



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE MECATRÓNICA

Teleoperación háptica de sistema de robots industriales cooperativos.

Tesis que presenta:
Ing. Michelle Acevedo Velázquez

Para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias

En la especialidad de:
Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis:
Dr. Alejandro Rodríguez Angeles

Ciudad de México

Diciembre 2020

Agradecimientos

Sin duda alguna, las metas logradas no son nada, si no tienes personas con quien compartirlas, por ello quiero aprovechar para agradecer y dedicar este trabajo.

A mis padres, Raúl y Tere: Por ser un apoyo incondicional, por brindarme todo el amor que una hija podría desear, por esforzarse para que nada me faltara, por ser un ejemplo de vida y por haber moldeado a la persona que soy hoy en día.

A mis hermanas, Paloma y Aline: Por su apoyo incondicional, por su protección y amor de hermanas mayores, por sus consejos y miles de pláticas.

A Luis Venegas: Por motivarme a estudiar esta maestría, por su apoyo cuando los momentos eran pesados, por su compañía y por hacer el trayecto igual de feliz que la meta.

A Yves Pérez: Por ser un hermano que motiva, apoya y protege en cualquier situación, por sacarme adelante cuando la luz se veía lejos al final del túnel.

A mi asesor el Dr. Alejandro Rodríguez: Por la confianza en emprender esta tesis bajo su asesoría, por toda la disposición y paciencia para resolver las dudas, por su atención en la revisión de este trabajo, por transmitir su conocimiento y por su invaluable papel en mi formación académica y científica.

Al CINVESTAV: Por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

Al CONACYT: Por darme una beca de tiempo completo que me permitió realizar mis estudios de Maestría y por su apoyo a través de los proyectos CB-2015-01/254329 y CB2017-2018-A1-S-26123.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el concepto de un sistema cooperativo teleoperado conformado por dos robots industriales de marca ABB y un dispositivo háptico de marca 3D Systems. Este sistema tiene como objetivo llevar a cabo tareas de manipulación que requieran la destreza y flexibilidad de un sistema cooperativo, así como la capacidad de realizar el seguimiento de trayectorias que involucren fuerza y posición impuestas por un operador humano.

La jerarquía seguida en el sistema comienza cuando el operador humano imprime fuerzas al robot maestro provocando el movimiento de su efector final, este robot maestro es la interfaz háptica que a través de medios de comunicación dicta ordenes que son acatadas únicamente por un robot manipulador denominado robot esclavo, este robot esclavo a su vez forma parte del sistema cooperativo conformado por dos robots industriales e impone sus movimientos al otro robot manipulador que se encuentra en reacción.

Se implementan dos esquemas de control distintos en los manipuladores industriales, para el primer robot se utiliza el control híbrido posición-fuerza/par extendido, el cual permite introducir una trayectoria deseada modificando la referencia del control de fuerza, mientras que para el segundo se hace uso de un control híbrido posición-fuerza/par, este robot se encuentra en reacción y el esquema de control se enfoca en conservar la fuerza de agarre.

Es importante recalcar que ambos robots son de arquitectura cerrada, esto quiere decir que no se tiene acceso a los algoritmos de control internos ni a las señales de control de sus actuadores. Los esquemas mencionados permiten el control de robots con arquitectura cerrada al utilizarse un lazo externo de fuerza/par, lográndose controlar tanto la posición como la fuerza en el efector final.

Los esquemas de control se programan en RAPID, el lenguaje de programación propio de ABB, por medio del software RobotStudio. Es importante mencionar que no se utiliza ningún kit de fuerza o de sincronización proporcionado por la marca, en su lugar se acondicionan sensores de fuerza/par de las marcas JR3 y ATI.

El dispositivo háptico desempeña dos tareas esenciales en el sistema, la primera consiste en interpretar los movimientos del humano a través del movimiento de su brazo articulado, para que sean imitados por uno de los robots industriales; la segunda tarea es transmitir al usuario por medio de sus actuadores la sensación de estar en contacto con el ambiente

que está experimentando el manipulador. La comunicación entre la interfaz háptica y el manipulador está basada en el protocolo TCP-IP con el modelo cliente/servidor, en la cual se manejan dos tipos de enlaces, alámbrico mediante cable ethernet e inalámbrico utilizando tecnología Wi-Fi.

Se describen los modelos matemáticos de cada elemento que integra al sistema cooperativo teleoperado, los cuales son la cinemática y dinámica del manipulador, la interacción del robot con el ambiente, el sistema teleoperado, el sistema cooperativo, la dinámica del objeto y los esquemas de control. Además, se realiza un análisis de estabilidad para todo el sistema en conjunto, en el cual no se abarcan los problemas de retardo y pérdida de información relacionados con la teleoperación.

Se realizan pruebas experimentales clasificadas en dos grupos, el primer grupo pertenece a las pruebas hechas únicamente con el sistema cooperativo, donde se muestra la manipulación del objeto a través de tres diferentes movimientos: horizontal provocado por un diferencial de fuerza, rotación sobre el eje central del objeto e inclinación fijando un punto de la superficie. El segundo grupo corresponde a las pruebas utilizando solo el sistema teleoperado, donde se presentan los resultados de la comunicación unilateral entre la interfaz maestra y el robot esclavo.

Abstract

This thesis work presents the concept of a teleoperated cooperative system that are constituted of two ABB industrial robots and a 3D Systems haptic device. This system aims to carry out manipulation tasks that require the dexterity and flexibility of a cooperative system, as well as the ability to track trajectories that involve force and position imposed by a human operator.

The hierarchy followed in the system begins when the human operator prints forces on the master robot causing the movement of its end effector, this master robot is the haptic interface that dictates orders through communication media that are followed by a single manipulator robot called slave robot, this slave robot is part of the cooperative system composed by two industrial robots and this imposes its movements on the other manipulator robot that is in reaction.

Two different control schemes are implemented in the industrial manipulators, for the first robot the hybrid position-force/torque extended control is used, which allows to insert a desired trajectory by modifying the force control reference, while for the second one a hybrid position-force/torque control is employed, this robot is in reaction and the control scheme focuses on conserving grip force.

It is important to emphasize that both robots have closed architecture, this means that there is no access to the internal control algorithms or to the control signals of their actuators, the mentioned schemes allow the control of robots with closed architecture by using an external force/torque loop, achieving control of position and force at the end effector.

The control schemes are programmed in RAPID, ABB's proprietary programming language, using RobotStudio software. It is important to mention that no force or synchronization kit provided by the brand is employed, instead force/torque sensors of the JR3 and ATI brands are fitted.

The haptic device performs two essential tasks in the system, the first one is to interpret the human's actions through the movement of its articulated arm, with the aim to be imitated by one of the industrial robots, the second task is to transmit to the user, by the aid of its actuators, the sensation of being in contact with the environment that the manipulator is experiencing. The communication between the haptic interface and the manipulator is based on the TCP-IP protocol with the client/server model, in which two

VIII

types of links are handled, wired through ethernet cable and wireless using Wi-Fi technology.

The mathematical models of each element that conforms the teleoperated cooperative system are described, which are the kinematics and dynamics of the manipulator, the interaction of the robot with the environment, the teleoperated system, the cooperative system, the dynamics of the object and the control schemes. In addition, a stability analysis is performed for the entire system, in which the problems of delay and loss of information related to teleoperation are not covered.

The experimental tests done are classified into two groups, the first one belongs to the tests made only with the cooperative system, where the manipulation of the object is shown through three different movements: horizontal caused by a force differential, rotation about the central axis of the object and inclination fixing a point on the surface, the second group corresponds to the tests using only the teleoperated system, where the results of the unilateral communication between the master interface and the slave robot are presented.

Contenido

Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	5
1.2. Motivación	7
1.3. Objetivos	7
1.4. Contribuciones	8
1.5. Organización	8
2. Modelos matemáticos	11
2.1. Modelo de interacción robot - ambiente	11
2.2. Representaciones de posición y orientación	14
2.3. Conversión de matriz de rotación a cuaternio	15
2.4. Robot manipulador	17
2.4.1. Modelo cinemático	17
2.4.2. Modelo dinámico	18
2.5. Sistema de robots cooperativos	19
2.5.1. Modelo dinámico del sistema cooperativo	20
2.5.2. Modelo dinámico del objeto	20
2.5.3. Modelo del agarre	21
2.6. Sistema maestro/esclavo	23
2.6.1. Modelo dinámico del sistema maestro/esclavo	23
3. Esquemas de control	25
3.1. Control híbrido posición-fuerza/par	25
3.1.1. Lazo interno de control de posición	27
3.1.2. Lazo externo de control de fuerza/par	28
3.2. Control híbrido posición-fuerza/par extendido	29
3.3. Control híbrido posición-fuerza/par en robots industriales ABB	31
3.4. Control híbrido posición-fuerza/par en el sistema teleoperado	32
3.5. Control híbrido posición-fuerza/par en el sistema cooperativo teleoperado	33
3.6. Análisis de Estabilidad	34
3.6.1. Modelo dinámico de los actuadores	34

3.6.2. Análisis del diagrama a bloques del sistema	36
4. Plataforma experimental	43
4.1. Componentes de la plataforma experimental	44
4.2. Canal de comunicación	45
4.3. Vector de posición y orientación (datos enviados)	47
4.4. Filtrado de las señales del dispositivo háptico	49
4.5. Interfaz gráfica de usuario	53
5. Resultados experimentales	55
5.1. Sistema cooperativo	55
5.1.1. Experimento 1: Movimiento horizontal del objeto a partir de un diferencial de fuerza.	58
5.1.2. Experimento 2: Rotación del objeto.	66
5.1.3. Experimento 3: Inclinación del objeto.	75
5.2. Teleoperación háptica	84
5.2.1. Comunicación unilateral	84
6. Conclusiones y trabajo futuro	91
6.1. Conclusiones	91
6.2. Trabajo futuro	92
Bibliografía	94
A. Fórmula de ganancia.	99
B. Funciones de transferencia.	101
B.1. Error de fuerza - Fuerza humano	101
B.2. Error de posición-I - Fuerza humano	104

Lista de Figuras

1.1.	Conjunto de robots ABB manipulando placas de madera. [1]	1
1.2.	Sistema cooperativo de robots Denso Wave manipulando una placa de metal para su inserción. [8]	2
1.3.	(a) Robot móvil explorador <i>Opportunity</i> de la NASA. (b) Foto captada por la cámara frontal del robot <i>Opportunity</i> donde se puede apreciar su sombra en la superficie de Marte. [11]	3
1.4.	Diagrama de comunicación en el sistema cooperativo teleoperado.	5
2.1.	Desplazamiento del manipulador en el ambiente.	12
2.2.	(a) Circuito RLC. (b) Sistema masa-resorte-amortiguador.	13
2.3.	Ubicación de un objeto en posición y orientación.	14
2.4.	Ejemplo de sistema cooperativo con dos robots manipuladores.	19
2.5.	Esquema de agarre en el objeto.	22
3.1.	Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par.	26
3.2.	Diagrama general del control de posición.	27
3.3.	Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par extendido.	30
3.4.	Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par en robots industriales.	31
3.5.	Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par extendido en robots industriales.	32
3.6.	Diagrama general del sistema teleoperado (relación maestro-esclavo).	33
3.7.	Diagrama general del sistema cooperativo teleoperado.	33
3.8.	Diagrama de un motor de DC.	34
3.9.	Diagrama a bloques del sistema teleoperado.	37
3.10.	Diagrama a bloques del sistema teleoperado mostrando salidas y entrada de interés.	38
4.1.	Diagrama del sistema maestro-esclavo.	43
4.2.	Modelo Cliente/Servidor.	46
4.3.	Marco coordinado original $\{A\}$ y marco coordinado trasladado $\{B\}$.	47
4.4.	Transformaciones aplicadas.	48
4.5.	Ejemplo del funcionamiento del filtro en la posición z .	51
4.6.	(a) Análisis espectral de las señal filtrada en la Figura 4.5 (b) Zoom del análisis espectral	51
4.7.	Diagrama de Bode de amplitud y fase.	52

4.8. Interfaz de usuario.	53
4.9. Diagrama de la comunicación cliente/servidor.	54
5.1. Sistema cooperativo físico.	56
5.2. Marcos coordenados del sistema cooperativo.	57
5.3. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 1.	61
5.4. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 1.	62
5.5. Error de posición en los ejes y en ambos robots, experimento 1.	63
5.6. Fuerza de referencia en el eje y del robot JR3, experimento 1.	63
5.7. Fuerza medida vs fuerza deseada en el eje y en ambos robots, experimento 1.	64
5.8. Error de fuerza en el eje y en ambos robots, experimento 1.	64
5.9. Posición de referencia en el eje y en ambos robots, experimento 1.	65
5.10. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 2.	69
5.11. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 2.	70
5.12. Error de posición en los ejes y, z en ambos robots, experimento 2.	71
5.13. Fuerza de referencia en el eje λ del robot JR3, experimento 2.	71
5.14. Fuerza medida vs fuerza deseada en el eje λ en ambos robots, experimento 2.	72
5.15. Error de fuerza en el eje λ en ambos robots, experimento 2.	72
5.16. Posición de referencia en el eje λ en ambos robots, experimento 2.	73
5.17. Ángulo del efector final (ϕ) en ambos robots, experimento 2.	74
5.18. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 3.	78
5.19. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 3.	79
5.20. Error de posición en los ejes y, z en ambos robots, experimento 3.	80
5.21. Fuerza de referencia en el eje y del robot JR3, experimento 3.	80
5.22. Fuerza medida vs fuerza deseada en ambos robots, experimento 3.	81
5.23. Error de fuerza en ambos robots, experimento 3.	81
5.24. Posición de referencia en ambos robots, experimento 3.	82
5.25. Momento medido vs momento deseado en el eje x del robot JR3, experimento 3.	82
5.26. Error de momento en el eje x del robot JR3, experimento 3.	83
5.27. Posición de referencia en el eje z del robot JR3, experimento 3.	83
5.28. Sistema teleoperado físico.	84
5.29. Posición real vs posición filtrada en los ejes x, y, z de la interfaz háptica Touch.	86
5.30. Posición en los ejes x, y, z de la interfaz háptica Touch.	87
5.31. Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3.	87
5.32. Componentes ϵ_0, ϵ_1 reales vs componentes ϵ_0, ϵ_1 filtradas del cuaternio en la interfaz háptica Touch.	88
5.33. Componentes reales ϵ_0, ϵ_1 vs componentes ϵ_0, ϵ_1 deseados del cuaternio en el robot JR3.	88

5.34. Componentes ϵ_2 , ϵ_3 reales vs componentes ϵ_2 , ϵ_3 filtradas del cuaternio en la interfaz háptica Touch.	89
5.35. Componentes reales ϵ_2 , ϵ_3 vs componentes ϵ_2 , ϵ_3 deseados del cuaternio en el robot JR3.	89
B.1. Diagrama a bloques del sistema teleoperado con el error de fuerza como salida.	101
B.2. Gráfica de flujo de señal con el error de fuerza como salida.	102
B.3. Malla 1 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).	102
B.4. Malla 2 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).	102
B.5. Malla 3 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).	103
B.6. Malla 4 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).	103
B.7. Diagrama a bloques del sistema teleoperado con el error de posición-I como salida.	104
B.8. Gráfica de flujo de señal con el error de posición-I como salida.	105
B.9. Malla 1 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).	105
B.10. Malla 2 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).	106
B.11. Malla 3 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).	106
B.12. Malla 4 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).	106

Lista de Tablas

3.1. Tabulación de Routh para el polinomio característico descrito en la ecuación (3.21)	40
4.1. Frecuencias de corte de las señales filtradas.	50
5.1. Ganancias de los controladores usadas en el experimento 1 del sistema cooperativo.	60
5.2. Ganancias de los controladores usadas en el experimento 2 del sistema cooperativo.	68
5.3. Ganancias de los controladores usadas en el experimento 3 del sistema cooperativo.	77
5.4. Factores de escalamiento en la posición enviada.	85

Capítulo 1

Introducción

La ciencia y la tecnología han sido participes del desarrollo de la humanidad, buscando facilitarle diferentes labores al ser humano, desde tareas simples a tareas más complejas que hubieran sido imposibles sin la invención y desarrollo de máquinas o dispositivos. Con el paso del tiempo diversas áreas de investigación fueron surgiendo y se fueron especializando a lo largo de los años, una de ellas fue la ingeniería y más específicamente la robótica.

El objeto de estudio de la robótica son los robots, los cuales han formado parte de la vida cotidiana del ser humano en las últimas décadas. En la actualidad se pueden encontrar en diferentes lugares como hospitales, escuelas, transportes, fabricas, estaciones espaciales, hogares, minas, empresas, entre muchos otros, siendo ahora imprescindibles para el día a día de la sociedad.

Los robots pueden clasificarse en diferentes tipos según el entorno donde se desempeñará, su morfología, su campo de aplicación, su tamaño, sus materiales de construcción, entre otros. En el área industrial su uso ha sido de vital importancia, especialmente el uso de robots manipuladores, debido a su flexibilidad, precisión, potencia y rapidez al ser utilizados para múltiples tareas.

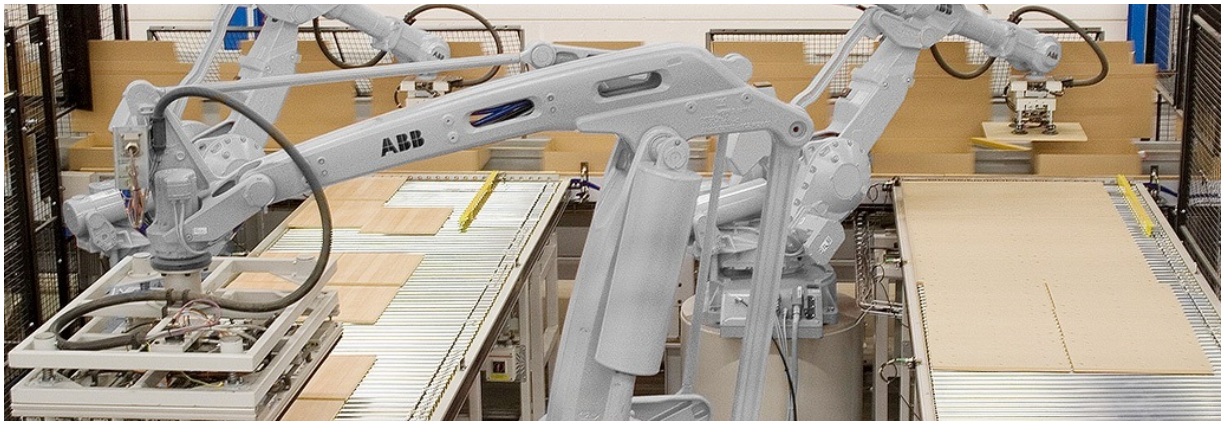


Figura 1.1: Conjunto de robots ABB manipulando placas de madera. [1]

Por esta razón el estudio de los robots manipuladores comprende una parte importante de la robótica, estos son mecanismos formados por elementos en serie, articulados entre sí, que dependiendo del tipo de efector final que se tenga, desempeñan diferentes labores como sujeción y desplazamiento de objetos por mencionar algunas. Muchas de estas tareas son logradas gracias al control de posición, permitiendo situar el manipulador en un punto específico dentro de su espacio de trabajo, un ejemplo de esto se muestra en la Figura 1.1, donde se presenta parte de una línea de producción dedicada a la fabricación de muebles de madera, donde tres brazos robóticos de marca ABB realizan "*pick and place*" es decir el tomar y colocar las placas de madera de un lugar a otro.

Aunque muchas tareas se cubren únicamente con el control de posición, muchas otras necesitan del control de fuerza para poderse desempeñar adecuadamente, un ejemplo de estas tareas es el ensamblaje o pulido de piezas, en donde es necesario conjuntar estos dos objetivos (el de llegar a una referencia y el de controlar con que fuerza se está haciendo la tarea). Existen diversos esquemas de control que tratan este tema, tales como control de impedancia (o admitancia) [2], [3], [4], complianza (o de rigidez) [5] e híbrido posición-fuerza [6], [7], cada uno de ellos con diferentes características que los hacen adecuados bajo diversas condiciones de trabajo.

Si bien un robot manipulador realiza actividades que un humano realizaría con menos precisión y rapidez, existen tareas en las que un solo robot no lograría cumplir el objetivo satisfactoriamente, una de ellas se presenta cuando se intenta manipular un objeto sin éxito, las causas pueden ser debidas a las propias características del objeto, como su peso, volumen o geometría, para solucionar este problema un sistema cooperativo entre dos o más robots es la clave para la resolución de este inconveniente, incrementando de esta manera la destreza, la flexibilidad, capacidad de carga, de manejo y robustez del sistema.

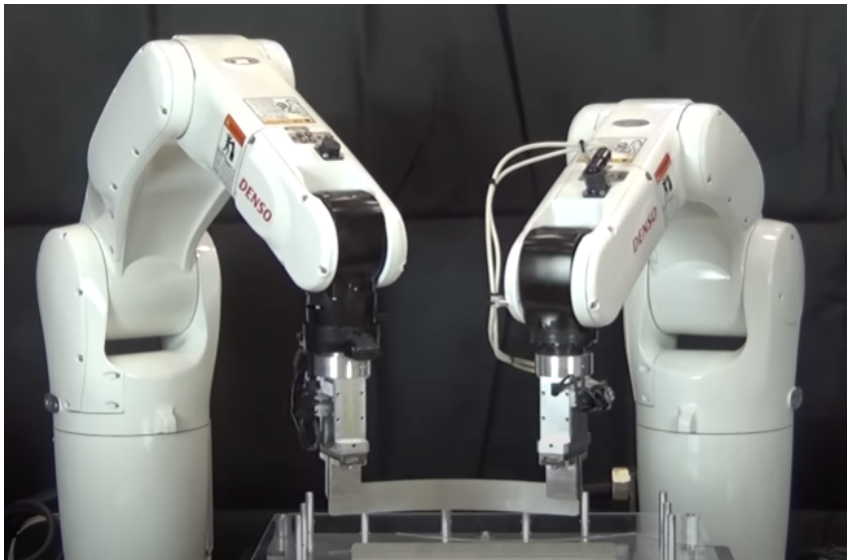


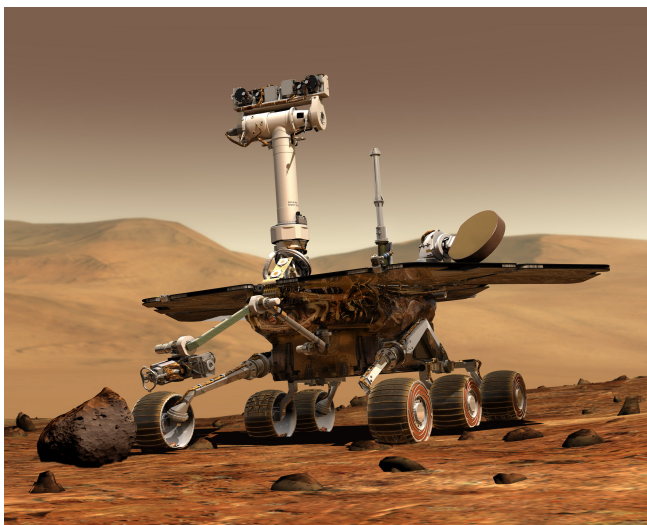
Figura 1.2: Sistema cooperativo de robots Denso Wave manipulando una placa de metal para su inserción. [8]

Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 1.2, donde un sistema cooperativo compuesto por dos robots Denso Wave manipulan una placa delgada de metal para insertarla en una trama distribuida de cilindros, esta tarea sería imposible con solo un robot puesto que la placa tiene que ser doblada y trasladada al lugar de inserción. Múltiples autores han tratado el tema robots cooperativos (citecontrolSlidingModes, [9], [7], [10], [4], con diferentes enfoques y diferentes esquemas de control, siendo un tema de estudio en la actualidad.

Aunque los robots cooperativos son capaces de realizar muchas funciones de forma autónoma con alta precisión y repetibilidad, aún necesitan intervención y orientación en forma de razonamiento y planificación de alto nivel. Dado que estas capacidades son inherentes a los humanos, es razonable emplear la interacción humano-robot.

La actividad que involucra a un humano controlando a un robot esclavo a través de un robot maestro de manera remota, es conocida como teleoperación, la cual ha sido empleada en un vasto campo de especialidades con la intención de no exponer al ser humano a terrenos peligrosos, cuando se encuentran geográficamente fuera de su alcance, o cuando la escala del área de trabajo difiere con la escala del ser humano.

Un ejemplo de la teleoperación es el robot móvil *Opportunity* de la NASA (Figura 1.3a), destinado a la exploración interplanetaria, específicamente dedicado a la investigación de la superficie de Marte. Terminó su conexión con la Tierra en el 2019 concluyendo con más de 15 años de trabajo, esta fue una solución para que el ser humano conociera un poco más a detalle el planeta rojo sin la necesidad de estar presente, evadiendo obstáculos como la distancia y la hostilidad del planeta.



(a)



(b)

Figura 1.3: (a) Robot móvil explorador *Opportunity* de la NASA. (b) Foto captada por la cámara frontal del robot *Opportunity* donde se puede apreciar su sombra en la superficie de Marte. [11]

Un excelente complemento de la teleoperación es la retroalimentación háptica que experimenta el usuario, esto es logrado gracias a sensores de fuerza ubicados en el efector final del robot esclavo, logrando transmitir esa percepción de su ambiente a través de sensaciones hápticas al operador, permitiendo sentir golpes, choques con objetos, o incluso el peso del objeto a operar. Si se conjunta una imagen visual con una sensación física del espacio, el usuario tendrá una mejor percepción del ambiente en que está controlando a su robot. Este tipo de comunicación es conocida como bilateral [12], [13], [14], es decir que el envío de datos fluye en ambos lados, tanto del maestro al esclavo para marcar la trayectoria a seguir, así como del esclavo al maestro para informar la fuerza del efector final.

Un aspecto importante en el sistema teleoperado es la forma del dispositivo maestro, cuando se tienen interfaces de control como joysticks o paneles (físicos o virtuales) con palancas y botones, el control del robot esclavo resulta menos intuitivo en comparación de mover una interfaz a través del espacio cartesiano. Es por esto que un robot como interfaz maestra resulta una mejor opción, y si sumado a esto la morfología de los robots si bien no es idéntica pero si parecida, resulta más intuitivo para el ser humano controlar al robot esclavo de forma natural, replicando de manera exacta los movimientos que el efector final del robot esclavo describirá, además de poder tener una referencia de la fuerza soportada por el manipulador.

Este trabajo se enfocará en un sistema cooperativo de dos robots manipuladores industriales ABB IRB2400 con arquitectura cerrada. Para ser más específicos, no se pueden controlar los actuadores de las articulaciones ni el algoritmo de control de posición que está implementado, por lo que se hará uso del software RobotStudio propio de la marca ABB. A través de palabras reservadas en el lenguaje de programación RAPID, se realizará el lazo de control de los robots, el esquema de control híbrido posición-fuerza será implementado sin la necesidad del kit de fuerza complementario que ofrece la marca, ya que cada uno de los robots está equipado con un sensor de fuerza de seis grados de libertad colocado en el efector final de marcas JR3 y ATI. La comunicación serial es usada para la conexión entre la computadora encargada de procesar los datos arrojados por los sensores y los controladores de cada robot, y la sincronización se lleva a cabo a partir de señales digitales entre los controladores de los robots.

El sistema teleoperado está conformado por una interfaz háptica Touch Haptic Device de 3D Systems y un robot manipulador que a su vez es parte del sistema cooperativo antes mencionado. El modelo empleado de comunicación será el de cliente/servidor usando los protocolos TCP/IP para el envío de datos. El agarre y la manipulación de objetos será la principal tarea de este sistema cooperativo teleoperado. La implementación de este esquema de control en el sistema será validado mediante una serie de experimentos con ayuda de un balón como objeto a manipular.

La Figura 1.4 muestra a groso modo la comunicación que existirá entre el operador, la interfaz y los robots que conforman el sistema cooperativo teleoperado.

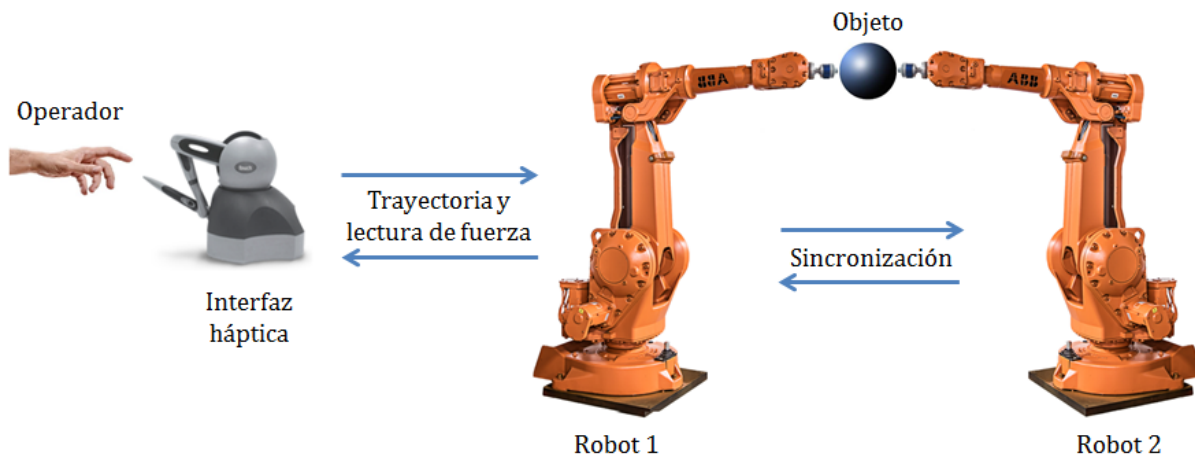


Figura 1.4: Diagrama de comunicación en el sistema cooperativo teleoperado.

1.1. Estado del Arte

Los sistemas cooperativos teleoperados han sido objeto de estudio en años recientes, cada una de las investigaciones ha sido enfocada a diferentes objetivos, como la estabilidad del sistema [15], retrasos de tiempo [16], manipulación de objetos deformables [17], control de uno o más robots esclavos [18], retroalimentación de fuerza entre otros.

Como ya se ha hablado con anterioridad, el control de robots en terrenos peligrosos ha sido un motivo determinante para el uso de este tipo de sistemas, un ejemplo se puede observar en [18] donde Seungyeol Lee y Jeon-Il Moon, implementan un software denominado *Integrated Robot System* (IRM) aplicado a un sistema *Single-Operator-Multiple-Robots* (SOMR), el cual permite al operador determinar el número de robots requeridos para ejecutar tareas de mantenimiento en plataformas petroleras que se encuentran mar adentro. El experimento se llevó a cabo a través de una interfaz háptica maestra y dos robots manipuladores esclavos, donde la tarea principal se enfocaba en la manipulación de una válvula industrial.

La medicina es un área donde estos sistemas también son altamente utilizados, un ejemplo se puede ver en [19], donde se enfocan en un control cartesiano apto para aplicaciones quirúrgicas mínimamente invasivas (MIS), en este artículo se comparan dos algoritmos diferentes para la retroalimentación de fuerza, los cuales son: algoritmo de reflexión de fuerza basada en proyección (PBF) y algoritmo de reflexión directa de fuerza (DFR), los cuales se evaluaron experimentalmente a través de tres tareas quirúrgicas diferentes: apriete de nudos, manipulación de piezas en un tablero adaptado y la manipulación de objetos. En este caso se hizo uso de dos interfaces hápticas maestras (Quanser haptic wand) y dos robots esclavos (Mitsubishi PA10-7C), equipados con herramientas especiales para prácticas quirúrgicas (da Vinci tools).

Como en el ejemplo anterior existen sistemas en donde una sola interfaz controla

únicamente un robot esclavo, por lo tanto para poder tener un sistema cooperativo es necesario tener dos interfaces y dos robots como mínimo, este tipo de sistemas es conocido como *Multiple-Operators-Multiple-Robots* (MOMR) o *Multiple-Masters-Multiple-Slaves* (MMMS), otro ejemplo de esto se puede ver en [15], donde el objetivo del artículo es comparar tres tipos diferentes de control de estabilización para el trabajo cooperativo entre sistemas de robots remotos con retroalimentación de fuerza. Los tres tipos de control de estabilización que se comparan en el artículo son: control de fuerza de reacción al golpear, control por viscosidad y el control con filtro. El experimento consistió en dos interfaces hápticas maestras (Geomagic Touch) y dos robots manipuladores industriales. Otro artículo que también cumple con estas características es [17], el cual trata un método de control articular para la teleoperación cooperativa multilateral enfocado a objetos deformables bajo diferentes consideraciones como retrasos de tiempo, retrasos de tiempo locales y la deformación no lineal del objeto. El experimento consistió en dos interfaces hápticas maestras (Falcon) y un robot con dos brazos articulados (ABB Yumi robot).

El caso contrario es presentado cuando solo una interfaz maestra controla múltiples robots esclavos, como ya se menciona en [18], estos sistemas son denominados *Single-Operator-Multiple-Robots* (SOMR) o bien *Single-Master-Multiple-Slaves* (SMMS), otros ejemplos son expuestos en [20] y [21], en el primero se presenta un esquema de control cartesiano para este tipo de sistemas, donde la tarea principal es el agarre y manipulación de un objeto, considerando la no linealidad e incertidumbre en la dinámica de los esclavos y el retraso variable en el tiempo en el canal de comunicación, basado en el enfoque de descomposición pasiva, la dinámica de los esclavos se separa en dos sistemas desacoplados (sistema de forma y sistema bloqueado), con dos controladores de modo deslizante de orden superior diseñados para controlarlos. Sus experimentos fueron realizados por una interfaz háptica maestra (Phantom Omni) y un par de robots quirúrgicos de 4 dof. En el segundo artículo se propone un esquema de control igualmente cartesiano para un sistema con las características mencionadas, este esquema de control de tiempo fijo esta basado en redes neuronales adaptativas y modos deslizantes. En el experimento fueron utilizados una interfaz maestra (Phantom Omni) y dos brazos manipuladores (Phantom Premium 1.5A robots).

Una contribución más a este tema se presenta en [22], donde el usuario manipula dos dispositivos hápticos (dedales) colocados en una mano con el objetivo de controlar cuatro robots manipuladores esclavos (KUKA LWR 4+), donde la tarea es la manipulación de un objeto, el esquema de control usado está basado en subtareas que permite la ejecución simultánea de estas, en este caso se ejecutan dos diferentes: cooperativa (manipulación del objeto) y relativa (agarre del objeto). El humano ordena ambas mediante un mapeo.

Como se puede observar los robots esclavos de estas investigaciones son realizados por fabricantes reconocidos en el campo de robots industriales, y en ninguno se menciona que la arquitectura sea cerrada como es nuestro caso, por lo que se asume que tienen control total de los actuadores del manipulador y son libres de aplicar sus esquemas de control.

1.2. Motivación

La continua innovación y desarrollo de la ingeniería robótica ha tenido un considerable progreso en las diversas áreas que la componen, esto es debido a las demandas que presenta día con día el mundo actual, cada vez más y más empresas buscan soluciones tecnológicas con el objetivo de minimizar tiempos y costos, y maximizar sus ganancias. Es por esta razón que las investigaciones enfocadas a sistemas cooperativos o telerobótica siguen aumentando y despertando interés en múltiples investigadores.

