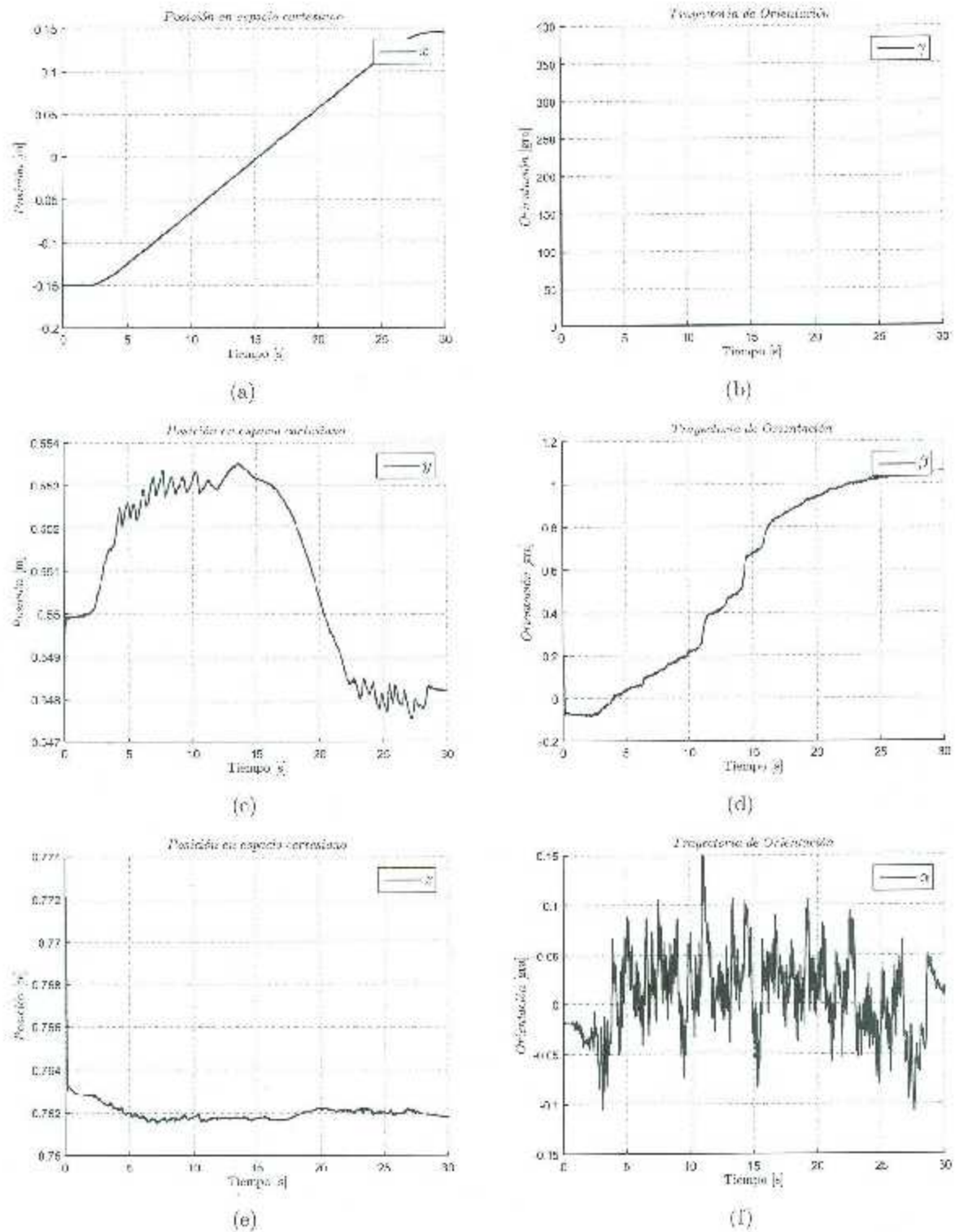
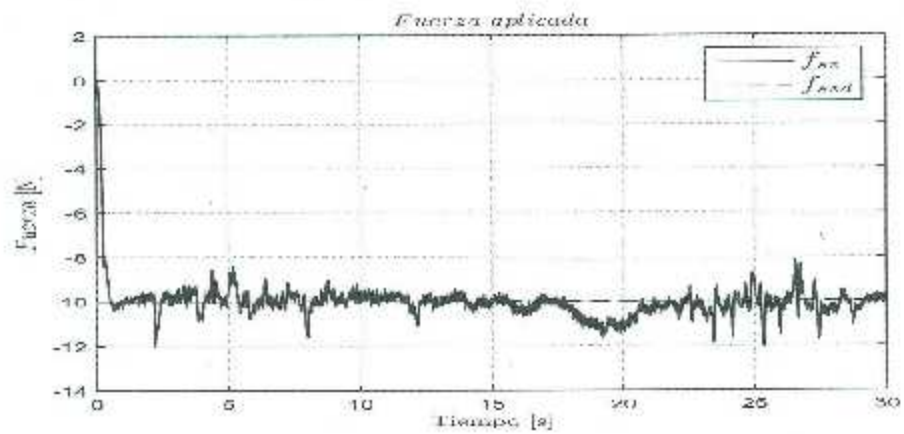
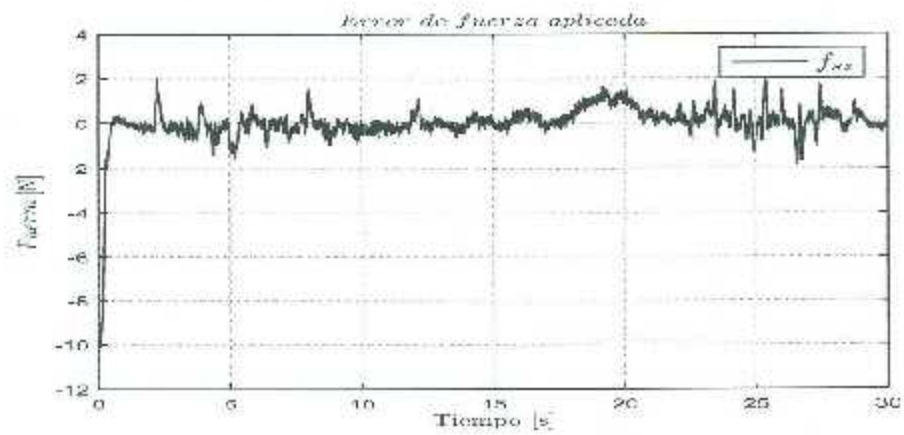


Figura 5.40: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dxd} = -50$ N sobre nieve seca.

Fuerza deseada de -10N



(a)



(b)

Figura 5.41: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dsd} = -10$ N sobre nieve seca.

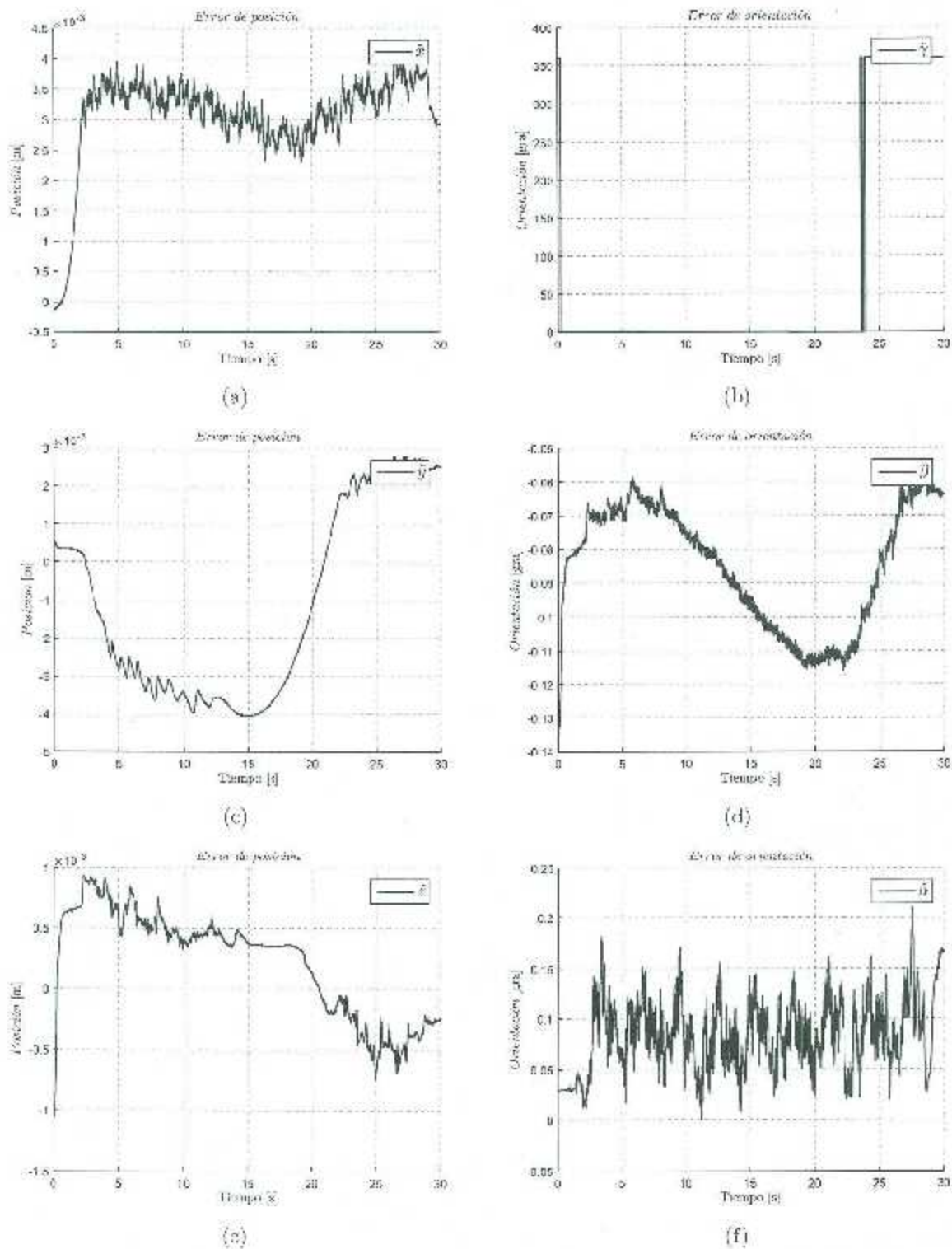


Figura 5.42: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre nieve seca.

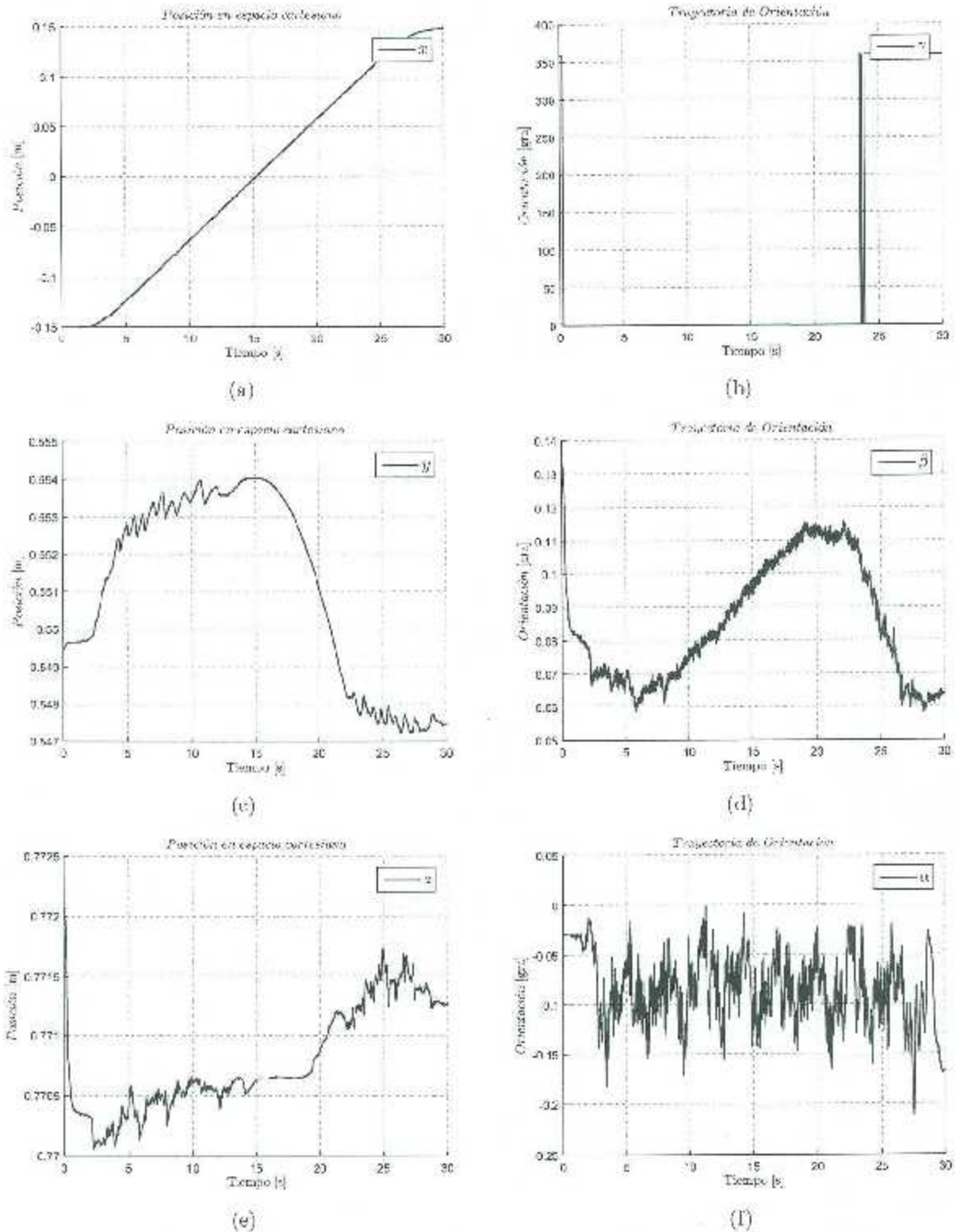


Figura 5.43; Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{d>d} = -10$ N sobre nieve seca.

