



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA ESPECIALIDAD EN  
MECATRÓNICA

**Telemanipulación de objetos en posición y fuerza  
mediante robots industriales**

Tesis que presenta:

**Ing. Jesus Sandoval Romero**

Para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

En la especialidad de:

**Ingeniería Eléctrica**

Director de la Tesis:

**Dr. Alejandro Rodríguez Angeles**

---

## Agradecimientos

A mis padres: Por su total apoyo en cada etapa de mi carrera académica y personal. Por ser una de las partes fundamentales en cada uno de mis logros y a quienes ofrezco este trabajo de tesis. Y a mis hermanos por estar ahí cuando los he necesitado.

A Biridiana Hernández: Por toda su paciencia, constancia, apoyo y compañía. Por ser mi motivación para el termino de este trabajo y la persona con la que comparto este logro.

A mi asesor el Dr. Alejandro Rodríguez Angeles : Por su asesoría, su apoyo y sus críticas para lograr la culminación de este trabajo. Por darme la oportunidad de trabajar con el y por confiar en mí para el desarrollo de este trabajo de tesis.

A los miembros del jurado: Por sus comentarios y las aportaciones que hicieron a este trabajo de tesis.

Al Dr. Alejandro Gutierrez Giles: Por toda su asesoría y guía que me presto para el termino de mi tesis. Por todo su apoyo para el desarrollo de mis experimentos, por contagiarme su inquietud por el conocimiento y procurar mi aprendizaje.

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

Al CONACYT: Por el apoyo económico que me permitió realizar mis estudios de Maestría.

---

## Resumen

Este trabajo de tesis se enfoca en la integración del sistema de control del robot industrial IRC5 con sistemas periféricos para lograr un control teleoperado. Al ser el robot de arquitectura cerrada los desafíos de trabajar con este tipo de robots se centran en poder dar solución a tareas integrando un conjunto de sistemas ajenos al fabricante, a través de los puertos periféricos que permiten la comunicación entre el robot y un sistema diferente. Se integra un sensor de fuerza, con el cual ya se han realizado trabajos, y se configura el robot para poder conectarse a la Internet.

Para la tarea de teleoperación y telemanipulación se realizan configuraciones tanto en el robot esclavo como en el robot maestro para poder lograr un canal de comunicación entre dos instituciones de investigación localizadas a más de 20 kilómetros, dentro de la Ciudad de México.

En el desarrollo de la tesis se describen conceptos que se consultaron para la tarea, también se mencionan las configuraciones requeridas y modelos matemáticos, esto con el fin de realizar una telemanipulación entre sistemas de robots maestro-esclavo no similares con retroalimentación háptica.

Al crear el canal de comunicación se pone a prueba el sistema mediante la realización de diferentes experimentos, control de fuerza y posición, y tarea de telemanipulación de objetos de masa y rigidez diferentes y desconocidas para el operador.

---

## Abstract

This thesis work focuses on the integration of the IRC5 industrial robot control system with peripheral systems to achieve teleoperated control. Being a closed architecture robot, the challenges of working with this type of robot focus on being able to solve tasks by integrating a set of systems outside the manufacturer, through the peripheral ports that allow communication between the robot and an external system. A force sensor is integrated, with which work has already been done, and the robot is configured to connect to the Internet.

For the teleoperation and telemanipulation task, configurations are carried out both in the slave robot and in the master robot, in order to achieve a communication channel between two research institutions located more than 20 kilometers apart, within Mexico City.

In the development of the thesis, concepts that were consulted for the task are described, the required configurations and mathematical models are also mentioned, this in order to perform a telemanipulation between non-similar master-slave robot systems with haptic feedback.

When creating the communication channel, the system is tested by performing different experiments, force and position control, and telemanipulation task of objects of different mass and stiffness unknown to the operator.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.4. Contribuciones . . . . .	4
1.5. Organización de la tesis . . . . .	4
<b>2. Sistema de teleoperación</b>	<b>5</b>
2.1. Sistema maestro/esclavo . . . . .	5
2.2. Robot maestro: interfaz háptica . . . . .	6
2.3. Robot esclavo: IRB2400/16 de ABB . . . . .	9
2.4. Sensor de fuerza: JR3 . . . . .	11
2.5. Canal de comunicación . . . . .	12
<b>3. Control híbrido de posición/fuerza</b>	<b>14</b>
<b>4. Modelos matemáticos</b>	<b>17</b>
4.1. Control PI fuerza . . . . .	17
4.2. Cinemática directa de la interfaz háptica . . . . .	18
4.3. Matrices de transformación . . . . .	21
<b>5. Plataforma experimental</b>	<b>28</b>
<b>6. Resultados experimentales</b>	<b>31</b>
6.1. Teleoperación con control de fuerza . . . . .	31
6.2. Telemanipulación con retroalimentación háptica . . . . .	38
<b>7. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>49</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	49
7.2. Trabajo futuro . . . . .	49
<b>Referencias</b>	<b>50</b>

## Índice de figuras

1.1. Sistema teleoperado de Goertz [2]	2
2.1. Sistema teleoperado	5
2.2. Relación entre los robots maestro y esclavo	6
2.3. SIMODONT DENTAL TRAINER para entrenamiento odontológico	7
2.4. Novint Falcon	7
2.5. Interfaz SATIN	8
2.6. Touch haptic device en aplicaciones de diseño	9
2.7. Macro y micro movimientos de la interfaz háptica [21]	9
2.8. Espacio de trabajo del robot IRB2400/16	10
2.9. Controlador IRC5 con FlexPendant	11
2.10. Sensor JR3	11
2.11. Red de Internet [24]	13
3.1. Kit para el control de Fuerza [13]	15
3.2. Esquema de control híbrido posición/fuerza [5]	15
3.3. Diagrama de control para la tarea de teleoperación	16
4.1. Parámetros cinemáticos Denavit-Hartenberg [28]	18
4.2. Marcos fijos de la interfaz háptica	20
4.3. Posición y orientación del cuerpo rígido [28]	22
4.4. Representación de un punto $P$ en dos marcos de referencia diferentes [28]	23
4.5. Marcos base	24
4.6. a) Posición inicial b) Posición segura b) Posición de trabajo	25
4.7. Perspectiva del operador	25
4.8. Orientación similar	26
5.1. Integración del sistema de teleoperación	28
5.2. Ventana de la aplicación.	29
6.1. Posición inicial para la tarea de teleoperación.	32
6.2. Trayectorias del robot maestro y el esclavo.	33
6.3. Seguimiento sobre los ejes coordenados.	33
6.4. Error de seguimiento.	34
6.5. Resultados de seguimiento sobre le eje "y"	34
6.6. Regulación y error de fuerza deseada.	35
6.7. Trayectorias del robot maestro y el esclavo.	36
6.8. Seguimiento sobre los ejes coordenados.	36
6.9. Error de seguimiento.	37
6.10. Seguimiento y error de fuerza deseada.	38
6.11. Posición inicial para la tarea de telemanipulación.	39
6.12. Seguimiento del robot esclavo.	40
6.13. Error de seguimiento.	40
6.14. Seguimiento de la orientación.	41
6.15. Error de seguimiento de orientación.	41
6.16. Fuerzas generadas en el robot esclavo.	42

6.17. Fuerzas generadas en la interfaz háptica. . . . .	43
6.18. Posición inicial para la tarea de telemanipulación. . . . .	44
6.19. Seguimiento del robot esclavo. . . . .	44
6.20. Error de seguimiento. . . . .	45
6.21. Seguimiento de la orientación. . . . .	45
6.22. Error de seguimiento de orientación. . . . .	46
6.23. Fuerzas generadas en el robot esclavo. . . . .	47
6.24. Fuerzas generadas en la interfaz háptica. . . . .	47

## Índice de tablas

2.1. Especificaciones de la interfaz háptica . . . . .	10
2.2. Especificaciones del transductor JR3 . . . . .	12
4.1. Parametros DH . . . . .	20
5.1. Operación de la interfaz gráfica de usuario. . . . .	30
6.1. Factores de escalamiento . . . . .	31
6.2. Factores de escalamiento . . . . .	38

---

# 1. Introducción

La teleoperación, o como en robótica también se le conoce como telerobots, es ampliamente utilizada para explorar terrenos peligrosos o fuera del alcance del humano, para la limpieza de desechos contaminantes, entre otras. Teleoperación la define en [8], como la capacidad de realizar alguna acción a distancia, pudiendo ser centímetros o kilómetros de distancia. Estos sistemas han sido empleados desde 1960, cuando se desarrolló por primera vez este tipo de sistemas. Otra forma de definir la robótica a distancia, es el tener un operador humano en el lazo de control. Todas las decisiones de las tareas a realizar o planeación de una trayectoria, serán decididas por el usuario, mientras que el robot será el instrumento responsable de su implementación mecánica. Como lo definen Günter Niemeyer, Carsten Preusche y Gerd Hirzinger [2], el cerebro se retira o se aleja del cuerpo. Para lograr un mejor desempeño en operaciones con sistemas maestro-esclavo siempre se busca obtener transparencia, la cual describe que tan cerca está la impedancia percibida por el usuario de recrear la impedancia ambiental verdadera [2], para ello se ha incorporado fuerza de retroalimentación permitiendo al usuario tener más elementos de percepción del ambiente de trabajo. Estos sistemas permiten que exista mayor interactividad entre el operador y el ambiente remoto.

Para el robot esclavo debe de ser de mucha relevancia el poder interactuar de manera segura con ambientes desconocidos, con el objetivo de evitar dañar el ambiente y al mismo manipulador [4]. Por ejemplo en aplicaciones industriales los materiales a manipular o a trabajar ya son completamente conocidos, su ubicación se conoce y se conoce el momento exacto en el cual interactuaran con otros materiales o equipos.

Por ello, las tareas de teleoperación de sistemas maestro/esclavo y el control de fuerza con retroalimentación háptica, resulta un caso de estudio aplicable en varias ramas de la industria.

## 1.1. Antecedentes

El inicio de la teleoperación data desde la investigación realizada por Raymond C. Goertz en la década de 1940 y 1950 [2]. Su trabajo principal era el de operar desde atrás de paredes blindadas manipuladores que se encontraban directamente en contacto con material radiactivo. Utilizaba interruptores para activar motores y mover ejes, ver Figura 1.1. Como era de esperar este primer sistema resultaba incomodo y lento, lo que lleva a Goertz a construir pares de robots vinculados mediante engranes y cables, volviendo más natural los movimientos. Con el trabajo realizado reconoció la importancia de tener manipuladores acoplados electricamente.

Gracias a los trabajos realizados por Goertz, se establecieron los fundamentos de la telerobótica moderna y control bilateral.

Por otra parte, Yokokohji y Yoshikawa [3] describieron y conceptualizaron el acoplamiento cinético ideal de robots manipuladores en sistemas maestro/esclavo. Con el resultado de sus trabajos propusieron tres casos ideales de teleoperación:



Figura 1.1: Sistema teleoperado de Goertz [2]

1. Las respuestas de posición del brazo maestro y el brazo esclavo son exactamente iguales independientemente de la dinámica del objeto.
2. Las respuestas de fuerza del brazo maestro y el brazo esclavo son exactamente iguales independientemente de la dinámica del objeto.
3. Las respuestas de posición y fuerza son absolutamente iguales entre el brazo maestro y el brazo esclavo, independientemente de la dinámica del objeto

El caso 3, es el propósito ideal para la tarea de teleoperación, donde el operador es capaz de percibir el ambiente a través del robot maestro como si estuviera en contacto directo.

También Yokokohji y Yoshikawa describen el modelo matemático de un sistema de teleoperación para el caso ideal 3, sin contar los efectos gravitacionales, el modelo es expresado en las siguientes ecuaciones

$$\tau_m = H_m(\theta_m)\ddot{\theta}_m + h_m(\theta_m, \dot{\theta}_m) - J_m^T(\theta_m)f_m \quad (1.1)$$

$$\tau_s = H_s(\theta_s)\ddot{\theta}_s + h_s(\theta_s, \dot{\theta}_s) + J_s^T(\theta_s)f_s \quad (1.2)$$

donde  $\theta_m, \theta_s \in \mathbb{R}^n$  son los desplazamientos articulares del robot maestro y el esclavo,  $\tau_m, \tau_s \in \mathbb{R}^n$  son los torques de control de cada uno de los robots,  $H_m(\theta_m), H_s(\theta_s) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son las matrices de inercia,  $h_m(\theta_m, \dot{\theta}_m), h_s(\theta_s, \dot{\theta}_s) \in \mathbb{R}^n$  son los términos de fuerza centrífuga y fuerza de Coriolis. Y  $J_m^T(\theta_m), J_s^T(\theta_s) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son las matrices Jacobianas. El vector  $f_m \in \mathbb{R}^n$  es la fuerza que el operador aplica en el robot maestro, y  $f_s \in \mathbb{R}^n$  es la fuerza de reacción en el robot esclavo sobre el ambiente.

Para controlar la fuerza de reacción del robot esclavo, en los sistemas maestro/esclavo, se han desarrollado varios trabajos, la mayoría de estos cuentan con control de fuerza por impedancia como en [4] para uso de tareas de manufactura con restricciones

geométricas [15] y con uso de sensores de fuerza [16]. Estos trabajos mencionados y otros existentes utilizan robots de arquitectura abierta, esto quiere decir que se tiene acceso total al control de los pares articulares y se puede implementar un vasto sistema de controles para poder realizar la tarea deseada. Se retomaron trabajos de tesis realizados donde describen el control híbrido de posición/fuerza [5] y la implementación del sensor de fuerza en el robot industrial [6].

En más trabajos realizados por la sección, ya se ha realizado control teleoperado con robots. En [7], se desarrollo control teloperado utilizando una interfaz háptica para lograr una evasión de obstáculos donde también se introduce el operador humano en el lazo de control del sistema. El trabajo [8], emplea la teleoperación bilateral de fuerza y posición mediante robots no similares con seguimiento en coordenadas cartesianas. También en [9] y [10] se aplican técnicas de control para lograr seguimiento y transparencia acorde a la tarea. Estos trabajos revisados realizan la tarea de teleoperación en la misma área o en el mismo espacio de trabajo.

## 1.2. Motivación

La industria del robot crece a cada día, empresas dueñas del mercado lanzan en periodos cortos robots para uso industrial con innovaciones. En la actualidad empresarios buscan estar conectados de manera remota con su empresa para poder tener control y una supervisión de sus productos y/o servicios. Con la revolución industrial 4.0 se logra una transformación digital de la industria, creando industrias inteligentes donde los fabricantes y maquinas compartirán información con la cadena de suministro [1]. También es posible poder teleoperar procesos de manera remota y en tiempo real. Por ello la telerobotica sigue siendo un factor importante en el desarrollo de cualquier industria y en la investigación, para poder seguir optimizando y generando productos competitivos. También para la manipulación adecuada de sustancias en ambientes de riesgo para la vida humana donde el correcto manejo impacta de manera positiva en el medio ambiente.

## 1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de tesis consiste en realizar telemanipulación de objetos mediante un robot industrial. Donde el robot maestro se localiza en el sur de la Cd. de México y el robot esclavo al norte de la ciudad.

Para lograr el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Establecer un canal de comunicación vía Internet entre Ciudad Universitaria y el CINVESTAV Unidad Zacatenco, para realizar el intercambio de datos.
- Establecer un espacio de trabajo similar entre ambos robots para realizar la tarea de telemanipulación.

- Implementar el seguimiento de las trayectorias generadas por el operador a través del robot maestro por el robot esclavo.
- Implementación del control híbrido posición/fuerza para la regulación y seguimiento de una fuerza deseada, para observar como afecta el retardo en la comunicación.
- Realizar telemanipulación, con retroalimentación háptica, de 2 objetos de características diferentes.

## 1.4. Contribuciones

Las aportaciones de este trabajo de tesis incluyen las configuraciones necesarias para entablar un canal de comunicación entre ambos centros de investigación para poder lograr la telemanipulación del robot industrial y la interfaz Háptica de 3Dsystems. El seguimiento de posición en el espacio cartesiano así como seguimiento de la orientación deseada por el operador mediante el robot industrial de ABB, y el control de fuerza sobre una superficie mediante control teleoperado.

## 1.5. Organización de la tesis

El documento de la tesis consiste de 7 capítulos. En el Capítulo 1 se presenta una introducción a los sistemas teleoperados, así como trabajos que definieron estos tipos de sistemas y tesis desarrollados con anterioridad en la sección, también se describe la motivación, los objetivos generales y particulares para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de tesis. En el Capítulo 2 se define de manera más puntual cada uno de los subsistemas que conforman nuestro sistema teloperado, se generalizan características del robot esclavo y del robot maestro, del sensor de fuerza y se describe de manera general y compacta el canal de comunicación. El control híbrido de posición/fuerza para la tarea de teleoperación, se desarrolla en el Capitulo 3, retomando trabajos anteriores para describirlo. En el Capitulo 4 se describen los modelos matematicos empleados en el control de teleoperación. Se detalla el control de fuerza, se desarrolla la cinematica directa del robot maestro y se describen los cambios de base utilizados para la tarea de telemanipulación. En el Capitulo 5, se muestra la integración de cada uno de los elementos y como se encuentran interconectados para realizar la tarea. Los resultados experimentales obtenidos durante el trabajo de tesis, se muestran en el Capitulo 6, donde se realizaron dos tareas principales: teloperación con control de fuerza y telemanipulación con retroalimentación haptica. En el último capitulo, Capitulo 7, se exponen las conclusiones del trabajo así como tambien las propuestas de trabajos a futuro que se pudieron ver como oportunidades durante el desarrollo del trabajo.



---

## 2. Sistema de teleoperación

Un sistema de teleoperación maestro/esclavo consta principalmente de 2 estaciones y de un canal de comunicación, como se muestra en la Figura 2.1. El canal de comunicación permite enviar la posición y fuerza deseada, y de recibir la fuerza real generada de la interacción del robot esclavo con el ambiente. El robot esclavo es de la marca ABB modelo IRB-2400 con capacidad de carga de 16 Kg, con el controlador IRC5 y acoplado en la muñeca del robot un sensor de fuerza JR3. El robot maestro será la interfaz háptica Touch Haptic Device de 3Dsystems. En las subsecciones siguientes se describen con mas detalle cada uno de los los elementos que conforman el sistema teleoperado.