Si bien las empresas dedicadas a la producción de robots manipuladores han creado aditamentos para estos temas, los precios no resultan asequibles para todo el público. Reconocidas empresas como ABB o KUKA han desarrollado kits para el control de fuerza y equipos para sincronizar múltiples robots, que resultan convenientes cuando se tiene un presupuesto para ello, en caso contrario, se buscan alternativas para lograr el mismo objetivo sin la necesidad de estos aditamentos.

Es por esta razón que uno de los enfoques principales de la tesis es implementar un esquema de control híbrido posición-fuerza en la arquitectura cerrada de los robots manipuladores, esto es logrado colocando el lazo de control de fuerza de manera externa al control de posición implementado en el robot industrial. En relación a la sincronización, se llevará a cabo mediante señales digitales entre un controlador y otro.

En el caso de la teleoperación, existe una amplia gama de posibles interfaces hápticas maestras, que por el contrario de los robots industriales la gran mayoría están enfocadas a desarrolladores, por lo que es posible realizar un control directo en los actuadores y manipular el esquema de control que se desee implementar.

Como resultado se trabajará con un sistema cooperativo de dos robots manipuladores industriales ABB IRB2400 con arquitectura cerrada, cada uno equipado con un sensor de seis grados de libertad, la teleoperación será llevada a cabo mediante una interfaz háptica Touch Haptic Device de 3D Systems. Conjuntando de esta manera la cooperación como la teleoperación en un solo sistema con el objetivo de manipular objetos.

1.3. Objetivos

Cabe aclarar que debido a la epidemia ocasionada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), los experimentos planeados en un inicio de la tesis (divididos en: experimentos del sistema cooperativo, experimentos del sistema teleoperado y experimentos del sistema cooperativo teleoperado) no se pudieron completar debido a la evacuación de las instalaciones, por lo tanto surgió la necesidad de realizar modificaciones a los objetivos de la tesis.

El objetivo general de este trabajo de tesis es la realización de un sistema cooperativo teleoperado con retroalimentación háptica, a partir de dos robots manipuladores indus-

triales ABB IRB2400 con arquitectura cerrada y una interfaz háptica Touch HapticDevice de 3D Systems.

Para alcanzar dicho objetivo general, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Estudio del estado de arte en temas como: sistemas cooperativos, teleoperación háptica y control de fuerza en robots manipuladores.
- Implementación del control híbrido posición-fuerza/par en el sistema cooperativo.
- Validación experimental del esquema de control híbrido posición/fuerza-par implementado, a través de pruebas que permitan el movimiento horizontal, rotacional e inclinación del objeto.
- Establecer una comunicación entre el robot maestro y el robot esclavo del sistema teleoperado, además de crear un algoritmo de envío y recibo de datos entre los dispositivos.
- Validación experimental de la comunicación del sistema teleoperado y del esquema de control implementado, a través de pruebas con flujo de datos unidireccional.
- Conjuntar el sistema cooperativo y el sistema teleoperado validándolo a través de un análisis de estabilidad de los esquemas de control implementados en cada sistema.

1.4. Contribuciones

Las principales aportaciones de este trabajo de tesis incluye la realización de un sistema cooperativo teleoperado con retroalimentación háptica, realizado con dos robots manipuladores industriales ABB IRB2400, y una interfaz háptica Touch Haptic Device de 3D Systems. La implementación de un esquema de control híbrido posición-fuerza/par en robots industriales con arquitectura cerrada, así como la sincronización y control de fuerza sin la necesidad de aditamentos comerciales.

1.5. Organización

La presente Tesis está conformada por 6 capítulos. Donde el Capítulo 1, presenta los pormenores del trabajo con una introducción, así como el estado del arte, mostrando los trabajos previos que sirvieron como antecedente para la elaboración de esta tesis, se exponen las motivaciones para la realización, se describen también los objetivos propuestos para la culminación del proyecto, así como las contribuciones principales.

En el Capítulo 2 se presentan las representaciones de posición y orientación en la robótica y la conversión de la matriz de rotación a cuaternio, además de los diferentes modelos matemáticos correspondientes a la interacción del robot con el ambiente, los modelos del robot manipulador incluyendo el modelo cinemático y dinámico, el modelado del sistema cooperativo, el modelo dinámico del objeto y el modelo de agarre que se presenta entre el

efector final de los robots y el objeto a manipular, por último se muestra el modelado del sistema maestro/esclavo donde se expone el modelo dinámico de este sistema.

Los esquemas de control utilizados son presentados en el Capítulo 3, el esquema de control híbrido posición-fuerza/par así como el modelo extendido son descritos ampliamente, además de presentar un análisis de estabilidad que valide el sistema.

En el Capítulo 4 se presenta la plataforma experimental a usar, donde se describe cada uno de los dispositivos utilizados para realizar y comprobar lo propuesto en la tesis, entre ellos se encuentran la interfaz háptica touch, los robots ABB IR2400, los sensores de fuerza/par, los canales de comunicación, la obtención del vector de posición y orientación para el envío de datos en la teleoperación, el filtrado de las señales del dispositivo háptico, así como una explicación de la realización de la interfaz gráfica de usuario.

Los resultados experimentales son mostrados en el Capítulo 5 donde los experimentos se encuentran divididos en dos diferentes subsistemas: el sistema cooperativo y la teleoperación háptica.

En el Capítulo 6 se encuentran las conclusiones a las que se llegaron al realizar la tesis haciendo comentarios de los objetivos alcanzados así como el trabajo a futuro que se puede seguir realizando como continuación de esta tesis.

Capítulo 2

Modelos matemáticos

A continuación se muestran los modelos matemáticos que describen el movimiento de los robots manipuladores tanto de manera independiente como del sistema cooperativo y del sistema teleoperado, así como la interacción entre los robots y el objeto manipulado.

2.1. Modelo de interacción robot - ambiente

Cuando se habla de un sistema cooperativo, la manipulación de objetos es una tarea que siempre será estudiada, por lo que la interacción mecánica entre el efector final de un robot manipulador y su ambiente (o entorno) es analizada en esta sección.

En relación al robot y el ambiente como sistemas físicos, el flujo de energía instantánea entre estos se puede definir como el producto de dos variables conjugadas, un esfuerzo (por ejemplo, una fuerza, un voltaje) y un flujo (por ejemplo, una velocidad, una corriente) [2]. Visto desde este enfoque los sistemas físicos están clasificados en dos tipos: de admitancia, el cual recibe como entrada un esfuerzo y da como salida un flujo, o de impedancia, que recibe como entrada un flujo y da como salida un esfuerzo.

Una de las características más importantes en la interacción dinámica entre dos sistemas físicos es que uno siempre complementa al otro, si uno es un sistema de impedancia, el otro tiene que ser de admitancia y viceversa. En el caso de un robot manipulador y su ambiente, el ambiente generalmente contiene inercias y/o restricciones cinemáticas, a las cuales siempre se les puede imprimir una fuerza pero no siempre se les puede mover, por lo que el entorno es considerado una admitancia. Siguiendo la regla enunciada al principio de este párrafo, el robot manipulador es en consecuencia una impedancia.

Si el entorno es una admitancia, entonces el robot manipulador debe ejercer una fuerza sobre este, la cual se obtiene con la siguiente relación entre un desplazamiento de entrada ($X - X_s$) y por consiguiente una fuerza de salida [3].

$$h_R = M(\ddot{X} - \ddot{X}_s) + B(\dot{X} - \dot{X}_s) + K(X - X_s) \quad (2.1)$$

Donde:

$h_R \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerza y momentos de reacción

$M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz de masa e inercia del ambiente

$B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz de amortiguamiento del ambiente

$K \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz de rigidez del ambiente

$X \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de posición y orientación del efector final

$X_S \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de posición y orientación del efector final en el punto de contacto con la superficie

Con:

$$h_R = \begin{bmatrix} f_R \\ M_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{R_x} \\ f_{R_y} \\ f_{R_z} \\ M_{R_x} \\ M_{R_y} \\ M_{R_z} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad X_S = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \\ \alpha_S \\ \beta_S \\ \gamma_S \end{bmatrix}$$

donde f_R y M_R son vectores de fuerza y momento de reacción, cada uno con sus respectivas componentes en el espacio cartesiano $(f_{R_x}, f_{R_y}, f_{R_z})$ y $(M_{R_x}, M_{R_y}, M_{R_z})$, además la posición cartesiana del efector final esta expresada con las componentes (x, y, z) , así como la posición cartesiana en el punto de contacto con la superficie (x_S, y_S, z_S) , finalmente la orientación del efector final esta expresada con los tres ángulos (α, β, γ) , así como la orientación del efector final en el punto de contacto con la superficie $(\alpha_S, \beta_S, \gamma_S)$. Cabe aclarar que estas posiciones y orientaciones son medidas a partir de un marco fijo, en este caso el marco que es propio del robot manipulador.

La resta entre el vector de posición y orientación del efector final en el punto de contacto con la superficie y el vector de posición y orientación del efector final $(X - X_S)$ corresponden a los desplazamientos lineales y angulares del efector final del robot, respecto al punto de contacto, esto se puede apreciar en la Figura 2.1.

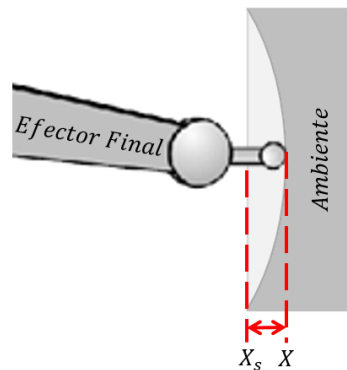


Figura 2.1: Desplazamiento del manipulador en el ambiente.

Recordemos que la impedancia es un concepto en el campo de la electrónica, la cual representa la oposición a la corriente eléctrica. Haciendo la analogía de un circuito eléctrico RLC (Figura 2.2a) con un sistema mecánico (Figura 2.2b), la ecuación general que representa este sistema es la mostrada en la ecuación (2.1).

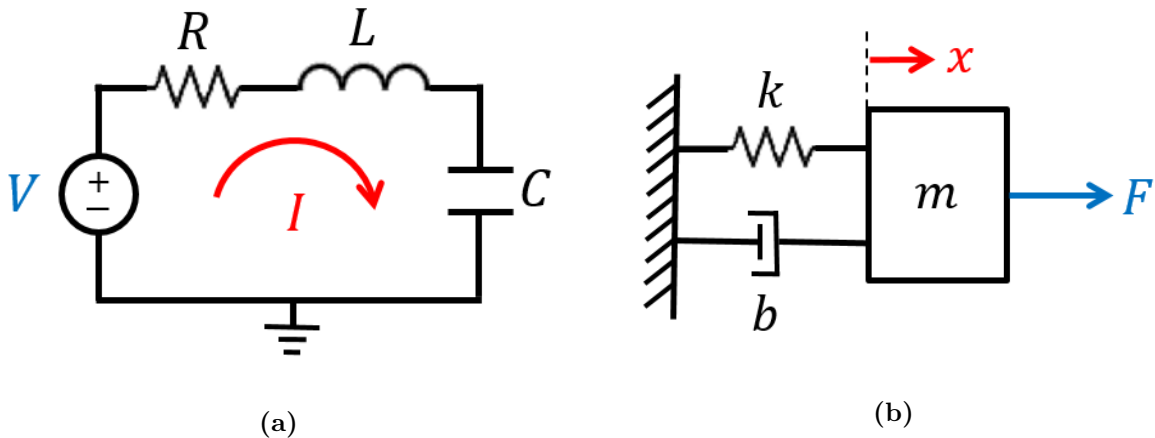


Figura 2.2: (a) Circuito RLC. (b) Sistema masa-resorte-amortiguador.

Donde R , L y C representan el resistor, inductor y capacitor del circuito eléctrico, así como V el voltaje e I la corriente que circula a través de este, m , k y b representan la masa, la rigidez y el amortiguamiento del sistema mecánico, así como F la fuerza y x el desplazamiento.

El modelo de impedancia completo mostrado en la ecuación (2.1) es muy adecuado cuando se quiere realizar control por impedancia [3], sin embargo en este trabajo se utiliza la ecuación (2.2), que representa un modelo simplificado de la ecuación completa.

$$h_R = K(X - X_S) \quad (2.2)$$

Esto es un equivalente a tener el comportamiento de un resorte (de rigidez K) y se dice que el ambiente es capacitivo. Esta ecuación es usada para modelar el sensor de fuerza y obtener una fuerza de reacción en simulaciones, además este tema será la base para explicar el esquema de control mostrado más adelante.

2.2. Representaciones de posición y orientación

Para representar la posición y la orientación relativa de un cuerpo rígido con respecto a otro, es necesario adjuntar un marco coordenado a cada cuerpo para poder especificar las relaciones geométricas que existen entre estos marcos.

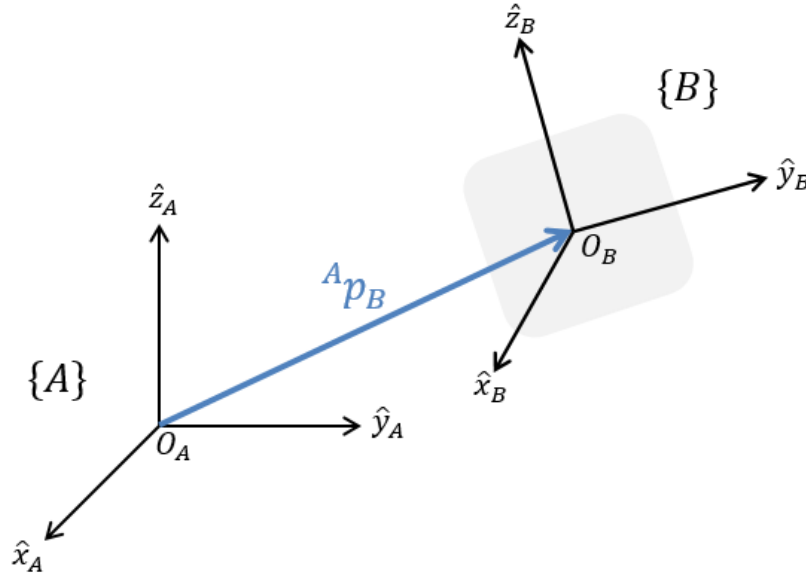


Figura 2.3: Ubicación de un objeto en posición y orientación.

Respecto a la posición, la ubicación de un punto o un objeto (con un marco coordenado adjunto) puede determinarse a partir de un vector ${}^A p_B \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ respecto a un marco coordenado base $\{A\}$ (Figura 2.3) de la siguiente manera:

$${}^A p_B = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Cada uno de los componentes de este vector representa las proyecciones del vector ${}^A p_B$ sobre los ejes del marco coordenado $\{A\}$.

La posición no es suficiente para ubicar completamente un cuerpo, la orientación también es esencial para determinar por completo la ubicación del objeto. A diferencia de la posición, la orientación tiene muchas representaciones tales como matrices de rotación, ángulos de Euler, ángulos fijos (roll-pitch-yaw), ángulo-eje, cuaternios entre otras, cada uno con sus características particulares que nos hacen querer trabajar con uno o con otro, en este trabajo nos enfocaremos principalmente a dos representaciones: matrices de rotación y cuaternios, sus características son descritas a continuación.

Una matriz de rotación en un espacio tridimensional contiene nueve elementos acomodados en una matriz de (3×3) , está se compone de vectores mutuamente ortonormales, razón por la cual es considerada una matriz ortogonal, además es perteneciente al $SO(3)$ (*Special Orthogonal Group (3)*). Tomando como ejemplo el esquema de la Figura 2.3, la matriz de rotación que representa la orientación del marco coordenado $\{B\}$ con respecto al marco $\{A\}$ es [23]:

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} \hat{x}_B \cdot \hat{x}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{x}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{x}_A \\ \hat{x}_B \cdot \hat{y}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{y}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{y}_A \\ \hat{x}_B \cdot \hat{z}_A & \hat{y}_B \cdot \hat{z}_A & \hat{z}_B \cdot \hat{z}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Los componentes de ${}^A R_B$ son los productos punto de los vectores unitarios de los marcos coordenados, cada eje del marco $\{A\}$ se proyecta sobre el marco $\{B\}$.

Por otra parte el cuaternio es una representación de orientación con la siguiente forma:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 i + \epsilon_2 j + \epsilon_3 k \quad (2.5)$$

Donde $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ y ϵ_3 son escalares e i, j y k son operadores que cumplen con las siguientes reglas:

$$\begin{aligned} ii &= jj = kk = -1, \\ ij &= k, jk = i, ki = j, \\ ji &= -k, kj = -i, ik = -j \end{aligned} \quad (2.6)$$

En muchas referencias se conoce a ϵ_0 como la parte escalar del cuaternio y a $(\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3)^T$ como la parte vectorial.

El cuaternio unitario es el utilizado para describir una orientación, y esté puede ser definido de la siguiente manera:

$$\epsilon \tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon} \epsilon = \epsilon_0^2 + \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 = 1 \quad (2.7)$$

Si la multiplicación del cuaternio ϵ por su conjugado $\tilde{\epsilon}$ es igual a uno, el cuaternio es unitario y por lo tanto puede representar una orientación.

2.3. Conversión de matriz de rotación a cuaternio

Uno de los principales obstáculos en la comunicación interfaz-robot es la cantidad de datos enviados de un controlador a otro, ya que el envío de estos datos se limita a un cierto número de caracteres, razón por la que es importante ser selectivos a la hora de enviar estos datos.

Una de las ventajas que nos ofrece un cuaternio en comparación a una matriz de rotación es sin duda el número de datos que componen a cada una de estas representaciones,

mientras que la matriz tiene nueve componentes, el cuaternio tiene solo cuatro, resultando este último el mejor partido en cuando a cantidad de datos.

Si bien el paso de un cuaternio a la matriz de rotación correspondiente está dado por la fórmula de Euler-Rodrigues, al revés se puede realizar de muchas maneras diferentes. Aunque todos ellos son algebraicamente equivalentes, su comportamiento numérico puede ser bastante diferente, es por eso que a pesar de que en múltiples bibliografías se encuentra el cálculo de un cuaternio a partir de una matriz de rotación dada, nos inclinamos por probar el método presentado en [24]. Este método fue el elegido ya que su porcentaje de precisión en comparación con otros métodos (incluido el método Shepperd) aumenta modestamente sin aumentar el costo computacional.

Las ecuaciones propuestas por este método son las siguientes:

$$\epsilon_0 = \begin{cases} \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}}, & \text{si } r_{11} + r_{22} + r_{33} > \eta \\ \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(r_{32}-r_{23})^2+(r_{13}-r_{31})^2+(r_{21}-r_{12})^2}{3-r_{11}-r_{22}-r_{33}}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_1 = \begin{cases} \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} - r_{22} - r_{33}}, & \text{si } r_{11} - r_{22} - r_{33} > \eta \\ \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(r_{32}-r_{23})^2+(r_{12}+r_{21})^2+(r_{31}+r_{13})^2}{3-r_{11}+r_{22}+r_{33}}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_2 = \begin{cases} \frac{1}{2}\sqrt{1 - r_{11} + r_{22} - r_{33}}, & \text{si } -r_{11} + r_{22} - r_{33} > \eta \\ \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(r_{13}-r_{31})^2+(r_{12}+r_{21})^2+(r_{23}+r_{32})^2}{3+r_{11}+r_{22}-r_{33}}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\epsilon_3 = \begin{cases} \frac{1}{2}\sqrt{1 - r_{11} - r_{22} + r_{33}}, & \text{si } -r_{11} - r_{22} + r_{33} > \eta \\ \frac{1}{2}\sqrt{\frac{(r_{21}-r_{12})^2+(r_{31}+r_{13})^2+(r_{32}+r_{23})^2}{3+r_{11}+r_{22}-r_{33}}}, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.11)$$

Debido a la presencia de raíces cuadradas, los signos de ϵ_i , con $i = 1, \dots, 4$ no están definidos. En este método si se supone que ϵ_0 es positivo, se asignan los signos de $(r_{32} - r_{23})$, $(r_{13} - r_{31})$ y $(r_{21} - r_{12})$, a ϵ_2 , ϵ_3 y ϵ_4 , respectivamente.

Donde η representa un umbral, el cual su valor numérico fue determinado a través de análisis estadísticos para obtener la mayor precisión, donde el valor de $\eta = 0$ arroja el valor más bajo para: el peor de los casos, error promedio y desviación estándar, razón por la que cero fue elegido como umbral en este trabajo.

2.4. Robot manipulador

En esta sección se presenta el modelo cinemático (directo, inverso y diferencial) y el modelo dinámico (libre y restringido) de un robot manipulador en general.

2.4.1. Modelo cinemático

La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo originan y se limita, principalmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo.

Un robot manipulador consiste en una cadena cinemática de $n+1$ eslabones con n articulaciones, estas articulaciones se clasifican de manera general en dos tipos: prismáticas y de revolución, que permiten el movimiento lineal y angular respectivamente. De acuerdo a la geometría del manipulador se pueden calcular la posición, orientación, velocidad y aceleración de cualquier punto en esta cadena respecto a un marco base, el último eslabón es el que representa mayor interés ya que en este se encuentra el efector final del cuerpo.

Actualmente existen muchas referencias en el ámbito de la robótica que explican a detalle y por diversos métodos la obtención del modelo cinemático de un robot manipulador, tanto de cadena abierta como de cadena cerrada [25], [26], [27].

A continuación se explicarán los tres modelos cinemáticos que se obtienen [28]:

- **Modelo cinemático directo:** este modelo permite determinar la posición y orientación del efector final ($X \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$) en función de las variables articulares ($q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$) (donde n representa los grados de libertad del robot manipulador):

$$X = f_{CD}(q) \quad (2.12)$$

- **Modelo cinemático inverso:** al contrario del modelo cinemático directo, a partir de la posición y orientación del efector final, se establece el valor de las variables articulares a través de la siguiente relación:

$$q = f_{CI}(X) \quad (2.13)$$

- **Modelo cinemático diferencial:** el Jacobiano ($J \in \mathbb{R}^{6 \times n}$) es una matriz que establece la relación entre la velocidad de las variables articulares ($\dot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$) y la velocidad lineal ($\nu \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$) y angular ($\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$) del efector final a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \nu \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q} \quad (2.14)$$

En el caso particular de $n = 6$, es posible obtener la inversa del Jacobiano, la cual es necesaria si se requiere determinar las velocidades articulares a partir de las velocidades cartesianas, solo hay que tener en cuenta las posibles singularidades que se

lleguen a presentar ya que en estos puntos no es posible obtener la inversa y por lo tanto se tienen que evitar.

Cuando $n \neq 6$, el Jacobiano se convierte en una matriz rectangular que no tiene inversa, para estos casos se utiliza una matriz conocida como la pseudoinversa de Moore-Penrose (o simplemente pseudoinversa).

Considerando $U \in \mathbb{R}^{m \times n}$ con rango k , se tienen los siguientes casos para el cálculo de la pseudoinversa [29]:

$$\blacktriangleright m < n, k = m \quad U^\dagger = U^T(UU^T)^{-1} \quad (2.15)$$

$$\blacktriangleright m > n, k = n \quad U^\dagger = (U^TU)^{-1}U^T \quad (2.16)$$

Otra relación importante que se obtiene gracias al Jacobiano, es la existente entre las fuerzas ($f_R \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$) y momentos ($M_R \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$) aplicados por el efector final y los pares presentes en las articulaciones ($\tau_R \in \mathbb{R}^{n \times 1}$) cuando el efector entra en contacto con el ambiente,

$$\tau_R = J(q)^T h_R \quad (2.17)$$

2.4.2. Modelo dinámico

En un modelo dinámico en comparación con uno cinemático, se consideran fuerzas y pares que producen movimiento, por lo tanto estas ecuaciones describen la relación que existe entre fuerzas y movimiento, tomando en cuenta las características físicas de robot tal como masas, longitudes, inercias, etc.

Existen diferentes métodos para calcular estas ecuaciones, uno de los más usados es el de Euler-Lagrange, que a través de la obtención de energías cinéticas y potenciales se logra calcular el modelo dinámico de un sistema en términos de las variables articulares [25], [26], [27].

Existen dos principales modelos dinámicos que serán expuestos a continuación:

- **Dinámica de movimiento libre:** Este modelo es usado cuando el manipulador no esta en contacto con el ambiente, es decir, no hay fuerzas externas que impidan su movimiento, por lo tanto la ecuación que representa este comportamiento es:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q\dot{q} + g(q) = \tau_a \quad (2.18)$$

- **Dinámica de movimiento restringido:** Este modelo se presenta cuando el manipulador se encuentra en contacto con el ambiente, por lo tanto los pares generados por el contacto se vuelven presentes en la ecuación como se puede ver a continuación:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q\dot{q} + g(q) = \tau_a + \tau_R \quad (2.19)$$

Donde:

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, posición, velocidad y aceleración de las variables articulares.

$D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz de masas e inercias

$C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis

$Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz de coeficientes de fricción viscosa

$g(q) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, vector de efectos gravitacionales

$\tau_a \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, vector de pares aplicados a las articulaciones por los actuadores

$\tau_R \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, vector de pares generados en las articulaciones debidas a las fuerzas de reacción.

Recordemos que el par generado τ_R esta dado por la ecuación (2.17).

El modelo dinámico es de vital importancia al momento de simular, animar, analizar estructuras del manipulador (eslabones, articulaciones) y para el diseño de algoritmos de control ya que describen el comportamiento del sistema sin la necesidad de tener el robot de manera física.

2.5. Sistema de robots cooperativos

Un sistema cooperativo de robots manipuladores se caracteriza por llevar a cabo tareas que un solo manipulador no puede ejercer, por ejemplo, manipular objetos con amplias dimensiones, con gran peso o con propiedades geométricas y físicas particulares. Un sistema cooperativo esta conformado por m robots manipuladores, los cuales se relacionan con el objeto de una manera sincronizada para poder llevar a cabo una tarea y es gracias a esta interacción el éxito de la misma.

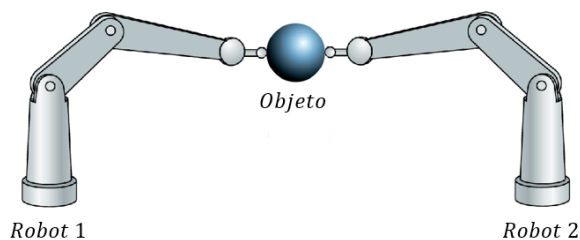


Figura 2.4: Ejemplo de sistema cooperativo con dos robots manipuladores.

2.5.1. Modelo dinámico del sistema cooperativo

Un sistema cooperativo de manipuladores esta conformado por m -robots los cuales tienen un objeto en común, por lo tanto la dinámica de cada manipulador sera de movimiento restringido, la ecuación dinámica para el i -ésimo robot manipulador del sistema cooperativo esta dada por la siguiente ecuación [30], [23]:

$$D_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + Q_i\dot{q}_i + g_i(q_i) = \tau_{ai} + J_i^T(q_i)h_i \quad \text{con } i = 1, \dots, m. \quad (2.20)$$

La ecuación dinámica para un sistema de m -robots manipuladores puede escribirse de forma compacta como se muestra a continuación:

$$D_{sc}(q_{sc})\ddot{q}_{sc} + C_{sc}(q_{sc}, \dot{q}_{sc})\dot{q}_{sc} + Q_{sc}\dot{q}_{sc} + g_{sc}(q_{sc}) = \tau_{asc} + J_{sc}^T(q_{sc})h_{sc} \quad (2.21)$$

donde las matrices son diagonales a bloques (*blockdiag*) y los vectores están apilados. Dentro de estas matrices a bloques se encuentran las matrices de cada robot y están acomodadas de manera diagonal con el objetivo de no combinar la dinámica de un robot con la del otro, teniendo el modelo de todos los robots en una sola ecuación matricial que permitiría hacer el análisis de todo el sistema como se hace en [7].

Si el sistema cooperativo esta conformado por dos robots ($m = 2$), la matrices y vectores se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} D_{sc} &= \text{blockdiag}(D_1, D_2) \\ C_{sc} &= \text{blockdiag}(C_1, C_2) \\ Q_{sc} &= \text{blockdiag}(Q_1, Q_2) \\ g_{sc} &= [g_1^T, g_2^T]^T \\ \tau_{asc} &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T \\ J_{sc} &= \text{blockdiag}(J_1, J_2) \\ q_{sc} &= [q_1^T, q_2^T]^T \\ h_{sc} &= [h_1^T, h_2^T]^T \end{aligned}$$

Donde el subíndice "sc" hace referencia al sistema cooperativo de los m -robots.

2.5.2. Modelo dinámico del objeto

Un grupo de robots manipuladores se vuelve un sistema cooperativo cuando todos entran en contacto con un objeto en común. Éste objeto se encuentra dinámicamente acoplado a cada uno de los robots que ejercen una fuerza o par sobre él, la ecuación que describe esta interacción en el objeto es la siguiente [30]:

$$M_e \dot{v}_e^e + C_e(v_e^e)v_e^e + g_e^e = h_e^e \quad (2.22)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 M_e &= \begin{bmatrix} m_e I & O \\ O & J_e^e \end{bmatrix} \\
 C_e(v_e^e) &= \begin{bmatrix} m_e S(\omega_e^e) & O \\ O & S(\omega_e^e) J_e^e \end{bmatrix} \\
 g_e^e &= \begin{bmatrix} -m_e g_0^e \\ 0 \end{bmatrix} \\
 v_e^e &= \begin{bmatrix} \dot{p}_e^e \\ \omega_e^e \end{bmatrix} \\
 h_e^e &= \begin{bmatrix} f_e^e \\ M_e^e \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

v_e^e es el vector de velocidades lineales y angulares del marco coordenado adjunto al objeto $\{\Sigma_e\}$ (Figura 2.5), m_e es la masa del objeto, J_e^e es el tensor de inercia del objeto referido al marco $\{\Sigma_e\}$, g_0^e es el vector de fuerzas gravitacionales h_e^e es el vector de fuerzas generalizadas ejercidas por los manipuladores en el objeto, es decir, las fuerzas externas. O denota una matriz nula, I denota una matriz identidad, $S(\cdot)$ es un operador matricial antisimétrico generado por el producto cruz.

2.5.3. Modelo del agarre

Un agarre, en robótica, se define por dos cosas: 1) el conjunto de puntos o regiones de agarre y, 2) las fuerzas ejercidas en dichos puntos o regiones. Este fenómeno ocurre cuando los efectores finales de los manipuladores tocan y sujetan al cuerpo, esta acción genera tanto fuerzas externas como internas en el objeto, las cuales serán estudiadas a continuación.

Considerando la superficie del objeto como $S(x, y, z) = 0$ y un marco de referencia $\{\Sigma_e\}$ ubicado en el centro de masa del objeto, (ver Figura 2.5).

En el caso tridimensional la posición del punto de contacto respecto al centro de masa del objeto es $r_j = (r_{xj}, r_{yj}, r_{zj})^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ donde $j = 1, \dots, p$, siendo p el número de puntos de contacto. Las fuerzas generalizadas aplicadas en cada punto de contacto $(h_1^T, h_2^T, \dots, h_p^T)^T$ generan dos vectores resultantes respecto al marco coordenado $\{\Sigma_e\}$, h_e^e que representa el vector de fuerzas externas, y h_i^e el vector de fuerzas internas, encargado de generar tensiones mecánicas aplicadas al objeto [30].

El vector h_i^e , es el encargado de representar las tensiones mecánicas aplicadas al objeto, generalmente estas fuerzas son causadas cuando se intentan violar las restricciones de agarre. Por otro lado, el vector de fuerzas externas h_e^e es el encargado de generar movimiento en el objeto y es el vector ubicado en la ecuación (2.22), recordando que son las fuerzas resultantes de la interacción manipuladores-objeto.

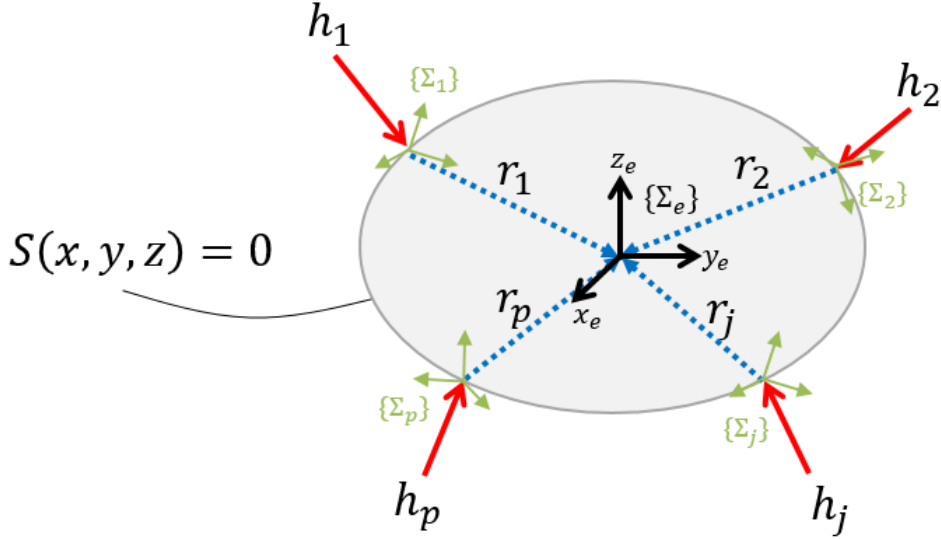


Figura 2.5: Esquema de agarre en el objeto.

El mapeo de las fuerzas aplicadas al objeto h_{sc} en los marcos coordenados $\{\Sigma_1\}, \{\Sigma_2\}, \dots, \{\Sigma_p\}$ al marco coordenado del objeto $\{\Sigma_e\}$ es logrado a partir de una matriz de agarre denominada $W = (w_1, w_2, \dots, w_p)$.