5.3.3. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre madera

En este apartado se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias difusas aplicado al manipulador PA10 en interacción con una superficie de madera como la de la figura 5.4 (c). En la primera parte (5.44 a 5.46) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z \tilde{f}_{ez} , los errores de postura en coordenadas operacionales y los desplazamientos en coordenadas operacionales al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (5.47 a 5.49) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N

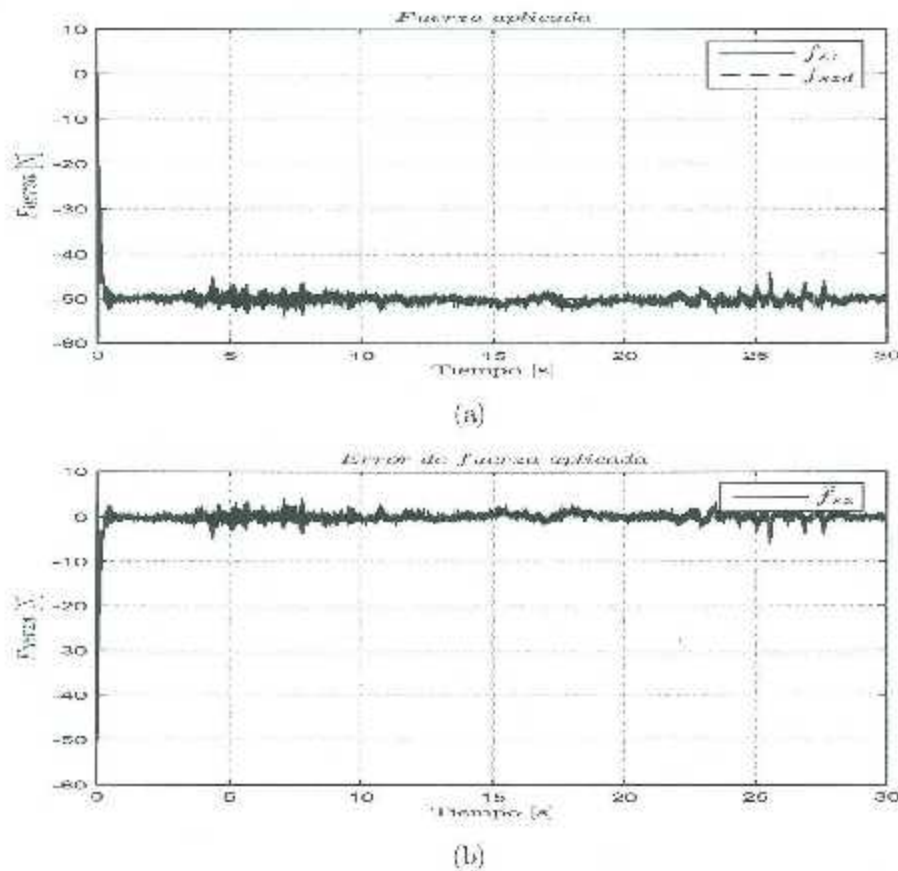


Figura 5.44: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dzd} = -50$ N sobre madera.

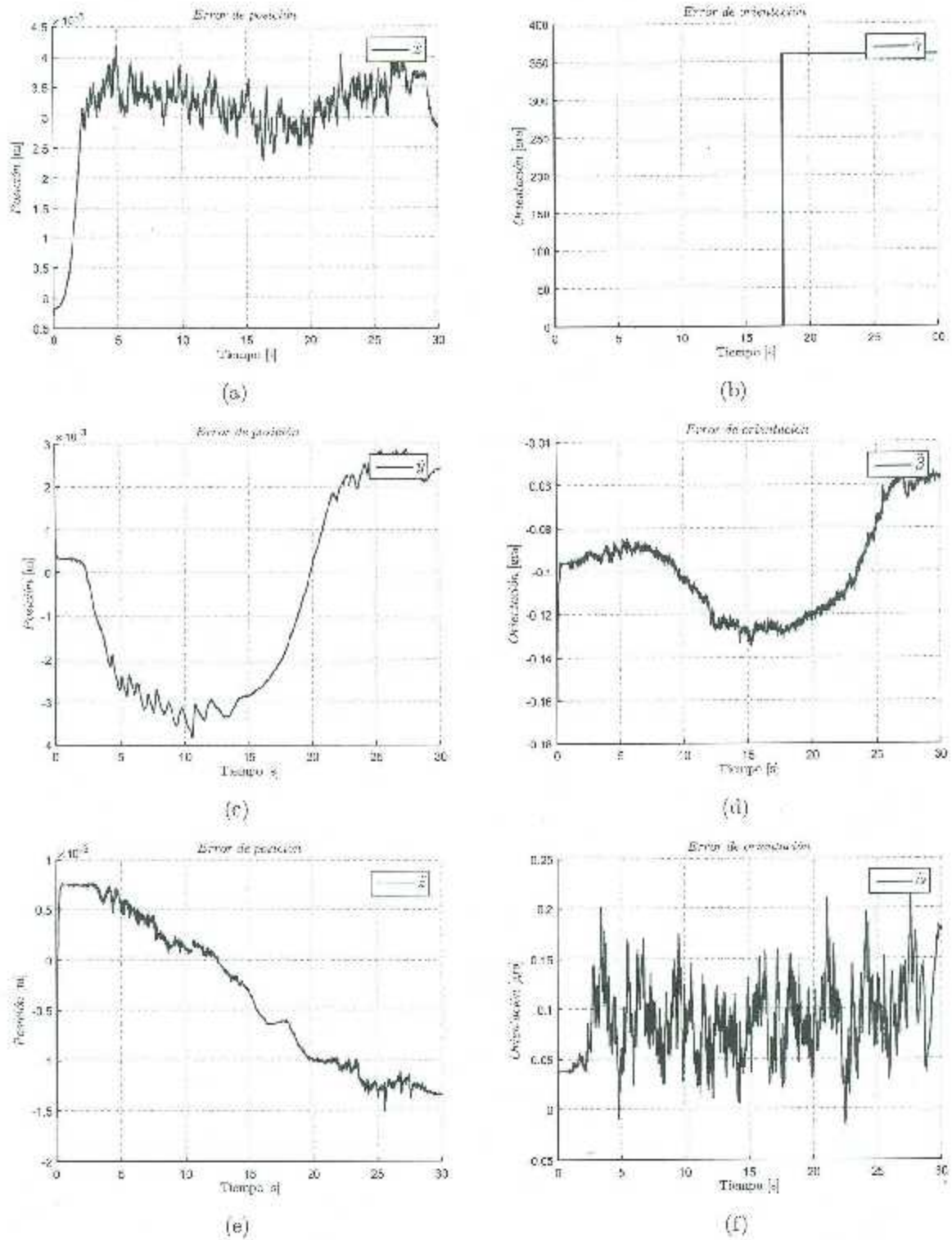


Figura 5.45: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{desd} = -50$ N sobre madera.

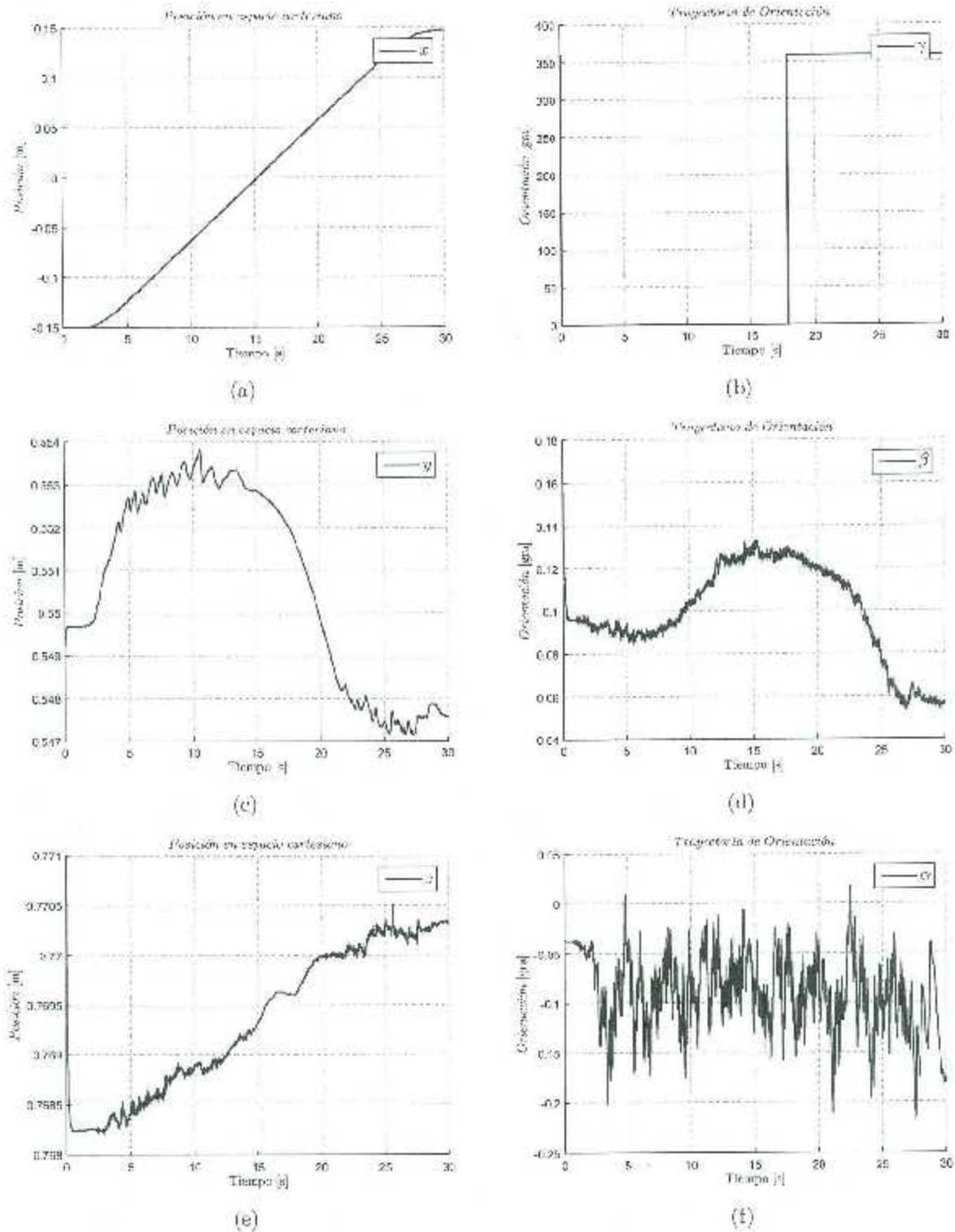


Figura 5.46: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza descendida $f_{ext} = -50$ N sobre madera.

