

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**TÉCNICAS DE MANIPULACIÓN  
REMOTA PARA TAREAS DE FUSIÓN  
NUCLEAR**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN AUTOMÁTICA  
Y ROBÓTICA**

**FRANCISCO SUÁREZ RUIZ**  
Ingeniero Mecatrónico

2012

**DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA, INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**

**TÉCNICAS DE MANIPULACIÓN  
REMOTA PARA TAREAS DE FUSIÓN  
NUCLEAR**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Autor:** Francisco Suárez Ruiz  
*Ingeniero Mecatrónico*

**Director:** Manuel Ferre Pérez  
*Doctor Ingeniero Industrial*

2012

# Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster tiene tres objetivos fundamentales. El primero de ellos es el diseño y evaluación de una plataforma experimental abierta de teleoperación, en la que sea posible aplicar técnicas de manipulación remota. El segundo, derivado del anterior, es que dicha plataforma sea útil para trabajos de investigación futuros realizados por los integrantes del grupo de robots y maquinas inteligentes, y por último, la posibilidad de implementar las técnicas desarrolladas durante el presente trabajo así como analizar sus ventajas y desventajas.

En primer lugar, se realiza una breve introducción seguida de una visión general de todo aquello que caracteriza los sistemas de teleoperación con un enfoque hacia los entornos nucleares. De este modo, se introducen factores a considerar, principales componentes de un sistema de control y un pequeño estado del arte mediante algunos ejemplos de desarrollos actuales, entre otros.

A continuación, se abordan diversos esquemas de control bilateral clásicos, haciendo un estudio en cuanto a su funcionamiento, un análisis de los factores que influyen en su desempeño y las condiciones que hacen posible su correcta operación, todo esto con el fin de conocer experimentalmente las ventajas y desventajas de dichos esquemas.

Además, se incorpora la parte más investigadora de este trabajo primero con el estudio de la integración de ROS en el sistema de teleoperación existente abordando la posibilidad de utilizarlo como canal de comunicaciones y después implementando funcionalidades con el fin de extender las capacidades del sistema. También se abordo el diseño e implementación de una arquitectura de control híbrida, orientada al control de manipuladores esclavos con un espacio de trabajo amplio, utilizando un dispositivo maestro de reducidas dimensiones. Por último, se intenta resumir de algún modo los resultados y conclusiones obtenidas con el fin de realizar una valoración del trabajo realizado.

# Abstract

This Master's thesis has three main goals. The first is the design and evaluation of an open teleoperation experimental platform, where it will be possible to implement remote handling techniques. The second, derived from the above, is that the platform will be useful for future research work carried out by the group of robots and intelligent machines, and finally, the possibility of implementing the techniques developed in this work and analyzing its advantages and disadvantages.

First, a brief introduction is followed by an overview of everything that characterizes teleoperation systems with a special focus on nuclear environments. Thus, factors to consider are introduced, main control system components and a brief state of the art with some examples of current developments among others.

Then, several bilateral control schemes classics are addressed, studying its operation, analyzing the factors affecting their performance and the conditions that allow their proper operation, all this, in order to experimentally know the advantages and disadvantages of such schemes.

Also the most research part of this work is included, first with the study of the integration of ROS in the existing teleoperation system, addressing the possibility of using it as a communications channel and then implementing features to extend the capabilities of the system. Also is presented the design and implementation of a hybrid control architecture, such control is oriented to slave manipulators with ample workspace, using a small-sized master device. Finally, is expected to summarize the results and conclusions obtained in order to make an assessment of the work done.

# Índice

<b>Índice</b>	<b>III</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Términos y Definiciones</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción a los Sistemas de Teleoperación . . . . .	1
1.2. Marco del Trabajo fin de Máster . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	5
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>6</b>
2.1. Telerróbótica y Teleoperación . . . . .	6
2.1.1. Componentes de un Sistema Teleoperado . . . . .	7
2.1.1.1. Entorno Local . . . . .	8
2.1.1.2. Entorno Remoto . . . . .	10
2.1.1.3. Canal de Comunicaciones . . . . .	10
2.1.2. Evolución de la Teleoperación . . . . .	11
2.1.3. Teleoperación en Entornos Nucleares . . . . .	13
2.3.1. Motivación . . . . .	14
2.3.2. Radiación . . . . .	14
2.3.3. Ultra-Vacío . . . . .	15
2.3.4. Altas Temperaturas . . . . .	16
2.3.4.1. Distribución de la Temperatura . . . . .	16
2.3.4.2. Aislamiento Térmico . . . . .	17
2.3.5. Campo Magnético . . . . .	17
2.4. Desarrollos Actuales . . . . .	18
2.4.1. Sistema de Diagnóstico . . . . .	19
2.4.2. Sonda IVVS . . . . .	19
2.4.3. Brazo Articulado de Inspección AIA . . . . .	20
2.4.4. Robot PAC . . . . .	21
2.4.5. Manipulador WHMAN . . . . .	21
2.4.6. Robots MRI . . . . .	22
<b>3. Evaluación de Diferentes Arquitecturas de Control para Teleoperación</b>	<b>24</b>

3.1.	Control Posición - Posición . . . . .	26
3.1.1.	Simulación del Sistema . . . . .	28
3.1.2.	Experimentos . . . . .	30
3.2.	Control Fuerza - Posición . . . . .	31
3.2.1.	Simulación del Sistema . . . . .	33
3.2.2.	Experimentos . . . . .	34
3.3.	Arquitectura de Cuatro Canales . . . . .	35
3.4.	Control por Convergencia de Estados . . . . .	36
<b>4.</b>	<b>Diseño y Construcción de la Plataforma Abierta de Teleoperación</b>	<b>38</b>
4.1.	Dispositivos Existentes . . . . .	38
4.1.1.	Robot Esclavo . . . . .	39
4.1.2.	Robot Maestro . . . . .	42
4.2.	Requisitos . . . . .	43
4.3.	Desarrollo Electrónico . . . . .	44
4.3.1.	Tarjeta de Acondicionamiento para el Maestro . . . . .	44
4.3.1.1.	Entrada Analógicas . . . . .	44
4.3.1.2.	Salidas Analógicas . . . . .	44
4.3.1.3.	Entrada y Salidas Digitales . . . . .	48
4.3.2.	Tarjeta de Acondicionamiento para el Esclavo . . . . .	48
4.3.2.1.	Entrada Analógicas . . . . .	49
4.3.2.2.	Salidas Analógicas . . . . .	49
4.3.2.3.	Salida Digital . . . . .	50
4.4.	Variante con Esclavo Virtual . . . . .	51
4.5.	Variante con Esclavo Real . . . . .	52
<b>5.</b>	<b>Integrando ROS a la Teleoperación: Restricciones Virtuales</b>	<b>53</b>
5.1.	Aplicación . . . . .	54
5.1.1.	Tareas de Mantenimiento en Entornos Radioactivos . . . . .	54
5.2.	Utilizando ROS para Teleoperación . . . . .	55
5.2.1.	Arquitectura de Control Utilizada . . . . .	55
5.2.2.	ROS como Canal de Comunicación . . . . .	55
5.2.3.	Efectos de los Retardos en el Desempeño del Controlador . . . . .	57
5.2.3.1.	Discusión sobre los Resultados . . . . .	58
5.2.4.4.	Utilizando ROS para Ajustar Parámetros de Control . . . . .	58
5.3.	Restricción Virtual . . . . .	60
5.3.1.	Factor de Penetración . . . . .	60
5.3.2.	Control Escalado . . . . .	60
5.4.	Montaje Experimental . . . . .	61
5.4.1.	Discusión de los Resultados . . . . .	62
<b>6.</b>	<b>RaPA: Rate-Position Arquitecture</b>	<b>64</b>
6.1.	Antecedentes . . . . .	64
6.2.	Descripción del Algoritmo . . . . .	66
6.2.1.	Estados del Algoritmo . . . . .	66
6.2.1.1.	Ir al Centro . . . . .	67
6.2.1.2.	Control en Posición . . . . .	67

6.2.1.3. Fase de Vibración . . . . .	68
6.2.1.4. Control en Velocidad . . . . .	68
6.2.1.5. Colisión en Velocidad . . . . .	69
6.2.2. Consideraciones acerca del Robot Esclavo . . . . .	70
6.3. Montaje Experimental . . . . .	70
6.3.1. Dispositivo Háptico Maestro . . . . .	71
6.3.2. Robot Esclavo . . . . .	71
6.3.3. Tarea Simulada . . . . .	71
6.3.3.1. Probeta y Contenedor . . . . .	73
6.3.3.2. Requisitos de la Tarea . . . . .	73
6.4. Resultados Obtenidos . . . . .	73
6.4.1. Evolución de los Estados del Controlador . . . . .	74
6.4.2. Experimento <i>Pick &amp; Place</i> . . . . .	75
6.4.3. Colisión en Velocidad . . . . .	76
6.5. Discusión . . . . .	77
<b>7. Conclusiones</b>	<b>78</b>
7.1. Evaluación de Diferentes Arquitecturas de Control para Teleoperación . . . . .	79
7.2. Plataforma Abierta de Teleoperación . . . . .	79
7.3. ROS y Restricciones Virtuales . . . . .	80
7.4. Arquitectura híbrida velocidad - posición . . . . .	80
7.5. Difusión del trabajo realizado . . . . .	81
<b>Bibliografía</b>	<b>83</b>