Si se considera el modelo de punto de contacto sin fricción, el cual supone que las fuerzas se aplican perpendicularmente a la superficie en todo momento, entonces se cumple la ecuación:

$$h_e^e = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_p][h_1^T, h_2^T, \dots, h_j^T, \dots, h_p^T]^T = Wh_{sc} \quad (2.23)$$

Con:

$$w_j = \begin{bmatrix} I_3 & O_3 \\ S(r_j) & I_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Donde O_3 denota una matriz nula, I_3 denota una matriz identidad y $S(\cdot)$ es un operador matricial antisimétrico que genera el producto cruz:

$$S(r_j) = \begin{bmatrix} 0 & r_{zj} & r_{yj} \\ r_{zj} & 0 & -r_{xj} \\ -r_{xj} & r_{yj} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Para una h_e^e dada, la solución inversa esta dada por:

$$h_{sc} = W^\dagger h_e^e + V h_i^e = h_E + h_I \quad (2.26)$$

Donde W^\dagger representa la pseudoinversa de W y V es una matriz que genera el espacio nulo de W . La ecuación que representa el vector de fuerzas externas que equilibran la dinámica del objeto, así como las fuerzas de contacto debido a la interacción con el ambiente es la siguiente:

$$h_E = W^\dagger W h_{sc} \quad (2.27)$$

Y para h_I que representa el vector de fuerzas internas producidas por los efectores finales en los puntos de contacto, las cuales contribuyen con las tensiones y torsiones mecánicas del objeto, se tiene lo siguiente:

$$h_I = V h_i^e = V V^\dagger h_{sc} \quad (2.28)$$

2.6. Sistema maestro/esclavo

2.6.1. Modelo dinámico del sistema maestro/esclavo

En un sistema compuesto por un robot maestro (m) y un robot esclavo (s), que no tienen necesariamente la misma configuración cinemática, se realiza un intercambio de señales como posiciones, velocidades y/o fuerzas con el fin de que el esclavo intente imitar el comportamiento del maestro. Las ecuaciones (2.29) y (2.30) representan las ecuaciones de un robot manipulador maestro y un robot manipulador esclavo, ambos en interacción con su entorno. En el caso del maestro en interacción con el humano; en el caso del esclavo, con el entorno remoto [17], [16].

$$D_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + Q_m\dot{q}_m + g_m(q_m) = \tau_{am} - J_m(q_m)^T h_m \quad (2.29)$$

$$D_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + Q_s\dot{q}_s + g_s(q_s) = \tau_{as} - J_s(q_s)^T h_s \quad (2.30)$$

Suponiendo que cada robot tiene n_i grados de libertad, con $i = \{m, s\}$ se tiene:

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in \mathbb{R}^{n_i \times 1}$, posición, velocidad y aceleración de las variables articulares.

$D_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, matriz de masas e inercias

$C_i(q_i, \dot{q}_i) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis

$Q_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, matriz de coeficientes de fricción viscosa

$g_i(q_i) \in \mathbb{R}^{n_i \times 1}$, vector de efectos gravitacionales

$\tau_{ai} \in \mathbb{R}^{n_i \times 1}$, vector de pares aplicados a las articulaciones por los actuadores

$J_i \in \mathbb{R}^{6 \times n_i}$, matriz jacobiana del robot

$h_m \in \mathbb{R}^{n_m \times 1}$, vector de fuerzas y momentos debidas a la manipulación del operador.

$h_s \in \mathbb{R}^{n_s \times 1}$, vector de fuerzas y momentos debidas al contacto con el ambiente.

De esta manera el sistema teleoperado esta descrito matemáticamente.

Capítulo 3

Esquemas de control

En este capítulo se expondrán los esquemas de control utilizados en el sistema cooperativo teleoperado. Las variables a controlar serán la posición y la fuerza, con el objetivo de realizar tareas de manipulación de objetos.

Se explicará a detalle el control híbrido posición-fuerza/par así como su variante el control híbrido posición-fuerza/par extendido [7], [10]. El control de posición y el control de fuerza/par serán implementados a través de los esquemas de control PID y PI respectivamente.

Es necesario recalcar que el control de fuerza estará activo cuando el robot manipulador esté en contacto con el ambiente. En pruebas físicas el sensor de fuerza/par es el encargado de realizar la retroalimentación de fuerza/par y también de esta manera asegurar que existe un contacto para activar dicho control.

3.1. Control híbrido posición-fuerza/par

Como se ha expuesto con anterioridad, el control de posición ya no es suficiente para controlar la interacción entre el robot manipulador y el ambiente, es por esta razón que múltiples autores se han enfocado en el estudio del control de fuerza.

El control de interacción puede dividirse en dos grandes categorías: pasivo y activo [23]. El control pasivo va enfocado a la seguridad del ser humano, que a través de dispositivos que limitan el par en las articulaciones o detectores de colisiones, evitan posibles daños al ser humano o a las instalaciones. A pesar de ser rápidos en reacción y baratos de implementar, no tienen la flexibilidad y precisión que se necesitan a la hora de manipular un objeto.

En el control de interacción activo se utilizan sistemas de control para garantizar que las fuerzas de reacción se encuentren debajo de un límite razonable, es común el uso de sensores de fuerza y momento para retroalimentar el controlador. El enfoque del control activo va dirigido a la mejora de los procesos, y este se divide en dos subcategorías: directo

e indirecto.

En la categoría de control indirecto se pueden encontrar esquemas como: control de impedancia (o admitancia), control de rigidez, control de complianza o control de amortiguamiento, donde el control de fuerza es logrado a través del control de movimiento, sin el cierre explícito de un ciclo de retroalimentación de fuerza.

Por el contrario, en el control directo se controla la fuerza y momento de contacto deseado, gracias al cierre de un bucle de retroalimentación de fuerza. Dentro de esta categoría es que se encuentra el esquema de control híbrido posición-fuerza/par [7], [10].

Este esquema permite el control simultáneo tanto de la fuerza de contacto como del movimiento del efector final. Existen diferentes implementaciones del control híbrido, la que se usará en este trabajo de tesis estará enfocada en lazos de control de fuerza externos cerrados alrededor de los lazos de posición internos [31], [32], esta elección es debida a que se trabajará con robots manipuladores de arquitectura cerrada, por lo que el control de posición ya está definido en su programación y únicamente se hará uso de las entradas y salidas de este sistema.

El bucle de control de fuerza está diseñado para prevalecer sobre el bucle de control de posición en caso de conflicto, dándole prioridad al control de fuerza que generalmente es un controlador PID o alguna variación de este.

En la Figura 3.1, se muestra el diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par aplicado a un robot manipulador, donde el error de fuerza se convierte en una trayectoria de referencia adecuada para el controlador de posición interno que se define en el espacio cartesiano. Cuando no hay restricciones debido al ambiente, el controlador de fuerza no tendrá efecto y el controlador de posición continuará controlando el sistema. Cuando aparecen restricciones, el controlador de fuerza permite el control de los esfuerzos generados.

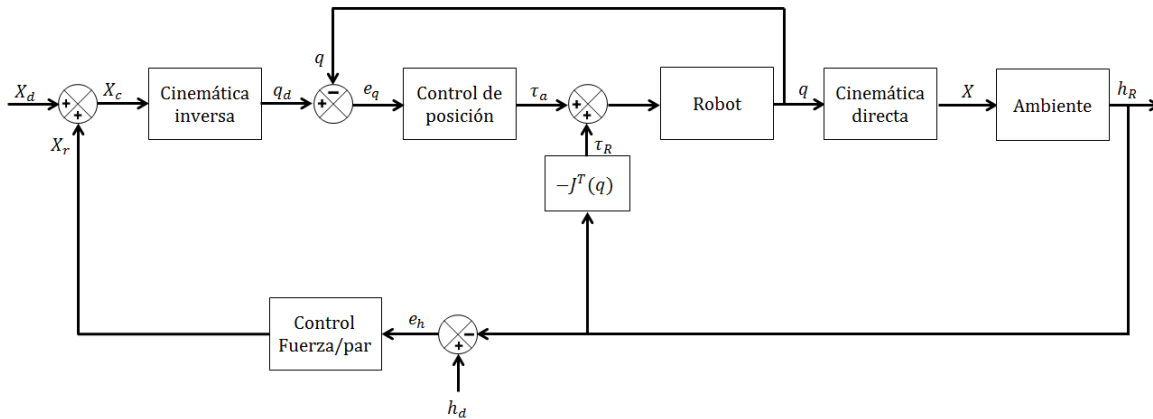


Figura 3.1: Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par.

Con n igual al número de articulaciones, se tiene:

- $q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, posición de las variables articulares.
- $q_d \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, posición deseada de las variables articulares.
- $e_q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, error de posición de las variables articulares.
- $\tau_a \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, pares aplicados a las articulaciones (salida del control de posición)
- $\tau_R \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, pares generados en las articulaciones debidas a las fuerzas de reacción.
- $h_R \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos de reacción.
- $h_d \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, fuerzas y momentos deseados.
- $e_h \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, error de fuerzas y momentos.
- $X \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación del efector final.
- $X_d \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación deseadas.
- $X_r \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación de referencia.
- $X_c \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación comandada.

Como se puede observar en el diagrama, la posición comandada esta dada por la siguiente ecuación:

$$X_c = X_d + X_r \quad (3.1)$$

Dentro de los bloques de control de posición y control de fuerza/par la implementación de cualquier esquema de control es posible, en este trabajo de tesis nos enfocaremos en el esquema PID en el caso de la posición y PI en el caso de la fuerza/par. A continuación estos esquemas se mostrarán a detalle.

3.1.1. Lazo interno de control de posición

El control de posición es el encargado de mover el efector final del robot manipulador según una trayectoria o punto deseado, este control puede ser articular o cartesiano según convenga y se usa el error (articular o cartesiano) como variable a considerar para lograr un correcto seguimiento.

El esquema general para el control de posición en variables articulares, se muestra a continuación:

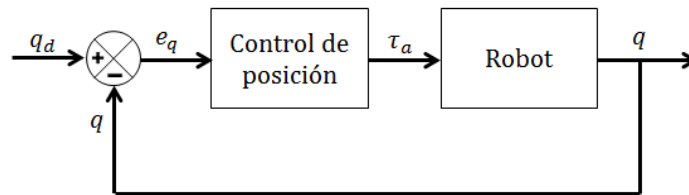


Figura 3.2: Diagrama general del control de posición.

Existen diferentes tipos de controladores para lograr los objetivos deseados. Uno de los más conocidos y utilizados en el mundo del control es el PID (Proportional-Integral-Derivative), que como su nombre lo indica consta de una constante proporcional que se encarga de los errores actuales, una constante integral que se encarga de los errores anteriores y finalmente una constante derivativa que se encarga de los errores a futuro (predicción), todo esto con el objetivo de reducir el error a cero y obtener el comportamiento deseado.

A continuación se muestra la expresión que define esta ley de control.

$$\tau_a = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q dt \quad (3.2)$$

Donde:

- $e_q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, error de posición de las variables articulares.
- $K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz diagonal de ganancias proporcionales.
- $K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz diagonal de ganancias derivativas.
- $K_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, matriz diagonal de ganancias integrales.

Con el error articular definido como:

$$e_q = q_d - q \quad (3.3)$$

En la gran mayoría de los robots industriales este lazo de control se encuentra definido dentro de su programación y normalmente no se tiene acceso a la manipulación del mismo (arquitectura cerrada).

3.1.2. Lazo externo de control de fuerza/par

En tareas que tienen como objetivo la interacción del robot con algún ambiente, el control de fuerza resulta primordial para su debido funcionamiento.

El control de posición permite al robot ubicarse en el punto de contacto con la superficie a manipular, cuando se encuentra en este punto y se ha asegurado un agarre con el objeto, el lazo externo de control fuerza/par se activa y empieza a funcionar. En la Figura 3.1, se muestra el diagrama con el lazo externo de control de fuerza/par implementado alrededor del control de posición.

Un controlador PI es el seleccionado para este lazo de control debido a que las mediciones de fuerza son tomadas a partir de un sensor analógico y por lo tanto el ruido presente podría aumentar con la parte derivativa del controlador.

El error de fuerzas generalizadas será la entrada de dicho bloque, el cual se define como la resta entre las fuerzas deseadas y las fuerzas de reacción (medidas a través del sensor de fuerza/par):

$$e_h = h_d - h_R \quad (3.4)$$

La expresión que muestra esta ley esta dada por:

$$X_r = K_{ph}e_h + K_{ih} \int e_h dt \quad (3.5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} e_h &\in \mathbb{R}^{6 \times 1}, \text{ error de fuerza y par.} \\ K_{ph} &\in \mathbb{R}^{6 \times 6}, \text{ matriz diagonal de ganancias proporcionales.} \\ K_{ih} &\in \mathbb{R}^{6 \times 6}, \text{ matriz diagonal de ganancias integrales.} \end{aligned}$$

Lo que se obtiene del control de fuerza es una posición de referencia (X_r), la cual será sumada a la posición deseada actual (ecuación (3.1)), con el objetivo de obtener la fuerza deseada requerida. El funcionamiento de este controlador se basa en el modelo de impedancia (ecuación (2.1)), que a través de una distancia de penetración en la superficie se espera una fuerza de reacción acorde a dicha posición.

3.2. Control híbrido posición-fuerza/par extendido

Si el control híbrido posición-fuerza/par es implementado en ambos robots del sistema cooperativo se puede garantizar un agarre del objeto, si la referencia tanto de posición como de fuerza se mantiene constante, el resultado es el equilibrio estático del objeto, por consiguiente no presenta movimiento.

Si bien se pueden programar trayectorias deseadas dentro del control de posición interno del robot, las trayectorias que están sobre la línea de acción donde se aplica la fuerza se encuentran comprometidas ya que como se hablo anteriormente el lazo de fuerza/par esta diseñado para prevalecer sobre el lazo de control de posición. Por lo tanto si se deseara un seguimiento aceptable en la trayectoria de posición, este esquema de control no sería suficiente.

Como solución se propone añadir un lazo de control de posición que dependiendo de la trayectoria deseada (\tilde{X}_d) tendrá como salida un vector de fuerza/par (h_{PI}), si se suma este vector al vector de fuerza/par deseado (h_d) se obtendrá una nueva referencia y un nuevo comportamiento.

Para mantener el agarre de un objeto entre dos o varios manipuladores, los robots ejercen una fuerza/par deseado el cual debe mantenerse para evitar dañar la superficie del objeto, así como evitar el deslizamiento del mismo. Si se presentan cambios en la fuerza aplicada por un robot, el otro robot reacciona tratando de mantener la fuerza deseada en

el objeto, cuando se presenta este comportamiento se dice que el robot está “en reacción” y el manipulador genera movimientos de traslación y rotación para mantener el agarre.

Si el esquema extendido es implementado a un robot (Figura 3.3), mientras que el otro robot del sistema cooperativo se encuentra en reacción (Figura 3.1), se generara una desigualdad en la magnitud de las fuerzas y pares aplicados por los efectores finales, esta desigualdad es denominada diferencial de fuerza y como resultado de este se generan fuerzas y pares externos (h_e) en el objeto originando movimiento de traslación y rotación respectivamente.

En la Figura 3.3, se muestra el diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par extendido aplicado a un robot manipulador, donde el error de posición-I se convierte en un diferencial de fuerza.

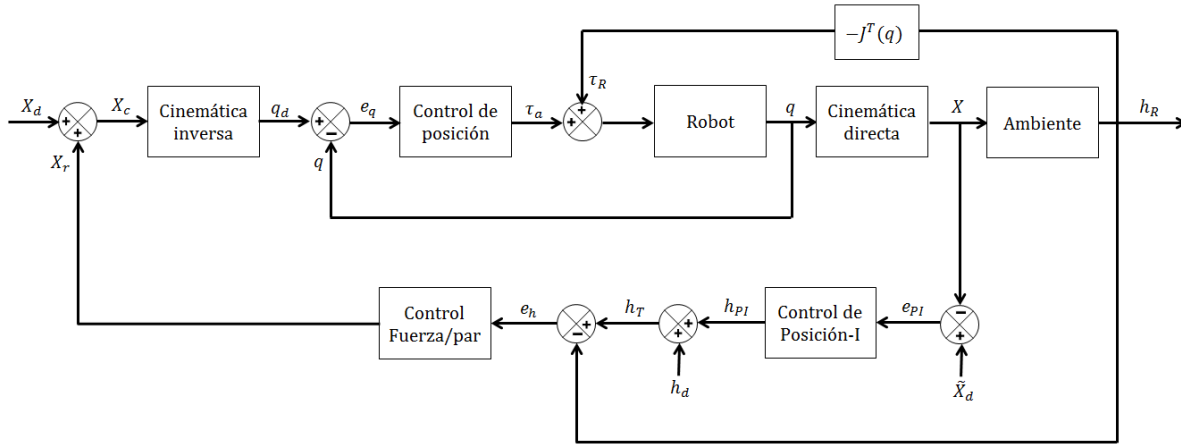


Figura 3.3: Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par extendido.

Donde:

$\tilde{X}_d \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación deseadas del control de posición-I.

$e_{PI} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, error de posición y orientación.

$h_{PI} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos salidos del control de posición-I.

$h_T \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos deseados totales.

Como se puede observar en el diagrama, el vector de fuerzas generalizadas deseadas totales esta dado por:

$$h_T = h_d + h_{PI} \quad (3.6)$$

En este lazo se busca reducir el error de posición representado por la siguiente ecuación:

$$e_{PI} = \tilde{X}_d - X \quad (3.7)$$

El esquema de control PID fue implementado en el bloque de control de posición-I, el cual se expresa como:

$$h_{PI} = K_{pPI}e_{PI} + K_{dPI}\dot{e}_{PI} + K_{iPI} \int e_{PI}dt \quad (3.8)$$

Donde:

- $e_{PI} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, error de posición y orientación.
- $K_{pPI} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz diagonal de ganancias proporcionales.
- $K_{dPI} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz diagonal de ganancias derivativas.
- $K_{iPI} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz diagonal de ganancias integrales.

3.3. Control híbrido posición-fuerza/par en robots industriales ABB

Como se había expuesto con anterioridad, la mayoría de los robots industriales son de arquitectura cerrada. En este trabajo de tesis se trabajará con un par de robots manipuladores de marca ABB, los cuales presentan este tipo de arquitectura, por lo tanto el diagrama del sistema para los dos esquemas de control expuestos se modifican de la siguiente manera:

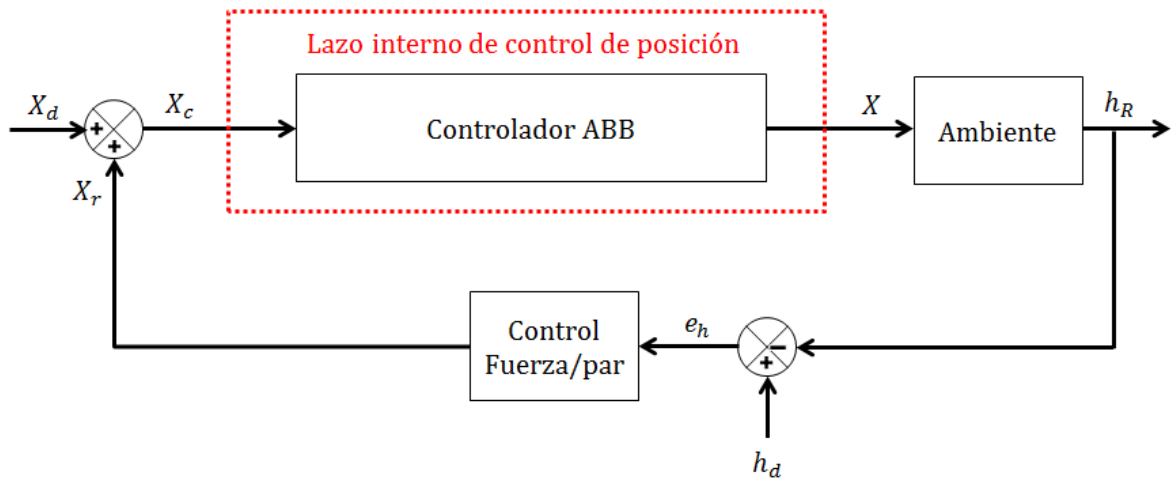


Figura 3.4: Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par en robots industriales.

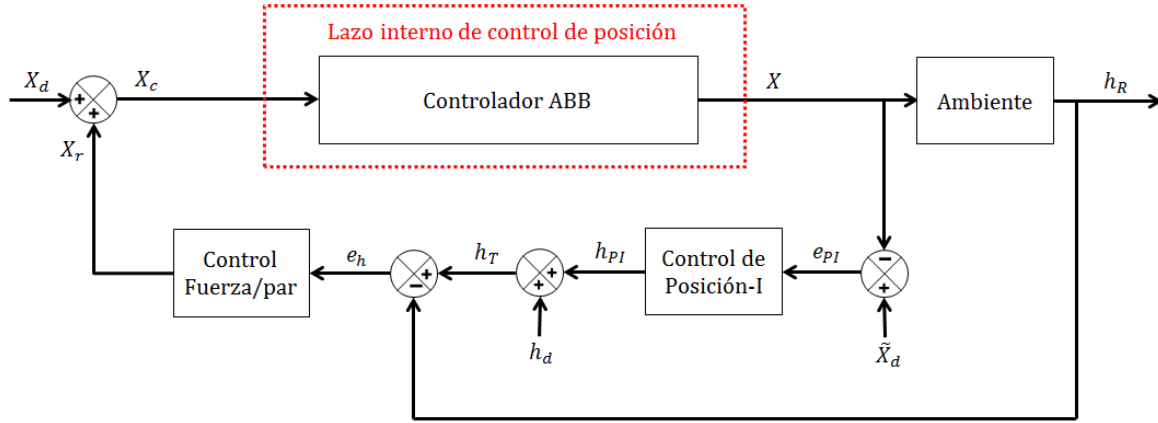


Figura 3.5: Diagrama general del control híbrido posición-fuerza/par extendido en robots industriales.

3.4. Control híbrido posición-fuerza/par en el sistema teleoperado

Dentro del sistema teleoperado, el flujo de información entre el robot maestro (interfaz háptica) y el robot esclavo (ABB) con el control híbrido posición-fuerza/par extendido implementado se muestra en la Figura 3.6. Donde cada variable, representa lo siguiente:

- $h_m \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos debidas a la manipulación del operador.
- $h_{dm} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos deseados del maestro.
- $h_s \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, vector de fuerzas y momentos debidas al contacto con el ambiente.
- $X_m \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación del efector final maestro.
- $X_s \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación del efector final esclavo.
- $X_{ds} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$, posición y orientación deseadas del esclavo.
- $\psi \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz diagonal de escalamiento para la posición.
- $\delta \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matriz diagonal de escalamiento para la fuerza.

Como se puede observar en la Figura 3.6, el diagrama mostrado en la Figura 3.3 esta ahora conectado con el dispositivo háptico, donde la posición deseada es dirigida por la interfaz ($\tilde{X}_d = X_{ds}$) al igual que la fuerza deseada ($h_d = h_{ds}$) y la fuerza de reacción es la fuerza sensada por el robot esclavo ($h_R = h_s$).

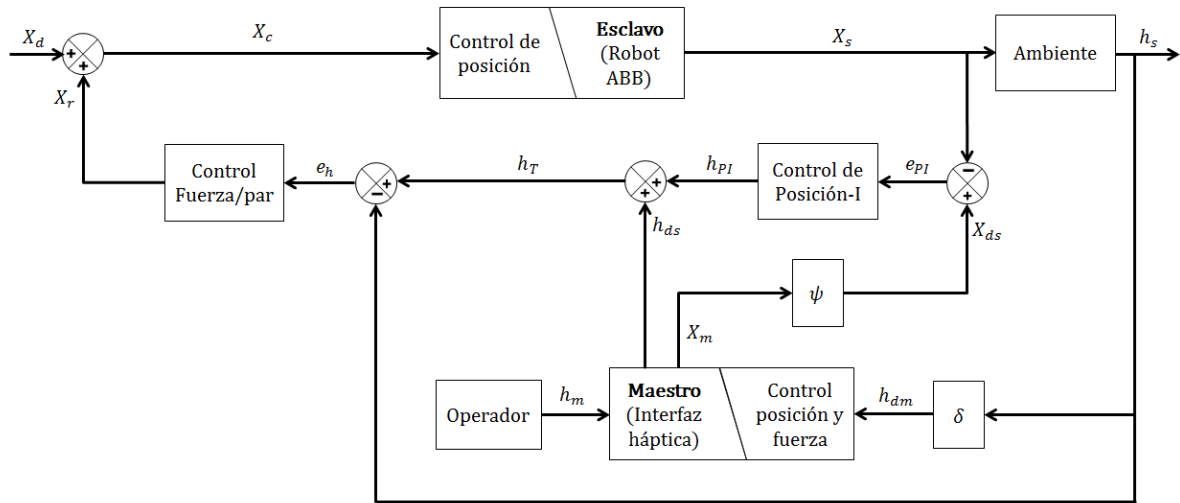


Figura 3.6: Diagrama general del sistema teleoperado (relación maestro-esclavo).

3.5. Control híbrido posición-fuerza/par en el sistema cooperativo teleoperado

Finalmente el diagrama expuesto en la Figura 3.7 muestra el sistema cooperativo teleoperado con cual se trabajará.

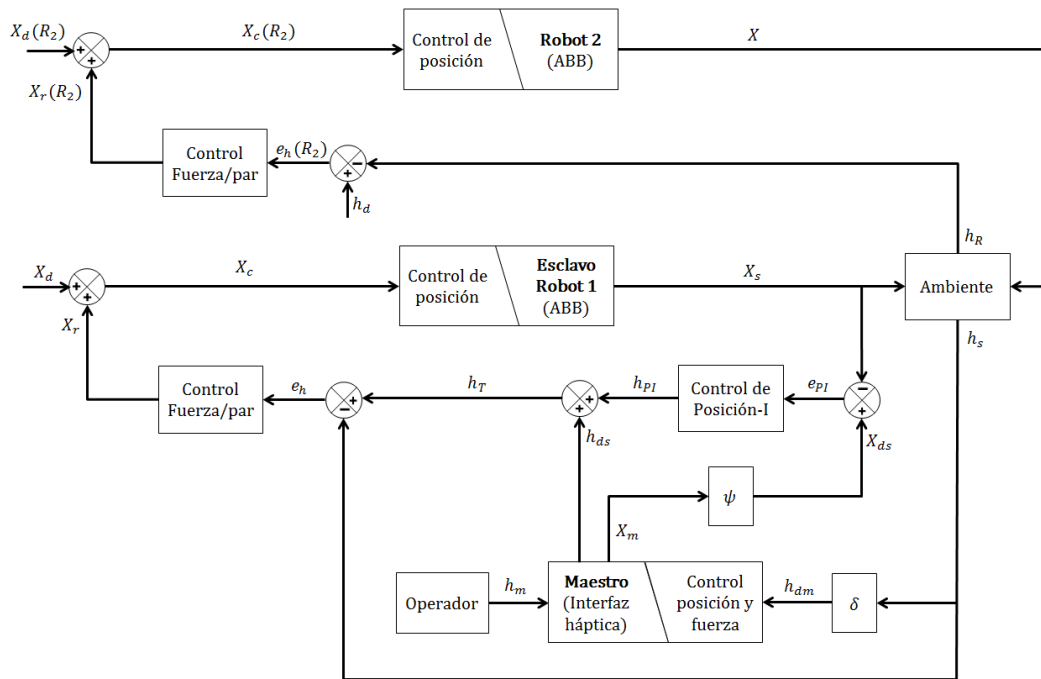


Figura 3.7: Diagrama general del sistema cooperativo teleoperado.

Como se mencionó con anterioridad, la interfaz háptica es el robot maestro que manda posición y fuerzas deseadas al robot esclavo, este robot esclavo también es denominado robot 1 dentro del sistema cooperativo que a través de diferentes trayectorias ejecutadas determina los movimientos realizados por el robot 2 debido a que este último se encuentra en reacción.

3.6. Análisis de Estabilidad

En esta subsección se analizará la estabilidad del sistema teleoperado con el control híbrido posición-fuerza extendido implementado, considerando la arquitectura cerrada del robot manipulador y sin retardos ni pérdida de información en la comunicación.

El análisis de estabilidad del sistema cooperativo se dejará de lado puesto que ya ha sido realizado en trabajos anteriores [7], en donde el error de fuerza es analizado en dos diferentes casos, en superficies deformables y en superficies rígidas, obteniendo en cada caso una relación del error de fuerza con la fuerza deseada. Además el análisis puede ser dividido puesto que el control de reacción del segundo robot manipulador es independiente del sistema teleoperado.

3.6.1. Modelo dinámico de los actuadores

En la ecuación (2.19) se habla de la dinámica del robot manipulador en función de los pares aplicados por los actuadores, este modelo es bastante útil para representar de la forma más simplificada posible el comportamiento de estos robots, sin embargo existen muchos fenómenos físicos que no son tomados en consideración y que en su momento pueden ser necesarios para un estudio en particular. Con el fin de analizar la estabilidad del robot manipulador, se tomará en cuenta la dinámica de los actuadores en cada una de sus articulaciones.

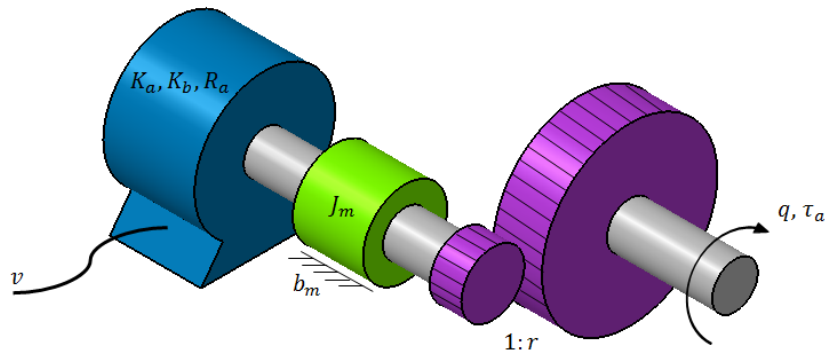


Figura 3.8: Diagrama de un motor de DC.

Los motores de corriente directa son ampliamente usados en robots industriales, estos

convierten la energía eléctrica en energía mecánica a través de la interacción de dos campos magnéticos, el modelo dinámico lineal (considerando una fricción lineal) que representa este tipo de actuadores es el siguiente:

$$J_m \ddot{q} + b_m \dot{q} + \frac{K_a K_b}{R_a} \dot{q} + \frac{\tau_a}{r^2} = \frac{K_a}{r R_a} v \quad (3.9)$$

Donde:

- J_m , inercia del rotor. [$kg \cdot m^2$]
- K_a , constante de torque. [$N \cdot m/A$]
- R_a , resistencia de armadura. [Ω]
- K_b , constante de fuerza contra-electromotriz. [$V \cdot s/rad$]
- b_m , coeficiente de fricción del rotor. [kg/s]
- r , relación de reducción del engranaje (generalmente $r \gg 1$).
- q , posición angular del eje de la carga mecánica. [rad]
- τ_a , par aplicado en el eje de la carga mecánica. [$N \cdot m$]
- v , voltaje de armadura. [V]

Cada una de las n -articulaciones esta accionada por un actuador, por lo tanto se tiene lo siguiente:

$$A_J \ddot{q} + A_B \dot{q} + A_R \tau_a = A_K V \quad (3.10)$$

Donde para cada actuador ($i = 1, \dots, n$), se tiene:

$$\begin{aligned} A_J &= \text{diag} \{ J_{mi} \} \\ A_B &= \text{diag} \left\{ b_{mi} + \frac{K_{ai} K_{bi}}{R_{ai}} \right\} \\ A_R &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{r_i^2} \right\} \\ A_K &= \text{diag} \left\{ \frac{K_{ai}}{r_i R_{ai}} \right\} \end{aligned}$$

Despejando τ_a de la ecuación (3.10) se tiene:

$$\tau_a = A_r^{-1} (A_K V - A_J \ddot{q} - A_B \dot{q}) \quad (3.11)$$

Ahora, para obtener el modelo de los manipuladores en términos del voltaje aplicado a los actuadores, se sustituye τ_a (ecuación (3.11)) en la ecuación (2.19), agrupando términos

semejantes se tiene:

$$(A_r D(q) + A_J)\ddot{q} + A_r C(q, \dot{q})\dot{q} + (A_r Q + A_B)\dot{q} + A_r g(q) = A_K V + A_r \tau_R \quad (3.12)$$

Los robots IRB 2400/16 con los que se trabajará, son manipuladores industriales, por lo tanto, se asume que la relación de reducción de engranaje es mucho mas grande que uno ($r_i \gg 1 \forall i$), de manera que la matriz A_r es aproximadamente cero ($A_r \approx 0$), por consiguiente la ecuación (3.12) puede reducirse a:

$$A_J \ddot{q} + A_B \dot{q} = A_K V \quad (3.13)$$

Como se ha hablado con anterioridad, los robots tienen una arquitectura cerrada, por lo que se asume que el esquema de control de posición que tienen implementado es un PID, el cual esta dado por la siguiente expresión:

$$V_{PID} = K_p e_q + K_d \dot{e}_q + K_i \int e_q dt \quad (3.14)$$

Siendo K_p , K_d y K_i matrices diagonales de ganancias, definidas positivas.

Suposición 1 *Las ganancias K_p , K_d y K_i del control de posición PID del robot industrial han sido sintonizadas correctamente, por lo cual para una trayectoria deseada variante en el tiempo $q_d(t)$ se logra $e_q \approx 0$ y $\dot{e}_q \approx 0$ y para una trayectoria deseada constante q_d se tiene $e_q = 0$ y $\dot{e}_q = 0$.*

Sustituyendo la expresión del esquema PID (ecuación (3.14)) en la ecuación (3.13), se tiene:

$$A_J \ddot{q} + A_B \dot{q} = \tilde{K}_p e_q + \tilde{K}_d \dot{e}_q + \tilde{K}_i \int e_q dt \quad (3.15)$$

Siendo $\tilde{K}_p = A_K K_p$, $\tilde{K}_d = A_K K_d$ y $\tilde{K}_i = A_K K_i$ matrices diagonales definidas positivas.

Observación 1 *En la ecuación (3.15) se observa que para una alta reducción de engranes, el efecto de las no linealidades se desprecia, resultando un sistema lineal, a su vez, se obtienen ecuaciones desacopladas para cada uno de los actuadores. El vector q en la ecuación (3.15) se encuentra restringido por la fuerza h a pesar de que no aparece explícitamente. La utilidad de la ecuación (3.15) se basa en el hecho de que permite implementar una acción de control de fuerza de forma indirecta solo eligiendo adecuadamente las trayectorias de posición deseadas [10].*

3.6.2. Análisis del diagrama a bloques del sistema

De acuerdo a la Suposición 1, se establece que $\Delta X = X_c - X \approx 0$, de esta manera se tiene un error pequeño y tomando en cuenta que se está hablando del sistema maestro/esclavo se tiene que $X = X_s$, por lo tanto se puede asumir que:

$$X_c \approx X_s \quad (3.16)$$

Esto será de utilidad para establecer un diagrama a bloques del sistema teleoperado, ya que la deducción de la función de transferencia correspondiente al robot esclavo no es posible debido a su arquitectura cerrada, esto quiere decir que no se tiene acceso a las señales internas del robot para una posible caracterización del robot en forma de función de transferencia.