Fuerza deseada de -10N

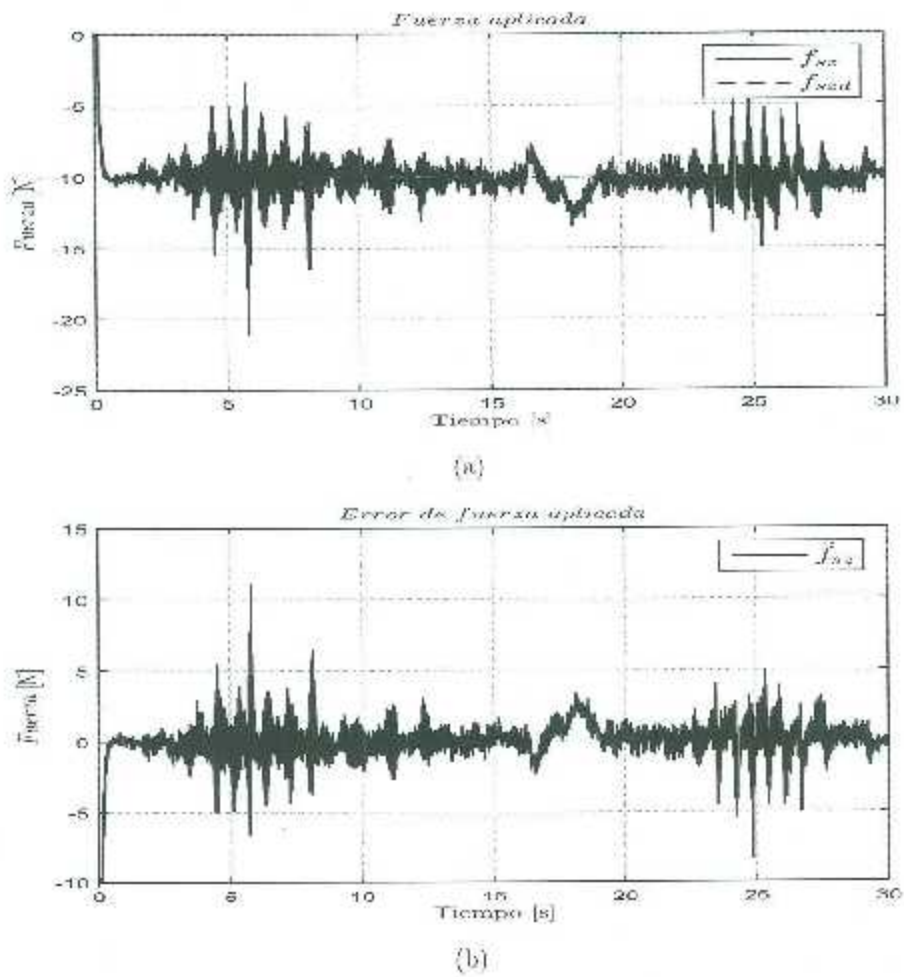


Figura 5.47: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{des} = -10$ N sobre másera.

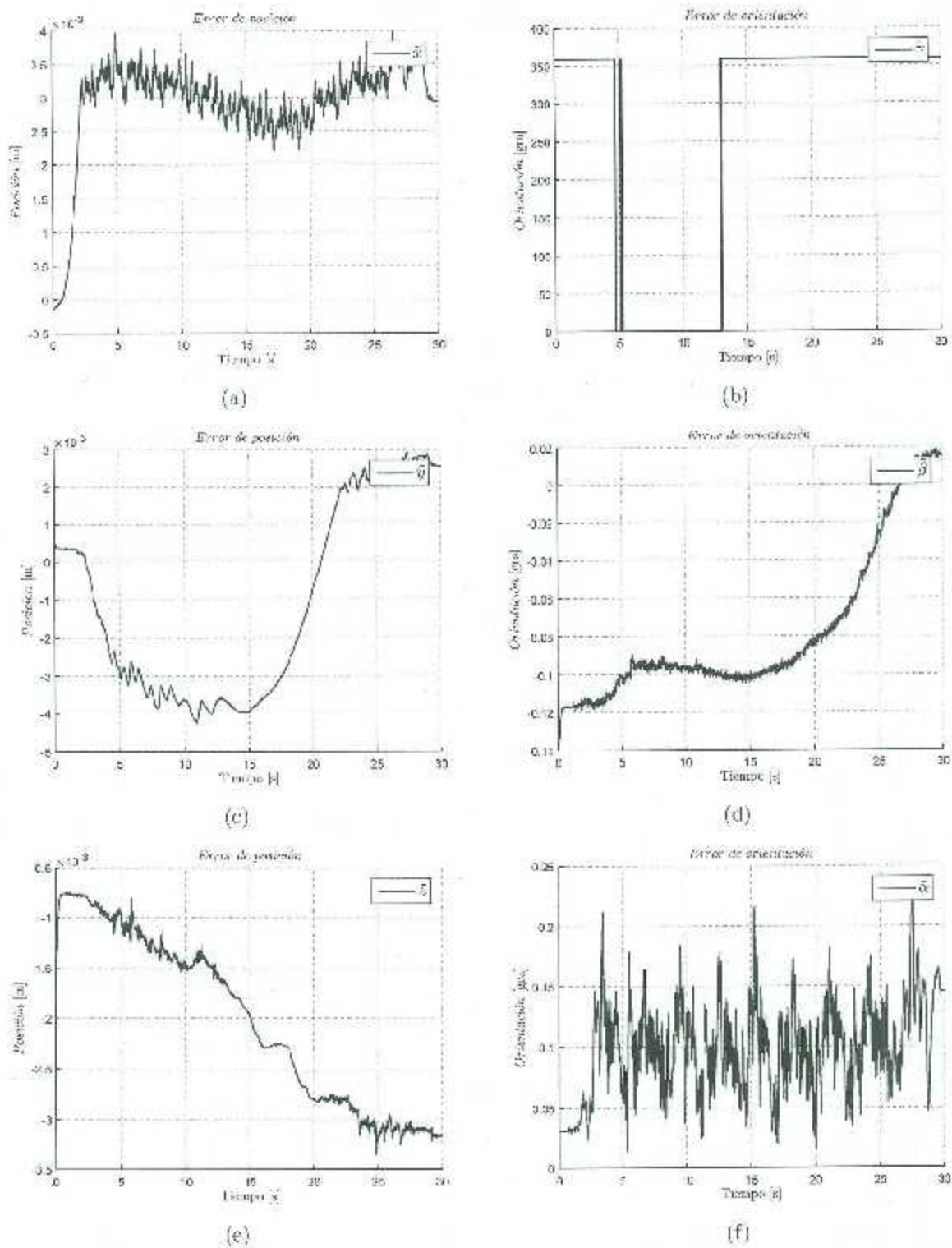


Figura 5.48: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{s2d} = -10$ N sobre madera.

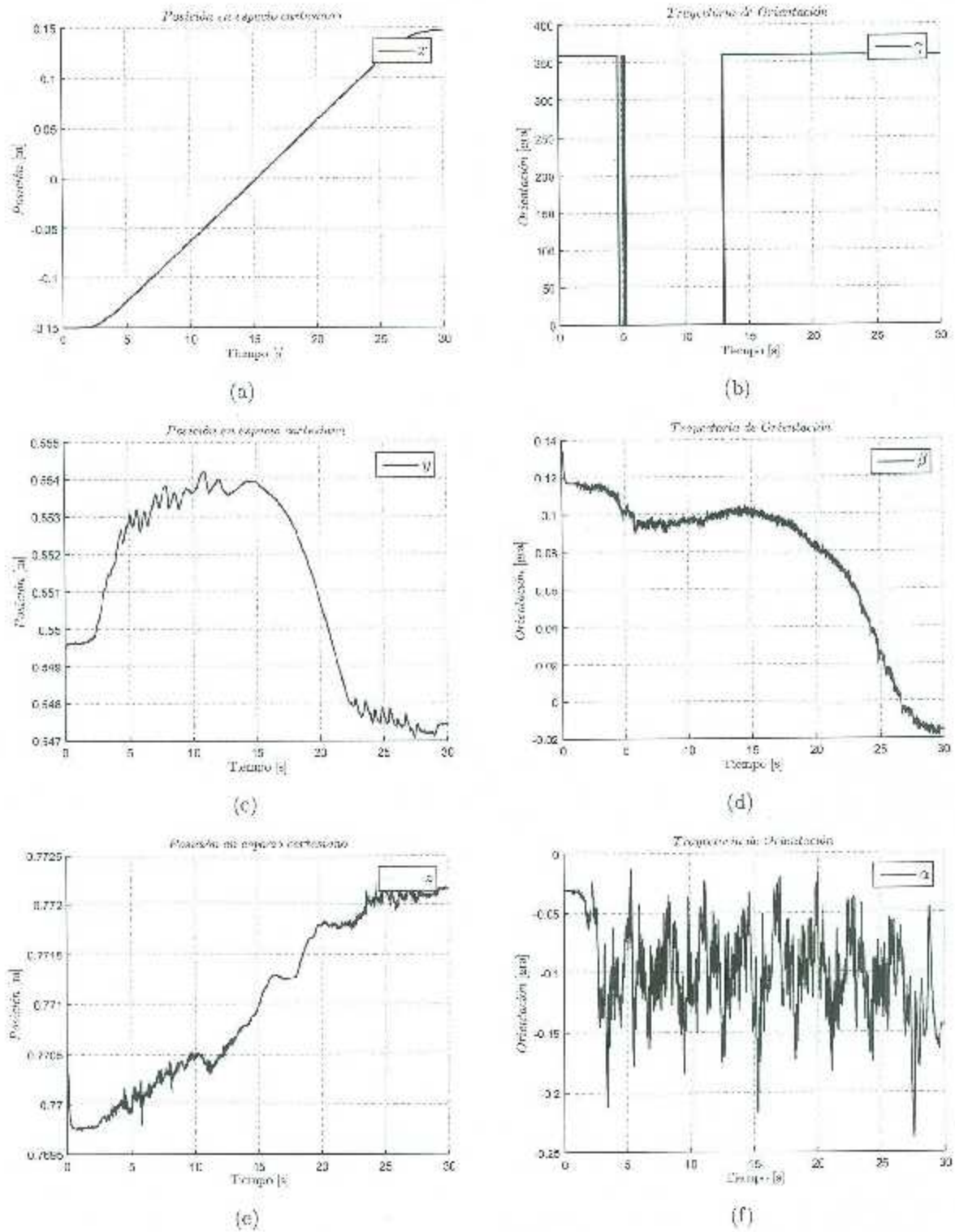


Figura 5.49: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{\text{ext}} = -10$ N sobre madera.

5.3.4. Regulación de fuerza y seguimiento de posición sobre vidrio

En las siguientes figuras se muestran los resultados del controlador híbrido con ganancias difusas aplicado al manipulador PA10 en interacción con una superficie de vidrio como la de la figura 5.4 (d). En la primera parte (5.50 a 5.52) se muestran los resultados del error de fuerza sobre el eje z \hat{f}_{sz} , los errores de postura en coordenadas operacionales y los desplazamientos en coordenadas operacionales al demandar una fuerza deseada de -50 N en z . En la segunda parte (5.53 a 5.55) se encuentran los resultados de las mismas variables pero para una fuerza de referencia de -10 N.