# Listado de Figuras

1.1.	<i>Canadarm</i> en la estación espacial de la NASA (Izq.); <i>Canadarm2</i> sujetando un astronauta (Der.) Fuente: <i>Canadian Space Agency</i> . . . . .	3
2.1.	Componentes de un sistema teleoperado . . . . .	8
2.2.	Raymond Goertz con los primeros sistemas de teleoperación maestro-esclavo	12
2.3.	CURV: Cable Controlled Underwater Vehicle . . . . .	13
2.4.	Sonda IVVS . . . . .	19
2.5.	Brazo Articulado de Inspección AIA . . . . .	20
2.6.	Robot PAC en una celda caliente de AREVA. . . . .	21
2.7.	Robot WHMAN de 6GDL. . . . .	22
2.8.	Robot MRI de al Universidad John Hopkins . . . . .	23
3.1.	Fotografía de la plataforma experimental . . . . .	24
3.2.	Diagrama de bloques del control implementado en cada motor . . . . .	25
3.3.	Fixed Point PID VI . . . . .	26
3.4.	NI SoftMotion Control Loop . . . . .	26
3.5.	Arquitectura de control Posición - Posición . . . . .	27
3.6.	Diagrama de bloques para los casos extremos del control Posición - Posición	27
3.7.	Respuesta del PD diseñado para control en posición de cada motor . . . . .	29
3.8.	Esquema de control Posición - Posición en Simulink . . . . .	30
3.9.	Simulación del control Posición - Posición . . . . .	30
3.10.	Resultados experimentales del control Posición - Posición . . . . .	31
3.11.	Arquitectura de control Fuerza - Posición . . . . .	32
3.12.	Diagrama de bloques para los casos extremos del control Fuerza - Posición	32
3.13.	Esquema de control Fuerza - Posición en Simulink . . . . .	33
3.14.	Simulación del control Fuerza - Posición . . . . .	34
3.15.	Resultados experimentales del control Fuerza - Posición . . . . .	34
3.16.	Arquitectura de control de 4 Canales . . . . .	35
3.17.	Resultados experimentales de la Arquitectura de Cuatro Canales . . . . .	35
3.18.	Control por Convergencia de Estados . . . . .	36
3.19.	Resultados experimentales del control por Convergencia de Estados . . . . .	37
4.1.	Esquema del telemanipulador GRIPS de Kraft Telerobotics Inc. . . . .	39
4.2.	Esclavo con sus grados de libertad. GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc. . .	40
4.3.	Espacio de trabajo del robot esclavo GRIPS . . . . .	41
4.4.	Maestro con sus grados de libertad. GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc. . .	42
4.5.	Pulsadores, leds y potenciómetros del maestro GRIPS . . . . .	43
4.6.	Diagrama de conexión de los potenciómetros del maestro . . . . .	45

4.7.	Diagrama de conexión de los motores del maestro . . . . .	45
4.8.	Esquema del acondicionamiento de señales del maestro . . . . .	48
4.9.	Tarjetas de acondicionamiento de señales del maestro . . . . .	49
4.10.	Esquema del acondicionamiento de señales del esclavo . . . . .	50
4.11.	Tarjeta de acondicionamiento de señales del esclavo . . . . .	50
4.12.	Arquitectura de la variante con esclavo virtual . . . . .	51
4.13.	Arquitectura de la variante con esclavo real . . . . .	52
5.1.	Restricción virtual y modelo simplificado del robot esclavo GRIPS. Vizualizador RViz de ROS . . . . .	53
5.2.	Nodos de ROS utilizados en la prueba de RTT . . . . .	55
5.3.	Comparación de los mensajes perdidos utilizando TCPROS y UDPROS en un <i>round trip</i> . . . . .	56
5.4.	Manipulador esclavo realizando fuerza de contacto durante una tarea . . . . .	57
5.5.	Respuesta de la articulación SE bajo el efecto de un retardo fijo de 13 ms . . . . .	58
5.6.	Uso de ROS para ajustar parámetros de control del maestro sin afectar la velocidad del lazo háptico . . . . .	59
5.7.	Representación de la restricción virtual. Las paredes cambian de color cuando el efecto final entra en contacto con alguna de ellas. El punto amarillo indica el centro de la restricción . . . . .	60
5.8.	Experimento realizado. Desenroscar un perno M10 con la pinza del robot esclavo. La cámara estereoscópica ofrece realimentación visual . . . . .	62
5.9.	Posición del efecto final proyectada en el plano X-Z durante la tarea de desenroscar el perno. El perno esta ubicado en el punto (0 , 1.37) . . . . .	63
6.1.	Definición de las zonas de control en posición y velocidad en el dispositivo maestro . . . . .	66
6.2.	Maquina de estados del algoritmo RaPA . . . . .	67
6.3.	Detalle de la zona de control en velocidad . . . . .	69
6.4.	Dispositivo háptico comercial PHANTOM OMNI . . . . .	71
6.5.	Robot virtual introduciendo la probeta en el contenedor. La esfera amarilla muestra el límite de la zona de control en posición . . . . .	72
6.6.	Probeta (izquierda) y contenedor (derecha) de la tarea simulada (proyecto IFMIF) . . . . .	73
6.7.	Fuerzas reflejadas al usuario durante los cambios de estado del controlador . . . . .	74
6.8.	Evolución de los estados del controlador y fuerzas de interacción cuando hay una colisión en velocidad . . . . .	76

# Lista de Tablas

2.1. Dosis de Radiación para ITER . . . . .	14
2.2. Posibles temperaturas durante inspección para ITER . . . . .	16
3.1. Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para $K_e = 0$ (Posición - Posición) . . . . .	28
3.2. Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para $K_e = \infty$ (Posición - Posición) . . . . .	28
3.3. Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para $K_e = \infty$ (Fuerza - Posición) . . . . .	33
4.1. Especificaciones del robot esclavo GRIPS . . . . .	40
4.2. Características de las servoválvulas del esclavo . . . . .	41
4.3. Listado de señales del robot maestro . . . . .	46
4.4. Listado de señales del robot esclavo . . . . .	47
5.1. RTT. Retrasos introducidos por ROS. . . . .	57
5.2. Tiempos de ejecución de la tarea de tres operadores expertos con y sin escalado. . . . .	63
6.1. Tiempos de ejecución de una tarea <i>Pick &amp; Place</i> . . . . .	75

# Términos y Definiciones

<b>AISI 304</b>	Acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido, sólo puede endurecerse en frío y presenta buena resistencia a la corrosión. 304L hace referencia a una variante con menor contenido de carbono para ofrecer mayor soldabilidad.
<b>Activación</b>	Proceso nuclear que consiste en hacer un átomo radioactivo mediante la absorción de un neutrón.
<b>Contaminación</b>	Proceso en el cual se deposita tritio en las porosidades superficiales de un material.
<b>Divertor</b>	Región inferior del tokamak, que en el caso de ITER esta compuesto por 56 módulos que transportan los componentes en contacto con el plasma generado durante la fusión nuclear.
<b>Campaña D-T</b>	Operación de un tokamak utilizando deuterio-tritio para la reacción de fusión nuclear. Esta reacción es mucho más rápida que la clásica deuterio-deuterio y por lo tanto más peligrosa, ya que genera neutrones de alta energía que activan el entorno. Por otro lado el tritio es contaminante.
<b>ITER</b>	El Reactor Termonuclear Experimental Internacional es el siguiente paso hacia las plantas de energía de fusión. Fue ideado en 1986, para demostrar la factibilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear. <i>Iter</i> , además significa “el camino” en latín.

<b>IVVS</b>	El sistema de visión <i>In-Vessel Viewing System</i> es utilizado para tareas de visión y metrología dentro de la cámara de vacío toroidal, donde es crítico determinar los niveles de erosión de los componentes.
<b>LHC</b>	El Gran Colisionador de Hadrones ( <i>Large Hadron Collider</i> ) es el acelerador de partículas más grande del mundo. Fue construido por la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) entre 1998 y 2008. Esta ubicado en un tunel de 27 kilómetros de circunferencia, a una profundidad de 175 metros cerca de Ginebra, en la frontera franco-suiza.
<b>MRI</b>	La obtención de Imágenes por Resonancia Magnética es un método utilizado en medicina que se basa en la resonancia de los átomos bajo la influencia de un elevado campo magnético. Las maquinas actuales utilizan imanes de 3T, pero se espera que este valor alcance los 11T, gracias a los desarrollos en la tecnología de superconductores.
<b>Ti-6-4</b>	Aleación de titanio con alta resistencia a la tensión.
<b>Tokamak</b>	Es una cámara toroidal con bobinas magnéticas cuyo objetivo es obtener la fusión de partículas de plasma. Este diseño actualmente es utilizado en las maquinas experimentales de fusión. Es considerado el primer diseño que utiliza el campo magnético para confinar el plasma.

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se da una visión general del trabajo, comentando el ámbito en el que se desarrolla, los objetivos perseguidos y el contenido detallado del mismo.

El presente Trabajo Fin de Máster ha sido realizado en el grupo de Robots y Máquinas Inteligentes (ROMIN) de la División de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISAM), en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid (UPM). En dicho grupo son varias las líneas de investigación llevadas a cabo en diversas aplicaciones de la robótica entre las que se encuentra la teleoperación, en la cual se tiene una larga trayectoria de trabajos realizados entre los cuales se pueden nombrar: utilización de robots teleoperados en el mantenimiento de líneas eléctricas, análisis sobre la reflexión de fuerza en sistemas bilaterales para teleoperación o control bilateral de robots teleoperados.