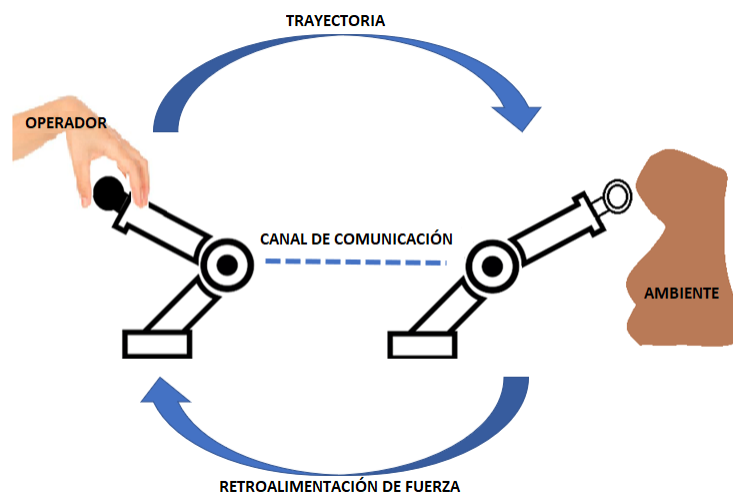


Figura 2.1: Sistema teleoperado

### 2.1. Sistema maestro/esclavo

Existen en la literatura dos arquitecturas principales en sistemas de robots maestro-esclavo [2], [17], posición-posición y posición-fuerza. En la arquitectura posición-posición, tanto el robot maestro como el esclavo tienen un control de seguimiento de posición, orientado al seguimiento de uno respecto al otro. Cuando se tiene un sistema con robots no-similares, las velocidades y los espacios de trabajo se escalan al igual que las fuerzas deseadas o resultantes, con el fin de lograr un mejor desempeño. En este tipo de arquitectura, cuando el sistema se encuentra en movimiento libre (sin contacto con el ambiente), el operador es capaz de percibir la inercia y/o cualquier otra dinámica intrínseca generada por el robot esclavo, dificultando la percepción de las fuerzas generadas por el robot esclavo al estar en contacto con el ambiente. El control mayormente propuesto para estos casos es un sistema de control local de fuerza para reproducir la fuerza en el robot maestro. Para evitar la dificultad de percepción del ambiente se

utiliza la arquitectura posición-fuerza. Esta arquitectura consta de la implementación de un sensor de fuerza en el robot esclavo y retroalimentar la fuerza hacia al operador, a través del robot maestro. Esta arquitectura resulta menos estable en comparación a la de posición-posición.

El control de posición y fuerza del sistema teleoperado en el que se basa este trabajo, es el descrito en [15], presentando la relación entre ambos robots en la Figura 2.2.

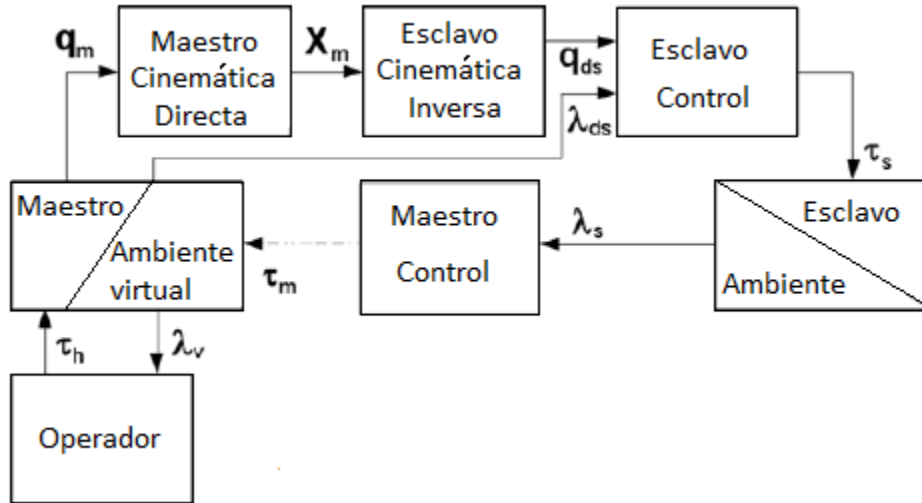


Figura 2.2: Relación entre los robots maestro y esclavo

Donde:  $q_m$  y  $X_m$  son la orientación de los ejes y posición en el espacio del efector final del robot maestro,  $q_{ds}$  y  $\tau_s$  son las posiciones deseadas de las articulaciones y el control por par del robot esclavo,  $\tau_m$  es el par de reacción generado por la interacción con el ambiente,  $\tau_h$  es el par generado por el operador,  $\lambda_{ds}$  es la fuerza deseada por el operador,  $\lambda_s$  es la fuerza real medida por el sensor del esclavo y  $\lambda_v$  es la fuerza virtual que el operador percibirá en el robot maestro. Esta es una forma de representar como se relacionan los sistemas de robot maestro/esclavo cuando se trabaja con 2 robots no-similares de arquitectura abierta y con un ambiente virtual, este último es implementado por el autor para su tarea.

Este diagrama (Figura 2.2) se modificará para poder ajustarlo a los robots con los que se trabajó.

## 2.2. Robot maestro: interfaz háptica

Un dispositivo háptico es una interfaz humano-máquina instrumentada y accionada bidireccional, empleada por el operador humano para interactuar activamente con un entorno virtual simulado por computadora [18] y sistemas teleoperados. Los dispositivos

hápticos presentan una gran variedad de formas, pueden tener forma de un mouse, volante, brazo robotico, en forma de pinza, joystick o hasta un exoesqueleto completo. Algunos de los principales campos de aplicación de las interfaces hápticas [19] son:

- Medicina y educación: simuladores para entrenamiento médico. Por ejemplo el SIMODONT DENTAL TRAINER (Figura 2.3), con lo que los estudiantes pueden practicar técnicas odontológicas [19].



Figura 2.3: SIMODONT DENTAL TRAINER para entrenamiento odontológico

- Entretenimiento: juegos de vídeo y simuladores. Por ejemplo la Novint Falcon de Novint Technologies Inc (Figura 2.4).



Figura 2.4: Novint Falcon

- Industria: integración de interfaces hápticas en los sistemas CAD de tal forma que el usuario puede manipular libremente los componentes de un conjunto en un entorno inmersivo. Por ejemplo el proyecto SATIN (Sound And Tangible Interfaces for Novel) consiste en una investigación sobre una nueva generación de interfaces multi-modales y multi-sensoriales, basada en la libre interacción de las manos del diseñador con formas virtuales que representan la terminación estética

de un artículo, con la posibilidad de una visión estereoscópica y con prestaciones auditivas [20] (ver Figura 2.5).



Figura 2.5: Interfaz SATIN

Algunas características que se tienen que considerar al momento de seleccionar una interfaz para nuestra tarea son: grados de libertad, espacio de trabajo, rango de retroalimentación de fuerza, rigidez, tiempo de muestreo, inercia y la flexibilidad de realizar una integración con otros sistemas.

La interfaz háptica que se emplea en este trabajo es el *Touch Haptic Device* de 3D Systems, Inc. Touch es un dispositivo háptico profesional de gama media (justo debajo del dispositivo de mayor calidad Touch X). Touch se utiliza en investigación, modelado 3D o aplicaciones OEM (ver Figura 2.6), facilitando a los usuarios el poder esculpir con libertad en ambientes de 3D, también promueve el aprendizaje productivo mejorando simulaciones científicas o medicas [21]. Este dispositivo permite la retroalimentación de fuerza a la mano del usuario, lo que le permite interactuar con objetos virtuales. Con ello, es una herramienta muy útil para evaluar ensayos, realizar montajes virtuales, rehabilitación, y control robótico.

### Limites físicos del dispositivo

El dispositivo háptico tiene 3 grados de libertad fijos en 6 puntos. Cada grado de libertad posee limites de movimiento físicos diseñados dentro del dispositivo, esto con el fin de evitar daños. El uso seguro de este dispositivo se puede revisar en [21].

El dispositivo divide sus movimientos en macro y micro. Los macros-movimientos son las rotaciones generadas en los enconders, las cuales describen los desplazamientos sobre los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Estos movimientos son del *cuerpo*, el *hombro* y el *codo*. Los micro-movimientos son los generados por el *gimbal* (cardán), estos describen la orientación del marco de trabajo. En la Figura 2.7 se observan los movimientos descritos.



Figura 2.6: Touch haptic device en aplicaciones de diseño

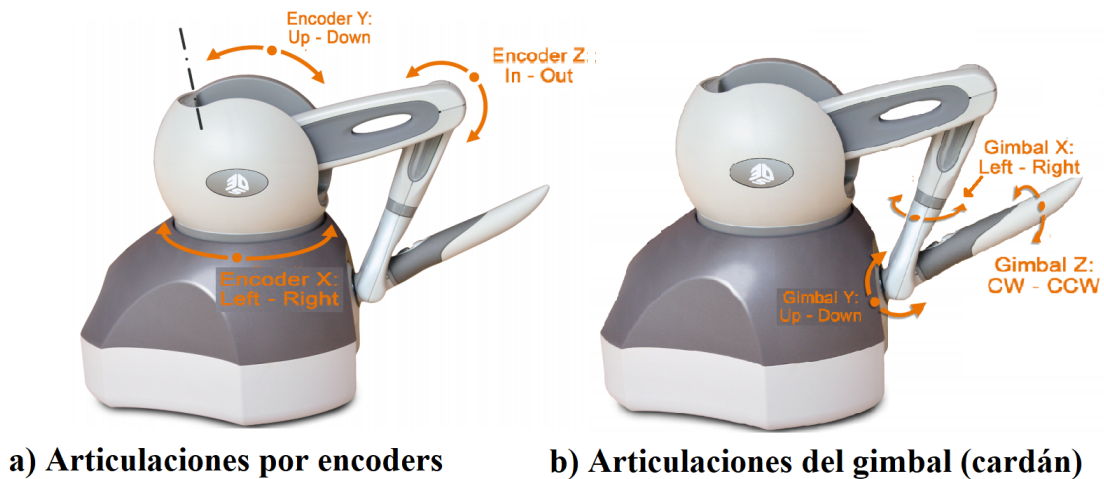


Figura 2.7: Macro y micro movimientos de la interfaz háptica [21]

Las especificaciones técnicas del dispositivo se describen en la Tabla 2.1

A través de la interfaz por USB, es posible diseñar tareas de control y manipulación del *Touch Haptic Device* y mediante la conexión a una PC se logra establecer el canal de comunicación para realizar la tarea de telemanipulación.

### 2.3. Robot esclavo: IRB2400/16 de ABB

El robot IRB2400 de la marca ABB pertenece a la familia de robots industriales de 6 grados de libertad diseñado específicamente para tareas repetitivas en la industria de la manufactura que utilizan una automatización flexible basada en robots. Esta familia de robots, en conjunto con el controlador IRC5 (ver Figura 2.9), permite grandes po-

Espacio de trabajo	160 ancho $\times$ 120 alto $\times$ 70 profundidad [mm]
Resolución	0.055 [mm]
Fuerza máxima a la posición nominal	3.3 [N]
Rigidez	Eje $x$ 1.26 [N/mm] Eje $y$ 2.31 [N/mm] Eje $z$ 1.02 [N/mm]
Retroalimentación de fuerza	3 grados de libertad ( $x, y, z$ )
Detección de posición de entrada	6 grados de libertad Encoders( $x, y, z$ ) Potenciómetros (raw, pitch, yaw)
Interfaz	USB 2.0

Tabla 2.1: Especificaciones de la interfaz háptica

sibilidades de comunicación con sistemas externos, por ejemplo, comunicación a través del puerto serial RS-232 y el puerto LAN. Estas 2 características para la comunicación se toman en cuenta para poder realizar la tarea de teleoperación. Para conocer más características del robot y el controlador favor de consultar [22] y [23].

El espacio de trabajo del robot se observa en la Figura 2.8, el cual se toma en cuenta para planear la tarea al momento de escalar el espacio de trabajo del robot maestro.

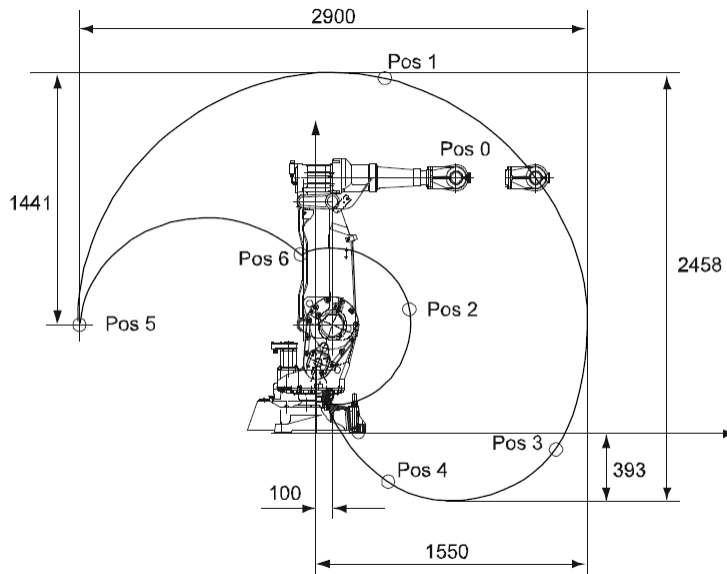


Figura 2.8: Espacio de trabajo del robot IRB2400/16



Figura 2.9: Controlador IRC5 con FlexPendant

## 2.4. Sensor de fuerza: JR3

Para la medición de la fuerza aplicada se utiliza un sensor de la marca JR3, que consta del transductor 50M31A3 y una tarjeta PCI para la adquisición de los datos (Figura 2.10). A través de la tarjeta de memoria PCI es posible tener acceso a los datos recibidos, cada dato posee una dirección predeterminada por el fabricante (Apéndice A). El procesamiento de los datos es realizado por un DSP.

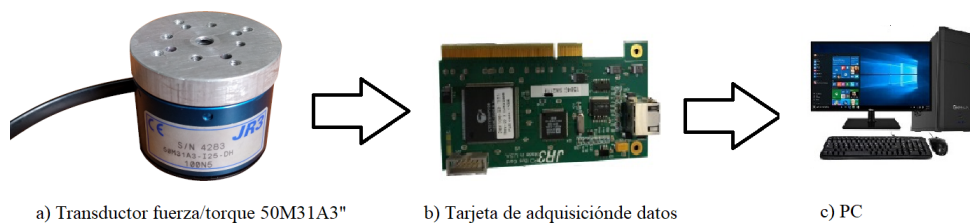


Figura 2.10: Sensor JR3

El transductor es una estructura compacta, resistente y monolítica que convierte la fuerza y el par en señales analógicas de galgas extensométricas. El transductor se instala de manera regular entre el robot y la herramienta. En la Tabla 2.2 se muestran las especificaciones del transductor.



	fuerza en $x$	fuerza en $y$	fuerza en $z$	par en $x$	par en $y$	par en $z$
Capacidad	$\pm 100N$	$\pm 100N$	$\pm 200N$	$\pm 5Nm$	$\pm 5Nm$	$\pm 5Nm$
Resolución	$0.044N$	$0.044N$	$0.089N$	$0.002Nm$	$0.002Nm$	$0.002Nm$

Tabla 2.2: Especificaciones del transductor JR3

Para calibrar el sensor JR3, se colocan cargas individualmente en cada eje. Estos datos de calibración se emplean para generar una matriz de calibración y desacoplamiento, con esto es posible convertir los voltajes de salidas en datos de carga de fuerza y momento. La matriz generada se multiplica por el vector de voltaje de seis elementos correspondientes a las 6 galgas en el transductor. Finalmente se obtienen los datos de fuerza y momento calibrados resolviendo la ecuación 2.1

$$[A] \times [V] = \begin{bmatrix} F \\ \eta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

donde  $A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  es la matriz de calibración,  $V \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  es el vector columna que representa los voltajes de salida del transductor,  $F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  es el vector columna de fuerzas y  $\eta \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  es el vector de pares en cada eje. La matriz se localiza en la memoria de la tarjeta PCI.

## 2.5. Canal de comunicación

En un inicio el control de dispositivos e interconexión remoto, era considerado como ciencia ficción, pero hoy en día los sistemas de teleoperación en red son una realidad y ampliamente utilizados en varios sectores industriales [3]. Hoy en día, el Internet y *World Wide Web* (www), son términos familiares para millones de personas alrededor del mundo [24]. Muchas áreas industriales hacen uso de páginas web y correos electrónicos para atender las demandas en sus productos y/o servicios. Por otra parte, los sistemas robóticos han traído consigo enormes cambios en varios aspectos socioeconómicos durante las pasadas décadas [2]. Los robots industriales se han desplegado y utilizado en todo tipo de industrias para realizar tareas repetitivas, tediosas, críticas y/o peligrosas, como el montaje del producto, la pintura del automóvil, la caja de embalaje y protección de soldadura [25].

Los sistemas teleoperados forman parte de la clasificación de sistemas robóticos en red, los cuales se definen como una colección de dispositivos que se encuentran conectados inalámbrica y/o alámbricamente a una red de comunicación, donde remotamente los robots son controlados a través del envío de comandos vía red, para la realización de tareas intercambiando datos e información [25] [26].

Para lograr el intercambio de datos e información, se hace uso de los protocolos TCP/IP (del inglés Transmission Control Protocol/Internet Protocol), los cuales se han convertido en los motores para la red mundial de comunicación vía internet, siendo un método



estandar a nivel industrial para lograr la interconexión de redes, hosts e Internet [24]. El canal de comunicación para la realización de la tarea de teleoperación, incluye tres elementos físicos: links (enlaces), routers (enrutadores) y hosts (anfitriones). Los links son el medio en el cual se transmiten los bits de un lugar a otro. Los routers se encargan de intercambiar información entre los links. Los hosts son los puntos finales de comunicación [2]. Para la tarea de teleoperación los hosts serán los robots esclavo y maestro. Nuestro canal de comunicación se encuentra basado en el modelo de comunicación servidor/cliente. Siendo el servidor una aplicación que ofrece un servicio a los usuarios de internet y el cliente es un solicitante de un servicio [24]. Un servidor generalmente puede manejar múltiples solicitudes y múltiples clientes solicitantes al mismo tiempo (Figura 2.11). En este trabajo, la aplicación de servidor será configurada en el robot

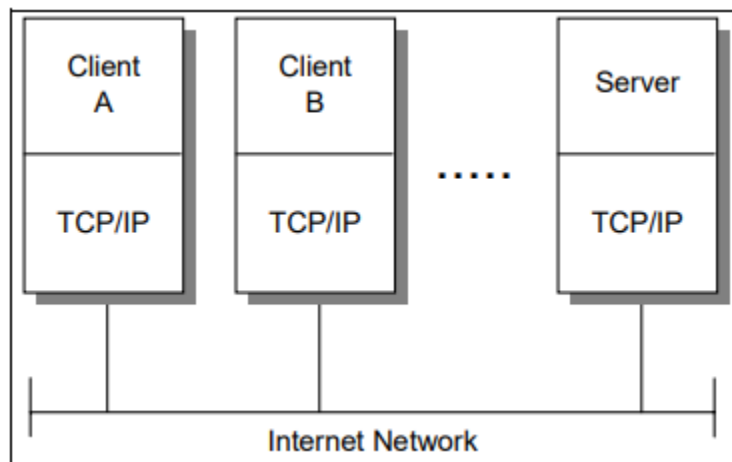


Figura 2.11: Red de Internet [24]

esclavo, posteriormente la aplicación del cliente será configurada en el robot maestro. El cliente genera un solicitud para un servicio en particular, para este caso la tarea de teleoperación, y lo envía a la aplicación del servidor y devuelve los resultados en respuesta. Para este intercambio de información se utilizan los protocolos TCP/IP como el vehículo de transporte.