Fuerza deseada de -50N

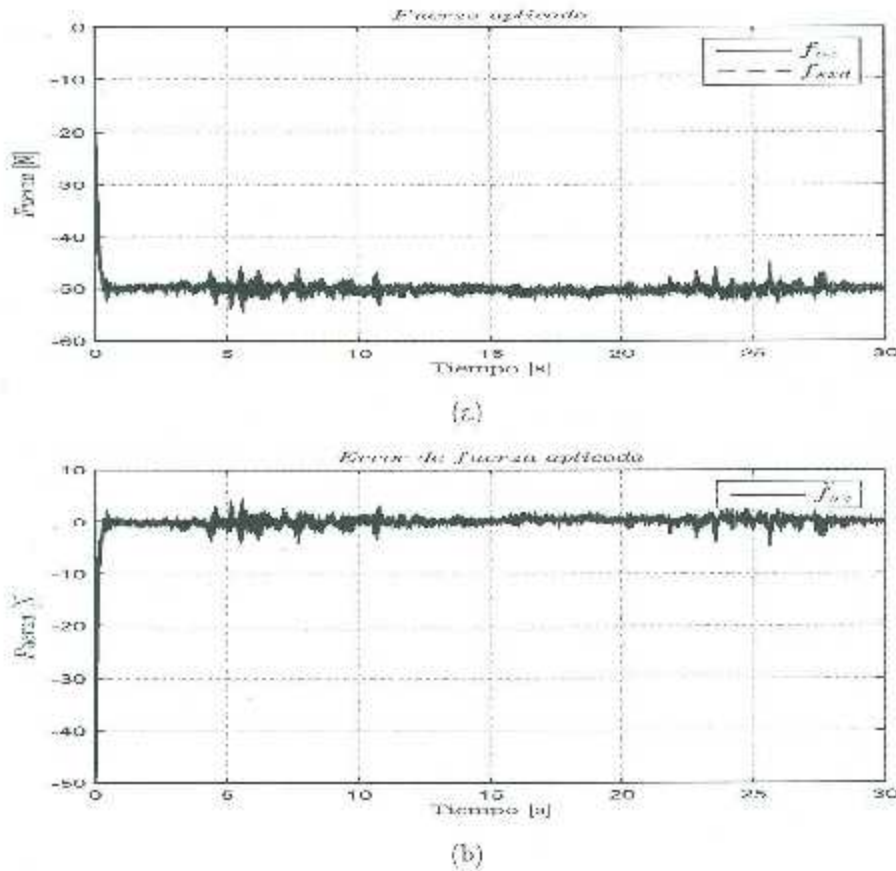


Figura 5.50: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dsd} = -50$ N sobre vidrio.

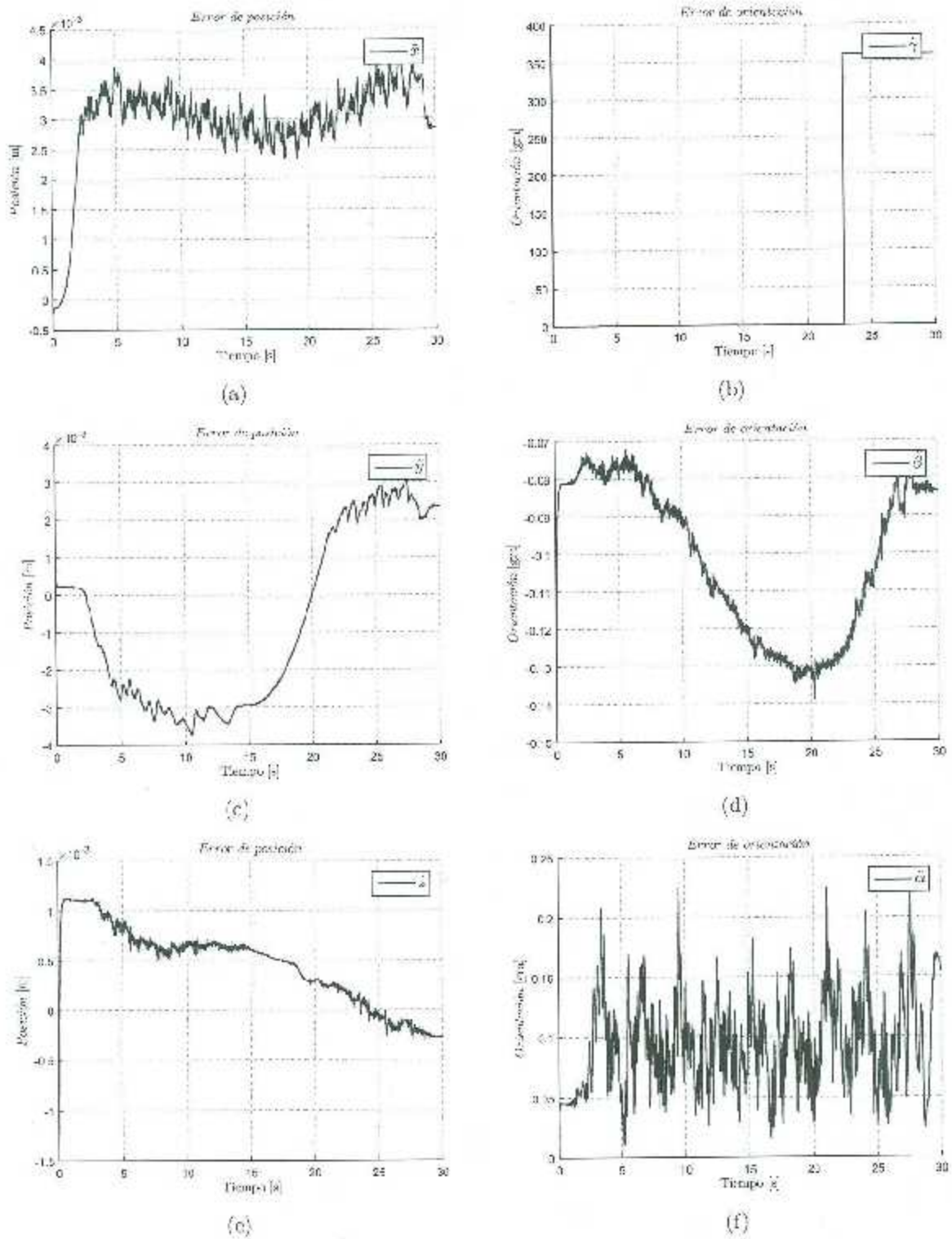


Figura 5.51: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza descada $f_{sd} = -50$ N sobre vidrio.

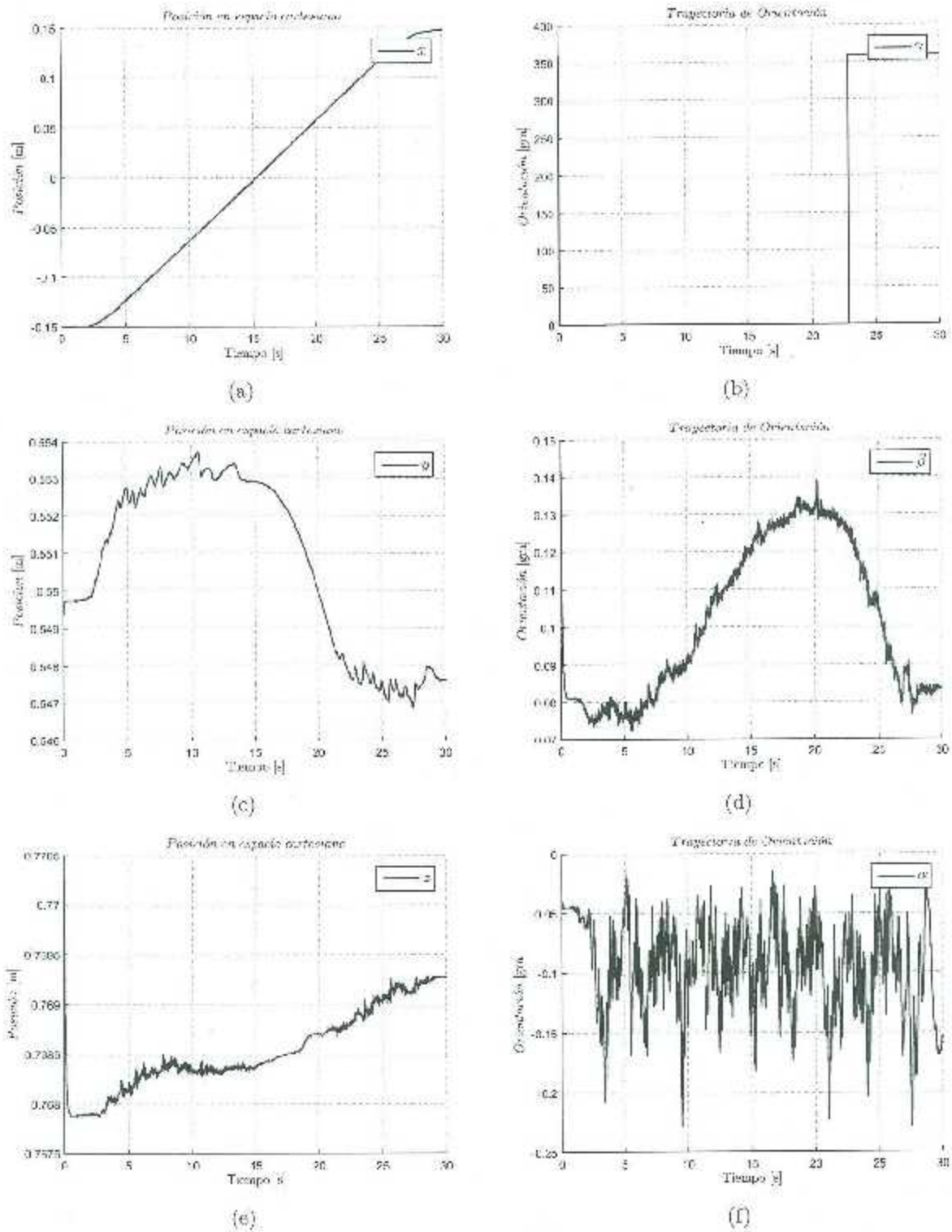


Figura 5.52: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{desd} = -50$ N sobre vidrio.

Fuerza deseada de -10N

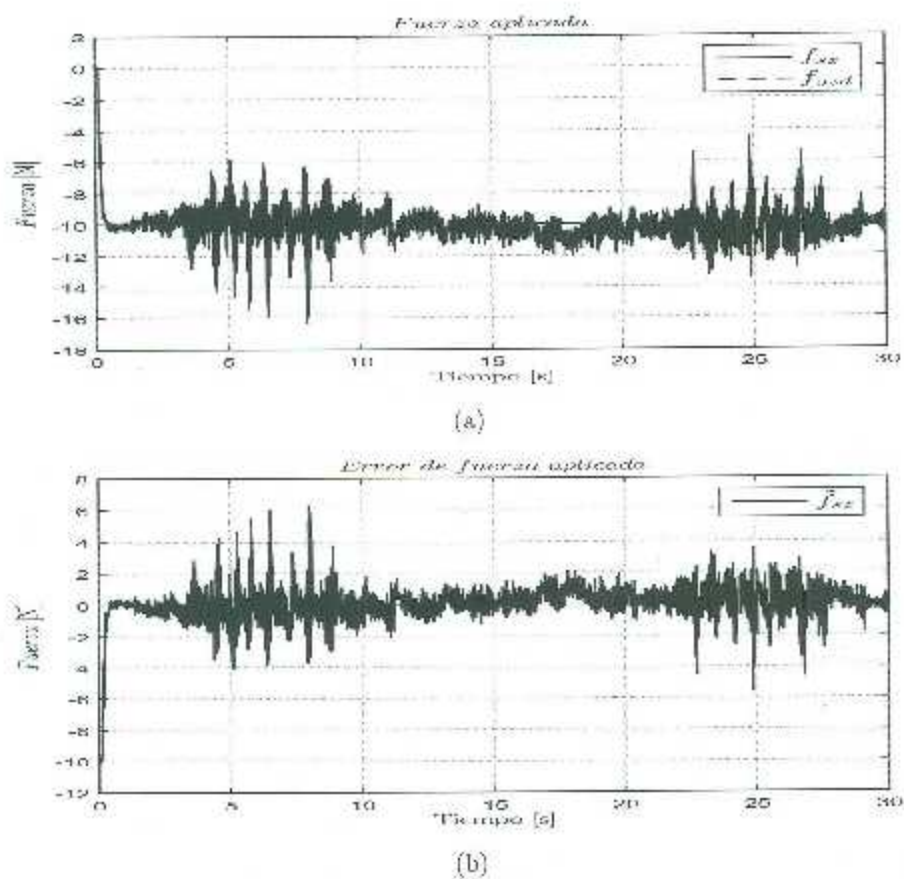


Figura 5.53: Fuerza aplicada y error de fuerza con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{dxd} = -10$ N sobre vidrio.