Es por ello que con la realización de este trabajo se busca dar un aporte, tanto en conocimiento como en experiencia, para ampliar las capacidades del grupo en lo que a telerrobótica y teleoperación respecta.

### 1.1. Introducción a los Sistemas de Teleoperación

La idea de manipular el ambiente que nos rodea es tan fundamental en la naturaleza que ha guiado la evolución en si misma [1] y en los tiempos actuales ha resultado en la evolución del manipulador definitivo: el humano. Nuestro apetito por la manipulación nos ha llevado a explorar los rincones más extremos del ambiente, desde las profundidades del océano hasta lugares extraterrestres. Bajo esta perspectiva, muchas de las herramientas y máquinas que nos rodean pueden ser consideradas como manipuladores. Según el *Robot Institute of America*:

*Un robot es un manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables, programados para la realización de una diversidad de tareas.*

A pesar de que esta definición fue hecha en 1979, hoy por hoy sigue siendo ampliamente aceptada [2]. En ella se consigue agrupar de groso modo, los equipos que generalmente son considerados como robots o manipuladores en la industria.

La demanda actual de manipuladores es más elevada que nunca. Esto se debe a las mayores exigencias en calidad y cantidad de producción. En el transcurso de las últimas cinco décadas los manipuladores se han convertido en una parte esencial e importante de los sistemas de automatización industrial. Sus habilidades para realizar tareas con alta velocidad, repetibilidad y a bajo costo operacional, han sido factores decisivos para su elección en muchos procesos de producción. Una lista corta de sus aplicaciones industriales incluyen soldadura, pintura, montaje, mecanizado, inspección, empaque, clasificación, etc., lo que demuestra que los manipuladores son una parte importante de todas las etapas de los procesos de producción modernos [3].

Desde el punto de vista de aplicación de los manipuladores, se pueden clasificar como: manipuladores de propósito general y de propósito especial. De propósito general o mejor conocidos como manipuladores industriales, son los brazos robóticos con seis o menos grados de libertad equipados con un sistema de control programable. La tarea del manipulador puede variar considerablemente en la medida que cambien los requisitos del producto y/o el proceso de producción. El brazo robótico y su sistema de control se selecciona para que sea hábil y flexible de acuerdo a la variedad de tareas previsibles. Las articulaciones de estos manipuladores utilizan actuadores eléctricos, hidráulicos o neumáticos, dependiendo de su tamaño, capacidad de carga, facilidad de mantenimiento y otros requisitos de rendimiento. Hoy en día muchos manipuladores industriales están disponibles con configuraciones predeterminadas y listos para su uso. Estos manipuladores están altamente estandarizados, con pocas alteraciones posibles y siempre hechas solo por los fabricantes. Algunas de las configuraciones más famosas de estos manipuladores son los de tipo: cartesiano, pórtico, SCARA cilíndrico, esférico, y antropomórfico [2].

Sin embargo, en varios casos, estos manipuladores de propósito general no son capaces de cumplir con los requisitos exigidos por las aplicaciones. Las restricciones bien pueden ser impuestas, o por la tarea misma, o por el entorno en el que la tarea debe ser ejecutada. En muchos casos las posibles configuraciones y exigencias de las tareas no puede ser completamente definidas y el manipulador deber ser diseñado para hacer frente a una variedad de situaciones imprevisibles. En ocasiones, estos manipuladores son dotados con grados adicionales de libertad (redundantes), así como también pueden estar equipados con actuadores y sensores especializados para ejecutar la tarea y/o soportar condiciones

hostiles. Las tareas de perforación subterránea [4], las centrales nucleares [5], las condiciones inhabitables del espacio [6, 7] y las zonas de alta presión en las profundidades del océano [8], son sólo algunos ejemplos de estos entornos. La presencia humana en estos entornos es indeseable y ofrecer protección ante los posibles peligros puede llegar a ser demasiado costoso. Es por esta capacidad de actuar en ambientes peligrosos y hostiles que el uso de manipuladores es ventajoso.

A modo de ejemplo, el *Canadarm*, instalado en el transbordador espacial de la NASA, ha sido capaz de reducir el número de misiones en la que es necesario enviar personal fuera de la lanzadera. Ha conseguido con éxito llevar a cabo varias operaciones de montaje en la Estación Espacial Internacional (ISS) y otros satélites de forma remota [9, 10]. Por las mismas razones, la ISS también está equipada con varios manipuladores especialmente diseñados como el *Canadarm2* y el *Japanese Experiment Module Remote Manipulator System* (JEMRMS) [11]. En 2012 el *European Robotic Arm* (ERA) ha sido añadido a la parte Rusa de la Estación Espacial Internacional [12]. Una comparación entre estos sistemas de manipulación se da en [13]. En la figura 1.1 se muestran fotografías del *Canadarm* y del *Canadarm2* durante una misión espacial.



Figura 1.1: *Canadarm* en la estación espacial de la NASA (Izq.); *Canadarm2* sujetando un astronauta (Der.) Fuente: *Canadian Space Agency*

El desarrollo de tareas en estos ambientes no sólo requiere el uso de los robots, sino también su control remoto, manipulación a distancia, su teleoperación. Teleoperación es un término asociado al conjunto de tecnologías que permiten la ampliación de la capacidad humana de detección y manipulación mediante el acoplamiento de sensores y actuadores remotos a través de canales de comunicación [14]. El operador se ubica a salvo de los peligros del entorno y puede realizar las tareas controlando el robot que si esta en el sitio. El vínculo entre el operador y el manipulador puede ser mecánico, eléctrico o inalámbrico.

Las tareas de mantenimiento en el reactor de fusión ITER son otro ejemplo de aplicaciones altamente especializadas que requieren desarrollos y pruebas de nuevas tecnologías relacionadas con la manipulación. ITER es uno de una serie de reactores de fusión experimentales que tienen por objeto investigar y demostrar la viabilidad de utilizar la fusión

como una fuente práctica de energía [15, 16]. La presencia de componentes activados con radiación beta y gamma dentro de la cámara de vacío del reactor, junto con polvo radiactivo, excluye la posibilidad de cualquier acceso humano y obliga al uso de equipo especial operado a distancia para el mantenimiento del reactor de ITER [17].

La teleoperación o el manejo a distancia de los manipuladores no es desconocida para la industria nuclear. De hecho, el primer sistema maestro-esclavo de teleoperación fue inventado por Goertz en 1949 para realizar trabajos en un laboratorio de celdas calientes [18, 19]. Se trataba de dos brazos iguales, donde el esclavo se ubicaba en la linea de visión del operador detrás de una ventana de cuarzo de un metro de espesor.

Las articulaciones correspondientes de los dos manipuladores estaban conectadas por cintas flexibles de acero inoxidable que funcionan sobre poleas. En la década de 1950 Goertz mejoró el sistema con el uso de accionamientos servo-eléctricos y un circuito cerrado de vídeo [20, 21]. De esta manera, la limitación de una distancia fija entre el operador y el esclavo desaparecido y abrió la posibilidad de realizar tareas en entornos más difíciles tales como un acelerador de partículas. En los tiempos modernos, dichos sistemas de teleoperación actuados eléctricamente se han vuelto muy sofisticados y se utilizan con un alto grado de fiabilidad y eficiencia [5, 22, 23].

En comparación con los anteriores reactores experimentales de fusión, el peso de los componentes y las herramientas que deben ser manipuladores de forma remota en ITER, son mucho más grandes, con lo cual es de esperar bajas velocidades de operación y fuerzas elevadas. Las limitaciones de espacio y los requisitos de capacidad de carga limitan la posibilidad de utilizar manipuladores actuados eléctricamente, con lo que los sistemas hidráulicos se presentan como una elección de interés en esta aplicación. Dichos sistemas, han demostrado su eficiencia en aplicaciones tales como automóviles, excavadoras y aviones, con un alto grado de fiabilidad y poco mantenimiento [24].

## 1.2. Marco del Trabajo fin de Máster

El presente trabajo fin de máster se ha desarrollado dentro de las actividades del grupo de “Robots y Máquinas Inteligentes” de la Universidad Politécnica de Madrid. En concreto sigue la línea de investigación de Telerrobótica y Teleoperación en el marco del proyecto TEMAR (DPI2009-12283) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con una beca FPI, “Formación de Personal Investigador”.

### 1.3. Objetivos

El objetivo del presente trabajo fin de máster es el estudio y evaluación de técnicas de manipulación remota en entornos de fusión nuclear. Dentro de los trabajos realizados cabe diferenciar los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar, analizar e implementar los principales esquemas clásicos de control bilateral existentes en la literatura para el análisis de sus prestaciones y carencias.
- Desarrollar una plataforma abierta de teleoperación en la que sea posible aplicar técnicas de manipulación remota en un sistema real. Dicha plataforma debe ser útil para la realización de futuros trabajos de investigación en este ámbito.
- Estudiar el uso de ROS para extender las capacidades de un sistema teleoperado y presentar los resultados obtenidos al utilizarlo directamente como canal de comunicaciones para el controlador bilateral existente sin comprometer el desempeño del sistema teleoperado.
- Presentar una nueva arquitectura híbrida de control orientada al control de manipuladores esclavos con un espacio de trabajo amplio, utilizando un dispositivo maestro de reducidas dimensiones.