La dinámica de la interfaz háptica y el ser humano pueden ser modeladas como un sistema masa-resorte-amortiguador (según [33]), en donde su función de transferencia puede ser representada de la siguiente manera:

$$G_{IH}(s) = \frac{1}{M_{IH}s^2 + C_{IH}s + K_{IH}} \quad (3.17)$$

Donde se tiene como entrada una fuerza y como salida una posición. Considerando un controlador PI en el control de fuerza y un controlador PID en el control de posición-I, el diagrama a bloques que describe el sistema teleoperado es el siguiente:

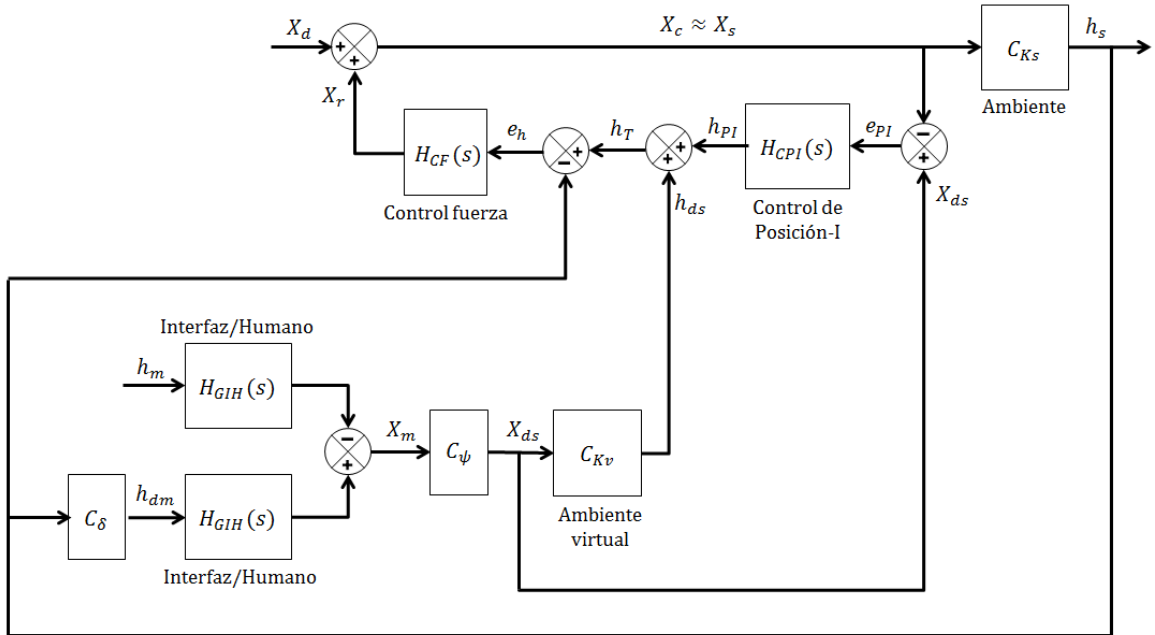


Figura 3.9: Diagrama a bloques del sistema teleoperado.

Donde C_{K_s} representa la matriz de rigidez del ambiente, C_{K_v} representa una matriz de rigidez virtual de la misma interfaz y C_ψ y C_δ matrices de factores de escalamiento.

Considerando que cada una de las entradas del diagrama son vectores ($X_d \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ y $h_m \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$) se obtiene:

$$\begin{aligned}
H_{CF}(s) &= \text{diag}\{C_F(s)_1, \dots, C_F(s)_6\} \\
H_{CPI}(s) &= \text{diag}\{C_{PI}(s)_1, \dots, C_{PI}(s)_6\} \\
H_{GIH}(s) &= \text{diag}\{G_{IH}(s)_1, \dots, G_{IH}(s)_6\} \\
C_{Ks} &= \text{diag}\{K_{s1}, \dots, K_{s6}\} \\
C_{Kv} &= \text{diag}\{K_{v1}, \dots, K_{v6}\} \\
C_\psi &= \text{diag}\{\psi_1, \dots, \psi_6\} \\
C_\delta &= \text{diag}\{\delta_1, \dots, \delta_6\}
\end{aligned}$$

Para empezar el correcto análisis del sistema descrito en la Figura 3.9, se realizan las siguientes observaciones:

Observación 2 Puesto que las entradas y salidas del sistema son vectores, los bloques en el diagrama se tratan de matrices de transferencia, para simplicidad del análisis se toma un solo elemento de cada vector sabiendo que el resultado seguirá siendo el mismo para cada elemento de las señales de entrada, gracias al desacoplamiento de los ejes.

Observación 3 El diagrama se trata de un sistema con múltiples entradas: X_d y h_m , ya que la posición deseada únicamente es usada para acercar al robot manipulador al punto de contacto con la superficie, se considerará $X_d = 0$ para simplicidad del análisis volviendo convenientemente el sistema en SISO (Single-Input-Single-Output).

Una vez aclaradas las condiciones del análisis, se pretende determinar la influencia de la fuerza ejercida por el humano en el error de fuerza y el error de posición-I del control híbrido, por lo que se determinarán las funciones de transferencia de estas dos relaciones.

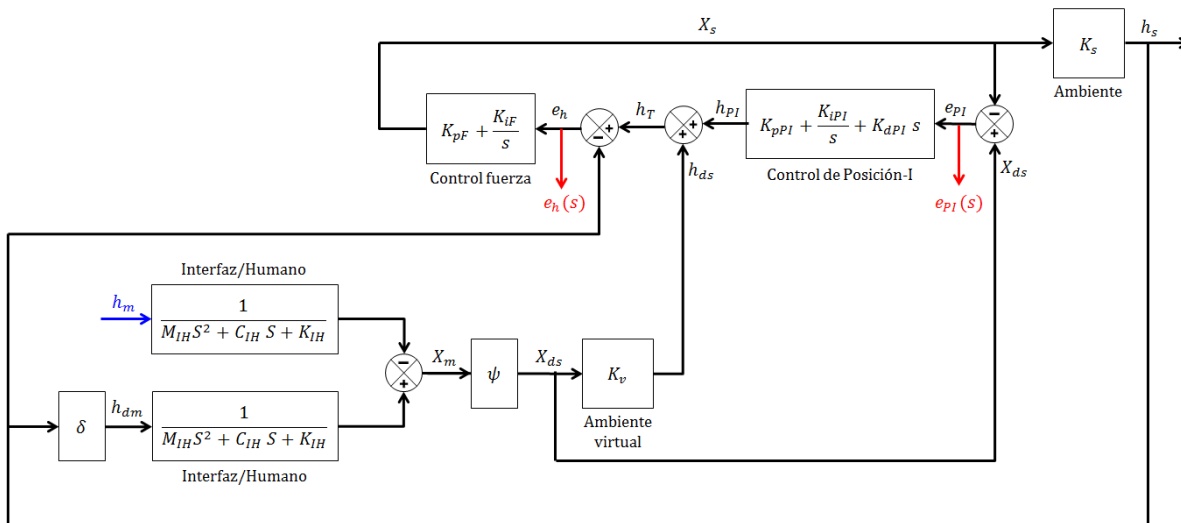


Figura 3.10: Diagrama a bloques del sistema teleoperado mostrando salidas y entrada de interés.

Con ayuda del álgebra de bloques y la conversión a una gráfica de flujo, se aplicó la fórmula de Mason o fórmula de ganancias (Apéndice A) para determinar las funciones de transferencia de interés, la primera relaciona el error de fuerza respecto a la fuerza del humano, mientras que la segunda relaciona el error de posición respecto a la fuerza del humano (el desarrollo puede observarse en el Apéndice B).

En el caso del error de fuerza se determino la siguiente función de transferencia:

$$\frac{e_h(s)}{h_m(s)} = \frac{-\psi G_{IH}(s)(C_{PI}(s) + K_v)}{1 - C_F(s)(\delta\psi K_s G_{IH}(s)[C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)} \quad (3.18)$$

Sustituyendo las funciones de transferencia en la ecuación (3.18) por:

$$\begin{aligned} G_{IH}(s) &= \frac{1}{M_{IH}s^2 + C_{IH}s + K_{IH}} \\ C_F(s) &= K_{pF} + \frac{K_{iF}}{s} \\ C_{PI}(s) &= K_{pPI} + \frac{K_{iPI}}{s} + K_{dPI}s \end{aligned} \quad (3.19)$$

Se tiene:

$$\frac{e_h(s)}{h_m(s)} = \frac{b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s^1}{a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s^1 + a_0} \quad (3.20)$$

Con:

$$\begin{aligned} b_3 &= -\psi K_{dPI} - \psi \\ b_2 &= -\psi K_v - \psi K_{pPI} \\ b_1 &= -\psi K_{iPI} \\ a_5 &= K_{dPI}K_{pF}M_{IH} \\ a_4 &= K_{dPI}K_{pF}C_{IH} + M_{IH} + K_{dPI}K_{iF}M_{IH} + K_sK_{pF}M_{IH} + K_{pF}K_{pPI}M_{IH} \\ a_3 &= C_{IH} + K_{dPI}K_{iF}C_{IH} + K_sK_{pF}C_{IH} - \delta\psi K_sK_{dPI}K_{pF} + K_{dPI}K_{IH}K_{pF} + C_{IH}K_{pF}K_{pPI} \\ &= +K_sK_{iF}M_{IH} + K_{iPI}K_{pF}M_{IH} + K_{iF}K_{pPI}M_{IH} \\ a_2 &= K_sC_{IH}K_{iH} - \delta\psi K_sK_{dPI}K_{iF} + K_{IH} + K_{dPI}K_{iF}K_{IH} - \delta\psi K_sK_vK_{pF} + K_sK_{IH}K_{pF} \\ &= +C_{IH}K_{iPI}K_{pF} + C_{IH}K_{iF}K_{pPI} - \delta\psi K_sK_{pF}K_{pPI} + K_{IH}K_{pF}K_{pPI} + K_{iF}K_{iPI}M_{IH} \\ a_1 &= -\delta\psi K_sK_vK_{iF} + K_sK_{iF}K_{IH} + C_{IH}K_{iF}K_{iPI} - \delta\psi K_sK_{iPI}K_{pF} + K_{IH}K_{iPI}K_{pF} \\ &= -\delta\psi K_sK_{iF}K_{pPI} + K_{iF}K_{IH}K_{pPI} \\ a_0 &= -\delta\psi K_sK_{iF}K_{iPI} + K_{iF}K_{IH}K_{iPI} \end{aligned}$$

Como se puede observar, los coeficientes de la función de transferencia están en términos de las ganancias del controlador de fuerza, del controlador de posición, la rigidez del

ambiente, la rigidez virtual, los factores de escalamiento y las componentes de masa, amortiguamiento y rigidez de la interfaz/humano.

La ecuación característica o polinomio característico del sistema esta representado por:

$$a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s^1 + a_0 = 0 \quad (3.21)$$

el cual será usado para determinar la estabilidad del sistema a través del criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz, el primer paso de este criterio es realizar la tabulación de Routh, en el caso de este polinomio característico se tiene lo siguiente:

s^5	a_5	a_3	a_1
s^4	a_4	a_2	a_0
s^3	$\frac{a_4a_3 - a_5a_2}{a_4} = A$	$\frac{a_4a_1 - a_5a_0}{a_4} = B$	0
s^2	$\frac{Aa_2 - a_4B}{A} = C$	$\frac{Aa_0 - a_4(0)}{A} = a_0$	0
s^1	$\frac{CB - Aa_0}{C} = D$	0	0
s^0	$\frac{Da_0 - C(0)}{D} = a_0$	0	0

Tabla 3.1: Tabulación de Routh para el polinomio característico descrito en la ecuación (3.21)

De acuerdo al criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz, todas las raíces del polinomio característico se encuentran en el semiplano izquierdo complejo si todos los elementos de la primera columna de la tabulación de Routh son del mismo signo. Por lo tanto, para que el sistema no tenga ninguna raíz en el semiplano derecho o en el eje imaginario, se propone que todos los determinantes de Hurwitz sean positivos para asegurar la estabilidad del sistema. De tal manera que:

$$\begin{aligned}
 & a_5 > 0 \\
 & a_4 > 0 \\
 & \frac{a_4a_3 - a_5a_2}{a_4} > 0 \\
 & \frac{-a_5a_2^2 + a_3a_4a_2 - a_1a_4^2 + a_0a_4a_5}{a_3a_4 - a_2a_5} > 0 \\
 & \frac{a_1^2a_4^2 + a_1((a_2^2 - 2a_0a_4)a_5 - a_2a_3a_4) + a_0(a_4a_3^2 - a_2a_5a_3 + a_0a_5^2)}{a_5a_2^2 - a_2a_3a_4 + a_4(a_1a_4 - a_0a_5)} > 0 \\
 & a_0 > 0
 \end{aligned} \quad (3.22)$$

En el caso del error de posición-I se determino la siguiente función de transferencia:

$$\frac{e_{PI}(s)}{h_m(s)} = \frac{\psi G_{IH}(s)(K_v C_F(s) - K_s C_F(s) - 1)}{1 - C_F(s)(\delta \psi K_s G_{IH}(s)[C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)} \quad (3.23)$$

Sustituyendo las funciones de transferencia en la ecuación (3.23) por:

$$\begin{aligned}
 G_{IH}(s) &= \frac{1}{M_{IH}s^2 + C_{IH}s + K_{IH}} \\
 C_F(s) &= K_{pF} + \frac{K_{iF}}{s} \\
 C_{PI}(s) &= K_{pPI} + \frac{K_{iPI}}{s} + K_{dPI}s
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Se tiene:

$$\frac{e_{PI}(s)}{h_m(s)} = \frac{b_2s^2 + b_1s^1}{a_5s^5 + a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s^1 + a_0} \tag{3.25}$$

Con:

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \psi K_v K_{pF} - \psi K_s K_{pF} - \psi \\
 b_1 &= \psi K_v K_{iF} - \psi K_s K_{iF} \\
 a_5 &= K_{dPI} K_{pF} M_{IH} \\
 a_4 &= K_{dPI} K_{pF} C_{IH} + M_{IH} + K_{dPI} K_{iF} M_{IH} + K_s K_{pF} M_{IH} + K_{pF} K_{pPI} M_{IH} \\
 a_3 &= C_{IH} + K_{dPI} K_{iF} C_{IH} + K_s K_{pF} C_{IH} - \delta\psi K_s K_{dPI} K_{pF} + K_{dPI} K_{IH} K_{pF} + C_{IH} K_{pF} K_{pPI} \\
 &= +K_s K_{iF} M_{IH} + K_{iPI} K_{pF} M_{IH} + K_{iF} K_{pPI} M_{IH} \\
 a_2 &= K_s C_{IH} K_{iH} - \delta\psi K_s K_{dPI} K_{iF} + K_{IH} + K_{dPI} K_{iF} K_{IH} - \delta\psi K_s K_v K_{pF} + K_s K_{IH} K_{pF} \\
 &= +C_{IH} K_{iPI} K_{pF} + C_{IH} K_{iF} K_{pPI} - \delta\psi K_s K_{pF} K_{pPI} + K_{IH} K_{pF} K_{pPI} + K_{iF} K_{iPI} M_{IH} \\
 a_1 &= -\delta\psi K_s K_v K_{iF} + K_s K_{iF} K_{IH} + C_{IH} K_{iF} K_{iPI} - \delta\psi K_s K_{iPI} K_{pF} + K_{IH} K_{iPI} K_{pF} \\
 &= -\delta\psi K_s K_{iF} K_{pPI} + K_{iF} K_{IH} K_{pPI} \\
 a_0 &= -\delta\psi K_s K_{iF} K_{iPI} + K_{iF} K_{IH} K_{iPI}
 \end{aligned}$$

Como se puede observar los coeficientes del polinomio característico son exactamente iguales a los de la función de transferencia con el error de fuerza como salida, por lo tanto las desigualdades obtenidas a través del criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz mostradas en la ecuación (3.22) son completamente válidas también para la función de transferencia con el error de posición-I como salida.

Capítulo 4

Plataforma experimental

En el esquema mostrado en la Figura 4.1 se encuentra el arreglo de la plataforma experimental utilizada en el desarrollo de este trabajo.

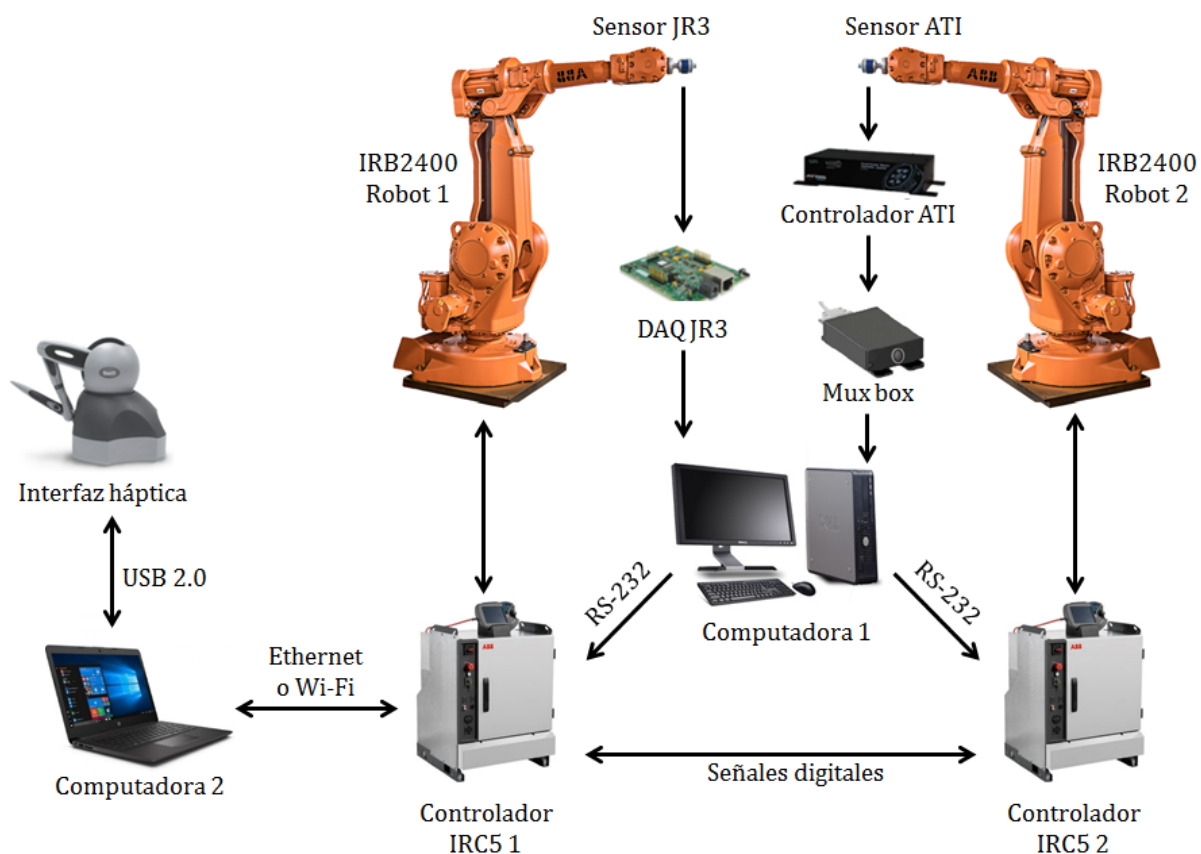


Figura 4.1: Diagrama del sistema maestro-esclavo.

4.1. Componentes de la plataforma experimental

El equipo de la plataforma experimental consiste en:

- Dos robots industriales de la marca ABB modelo IRB 2400/16, este modelo cuenta con 6 grados de libertad con capacidad de carga máxima en el efector final de 20 kg. A cada uno de los robots se les acopla un sensor de fuerza/par como efector final. Las especificaciones del IRB2400 se pueden encontrar en [34].
- Dos unidades de control modelo IRC5 de la marca ABB, estos tienen la función de suministrar energía a los motores de los robots IRB2400 y leer todas las variables necesarias para realizar el control de la posición y orientación del robot, se utiliza un controlador IRC5 para cada uno de los robots. Además, el IRC5 cuenta con puertos de comunicación serial RS-232, LAN y entradas/salidas digitales; entre ambos controladores IRC5 se realiza una interconexión por medio de un cable, donde se envía una señal digital de un bit que sirve para sincronizar el inicio de las rutinas programadas para los robots. Se pueden encontrar las especificaciones del IRC5 en [35].
- Un sensor de fuerza/par de 6GDL modelo 50M31A3 de la marca JR3 constituido por un arreglo de galgas extensiométricas que permiten la medición de la fuerza aplicada en tres ejes y la medición del par torsor en tres ejes. En fuerza se tiene un rango de ± 111 [N] y resolución de 0.028 [N] en sus ejes x, y , mientras que en su eje z se tiene un rango de ± 222 [N] y resolución de 0.057 [N]. Para la medición del par torsor se tiene un rango de ± 5.65 [N-m] y resolución de 0.0014 [N-m] en sus tres ejes. Este sensor se acopla como efector final del robot. Se pueden encontrar las especificaciones del sensor JR3 50M31A3 en [36].
- Una tarjeta de adquisición de datos de marca JR3, ésta cuenta con bus PCI y se conecta directamente en la tarjeta madre de la computadora 1. Por medio de un conector RJ11 se suministra la alimentación al sensor JR3/50M31A3 y se hacen las lecturas de las señales del sensor, la DAQ cuenta con convertidores analógico a digital (ADC) y módulos DSP con posibilidad de aplicar filtros digitales, la computadora 1 lee los registros de la DAQ para disponer de las señales procesadas de las fuerzas y pares torsos que se aplican en el efector final del robot 1 [37].
- Un sensor de fuerza/par de 6GDL modelo Mini40 de la marca ATI, el cual se constituye por un arreglo de galgas extensiométricas para la medición de fuerza en tres ejes y medición de par torsor en tres ejes. En fuerza se tiene un rango de ± 80 [N] y resolución de $1/25$ [N] en sus ejes x, y , para el eje z cuenta con un rango de ± 240 [N] y resolución de $2/25$ [N]. Mientras que para el par torsor se dispone de un rango de ± 4 [N-m] y resolución de 0.001 [N-m] en sus tres ejes. Este sensor se acopla como efector final del robot 2. Se pueden encontrar las especificaciones del sensor ATI Mni40 en [38], [39].
- Un transductor Mux Box de marca ATI, el cual se conecta entre la controladora F/T y el sensor Mini40 debido a que contiene componentes electrónicos que complementan al sensor [40].

- Una controladora F/T de marca ATI, la cual se conecta al transductor Mux Box para realizar las lecturas de las señales del sensor Mini40. La controladora F/T cuenta con un puerto de comunicación RS-232 por el cual se envían las señales previamente convertidas a formato digital, la computadora 1 se conecta con el puerto RS-232 y recibe las mediciones de las fuerzas y pares torsores que se aplican en el efector final del Robot 2 [40].
- Una computadora de escritorio nombrada computadora 1, los datos de fuerzas y pares torsores de ambos robots son procesados en esta computadora a través de matrices de calibración para obtener datos adecuados de las mediciones, los datos correspondientes a cada robot son enviados a su respectivo controlador IRC5 y les servirán para la leyes de control programadas.
- Una computadora portátil nombrada computadora 2, en la cual a través del software RobotStudio y el lenguaje de programación RAPID se programan las leyes de control y rutinas para ambos robots, estos programas se cargan por medio de un cable Ethernet hacia los controladores IRC5 de cada robot. Durante las pruebas experimentales la computadora 2 y el controlador IRC5 del robot 1 deben estar conectados por medio de un cable Ethernet o por medio de una red wi-fi estableciéndose una comunicación cliente/servidor, de esta forma la computadora puede enviar los datos de la posición y orientación deseada del robot 1. A su vez, esta computadora ejecuta la interfaz gráfica de usuario (GUI) para leer los datos del dispositivo háptico.
- Un dispositivo háptico modelo Touch Haptic Device marca 3D Systems, el cual registra las señales de movimiento y fuerza provocadas por el usuario en sus 6 GDL, estas señales se envían hacia la computadora 2 por medio de un conector USB y son leídas por la GUI. Se pueden encontrar las especificaciones de la interfaz en [41].

4.2. Canal de comunicación

Los robots teleoperados se encuentran dentro de la categoría de los robots que hacen uso de las redes de comunicaciones tales como Internet o LAN (*Local Area Network*). La red puede ser cableada o inalámbrica y basada en cualquiera de una variedad de protocolos como TCP, UDP o 802.11.

Una red de comunicación incluye tres elementos: enlaces, enrutadores/conmutadores y *hosts*. Los enlaces se refieren al medio físico que transporta bits de un lugar a otro. Ejemplos de enlaces incluyen cables de cobre o de fibra óptica y canales inalámbricos (radiofrecuencia o infrarrojos). Los conmutadores y enrutadores son concentradores que dirigen información digital entre enlaces. Los *hosts* son puntos finales de comunicación, como navegadores, computadoras y robots [23].

En la red de comunicación del sistema teleoperado, se manejaron dos tipos de enlaces, alámbrico e inalámbrico, el primer caso se trata del cable *ethernet* y en el segundo caso de la tecnología *WiFi*, que dependiendo de las características de la tarea se elije entre una

u otra. El papel de *hosts* serán tomados por la interfaz maestra y el robot esclavo, siendo estos los extremos de la comunicación.

Los sistemas de comunicación utilizan formatos bien definidos denominados protocolos para intercambiar mensajes. Un protocolo de comunicaciones es un sistema de reglas que permiten que dos o más entidades de un sistema de comunicación se comuniquen entre ellas para transmitir información.

Los protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) se han convertido en el método estándar de la industria para interconectar *hosts*, redes e Internet [42]. TCP/IP provee conectividad de extremo a extremo especificando cómo los datos deberían ser formateados, direccionados, transmitidos, enrutados y recibidos por el destinatario.

A cada *host* se le asigna una dirección denominada dirección IP, para que pueda ser identificado en una red. La dirección IP consta de dos partes: Dirección IP = <número de red> <número de host>.

Dentro del protocolo TCP/IP no existen jerarquías es decir no hay relaciones maestro/subordinado. Sin embargo, existen aplicaciones que suelen utilizar un modelo denominado cliente/servidor para las comunicaciones.

Un servidor es una aplicación que ofrece un servicio a los usuarios de Internet y un cliente es un solicitante de un servicio. El cliente genera una solicitud para un servicio en particular y la envía al servidor de la aplicación utilizando TCP / IP como vehículo de transporte.

El servidor es un programa que recibe una solicitud, realiza el servicio requerido y envía los resultados en una respuesta. Por lo general, un servidor puede tratar con múltiples solicitudes y múltiples clientes solicitantes al mismo tiempo como se puede ver en la Figura 4.2. La mayoría de los servidores esperan solicitudes en un puerto conocido para que sus clientes sepan a qué puerto (y, a su vez, qué aplicación) deben dirigir sus solicitudes. El cliente normalmente usa un puerto arbitrario llamado puerto efímero para su comunicación.

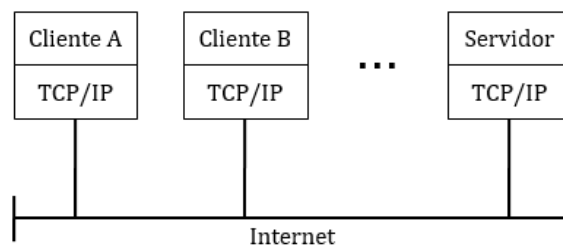


Figura 4.2: Modelo Cliente/Servidor.

4.3. Vector de posición y orientación (datos enviados)

Sabiendo que tanto los marcos base como los marcos del efector final entre el robot esclavo y el robot maestro no son iguales, la información arrojada por la interfaz tiene que ser modificada.

En cuanto a la posición, las coordenadas cartesianas obtenidas corresponden al marco coordenado $\{A\}$, intentando realizar este movimiento más natural respecto a la perspectiva del operador se propuso trasladar este a la posición del marco coordenado $\{B\}$ (Figura 4.3). De esta manera la punta del efector final en la interfaz corresponde a la punta del sensor de fuerza del robot esclavo.

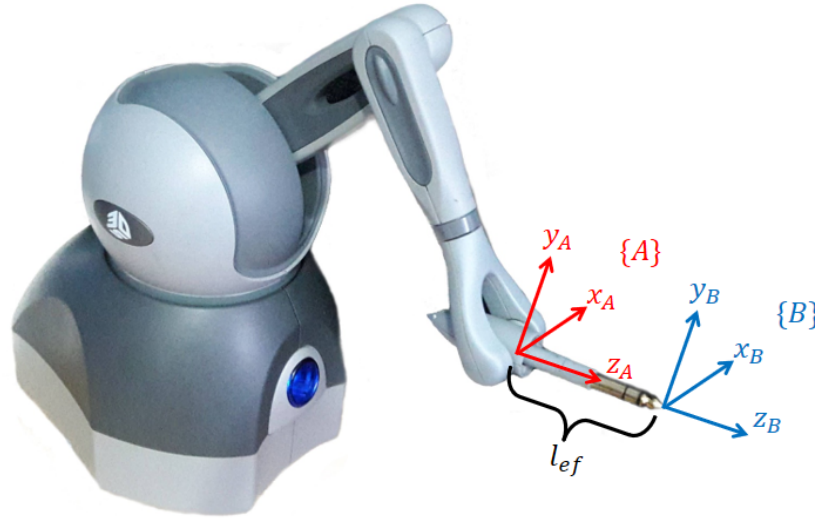


Figura 4.3: Marco coordenado original $\{A\}$ y marco coordenado trasladado $\{B\}$.

La transformación se realizó a partir de la multiplicación de las siguientes matrices de transformación homogéneas:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_{ef} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & l_{ef}r_{13} + p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & l_{ef}r_{23} + p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & l_{ef}r_{33} + p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Como se puede observar, la primera matriz de la ecuación (4.1) corresponde a los datos obtenidos de la interfaz en el marco coordenado $\{A\}$ (matriz de rotación y vector de posición), la segunda matriz representa la traslación que se realiza para llegar al segundo marco coordenado $\{B\}$ a una distancia l_{ef} . Finalmente como resultado de esto se obtiene el nuevo vector de posición, el cual se multiplica por un factor de escalamiento ψ para que el movimiento del robot esclavo sea acorde a la dimensión del espacio de trabajo en el que

se esta desplazando.

$$P_{ef} = \begin{bmatrix} l_{ef}r_{13} + p_x \\ l_{ef}r_{23} + p_y \\ l_{ef}r_{33} + p_z \end{bmatrix} \psi \quad (4.2)$$

Con la posición ya lista, se realizan las transformaciones necesarias para que la orientación enviada corresponda al marco base del robot esclavo como se muestra en la Figura 4.4.

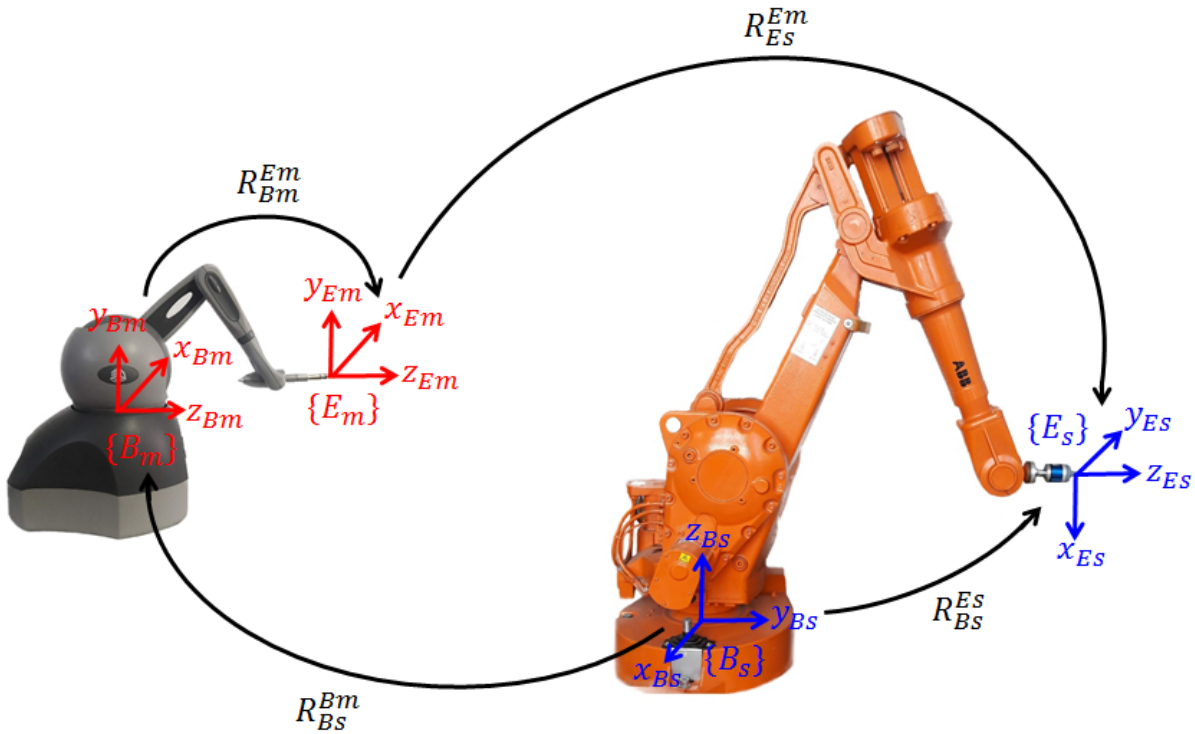


Figura 4.4: Transformaciones aplicadas.

La orientación que toma el efector final del robot esclavo, es ejecutada respecto a su marco de referencia base $\{B_s\}$, es por eso que la multiplicación de las siguientes matrices de rotación logran la matriz deseada.

$$R_{B_s}^{E_s} = R_{B_s}^{B_m} R_{B_m}^{E_m} R_{E_m}^{E_s} \quad (4.3)$$

Sustituyendo las matrices correspondientes en la ecuación (4.3), se tiene:

$$R_{B_s}^{E_s} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
\{Bm\} &= \text{Marco coordinado de la base del robot maestro} \\
\{Em\} &= \text{Marco coordinado del efector final del robot maestro} \\
\{Bs\} &= \text{Marco coordinado de la base del robot esclavo} \\
\{Es\} &= \text{Marco coordinado del efector final del robot maestro} \\
R_{Bs}^{Es} &\in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \text{matriz de rotación del marco } \{Bs\} \text{ al marco } \{Es\} \\
R_{Bs}^{Bm} &\in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \text{matriz de rotación del marco } \{Bs\} \text{ al marco } \{Bm\} \\
R_{Bm}^{Em} &\in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \text{matriz de rotación del marco } \{Bm\} \text{ al marco } \{Em\} \\
R_{Em}^{Es} &\in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \text{matriz de rotación del marco } \{Em\} \text{ al marco } \{Es\}
\end{aligned}$$

Finalmente esta matriz de rotación es convertida a cuaternio por medio de las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11), quedando listo para ser enviado junto con la posición al controlador del robot ABB.

4.4. Filtrado de las señales del dispositivo háptico

En el intercambio de datos, la interfaz es la que envía las instrucciones para que el robot manipulador se mueva según los deseos del operador, al estar trabajando con un usuario humano los pequeños temblores o movimientos involuntarios son recurrentes a la hora de la manipulación, es por eso que el uso de un filtros en dispositivos con operadores humanos es bastante recurrente como se puede leer en [43]. En este trabajo se seleccionó un filtro pasa bajas para las señales de posición y orientación, con el objetivo de volver el movimiento del robot esclavo más fluido y natural.

Se hizo uso de un filtro de primer orden para poder reducir estas perturbaciones incluyendo el ruido de las señales, la función de transferencia que representa este filtro tiene la forma:

$$H(s) = \frac{Y_F(s)}{Y(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (4.5)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
Y_F(s) &= \text{señal de salida filtrada.} \\
Y(s) &= \text{señal de entrada.} \\
\omega_c &= 2\pi f_c = \text{frecuencia angular de corte.} \\
f_c &= \text{frecuencia de corte.}
\end{aligned}$$

Los filtros pasa bajas dejan pasar las frecuencias que están por debajo de una determinada frecuencia, denominada frecuencia de corte, la cual fue elegida especialmente para cada señal filtrada.