Las responsables para lograr la conexión con los hosts de origen y destino, son las direcciones IP. Las direcciones IP no solo deben dirigirse a un host en particular, sino también a una red en particular. Existen las IP públicas y las IP privadas, las primeras se refieren a la identificación desde el exterior y la segunda refiere a la identificación de los dispositivos conectados en la red propia. La dirección IP facilita la comunicación a través de redes y debe reconocerse universalmente, incluso si el host es un nodo conectado a una red de área local o un puerto serie conectado a un módem [27]. La configuración del robot esclavo permite mantener una IP pública fija la cual facilitará al cliente su búsqueda para establecer el canal de comunicación.

---

### 3. Control híbrido de posición/fuerza

En la sección, se ha realizado control híbrido de posición/fuerza aplicado en robots industriales [5], [6]. Este tipo de control se basa en primera instancia en controlar la posición y después la fuerza. Raibert y Craig [11], conceptualizaron la técnica de control híbrido, la cual combina la fuerza y el par con datos posicionales para satisfacer las restricciones que existan en posición y durante la trayectoria de fuerza. Este control híbrido de posición/fuerza ha demostrado, en los trabajos realizados por Raibert y Craig, estabilidad en una variedad de condiciones de prueba. Los avances en la tecnología robótica han generado sistemas de control de posición muy precisos para poder lograr tareas de ensamblaje, *pick and place*, para tareas de agarre, etc., pero el control de fuerza se encuentra concentrado en las principales empresas dedicadas a la fabricación de robots. Para el caso del robot esclavo, la empresa ABB ofrece un kit para aplicaciones de control de fuerza integrado.

*La funcionalidad adaptable de Integrated Force Control se puede usar en muchas aplicaciones, como montaje, comprobación de productos y mecanizado. Una ligera variación en la fase de fabricación puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso. Para ayudarle a abordar estos problemas, la tecnología Integrated Force Control de ABB dota a los robots de más inteligencia y les permite manejar las variaciones en el proceso con información externa en tiempo real, como haría una mano humana al manejar un objeto delicado de dimensiones precisas [12].* "

El paquete básico incluye:

- RW Machining FC
- Interfaz gráfica del usuario (GUI)
- Panel DAQ
- Sensor de fuerza/par
- Paquete de cables
- Montaje, prueba y validación

Como se observa en la Figura 3.1, el kit incluye todo lo necesario para las tareas que requieran un control preciso de fuerza o torque. Cada uno de los elementos está diseñado de tal manera que su integración al robot se encuentre en sinergia con cada uno de sus elementos y flexible a la tarea deseada. Así como ABB y otras principales empresas dedicadas a la fabricación de robots [14] (Yaskawa, EPSON Robots, Kuka Robot, Kawasaki Heavy Industries), sus sistemas de control de fuerza no son flexibles para otro fabricante por lo que la adquisición del *software* y *hardware* resulta un costo mayor. El control híbrido de posición/fuerza resuelve la falta de un kit de fuerza. Para ello



Figura 3.1: Kit para el control de Fuerza [13]

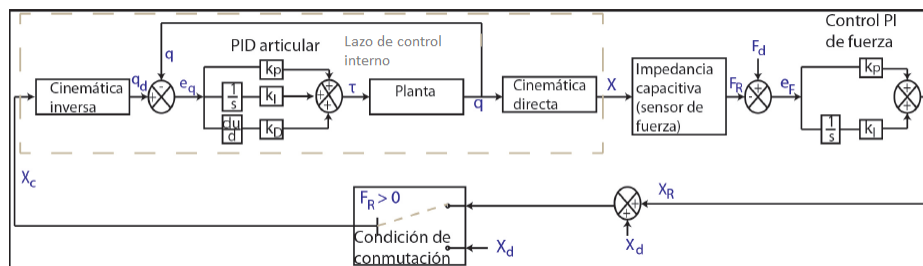


Figura 3.2: Esquema de control híbrido posición/fuerza [5]

el diagrama que describe este lazo de control se puede observar en la Figura 3.2. En el esquema de control híbrido (Figura 3.2) descrito por [5], se puede observar el lazo interno de control, un control PI de fuerza, modelos cinemáticos y dinámicos, modelo del ambiente y una condición de conmutación. El lazo de control interno es propio del controlador del robot, al ser un robot de arquitectura cerrada, es imposible tener acceso a las ganancias del control PID o modificar alguno de los modelos cinemáticos o dinámicos. A través de la interfaz del controlador es posible comandar las posiciones del robot mediante programación en código RAPID o directamente con el "TeachPendant". La impedancia capacitiva es la fuerza que es medida por el sensor JR3 y el control de fuerza PI regula la fuerza deseada aplicada contra el ambiente. La condición de conmutación entra en función en el momento que el robot se encuentre en contacto con el ambiente. Para realizar la tarea de teleoperación con retroalimentación háptica de este trabajo se realizó una modificación de la Figura 2.2 e integrando el esquema de control híbrido,

---

quedando como se muestra en la Figura 3.3. Donde  $F_d = \lambda_{ds}$ ,  $F_R = \lambda_s$  y la variable  $X_c$ ,

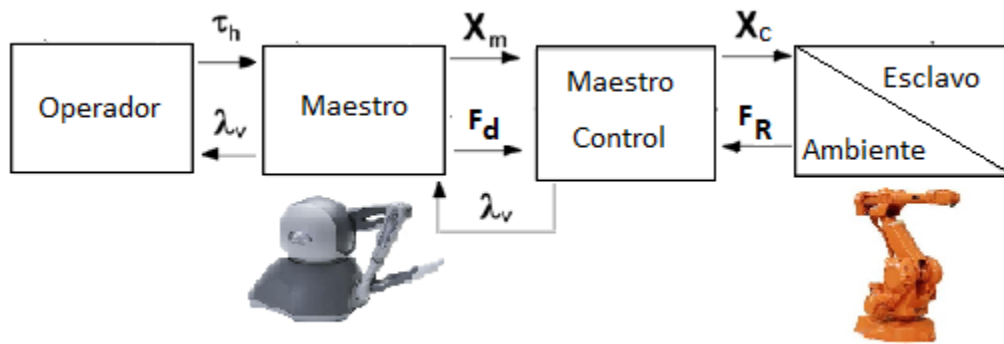


Figura 3.3: Diagrama de control para la tarea de teleoperación

que es la posición comandada, es retomada nuevamente del esquema de control híbrido.

---

## 4. Modelos matemáticos

En este capítulo se describen los modelos que se ocuparon en la tarea de telemanipulación. Las ecuaciones para el control de fuerza, la cinemática directa de la interfaz háptica y las operaciones matriciales que se requirieron para lograr una buena manipulabilidad.

### 4.1. Control PI fuerza

Se utiliza el modelo de impedancia, ecuación (4.1), del sistema masa-resorte-amortiguador desarrollado en [5]

$$F_R = k(X - X_a) \quad (4.1)$$

donde considera la posición actual del robot  $X$  y la posición del ambiente  $X_a$  tal que  $X - X_a$  representa penetración en el ambiente. Con esta premisa el control de fuerza que se implementa en el sistema de telemanipulación para el lado del robot esclavo, presenta la forma de la ecuación (4.2)

$$X_R(t) = K_P e_F(t) + K_I \int_0^t e_F(T) dT \quad (4.2)$$

Donde  $K_P$  y  $K_I$ , son las ganancias proporcionales e integrales respectivamente.  $e_F$  es el error de fuerza definida en (4.3)

$$e_F = F_d - F_R \quad (4.3)$$

Siendo  $F_d$  la fuerza deseada por el operador, a través de la interfaz háptica y  $F_R$  es la fuerza real medida por el sensor JR3.

$X_R$  es la posición de referencia, la cual es añadida a la posición actual del ambiente ( $X_a$ ), cuando el robot se encuentra en contacto con la superficie y  $F_R > 0$  N (condición de conmutación) se obtiene la nueva posición comandada ( $X_c$ ), teniendo la forma (4.4)

$$X_c = X_a + X_R \quad (4.4)$$

Para el lado del robot maestro, la interfaz háptica ya tiene incluido el control de fuerza en cada uno de sus ejes coordenados. Por medio del llamado de la librería de fuerza es como se genera la retroalimentación de fuerzas. Esta fuerza es escalada de la fuerza real.

Cuando la teleoperación conmuta de movimiento libre a restringido por una superficie horizontal, el desplazamiento sobre el eje  $z$  de la interfaz conmuta a un resorte virtual para poder generar la fuerza deseada sobre el ambiente remoto. En otras palabras

$$F_d = k_h \times z_h \quad (4.5)$$

Donde  $k_h$  es la constante de rigidez de nuestro resorte virtual con valor de  $1N/m$  y  $z_h$  es el desplazamiento generado por el operador a través de la interfaz háptica sobre el

eje  $z$  medido a partir del contacto del robot esclavo con la superficie. Con la ecuación (4.5) es posible regular la fuerza que se desea aplicar contra el ambiente.

## 4.2. Cinemática directa de la interfaz háptica

### Convención Denavit-Hartenberg (DH)

Por conveniencia se estableció una convención para calcular la cinemática directa de un manipulador de cadena abierta con el fin de poder definir la posición relativa y la orientación de dos eslabones consecutivos. Con referencia a la Figura 4.1 el eje  $i$  denota el eje de la unión que conecta el eslabón  $i_1$ ; la llamada convención Denavit-Hartenberg [28] es adoptada para definir los marcos de cada eslabón:

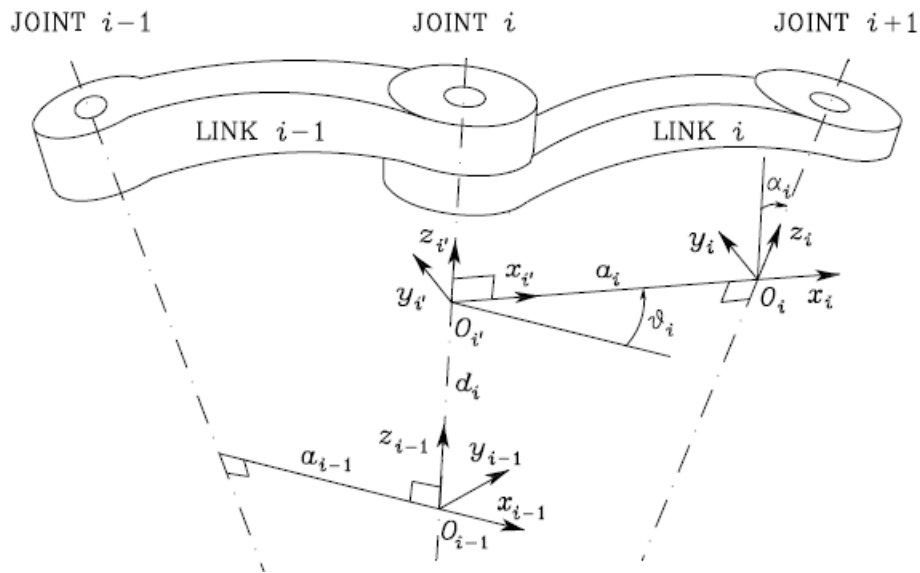


Figura 4.1: Parámetros cinemáticos Denavit-Hartenberg [28]

1. Identificar los ejes y dibujar líneas sobre ellos.
2. Identificar la perpendicular común entre ellos.
3. Asignar el eje  $\hat{Z}_i$  orientado sobre el  $i$ -ésimo eje de articulación.
4. Asigne el eje  $\hat{X}_i$  apuntando perpendicularmente común o, si los ejes se intersecan, asigne  $\hat{X}_i$  para que sea normal al plano que contiene los ejes.

5. Asigne el eje  $\hat{Y}_i$  para completar un sistema de coordenadas de mano derecha.
6. Asignar el marco 0 para que concuerde con el marco 1 cuando la primera variable de articulación sea cero.

Si las tramas de los vínculos son asignadas de acuerdo con la convención DH [29], son validas las siguientes definiciones:

- $a_i =$  la distancia de  $\hat{Z}_i$  a  $\hat{Z}_{i+1}$  medida sobre  $\hat{X}_i$ .
- $\alpha_i =$  el ángulo de  $\hat{Z}_i$  a  $\hat{Z}_{i+1}$  medido sobre  $\hat{X}_i$
- $d_i =$  la distancia de  $\hat{X}_{i-1}$  a  $\hat{X}_i$  medida sobre  $\hat{Z}_i$
- $\theta_i =$  el ángulo de  $\hat{X}_{i-1}$  a  $\hat{X}_i$  medido sobre  $\hat{Z}_i$

Por lo general se elige  $a_i > 0$  ya que corresponde a una distancia; no obstante  $\alpha_i$ ,  $d_i$  y  $\theta_i$  son cantidades con signo. Sustituyendo las definiciones en la siguiente matriz (4.6),

$${}_{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

se obtiene la descripción de la posición y orientación del marco  $n$  respecto al marco 0 mediante la siguiente expresión,

$${}^0_nT = {}^0_1A(q_1) {}^1_2A(q_2) \dots {}^{n-1}_nA(q_n). \quad (4.7)$$

### Matriz homogénea de la interfaz

Para obtener la matriz homogénea de la interfaz, primero se obtiene la matriz de transformación del marco de trabajo respecto al marco de la base (4.8) de manera heurística, midiendo y observando. En la Figura 4.2 se observan los marcos fijos de la interfaz.

$${}^w_0T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 30mm \\ 1 & 0 & 0 & -176mm \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

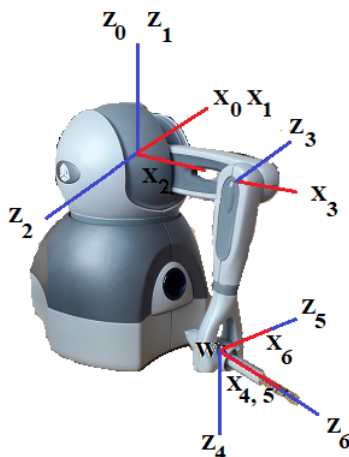


Figura 4.2: Marcos fijos de la interfaz háptica

Mediante la convención de Denavit-Hartenberg, es posible obtener la matriz homogénea.

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$\pi/2$	0	0	$\theta_2$
3	0	$a_2$	0	$\theta_3$
4	$\pi/2$	0	$d_4$	$\theta_4$
5	$-\pi/2$	0	0	$\theta_5$
6	$\pi/2$	0	0	$\theta_6$

Tabla 4.1: Parametros DH

Donde  $a_2 = 127mm$  y  $d_4 = 150mm$ . Con los parámetros obtenidos en la Tabla 4.1 es posible obtener la cinemática directa. En la matriz homogénea se puede expresar la posición y la orientación del efector final como una función de seis variables, como se muestra en (4.9), mediante (4.7)

$${}^wT = {}^wT_0 {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6. \quad (4.9)$$

Debido a la configuración de este dispositivo es posible separar la Ec. 4.9 en dos distintas, la primera en la posición final y la segunda la orientación.

$${}^wT = {}^wT_0 [R(\theta_1, \theta_2, \theta_3)] [W(\theta_4, \theta_5, \theta_6)] \quad (4.10)$$

En la Ec. (4.10),  $R(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  es la expresión matricial de la posición y  $W(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$  es la expresión matricial de la orientación. Substituyendo los parámetros de la Tabla 4.1,



se obtiene

$$R(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{pmatrix} c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3 & s_1 & c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3 & -(-c_1c_2s_3 - c_1s_2c_3)d_4 + c_1c_2a_2 \\ s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3 & -c_1 & s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3 & -(-s_1c_2s_3 - s_1s_2c_3)d_4 + s_1c_2a_2 \\ s_2c_3 + c_2s_3 & 0 & s_2s_3 - c_2c_3 & -(-s_2s_3 + c_2c_3)L_2 + s_2L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$W(\theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{pmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5c_6 - s_4c_6 & c_4s_5 & 0 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_4 & -s_4c_5s_6 + c_4c_6 & s_4s_5 & 0 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Donde  $c_1, c_2$  y  $c_3$ , son  $\cos(\theta_1), \cos(\theta_2), \cos(\theta_3)$  respectivamente, y  $s_1, s_2$  y  $s_3$ , son  $\sin(\theta_1), \sin(\theta_2), \sin(\theta_3)$  respectivamente. Obteniendo de esta manera la cinemática directa

$${}^w_6T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = {}^w_0TR(\theta_1, \theta_2, \theta_3) W(\theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

donde

$$\begin{aligned} r_{11} &= (s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) - (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)s_5c_6 \\ r_{12} &= (s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) - c_1(s_4c_5s_6 + c_4c_6) + (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)s_5s_6 \\ r_{13} &= (s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3)c_4c_5 - c_1s_4s_5 + (s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3)c_5 \\ P_x &= -(-s_1c_2s_3 - s_1s_2c_3)d_4 + s_1c_2a_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{21} &= (s_2c_3 + c_2s_3)(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - (s_2s_3 - c_2c_3)s_5c_6 \\ r_{22} &= (s_2c_3 + c_2s_3)(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + (s_2s_3 - c_2c_3)s_5s_6 \\ r_{23} &= (s_2c_3 + c_2s_3)c_4s_5 + (s_2s_3 - c_2c_3)c_5 \\ P_y &= -(-s_2s_3 + c_2c_3)d_4 + s_2a_2 + 30 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{31} &= (c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) - (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)s_5c_6 \\ r_{32} &= (c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_1(-s_4c_5s_6 + c_4c_6) + (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)s_5s_6 \\ r_{33} &= (c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3)c_4s_5 + s_1s_4s_5 + (c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3)c_5 \\ P_z &= -(-c_1c_2s_3 - c_1s_2c_3)d_4 + c_1c_2a_2 - 176 \end{aligned}$$

### 4.3. Matrices de transformación

Un cuerpo rígido se puede describir dado su posición y orientación respecto a un marco de referencia [28], como se muestra en la Figura 4.3, donde  $O_{xyz}$  es el marco

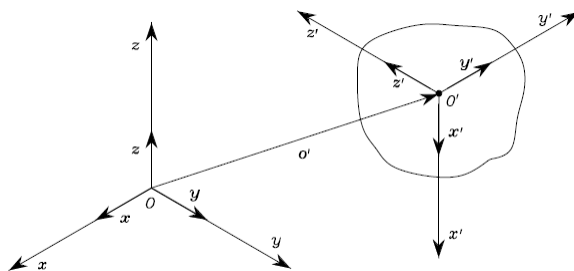


Figura 4.3: Posición y orientación del cuerpo rígido [28]

ortonormal de referencia y  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son los vectores unitarios de los ejes del marco. La posición del punto  $O'$  del cuerpo rígido respecto al marco coordinado  $O - xyz$  se puede expresar por la relación

$$o' = o'_x x + o'_y y + o'_z z$$

donde  $o'_x, o'_y, o'_z$  describen los componentes del vector  $o' = \begin{bmatrix} o'_x \\ o'_y \\ o'_z \end{bmatrix}$ . A su vez para describir

la rotación, en una notación compacta, se hace el uso de 3 vectores unitarios. Con ello es posible describir la orientación del cuerpo con respecto al marco de referencia que se combina en una matriz  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,

$$R = \begin{pmatrix} x' & y' & z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

denotada como matriz de rotación. En la matriz de rotación, los vectores columna que la conforman son ortogonales entre si ( $x'^T y' = 0$ ,  $y'^T z' = 0$ ,  $z'^T x' = 0$ ) y de norma unitaria ( $x'^T x' = 1$ ,  $y'^T y' = 1$ ,  $z'^T z' = 1$ ). En consecuencia,  $R$  es una matriz ortogonal ( $R^T R = I_3$ ) y ortonormal ( $\det(R) = 1$  si es marco de la mano derecha, y  $\det(R) = -1$  si es el marco de la mano izquierda).