Además, el presente trabajo pretende servir de base para realizar futuras comparaciones de arquitecturas de control avanzadas con las arquitecturas que se vienen usando en el ámbito de control bilateral, así como servir de referencia para el diseño de futuros esquemas de control para la interacción con entornos con espacio de trabajo grandes donde sea necesaria la manipulación de cargas elevadas.

## Capítulo 2

# Estado del Arte

El presente capítulo describe el contexto del trabajo, introduciendo el ámbito en el que se sitúa la teleoperación, sus orígenes y evolución. Se presenta el estado de la técnica en la actualidad, se explican los diferentes temas de investigación que son de interés hoy en día, su problemática y resultados.

En primer lugar, se hace una inclusión en el origen de la robótica y en concreto, la teleoperación, comentando cuales son sus componentes, requisitos a cumplir, tipos de técnicas de control, etc. Luego, se describe la evolución de la teleoperación, desde sus inicios y sus primeras aplicaciones.

Por otro lado se abordan las condiciones a las que se enfrentan los sistemas de operación en un entorno tan hostil como el nuclear y se resumen las condiciones de radiación, temperatura, ultra-vacío y campo magnético. Además se presentan los trabajos más recientes y relevantes de sistemas de teleoperación que cumplen con algunas de las condiciones del entorno nuclear y que además ofrecen suficientes capacidades de destreza para ser considerados como robots manipuladores en su conjunto.

### 2.1. Telerrobótica y Teleoperación

La robótica, es un campo multidisciplinario de la ingeniería encargado de la investigación y desarrollo de robots. En el mismo confluyen áreas como la mecánica, automática, informática y electrónica. En la actualidad, los robots tienen múltiples variedades, clasificados de acuerdo a su arquitectura y aplicación, los mismos van desde los industriales que pueden ser encontrados en las líneas de ensamblaje de las industrias hasta robots humanoides que buscan mimetizar al ser humano, así como también insectoides, aéreos, submarinos, móviles, etc. En el marco de este trabajo, el interés está centrado en los

robots industriales. La Organización Internacional de Estándares (ISO) lo define como: “Manipulador multifuncional re-programable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”. De ahora en adelante, al hacer referencia a la palabra robot, se entenderá como Robot Industrial, de acuerdo con esta definición.

Los robots, desde sus inicios han estado confinados a trabajar en fábricas, principalmente en la industria automovilística, donde han sido de gran utilidad debido a su capacidad para realizar trabajos simples pero repetitivos con un desempeño, rapidez y uniformidad superior al operador humano. Inicialmente los robots ejecutaban las tareas que le eran programadas con un escaso margen de adaptación al entorno, prácticamente nulo, pero esto ha ido cambiando a medida que se han desarrollado nuevos sensores, técnicas de control, aumentando la capacidad de cálculo, etc. Hoy en día los robots admiten cierto grado de adaptación a las tareas que ejecutan. Por ejemplo, son capaces mediante un sistema de visión de captar la orientación de las piezas de la cadena de producción y reorientar la herramienta de agarre para operaciones *pick & place* o hacer uso de un sensor de fuerza para reorientar la herramienta de agarre y así no dañar el objeto manipulado, el robot o el entorno de trabajo en operaciones de inserción.

Estos avances han ayudado a aumentar el esfuerzo orientado a expandir el campo de aplicación de los robots más allá de las fábricas, por ejemplo en sectores como medicina, construcción, mantenimiento, hogar, etc. Pero aún con ese grado de adaptabilidad, es necesario conocer de antemano la tarea y el entorno en el cual va a trabajar el robot.

Por tanto, si una tarea no es repetitiva, no está bien estructurada y el entorno es variable, el uso del robot industrial como se ha definido hasta ahora no es aplicable, por lo que es necesario recurrir a las capacidades de adaptación del operador humano. Pero cuando la tarea es realizada en ambientes hostiles, como puede ser entornos radioactivos, el espacio, mundo submarino, manipulación de explosivos, etc., surge la necesidad de buscar una manera de aprovechar las ventajas de los robots y del operador humano de forma conjunta. Es ahí donde surgen la Telerrobótica y Teleoperación, que se centran en gobernar, u operar, un dispositivo de forma remota por parte de un operador humano para la realización de una tarea. Más aún, la teleoperación hace referencia a la transferencia tanto de la capacidad sensorial como de la destreza humana a una posición remota.

### 2.1.1. Componentes de un Sistema Teleoperado

Un sistema teleoperado está compuesto básicamente por dos partes: una interfaz que incluye normalmente un elemento llamado maestro, situado en el entorno local, y que es

utilizado por un operador para generar órdenes o comandos, y el denominado esclavo, que es el dispositivo situado en un entorno remoto al que le llegan las órdenes generadas por el maestro.



Figura 2.1: Componentes de un sistema teleoperado

Las comunicaciones para el intercambio de datos entre ambas partes se establecen por medio de un canal. El sistema de control y los sensores permiten el movimiento controlado del esclavo, así como la correcta recepción de información del entorno remoto por el operador. Todo esto se puede visualizar en la figura 2.1.

#### 2.1.1.1. Entorno Local

En el entorno local se ubica el operador humano, que es el encargado de controlar la ejecución de la tarea en el entorno remoto. El mismo deberá contar con dispositivos de

actuación cuya función es la de generar los comandos del operador para ser enviados al robot remoto. Para que el operador pueda tener conciencia del trabajo que está realizando se necesita dotar a la interfaz del sistema teleoperado de dispositivos de realimentación con los que el operador pueda tener información de la ejecución de la tarea.

Dependiendo de la complejidad de la tarea y las condiciones de operación, puede ser necesario cerrar un bucle de control en el entorno local, donde se presentan al operador ciertas ayudas que le faciliten la manipulación, bien sea para mejorar su desempeño o para superar adversidades propias de la aplicación, como por ejemplo los retardos en las comunicaciones. La intervención del operador puede ser diversa, dependiendo de la aplicación, y puede ir desde un control absoluto, pasando por un control compartido, hasta el control supervisado.

En cuanto a los dispositivos encargados de capturar los comandos generados por el operador para ser transmitidos al manipulador remoto, cabe destacar que existe una gran variedad capaces de realizar esta función, cada uno con características propias, ventajas y desventajas, entre los cuales se pueden nombrar:

- Teclados
- Ratones
- Joysticks
- Paletas
- Pantallas táctiles
- Pedales

Los joysticks habitualmente generan comandos de velocidad aunque existen dispositivos que pueden ser programados de tal manera que también generen comandos de posición. Es posible hacer uso de otro tipo de dispositivos, simplemente cambiando el medio a través del cual se emiten los comandos, por ejemplo micrófonos para comandos de voz [25] o cámaras para sistemas de captura de movimiento [26].

Por otra parte, vital importancia tienen aquellos dispositivos encargados de presentarle al operador cualquier tipo de información relacionada con el desarrollo de la tarea que está realizando. Por un lado, es necesario que el operador realice la operación viendo que es lo que está sucediendo en la tarea y para ello un dispositivo de salida indispensable en cualquier operación suele ser un monitor a través del cual se le presenta al operador imágenes de la tarea. Los monitores también son capaces de presentarle al operador información de tipo texto, gráficos o imágenes compuestas entre realidad y simulación.

Por otro lado, existen dispositivos con reflexión de fuerzas (dispositivos hápticos) que son capaces de presentarle al operador fuerzas de contacto y manipulación relacionadas con la tarea ejecutada. También es posible hacer uso de altavoces para emitir sonidos, alarmas o otra información auditiva al operador.

### **2.1.1.2. Entorno Remoto**

Es el entorno en el que se encuentra ubicado el robot esclavo y con el que interactúa para desarrollar la tarea correspondiente. Es importante resaltar que a diferencia del robot industrial, el entorno de trabajo de un robot usado como manipulador teleoperado, por lo general, es no-estructurado, variable o desconocido. Debido a que el operador humano es el que cierra el bucle de control del manipulador esclavo, en ocasiones, el mismo no requiere de gran precisión en sus movimientos (siempre y cuando el error no sea acumulativo) ya que el operador realizará las correcciones necesarias.

Para asegurar el éxito en la ejecución de la tarea es necesario implantar un control adecuado, que será el encargado de que el manipulador esclavo ejecute los comandos enviados por el operador. El control más básico es el encargado simplemente de manejar las comunicaciones maestro-esclavo. Esquemas de control más avanzados incluyen el uso de sensores, control compartido o el aumento del grado de autonomía como el caso del control supervisado o la tele-programación.

Los sensores son los encargados de adquirir el estado del esclavo, de su entorno y de la tarea realizada con la finalidad de ser usado tanto por el control en el entorno remoto como por el control local y los dispositivos de salida en el caso que los haya. Existen múltiples tipos de sensores, el principal son las cámaras que realimentan imágenes al operador, seguido de los transductores de fuerza-par, normalmente acoplados al efecto final del esclavo para medir fuerzas de contacto.

### **2.1.1.3. Canal de Comunicaciones**

Es sumamente indispensable el medio utilizado para el intercambio de datos entre ambos dispositivos, esto es, la transmisión de los comandos enviados desde el entorno local al entorno remoto y la información de realimentación transmitida.