Las señales filtradas fueron las componentes de la posición (x, y, z) y los ángulos de cada articulación de la interfaz $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$. Las frecuencias de corte de cada componente fueron las siguientes:

Señal	Frecuencia de corte (f_c)
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	5 [Hz]
$\theta_4, \theta_5, \theta_6$	1 [Hz]
x, y, z	1 [Hz]

Tabla 4.1: Frecuencias de corte de las señales filtradas.

Para poder programar este filtro se utilizó la transformación bilineal, esta es una técnica alternativa para aproximar un sistema analógico caracterizado por la función de transferencia en términos de la transformada de Laplace en su homólogo digital caracterizado por la transformada z a partir de la siguiente aproximación [44]:

$$s \approx \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (4.6)$$

Con T representando el periodo de muestreo del filtro discreto. Usando la ecuación (4.6) en la ecuación (4.5), se obtiene:

$$H_d(z) = \frac{Y_F(z)}{Y(z)} = H(s)|_{s=\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}}$$

$$Y_F(z) = \left(\frac{2 - \omega_c T}{2 + \omega_c T} \right) Y_F(z^{-1}) + \left(\frac{\omega_c T}{2 + \omega_c T} \right) Y(z) + \left(\frac{\omega_c T}{2 + \omega_c T} \right) Y(z^{-1}) \quad (4.7)$$

Con esta representación en tiempo discreto se programa el filtro y se utiliza para el envío de las señales. En el caso de la posición, la señal es enviada después del filtrado, y para la orientación se calcula la matriz de rotación del efector final respecto a la base de la interfaz R_{Bm}^{Em} a partir de los ángulos filtrados, que posteriormente se convierte a cuaternio y es enviado al robot esclavo junto con la posición.

Un ejemplo del funcionamiento del filtro se presenta en la Figura 4.5.

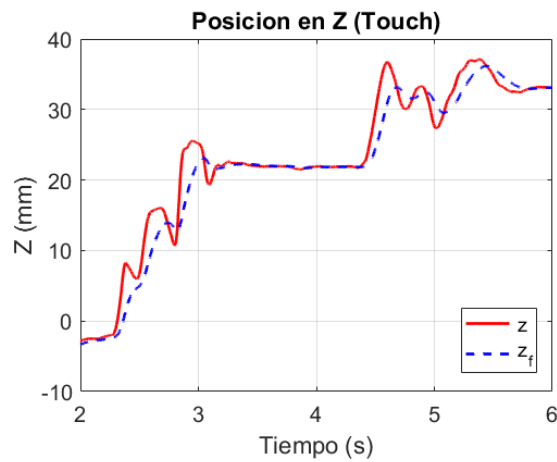


Figura 4.5: Ejemplo del funcionamiento del filtro en la posición z .

Como se habló con anterioridad el filtro pasa bajas permite el paso de frecuencias más bajas a la frecuencia de corte y atenúa las frecuencias más altas, esto se puede apreciar en la Figura 4.5, donde las componentes de alta frecuencia son atenuadas provocando que la señal se suavice y que disminuya la magnitud de los sobretiros.

Para visualizar mejor el comportamiento de este filtro se realiza el análisis espectral de la señal filtrada en la Figura 4.5. En la gráfica mostrada en la Figura 4.6a se puede apreciar que la amplitud de las frecuencias superiores a la frecuencia de corte es mínima (de acuerdo a la Tabla 4.1 la frecuencia de corte de la posición z tiene un valor de 1 Hz.).

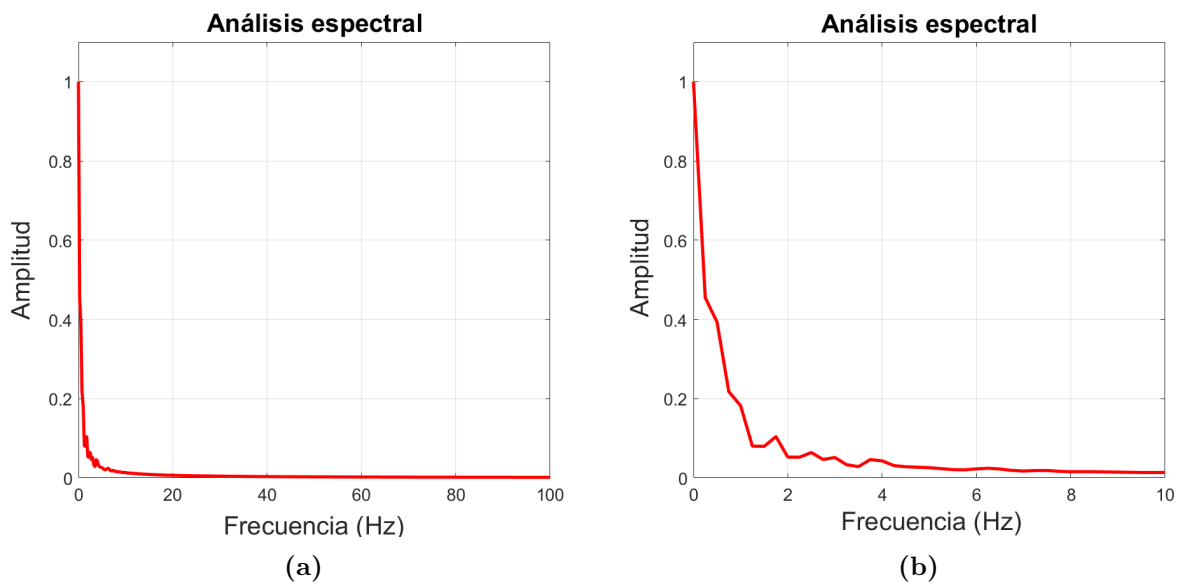


Figura 4.6: (a) Análisis espectral de las señal filtrada en la Figura 4.5 (b) Zoom del análisis espectral

Debido a la propia naturaleza del filtro cuando existen frecuencias altas en la señal real, la señal filtrada presenta un desfase que podría ser interpretado como un retraso, analizando la Figura 4.7, correspondiente al diagrama de Bode de un filtro pasa bajas con frecuencia de corte en 1 [Hz], se observa que el desfaseamiento tenderá a cero siempre y cuando la frecuencia esté por debajo de la frecuencia de corte, por otro lado si se supera este valor el desfaseamiento tenderá a -90 [°].

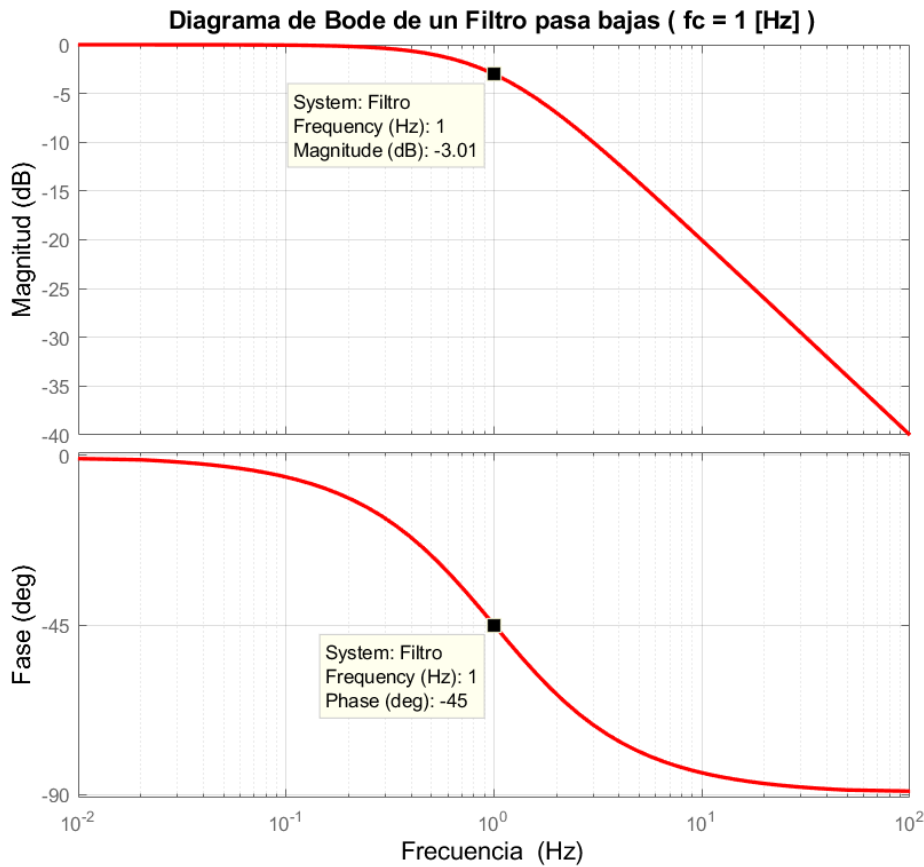


Figura 4.7: Diagrama de Bode de amplitud y fase.

De manera similar se puede realizar un análisis al diagrama de Bode correspondiente a la magnitud del filtro pasa bajas (Figura 4.7), donde la amplitud de la señal casi no se modificará si la frecuencia está por debajo de la frecuencia de corte, pero si este valor se supera, la amplitud de la señal disminuirá progresivamente con una pendiente de -20 [dB/dec].

Para seleccionar la frecuencia de corte adecuada para cada filtro se observó el comportamiento del robot esclavo con diferentes valores, finalmente se seleccionó la frecuencia en la que el comportamiento del robot esclavo era lo suficientemente fluido y no presentaba tanto desfase en las señales mandadas.

4.5. Interfaz gráfica de usuario

La interfaz gráfica de usuario se muestra en la Figura 4.8, ésta se desarrolló en el entorno de Visual Studio con el lenguaje C++, se encarga de procesar los datos leídos de posición y fuerza del dispositivo háptico con el objetivo de determinar la posición y la orientación que serán consignas para el robot 1.

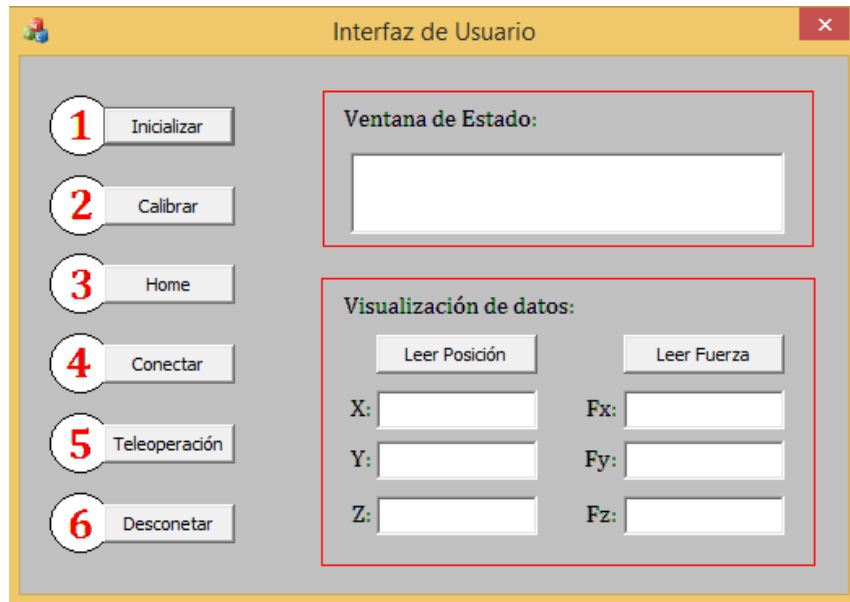


Figura 4.8: Interfaz de usuario.

Para realizar una prueba experimental se deben realizar las siguientes rutinas secuencialmente.

- Inicializar.- Una vez que el dispositivo háptico se encuentra alimentado y conectado a la computadora 2 se presiona el botón “Inicializar”, la GUI establecerá la comunicación con el dispositivo háptico y de ser exitosa se puede continuar.
- Calibrar.- Primero se coloca el efector final del dispositivo háptico en su posición de calibración y después se debe presionar el botón de “Calibrar”, hay que esperar a que termine para continuar.
- Home.- Primero se debe retirar el efector final del dispositivo háptico de su posición de calibración y dejarlo libre, después se debe presionar el botón de “Home”, la GUI controlará la posición del dispositivo háptico y generará una trayectoria que se seguirá hasta llegar a la posición de home.
- Conectar.- Una vez que el dispositivo háptico se encuentra en la posición de home el usuario debe tomar el efector final firmemente pero sin aplicar fuerza para moverlo,

después se debe presionar el botón de “Conectar” y la GUI establecerá una conexión cliente/servidor con el controlador IRC5 del robot 1 (Ver figura 4.9).

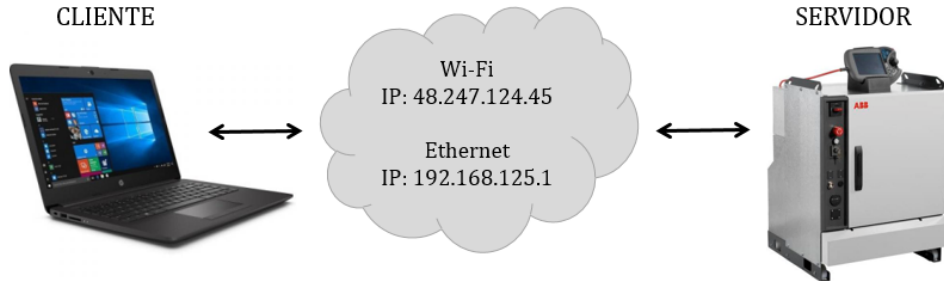


Figura 4.9: Diagrama de la comunicación cliente/servidor.

- Teleoperación.- Cuando se haya terminado de establecer la conexión se debe presionar el botón de “Teleoperación”, a partir de ese momento el usuario puede manipular y aplicar fuerzas en el efector final del dispositivo háptico y a su vez se envían los datos que la GUI procesó de la posición y orientación deseadas del robot 1, con un periodo constante de 20[ms]. Entre cada periodo y antes de enviar los datos se realiza el siguiente procesamiento, el valor de posición angular en todas las articulaciones del dispositivo háptico se leen y se filtran con un filtro pasa bajas digital, estas se aplican a las transformaciones homogéneas calculadas para la cinemática directa de su efector final y así se determina su cinemática directa filtrada, el vector de posición se escala multiplicándose por una constante para obtener la posición deseada del robot 1, mientras que los datos de la matriz de rotación calculada se convierten a cuaternio obteniéndose la orientación deseada del robot 1.
- Desconectar.- Cuando se presione el botón “Desconectar” la GUI finalizará la comunicación con el controlador IRC5 y dejará de actualizarse la posición deseada del robot 1, en ese momento se termina la prueba experimental.

Grabación: A continuación se añade un enlace para poder observar la rutina de inicialización/calibración de la interfaz háptica.

<https://youtu.be/OTdSNS1L1aI>

Capítulo 5

Resultados experimentales

En este capítulo se presenta la implementación del desarrollo teórico a través de diferentes experimentos, el funcionamiento de los esquemas de control es demostrado tanto en el sistema cooperativo como en la teleoperación háptica.

Estos experimentos se realizaron con dos robots manipuladores ABB IRB2400, cada uno equipado con un sensor de fuerza de seis grados de libertad de las marcas JR3 y ATI, se hizo uso de distintas herramientas como RobotStudio [®], que es el software que permite la programación y simulación de los robots ABB, el cual utiliza un lenguaje de programación textual de alto nivel denominado RAPID [®]. Los datos arrojados se graficaron en el software de cálculo matemático MATLAB [®].

Cabe recalcar que el robot consta de una arquitectura cerrada, esto implica que no se puede programar el control de posición, simplemente se le arroja un punto deseado, y el robot llega a él, la contribución está en la parte de control de fuerza, las trayectorias programadas, la comunicación de dispositivos y las relaciones impuestas entre estos.

5.1. Sistema cooperativo

La primera parte de estos experimentos pertenece a la parte de sistema cooperativo, en el cual se llevan a cabo tres diferentes experimentos relacionados con la manipulación de un objeto, en este caso un balón de básquetbol con un peso de 620 [g] y diámetro de 240 [mm].

En la Figura 5.1 se muestra el sistema cooperativo utilizado en los experimentos, el robot manipulador localizado a la izquierda (equipado con el sensor JR3) es el que dirige las trayectorias demandadas, mientras que el robot de la derecha (equipado con el sensor ATI) se mantiene en reacción. El objeto a manipular se encuentra en medio de los dos robots sostenido por un apoyo en su base, a través de diversos comandos los robots moverán el objeto de manera horizontal, rotacional e inclinación.

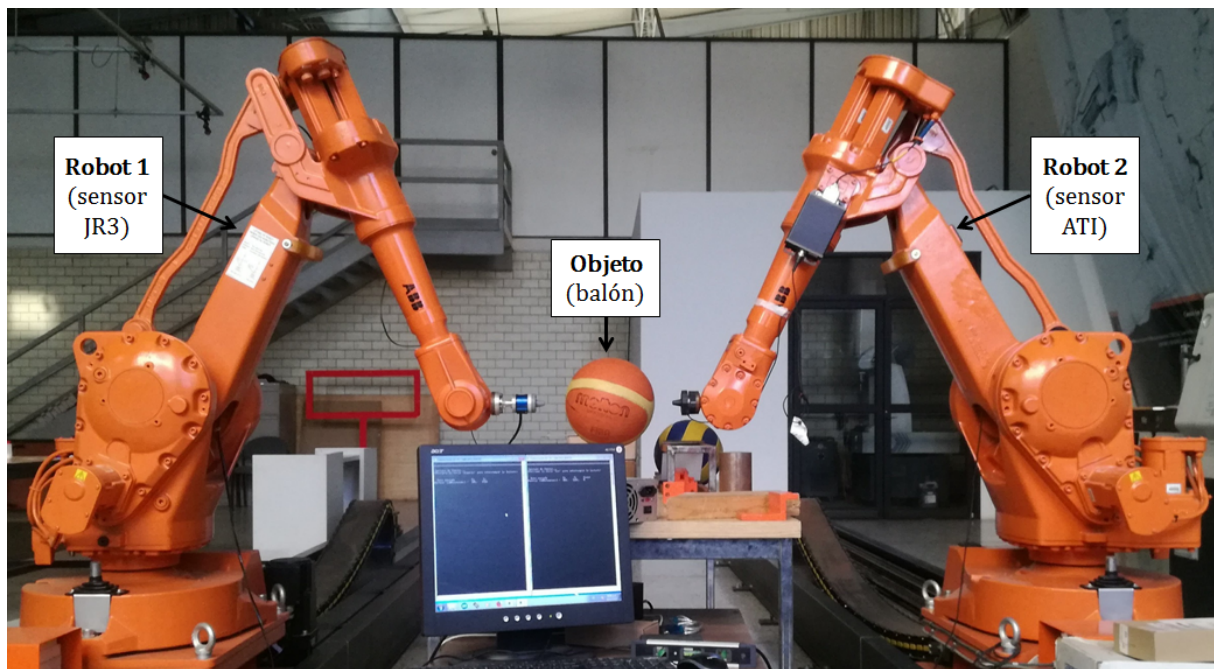


Figura 5.1: Sistema cooperativo físico.

A continuación se muestra la rutina inicial efectuada por los tres experimentos, y posteriormente se exponen los resultados gráficos arrojados en cada uno de ellos.

Rutina inicial

1. Los robots se mandan señales digitales con el objetivo de sincronizarse y así empezar al mismo tiempo la rutina.
2. El robot se dirige a la posición *Home*, utilizada para calibrar y comenzar cualquier rutina en los robots:

$$JR3 \left\{ \begin{array}{l} \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 \text{ [}^\circ\text{]} \\ ATI \left\{ \begin{array}{l} \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 \text{ [}^\circ\text{]} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

3. El robot se dirige a la posición *Segura*, con el objetivo de posicionar su área de trabajo alejada del operador:

$$JR3 \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = 90 \text{ [}^\circ\text{]} \\ \theta_2 = -30 \text{ [}^\circ\text{]} \\ \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 \text{ [}^\circ\text{]} \end{array} \right. \quad ATI \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = -90 \text{ [}^\circ\text{]} \\ \theta_2 = -30 \text{ [}^\circ\text{]} \\ \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 \text{ [}^\circ\text{]} \end{array} \right.$$

4. El robot se dirige a la posición *Cerca*, con la cual el efector final es llevado a escasos centímetros del objeto a manipular:

$$JR3 \begin{cases} \text{Posición } (x, y, z) = (0, -170, 250) \text{ [mm]} \\ \text{Orientación } (\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.5, -0.5, 0.5, 0.5) \end{cases}$$

$$ATI \begin{cases} \text{Posición } (x, y, z) = (0, 170, 250) \text{ [mm]} \\ \text{Orientación } (\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.5, 0.5, 0.5, -0.5) \end{cases}$$

5. El robot se dirige a la posición *Contacto*, a partir de esta el control de fuerza es accionado para lograr el agarre del objeto:

$$JR3 \begin{cases} \text{Posición } (x, y, z) = (0, -120, 250) \text{ [mm]} \\ \text{Orientación } (\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.5, -0.5, 0.5, 0.5) \end{cases}$$

$$ATI \begin{cases} \text{Posición } (x, y, z) = (0, 120, 250) \text{ [mm]} \\ \text{Orientación } (\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.5, 0.5, 0.5, -0.5) \end{cases}$$

Donde θ_i con $i = 1, \dots, 6$, representa el desplazamiento angular de la i –ésima articulación en el robot manipulador respecto al marco de referencia propio del robot ($\{R_1\}$ o $\{R_2\}$ respectivamente), (x, y, z) representa la posición en coordenadas cartesianas del efector final, y $(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ representa las componentes del cuaternión con el cual se puede interpretar la orientación del efector respecto al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$) en la que se está trabajando (ver Figura 5.2 para visualizar los marcos coordenados utilizados en el sistema cooperativo).

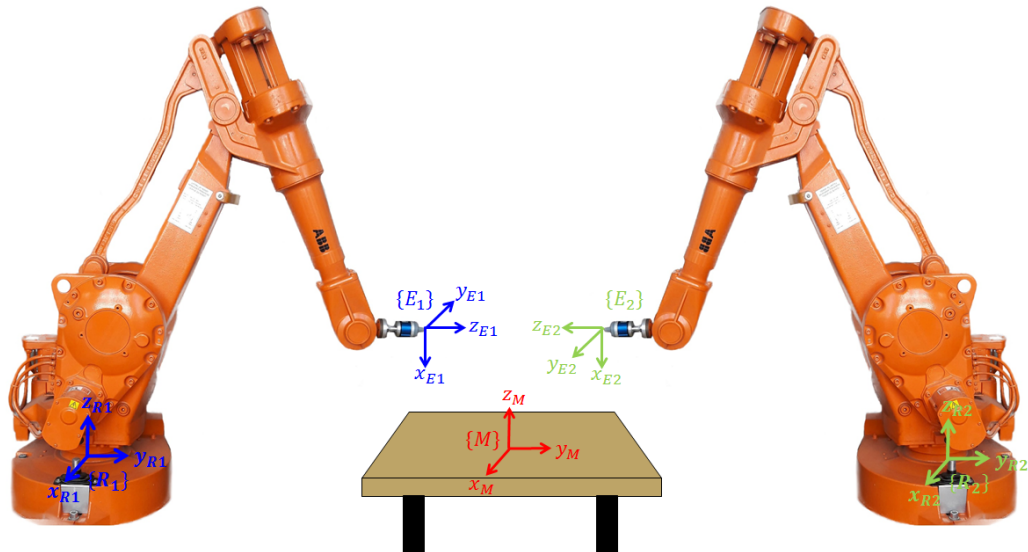


Figura 5.2: Marcos coordenados del sistema cooperativo.

5.1.1. Experimento 1: Movimiento horizontal del objeto a partir de un diferencial de fuerza.

Esta prueba consiste en mover horizontalmente el objeto (un balón de básquetbol) a partir de un diferencial de fuerza ocasionado por el seguimiento de una trayectoria sinusoidal en el eje y (respecto al marco coordenado $\{M\}$), esto es implementado en el robot 1 (JR3), variando su referencia de fuerza se logra observar el movimiento esperado, mientras que el robot 2 (ATI), intenta mantener su referencia de fuerza constante a lo largo del experimento. El esquema de control híbrido posición-fuerza extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)) es programado en este experimento.

Este procedimiento se implementó a partir de los siguientes pasos:

Robot ABB con sensor JR3

1. Rutina Inicial JR3 (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que ambos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{yd} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A1})}) \quad (5.1)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A1} es el tiempo inicial, es decir, el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B1}) \quad (5.2)$$

Donde t_{B1} es el tiempo inicial en esta rutina. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 80 [seg]*) Con el efector final posicionado, se procede a activar la ley de control híbrido posición-fuerza/par extendido (ecuaciones

(3.5) y (3.8)) para lograr una posición deseada (y_d), y fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) del efector final, las cuales son representadas en las siguientes ecuaciones:

$$y_d = y_0 + 75 \sin(4.5(t - t_{C1})) \quad (5.3)$$

$$f_{yd} = 35 + f_{yPI} \quad (5.4)$$

Donde y_0 es la posición en el eje y medida al inicio de este paso, t_{C1} el tiempo inicial en esta rutina y f_{yPI} la fuerza salida del control de posición-I (ecuación (3.8)).

Robot ABB con sensor ATI

1. Rutina Inicial ATI (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que ambos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{yd} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A2})}) \quad (5.5)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A2} es un tiempo inicial, es decir el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B2}) \quad (5.6)$$

Donde t_{B2} es el tiempo inicial. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 80 [seg]*) Una vez recibida la señal, el robot continua con el control híbrido posición fuerza (ecuación (3.5)), manteniendo el punto de contacto entre el efector final y el objeto. Esto quiere decir que el robot se mantiene en reacción.

A continuación se muestran los parámetros utilizados a lo largo del experimento:

	Robot 1 (JR3)	Robot 2 (ATI)
Ganancias del control PI de fuerza		
k_p	0.13	0.05
k_i	0.8	1
Ganancias del control PID de posición		
k_p	0.3	-
k_i	0.015	-
k_d	0.08	-

Tabla 5.1: Ganancias de los controladores usadas en el experimento 1 del sistema cooperativo.

Es importante mencionar que los valores de las ganancias de cada controlador fueron determinados de manera heurística, si bien se tienen las desigualdades obtenidas en el análisis de estabilidad, éstas no se utilizan para la sintonización de los controladores, puesto que no se conocen los valores exactos de la rigidez del ambiente y del ambiente virtual. Aspectos como la presión del balón, el desgaste de la superficie o el material con el que está hecho influyen en la estimación de la rigidez del ambiente, por lo tanto el cálculo de este parámetro sería impreciso y poco fiable de utilizar.

En los experimentos subsecuentes las ganancias fueron obtenidas de igual forma.

Grabación: A continuación se añade un enlace para poder observar el experimento 1.

https://youtu.be/Q_rUAKN9w1o

Resultados obtenidos:

Como se puede apreciar en la Figura 5.3, el experimento se desarrolló en el plano yz , por lo que no existe movimiento en el eje x . En el caso del eje y se observa que la trayectoria a seguir es una senoidal dada por la ecuación (5.3) con el objetivo de lograr un movimiento horizontal a través de un diferencial de fuerza. En el eje z se aprecia una trayectoria tipo rampa que es usada para levantar el objeto del pedestal donde se encuentra apoyado, después de haber alcanzado una altura deseada la referencia es una constante.

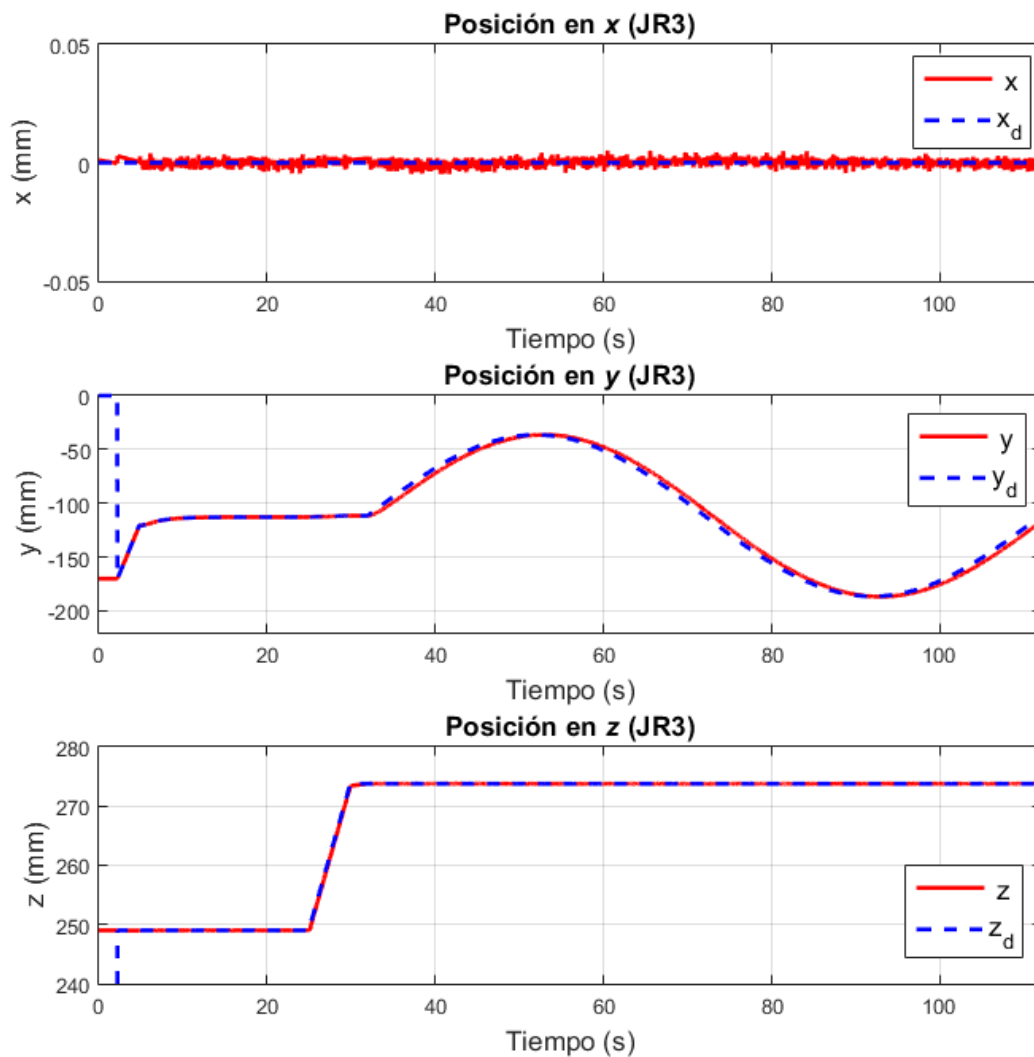


Figura 5.3: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 1.

En el caso del robot ATI la situación es similar, la posición en el eje x se mantiene en cero puesto que los experimentos se desarrollan en el plano yz . La trayectoria senoidal observada en el eje y a diferencia del robot JR3 es una referencia salida del control de fuerza no del control de posición-I como en el otro robot. El levantamiento del objeto se realiza de manera sincronizada por lo que el robot ATI también cuenta con la trayectoria tipo rampa y una constante al final de esta.

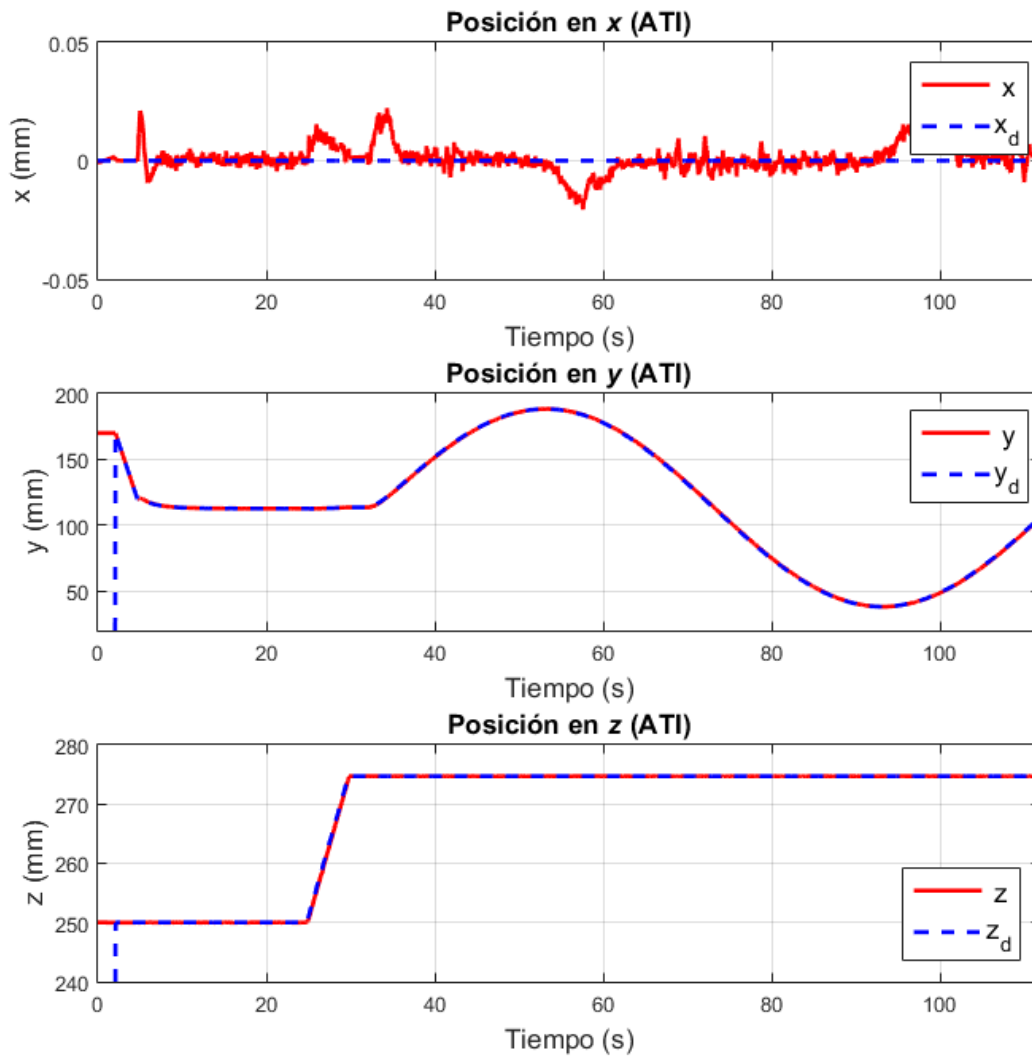


Figura 5.4: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 1.

El error de posición en el eje y de ambos robots es mostrado en la Figura 5.5), en el caso del robot JR3 esta señal es la entrada al control de posición-I (ecuación (3.8)), donde la salida de este bloque es una fuerza de referencia en el eje y mostrada en la Figura 5.6.