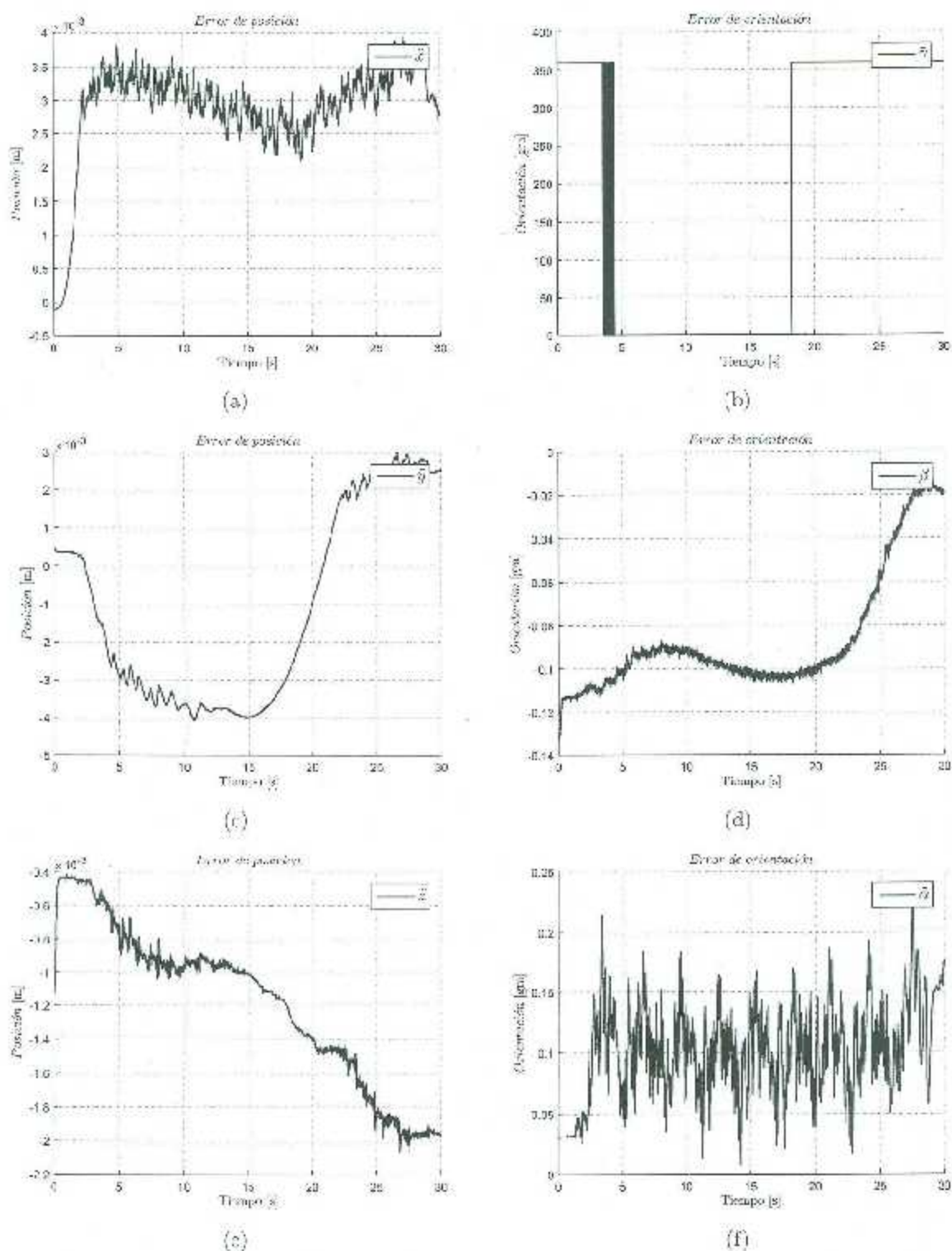


Figura 5.54: Errores de posición en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $f_{szd} = -10$ N sobre vidrio.

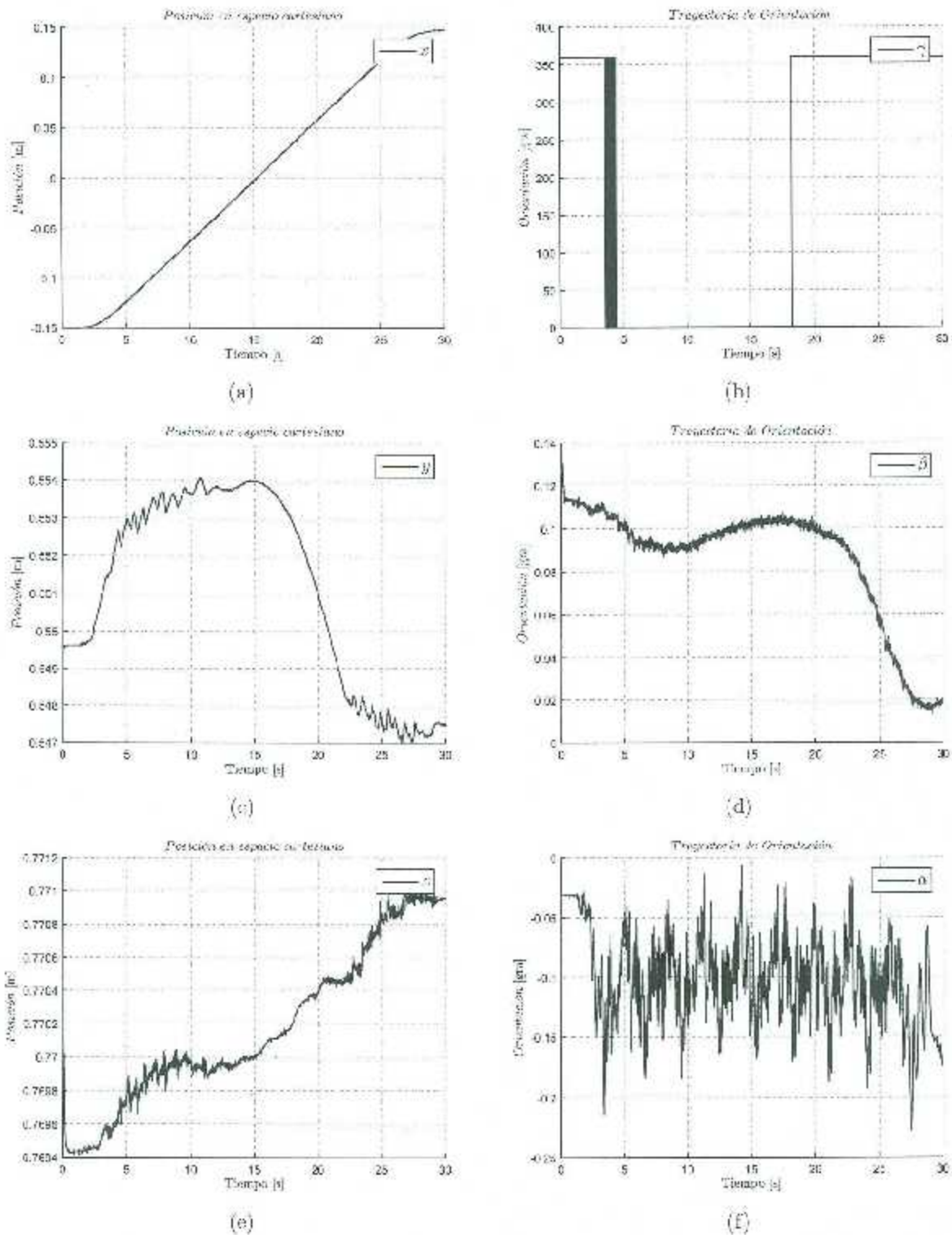


Figura 5.55: Evolución temporal de cada variable de postura en espacio operacional con el controlador híbrido de ganancias variables para una fuerza deseada $J_{des} = -10$ N sobre vidrio.

5.4. Comparación entre los controladores híbridos

Para poder hacer una comparación entre el rendimiento de los dos controladores híbridos presentes en este trabajo, y poder observar si se presenta alguna mejora con el controlador híbrido de ganancias variables, se calcula el promedio de la raíz cuadrada media del error de fuerza, el cual está dado por:

$$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}] = \sqrt{\frac{1}{T-t_0} \int_{t_0}^T \|\tilde{f}_{sz}\|^2 dt} \quad (5.4)$$

donde T es el tiempo total de experimentación, para este caso $T = 40$ s, y t_0 es el tiempo inicial de interés, en este caso $t_0 = 10$ s debido a que ese es el tiempo en el que empieza a ejecutarse la tarea de control de fuerza/posición.

En la tabla 5.5 se muestra la norma \mathcal{L}_2 del error de fuerza en el eje z para cada uno de los dos controladores híbridos actuando sobre los diferentes materiales que se usaron como entorno de contacto tomando como referencia una fuerza deseada de 50 N a lo largo de la parte negativa del eje z . Es evidente que para la mayoría de los casos, con excepción del de la madera, el controlador Híbrido de Fuerza/Posición con Ganancias Difusas (CHFPGD) presenta un rendimiento un poco mejor que el obtenido con el controlador Híbrido de Fuerza/Posición con Ganancias Fijas (CHFPGF).

Tabla 5.5: Índice de desempeño de los controladores híbridos de fuerza/posición para una fuerza deseada $\tilde{f}_{szd} = -50$ N

Controlador	Esponja	Nieve Seca	Madera	Vidrio
	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N
CHFPGF	2.8999	2.4537	2.2603	2.2255
CHFPGD	2.8157	2.4171	2.3515	2.2064

Para comparar el rendimiento de los dos controladores sobre diferentes superficies pero ahora con una fuerza de contacto deseada de 10 N se presenta la tabla 5.6, que muestra las normas \mathcal{L}_2 del error de fuerza para cada controlador y para las 4 superficies de contacto diferentes.

Tabla 5.6: Índice de desempeño de los controladores híbridos de fuerza/posición para una fuerza deseada $\tilde{f}_{szd} = -10$ N

Controlador	Esponja	Nieve Seca	Madera	Vidrio
	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N	$\mathcal{L}_2[\tilde{f}_{sz}]$ N
CHFPGF	1.4092	1.0249	1.1947	1.7669
CHFPGD	1.2446	0.9138	1.3714	1.1848

En las tablas 5.5 y 5.6 se puede apreciar que el controlador difuso funciona mejor para casi todos los materiales excepto madera; sin embargo hay que hacer notar que el controlador de ganancias fijas hay que resintonizarlo para cada material hasta obtener su mejor desempeño. Por otro lado en el controlador difuso no es necesario hacer resintonizaciones, ya que funciona aceptablemente bien para casi cualquier material. Esto último es la aportación principal de este trabajo de tesis; es decir, un controlador de fuerza de uso general autosintonizable.

Es importante mencionar que el rendimiento del controlador con ganancias fijas se pudo mejorar para cada uno de los materiales, sin embargo esto se logró resintonizando la ganancia K_{pf} hasta encontrar el valor ideal para cada material. Mientras que el controlador con ganancia difusa ofreció mejor rendimiento para la mayoría de los materiales sin necesidad de ser resintonizado. Además, el controlador con ganancia difusa puede funcionar con materiales diferentes a los considerados en este trabajo mientras que el controlador de ganancias fijas puede volverse inestable y presentar vibraciones sobre la superficie de contacto.

Capítulo 6

Conclusiones

Anteriormente, en la División de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna sólo se había presentado un trabajo sobre manipuladores en contacto con el entorno [Salinas A., 2011], sin embargo ese trabajo quedó incompleto y quedaron demasiadas incertidumbres. Con este trabajo se retomó esta línea de investigación y se disolvieron algunas incertidumbres. Además, se obtuvieron modelos matemáticos del manipulador Mitsubishi PA10-7CE configurado a 6 gdl, tal como el modelo cinemático inverso de posición. También se aplicó un control basado en lógica difusa para tratar de mejorar el rendimiento de control de fuerza/posición.

Como contribución principal, se tiene que con el controlador híbrido con ganancias difusas no es necesario reajustar la ganancia $K_{p,f}$ para los diferentes tipos de materiales y obtener un buen rendimiento, mientras que con el controlador híbrido de ganancias fijas si hay que hacer reajuste de ganancias para cada material y obtener un buen rendimiento de controlador. Es importante hacer notar que las mejores ganancias obtenidas para materiales suaves no pueden ser usadas en materiales duros pues el sistema se vuelve inestable y se presentan vibraciones muy violentas. Un resumen de las diferentes contribuciones de esta investigación se mencionan enseguida:

- Verificación y validación del modelo dinámico del robot PA10-7CE configurado a 6 gdl.
- Obtención el modelo cinemático inverso de posición del PA10-7CE configurado a 6 gdl.
- Implementación del sensor de fuerza/par en el entorno Simulink MATLAB.
- Implementación de un sistema de control híbrido de fuerza difuso.
- Mejoramiento del rendimiento de control de leyes de control convencionales de fuerza/posición aplicándoles lógica difusa.
- La experiencia y conocimiento de la implementación experimental de controles de interacción.