Existen múltiples formas de implementar el medio para el intercambio de información:

- MODEMs
- Fibra óptica

- Medio eléctrico
- Ondas de radio
- Ethernet. Redes locales
- Internet

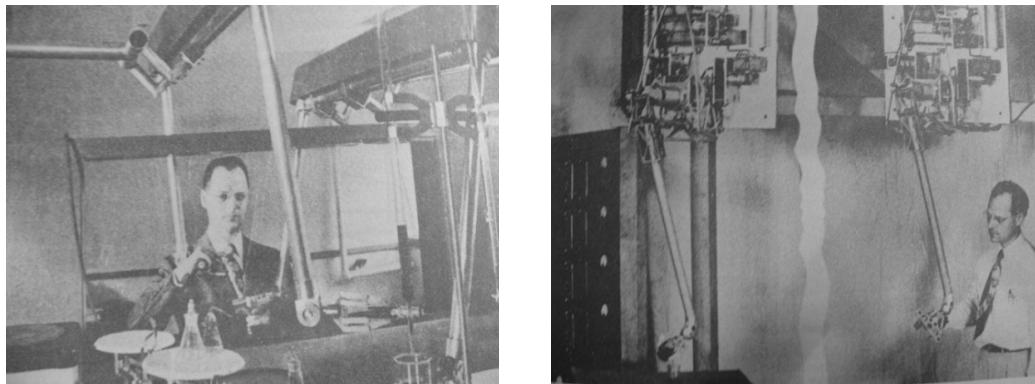
Cualquiera que sea el caso, existen dos características primordiales a la hora de escoger un canal de comunicaciones y esas son: el ancho de banda y el retardo temporal. El ancho de banda se refiere a la cantidad de información que el canal es capaz de manejar, mientras que el retardo temporal lo determina el tiempo que tarda la información en ir desde una zona a la otra.

## 2.2. Evolución de la Teleoperación

A lo largo de la historia, los seres humanos han hecho uso de herramientas que les permitían realizar una tarea, o suplir alguna deficiencia para poder llevarla a cabo. Por ejemplo, han hecho uso de palos que permitieran extender el alcance para hacer caer una fruta, o las tenazas del herrero que les permitiera manipular los objetos calientes. A medida que la humanidad evoluciona, se llevan a cabo nuevos descubrimientos y se desarrollan nuevas tecnologías; de igual manera van evolucionando las herramientas que ayudan al hombre a llevar a cabo las tareas que éste se proponga realizar. La robótica y específicamente la telerroborótica no son la excepción a la regla.

La teleoperación tal y como se conoce hoy en día tiene sus orígenes gracias a la industria nuclear. Inicialmente se usaban pinzas de más de medio metro para separar al operador del material radioactivo, pero a medida que el trabajo con este tipo de material se iba haciendo mayor, aumentaba la peligrosidad. Se emplearon pinzas con accionamiento remoto, separando al operador del material mediante barreras de protección. El trabajo era bastante incomodo, debido a las restricciones de las pinzas por su paso a través las barreras y a la visión de la tarea que se realizaba a través de espejos.

En 1947 en el *Argonne National Laboratory* de Estados Unidos, se iniciaron las primeras investigaciones lideradas por Raymond Goertz, cuya finalidad era el desarrollo de sistemas de telemanipulación que facilitaran la realización de tareas remotas. En 1949, concluyó el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, llamado M1 y que podría ser considerado el antecesor de los sistemas de teleoperación maestro-esclavo existentes hoy en día. En los años posteriores continuaron los desarrollos basados en mejoras del M1, pero no fue sino hasta 1954 cuando Goertz presentó el primer sistema de control bilateral con accionamientos eléctricos y servo-controlados, llamado E1, figura 2.2.



(a) Maestro-esclavo mecánico

(b) Maestro-esclavo electro-mecánico E1.

Figura 2.2: Raymond Goertz con los primeros sistemas de teleoperación maestro-esclavo

A partir de 1956, para la Agencia Atómica Francesa CEA (*Commissariat à l'énergie atomique*), Pesanti y Cherel comienzan el desarrollo de un sistema maestro-esclavo mecánico. Ese mismo año se desarrolló el sistema teleoperado *Mascot*, entre un equipo Italiano y el *Argonne National Laboratory*. A finales de los años 50, se comenzó a aplicar esta tecnología al campo de las prótesis humanas y la rehabilitación en general.

En la década de los 60, se extienden las investigaciones de la teleoperación a aplicaciones submarinas. Los primeros desarrollos fueron llevados a cabo por la Armada de EE.UU., inicialmente destinados a la recogida de torpedos. Más adelante fueron empleados en otras tareas como en la recuperación de restos de accidentes. Los primeros sistemas fueron *Snoopy* y *SCAT*, que tenían 3 grados de libertad con una o dos cámaras de vídeo.

El siguiente en ser desarrollado fue el sistema CURV (*Cable Controlled Underwater Vehicle*) en el anteriormente llamado Pasadena Annex del centro de pruebas de maquinas de guerra navales, para la recuperación de elementos de guerra perdidos en la isla San Clemente. El mismo podía trabajar a profundidades de hasta 600 metros y sus manipuladores poseían más grados de libertad que los sistemas *Snoopy* y *SCAT*. El CURV se hizo famoso porque fue el robot encargado del rescate de la bomba H en Palomares, España. Esto llevó al desarrollo de más versiones como los CURV II, CURV IIB, CURV IIC y CURV III, figura 2.3.

Durante los 70, se realizaron grandes avances en la teleoperación, especialmente en el área submarina y nuclear una vez finalizada la carrera espacial. Cabe destacar las mejoras hechas en un desarrollo de aplicaciones nucleares, el SM229 en EEUU, donde el control inicialmente analógico fue realizado digitalmente, convirtiéndolo en el primer sistema teleoperado maestro-esclavo con control digital. En la década de los 80, el interés en la teleoperación estuvo un poco ralentizado, especialmente por el auge de la robótica industrial.



Figura 2.3: CURV: Cable Controlled Underwater Vehicle

Finalmente, no es sino a partir de los 90 cuando la teleoperación y las tecnologías asociadas han adquirido un nuevo impulso, en gran parte debido a la dificultad en la aplicación de robots autónomos en distintas áreas. Hoy en día, continúan los desarrollos en el campo espacial, submarino y nuclear, pero el campo de aplicación de la teleoperación se ha visto ampliado a sectores como: minería, cirugía, educación, entretenimiento, aplicaciones militares, vigilancia, construcción, mantenimiento, etc.

### 2.3. Teleoperación en Entornos Nucleares

Los entornos de fusión nuclear están fuertemente restringidos por varios factores, tales como la radiación, altas temperaturas y las dimensiones y pesos de sus componentes. Esto obliga a considerar el diseño de tecnologías de teleoperación como una estrategia viable para realizar tareas en dichas instalaciones. La fusión nuclear como fuente de energía requerirá el desarrollo de varias tecnologías de teleoperación que pueden ser automáticas o manuales.

Las futuras plantas de energía de fusión similares a la planta de demostración (DEMO) requerirán un sistema de teleoperación excepcional para llevar a cabo actividades de supervisión y mantenimiento. Estas tareas desempeñan un papel fundamental en la gestión global de una planta de energía nuclear.

Las tecnologías de teleoperación se han utilizado con éxito en células de fisión nuclear durante mucho tiempo [27] y en el mantenimiento del *tokamak* del *Joint European Torus* (JET) por más de 10 años [22, 28] ya que con ello se evitan paradas inesperadas, retrasos de mantenimiento, etc. Además, se ha mejorado la seguridad del personal mediante la reducción de exposición a la radiación y el aumento de la disponibilidad del reactor mediante el uso de equipo endurecido para resistir las condiciones de operación tan críticas.

En esta sección se presentan los requisitos y características que deben cumplir los sistemas de telerrobótica en un entorno de fusión nuclear. En [29–31] se presentan estudios completos sobre dichos requisitos y características.

### 2.3.1. Motivación

En los próximos años, el establecimiento de la fusión nuclear como fuente de energía requerirá el uso de sistemas teleoperados debido principalmente a la radiación. La industria nuclear ha utilizado los sistemas remotos debido a las restricciones de su entorno desde el principio, pero con los avances tecnológicos se hace necesario implementar sistemas innovadores. Es por esta novedad, que trabajos importantes tienen que llevarse a cabo con el fin de desarrollar actuadores, sensores, sistemas de visualización, cables eléctricos, conectores, electrónica, sistemas de comunicación, etc., que cumplan con las restricciones ya mencionadas.

Dichos sistemas teleoperados deben hacer frente a: altos niveles de radiación, ultra-vacío, altas temperaturas y el campo magnético toroidal con la intención de realizar la inspección, mantenimiento y reparación de instalaciones de fusión nuclear, tales como el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), DEMO o *International Fusion Materials Irradiation Facility* (IFMIF).