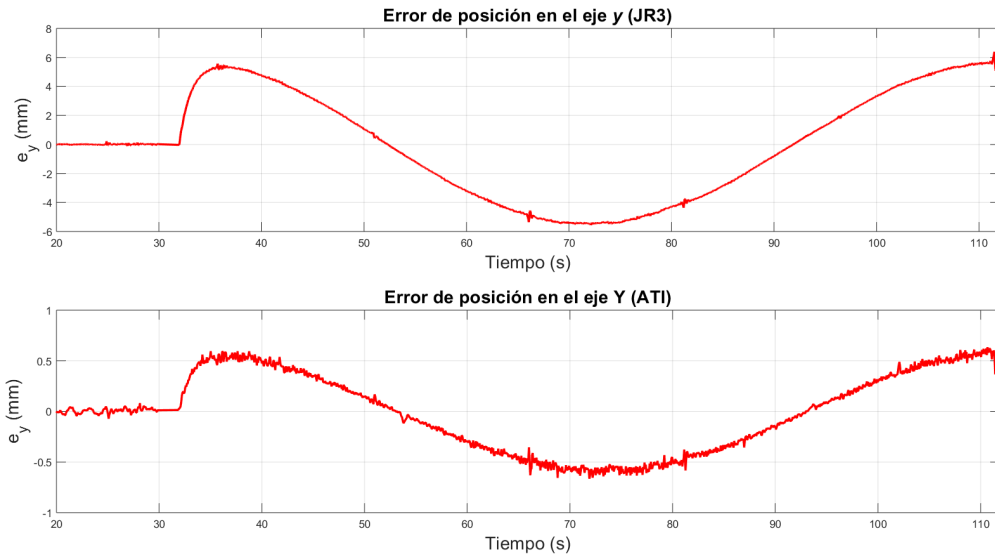


Figura 5.5: Error de posición en los ejes y en ambos robots, experimento 1.

El bloque de control de posición-I es activado después de haber asegurado el agarre del objeto, razón por la cual la gráfica de la fuerza de referencia empieza desde el segundo 32.



Figura 5.6: Fuerza de referencia en el eje y del robot JR3, experimento 1.

El control híbrido posición-fuerza extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)) es aplicado al robot 1 (JR3), es por eso que su referencia después de los 30 [seg] empieza a variar debido a la trayectoria sinusoidal dada en la ecuación (5.3), como resultado del control de posición-I (ecuación (3.8)) se obtiene una fuerza de referencia (Figura 5.6) que es sumada a la referencia actual de 35 [N]. Por otro lado el robot 2 (ATI) se encuentra en reacción, por lo que la fuerza deseada no varía como en el otro robot, esta se mantiene en 35 [N] y el manipulador intenta conservar esta referencia.

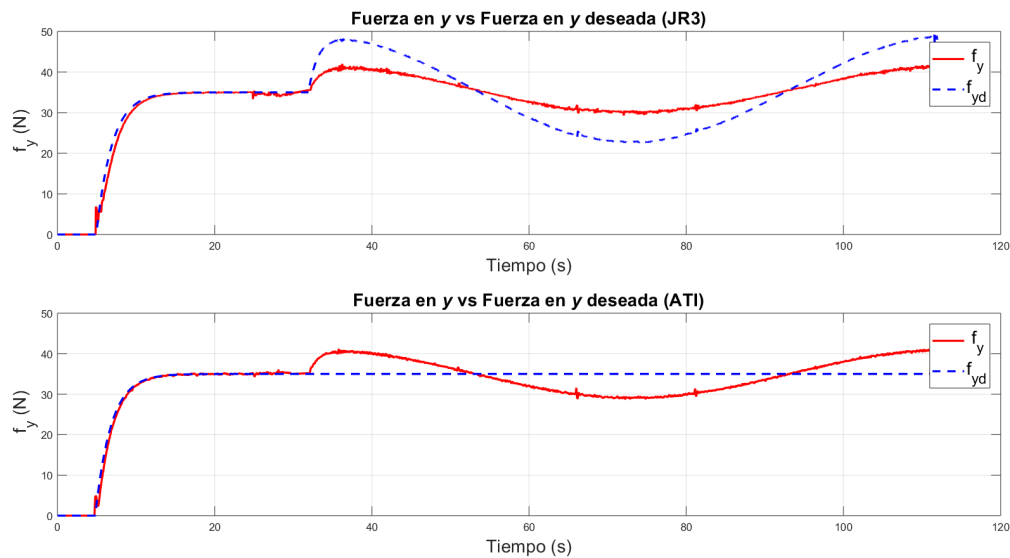


Figura 5.7: Fuerza medida vs fuerza deseada en el eje y en ambos robots, experimento 1.

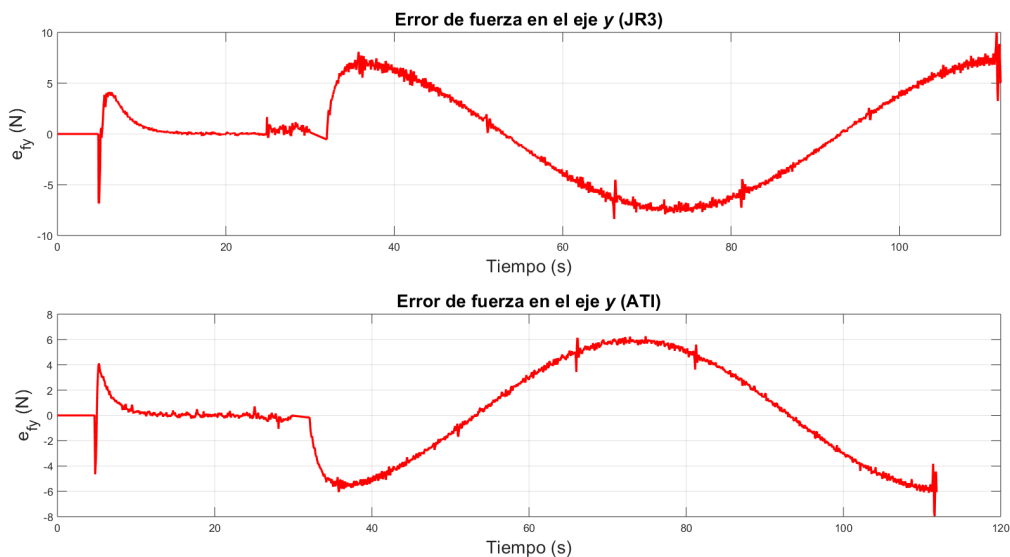


Figura 5.8: Error de fuerza en el eje y en ambos robots, experimento 1.

La diferencia entre la fuerza deseada y la fuerza medida en el eje y en ambos robots es denominada error de fuerza en y (Figura 5.8), esta señal es la entrada al bloque de control de fuerza. Como salida se obtiene una posición de referencia en el eje y la cual refleja el movimiento horizontal presentado en el objeto (Figura 5.9).

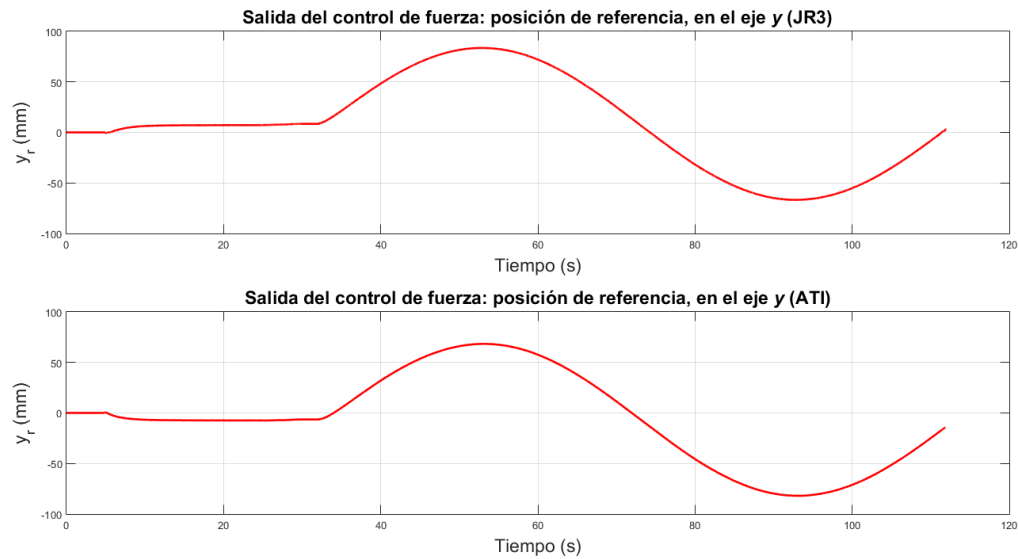


Figura 5.9: Posición de referencia en el eje y en ambos robots, experimento 1.

5.1.2. Experimento 2: Rotación del objeto.

Esta prueba consiste en rotar el objeto (un balón de básquetbol) alrededor de su centro de masa, esto se efectúa cambiando la posición y orientación de los efectores finales, manteniéndolos siempre colineales uno respecto al otro mientras conservan el agarre del objeto. Esto se lleva a cabo gracias al control híbrido posición-fuerza extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)).

Este procedimiento se implemento a partir de los siguientes pasos:

Robot ABB con sensor JR3

1. Rutina Inicial JR3 (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que estos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{ M \}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{yd} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A1})}) \quad (5.7)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A1} es el tiempo inicial, es decir, el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B1}) \quad (5.8)$$

Donde t_{B1} es el tiempo inicial en esta rutina. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 80 [seg]*) Una vez recibida la señal, el efector final cambia de modo gradual su orientación actual (ϕ) a través de una onda sinusoidal que va de los 15[°] a -15 [°] respecto a la horizontal en el plano yz , la ecuación que representa esta trayectoria es:

$$\phi = 15 \sin (4.5(t - t_{C1})) \quad (5.9)$$

Comenzando por el semiciclo positivo de la señal. Donde t_{C1} es el tiempo inicial en esta rutina.

Todo esto se ejecuta a la par del control híbrido posición-fuerza extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)) para lograr una posición deseada (y_d, z_d) y una fuerza deseada $(f_{\lambda d})$ sobre la línea de acción del efector final (denominado eje λ), las cuales son representadas en las siguientes ecuaciones:

$$y_d = -r_o \cos(\phi) \quad (5.10)$$

$$z_d = z_0 + r_o \sin(\phi) \quad (5.11)$$

$$f_{\lambda d} = 35 + (f_{yPI} \cos|\phi| + f_{zPI} \sin(|\phi|)) \quad (5.12)$$

Donde r_o es el radio del balón de básquetbol menos la distancia de penetración por el agarre, z_0 es la posición en z medida al inicio de este paso, f_{yPI} la fuerza que se origina a partir del control de posición-I (ecuación (3.8)) en el eje y y f_{zPI} la fuerza que se origina a partir del control de posición-I (ecuación (3.8)) en el eje z .

Robot ABB con sensor ATI

1. Rutina Inicial ATI (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que estos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{yd} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A2})}) \quad (5.13)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A2} es un tiempo inicial, es decir el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B2}) \quad (5.14)$$

Donde t_{B2} es el tiempo inicial en esta rutina. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 80 [seg]*) Una vez recibida la señal, el efector final cambia de modo gradual su orientación actual (ϕ) a través de una onda sinusoidal que va de los $15[^\circ]$ a $-15 [^\circ]$ respecto a la horizontal en el plano yz , la ecuación que representa esta trayectoria es:

$$\phi = -15 \sin(4.5(t - t_{C2})) \quad (5.15)$$

Comenzando por el semiciclo negativo de la señal. Donde t_{C2} es el tiempo inicial en esta rutina. La trayectoria circular deseada a seguir esta definida como:

$$y_d = r_o \cos(\phi) \quad (5.16)$$

$$z_d = z_0 + r_o \sin(\phi) \quad (5.17)$$

Donde r_o es el radio del balón de básquetbol menos la distancia de penetración por el agarre y z_0 es la posición en z medida al inicio de este paso.

Todo esto se ejecuta a la par del control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)) para garantizar el agarre del objeto.

A continuación se muestran los parámetros utilizados a lo largo del experimento:

	Robot 1 (JR3)	Robot 2 (ATI)
Ganancias del control PI de fuerza		
k_p	0.13	0.05
k_i	0.8	1
Ganancias del control PID de posición		
k_p	0.36	-
k_i	0.018	-
k_d	0.096	-

Tabla 5.2: Ganancias de los controladores usadas en el experimento 2 del sistema cooperativo.

Grabación: A continuación se añade un enlace para poder observar el experimento 2.

https://youtu.be/7CPyeFU0_mo

Resultados obtenidos:

Como se puede apreciar en la Figura 5.10, el experimento se desarrolló nuevamente en el plano yz , por lo que no existe movimiento en el eje x . En el caso del eje y se observa que la trayectoria a seguir después de haber asegurado el agarre es una curva senoidal dada por la ecuación (5.10) que junto a la ecuación (5.11) en el eje z el efector final describe una circunferencia con el objetivo de lograr un movimiento de rotación en el objeto sobre su propio eje. Antes de la señal senoidal en el eje z , se aprecia una trayectoria tipo rampa que es usada para levantar el objeto del pedestal donde de encuentra apoyado.

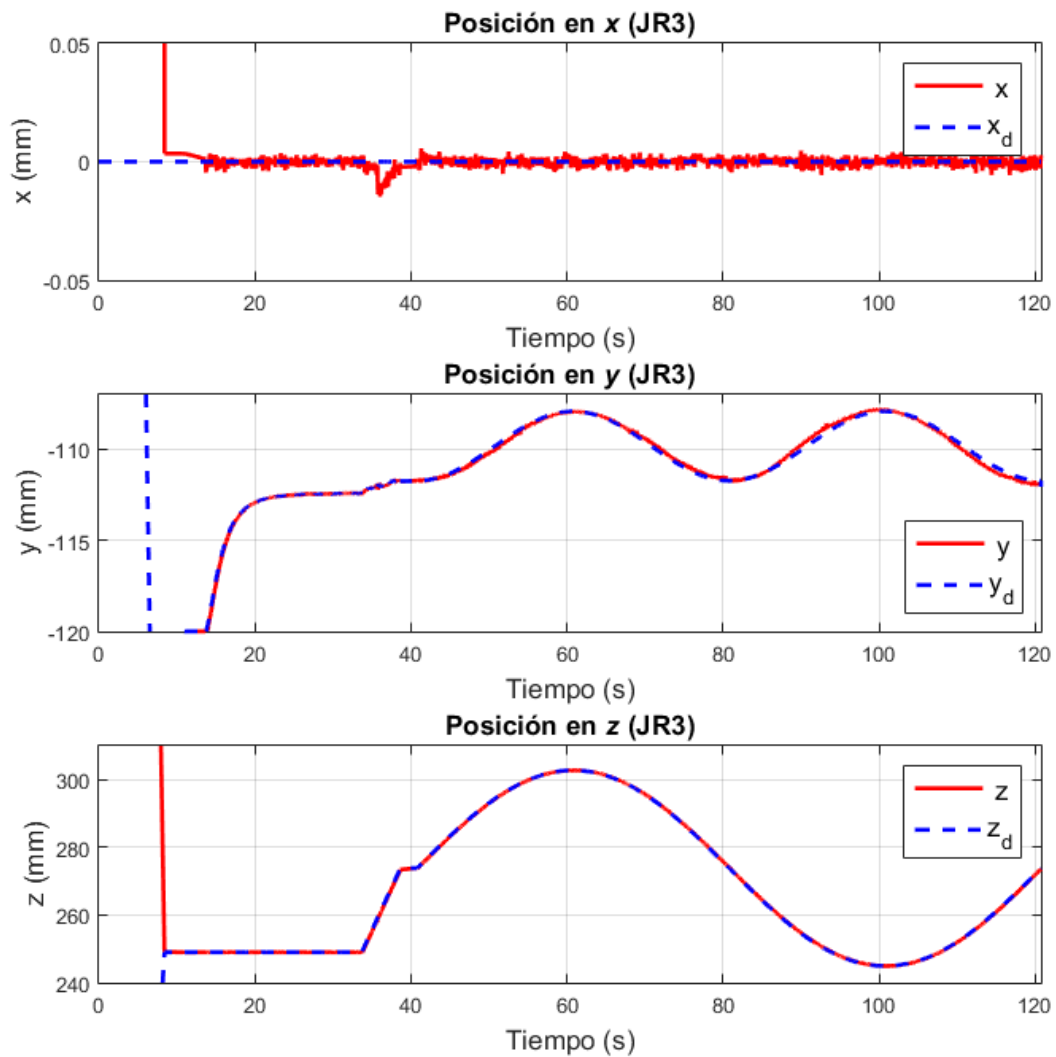


Figura 5.10: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 2.

En el caso del robot ATI la situación es similar, la posición en el eje x se mantiene en cero puesto que los experimentos se desarrollan en el plano yz . Las trayectorias senoidales deseadas en los ejes y y z corresponden a las ecuaciones (5.16) y (5.17), que en conjunto logran que el efector final describa una circunferencia con el objetivo de lograr el movimiento deseado. En el eje z se puede observar nuevamente la referencia tipo rampa entre los segundos 34 a 39 en ambos robots, seguida por una pausa de 2 segundos para dar comienzo a la señal sinusoidal.

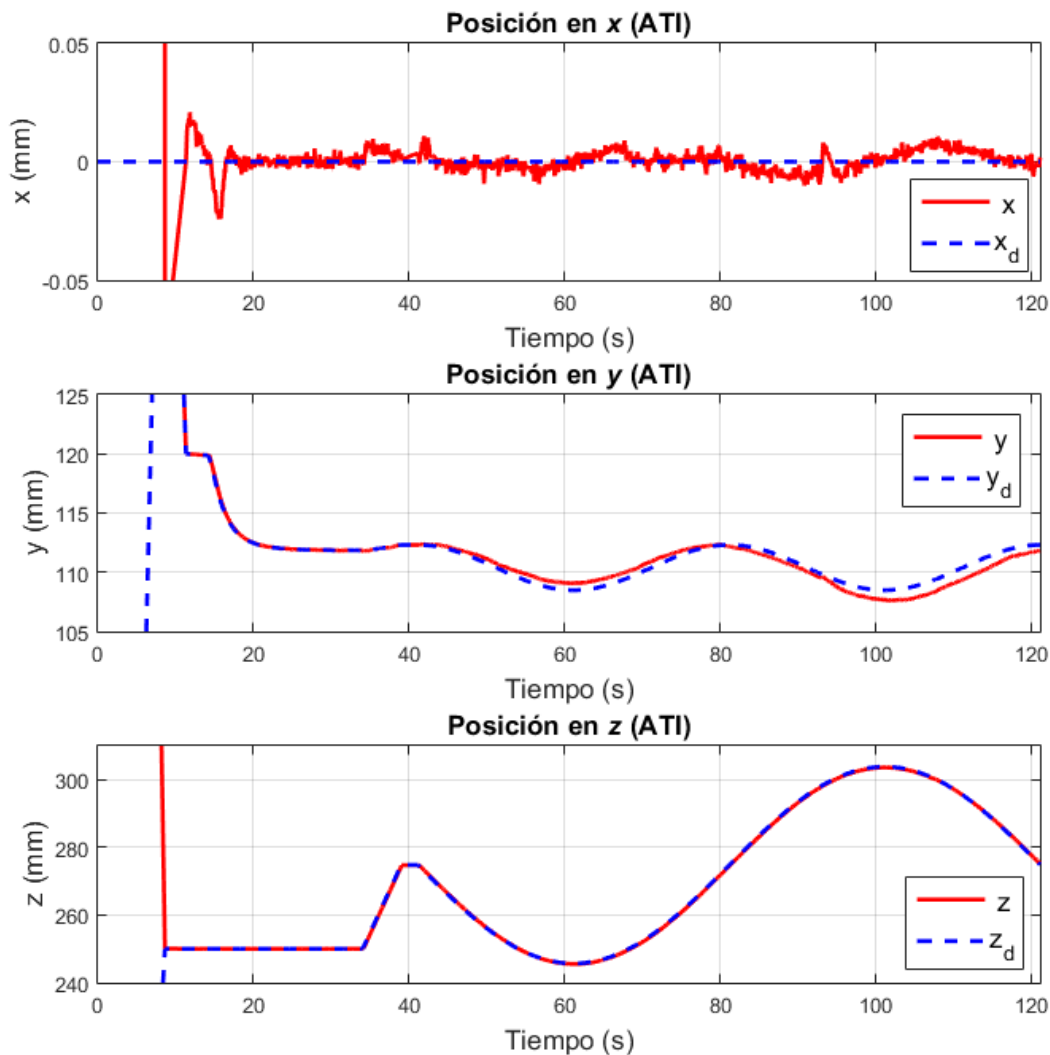


Figura 5.11: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 2.

Una clara diferencia entre el robot JR3 y el robot ATI se puede percibir en el eje y , ya que el control de posición-I (ecuación (3.8)) solo fue implementado en el robot JR3, el error de posición es considerablemente bajo respecto al robot ATI (Figura 5.12), el cual solo tiene activo el control de fuerza (ecuación (3.5)). El error en el eje z en ambos robots es pequeño y la diferencia no es tan visible como en el eje y debido a la baja frecuencia de la trayectoria de referencia.

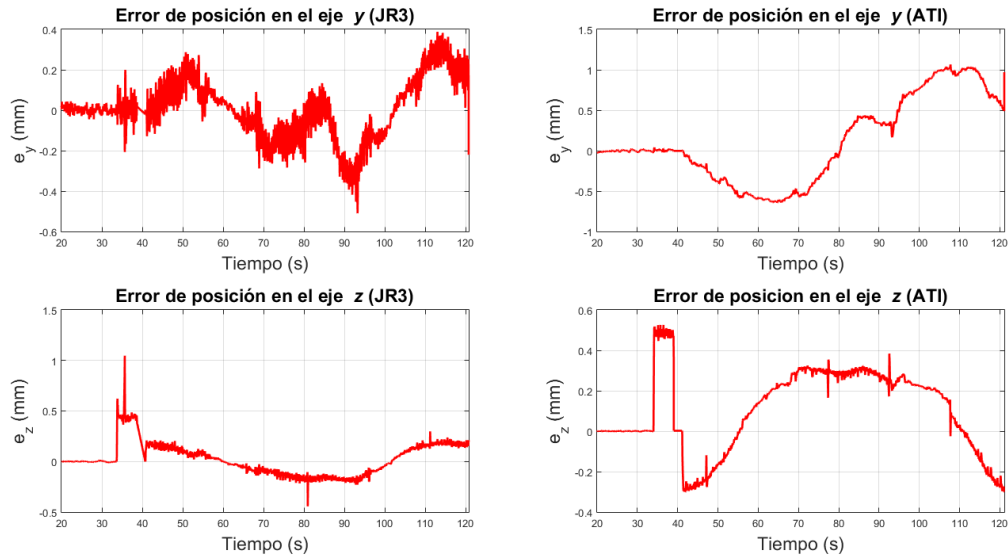


Figura 5.12: Error de posición en los ejes y, z en ambos robots, experimento 2.

Los errores de posición en el robot JR3 son las señales de entrada en los bloques de control de posición-I (ecuación (3.8)), que dan como salida fuerzas de referencia en cada uno de sus ejes correspondientes (f_{yPI} y f_{zPI}). Con el objetivo de simplificar el cálculo computacional, el control de fuerza se realizó siempre sobre el eje correspondiente a la línea de acción de los efectores finales denominado eje λ , por lo tanto las fuerzas de referencia fueron usadas de acuerdo a la ecuación (5.12) para obtener una sola fuerza de referencia como se aprecia en la Figura 5.13.



Figura 5.13: Fuerza de referencia en el eje λ del robot JR3, experimento 2.

En la Figura (5.14), se comparan las fuerzas deseadas con las fuerzas medidas en el eje λ en ambos robots. Se puede observar claramente que en el robot JR3 se implementó el control híbrido posición-fuerza extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)), ya que presenta una referencia sinusoidal correspondiente a la Figura (5.13), mientras que el robot 2 (ATI) se mantiene reactivo siguiendo la constante de 35 [N] en el control de fuerza (ecuación (3.5)).

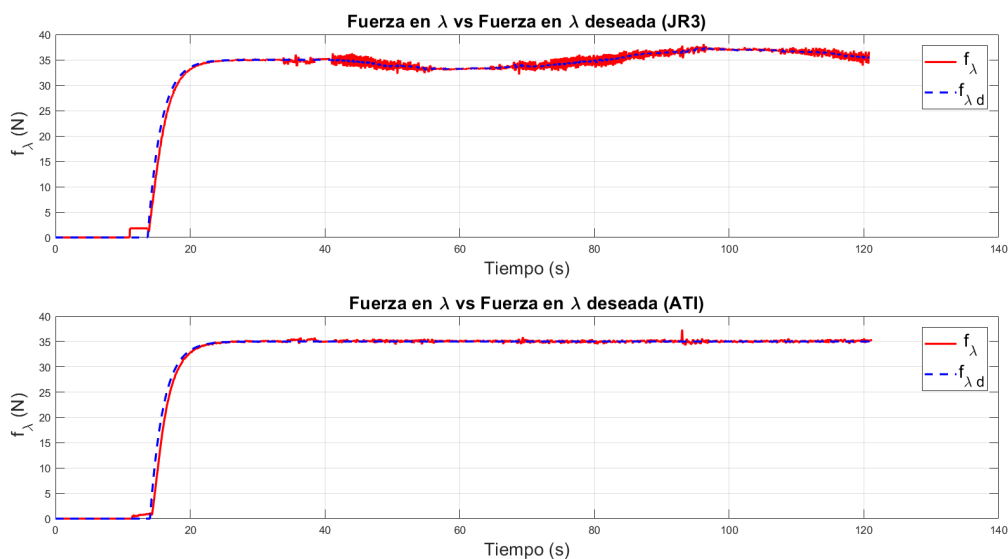


Figura 5.14: Fuerza medida vs fuerza deseada en el eje λ en ambos robots, experimento 2.

El error de fuerza en ambos robots se mantiene en ± 5 [N] (Figura 5.15), lo cual no representa un peligro para el agarre del objeto.

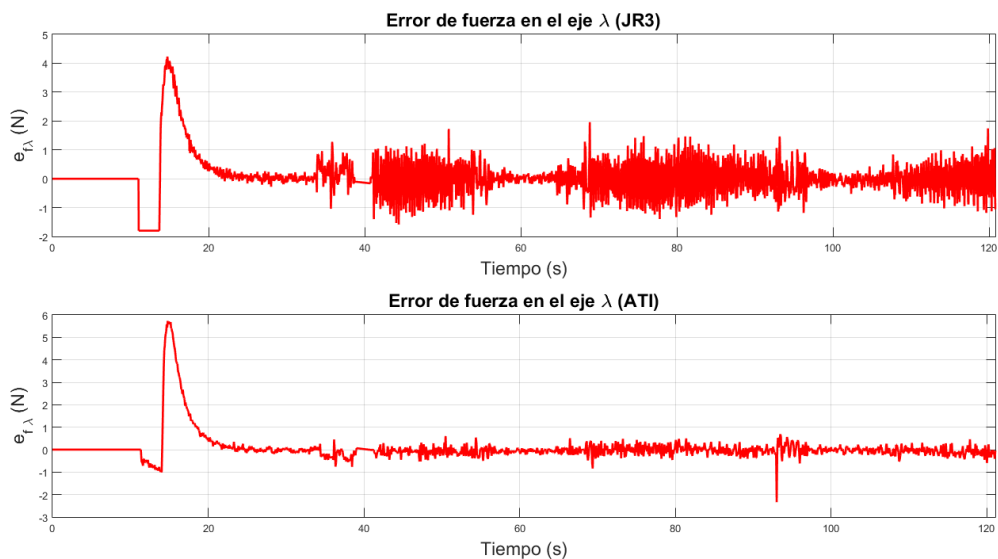


Figura 5.15: Error de fuerza en el eje λ en ambos robots, experimento 2.

Desde el inicio del experimento hasta el segundo 35 la posición de referencia (λ_r) se implementa en el eje y (Figura 5.16), en el momento en que los efectores finales empiezan a cambiar de orientación, esta posición no se implementa directamente ya que el efector ya no solo se encuentra actuando en el eje y , ahora actúa en el plano yz , por lo tanto la posición de referencia en cada eje a partir de este momento se representa a través de las siguientes ecuaciones:

$$JR3 \begin{cases} y_r = \lambda_r \cos(\phi) \\ z_r = -\lambda_r \sin(\phi) \end{cases} \quad (5.18)$$

$$ATI \begin{cases} y_r = -\lambda_r \cos(\phi) \\ z_r = -\lambda_r \sin(\phi) \end{cases} \quad (5.19)$$

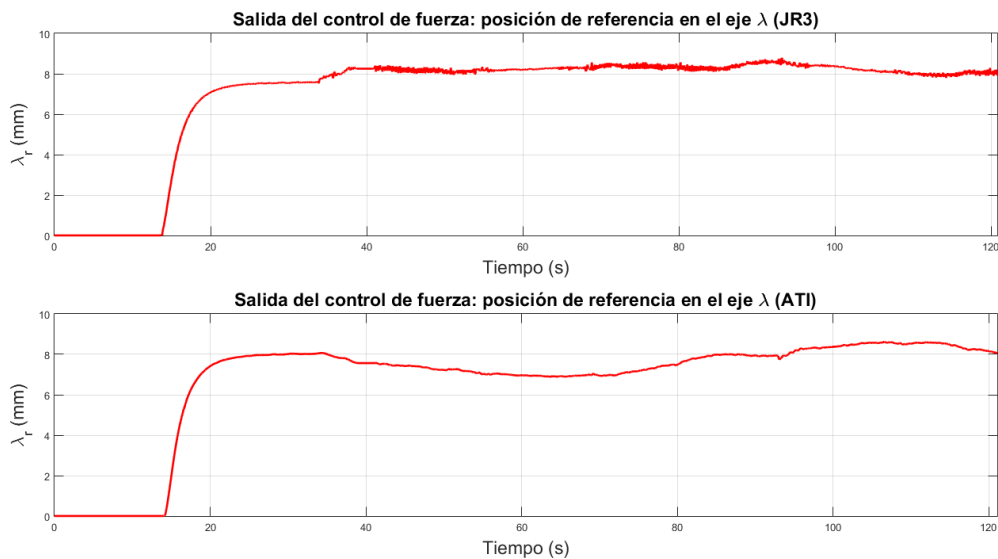


Figura 5.16: Posición de referencia en el eje λ en ambos robots, experimento 2.

El ángulo deseado (ϕ) del efector final en ambos robots, se puede observar en la Figura 5.17, que a partir del segundo 40, empieza a variar de manera senoidal de acuerdo a las ecuaciones (5.9) y (5.15), para lograr el movimiento de rotación y que siempre estén colineales los efectores, las orientaciones deben de ser de igual magnitud pero de signo contrario como se aprecia en la Figura 5.17.

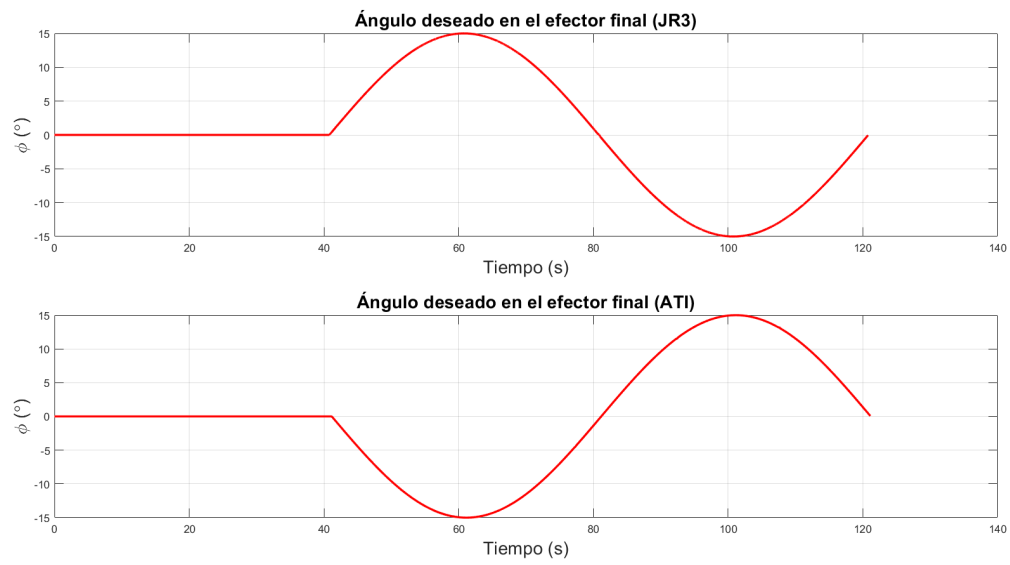


Figura 5.17: Ángulo del efector final (ϕ) en ambos robots, experimento 2.

5.1.3. Experimento 3: Inclinación del objeto.

Esta prueba consiste en inclinar el objeto (un balón de básquetbol) a partir del cambio de orientación de uno de los efectores finales, mientras que el otro efector permanece en reacción para mantener el agarre. Esto se lleva a cabo gracias al control híbrido posición-fuerza/par extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)).

Este procedimiento se implemento a partir de los siguientes pasos:

Robot ABB con sensor JR3

1. Rutina Inicial JR3 (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que estos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{yd} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A1})}) \quad (5.20)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A1} es el tiempo inicial, es decir, el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B1}) \quad (5.21)$$

Donde t_{B1} es el tiempo inicial en esta rutina. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Una vez recibida la señal, el efector final cambia de modo gradual su orientación actual (ϕ) de 0 [°] a -15 [°] respecto a la horizontal en el plano yz a través de una trayectoria sinusoidal:

$$\phi = 15 \sin(4.5(t - t_{C1})); \quad (5.22)$$

Donde t_{C1} es el tiempo inicial en esta rutina.

6. (*Tiempo de duración de la rutina: 40 [seg]*) Con el efector final posicionado, se procede a activar la ley de control híbrido posición-fuerza/par extendido (ecuaciones (3.5) y (3.8)) para lograr una posición deseada (y_d), par deseado en el eje x (M_{xd})

y fuerza deseada en el eje y (f_{yd}), las cuales son representadas en las siguientes ecuaciones:

$$y_d = y_0 \quad (5.23)$$

$$M_{xd} = -0.075(t - t_{D1}) + M_{x0} \quad (5.24)$$

$$f_{yd} = 35 + f_{yPI} \quad (5.25)$$

Donde y_0 y M_{x0} es la posición y par medidos al inicio de este paso, t_{D1} es el tiempo inicial en esta rutina y f_{yPI} la fuerza se origina a partir del control de posición-I.

7. (*Tiempo de duración de la rutina: 40 [seg]*) Se procede con los objetivos anteriores, únicamente se modifica el par deseado.

$$M_{xd} = M_{xf} \quad (5.26)$$

Donde M_{xf} es el último momento medido al final del paso anterior, de esta forma la referencia ahora es un valor constante.