Existen matrices de rotación que permiten generar rotaciones elementales del marco de referencia respecto a un eje coordenado.

La rotación de un ángulo  $\gamma$  respecto al eje  $x$

$$R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

la rotación de un ángulo  $\beta$  respecto al eje  $y$

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

la rotación de un ángulo  $\alpha$  respecto al eje  $z$

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

con estas matrices es posible describir rotaciones sobre un eje arbitrario en el espacio. Para comprender más su importancia y su uso, de las matrices de rotación, se presenta el ejemplo siguiente, considérese el caso del origen del marco de referencia  $x y z$  de un cuerpo rígido coincide con el origen del marco de referencia  $x' y' z'$  (Figura 4.4). Un punto  $P$  se puede representar en el espacio del marco de referencia  $O - xyz$  como

$$p = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

y respecto al marco  $O - x'y'z'$

$$p' = \begin{pmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

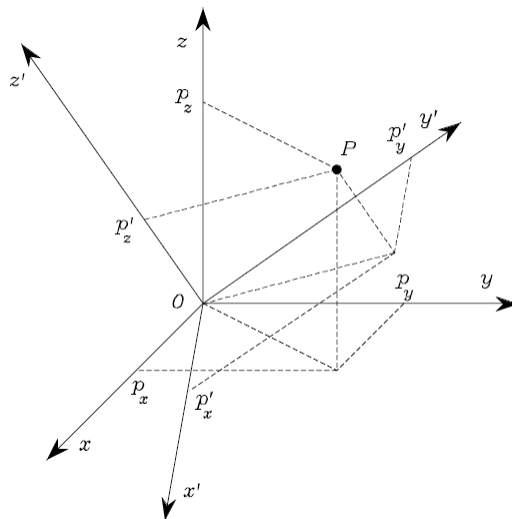


Figura 4.4: Representación de un punto  $P$  en dos marcos de referencia diferentes [28]

por lo tanto  $p$  y  $p'$  son representaciones del mismo punto  $P$  y de acuerdo a 4.14, se puede expresar como

$$p = Rp' \quad (4.20)$$

Donde  $R$  representa la matriz de transformación que lleva el vector del punto  $P$  del marco  $O - x'y'z'$  al marco de referencia  $O - xyz$ . Tomando en cuenta la propiedad de ortogonalidad, mencionada anteriormente, la transformación inversa es dada por

$$p' = R^T p. \quad (4.21)$$

### Cambio de base del robot maestro

Con lo ya descrito, al instante de realizar la conexión del robot maestro con el robot esclavo, y al ser robots no-similares, sus marcos de referencia no son coincidentes como se puede observar en la Figura 4.5.

Para poder realizar la tarea de teleoperación entre dos robots no-similares se definió

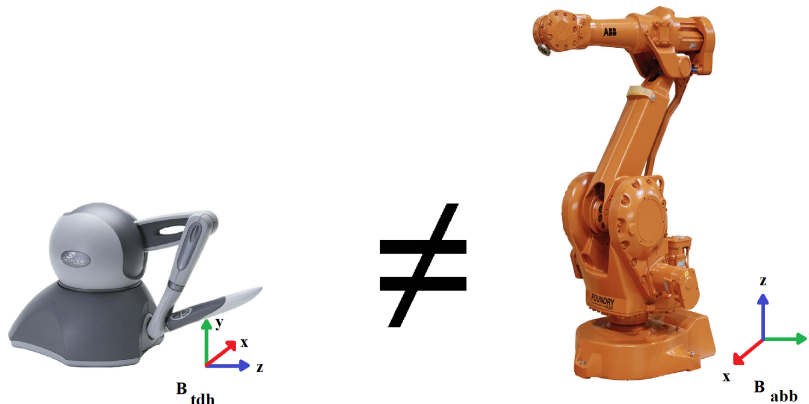


Figura 4.5: Marcos base

el espacio de la tarea del robot esclavo en el laboratorio. El robot esclavo inicialmente se colocará en una posición segura y una posición de trabajo, como se muestra en la Figura 4.6.

El robot maestro se orienta de igual manera, para que el seguimiento del robot esclavo sea natural con respecto a la perspectiva del operador, como se observa en la Figura 4.7. Para poder resolver una parte de la no-similaridad entre ambos robots, primero se orienta el *gimbal* de la interfaz de manera que sea homologa a la del sensor (ver Figura 4.8), para ello la matriz de la ecuación (4.13) la postmultiplicamos por

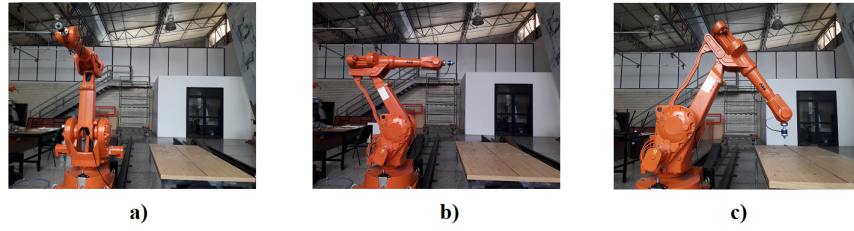


Figura 4.6: a) Posición inicial b) Posición segura b) Posición de trabajo

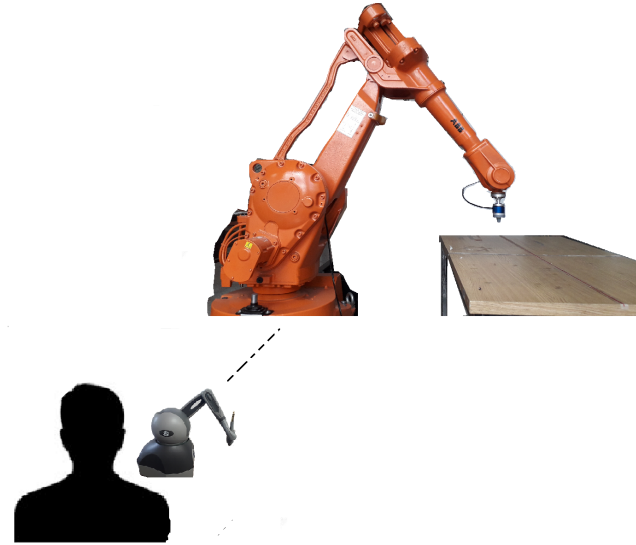


Figura 4.7: Perspectiva del operador

la matriz de transformación  $H_{6x} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  y después la premultiplicamos por  $H_{AB} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ .

$$H_{AB} T_6^w H_{6x} = R_T, \quad R_T \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad (4.22)$$

Donde

$$H_{AB} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

$$H_{6x} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

La matriz (4.24) permite orientar el *gimbal* en la posición de trabajo deseada respecto al marco de la base de la interfaz, y la matriz (4.23) permite hacer el cambio de base de la interfaz respecto al marco de la base de referencia del robot esclavo. Ambas matrices se obtuvieron de manera heurística. Con esto último, las posiciones cartesianas ya se

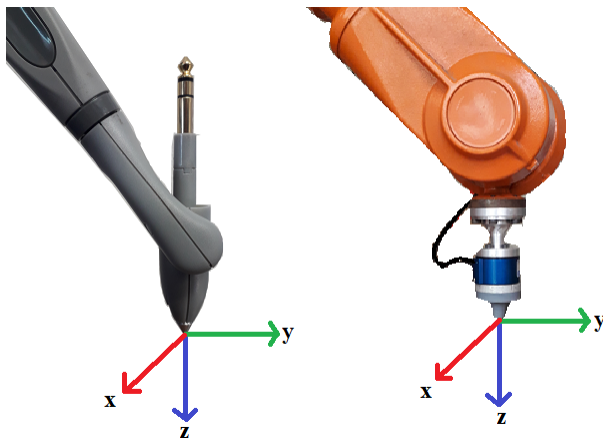


Figura 4.8: Orientación similar

encuentran en la misma orientación para lograr un seguimiento en el espacio. Para lograr una telemanipulación utilizando los 6 grados de libertad de ambos robots, se procede a obtener el cuaternión.

### Cuaternios

Un cuaternión es un conjunto de 4 números que representan la orientación de un manipulador. Estos 4 números son conocidos como los parámetros de Euler, definidos como  $Q = \{\eta, \epsilon\}$  donde:

$$\eta = \cos \frac{\vartheta}{2} \quad (4.25)$$

$$\epsilon = \sin \frac{\vartheta}{2} r \quad (4.26)$$

Siendo  $\vartheta$  la rotación sobre el eje  $r$ ,  $\eta$  es llamado la parte escalar del cuaternión mientras que  $\epsilon = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z]^T$  es llamado la parte vectorial del cuaternión [28]. También se les conoce como cuaternión unitario porque está restringido por la siguiente condición

$$\eta^2 + \epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2 = 1 \quad (4.27)$$

Esta representación es extremadamente útil en los sistemas robóticos para resolver problemas con singularidades.

La matriz de rotación correspondiente de un cuaternio determinado toma la forma

$$R(\eta, \epsilon) = \begin{pmatrix} 2(\eta^2 + \epsilon_x^2) - 1 & 2(\epsilon_x \epsilon_y - \eta \epsilon_z) & 2(\epsilon_x \epsilon_z + \eta \epsilon_y) \\ 2(\epsilon_x \epsilon_y + \eta \epsilon_z) & 2(\eta^2 + \epsilon_y^2) - 1 & 2(\epsilon_y \epsilon_z - \eta \epsilon_x) \\ 2(\epsilon_x \epsilon_z - \eta \epsilon_y) & 2(\epsilon_y \epsilon_z + \eta \epsilon_x) & 2(\eta^2 + \epsilon_z^2) - 1 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

En caso contrario, el cuaternio correspondiente a una determinada matriz de rotación  $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

se obtiene a través de las ecuaciones (4.30) y (4.31)

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{r_{11} + r_{22} + r_{33} + 1} \quad (4.30)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \operatorname{sgn}(r_{32} - r_{23}) \sqrt{r_{11} - r_{22} - r_{33} + 1} \\ \operatorname{sgn}(r_{13} - r_{31}) \sqrt{r_{22} - r_{33} - r_{11} + 1} \\ \operatorname{sgn}(r_{21} - r_{12}) \sqrt{r_{33} - r_{11} - r_{22} + 1} \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

donde  $\operatorname{sgn}(x) = 1$  para  $x \geq 0$  y  $\operatorname{sgn}(x) = -1$  para  $x < 0$ . Asumiendo que  $\eta \geq 0$ , se dice que corresponde a un ángulo  $\vartheta \in [\pi, \pi]$ .

## 5. Plataforma experimental

Como se menciona en el capítulo 2.1, el sistema de telemanipulación consta de 2 robots, de un canal de comunicación y un sensor de fuerza.

En la figura 5.1 se aprecia la distribución de cada uno de los elementos que conforman al sistema.

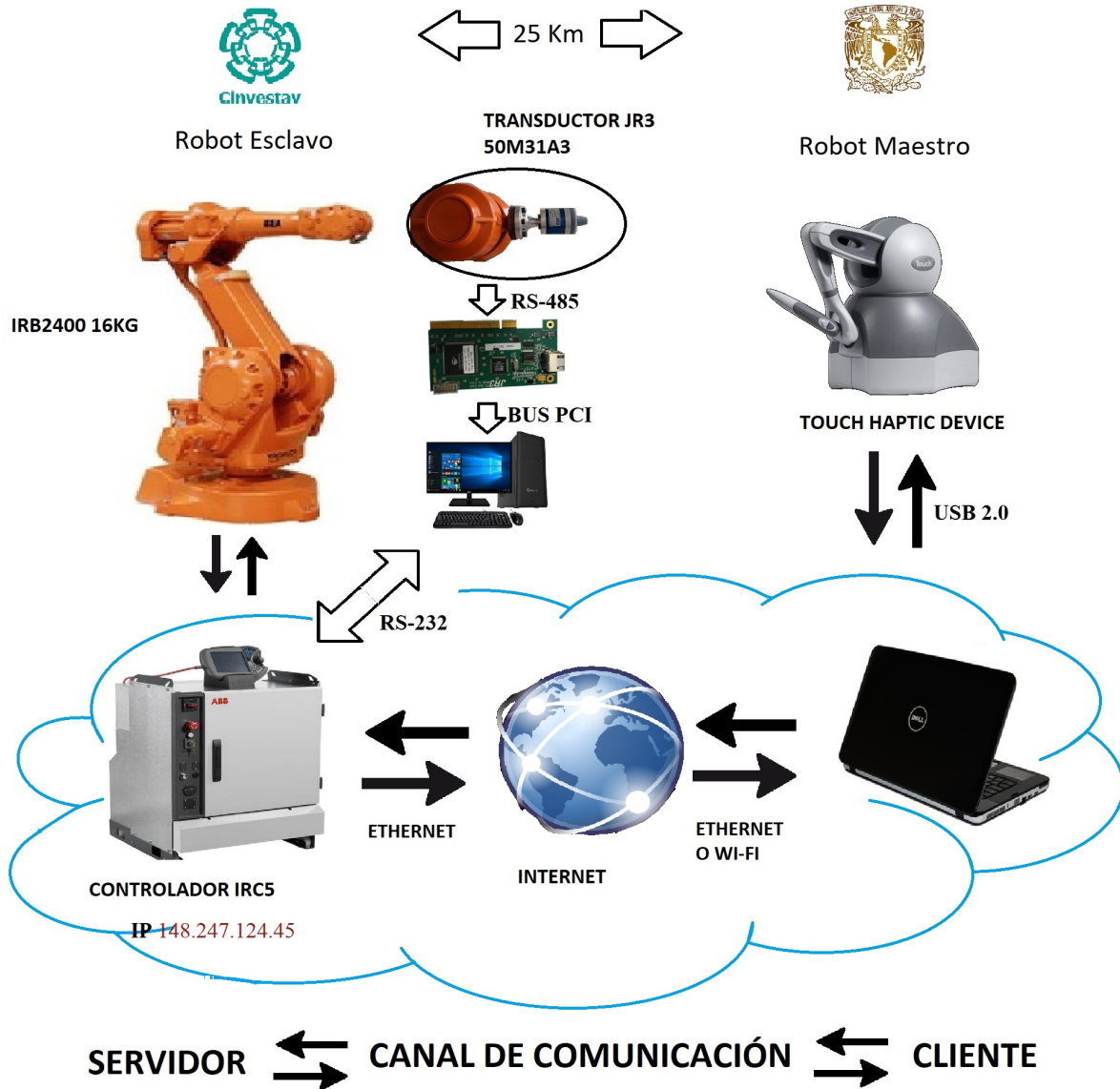


Figura 5.1: Integración del sistema de teleoperación

man al sistema. El robot esclavo se encuentra localizado en el Laboratorio de Robótica de la Sección de Mecatrónica del CINVESTAV Unidad Zacatenco a 25 km apartado, aproximadamente, del robot maestro localizado en el Laboratorio de Robótica del De-



---

partamento de Posgrado de Ingeniería en Ciudad Universitaria.

El canal de comunicación se encuentra conformado por el controlador IRC5, la red de Internet, y una computadora portátil, esta última tiene la función de integrar el robot maestro al sistema, de igual manera funciona el controlador IRC5 con el robot esclavo. En la computadora portatil se creó una interfaz gráfica de usuario (GUI) que nos permite realizar las acciones de control y de retroalimentación, también nos permite la integración del robot maestro al sistema. La interfaz gráfica se puede observar en la Figura 5.2 y en la Tabla 5 se observan cada una de las funciones de la interfaz GUI.

En el Anexo B, se describen los pasos necesarios para una correcta configuración de la

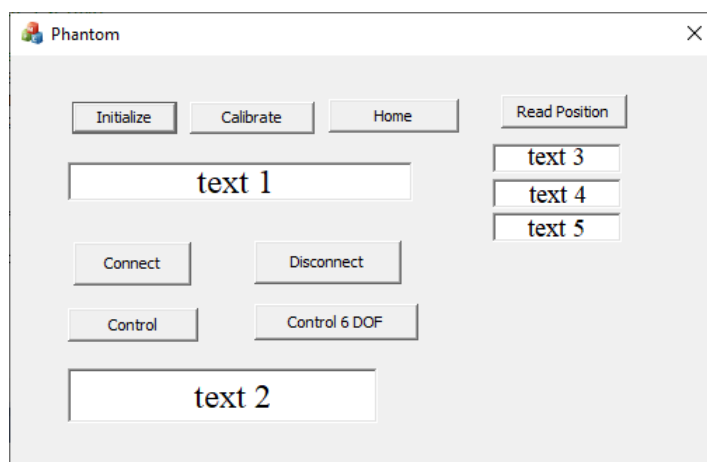


Figura 5.2: Ventana de la aplicación.

IP en el controlador IRC5.

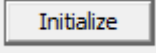
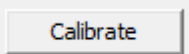
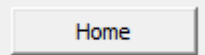
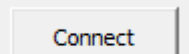
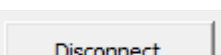
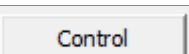
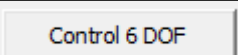

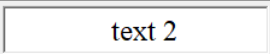
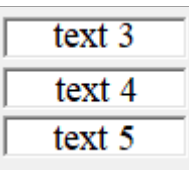
	Inicializa la interfaz háptica
	Se calibra la interfaz antes de realizar la tarea
	Se lleva el <i>gimbal</i> a su posición inicial
	Se inicializa el canal de comunicación con el robot esclavo
	Al finalizar la tarea se da termino al canal
	Se inicializa la tarea de teleoperación
	Se inicializa la tarea de telemanipulación
	Ventana de estado de la interfaz
	Ventana de estado de la tarea de teleoperación
	Posición actual de la interfaz

Tabla 5.1: Operación de la interfaz gráfica de usuario.

---

## 6. Resultados experimentales

En esta sección se describen los experimentos realizados mediante la teleoperación del robot industrial IRB2400 de ABB. En cada uno de los casos, la tarea de telemanipulación y teleoperación, inicia de manera similar, esto significa que ambos robots los llevamos de manera independiente a una posición de trabajo antes de formar el canal de comunicación. Una vez establecido el canal, se procede a realizar la tarea.