### 2.3.2. Radiación

En la tabla 2.1 se muestran las dosis de radiación para el caso de ITER [32]. El fun-

Tabla 2.1: Dosis de Radiación para ITER

	Programada	Tipo de Inspección Sin Programar	Mantenimiento
<b>Tasa de Dosis (Gy/h)*</b>	1500	15000	300
<b>Duración</b>	12 h/semana	12 h/semana	60 h/mes
<b>Periodo</b>	7,5 años	7,5 años	32 meses
<b>Dosis Total (MGy)</b>	2,7	27	0,6

\* Datos estimados

cionamiento de la electrónica es un problema importante cuando se trata de entornos con radiación [33]. A pesar que varios sistemas de multiplexación no soportan más de 10 kGy, algunos transistores manejan valores nominales de hasta 10MGy. Por lo tanto, es de esperarse que sea posible diseñar componentes resistentes hasta 10MGy con estos transistores. El *Radiation Hardness Manual* [34] cuenta con un listado de circuitos digitales (flip-flops y compuertas) basados en transistores discretos que resisten dosis en el rango

de 10MGy. Por ejemplo, todos los componentes electrónicos del robot PAC [33], descrito en el numeral 2.4.4, soportan una dosis total de hasta 10 kGy, con una tasa máxima de 10Gy/h.

Todos los materiales estructurales no deben ser susceptibles a la degradación por contaminación. Componentes sensibles como los sellos deben ser elegidos de acuerdo a su resistencia a la radiación. Teniendo en cuenta que la única barrera contra la radiación es la masa y que los requisitos dimensionales de los robots no permiten el uso de tales barreras de manera eficaz, todos los componentes a ser utilizados deben probarse para comprobar su funcionamiento bajo altas dosis de radiación.

Varios estudios se han llevado a una amplia gama de componentes con el fin de utilizarlos en la cámara de vacío del reactor, desde fibras ópticas hasta lubricantes, actuadores y cámaras de vídeo [35–37]. Estos estudios dan grandes esperanzas en el hecho de que sería posible tener diseños electrónicos compatibles con las limitaciones del entorno de fusión nuclear.

### 2.3.3. Ultra-Vacío

Teniendo en cuenta el ultra-vacío ( $10^{-5}$  Pa) [32], la cámara de vacío (VV - *Vacuum Vessel*) se debe mantener limpia a toda costa. Por ejemplo, el uso de materiales que liberan gases debe ser evitado. Por lo general, materiales susceptibles a la oxidación y los materiales orgánicos, liberan gases. Todo los componentes que entran en contacto directo con la cámara de vacío tienen que ser certificados. Una lista de componentes y materiales aptos para ser utilizados en ultra-vacío se puede encontrar en el *ITER Vacuum Handbook* [38]. El material estructural predeterminado por ITER para estas condiciones es el acero inoxidable 316L (N)-IG [39].

Con el fin de eliminar todas las impurezas y bolsillos de gases se realiza el coquizado del robot (normalmente a 240 °C). Generalmente estos puntos que pueden liberar gases se encuentran situados en las imperfecciones de la estructura. El coquizado permite eliminar cualquier rastro de hidrógeno y oxígeno que queda en los poros de los materiales. Cuando el robot no se puede coquizar en un plazo razonable, lo habitual es confinar en un espacio cerrado las zonas con porosidades.

Soluciones de sellado existen, como la utilizada en el robot AIA [40], descrito en el numeral 2.4.3, donde se utiliza Helicoflex® y sellos de metal.

Por otro lado, se deben utilizar lubricantes no estándar, tales como el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ), carbón tipo diamante (DLC), diseleniuro de tungsteno ( $\text{WSe}_2$ ), sulfuro

de tungsteno ( $WS_2$ ) y diseleniuro de molibdeno ( $MoSe_2$ ) [41]. En [42] se puede encontrar una revisión completa sobre el comportamiento del  $MoS_2$ . Además, el  $MoS_2$  ha sido probado en ultra-vacío y se ha encontrado que ofrece un coeficiente de fricción muy bajo [43]. Esta técnica se ha utilizado ampliamente para el diagnóstico de reactores [41].

### 2.3.4. Altas Temperaturas

Para ITER, en la tabla 2.2 se muestra un resumen de las posibles temperaturas de operación en distintos escenarios [32].

Tabla 2.2: Posibles temperaturas durante inspección para ITER

Descripción	Temperatura 1 <sup>er</sup> Pared
<b>Inspección Programada</b>	120 °C
<b>Inspección Durante Coquizado</b>	240 °C
<b>Inspección sin Programar</b>	120 °C
<b>Mantenimiento</b>	50 °C

Teniendo en cuenta las altas temperaturas, todas las propiedades de los materiales, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, etc., deben ser consideradas a 120 °C pero el material también debe ser coquizado (240 °C). Por ejemplo, la mayoría de las aleaciones de aluminio están prohibidas para fines estructurales, ya que debido a sus propiedades mecánicas no son adecuadas para estas temperaturas. Las experiencias con el brazo articulado de Inspección (AIA) [40] y el sistema de diagnóstico [44], dicen que la lubricación puede ser un problema grave también.

#### 2.3.4.1. Distribución de la Temperatura

Si las diferentes partes del robot están a diferentes temperaturas, puede producirse un problema debido a la dilatación térmica, lo que puede resultar en grietas o estrés adicional en los materiales.

Una solución para evitar este problema consiste en diseñar el robot para alcanzar uniformemente 120 °C. En este caso, las partes exteriores del robot deben actuar como cuerpos negros, con el fin de calentar la totalidad del robot a 120 °C.

Por lo tanto, también se deben elegir los materiales con constantes de dilatación cercanas. Para los materiales con constante de dilatación diferente es necesario tener especial cuidado durante la fase de diseño del robot, ya que todas las piezas serán fabricadas a temperatura ambiente (20°C aprox.). Esto también puede ser un problema si la fase de pruebas tiene que hacerse a temperatura ambiente.

### 2.3.4.2. Aislamiento Térmico

A pesar de los esfuerzos que se pueden hacer para encontrar componentes compatibles con las altas temperaturas, habrá algunos componentes que no deben ser expuestos a dichas temperaturas. En estos casos, la solución es confinar estos componentes en una jaula hecha de material reflectante y puesto que los robots estarán en un ambiente de ultra-vacío, el modo de transferencia de calor principal será la radiación y dicha jaula reflectante tardaría una gran cantidad de tiempo para obtener la temperatura nominal.

Por lo tanto un buen diseño implica que los componentes dentro de la jaula pueden estar trabajando durante un largo período de tiempo.

Las articulaciones del robot deben ser diseñadas teniendo en cuenta el aislamiento térmico con el fin de minimizar la transferencia de calor por conducción. Esta solución es exactamente la opuesta a la estrategia de distribución de la temperatura. Dado el caso en que estas dos soluciones deban ser utilizadas en un mismo robot, es recomendable trabajar con un modelo muy preciso para cada uno de los casos.

Es evidente que la obtención de un modelo es una dificultad real, ya que el reparto térmico puede llegar a ser tan complejo como el diseño del montaje. Otro posible solución es diseñar un sistema enfriador con un fluido o gas frío y utilizar un intercambiador de calor fuera de la cámara de vacío.

### 2.3.5. Campo Magnético

Un campo magnético tan elevado ( $3,3 \pm 6.5 \text{ MAm}^{-1}$  /  $41000 \pm 82000 \text{ Oe}$  densidad de flujo magnético es  $4,1 \pm 8.2 \text{ T}$  en el vacío) [45], en un gran volumen es una situación muy rara, que sólo se encuentra en el mundo de fusión. Incluso la intención de operar bajo estas condiciones un equipo de remoto es única. De hecho, sólo recientemente gracias a los imanes superconductores es que es posible generar campos magnéticos sostenidos tan altos [46].

Los imanes de cobre pueden producir campos muy elevados (el récord actual es de 100T), pero en un período de tiempo muy limitado [46], por lo que el robot esperaría a que el pulso acabase para realizar las tareas. Hasta ahora, no se habían combinado más restricciones a la del campo magnético, tales como la radiación, altas temperaturas y ultra-vacío en el caso de la fusión nuclear. Sin embargo, los robots que operan bajo la influencia de campos magnéticos elevados no son una novedad, ya que investigadores de la Universidad Johns Hopkins han presentado un sistema robótico completamente compatible con la resonancia magnética [47].

En lo que respecta al uso de componentes funcionan utilizando un campo magnético (bobinas de inductancia, transformadores con núcleos de hierro, etc) estos se verán saturados y serán afectados por fuerzas muy altas, con lo cual, deben ser sustituidos por dispositivos tolerantes al campo magnético como bobinas de aire y transformadores de cerámica [48] .

La diferencia principal de una aplicación de fusión nuclear con cualquier máquina superconductora, en general, es que la máquina no está funcionando en el momento del mantenimiento o la inspección, por lo tanto, la perturbación del campo local se puede tolerar, con lo cual los dispositivos electrónicos y los sistemas electromecánicos están permitidos. Los efectos del campo magnético son descritos por las ecuaciones de Maxwell. El desarrollo de las ecuaciones de Maxwell conduce a la fuerza de Lorentz  $\mathbf{F}_L$ . Cuando no hay ningún campo eléctrico, está escrito como,

$$\mathbf{F}_L = q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

En una carga  $q$  que se mueve a una velocidad  $\mathbf{v}$ , ó,

$$F_L = i \cdot l \cdot \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

En un conductor con una longitud  $l$  y corriente  $i$  a lo largo del vector  $\mathbf{u}$ .  $\mathbf{B}$  es la densidad de flujo magnético local en ambas ecuaciones. La ecuación de la fuerza de Lorentz puede ser desarrollada con el fin de demostrar que un campo magnético elevado y constante puede producir un par elevado pero ninguna fuerza: un alto gradiente es necesario para generar una fuerza elevada en un volumen reducido [45].