Robot ABB con sensor ATI

1. Rutina Inicial ATI (Posición: *Home, Seguro, Cerca, Contacto*)
2. El efector final se va acercando al objeto con desplazamientos cortos hasta que el sensor alcance una fuerza de 2 [N] en el eje de acción, en ese momento se envía una señal al otro robot para que estos se sincronicen. A partir de este paso todas las instrucciones se programan de acuerdo al marco de referencia de la mesa ($\{M\}$).
3. (*Tiempo de duración de la rutina: 20 [seg]*) Cuando se recibe la señal de sincronización, se activa la ley de control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), teniendo como referencia una trayectoria suave para la fuerza deseada en el eje y (f_{yd}) con un valor final de 35 [N] con el objetivo de asegurar el agarre del objeto. La ecuación que representa dicha trayectoria es:

$$f_{td} = 35 (1 - e^{-0.5(t-t_{A2})}) \quad (5.27)$$

Donde t es el tiempo del reloj del robot y t_{A2} es el tiempo inicial, es decir, el valor que tiene el reloj del robot al inicio de esta rutina.

4. (*Tiempo de duración de la rutina: 5 [seg]*) Con la ley de control activada (ecuación (3.5)), se procede a levantar al objeto, siguiendo una trayectoria deseada en el eje z (z_d). La trayectoria es la siguiente:

$$z_d = 5(t - t_{B2}) \quad (5.28)$$

Donde t_{B2} es el tiempo inicial en esta rutina. Al final se envía una señal digital para la sincronización.

5. (*Tiempo de duración de la rutina: 100 [seg]*) Una vez recibida la señal, el robot continúa con el control híbrido posición-fuerza (ecuación (3.5)), manteniendo el punto de contacto entre el efector final y el objeto. Esto quiere decir que el robot se mantiene en reacción.

A continuación se muestran los parámetros usados a lo largo del experimento:

	Robot 1 (JR3)	Robot 2 (ATI)
Ganancias del control PI de fuerza		
k_p	0.13	0.05
k_i	0.8	1
Ganancias del control PI de par		
k_p	0.2	-
k_i	15	-
Ganancias del control PID de posición		
k_p	0.36	-
k_i	0.018	-
k_d	0.096	-

Tabla 5.3: Ganancias de los controladores usadas en el experimento 3 del sistema cooperativo.

Grabación: A continuación se añade un enlace para poder observar el experimento 3.

<https://youtu.be/zTPBly9RHpk>

Resultados obtenidos:

Como se puede apreciar en la Figura 5.18, el experimento se desarrolló una vez más en el plano yz , por lo que no existe movimiento en el eje x . En el caso del eje y se observa que la trayectoria a seguir después de haber asegurado el agarre es una constante, mientras que en el eje z se aprecia una primera rampa correspondiente al levantamiento del objeto y segundos después, una segunda trayectoria tipo rampa que logra el movimiento de inclinación deseado.

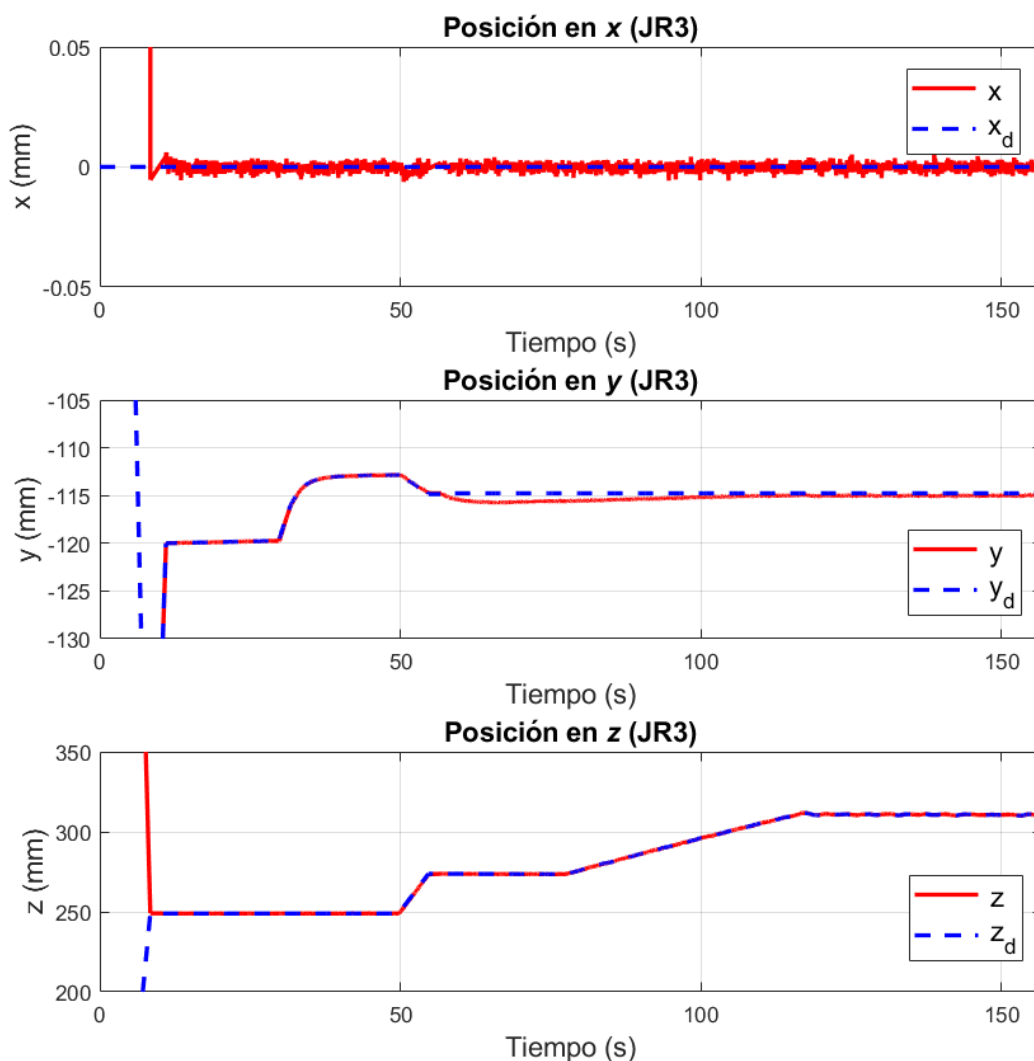


Figura 5.18: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot JR3, experimento 3.

En el caso del robot ATI la situación es similar, la posición en el eje x se mantiene en cero puesto que los experimentos se desarrollan en el plano yz . En el eje y se observan las variaciones de referencia debidas al control de fuerza (ecuación (3.5)) mostradas en la Figura 5.24, en el eje z se puede observar la referencia tipo rampa usada para el levantamiento del objeto del segundo 50 a 55 quedando finalmente con una referencia constante.

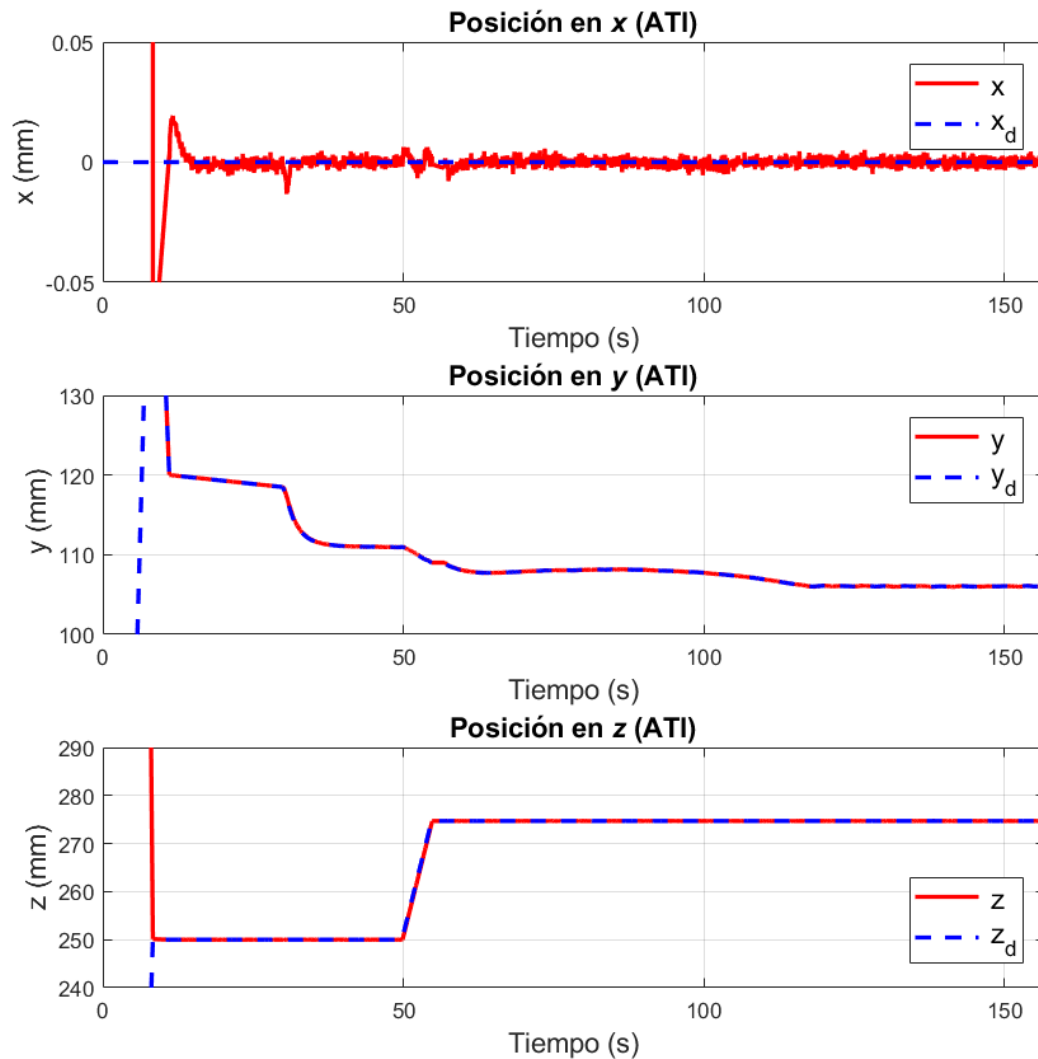


Figura 5.19: Posición real vs posición deseada en los ejes x, y, z del robot ATI, experimento 3.

Los errores en el eje y y z de ambos robots son mostrados en la Figura 5.20, cada uno de ellos presenta una magnitud considerada pequeña, ya que se encuentran acotados entre ± 1 [mm] cada una de ellas.

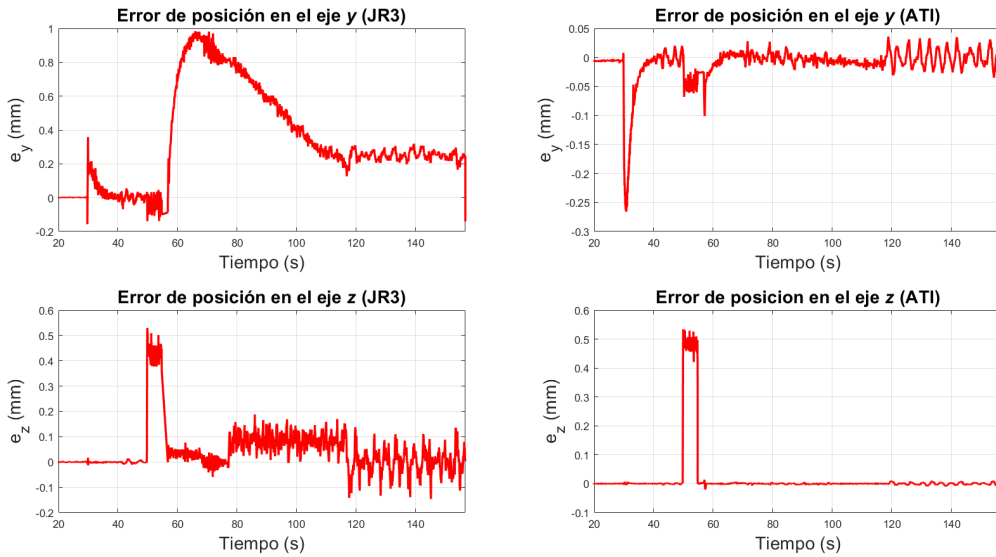


Figura 5.20: Error de posición en los ejes y, z en ambos robots, experimento 3.

Con ayuda del error en el eje y del robot JR3 se obtiene una fuerza de referencia mostrada en la Figura 5.21, esta señal corresponde a la salida del control de posición-I (ecuación (3.8)), la cuál será usada como referencia en el siguiente bloque de control de fuerza (ecuación (3.5)).



Figura 5.21: Fuerza de referencia en el eje y del robot JR3, experimento 3.

La anomalía observada en la Figura 5.22, entre los segundos 50 a 60 es debida a la fuerza de gravedad ya que el objeto es cargado por los dos robots, a partir de eso el seguimiento se realiza de manera concisa. Cuando el robot JR3 cambia la orientación de su efector final, la fuerza aplicada por el robot en su eje de acción incrementa 3.8 [N] para mantener 35 [N] en la componente y .

Como se puede observar la referencia deseada del robot JR3 es modificada de acuerdo a la fuerza de referencia arrojada por el control de posición-I (Figura 5.21). La referencia del robot ATI se mantiene constante a lo largo del experimento puesto que solo se mantiene en reacción y resulta ser el pivote para que la inclinación del objeto sea lograda.

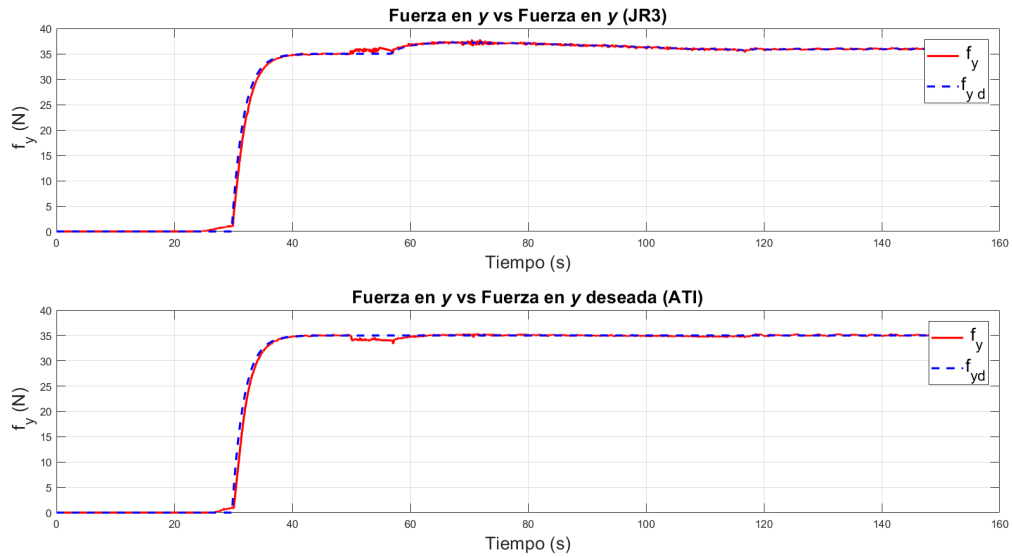


Figura 5.22: Fuerza medida vs fuerza deseada en ambos robots, experimento 3.

El error de fuerza en ambos robots se mantiene en ± 5 [N] (Figura 5.23), lo cual no representa un peligro para el agarre del objeto.

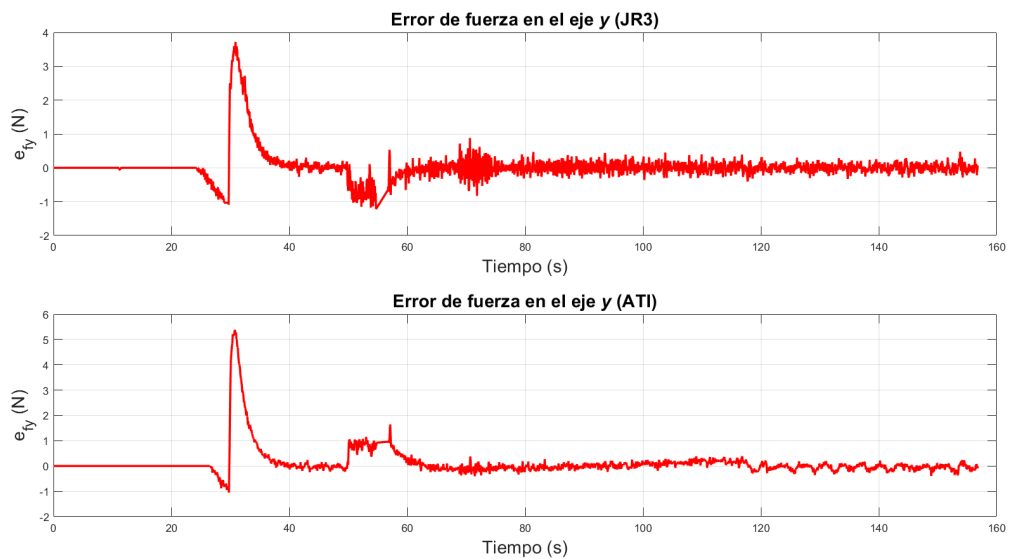


Figura 5.23: Error de fuerza en ambos robots, experimento 3.

La posición de referencia (y_r) va variando según el objetivo en cada etapa del experimento en ambos robots. Esta posición de referencia es la señal de salida del bloque de control de fuerza, la cual tiene como objetivo mantener el agarre del objeto.

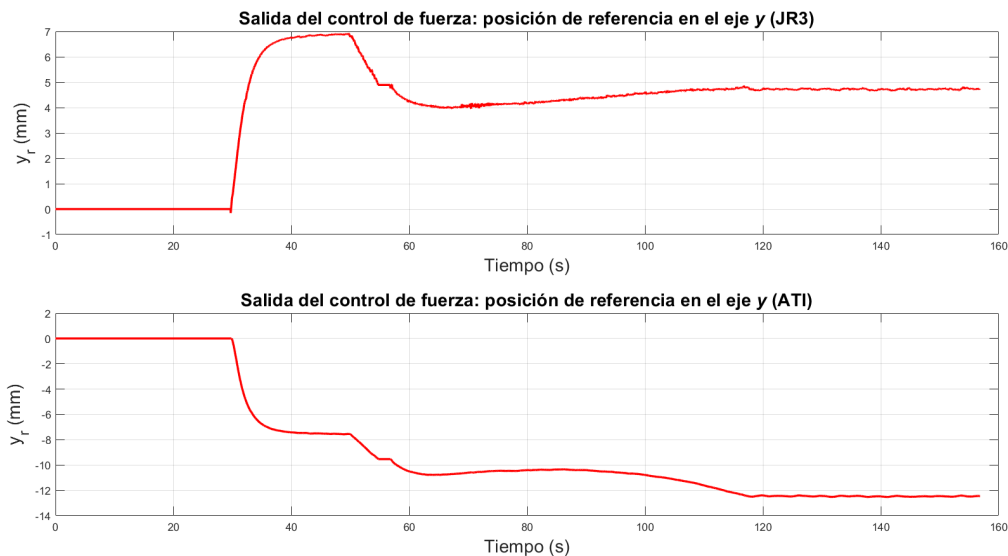


Figura 5.24: Posición de referencia en ambos robots, experimento 3.

Como se puede apreciar en la Figura 5.25, el momento medido presenta diferentes variaciones a lo largo del experimento, del segundo 50 al 55 existe una alteración debido al momento creado por la fuerza de gravedad, esto ocurre cuando el balón es levantado del soporte en el que reposa, del segundo 55 al 75 el efector final cambia de orientación de $0 [^\circ]$ a $15 [^\circ]$ por lo que la lectura en el sensor de fuerza/par también cambia, cuando el efector llega a la orientación deseada se activa el control de par (ecuación (3.5)), primero con una referencia tipo rampa (ecuación (5.24)) y finalmente una referencia constante.

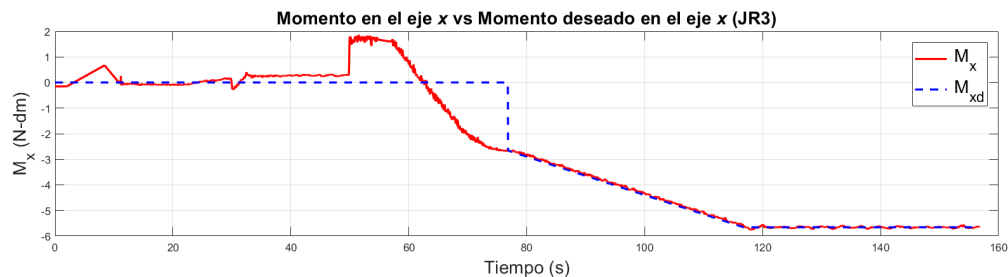


Figura 5.25: Momento medido vs momento deseado en el eje x del robot JR3, experimento 3.

El error de momento en el eje x , es mostrado en la Figura 5.26, debido a las rutinas implementadas en el experimento las mediciones varían, pero cuando el control de par es activado el error se mantiene en una vecindad muy cercana a cero.

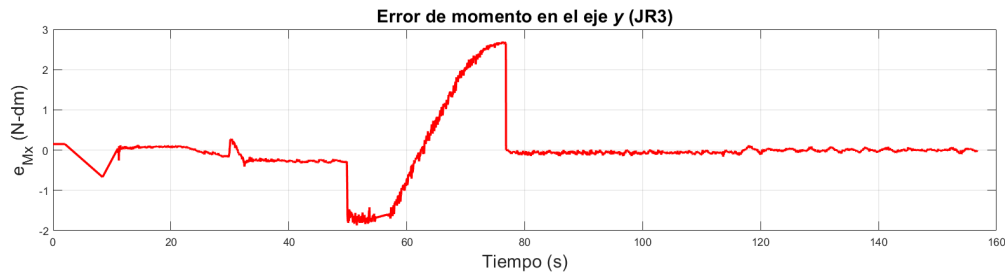


Figura 5.26: Error de momento en el eje x del robot JR3, experimento 3.

En la Figura 5.27 es bastante notorio el momento en que es activado el control de par (ecuación (3.5)), puesto que su valor cambia de cero, esta posición de referencia es implementada en el eje z con el objetivo de lograr la inclinación del objeto.



Figura 5.27: Posición de referencia en el eje z del robot JR3, experimento 3.

5.2. Teleoperación háptica

La segunda parte de estos experimentos pertenece a la parte de teleoperación háptica, en el cual se llevará a cabo la comunicación unilateral del sistema.

En la Figura 5.28 se muestra el sistema teleoperado utilizado en el experimento, el manipulador localizado a la izquierda (equipado con el sensor JR3) es el robot esclavo que es controlado por la interfaz háptica maestra localizada al lado de la computadora, esta dirige la posición y orientación del efector final del robot esclavo.

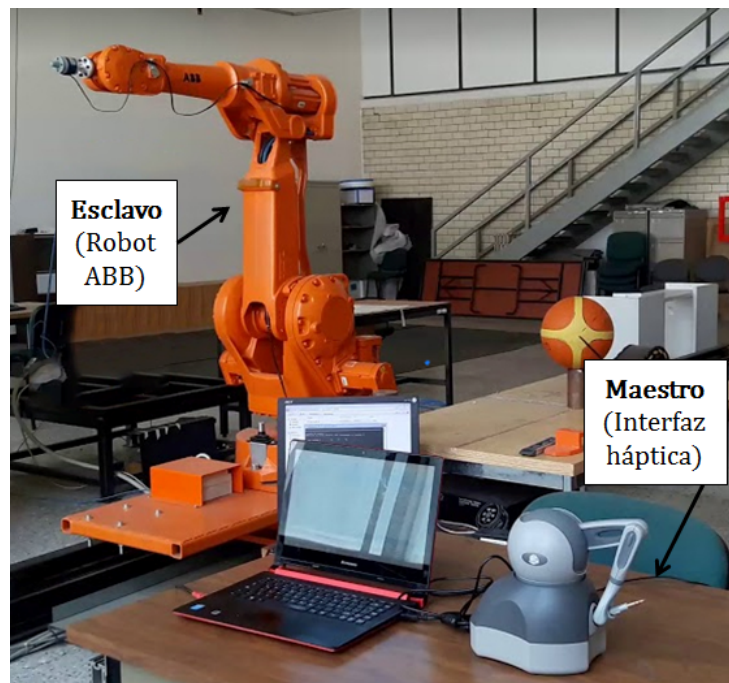


Figura 5.28: Sistema teleoperado físico.

A continuación se explica el experimento y se muestran los resultados gráficos obtenidos.

5.2.1. Comunicación unilateral

En este tipo de comunicación el robot maestro (interfaz háptica Touch) envía datos de posición y orientación del efector final, de esta manera el robot esclavo (robot manipulador ABB IRB2400) recibe un vector de información correspondiente a una posición escalada en coordenadas cartesianas (x, y, z) y una orientación dada por las componentes del cuaternio $(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ para su movimiento.

El factor de escalamiento en cada componente de posición para este experimento fue el siguiente:

	Factor
Eje x	2.0
Eje y	2.0
Eje z	2.0

Tabla 5.4: Factores de escalamiento en la posición enviada.

Antes de realizar la comunicación entre los dispositivos, cada uno de ellos realiza una rutina para llegar al lugar de trabajo, la cual es explicada a continuación:

Rutina inicial: Interfaz háptica Touch

1. Botón *Inicializar*: se realiza la conexión entre Visual Studio y la interfaz háptica. Se verifica que el robot maestro este conectado a la computadora y dependiendo del estado se envía un mensaje si la interfaz fue encontrada o no.
2. Botón *Calibrar*: para realizar este paso, es necesario colocar el efector final en el “tintero”, si la calibración se lleva a cabo de manera exitosa será enviado un mensaje para corroborar esta información, en caso contrario el mensaje indicará el problema por el cual la calibración no fue llevada a cabo.
3. Botón *Home*: la interfaz se manda al punto $(0,0,0)$ (posición de inicio de teleoperación), con ayuda de un PID se controlan las articulaciones actuadas para alcanzar la posición deseada.
4. Botón *Conectar*: Con el puerto y la dirección IP definidas, la interfaz manda solicitud al servidor para iniciar comunicación.
5. Botón *Teleoperación*: una vez realizada la conexión, se mandan los datos de posición y orientación al robot ABB según los movimientos del robot maestro (interfaz háptica Touch).

Rutina inicial: Robot 1 ABB IRB2400 (JR3)

1. El robot se dirige a la posición *Home*, utilizada para calibrar y comenzar cualquier rutina en los robots:

$$JR3 \{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 [^\circ] \}$$

Donde θ_i con $i = 1, \dots, 6$ representa el desplazamiento angular de cada articulación en el robot manipulador respecto al marco de referencia propio del robot.

2. El robot se dirige a la posición *Segura*, con el objetivo de posicionar su área de trabajo alejada del operador:

$$JR3 \left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = 90 [^\circ] \\ \theta_2 = -30 [^\circ] \\ \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6 = 0 [^\circ] \end{array} \right.$$

- El robot se dirige a la posición *Inicial*, a partir de esta es como empezará a moverse de acuerdo con los datos recibidos de la interfaz:

$$JR3 \begin{cases} \text{Posición } (x, y, z) = (0, 1010, 690) \text{ [mm]} \\ \text{Orientación } (\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = (0.5, -0.5, 0.5, 0.5) \end{cases}$$

Donde (x, y, z) representa la posición en coordenadas cartesianas del efector final, y $(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ representa las componentes del cuaternio con el cual se puede interpretar la orientación del efector respecto al marco de referencia propio del robot.

- Finalmente se inicia la conexión con la interfaz, recordemos que el controlador del robot ABB funje como servidor, por lo tanto es necesario seguir una serie de pasos para que exista esta comunicación: se crea un socket, se enlaza este socket con un número de puerto de servidor (en este caso 8000) y la dirección IP, se inicia la escucha de conexiones entrantes y finalmente se aceptan estas peticiones.

Los resultados gráficos en este experimento fueron los siguientes:

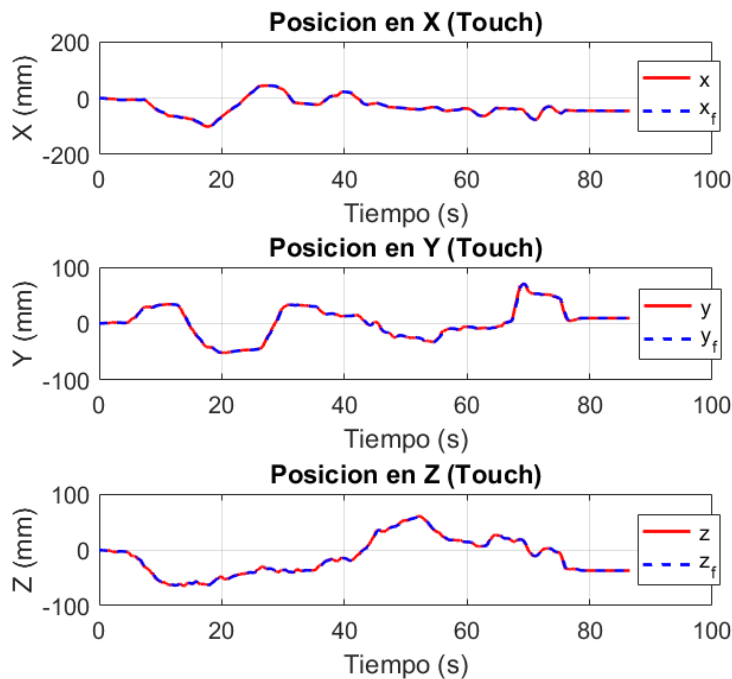


Figura 5.29: Posición real vs posición filtrada en los ejes x, y, z de la interfaz háptica Touch.

En la Figura 5.29 se pueden visualizar las tres componentes de la posición cartesiana, en cada una de ellas se muestra la posición original y la posición filtrada, debido a la velocidad con que fue manejada la interfaz la diferencia entre una y otro no es tan visible, sin embargo en diferentes experimentos el filtro fue importante para mejorar el movimiento del robot esclavo y poder visualizarlo de manera fluida y suave.

Una vez filtrada la posición, se le aplicó una transformación para obtener las coordenadas del punto final del efector (ecuación (4.1)) y se multiplicó por el factor de escalamiento para ser enviado al robot esclavo (ecuación (4.2)). Como se puede observar en las Figuras 5.30 y 5.31, las gráficas coinciden tanto en forma como en escala, las únicas diferencias son: el offset en el que se encuentran, esto debido a los marcos de referencia en los que se basan cada una de ellas y los primeros 30 segundos en la gráfica del robot JR3, esto debido a la rutina inicial de posicionamiento y a la espera de conexión con la interfaz.

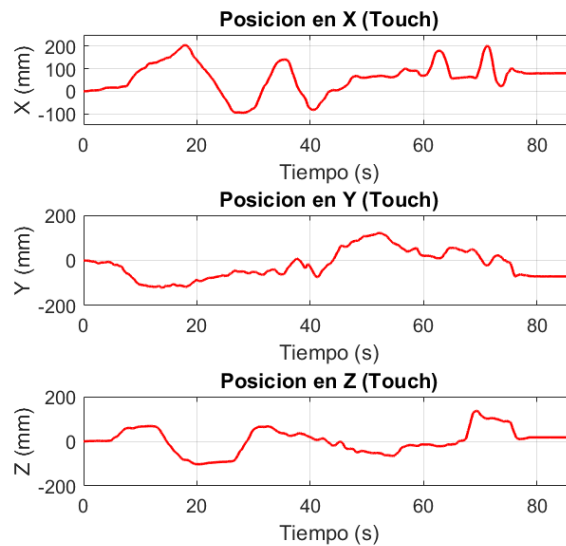


Figura 5.30: Posición en los ejes x,y,z de la interfaz háptica Touch.

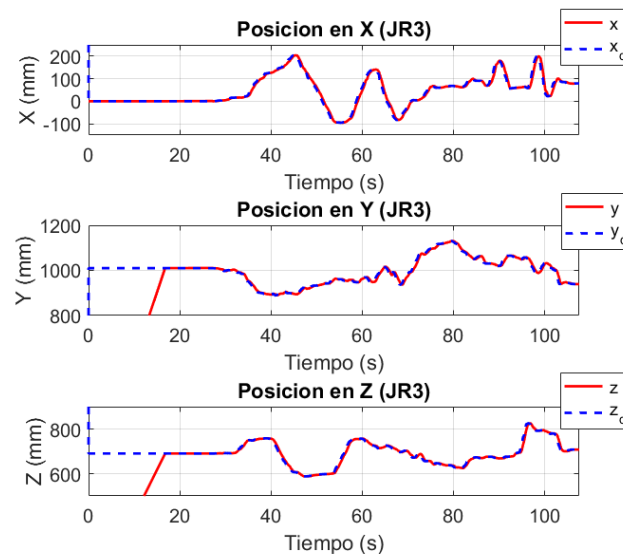


Figura 5.31: Posición real vs posición deseada en los ejes x,y,z del robot JR3.

Además de la posición, la orientación es indispensable para poder replicar los movimientos del robot maestro, cada uno de los ángulos de las articulaciones fue filtrado con el objetivo de obtener un movimiento más suave en el robot esclavo, y esta matriz de rotación filtrada obtenida fue modificada de acuerdo a la ecuación 4.4 para obtener la matriz de rotación filtrada correspondiente al marco base del robot esclavo. Al momento de comparar las gráficas de la interfaz (Figuras 5.32 y 5.34) con las del robot ABB (Figuras 5.33 y 5.35), se puede observar que la forma coincide, salvo los primeros 30 segundos en las gráficas del robot JR3, que como ya se había explicado con anterioridad esto es debido a la rutina inicial de posicionamiento y a la espera de conexión con la interfaz.

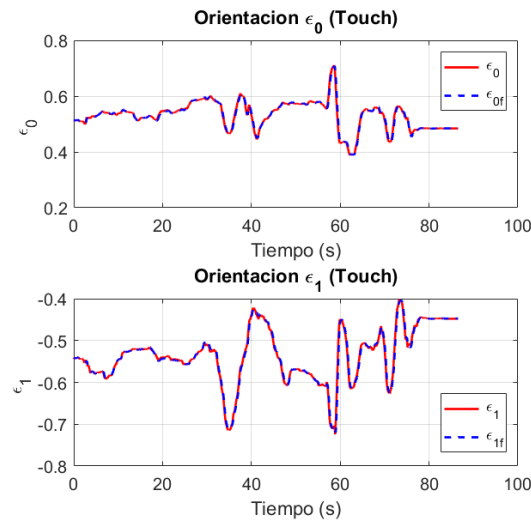


Figura 5.32: Componentes ϵ_0 , ϵ_1 reales vs componentes ϵ_0 , ϵ_1 filtradas del cuaternio en la interfaz háptica Touch.

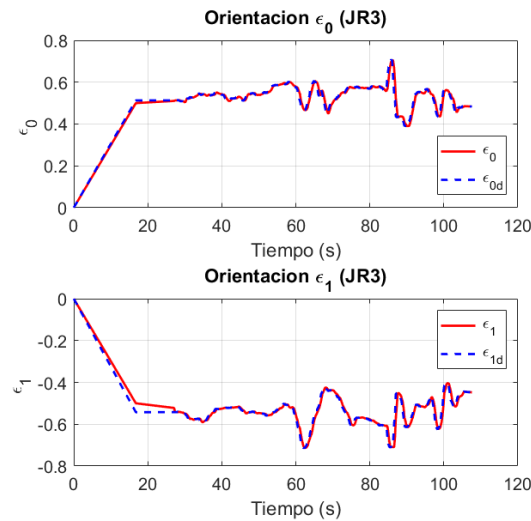


Figura 5.33: Componentes reales ϵ_0 , ϵ_1 vs componentes ϵ_0 , ϵ_1 deseados del cuaternio en el robot JR3.