En la tarea de teleoperación, se realizó control de fuerza, en regulación y seguimiento, sobre una caja de cartón perpendicular al eje  $z$  del sensor JR3, para estas tareas la orientación del sensor se mantiene constante, de esta manera se restringe el movimiento del robot esclavo en desplazamientos sobre los ejes coordinados.

Para la tarea de telemanipulación, se diseñaron 2 tareas diferentes. La primera es donde el operario intenta hacer girar un balón sobre una superficie y la segunda el operario mueve una caja de masa desconocida sobre una superficie para colocarla en un sitio seguro. Para lograr estas tareas de manipulación las orientaciones del robot esclavo son operados a través del robot maestro.

### 6.1. Teleoperación con control de fuerza

Para la tarea de teleoperación con control de fuerza sobre una superficie, se escalan los desplazamientos sobre los ejes coordinados y la fuerza real medida (ver Tabla 6.1), la fuerza escalada resultante se retroalimenta al operador a través del robot maestro. De esta manera el operador es capaz de percibir la fuerza medida por el robot esclavo. El seguimiento del robot esclavo es en movimiento libre, hasta que el sensor del robot se encuentre en contacto con la caja de cartón (ver Figura 6.1) midiendo una fuerza mayor a  $1\text{ N}$ , conmuta a movimiento restringido y de igual manera entra en operación el control de fuerza para la regulación y el seguimiento.

	Factor escalar
Eje $x$	2.5
Eje $y$	2
Eje $z$	1
Fuerza	0.15

Tabla 6.1: Factores de escalamiento

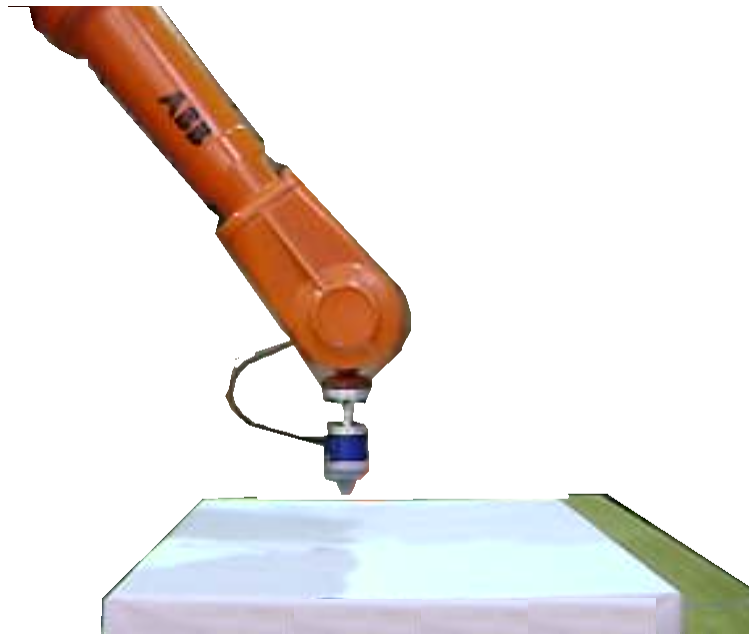


Figura 6.1: Posición inicial para la tarea de teleoperación.

### **Teleoperación con control de fuerza constante. Experimento 1**

En este experimento el operador realiza una trayectoria sobre una caja de cartón, a través del robot esclavo. El control de fuerza híbrido está implementado en el robot esclavo.

En la Figura 6.2 se observa la trayectoria generada por ambos robots, es posible observar como inician desde una misma posición de trabajo hasta la superficie de la caja de cartón para realizar una trayectoria sobre ella.

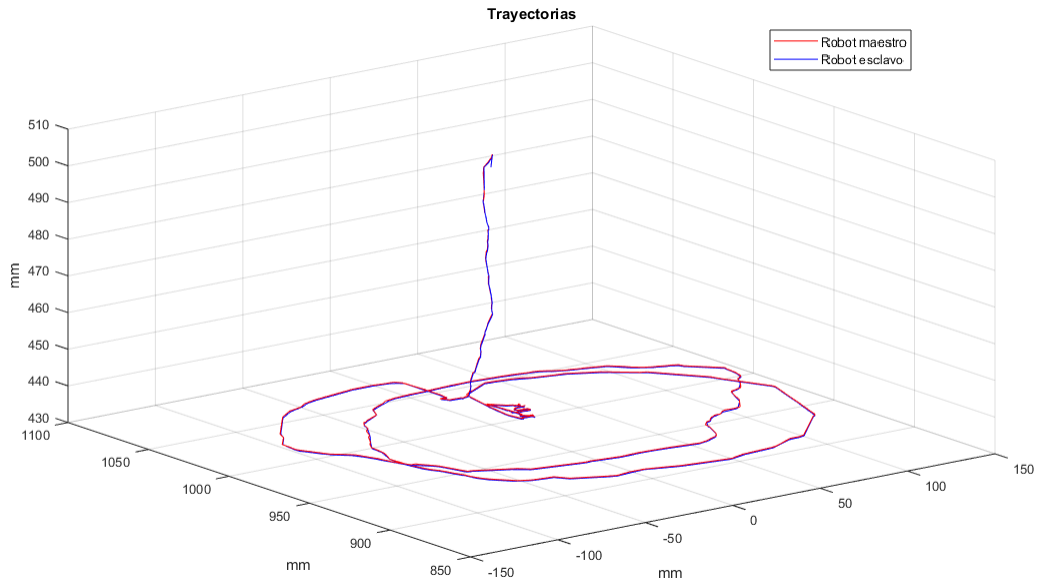


Figura 6.2: Trayectorias del robot maestro y el esclavo.

En la Figura 6.3 se observa el seguimiento del robot esclavo en cada uno de los ejes coordenados, y en la Figura 6.4 se presenta el error de seguimiento durante la tarea de teleoperación.

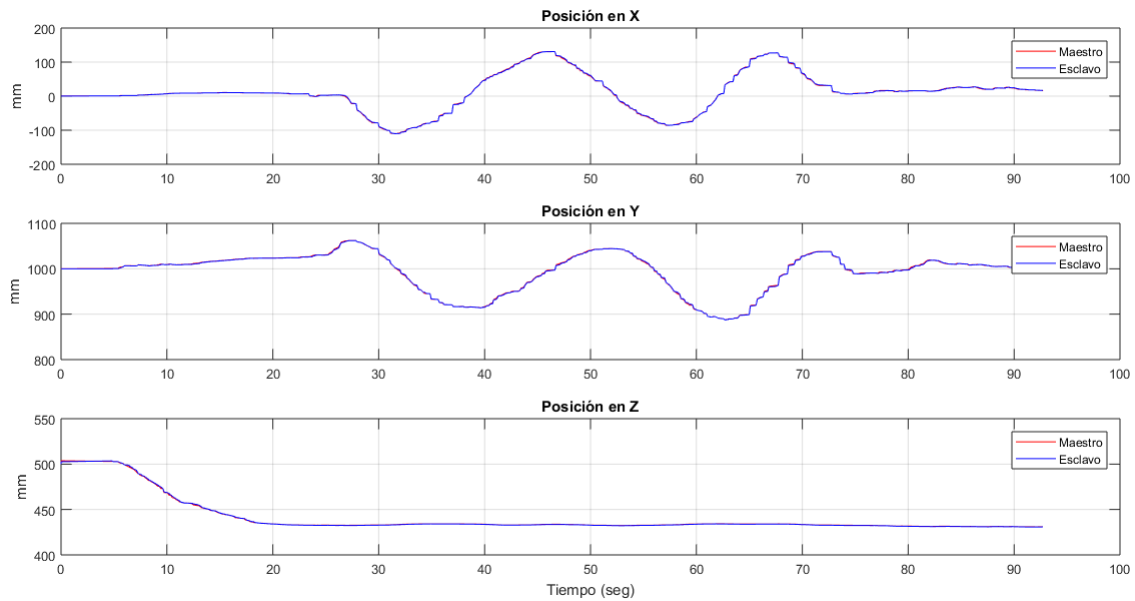


Figura 6.3: Seguimiento sobre los ejes coordenados.

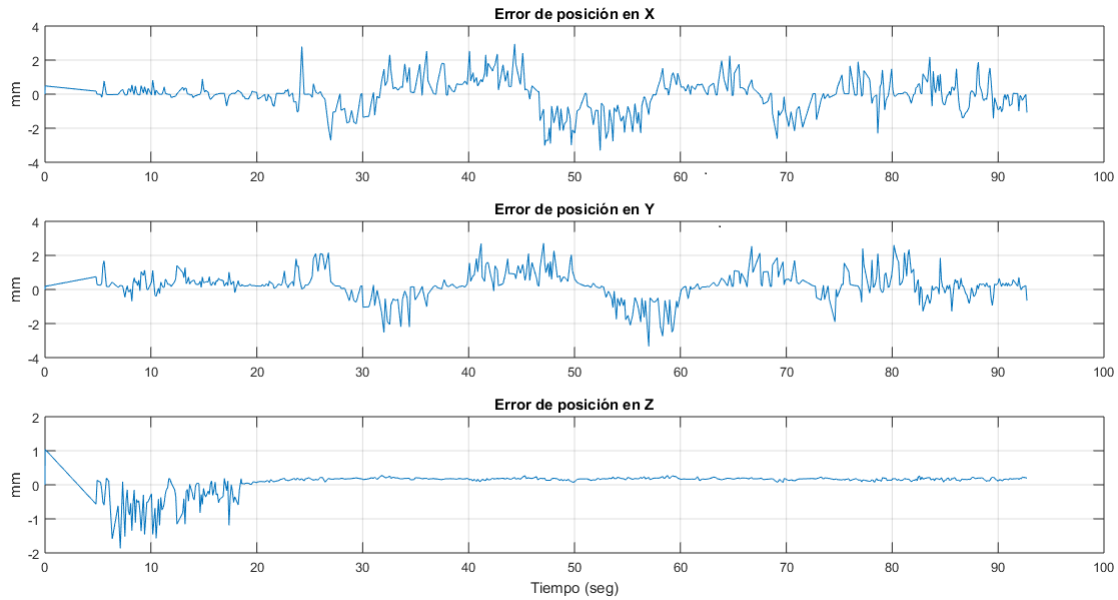


Figura 6.4: Error de seguimiento.

Los errores de seguimiento en la Figura 6.4 se encuentran dentro de una banda de  $\pm 4mm$  la cual es aceptable para una tarea teleoperada con robots industriales, comparando los resultados obtenidos en la tesis [30], donde se sigue la trayectoria solo sobre un eje como se muestra en la Figura 6.5.

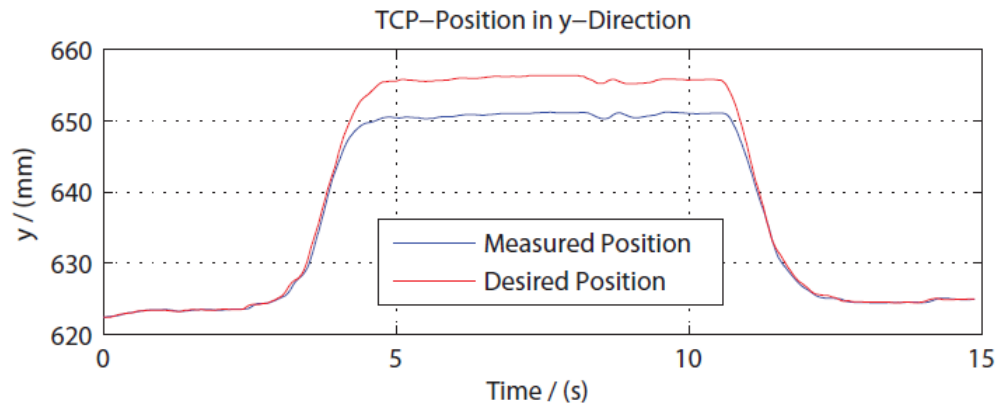


Figura 6.5: Resultados de seguimiento sobre le eje "y"

Se desea que durante la trayectoria generada por el operador se mantenga una fuerza constante de  $10N$ . En la Figura 6.6 se observa la fuerza medida por el sensor y el error a la fuerza deseada.

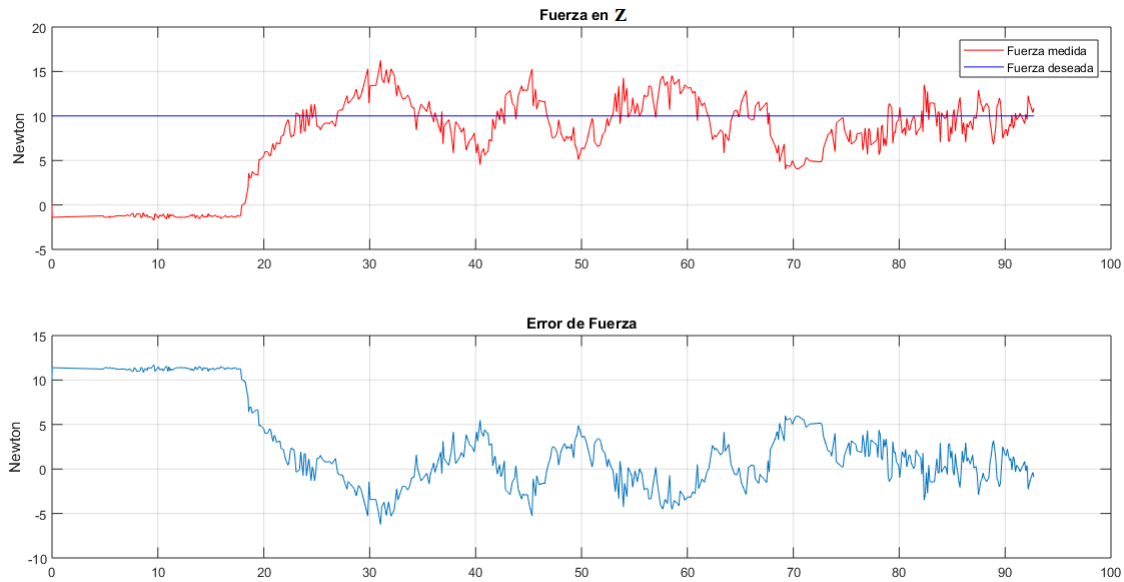


Figura 6.6: Regulación y error de fuerza deseada.

Al inicio del experimento la fuerza medida sobre  $Z$  es diferente a cero, ya que no se realizó ningún control para compensar el efecto de la gravedad.

### Teleoperación con control de fuerza variable. Experimento 2

De igual manera, esta tarea inicia en una posición inicial de trabajo. El operador teleopera el robot esclavo en movimiento libre hasta estar en contacto con la superficie. Cuando conmuta a movimiento restringido, empieza el seguimiento de fuerza, la cual regula el operador a través del robot maestro acorde a la ecuación (4.5). En el mismo instante que el operador regula una fuerza deseada también genera una trayectoria sobre los ejes coordenados  $x$  y  $y$ .

En la Figura 6.7 se observa la trayectoria generada por ambos robots.

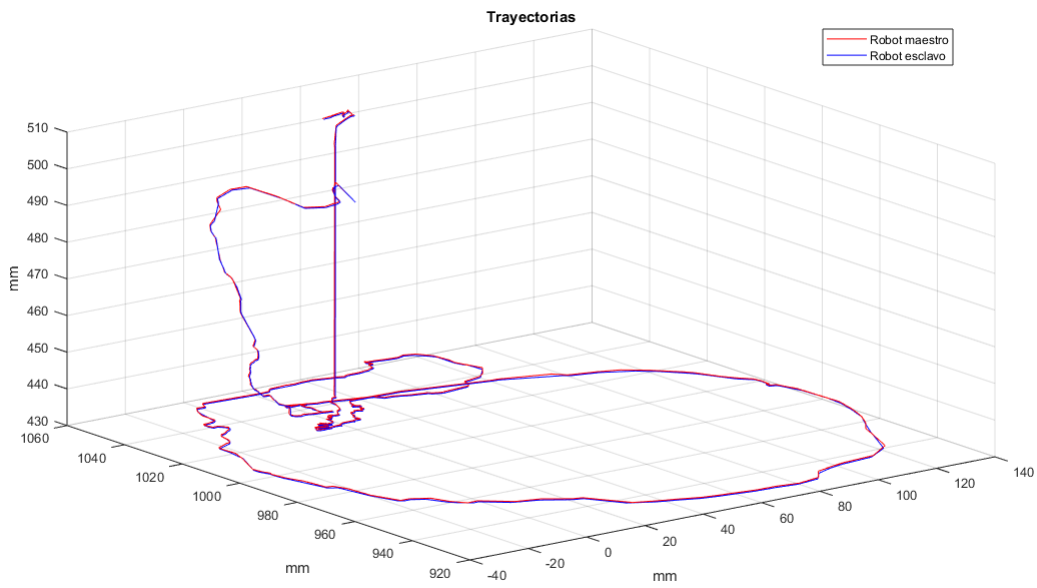


Figura 6.7: Trayectorias del robot maestro y el esclavo.

En la Figura 6.8 se observa el seguimiento del robot esclavo en cada uno de los ejes coordenados, y en la Figura 6.9 se presenta el error de seguimiento durante la tarea de teleoperación.

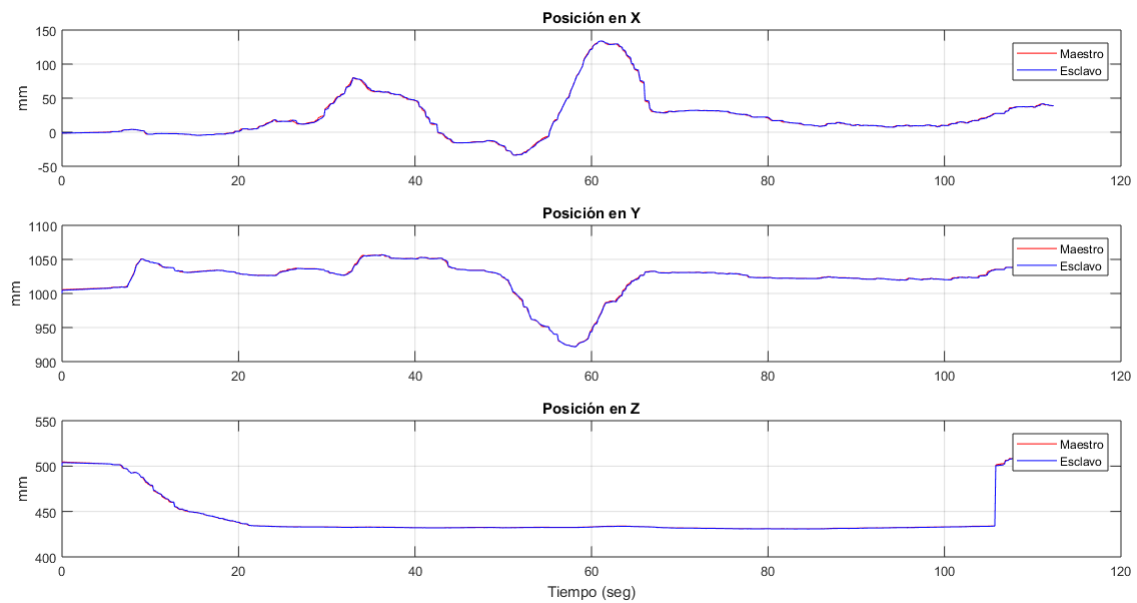


Figura 6.8: Seguimiento sobre los ejes coordenados.