## 2.4. Desarrollos Actuales

Las restricciones del entorno de fusión nuclear aún no se cumplen por una máquina con gran destreza. En la actualidad, los únicos sistemas que cumplen dichas restricciones son los de diagnóstico, pero deben operar incluso durante la fase de plasma y en muchas ocasiones no se pueden recuperar. Además, el diseño de estos sistemas los hace muy robustos y lejos de poder ser considerados como un robot completo. El sistema de visión *In-Vessel Viewing System* (IVVS) [49, 50] desarrollado por la ENEA es un ejemplo de los mencionados sistemas de diagnóstico y de lo qué se puede hacer con las condiciones dadas.

Dado que estos sistemas de diagnóstico no proporcionan la destreza necesaria para el funcionamiento en la cámara de vacío, la segunda parte de esta sección se centrará en los dispositivos que cumplen algunas de las restricciones, pero con niveles de destreza altos.

### 2.4.1. Sistema de Diagnóstico

En fusión nuclear, el entorno de diagnóstico es aún más difícil que el entorno de inspección y mantenimiento, ya que adicionales al ultra-vacio, el sistema de diagnóstico tiene que lidiar con enormes dosis de radiación y las altas temperaturas. Además, se utilizan durante la operación del plasma y tienen que hacer frente a las corrientes parásitas (*Eddy currents*) generadas a lo largo de su estructura en caso de un enfriamiento rápido [45].

Por estas razones, los sistemas de diagnóstico son muy robustos, sencillos y con capacidades de movimiento mínimas con el fin de evitar fallas. La regla general es el uso de actuadores neumáticos que generan un movimiento lineal. Otros sistemas como mecanismos accionados por temperatura y diseños que utilizan el campo magnético local para generar movimiento también se han utilizado en *tokamaks* anteriores [44] y esta prevista su utilización en ITER. En este entorno, parece que un gran porcentaje de la carga sobre los actuadores es debido a las corrientes parásitas generadas en las partes móviles [45].

### 2.4.2. Sonda IVVS

El objetivo de la sonda IVVS (*In-Vessel Viewing System*), figura 2.4, para ITER es la medición y visión en la cámara de vacío en condiciones de inspección. En el prototipo construido por la Asociación Italiana de Fusión ENEA [33, 49, 50], un láser se dirige hacia la cabeza de la sonda usando fibra óptica endurecida y luego hacia la pared en inspección utilizando un prisma cuya posición es ajustada por un accionamiento de dos grados libertad.

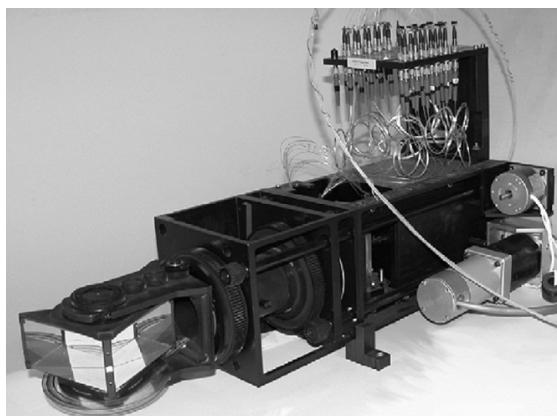


Figura 2.4: Sonda IVVS

En su último diseño, la sonda es de acero inoxidable AISI 304, pesa 22 Kg., tiene motores ultrasónicos y reductoras para mover el prisma. El marco del espejo es en aleación de titanio para reducir la fricción por las corrientes parásitas, ya que se supone que se mueva a 1 rps [45]; Las reductoras también son de acero inoxidable AISI 304, con nitruro de titanio para su lubricación.

#### 2.4.3. Brazo Articulado de Inspección AIA

El brazo articulado de Inspección AIA [40, 51–53], que se muestra en la figura 2.5, desarrollado en conjunto por CEA List y los laboratorios IRFM, es una demostración de cómo un brazo articulado de largo alcance puede ser una solución factible para la inspección en la cámara de vacío. Este robot ha sido diseñado para funcionar en ultra-vacío ( $10^{-5}$  Pa) y a una temperatura de 120°C (previamente coquizado a 200°C). Es un brazo de cinco módulos con una capacidad de carga de 10 Kg, con una longitud total de 7,4 m y 160 mm de diámetro. Su peso total es de 130 Kg.

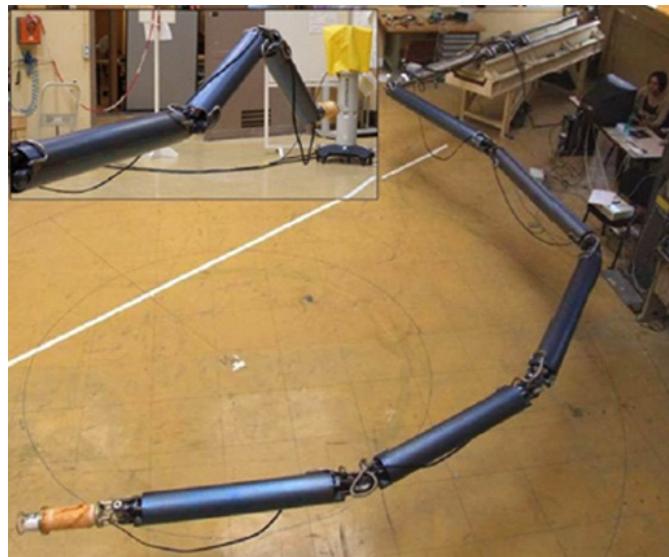


Figura 2.5: Brazo Articulado de Inspección AIA

La primera introducción del AIA en el reactor *Tore Supra* en condiciones de operación tanto de ultra-vacío y temperatura se produjo en septiembre de 2008 [40]. Se equipó con una sonda de visión endurecida que le permitía observar la erosión de los casquetes limitadores y el funcionamiento de las persianas de diagnóstico. Además cuenta con una amplia gama de efectores finales desde un láser para la eliminación de tritio hasta tareas ligeras de contacto y calibración de diagnóstico con herramientas de sujeción. La operación del plasma se reanudó 15 horas después de retirar el robot que es el tiempo necesario para alimentar las bobinas superconductoras [52].

La información se transfiere a los módulos gracias a los sistemas de multiplexación. Cada módulo está equipado con una electrónica de multiplexación *Neurobot* endurecida para las altas temperaturas. También está equipado con un sistema de amplificación para los motores. Los componentes que no son compatibles con el ultra-vacío están encerrados en cajas anti-fugas de acero inoxidable.

#### 2.4.4. Robot PAC

El robot PAC (*The Porteur Articulé en Cellule*) [33] mostrado en la figura 2.6, es un brazo articulado de 6 metros de largo con una capacidad de carga de 1 Kg y un diámetro exterior de 100 mm. Se ha desarrollado para aplicaciones de AREVA-NC por CEA LIST y ha sido diseñado para realizar tareas de inspección en celdas calientes. Dichas celdas se encuentran bajo condiciones atmosféricas y de temperatura normales, pero los niveles de radiación son altos, por lo tanto, el robot tiene que resistir una dosis total de 10 kGy.



Figura 2.6: Robot PAC en una celda caliente de AREVA.

La principal característica demandada a este robot es movilidad, ya que la celda caliente tiene tuberías complejas. Es por eso que el robot tiene la misma arquitectura modular con el mecanismo paralelogramo vertical como el AIA del cual el PAC es inspirado. La diferencia es que en este caso el mecanismo de paralelogramo compensa la gravedad con un resorte de fibra de vidrio.

#### 2.4.5. Manipulador WHMAN

El manipulador WHMAN (*Water Hydraulic MANipulator*) [54] es un robot teleoperado con reflexión de fuerzas. Se caracteriza porque es hidráulico y como fluido utiliza agua.

El brazo esta equipado con siete articulaciones actuadas que le permiten contar con seis grados de libertad. El diseño actual pesa 185 kg donde sus materiales base son aleaciones de aluminio y acero inoxidable. Funciona con una presión de linea de 210 bar y requiere un caudal de 10 lpm. Además requiere una linea neumática a 6 bar y una conexión eléctrica.

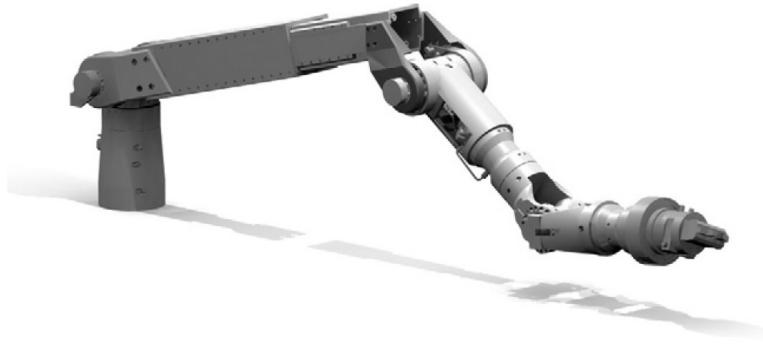


Figura 2.7: Robot WHMAN de 6GDL.