Como trabajo a futuro queda:

- Implementar el control híbrido de fuerza/posición con ganancias difusas en los que la entrada al sistema difuso no sea el error de fuerza sino la rigidez estimada del entorno.
- Implementar leyes de control difusas en el lazo de fuerza y también en el lazo de posición del control híbrido.
- Hacer experimentos en los que se controle la fuerza de contacto en más de un grado de libertad.

Apéndice A

Modelos y parámetros del robot PA10-7CE

Los parámetros de Denavit-Hartenberg modificados para el robot Mitsubishi PA10 se obtuvieron con los marcos asignados en la figura A.1 y se muestran en la tabla A.1.5.

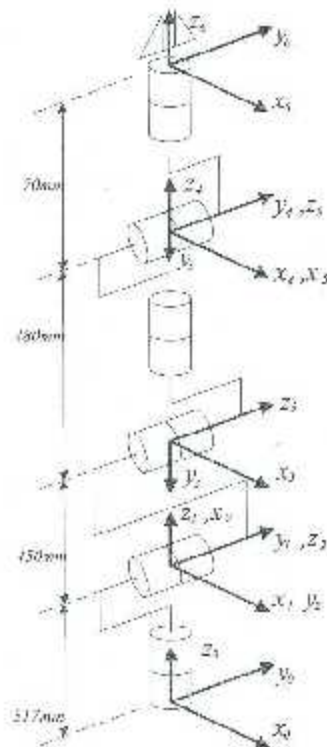


Figura A.1: Esquema cinemático para los parámetros Denavit-Hartenberg modificados del robot PA10 reducido a 6 g.d.l.

Tabla A.1: Parámetros Denavit-Hartenberg del PA10-7CE reducido a 6 g.d.l.

Eslabón	a_i [m]	α_i [rad]	a_i [m]	θ_i [rad]
1	0	0	0.317	q_1
2	0	$-\pi/2$	0	$q_2 - \frac{\pi}{2}$
3	0.450	0	0	$q_2 + \frac{\pi}{3}$
4	0	$\pi/2$	0.480	q_4
5	0	$-\pi/2$	0	q_5
6	0	$\pi/2$	0.070	q_6

A.1. Modelo cinemático

La posición correspondiente a una configuración determinada está dada por la columna cuatro de 0_6T , es decir:

$$P(1, 4) = l3 * C_1 * S_2 + l4 * C_1 * C_2 * S_3 + l4 * C_1 * C_3 * S_2 - l6 * S_1 * S_4 * S_5 - l6 * C_1 * C_2 * C_5 * S_3 + l6 * C_1 * C_3 * C_5 * S_2 + l6 * C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * S_5 - l6 * C_1 * C_4 * S_2 * S_3 * S_5;$$

$$P(2, 4) = l3 * S_1 * S_2 + l4 * C_2 * S_1 * S_3 + l4 * C_3 * S_1 * S_2 + l6 * C_1 * S_4 * S_5 + l6 * C_2 * C_5 * S_1 * S_3 + l6 * C_3 * C_5 * S_1 * S_2 - l6 * C_2 * C_3 * C_4 * S_1 * S_5 - l6 * C_4 * S_1 * S_2 * S_3 * S_5;$$

$$P(3, 4) = l1 + l3 * C_2 + l4 * C_2 * C_5 - l4 * S_2 * S_3 + l6 * C_2 * C_3 * C_5 - l6 * C_5 * S_2 * S_1 - l6 * C_2 * C_4 * S_3 * S_5 - l6 * C_3 * C_4 * S_2 * S_5;$$

y los componentes de rotación por la submatriz izquierda superior de 3×3 dentro de 0_6T

$$R(1, 1) = -S_6 * (C_4 * S_1 + C_1 * C_2 * C_3 * S_5 - C_1 * S_2 * S_3 * S_4) - C_6 * (C_5 * S_1 * S_5 - C_1 * C_2 * S_3 * S_5 - C_1 * C_3 * S_2 * S_5 - C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * C_5 + C_1 * C_4 * C_5 * S_2 * S_3);$$

$$R(1, 2) = S_6 * (C_5 * S_1 * S_4 + C_1 * C_2 * S_3 * S_5 + C_1 * C_3 * S_2 * S_5 - C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * C_5 + C_1 * C_4 * C_5 * S_2 * S_3) - C_6 * (C_4 * S_1 - C_1 * C_2 * C_3 * S_4 - C_1 * S_2 * S_3 * S_4);$$

$$R(1, 3) = C_1 * C_2 * C_5 * S_3 - S_1 * S_4 * S_5 + C_1 * C_3 * C_5 * S_2 + C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * S_5 - C_1 * C_4 * S_2 * S_3 * S_5;$$

$$R(2, 1) = S_6 * (C_1 * C_4 - C_2 * C_3 * S_1 * S_4 + S_1 * S_2 * S_3 * S_4) - C_6 * (C_2 * S_1 * S_3 * S_5 - C_1 * C_5 * S_4 + C_3 * S_1 * S_2 * S_5 - C_2 * C_3 * C_4 * C_5 * S_1 + C_4 * C_5 * S_1 * S_2 * S_3);$$

$$R(2, 2) = C_6 * (C_1 * C_4 - C_2 * C_3 * S_1 * S_4 - S_1 * S_2 * S_3 * S_4) + S_6 * (C_2 * S_1 * S_3 * S_5 - C_1 * C_5 * S_4 + C_3 * S_1 * S_2 * S_5 - C_2 * C_3 * C_4 * C_5 * S_1 + C_4 * C_5 * S_1 * S_2 * S_3);$$

$$R(2, 3) = C_1 * S_4 * S_5 + C_2 * C_5 * S_1 * S_3 + C_3 * C_3 * S_1 * S_2 + C_2 * C_3 * C_4 * S_1 * S_5 - C_4 * S_1 * S_2 * S_3 * S_5;$$

$$R(3, 1) = \sin(t2 + t3) * S_4 * S_6 - C_6 * (C_2 * C_3 * S_5 - S_2 * S_3 * S_5 + C_2 * C_4 * C_5 * S_3 + C_3 * C_4 * C_5 * S_2);$$

$$R(3, 2) = S_6 * (C_2 * C_3 * S_5 - S_2 * S_3 * S_5 + C_2 * C_4 * C_5 * S_3 + C_3 * C_4 * C_5 * S_2) + \sin(t2 - t3) * C_6 * S_4;$$

$$R(3, 3) = C_2 * C_3 * C_5 - C_5 * S_2 * S_3 - C_2 * C_4 * S_3 * S_5 - C_3 * C_4 * S_2 * S_5;$$

El modelo cinemático inverso se describe a continuación:

Sea la matriz 0_6T dada como

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} sx & rx & ax & Pz \\ sy & ry & ay & Py \\ sz & rz & az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde

$$\begin{aligned}
 sx &= \cos(\alpha) * \cos(\beta) \\
 sy &= \sin(\alpha) * \cos(\beta) \\
 sz &= -\sin(\beta)nz = \cos(\beta) * \sin(\gamma) \\
 nx &= \cos(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) - \sin(\alpha) * \cos(\gamma) \\
 ny &= \sin(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) + \cos(\alpha) * \cos(\gamma) \\
 nz &= \cos(\beta) * \sin(\gamma) \\
 ax &= \cos(\alpha) * \sin(\beta) * \cos(\gamma) + \sin(\alpha) * \sin(\gamma) \\
 ay &= \sin(\alpha) * \sin(\beta) * \cos(\gamma) - \cos(\alpha) * \sin(\gamma) \\
 az &= \cos(\beta) * \cos(\gamma)
 \end{aligned}$$

entonces las ecuaciones que describen el modelo cinemático inverso de posición son

$$\begin{aligned}
 q_1 &= \text{atan2}(Py, Px) \\
 X &= -Px * \cos(q_1) - Py * \sin(q_1) \\
 Y &= -0.31099999999999999 - Pz \\
 B1 &= 0.9 * Y \\
 B2 &= 0.9 * X \\
 B3 &= 0.027899999999999998 - X^2 - Y^2 \\
 SQ &= \frac{B1 * B3 + B2 * \sqrt{B1^2 + B2^2} - B3^2 * e1}{B1^2 + B2^2} \\
 CQ &= \frac{B2 * B3 - B1 * \sqrt{B1^2 + B2^2} - B3^2 * e2}{B1^2 + B2^2} \\
 q_2 &= \text{atan2}(SQ, CQ) \\
 q_3 &= \text{atan2}(-2.083 * (0.45 + X * \cos(q_2) + Y * \sin(q_2)), \\
 &\quad -2.083 * (-(Y * \cos(q_2)) - X * \sin(q_2))) \\
 X1 &= ay * \cos(q_1) - ax * \sin(q_1) \\
 Y1 &= -(ax * \cos(q_1) * \cos(q_2 + q_3)) - ay * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1) + \\
 &\quad az * \sin(q_2 + q_3) \\
 q_4 &= \text{atan2}(X1, -Y1) \\
 Y2 &= -(\cos(q_4) * (ax * \cos(q_1) * \cos(q_2 + q_3) - ay * \cos(q_2 + q_3) * \\
 &\quad \sin(q_1) - az * \sin(q_2 + q_3))) - (ay * \cos(q_1) - ax * \sin(q_1)) * \sin(q_4) \\
 Y3 &= -(az * \cos(q_2 + q_3)) - ax * \cos(q_1) * \sin(q_2 + q_3) - ay * \sin(q_1) * \\
 &\quad \sin(q_2 + q_3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_5 &= \text{atan2}(-Y2, -Y3) \\
Y4 &= -(\cos(q_4) * (sy * \cos(q_1) - sx * \sin(q_1))) - (sx * \cos(q_1) * \cos(q_2 \\
&\quad + q_3) + sy * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1) - sz * \sin(q_2 + q_3)) * \sin(q_4) \\
Y5 &= -(\cos(q_4) * (ny * \cos(q_1) - nx * \sin(q_1))) + (nx * \cos(q_1) * \cos(q_2 \\
&\quad + q_3) + ny * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1) - nz * \sin(q_2 + q_3)) * \sin(q_4) \\
q_6 &= \text{atan2}(Y4, Y5)
\end{aligned}$$

y el vector de variables articulares queda definido como

$$q = [q_1, q_2 - \frac{\pi}{2}, 0, q_3 - \frac{\pi}{2}, q_4, q_5, q_6]^T$$

Observe que en θ_2 se suma un ángulo de 90° y en θ_3 se resta un valor similar. Esto es debido a que al introducir en SYMORO+ los parámetros Denavit-Hartenberg de la tabla A.1.1 obtenidos con la configuración de la figura A.1 el software arroja un error. Lo que se hizo fue cambiar la configuración del manipulador, girando θ_2 un ángulo de 90° y compensando este giro en θ_3 , para después obtener los parámetros Denavit-Hartenber en una configuración diferente aceptables para SYMORO+.