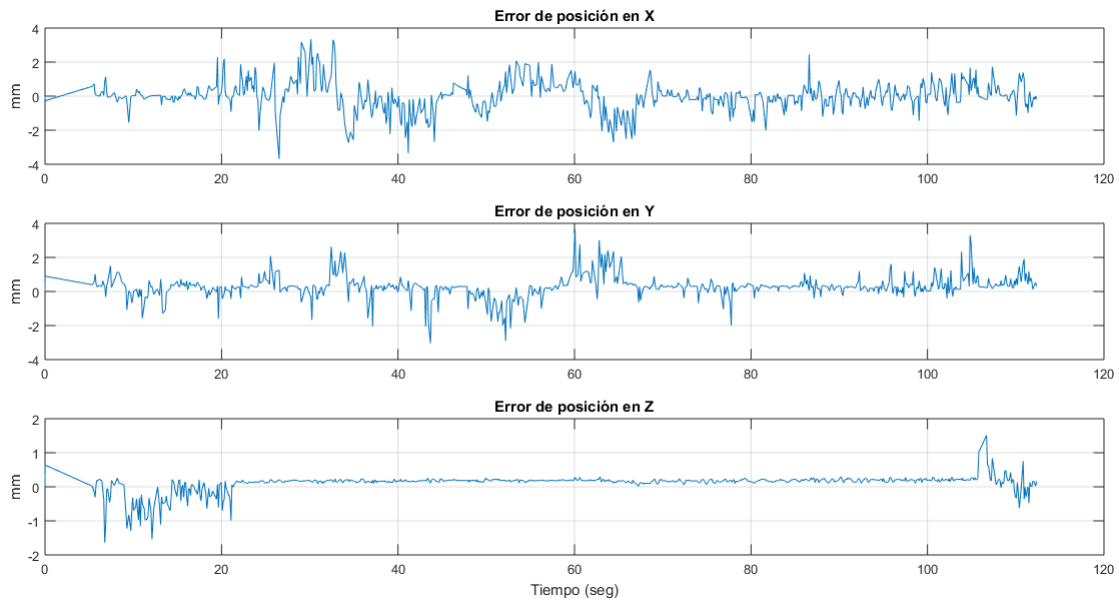


Figura 6.9: Error de seguimiento.

Se desea que durante la trayectoria generada por el operador también regule la fuerza, logrando un seguimiento de fuerza y posición. En la Figura 6.10 se observa la fuerza medida por el sensor y el error a la fuerza deseada.

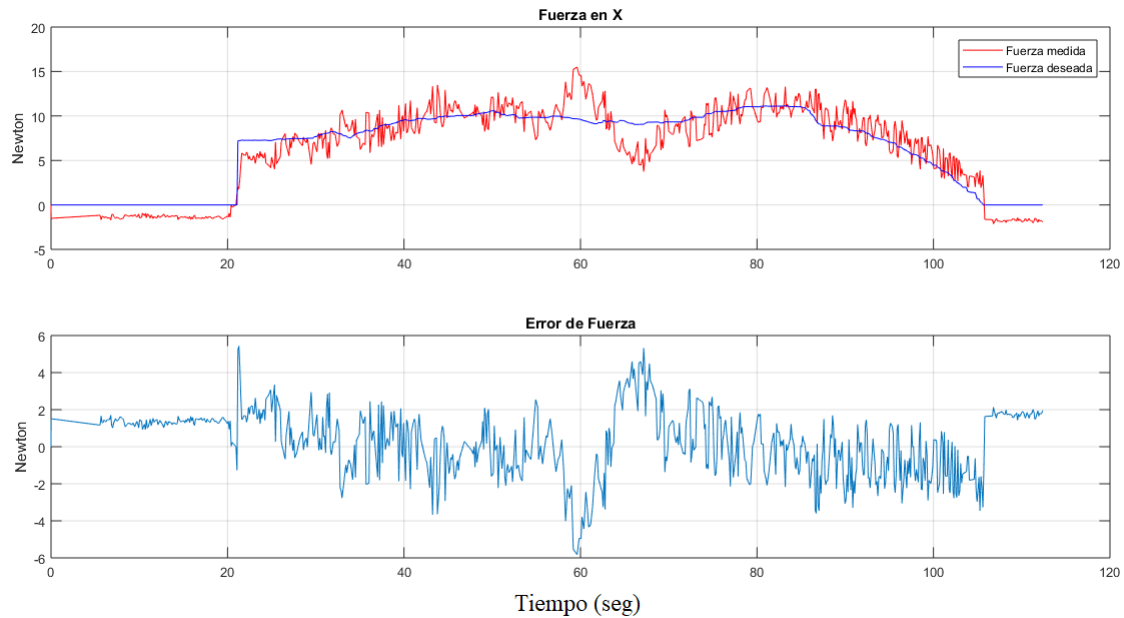


Figura 6.10: Seguimiento y error de fuerza deseada.

## 6.2. Telemanipulación con retroalimentación háptica

En los siguientes experimentos el operador realiza la manipulación de 2 diferentes objetos de rigidez desconocida y masa desconocida. Mediante la retroalimentación háptica el operador es capaz de percibir la fuerza medida por el sensor y con el uso de cuaterniones permite orientar el robot esclavo para facilitar la manipulación. Y con el cambio de marcos de referencia le permite al operador percibir de manera natural la dirección real de la fuerza medida por el robot esclavo.

Para estos experimentos se utilizaron escalas diferentes, las cuales se muestran en la Tabla 6.2.

	Experimento 3. Factor escalar	Experimento 4. Factor escalar
Eje $x$	1	3
Eje $y$	1	3
Eje $z$	1	1
Fuerza	0.30	0.15

Tabla 6.2: Factores de escalamiento

### Telemanipulación de un objeto esférico. Experimento 3

En este experimento el operador trata de hacer girar un balón de *volley – ball* (ver Figura 6.11). El operador teleopera el robot esclavo en movimiento libre, cuando se en-

cuenta en contacto con el balón la fuerza medida por el sensor se retroalimenta al operador para que este logre realizar una manipulación de manera natural. En la Figura 6.12 se puede observar el seguimiento del robot esclavo y en la Figura 6.13 se observa que el error de seguimiento se encuentra en una banda de  $\pm 1mm$ .

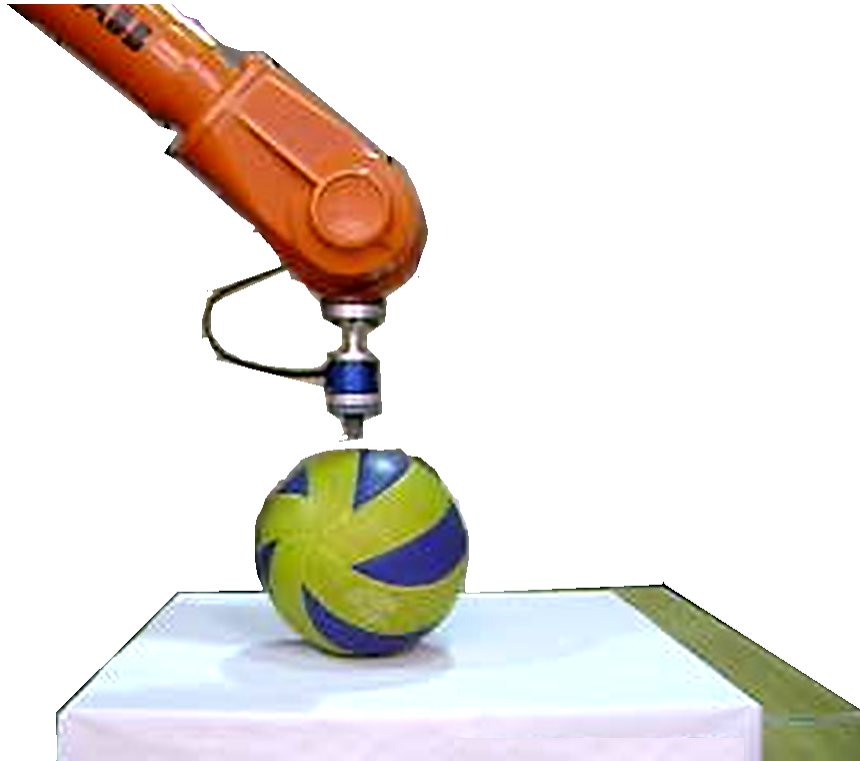


Figura 6.11: Posición inicial para la tarea de telemanipulación.

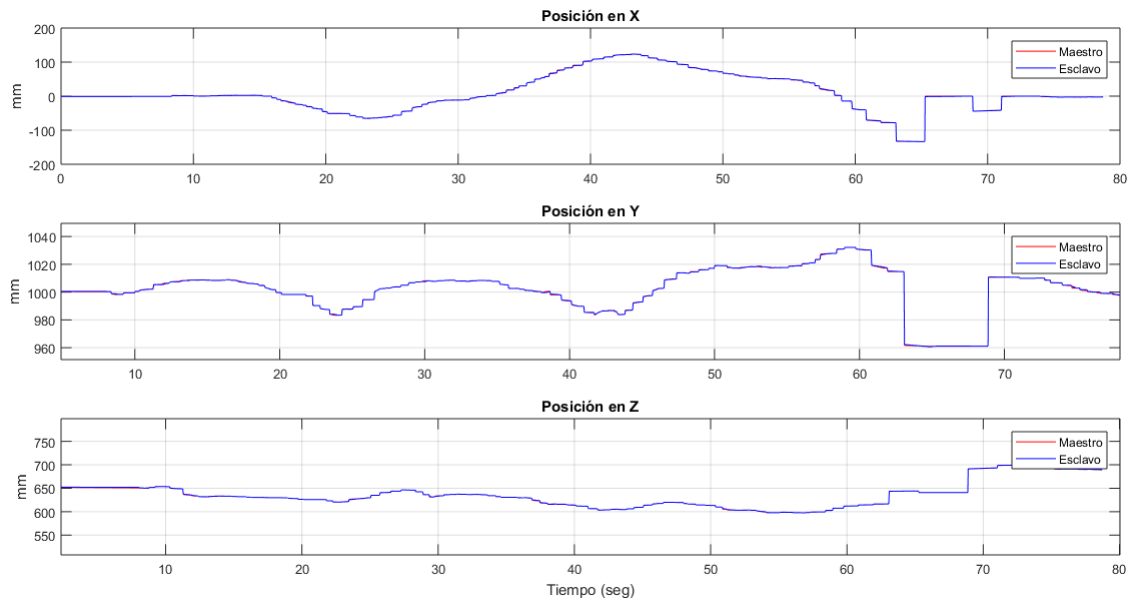


Figura 6.12: Seguimiento del robot esclavo.

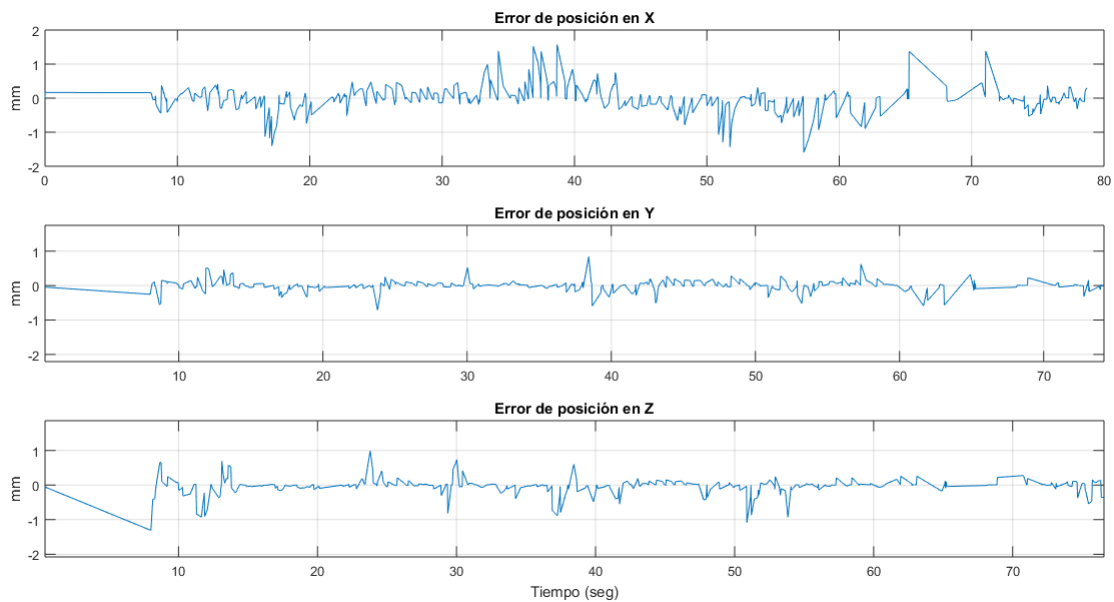


Figura 6.13: Error de seguimiento.

También se realiza el seguimiento de la orientación comandada por el operador a través del robot maestro. En la Figura 6.14 se observa el seguimiento de la orientación

y en la Figura 6.15 se puede observar el error, esto mediante el uso del cuaternión calculado con la ecuación (4.28).

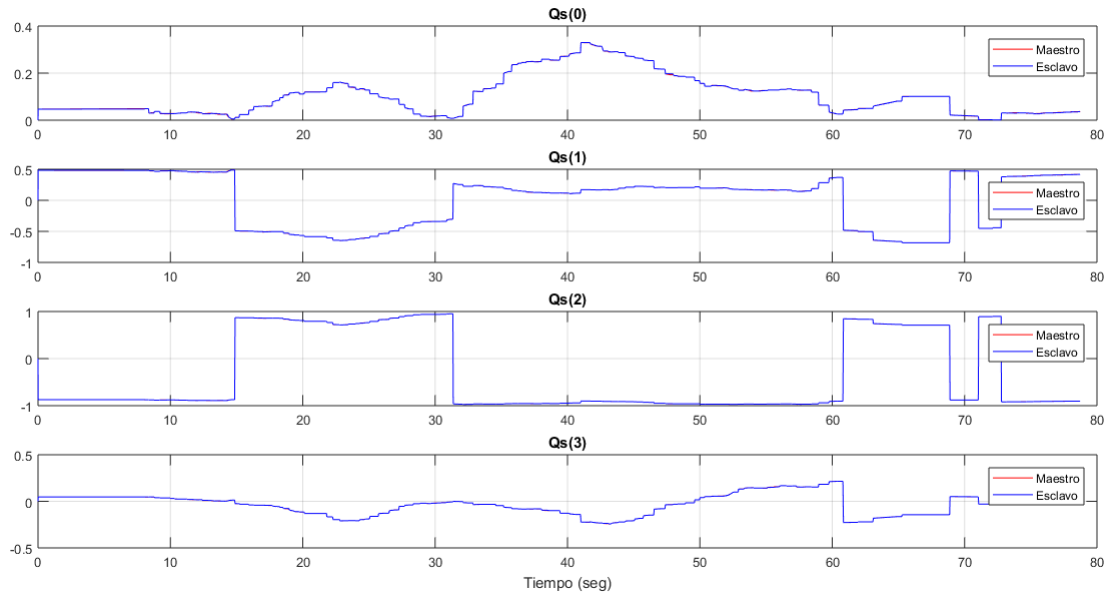


Figura 6.14: Seguimiento de la orientación.

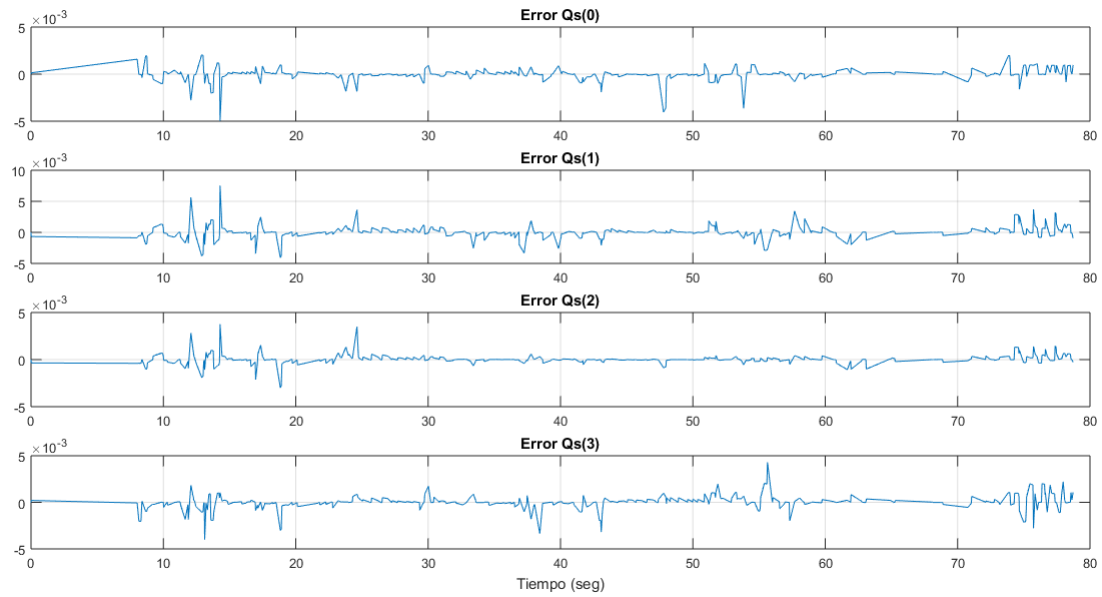


Figura 6.15: Error de seguimiento de orientación.

Al estar en contacto el robot esclavo con el balón el sensor medirá las fuerzas en los tres ejes ( $x$ ,  $y$  y  $z$ ) y la retroalimentará al operador. En la Figura 6.16 se observan las fuerzas generadas por el robot esclavo al estar en contacto con el balón y en la Figura 6.17 se observan las fuerzas generadas en la interfaz.