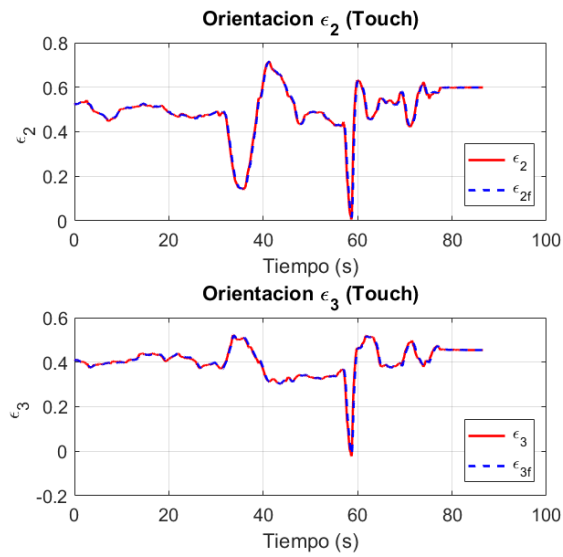


Figura 5.34: Componentes ϵ_2 , ϵ_3 reales vs componentes ϵ_2 , ϵ_3 filtradas del cuaternio en la interfaz háptica Touch.

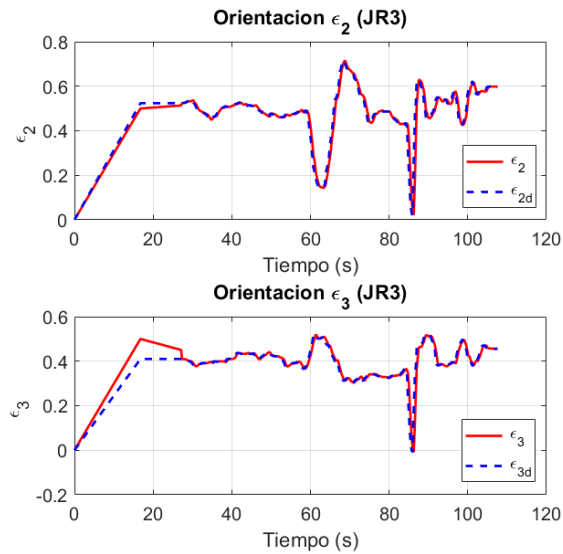


Figura 5.35: Componentes reales ϵ_2 , ϵ_3 vs componentes ϵ_2 , ϵ_3 deseados del cuaternio en el robot JR3.

Grabación: A continuación se añade un enlace para poder observar el experimento de comunicación unilateral.

<https://youtu.be/UgutVgQTluk>

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

Se planteó la realización de un sistema cooperativo teleoperado el cual fue validado a través de un análisis de estabilidad, en el que con ayuda del criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz se obtuvo un grupo de desigualdades en términos de las ganancias de los controladores y los parámetros del sistema maestro (interfaz háptica), sistema esclavo (robot ABB) y del operador humano.

La implementación del control híbrido posición-fuerza/par y control híbrido posición-fuerza/par extendido se llevó a cabo en el sistema cooperativo a través de un lazo externo para el control de fuerza, programado en el software RobotStudio propio de la marca ABB, demostrando de esta manera que es posible implementar un control híbrido en un robot con arquitectura cerrada y sin necesidad de un kit de fuerza o sincronización propio de la marca.

Se obtuvieron resultados experimentales satisfactorios del sistema cooperativo para los movimientos horizontal, rotación e inclinación, presentándose errores acotados de posición y fuerza. Un tiempo de muestreo bajo es un parámetro importante para un buen desempeño en cualquier sistema, en el caso del sistema cooperativo el tiempo de muestreo se vio afectado por diversos factores, por un lado se encuentra la adquisición de datos de los sensores y por el otro la rutina programada en el controlador del robot ABB, aumentando el periodo de muestreo, a pesar de esto el desempeño fue bastante bueno, cumpliendo adecuadamente todas las tareas de manipulación del objeto, manteniendo siempre el agarre entre los dos robots.

Realizando un análisis del tiempo de muestreo de los robots cooperativos, se calculó el promedio de este tiempo en cada robot, por un lado el robot con el sensor JR3 presenta un tiempo de muestreo promedio de 50 [ms], mientras que el robot con el sensor ATI tiene un tiempo de muestro promedio de 75 [ms], cabe mencionar que no es un tiempo de muestreo constante ya que depende de las rutinas internas de cada robot.

La comunicación entre la interfaz háptica y el robot esclavo fue realizada con éxito, teniendo como resultado en los experimentos del sistema teleoperado que las posiciones y orientaciones del maestro y esclavo coinciden tanto en escala como en forma. En estas pruebas al igual que en el sistema cooperativo, la adquisición de datos del sensor y la rutina del controlador fueron factores que aumentaron el tiempo de muestreo, además se añade el tiempo de retardo en la transmisión de datos, así como el retraso ocasionado por el filtrado, sin embargo para la manipulación realizada por un operador humano estos retardos son imperceptibles considerándose movimientos fluidos y naturales.

Se buscó obtener un mejor desempeño en el sistema, lo cual se logró realizando la programación de un mejor algoritmo para el envío y recepción de datos en el que se buscaba la menor pérdida de información posible, se varió la velocidad con la que se desplaza el robot entre dos puntos hasta encontrar el mejor valor de velocidad, se filtraron las posiciones y ángulos de la interfaz gráfica con la intención de quitar ruido y movimientos involuntarios del humano, finalmente se discretizaron las leyes de control PI y PID utilizadas en el control de fuerza y posición respectivamente para tener una buena respuesta ante periodos de muestreo grandes.

Como se explicó en los objetivos, a causa de la epidemia ocasionada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), los experimentos planeados en un inicio de la tesis no pudieron ser completados debido a la evacuación de las instalaciones, por lo tanto las pruebas correspondientes a la comunicación bilateral y al sistema cooperativo teleoperado se proponen como trabajo futuro quedando como antecedente el análisis de estabilidad que se realizó del sistema.

6.2. Trabajo futuro

A partir del desarrollo, resultados y conclusiones de este trabajo de tesis, se mencionan las propuestas de trabajo futuro que permitan dar continuidad a la línea de investigación planteada en esta tesis.

- Concluir los experimentos relacionados con la comunicación bilateral y los experimentos del sistema cooperativo teleoperado.
- Aumentar el número de robots en el sistema cooperativo para abarcar un campo más extenso en tareas posibles a realizar.
- Adicionar al control híbrido posición-fuerza/par una planeación de agarre con el objetivo de realizar la manipulación del objeto a pesar de no conocer la geometría con anterioridad.
- Implementar sistemas de control con retardo, en el control de fuerza, para disminuir el error en tareas de telemanipulación.

- Implementar un sistema de visión en la interfaz de usuario, con la intención de aumentar la inmersión del operador en el ambiente de trabajo del robot esclavo.

Bibliografía

- [1] ABB. *Welcome to ABB Robotics Wood Industries Portal*. Accedido en 17/06/2020. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/applications-by-industry/wood-industries>.
- [2] Neville Hogan. «Impedance control: An approach to manipulation: Part I - theory». En: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* Vol. 107 (mar. de 1985), págs. 1-7. DOI: 10.1115/1.3140702.
- [3] Neville Hogan. «Impedance control: An approach to manipulation: Part II - implementation». En: *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* Vol. 107 (mar. de 1985), págs. 8-16. DOI: 10.1115/1.3140713.
- [4] Rogelio de Jesús Portillo Vélez. «*Control multilateral de agarre para robots cooperativos maestro/multi-esclavo*.» Tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN).
- [5] J. Kenneth Salisbury. «Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates.» En: *19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes* (1980), págs. 95-10. DOI: 10.1109/CDC.1980.272026.
- [6] M. H. Raibert y J.J. Craig. «Hybrid Position/Force Control of Manipulators.» En: *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control* Vol. 102 (jun. de 1981), págs. 126-133. DOI: 10.1115/1.3139652.
- [7] Luis Uriel Evangelista Hernández. «*Control para sistemas robóticos cooperativos en tareas de manipulación en interacción con el ambiente*.» Tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN).
- [8] Denso Wave. *Cooperative Control*. Accedido en 23/06/2020. URL: <https://www.denso-wave.com/en/robot/product/function/Coordinated.html>.
- [9] Jesús A. López-Silvano, Alejandro Rodríguez-Angeles y Carlos A. Cruz-Villar. «Sistema cooperativo de robots industriales para tareas de manipulación mediante control de fuerza.» En: *Memorias del XX Congreso Mexicano de Robótica 2018* (sep. de 2018), págs. 79 -84.
- [10] Jesús A. López Silvano. «*Diseño e implementación de sistema cooperativo de robots industriales para tareas de manipulación*.» Tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN).

- [11] NASA. *NASA's Record-Setting Opportunity Rover Mission on Mars Comes to End*. Accedido en 23/06/2020. URL: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-record-setting-opportunity-rover-mission-on-mars-comes-to-end>.
- [12] Alejandro Rodríguez-Angeles, Marco A. Arteaga-Pérez, Rogelio de J. Portillo-Vélez y Carlos A. Cruz-Villar. «Transparent bilateral master-slave control based on virtual surfaces: Stability analysis and experimental results.» En: *International Journal of Robotics and Automation* Vol. 30, No. 2 (2015), págs. 128 -139. DOI: 10.2316/206.2015.2.206-3953.
- [13] Yasuyoshi Yokokohji y Tsuneo Yoshikawa. «Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment.» En: *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 10, No. 5. (Oct. de 1994), págs. 605 -620. DOI: 10.1109/70.326566.
- [14] Humiko Yahaira Hernández Acosta. «*Sistema de teleoperación bilateral de fuerza posición maestro esclavo no similar en tiempo real.*» Tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN).
- [15] Eijiro Taguchi, Yutaka Ishibashi, Pingguo Huang, Yuichiro Tateiwa y Takanori Miyoshi. «Comparison of stabilization control in cooperation between remote Robot systems with force feedback». En: *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 9 (ene. de 2020). DOI: 10.18178/ijmerr.9.1.87-92.
- [16] Zhijun Li, Xiaoqing Cao, Yong Tang, Rui Li y Wenjun Ye. «Bilateral teleoperation of holonomic constrained robotic systems with time-varying delays». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* Vol. 62, No.4 (2013). DOI: 10.1109/TIM.2013.2246906.
- [17] Zhenyu Lu, Panfeng Huang y Zhengxiong Liu. «High-gain nonlinear observer-based impedance control for deformable object cooperative teleoperation with nonlinear contact model». En: *International Journal of Robust and Nonlinear Control* Vol. 30, No. 4 (sep. de 2019), págs. 1329-1350. DOI: 10.1002/rnc.4880.
- [18] Seungyeol Lee y Jeon-Il Moon. «Management of a single-user multi-robot teleoperated system for maintenance in offshore plants». En: *Multi-agent Systems*. IntechOpen, 2017, págs. 117-127. DOI: 10.5772/intechopen.69351.
- [19] Amir Takhmar, Ilia G. Polushin, Ali Talasaz y Rajni V. Patel. «Cooperative teleoperation with projection-based force reflection for MIS». En: *IEEE Transactions on control systems technology* Vol. 23, No. 4 (jul. de 2015), págs. 1411-1426. DOI: 10.1109/TCST.2014.2369344.
- [20] Maryam Farahmandrad, Soheil Ganjefar, Heidar Ali Talebi y Mahdi Bayati. «A novel cooperative teleoperation framework for nonlinear time-delayed single-master/multi-slave system». En: *Robotica* Vol. 38, No. 3 (abr. de 2019), págs. 475-492. DOI: 10.1017/S0263574719000791.
- [21] Y. Yang, C. Hua y X. Guan. «Multi-manipulators coordination for bilateral teleoperation system using fixed-time control approach». En: *Int J Robust Nonlinear Control*. (jul. de 2018), págs. 1-21. DOI: 10.1002/rnc.4336.

- [22] Selma Musić, Gionata Salvietti, Pablo Budde gen. Dohmann, Francesco Chinello, Domenico Prattichizzo y Sandra Hirche. «Robot team teleoperation for cooperative manipulation using wearable haptics». En: *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (sep. de 2017), págs. 2556-2563. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206077.
- [23] Bruno Siciliano y Oussama Khatib. *Handbook of Robotics*. Springer, 2008.
- [24] Soheil Sarabandi y Federico Thomas. «Accurate computation of quaternions from rotation matrices». En: *Advances in robot kinematics 2018*. Springer, 2018, págs. 39-46. DOI: 10.1007/978-3-319-93188-3_5.
- [25] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani y Giuseppe Oriolo. *Robotics: modelling, planning and control*. Springer, 2009.
- [26] Mark W. Spong, Seth Hutchinson y M. Vidyasagar. *Robot modelling and control*. First edition. John Wiley y Sons, Inc., 1989.
- [27] John J. Craig. *Robótica*. Tercera edición. Pearson, Prentice Hall, 2006.
- [28] Bruno Siciliano y Luigi Villani. *Robot Force Control*. Springer Science+Business Media, 1999.
- [29] Charles A. Klein y Ching-Hsiang Huang. «Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators». En: *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* Vol. SMC-13, No. 3 (mar. de 1983), págs. 245-250. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313123.
- [30] Fabrizio Caccavale, Pasquale Chiacchio, Alessandro Marino y Luigi Villani. «Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators». En: *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* Vol. 13, No. 5 (oct. de 2008), págs. 576-586. DOI: 10.1109/TMECH.2008.2002816.
- [31] J. De Schutter y H. Van Brussel. «Compliant robot motion II. A control approach based on external control loops». En: *The international journal of robotics research* Vol. 7, No. 4 (ago. de 1988), págs. 18-33. DOI: 10.1177/027836498800700402.
- [32] Farid Ferguene y Redouane Toumi. «Dynamic external force feedback loop control of a robot manipulator using a neural compensator-application to the trajectory following in an unknown environment». En: *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* Vol. 19, No. 1 (2009), págs. 113-126. DOI: 10.2478/v10006-009-0011-9.
- [33] Walid Zarrad, Philippe Poignet, Rui Cortesão y Olivier Company. «Stability and transparency analysis of a haptic feedback controller for medical applications». En: *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control* (dic. de 2007), págs. 5767-5772. DOI: 10.1109/CDC.2007.4434677.
- [34] *Especificaciones del producto: IRB 2400*. ID: 3HAC042195-005, Revisión: P(2019-09-16). ABB.
- [35] *Industrial Robot Controller: IRC5*. ID: ROB0295EN, Checked: D(2019-06-27). ABB.
- [36] *JR3 Multi-Axis Force-Torque Sensor Technical Specifications*. JR3 INC.

- [37] Carlos de la Hoz Najarro. «*Puesta en marcha del sensor fuerza/par JR3.*» Tesis de maestría. Universidad Carlos III de Madrid.
- [38] ATI INDUSTRIAL AUTOMATION. *F/T Sensor: Mini40*. Accedido en 10/08/2020. URL: https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini40.
- [39] *F/T Transducer, Six-Axis Force/Torque Sensor System, Installation and Operation Manual*. Document #9620-05-Transducer Section-28. ATI INDUSTRIAL AUTOMATION.
- [40] *F/T Controller (CTL/CTLJ/CON), Six-Axis Force/Torque Sensor System, Installation and Operation Manual*. Document #9620-05-ctl-14. ATI INDUSTRIAL AUTOMATION.
- [41] *Touch Haptic Device, User Guide*. 30-0323 Rev. A. 3D SYSTEMS.
- [42] Lydia Parziale, David T. Britt, Chuck Davis, Jason Forrester, Wei Liu, Carolyn Matthews y Nicolas Rosselot. *TCP/IP Tutorial and Technical Overview*. Eighth Edition. IBM, 2006.
- [43] Alex D. Paredes, Andrés Úbeda y Gabriel J. Garcia. «Teleoperación de un brazo robot Kinova MICO2 a través de un dispositivo Omni Bundle». En: *XXXIX Jornadas de Automática* (sep. de 2018), págs. 241-248.
- [44] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer y John R. Buck. *Discrete-time signal processing*. Segunda edición. Prentice Hall, 1999.
- [45] Benjamin C. Kuo. *Sistemas de Control Automático*. First Edition. Prentice Hall, 1996.

Apéndice A

Fórmula de ganancia.

Dada una gráfica de flujo de señal (SFG [Signal-Flow-Graph]) con N trayectorias directas y L mallas, la ganancia entre el nodo de entrada (y_{ent}) y el nodo de salida (y_{sal}) es [45]:

$$M = \frac{y_{sal}}{y_{ent}} = \sum_{k=1}^N \frac{M_k \Delta_k}{\Delta} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

y_{ent} , variable del nodo de entrada.

y_{sal} , variable del nodo de salida.

M , ganancia entre y_{ent} y y_{sal} .

N , número total de trayectorias directas entre y_{ent} y y_{sal} .

M_k , ganancia de la trayectoria directa k –ésima entre y_{ent} y y_{sal} .

Y con Δ definido como:

$$\Delta = 1 - \sum_i L_{i1} + \sum_j L_{j2} - \sum_k L_{k3} + \dots \quad (\text{A.2})$$

Donde:

L_{mr} , producto de la ganancia de la combinación posible m –ésima ($m = i, j, k, \dots$) de las mallas de no contacto ($1 \leq r \leq L$).

Δ , 1-(suma de las ganancias de todas las mallas individuales)+(suma de los productos de las ganancias de todas las combinaciones posibles de dos mallas que no se tocan)-(suma de los productos de las ganancias de todas las combinaciones posibles de tres mallas que no se tocan)+...

Δ_k , la Δ para aquella parte de la SFG que no toca la k –ésima trayectoria directa.

Apéndice B

Funciones de transferencia.

B.1. Error de fuerza - Fuerza humano

Como primer paso se procede a enumerar la entrada, salida, puntos de bifurcación y puntos de suma como se observa en la Figura B.1.

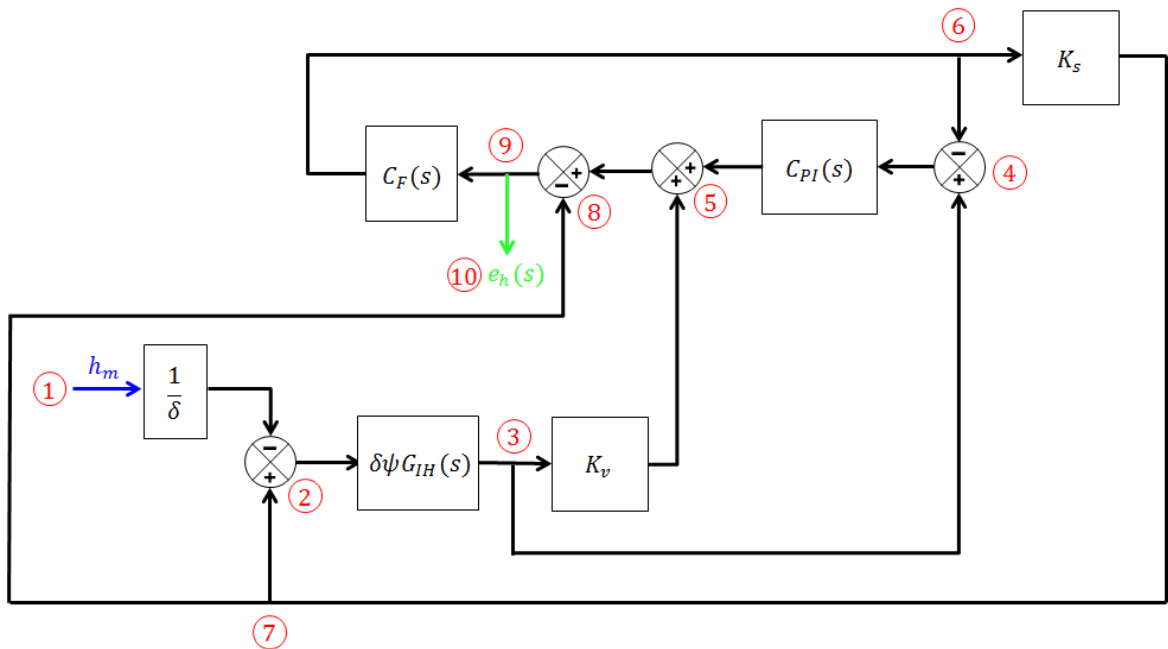


Figura B.1: Diagrama a bloques del sistema teleoperado con el error de fuerza como salida.

De esta forma es mucho más fácil su conversión a una SFG, que se podría ver como una versión simplificada de un diagrama a bloques. La Figura B.2 demuestra esta conversión a partir de la Figura B.1.

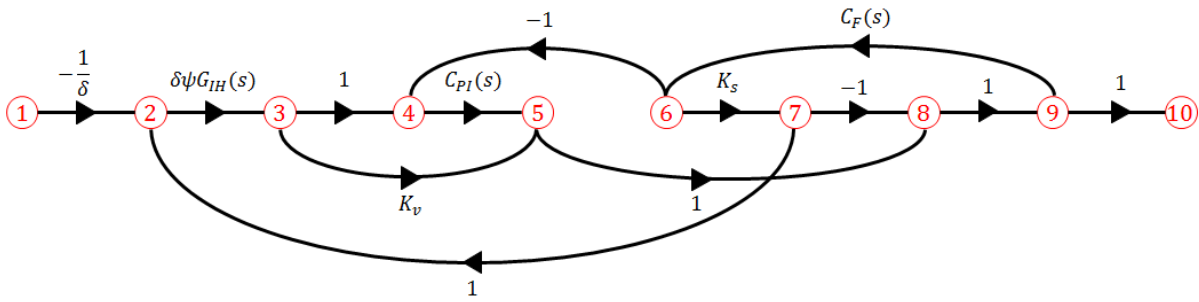


Figura B.2: Gráfica de flujo de señal con el error de fuerza como salida.

Con la ayuda de la fórmula de ganancia o fórmula de Mason (Apéndice A), se determinará la relación entrada/salida del sistema. Para poder aplicarla, se determinaran los elementos de la fórmula.

Ganancias de trayectorias directas:

$$M_1 = (-1/\delta)(\delta\psi G_{IH}(s))(1)(C_{PI}(s))(1)(1)(1) = -\psi G_{IH}(s)C_{PI}(s)$$

$$M_2 = (-1/\delta)(\delta\psi G_{IH}(s))(K_v)(1)(1)(1) = -\psi K_v G_{IH}(s)$$

Ganancias de mallas individuales:

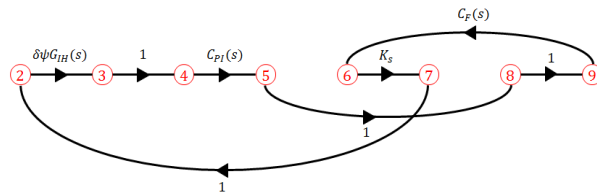


Figura B.3: Malla 1 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).

$$L_{11} = (\delta\psi G_{IH}(s))(1)(C_{PI}(s))(1)(1)(C_F(s))(K_s)(1) = \delta\psi K_s G_{IH}(s)C_{PI}(s)C_F(s)$$

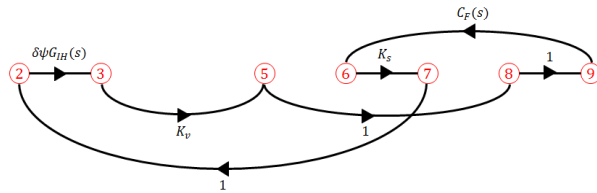


Figura B.4: Malla 2 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).

$$L_{21} = (\delta\psi G_{IH}(s))(K_v)(1)(1)(C_F(s))(K_s)(1) = \delta\psi K_v K_s G_{IH}(s)C_F(s)$$

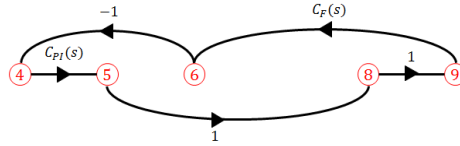


Figura B.5: Malla 3 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).

$$L_{31} = (C_{PI}(s))(1)(1)(C_F(s))(-1) = -C_{PI}(s)C_F(s)$$

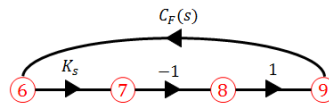


Figura B.6: Malla 4 (SFG de error de fuerza - fuerza humano).

$$L_{41} = (K_s)(-1)(1)(C_F(s)) = -K_s C_F(s)$$

Ganancias de mallas que no se tocan:

En este sistema todas las mallas individuales se tocan, es fácil percatarse de esto observando el nodo número nueve, todas las mallas individuales lo contienen.

Delta (Δ):

$$\begin{aligned} \Delta &= 1 - (L_{11} + L_{21} + L_{31} + L_{41}) \\ &= 1 - ([\delta\psi K_s G_{IH}(s)C_{PI}(s)C_F(s)] + [\delta\psi K_v K_s G_{IH}(s)C_F(s)] + [-C_{PI}(s)C_F(s)] + [-K_s C_F(s)]) \\ &= 1 - C_F(s)(\delta\psi K_s G_{IH}(s)[C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s) \end{aligned}$$

Deltas individuales (Δ_k):

$$\Delta_1 = 1$$

$$\Delta_2 = 1$$

Habiendo determinado todos los elementos de la fórmula de ganancia, la función de transferencia en lazo cerrado se escribe como:

$$\begin{aligned} \frac{e_h(s)}{h_m(s)} &= \frac{M_1\Delta_1 + M_2\Delta_2}{\Delta} \\ &= \frac{(-\psi G_{IH}(s)C_{PI}(s))(1) + (-\psi K_v G_{IH}(s))(1)}{1 - C_F(s)([\delta\psi K_s G_{IH}(s)][C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)} \\ &= \frac{-\psi G_{IH}(s)(C_{PI}(s) + K_v)}{1 - C_F(s)(\delta\psi K_s G_{IH}(s)[C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)} \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

B.2. Error de posición-I - Fuerza humano

Al igual que el procedimiento anterior, el primer paso es enumerar la entrada, salida, puntos de bifurcación y puntos de suma.

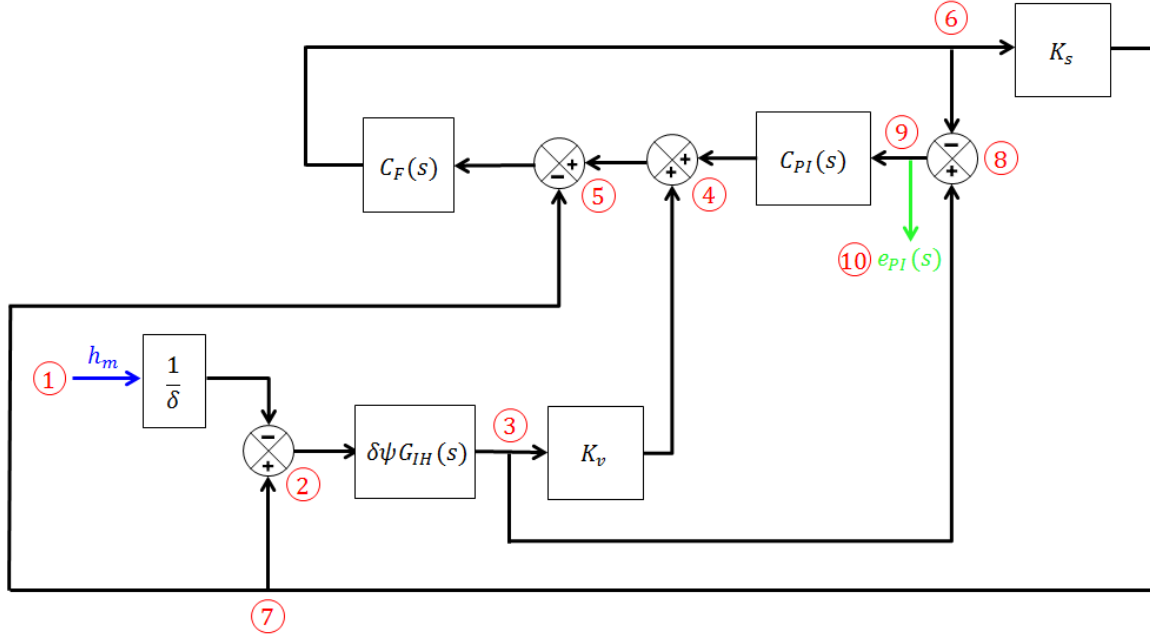


Figura B.7: Diagrama a bloques del sistema teleoperado con el error de posición-I como salida.

De esta forma es mucho más fácil su conversión a una SFG, que se podría ver como una versión simplificada de un diagrama a bloques. La Figura B.8 demuestra esta conversión a partir de la Figura B.7.

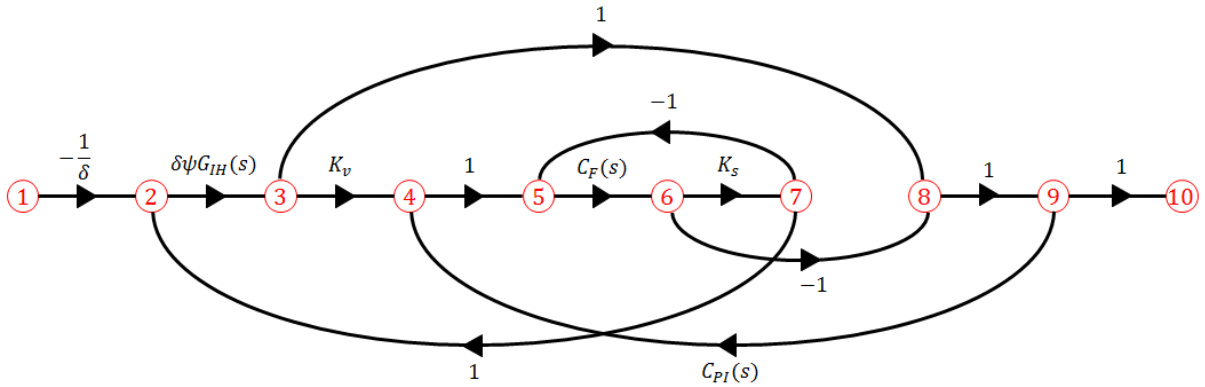


Figura B.8: Gráfica de flujo de señal con el error de posición-I como salida.

Con la ayuda de la fórmula de ganancia o fórmula de Mason (Apéndice A), se determinará la relación entrada/salida del sistema. Para poder aplicarla, se determinaran los elementos de la fórmula.

Ganancias de trayectorias directas:

$$M_1 = (-1/\delta)(\delta\psi G_{IH}(s))(1)(1)(1) = -\psi G_{IH}(s)$$

$$M_2 = (-1/\delta)(\delta\psi G_{IH}(s))(K_v)(1)(C_F(s))(-1)(1)(1) = \psi K_v G_{IH}(s) C_F(s)$$

Ganancias de mallas individuales:

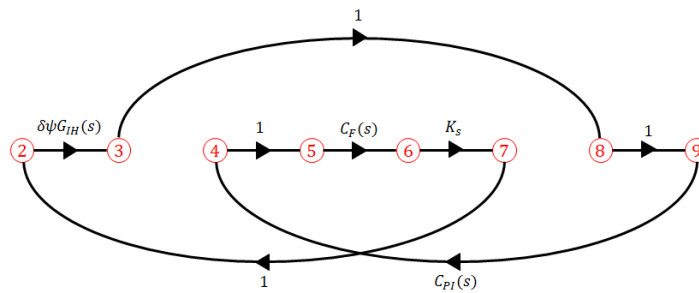


Figura B.9: Malla 1 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).

$$L_{11} = (\delta\psi G_{IH}(s))(1)(1)(C_{PI}(s))(1)(C_F(s))(K_s)(1) = \delta\psi K_s G_{IH}(s) C_{PI}(s) C_F(s)$$

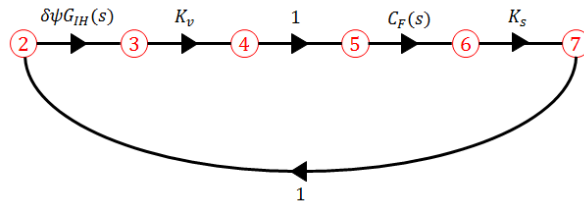


Figura B.10: Malla 2 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).

$$L_{21} = (\delta\psi G_{IH}(s))(K_v)(1)(C_F(s))(K_s)(1) = \delta\psi K_v K_s G_{IH}(s) C_F(s)$$

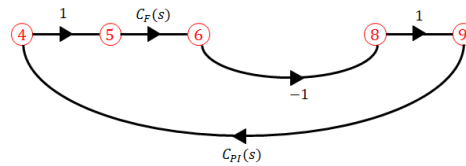


Figura B.11: Malla 3 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).

$$L_{31} = (1)(C_F(s))(-1)(1)(C_{PI}(s)) = -C_{PI}(s)C_F(s)$$

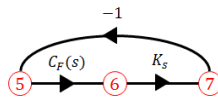


Figura B.12: Malla 4 (SFG de error de posición-I - fuerza humano).

$$L_{41} = (C_F(s))(K_s)(-1) = -K_s C_F(s)$$

Ganancias de mallas que no se tocan:

En este sistema todas las mallas individuales se tocan, es fácil percatarse de esto observando el nodo número cinco, todas las mallas individuales lo contienen.

Delta (Δ):

Sin importar la salida que se este analizando del sistema, el elemento Δ no cambia, por lo

que se puede observar que es exactamente igual que en el anterior análisis.

$$\begin{aligned}
\Delta &= 1 - (L_{11} + L_{21} + L_{31} + L_{41}) \\
&= 1 - ([\delta\psi K_s G_{IH}(s) C_{PI}(s) C_F(s)] + [\delta\psi K_v K_s G_{IH}(s) C_F(s)] + [-C_{PI}(s) C_F(s)] + [-K_s C_F(s)]) \\
&= 1 - C_F(s) (\delta\psi K_s G_{IH}(s) [C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)
\end{aligned}$$

Deltas individuales (Δ_k):

$$\begin{aligned}
\Delta_1 &= 1 - L_{41} = 1 + K_s C_F(s) \\
\Delta_2 &= 1
\end{aligned}$$

Habiendo determinado todos los elementos de la fórmula de ganancia, la función de transferencia en lazo cerrado se escribe como:

$$\begin{aligned}
\frac{e_{PI}(s)}{h_m(s)} &= \frac{M_1 \Delta_1 + M_2 \Delta_2}{\Delta} \\
&= \frac{(-\psi G_{IH}(s))(1 + K_s C_F(s)) + (\psi K_v G_{IH}(s) C_F(s))(1)}{1 - C_F(s) (\delta\psi K_s G_{IH}(s) [C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)} \\
&= \frac{\psi G_{IH}(s) (K_v C_F(s) - K_s C_F(s) - 1)}{1 - C_F(s) (\delta\psi K_s G_{IH}(s) [C_{PI}(s) + K_v] - C_{PI}(s) - K_s)}
\end{aligned} \tag{B.2}$$