Los componentes de la matriz jacobiana geométrica J son los siguientes

$$J(1, 1) = -(3 * \sin(q_1) * (16 * \sin(q_2 + q_3) + 15 * \sin(q_2)))/100,$$

$$J(1, 2) = (3 * \cos(q_1) * (16 * \cos(q_2 + q_3) + 15 * \cos(q_2)))/100,$$

$$J(1, 3) = (12 * \cos(q_2 + q_3) * \cos(q_1))/25,$$

$$J(1, 4) = 0,$$

$$J(1, 5) = 0,$$

$$J(1, 6) = 0;$$

$$J(2, 1) = (3 * \cos(q_1) * (16 * \sin(q_2 + q_3) - 15 * \sin(q_2)))/100,$$

$$J(2, 2) = (3 * \sin(q_1) * (16 * \cos(q_2 + q_3) + 15 * \cos(q_2)))/100,$$

$$J(2, 3) = (12 * \cos(q_2 + q_3) * \sin(q_1))/25,$$

$$J(2, 4) = 0,$$

$$J(2, 5) = 0,$$

$$J(2, 6) = 0;$$

$$J(3, 1) = 0,$$

$$J(3, 2) = -(12^* \sin(q_2 - q_3))/25 - (9^* \sin(q_2))/20,$$

$$J(3, 3) = -(12^* \sin(q_2 + q_3))/25,$$

$$J(3, 4) = 0,$$

$$J(3, 5) = 0,$$

$$J(3, 6) = 0;$$

$$\begin{aligned} J(4, 1) = & (\cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \sin(q_2)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_3) \\ & + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5)))^* (\cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \sin(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) \\ & - \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \\ & \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - (\sin(\text{conj}(q_2))^* (\cos(q_5)^* (\sin(q_4)^* \sin(q_6) - \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \cos(q_6)) - \cos(q_6)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_6)^* \sin(q_5) - \sin(q_3)^* \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_6) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_3)))^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) \\ & + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \sin(q_5)^* (\cos(q_4)^* \\ & \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4))) - (\cos(q_6)^* \\ & (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \\ & \sin(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \\ & \sin(q_2)^* \sin(q_3)))^* (\cos(q_2)^* (\sin(q_3)^* (\cos(q_6)^* \sin(q_4) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) + \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_5)^* \sin(q_6)) + \sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* (\cos(q_6)^* \sin(q_4) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) - \sin(q_3)^* \\ & \sin(q_5)^* \sin(q_6))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(4, 2) = & \sin(q_4)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \sin(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \\ & \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \\ & \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \sin(q_5)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \\ & \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)))^* (\cos(q_4)^* \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_6)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\ & + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \\ & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)))^* (\cos(q_4)^* \sin(q_6) + \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J(4,3) = & \sin(q_4)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \sin(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \\
& \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \\
& \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\
& \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \sin(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \\
& \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\
& \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) * (\cos(q_4)^* \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \\
& \sin(q_4)^* \sin(q_6)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\
& - \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \\
& \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\
& \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4))) * (\cos(q_4)^* \sin(q_3) + \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4)),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J(4,4) = & \cos(q_5)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \sin(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \\
& \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \\
& \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \sin(q_5)^* \sin(q_6)^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \\
& \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \sin(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \\
& \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \\
& \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + \cos(q_6)^* \sin(q_5)^* \\
& (\cos(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \\
& \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \\
& \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \\
& \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4))),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J(4,5) = & -\cos(q_6)^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_4)^* \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \\
& \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \sin(q_6)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \\
& \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \\
& \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) - \sin(q_6)^* (\cos(q_5)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) \\
& + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \\
& \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_4)^* \\
& \sin(q_1) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_4) - \cos(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4))),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J(4,6) = & \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \sin(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_1)^* \cos(q_3)^* \\
& \cos(q_5)^* \sin(q_2) + \cos(q_1)^* \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \\
& \sin(q_3)^* \sin(q_5);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J(5,1) = & (\cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* \sin(q_5) \\
& - \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_5))) * (\cos(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3) \\
& - \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2) + \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) - \cos(q_4)^* \\
& \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5)^* \sin(q_5)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \\
& \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\
& - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) - \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \\
& \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) * (\cos(q_2)^* (\sin(q_3)^* (\cos(q_6)^* \\
& \sin(q_4) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) + \cos(q_3)^* \sin(q_5)^* \sin(q_6)) + \sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* (\cos(q_6)^* \\
& \sin(q_4) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) - \sin(q_3)^* \sin(q_5)^* \sin(q_6))) + (\sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* (\sin(q_4)^*
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin(q_6) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \cos(q_6)) + \cos(q_6)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_6)^* \\ & \sin(q_5) - \sin(q_3)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_3)))^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_1)^* \\ & \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_1)) - \cos(q_6)^* \\ & (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \\ & \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \\ & \sin(q_3))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5, 2) = & (\cos(q_4)^* \sin(q_6) + \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4))^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_1)) - \cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + (\cos(q_4)^* \\ & \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6))^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\ & - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + \sin(q_4)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_1)^* \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2) + \\ & \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5, 3) = & (\cos(q_4)^* \sin(q_6) + \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4))^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_1)) - \cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + (\cos(q_4)^* \\ & \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6))^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\ & - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) - \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + \sin(q_4)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_1)^* \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2) + \\ & \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5, 4) = & \cos(q_5)^* (\cos(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3) - \cos(q_3)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \\ & \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \cos(q_6)^* \sin(q_5)^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_1)) - \cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \\ & \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))) + \sin(q_5)^* \sin(q_6)^* \\ & (\cos(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \\ & \sin(q_4)) + \sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \\ & \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5, 5) = & \sin(q_6)^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) - \cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \\ & \sin(q_4) - \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)) + \cos(q_6)^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_1)^* \cos(q_4) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_4) + \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_4)) + \sin(q_5)^* (\cos(q_2)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_1)^* \cos(q_5)^* \sin(q_4) + \cos(q_3)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5,6) = & \cos(q_1)^* \sin(q_4)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_5)^* \sin(q_1)^* \sin(q_3) - \cos(q_3)^* \\ & \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_2) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_1)^* \\ & \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5,1) = & (\sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) + \sin(q_2 + q_3)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4))^* \\ & (\cos(q_2)^* (\sin(q_3)^* (\cos(q_6)^* \sin(q_4) + \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) + \cos(q_3)^* \sin(q_5)^* \sin(q_6)) \\ & - \sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* (\cos(q_6)^* \sin(q_4) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_6)) - \sin(q_3)^* \sin(q_5)^* \sin(q_6))) \\ & - (\cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_5) - \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \sin(q_2)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \\ & \cos(q_4)^* \sin(q_5)))^* (\cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5)) - (\sin(q_2)^* (\cos(q_3)^* (\sin(q_4)^* \sin(q_6) - \\ & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \cos(q_6)) - \cos(q_6)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5)) - \cos(q_2)^* (\cos(q_3)^* \cos(q_6)^* \sin(q_5) - \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6) - \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_3)))^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \\ & \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_1)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_2)) - \sin(q_2 + q_3)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(6,2) = & (\sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) - \sin(q_2 + q_3)^* \cos(q_6)^* \\ & \sin(q_4))^* (\cos(q_1)^* \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) \\ & - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \\ & \sin(q_2)) - \sin(q_2 + q_3)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6))^* (\cos(q_4)^* \sin(q_6) + \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4)) - \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5,3) = & (\sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \\ & \cos(q_5)^* \sin(q_3) - \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) + \sin(q_2 + q_3)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4))^* \\ & (\cos(q_4)^* \cos(q_6) - \cos(q_5)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6)) - (\cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \\ & \sin(q_3)^* \sin(q_5) - \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) \\ & - \sin(q_2 + q_3)^* \sin(q_4)^* \sin(q_6))^* (\cos(q_4)^* \sin(q_6) - \cos(q_5)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4)) - \sin(q_4)^* \\ & \sin(q_5)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \\ & \sin(q_5) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(5,4) = & \cos(q_3)^* \sin(q_5)^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) \\ & + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) - \sin(q_2 + q_3)^* \\ & \sin(q_4)^* \sin(q_6)) - \cos(q_5)^* (\cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3) - \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5) + \cos(q_2)^* \\ & \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5)) + \sin(q_5)^* \sin(q_6)^* (\sin(q_6)^* \\ & (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \\ & \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) + \sin(q_2 + q_3)^* \cos(q_6)^* \sin(q_4)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J(5, 5) = & \cos(q_6)^* (\sin(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \\
 & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) + \sin(q_2 + q_3)^* \cos(q_6)^* \\
 & \sin(q_4)) - \sin(q_6)^* (\cos(q_6)^* (\cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \sin(q_5) - \sin(q_2)^* \sin(q_3)^* \sin(q_5) + \cos(q_2)^* \\
 & \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_3) + \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \cos(q_5)^* \sin(q_2)) - \sin(q_2 - q_3)^* \sin(q_4)^* \\
 & \sin(q_6)),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J(6, 6) = & \cos(q_2)^* \cos(q_3)^* \cos(q_5) - \cos(q_5)^* \sin(q_2)^* \sin(q_3) - \cos(q_2)^* \cos(q_4)^* \sin(q_3)^* \\
 & \sin(q_5) - \cos(q_3)^* \cos(q_4)^* \sin(q_2)^* \sin(q_5);
 \end{aligned}$$

Apéndice B

Parámetros del sensor de fuerza ATI Delta

Las características principales de dicho sensor se muestran en las tablas B.1 y B.2. Para mayor información técnica consultar [ATI manual] y [ATI sensores].

Tabla B.1: Características del sensor de fuerza/torque. Parte 1.

Ejes	Rango del sensor	Resolución
	Calibración SI-165-15	Tipo de sistema:DAQ
F_x,F_y(±N)	165	1/32
F_z(+N)	495	1/16
T_x,T_y(±Nm)	15	1/528
T_z(±Nm)	15	1/528

Tabla B.3: Características del sensor de fuerza/torque. Parte 2.

Sobre carga en un solo eje	
F _{xy}	± 2600 N
F _z	± 8600 N
T _{xy}	± 290 Nm
T _z	± 400 Nm
Rigidez(calculada)	
Fuerza en el eje X y Y(K _x y K _y)	3.6 × 10 ⁷ N/m
Fuerza en el eje Z (K _z)	5.9 × 10 ⁷ N/m
Torque en el eje Xy Y(K _{tx} , K _{ty})	5.2 × 10 ⁴ Nm/rad
Torque en el eje Z(K _{tz})	09.1 × 10 ⁴ Nm/rad
Frecuencia de resonancia	
F _x , F _y , T _z	1500 Hz
F _z , T _x , T _y	1700 Hz
Especificaciones físicas	
Peso	0.913 Kg
Diámetro	94 mm
Altura	33 mm

Del archivo de calibración para el sensor proporcionado por el fabricante se extrajo la matriz M_T necesaria para convertir el vector de voltajes medidos por las galgas del sensor a un vector con las fuerzas y pares sobre cada eje cartesiano y es la siguiente

$$M_T = \begin{bmatrix} \frac{0.22364}{s_1} & \frac{-0.03889}{s_2} & \frac{0.62549}{s_3} & \frac{-34.78142}{s_4} & \frac{0.54749}{s_5} & \frac{34.22769}{s_6} \\ \frac{1.15360}{s_2} & 40.27729 & \frac{0.05200}{s_2} & \frac{-19.96439}{s_2} & \frac{0.46815}{s_5} & \frac{-20.00716}{s_3} \\ \frac{19.69455}{s_3} & \frac{-0.49683}{s_3} & 19.57388 & \frac{-0.64121}{s_3} & \frac{19.52488}{s_3} & \frac{-0.53221}{s_3} \\ \frac{-0.03011}{s_4} & \frac{0.02476}{s_4} & \frac{-33.93614}{s_4} & \frac{1.04265}{s_4} & \frac{33.29106}{s_4} & \frac{-0.80423}{s_4} \\ \frac{39.31989}{s_5} & \frac{0.02053}{s_5} & \frac{-19.45225}{s_5} & \frac{0.60772}{s_5} & \frac{-0.10624}{s_5} & \frac{0.43610}{s_5} \\ \frac{0.72206}{s_6} & \frac{-19.94943}{s_6} & \frac{0.23773}{s_6} & \frac{-20.23960}{s_6} & \frac{0.21919}{s_6} & \frac{-19.62038}{s_6} \end{bmatrix}$$

donde

$$\begin{aligned} s_1 &= 1.73069174714047 \\ s_2 &= 1.73069174714047 \\ s_3 &= 0.650593869289902 \end{aligned}$$

$$s_4 = 32.6726829503729$$

$$s_5 = 32.6726829503729$$

$$s_6 = 29.1789617921106$$

El vector de compensaciones \mathbf{c}_o , que también es proporcionado en el archivo de calibración del sensor y utilizado para hacer la conversión de voltajes a fuerzas y pares en la ecuación 2.8, está dado por la siguiente expresión

$$\mathbf{c}_o = [22.1000 \quad 3.0100 \quad 12.0400 \quad 0.3000 \quad 0.4620 \quad -0.0360]^T$$

Apéndice C

Trayectorias de referencia para los controladores

C.1. Trayectoria de fuerza

Las trayectorias que se diseñaron para los controladores son trayectorias de fuerza deseadas sólo en la dirección del eje z del marco de la tarea, i.e., el vector de fuerzas deseadas es $f_{sd} = [0, 0, f_{szd}, 0, 0, 0]^T$.