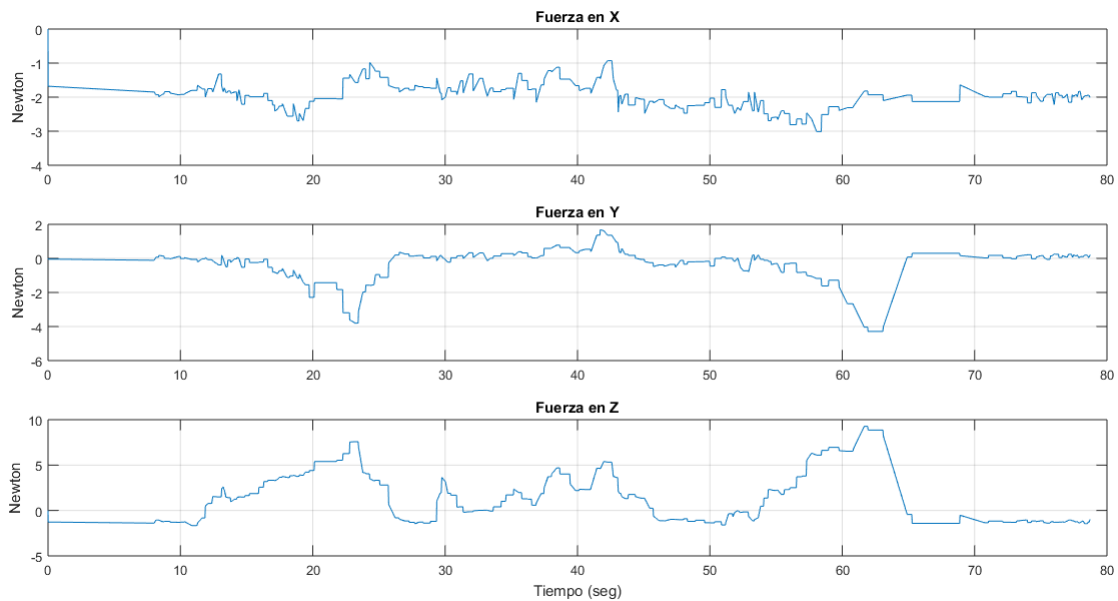


Figura 6.16: Fuerzas generadas en el robot esclavo.

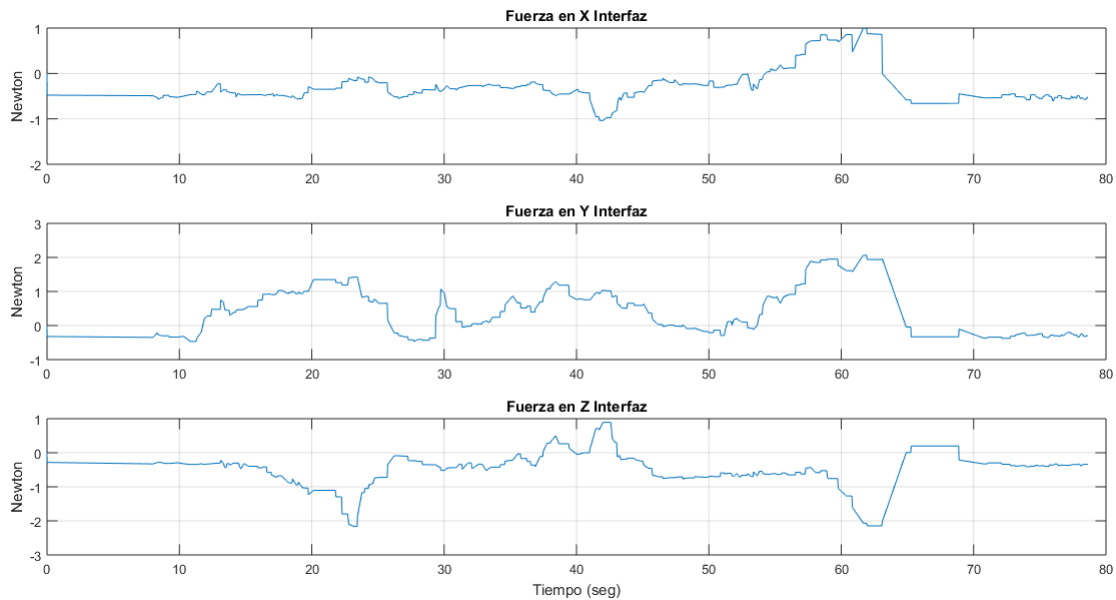


Figura 6.17: Fuerzas generadas en la interfaz háptica.

Se puede observar en ambas figuras (6.16 y 6.17) que las fuerzas generadas sobre el eje  $x$  son coincidentes, sin embargo las fuerzas sobre el eje  $y$  y  $z$  están intercambiadas esto debido al cambio de marcos de referencia que se realizó.

#### Telemanipulación de un objeto rectangular. Experimento 4

En este experimento el operador trata de desplazar una caja (ver Figura 6.18), simulando un material peligroso, sobre la superficie de la mesa hasta llegar a un tope, que significaría que ya llegó a su posición de resguardo. Cuando la caja llegue al tope el operador percibirá un aumento en la fuerza de retroalimentación. El operador teleopera el robot esclavo en movimiento libre, cuando se encuentra en contacto con la caja la fuerza medida por el sensor se retroalimenta al operador, para que este logre realizar una manipulación de manera natural mientras orienta el robot esclavo de manera que permita empujar la caja linealmente.

En la Figura 6.19 se puede observar el seguimiento del robot esclavo y en la Figura 6.20 se observa que el error de seguimiento se encuentra en una banda de  $\pm 1mm$ .



Figura 6.18: Posición inicial para la tarea de telem manipulación.

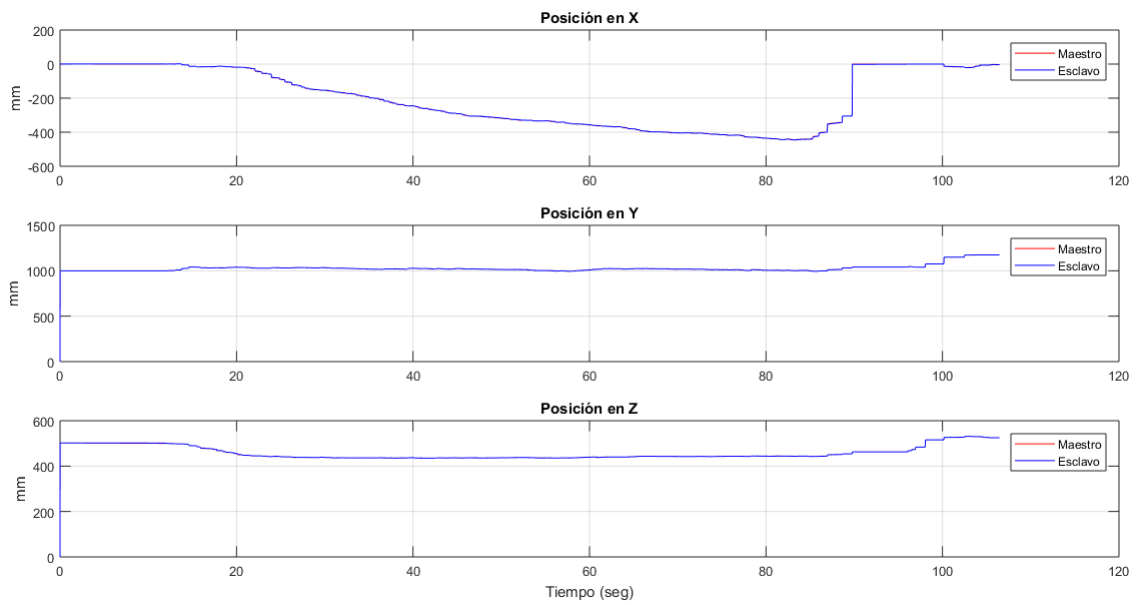


Figura 6.19: Seguimiento del robot esclavo.



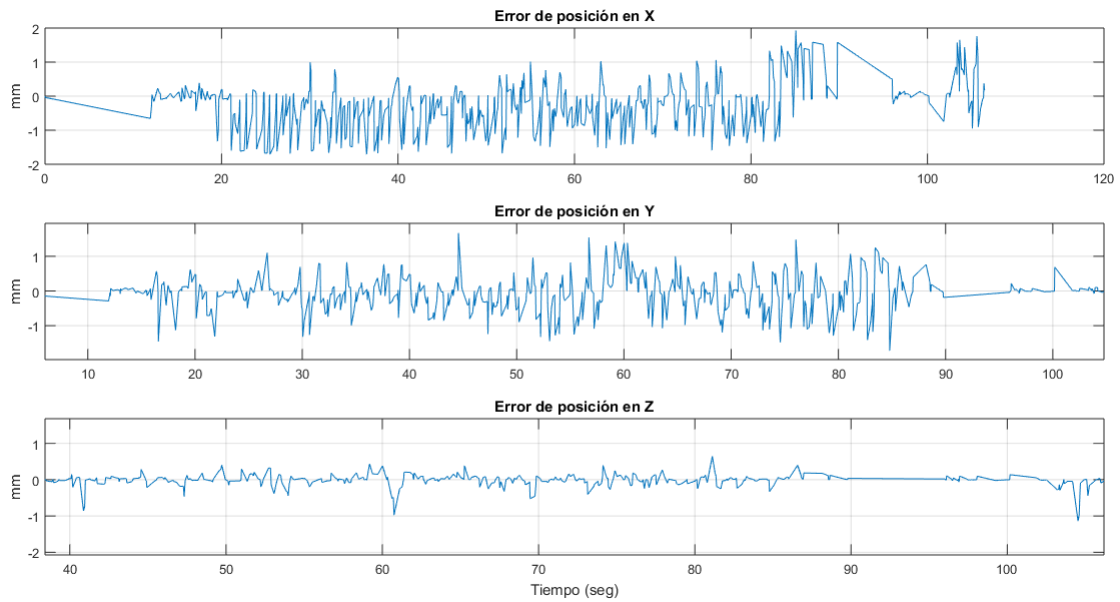


Figura 6.20: Error de seguimiento.

También se realiza el seguimiento de la orientación comandada por el operador a través del robot maestro. En la Figura 6.21 se observa el seguimiento de la orientación y en la Figura 6.22 se puede observar el error.

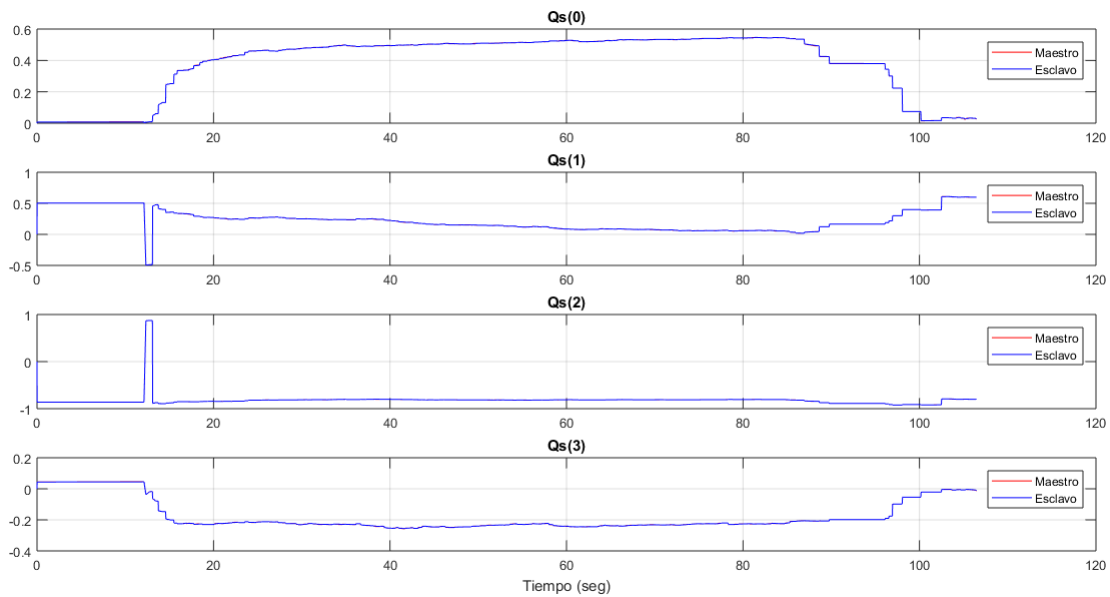


Figura 6.21: Seguimiento de la orientación.

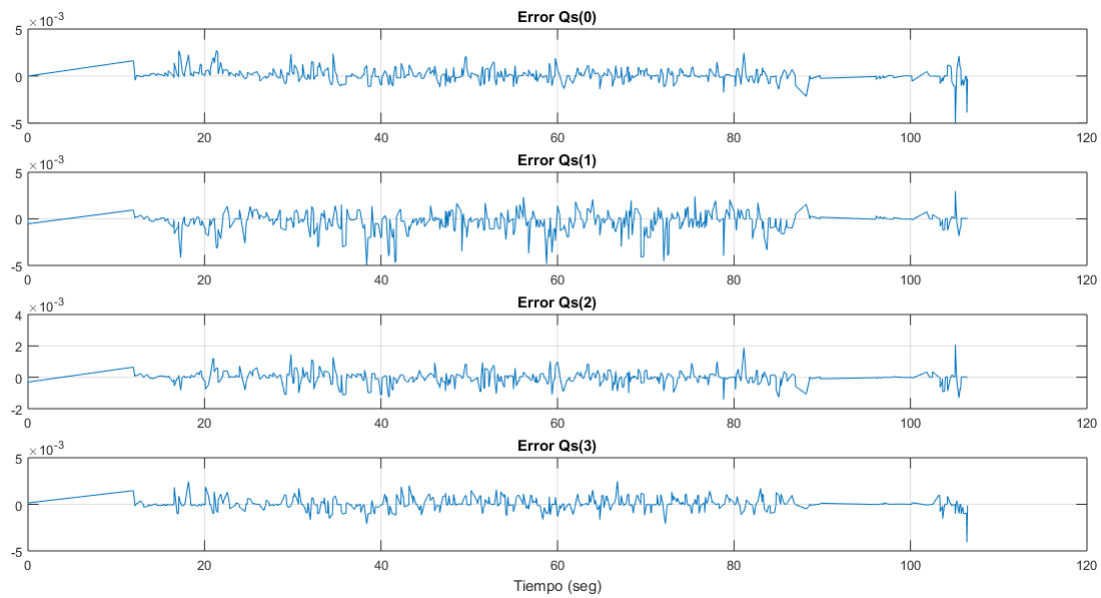


Figura 6.22: Error de seguimiento de orientación.

Al estar en contacto el robot esclavo con la caja el sensor medirá las fuerzas en los tres ejes ( $x$ ,  $y$  y  $z$ ) de acuerdo a la orientación que le comande el operador y la retroalimentará. En la Figura 6.23 se observan las fuerzas generadas por el robot esclavo al estar en contacto con la caja y en la Figura 6.24 se observan las fuerzas generadas en la interfaz.

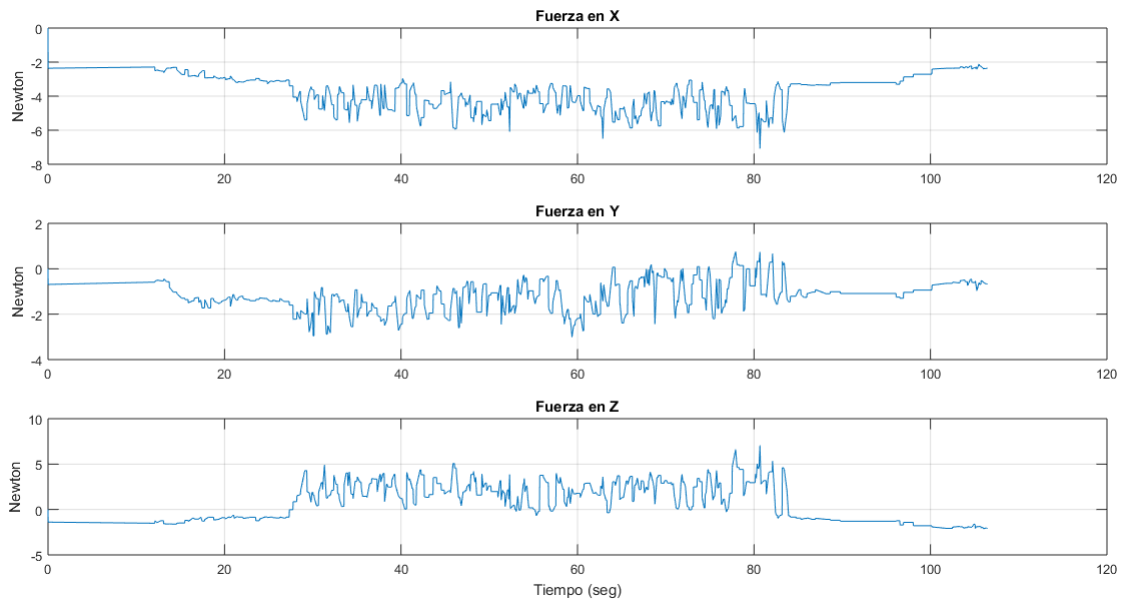


Figura 6.23: Fuerzas generadas en el robot esclavo.

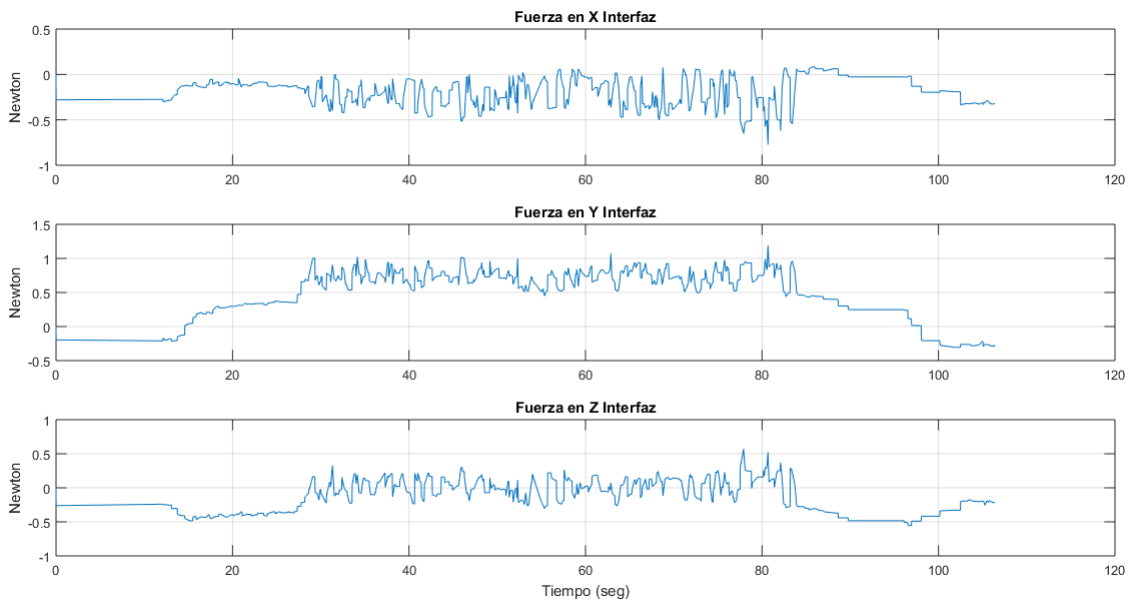


Figura 6.24: Fuerzas generadas en la interfaz háptica.

Al haber concluido los experimentos se logró observar que el controlador de posición del robot esclavo funciona correctamente permitiendo un buen seguimiento del robot maestro. El control de fuerza implementado resulto con mejor desempeño al momento

de seguir la fuerza comandada por el operador, aunque a mitad del experimento 2 en la Fig. 6.10 se observa un pico de error de fuerza, esto puede ser debido a las imperfecciones de la superficie de trabajo, el sensor al ser muy sensible detecta estas imperfecciones y la fuerza varía. Al existir un retraso en la comunicación (aproximadamente entre 300 y 500 milisegundos) el error de fuerza tarda en converger a una vecindad cercana a cero.

---

## 7. Conclusiones y trabajo futuro

### 7.1. Conclusiones

Con el trabajo realizado de la integración de sistemas ajenos al robot esclavo se logro realizar un tarea de telemanipulación entre 2 instituciones de investigación distanciadas, aproximadamente por 25 km. La metodología empleada para el seguimiento del robot esclavo tuvo un buen desempeño y una buena respuesta aun siendo un sistema de robots no-similares. Con el uso de cambios de base y cuaterniones fue posible hacer uso de los 6 ejes del robot esclavo, evitando convertirlo en un robot redundante, logrando un buen desempeño al momento de realizar tareas en diferentes orientaciones y posiciones. El desempeño de la teleoperación puede ser afectada por la calidad de la comunicación, esto se aprecia en la variación del retraso en el canal de comunicación que oscilaba entre 300 y 500 milisegundos, debido a esto la regulación y seguimiento de la fuerza, en el experimento 1 y 2, dificulta que el error converja a 0.

Independientemente del retraso que afecta el control de fuerza, fue posible establecer un canal de comunicación para realizar teleoperación. Se logró telemanipular el robot industrial de manera natural, mediante la retroalimentación háptica, permitiendo la manipulación de objetos diferentes de características desconocidas para el operador. Con el trabajo realizado se dejan bases para el desarrollo de nuevos sistemas aplicables en robots industriales.

### 7.2. Trabajo futuro

Los trabajos a futuro propuestos se describen en los siguientes puntos:

- 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, que le permita al usuario una mayor visualización del ambiente y del espacio de trabajo.
- Diseñar un efector final acorde a la tarea que se pretenda realizar.
- Realizar tareas de telemanipulación con robots de arquitectura abierta para implementar sistemas de control con retardo.

## Referencias

- [1] Industria 4.0, la cuarta revolución industrial y la inteligencia operacional. Disponible [https : //www.cic.es/industria – 40 – revolucion – industrial/](https://www.cic.es/industria-40-revolucion-industrial/). Accedido 20/11/2019.
- [2] Siciliano B.,Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Würzburg, Springer, 2008.
- [3] Y. Yokokohji, T. Yoshikawa. (1990). Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling, *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS '90*
- [4] J. De Gea, F. Kirchner. (2008). *Modelling and Simulation of Robot Arm Interaction Forces Using Impedance Control*, The International Federation of Automatic Control 2008, Seoul, Korea.
- [5] A. J. López Valle, "Planeación óptima de trayectorias en robots industriales" Tesis de maestría, Dic. 2017.
- [6] J. A. López Silvano, "Diseño e implementación de sistema cooperativo de robots industriales para tareas de manipulación" Tesis de Maestría, Oct. 2018.
- [7] N. V. García Hernández, "Teleoperación Háptica para Navegación y Guiado de Robots" Tesis de Maestría, Nov. 2006.
- [8] H. Y. Hernández Acosta, "Sistema de teleoperación bilateral de fuerza/posición Maestro-Esclavo no similar en tiempo real" Tesis de Maestría, Agos. 2009.
- [9] D. Librado Martinez, "Teleoperación unilateral de robots manipuladores utilizando técnicas de control GPI" Tesis de Maestría, Agos. 2009.
- [10] I. Jerónimo Rodriguez, "Diseño y Control de un sistema de teleoperación maestro-esclavo transparente" Tesis de Maestría, Agos. 2009.
- [11] Raibert, M. H., and Craig, J. J. (June 1, 1981). "Hybrid Position/Force Control of Manipulators." *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control.* June 1981; 103(2): 126–133. Disponible: <https://doi.org/10.1115/1.3139652>. Accedido 10/09/2019.
- [12] Integrated Force Control. Disponible: <https://new.abb.com/products/robotics/es/equipamiento-accesorios-aplicaciones/integrated-force-control>. Accedido 10/09/2019.
- [13] Paquete de función para las soluciones de control de fuerza. Disponible: <https://new.abb.com/products/robotics/es/equipamiento-accesorios-aplicaciones/flexfinishing/paquete-de-funci%C3%B3n-para-soluciones-de-control-de-fuerza>. Accedido 10/09/2019.

- 
- [14] Principales empresas dedicadas a la fabricación de robots. Disponible: <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/los-5-mejores-fabricantes-robots-industriales/>. Accedido 11/09/2019.
- [15] R. de J. Portillo Vélez, C. A. Cruz Villar, A. Rodríguez Ángeles, M. A. Arteaga Pérez. *Master/slave robotic system for teaching motion-force manufacturing tasks.*, International Conference on Mechatronics and Computational Mechanics 2012, Dubai, UAE.
- [16] F. Geffard, C. Andriot, A. Micaelli, G. Morel. *On the Use of a Base Force/Torque Sensor in Teleoperation*, International Conference on Robotics & Automation 2000, San Francisco, CA.
- [17] D. A. Lawrence (1993). *Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation*. IEEE Trans. on Rob. and Aut. Vol.9 No.5.
- [18] Haptic Devices. Disponible [http : //www.chai3d.org/download/doc/html/chapter6-haptic-devices.html](http://www.chai3d.org/download/doc/html/chapter6-haptic-devices.html). Accedido 11/09/2019.
- [19] Sistemas de Realidad Virtual. Disponible:[http : //cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro39/19\\_interfases\\_hapticas.html](http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro39/19_interfases_hapticas.html). Accedido 11/09/2019.
- [20] Soluciones hápticas para el modelado industrial. Disponible :[https : //www.neoteo.com/19383-soluciones-hapticas-para-el-modelado/](https://www.neoteo.com/19383-soluciones-hapticas-para-el-modelado/). Accedido 11/09/2109.
- [21] Dispositivo háptico touch. Disponible: [https : //es.3dsystems.com/haptics-devices/touch](https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch). Accedido 11/09/2019.
- [22] ABB, Especificaciones del producto: IRB 2400/10, IRB 2400/16, 3HAC042195-005.
- [23] ABB, Especificaciones del producto: Controller IRC5 with FlexPendant RobotWare 5.15, 3HAC041344-005.
- [24] L. Parziale, D. T. Britt, C. Davis, J. Forrester, W. Liu, C. Matthews, N. Rosselot, *TCP/IP Tutorial and Technical Overview*, ibm.com/redbooks. Disponible: [https : //www.redbooks.ibm.com/pubs/pdfs/redbooks/gg243376.pdf](https://www.redbooks.ibm.com/pubs/pdfs/redbooks/gg243376.pdf). Accedido 29/08/2019.
- [25] P. P. Ray (current version 2017). Internet of Robotic Things: Concept Technologies, and Challenges, *Open Acces Journal IEEE Access*.
- [26] IEEE Society of Robotics and Automation's Technical Committee on Networked Robots. [Online]. Disponible: [https : //www-users.cs.umn.edu/isler/tc/](https://www-users.cs.umn.edu/isler/tc/). Accedido 30/08/2019.

- [27] G. Thomas, *Introduction to the internet protocol- How does IP impact control networks*. The Extension A technical Supplement to control network. Volumen 1 . Issue 4. Winter 1999.
- [28] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G.. *Robotics Modelling, Planning and Control*. London, Springer, 2009.
- [29] Craig J. J., *Robótica*. México, Pearson Educación, 3a Ed., 2009.
- [30] Fredrik Eriksson and Marcus Welander, "Haptic Interface for a Contact Force Controlled Robot" Master Thesis, May. 2009.



## Apéndice A

### Especificaciones del sensor JR3

The axes on standard **JR3** sensors are oriented with the X and Y axes in the plane of the sensor body, and the Z axis perpendicular to the X and Y axes. The reference point for all loading data is the geometric center of the sensor. When viewed from the Robot Side of the sensor the forces and moments are related by the Right Hand Rule.

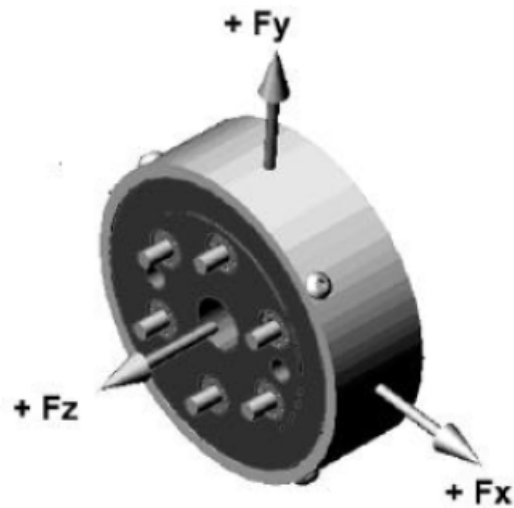


Fig. 1-1  
SENSOR AXIS ORIENTATION FROM ROBOT SIDE

**Table 1: Summary of JR3 DSP Data locations**

	0x00	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07
0x00	ch0time	ch0data			ch1time	ch1data		
0x08	ch2time	ch2data			ch3time	ch3data		
0x38	chEtime	chEdata			chFtime	chFdata		
0x40	'C'	'o'	'p'	'y'	'r'	'i'	'g'	'h'
0x48	't'	' '	'J'	'R'	'3'	'.'	' '	'l'
0x50	'n'	'c'	' '	'l'	'9'	'9'	'4'	0
0x58								
0x60	shunt fx	shunt fy	shunt fz	shunt mx	shunt my	shunt mz		
0x68	def fs fx	def fs fy	def fs fz	def fs mx	def fs my	def fs mz		load env #
0x70	min fs fx	min fs fy	min fs fz	min fs mx	min fs my	min fs mz		xForm #
0x78	max fs fx	max fs fy	max fs fz	max fs mx	max fs my	max fs mz		peak addr
0x80	fs fx	fs fy	fs fz	fs mx	fs my	fs mz	fs v1	fs v2
0x88	ofs fx	ofs fy	ofs fz	ofs mx	ofs my	ofs mz	ofs #	vect axes
0x90	f0 fx	f0 fy	f0 fz	f0 mx	f0 my	f0 mz	f0 v1	f0 v2
0x98	f1 fx	f1 fy	f1 fz	f1 mx	f1 my	f1 mz	f1 v1	f1 v2
0xa0	f2 fx	f2 fy	f2 fz	f2 mx	f2 my	f2 mz	f2 v1	f2 v2
0xa8	f3 fx	f3 fy	f3 fz	f3 mx	f3 my	f3 mz	f3 v1	f3 v2
0xb0	f4 fx	f4 fy	f4 fz	f4 mx	f4 my	f4 mz	f4 v1	f4 v2
0xb8	f5 fx	f5 fy	f5 fz	f5 mx	f5 my	f5 mz	f5 v1	f5 v2
0xc0	f6 fx	f6 fy	f6 fz	f6 mx	f6 my	f6 mz	f6 v1	f6 v2
0xc8	rate fx	rate fy	rate fz	rate mx	rate my	rate mz	rate v1	rate v2
0xd0	min fx	min fy	min fz	min mx	min my	min mz	min v1	min v2
0xd8	max fx	max fy	max fz	max mx	max my	max mz	max v1	max v2
0xe0	near sat	sat	rate addr	rate div	rate count	comm 2	comm 1	comm 0
0xe8	count 1	count 2	count 3	count 4	count 5	count 6	errors	count x
0xf0	warning	error	threshold	crc	rom ver #	ver no	ver day	ver year
0xf8	serial	model	cal day	cal year	units	bits	chans	thickness

0x100-0x1ff - Load envelope table (threshold monitoring), 16 entries

0x200-0x2ff - Transform table (translations and rotations), 16 entries

Description of table entries, see text for full description and missing entries:

ch0time, ch0data	time last data for channel 0 was received, last data received for raw channel 0
shunt fx,...	shunt reading for fx channel
def fs fx,...	sensor default full scale
min fs fx,...	min full scale, at which the data will not have the lsb zero filled
max fs fx,...	max full scale, at which the data will not have the lsb truncated
fs fx,...	full scale value for fx, when fx = 16384 this is the equivalent engineering units
load env #	number of currently active load envelope
xForm #	number of the transform currently in use
peak addr	addr of the data used in finding the maxima and minima
ofs fx,...	current offset value for fx
ofs #	number of the offset currently in use
vect axes	bit map for the axes which are being used for calculating the vectors
f0 fx, f0 fy,...	decoupled, unfiltered data
f1 fx,...	fx from filter 1
rate fx,...	rate calculation for fx
min fx, ..., max fx,...	minimum peak (valley) value for fx, maximum peak value for fx
near sat, sat	raw value which sets near sat bit in warning word, and sat bit in the error word
rate addr	address of data used for calculating the rate data
rate div	rate divisor, the number of samples between rate calculations
rate count	this counter counts up to rate div, and then the rates are calculated
comm2,...	command word 2, 1 and 0. Area used to send commands to JR3 DSP
count1,...	counter for filter #1, 1 count = 1 filter iteration
errors	a count of data reception errors
warning, error, threshold	warning word, error word, threshold monitoring word (load envelopes)
rom ver no	version no. of data stored in sensor EEPROM
ver no, ver day	software version # that the JR3 DSP is running, JR3 DSP software release date
serial, model	sensor serial number, and sensor model number
cal day	last calibration date of the sensor
units	engineering units of full scale, 0 is lbs, in-lbs and in*1000, 1 is Newtons, ...
bits	number of bits in sensor ADC
chans	bit map of channels the sensor is capable of sending
thickness	the thickness of the sensor

## Apéndice B

### Configuración de IP en el controlador IRC5

Para poder configurar la IP en el controlador se revisaron los siguientes manuales

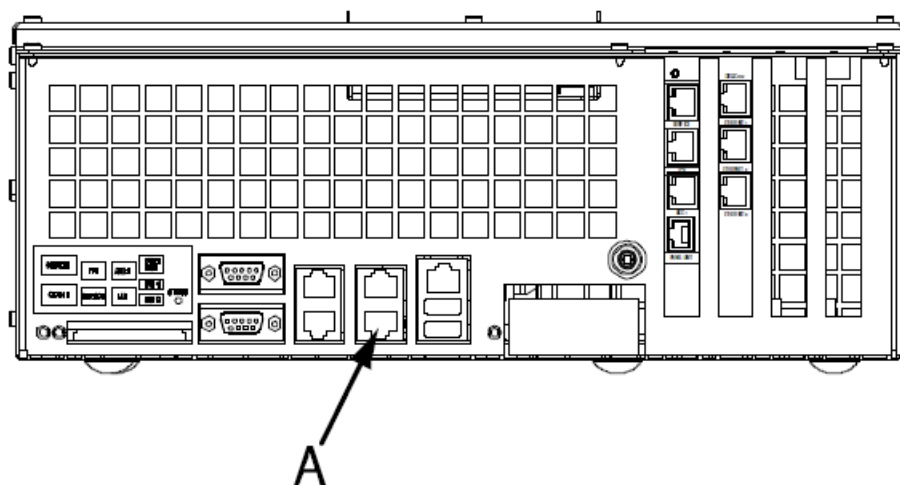
- EtherNet/IP Master/Slave - Application manual ABB Robotics
- Robot communication and I/O control - Application manual ABB Robotics
- IRC5 con FlexPendant M2004, Manual del operador

El Ethernet/IP es un enlace de comunicación para conectar dispositivos industriales e integrarlos mediante protocolos de comunicación. Una de las aplicaciones del Ethernet/IP son:

- Intercambio de datos *peer – to – peer* (punto a punto) donde un producto Ethernet/IP puede producir y consumir mensajes
- Operación maestro/esclavo definido como un subconjunto apropiado de punto a punto.
- Un producto Ethernet/IP puede funcionar como cliente o servidor, o ambos.

La red Ethernet/IP es conectada a la conexión de Ethernet de la computadora principal. En la figura siguiente se muestra donde se conecta el cable Ethernet en el puerto LAN en el modulo de la computadora.

Donde *A* es el puerto LAN. Las especificaciones se muestran en la siguiente tabla

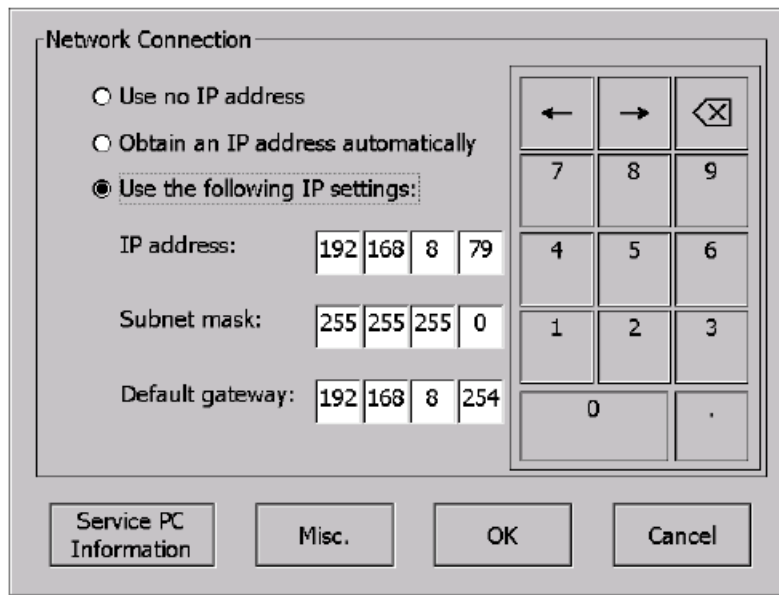


Item	Specification
Fieldbus type	EtherNet/IP
Specification revision	EtherNet/IP Specification Edition 1.2
Data rate	10/100 Mbit
Connection type	Cyclic
Connection size	Maximum 128 input bytes and 128 output bytes
Transport Class	Class 1 I/O implicit

Para poder hacer uso del puerto LAN se usa el *PC Interface*, la cual se usa para la comunicación del controlador y una PC. El *PC Interface* es requerida para algunos productos de ABB, tal como WebWare y algunas funciones en RobotStudio, permitiendo enviar datos hacia la PC.

Finalmente se configura la conexión de red, la cual se configura en una primera vez para que el controlador IRC5 se conecte a una red. Al configurar la IP es posible establecer un canal de comunicación. En la siguiente figura se muestra la ventana de diálogo *Network Connection*

Para configurar la IP deseada se siguen los siguientes pasos



- Abrir Boot Application, realizando un arranque X-Start.
- En Boot Application, seleccione *Settings*, aparecerá la ventana de diálogo *Network Connection*

- Si se desea obtener una dirección IP automáticamente, seleccione *Obtain on IP address automatically*. De lo contrario realice los pasos siguientes.
- Para utilizar una dirección IP fija, seleccione *Use the following IP address*. Introduzca la dirección IP, la máscara de subred y la pasarela predeterminada.
- Seleccione *OK* para guardar el nuevo valor.
- En *Boot Application*, seleccione *Restart Controller* para reiniciar el controlador y utilizar la nueva configuración.

De esta manera es posible realizar la conexión del controlador hacia una computadora.