En este trabajo sólo se realizaron experimentos con dos señales de fuerza deseadas f_{szd} . Las dos señales son de la forma escalón, una con amplitud de -50 N (Figura C.1) y la otra con amplitud de -10 N (Figura C.2). Las dos referencias cambian de amplitud a los 10 segundos después de ejecutar el control de posicionamiento para el contacto, esto para asegurar que el robot ya esté posicionado en el lugar correcto en el que se llevará el contacto con el entorno. La duración del pulso es de 30 segundos, tiempo que tarda el manipulador en realizar la tarea de seguimiento de posición durante el contacto con el entorno. La función que describe la referencia de fuerza pulso de -50 N es:

$$f_{szd-50} = \begin{cases} 0, & t < 10 \\ -50 & 10 \leq t < 40 \\ 0, & t \geq 40 \end{cases} \quad (C.1)$$

y la referencia de fuerza con un pulso de 10 N es descrita por:

$$f_{szd-10} = \begin{cases} 0, & t < 10 \\ -10 & 10 \leq t < 40 \\ 0, & t \geq 40 \end{cases} \quad (C.2)$$

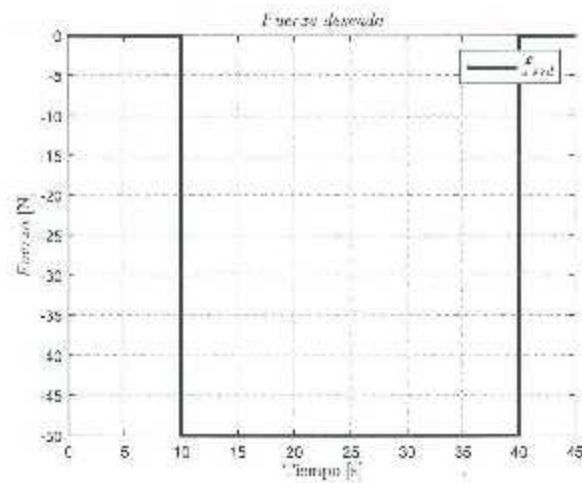


Figura C.1: Referencia de fuerza de 50 N

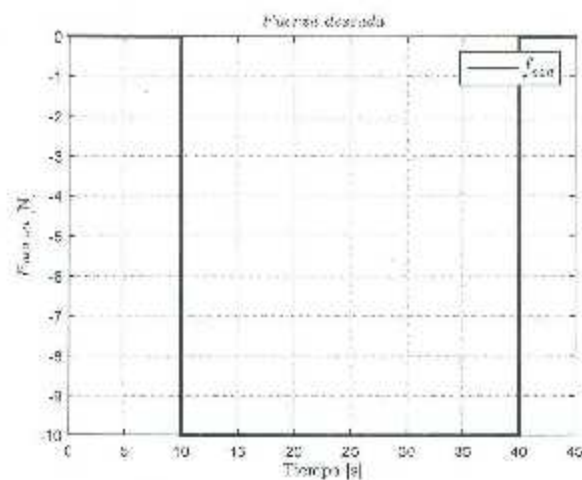


Figura C.2: Referencia de fuerza de 10 N

C.2. Referencias de posición

Antes de los 10 segundos después de haber corrido el controlador, se desea posicionar el robot en el lugar adecuado para realizar la labor de contacto con el entorno, y a partir del tiempo $t_i = 10$ se espera que el manipulador siga una línea recta a lo largo del eje x con respecto del marco de la base durante 30 segundos. De acuerdo con esto se asignan las siguientes fases de movimiento

Fase de posicionamiento ($0 < t_i$):

Se establece el vector de posiciones y orientaciones cartesianas iniciales (posiciones y orientaciones a las que se llega con el control Tanh-D+g) como

$$\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i, \gamma_i, \beta_i, \alpha_i] \quad (C.3)$$

donde γ_i (giro en el eje x), β_i (giro en el eje y) y α_i (giro en el eje z) son las orientaciones deseadas expresadas en ángulos XYZ o RPY.

Entonces para la fase de posicionamiento el vector de posiciones y orientaciones deseadas se establece como

$$\mathbf{x}_d = \mathbf{x}_i \quad (C.4)$$

Fase de arranque ($\leq T_1$):

$$t_2 = t - t_i$$

$$x_d(t) = L_1 \left(\frac{t_2}{T_1} - \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi t_2}{T_1} \right) \right) \quad (C.5)$$

$$\dot{x}_d(t) = \frac{L_1}{T_1} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t_2}{T_1} \right) \right) \quad (C.6)$$

$$\ddot{x}_d(t) = \frac{\pi L_1}{T_1^2} \sin \left(\frac{\pi t_2}{T_1} \right) \quad (C.7)$$

$$\mathbf{x}_d = [x_d, y_d, z_d, \gamma_d, \beta_d, \alpha_d] \quad (C.8)$$

Fase de movimiento uniforme ($t_i + T_1 \leq t < t_i + T_1 + T_2$):

$$t_3 = t - t_i - T_1$$

$$x_d(t) = x_i + L_1 + \frac{L_2}{T_2} t_3 \quad (C.9)$$

$$\dot{x}_d(t) = \frac{L_2}{T_2} \quad (C.10)$$

$$\ddot{x}_d(t) = 0 \quad (C.11)$$

$$\mathbf{x}_d = [x_d, y_d, z_d, \gamma_d, \beta_d, \alpha_d] \quad (C.12)$$

Fase de detención ($t_i + T_1 + T_2 \leq t \leq t_i + T_1 + T_2 + T_3$):

$$t_4 = t - t_i - T_1 - T_2$$

$$x_d(t) = x_i + L_1 + L_2 + L_3 \left(\frac{t_4}{T_3} + \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi t_4}{T_3} \right) \right) \quad (C.13)$$

$$\dot{x}_d(t) = \frac{L_3}{T_3} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi t_4}{T_3} \right) \right) \quad (C.14)$$

$$\ddot{x}_d(t) = -\frac{\pi L_3}{T_3^2} \sin \left(\frac{\pi t_4}{T_3} \right) \quad (C.15)$$

$$\mathbf{x}_d = [x_d, y_d, z_d, \gamma_d, \beta_d, \alpha_d] \quad (\text{C.16})$$

donde $x_d(t)$, $\dot{x}_d(t)$, $\ddot{x}_d(t)$ son las posiciones, velocidades y aceleraciones deseadas a lo largo del eje x respectivamente. Los parámetros $T_1 = 5$ seg, $T_2 = 20$ seg, $T_3 = 5$ seg son los tiempos que dura cada fase del movimiento de seguimiento de la trayectoria; $L_1 = 0.003$ m, $L_2 = 0.014$ m, $L_3 = 0.003$ m son las longitudes recorridas en cada fase del movimiento. Con esto se tiene que la longitud de la trayectoria es de 0.3 m y tiene una duración de 30 seg. Las trayectorias deseadas, sólo sobre el eje x , se muestran en las Figuras C.3, C.4 y C.5.

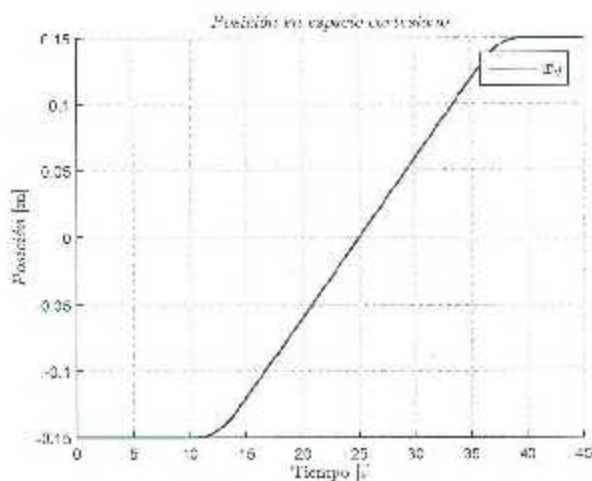


Figura C.3: Posición cartesiana deseada sobre el eje x

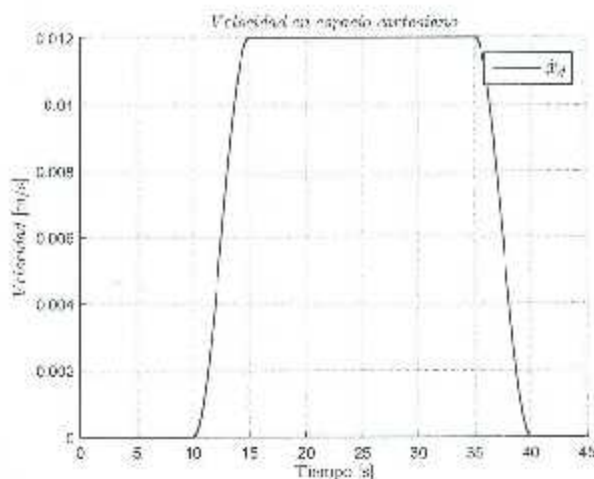
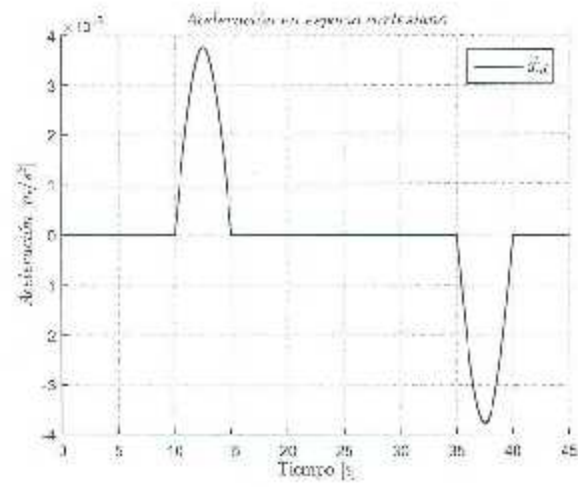


Figura C.4: Velocidad cartesiana deseada sobre el eje x

Figura C.5: Aceleración cartesiana deseada sobre el eje x

Bibliografía

- [Craig J. J., Raibert M. H., 1979] CRAIG J. J. , RAIBERT M. H., "A systematic method of hybrid position/force Control of a manipulator", proceedings of the *IEEE Computer Software and Applications Conference*, Chicago, IL, USA, November 1979.
- [Ramírez C., 2008] RAMÍREZ C. , *Modelado dinámico y control en modo par del robot Mitsubishi PA10-7CE*, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torroón, Coahuila, México. Diciembre 2008.
- [Mason, M. T., 1981] MASON, M.T., "Compliance and force control for computer controlled manipulators", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 11, No. 6, pp. 418-432, 1981.
- [Zadch L.A., 1965] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8, pp.338-353, 1965.
- [Nguyen H. et al., 2003] NGUYEN H., PRASAD R., WALKER C., *A first course in fuzzy and neural control*, Chapman & Hall/CRC, USA, 2003.
- [Camarillo K. et al., 2006] CAMARILLO K., CAMPA R. Y SANLIBÁÑEZ, V. "Control del robot Mitsubishi PA10-7CE usando lazos internos PI de velocidad", en memorias *VIII Congreso Mexicano de Robótica, México, D.F.*, Octubre 2006.
- [Ollero A., 2001] MAZA J.I. , OLLERO A., *HEMERO: Herramienta MATLAB/Simulink para el estudio de manipuladores y robots móviles*, Marcombo-Boixareu, 2001.
- [Craig J. J.,2006] CRAIG J. J., *Robótica*. Prentice Hall, 2006.
- [Sciavicco L., Siciliano B., 1996] SCIAVICCO L., SICILIANO B., *Modelling and control of robot manipulators*, Springer, 1996.
- [Salinas A., 2011] SALINAS A., *Análisis e implementación de esquemas de control de interacción activa para robots manipuladores: Aplicación al robot Mitsubishi PA10*, tesis de maestría, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torroón, Coah., Diciembre 2011.
- [Vukobratovic M. et al., 2009] VUKOBRATOVIC M., SURDILOVIC D., EKALO Y. AND KATIC D., *Dynamics and robust control of robot-environment interaction*. World Scientific, 2009.

- [Paul R.P., 1981] *Robot manipulators: mathematics, programming and control*, MIT Press, Massachusetts.
- [ATI sensores] ATI Industrial Automation, Inc., "Multi-Axis Force/Torque Sensor".
- [ATI manual] ATI Industrial Automation, Inc., "Installation and Operation Manual".
- [Shin K. G., Lee C. P., 1985] SHIN K.G., LEE C.P., "Compliant control of robotic manipulators with resolved acceleration", *Proceedings of 24th IEEE Conference on Decision and Control*, Ft. Lauderdale, FL, USA, December, 1985.
- [Khatib O., 1987] KHATIB O., "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation", *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 3, No.1, pp. 43-53, 1987.
- [Bona B., Indri M., 1992] BONA B., INDRI M., "Exact decoupling of the force-position control using the operational space formulation", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, May 1992.
- [Zhang H., Paul R., 1985] ZHANG H., PAUL R., "Hybrid Control of Robot Manipulator", *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1985.
- [Shih-Tin L., Ang-Kiong H., 1998] SHIH-TIN L., ANG-KIONG H., "Hierarchical fuzzy force control for industrial robots", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 4, August 1998.