Tiene una capacidad de carga de 100 kg cuando esta totalmente extendido, en cuyo caso alcanza una distancia de 2.5 m medidos desde la articulación de la base. En la figura 2.7 se muestra el diseño actual [54]. El WHMAN ha sido diseñado desde sus primeras fases para utilizar la potencia hidráulica del agua de acuerdo a los requisitos de ITER. Este manipulador es resistente a la radiación. Se estima que soporta una dosis de radiación de 300 Gy/h con una dosis acumulada de 1MGy. Debido a la elevada radiación, no utiliza electrónica digital, con lo cual, todos sus transductores son basados en tecnología analógica.

#### 2.4.6. Robots MRI

Cabe mencionar que el reducida cantidad de máquinas superconductoras dará lugar a graves problemas logísticos cuando se quiera probar un robot completo bajo tales limitaciones.

En pocas áreas, los robots se utilizan para posicionar objetos con precisión bajo la influencia de un alto campo magnético. Demuestra ser de interés para algunas intervenciones quirúrgicas. Es ahí donde aparecen los robots MRI. Un robot MRI es un robot médico capaz de operar dentro de una imagen de resonancia magnética (MRI), con el fin de realizar o ayudar en las intervenciones guiadas por imágenes (GII) [55].

Hay pocos diseños para robots MRI, la mayoría de ellos trabajan lejos del campo magnético a fin de no sólo evitar la perturbación del dispositivo, sino también evitar la

distorsión de la imagen como tal. En estos robots, tal como se presenta en [55], sólo las varillas largas pasivas de aleación de titanio o de material compuesto van en el campo magnético ( $<0.5\text{T}$ ).



Figura 2.8: Robot MRI de al Universidad John Hopkins

Sin embargo, un equipo de la universidad John Hopkins ha sido diseñado un robot para funcionar con equipos de resonancias magnéticas [47]. Se dice que es el primer robot totalmente compatible con MRI y que cuenta con pruebas de compatibilidad de hasta 7T [47]. Dicho robot ha sido fabricado completamente con materiales paramagnéticos que evitan la distorsión del campo. Se basa en motores especiales, neumáticos, paso a paso y encoders ópticos con el fin de realizar movimientos precisos. Esto le permite manejar valores de precisión del orden de la fracción de milímetro. Es importante tener en cuenta que lo único que se le exige es ser compatible con resonancias magnéticas.

## Capítulo 3

# Evaluación de Diferentes Arquitecturas de Control para Teleoperación

El objetivo de este capítulo es comprobar de manera experimental los principales algoritmos de control bilateral así como sus ventajas e inconvenientes.

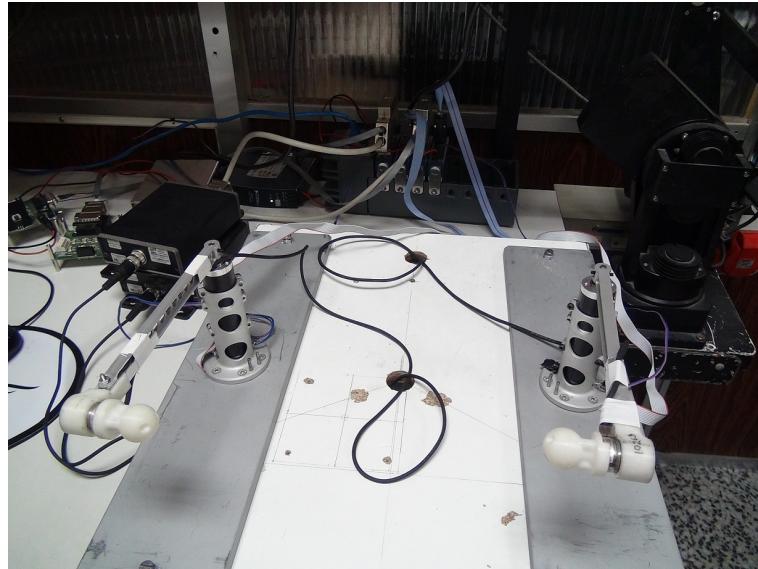


Figura 3.1: Fotografía de la plataforma experimental

Este trabajo se ha desarrollado en la plataforma experimental mostrada en la figura 3.1, donde la implementación de los algoritmos se realiza utilizando el entorno de desarrollo LABVIEW.

Los elementos principales de la plataforma experimental son:

- 2 x Motor Maxon, serie RE 25, reductor planetario GP 26 B (1:104), encoder MR.
- 1 x Controlador compact RIO 9022 dotado de una FPGA.
- 2 x NI 9505 Módulo de Drive Servo de DC de Escobillas con Puente H Completo.
- 2 x NI 9205 Módulo de Entrada Analógica de 32 Canales.

El modelo de ambos motores, maestro y esclavo, que se ha utilizado es el siguiente:

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{A}{(Js^2 + Bs)} = \frac{4,5552}{0,0118s^2 + 2,8607s} \quad (3.1)$$

$$F \cdot 0,16 = R_T K_\tau I$$

Donde,

- $F$  es la fuerza aplicada al dispositivo.
- $R_T$  es el factor de reducción de los motores e igual a 104.
- $K_\tau$  es la constante de par de los motores e igual a  $43,8 \cdot 10^{-3} \frac{Nm}{A}$ .
- $I$  es la intensidad que fluye por los motores. Máximo 0.7 A.

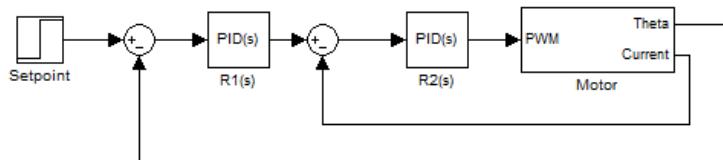


Figura 3.2: Diagrama de bloques del control implementado en cada motor

Otro aspecto a tener en cuenta es el tipo de control implementando en cada motor ya que con el objetivo de protegerlos se utiliza un esquema en cascada como se muestra en la figura 3.2. Para los propósitos de este trabajo solo se ha considerado el regulador  $R_1(s)$  ya que el lazo interno responde más rápido (hasta 10 veces más rápido) y se puede considerar únicamente su valor en régimen permanente, la unidad, ya que  $R_2(s)$  es un regulador PI (error nulo en régimen permanente). Con respecto a  $R_1(s)$  cabe mencionar que se ha utilizado el VI mostrado en la figura 3.3. Este PID permite gran flexibilidad ya que se pueden probar reguladores clásicos así como versiones mejoradas en las que se considera la velocidad o aceleración del motor. En la figura 3.4 se muestra de manera gráfica como se relacionan los diferentes parámetros y ganancias con las que cuenta el VI en cuestión.

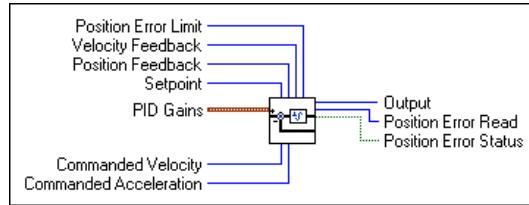


Figura 3.3: Fixed Point PID VI

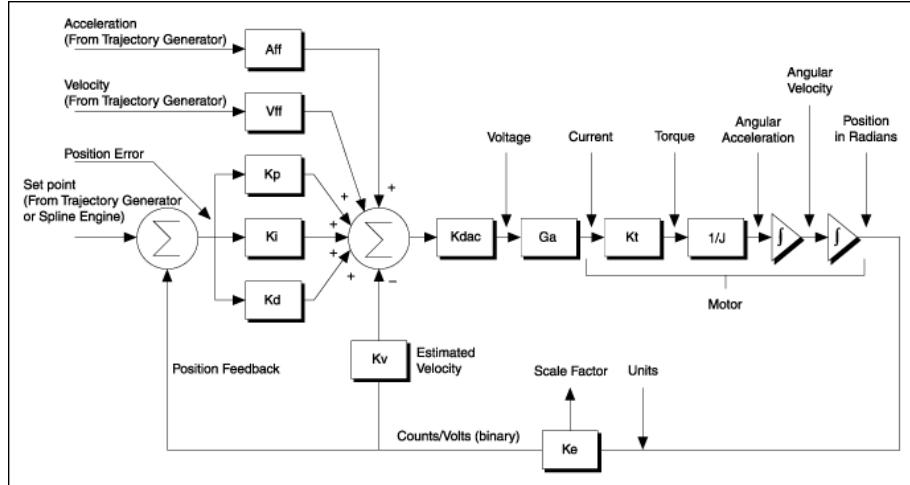


Figura 3.4: NI SoftMotion Control Loop

### 3.1. Control Posición - Posición

En esta sección se realiza en primer lugar un análisis teórico de la estabilidad y de la percepción por parte del operador en este tipo de algoritmo en sus casos extremos:

- Espacio libre: La impedancia del entorno es nula ( $K_e = 0$ ), el esclavo se mueve libremente, y la única fuerza externa que actúa sobre el sistema es la del operador sobre el maestro.
- Contacto con un objeto rígido: El esclavo está en contacto con un entorno rígido ideal ( $K_e = \infty$ ).

Posteriormente se presentarán algunos resultados obtenidos en la plataforma experimental.

En la figura 3.5 se muestra la arquitectura en cuestión. Con el fin de analizar los casos extremos y como serán percibidos por el operador es necesario simplificar este diagrama de bloques reemplazando el valor de  $K_e$ .

En la figura 3.6 se muestran los diagramas simplificados así como las funciones de transferencia resultantes en los casos extremos.

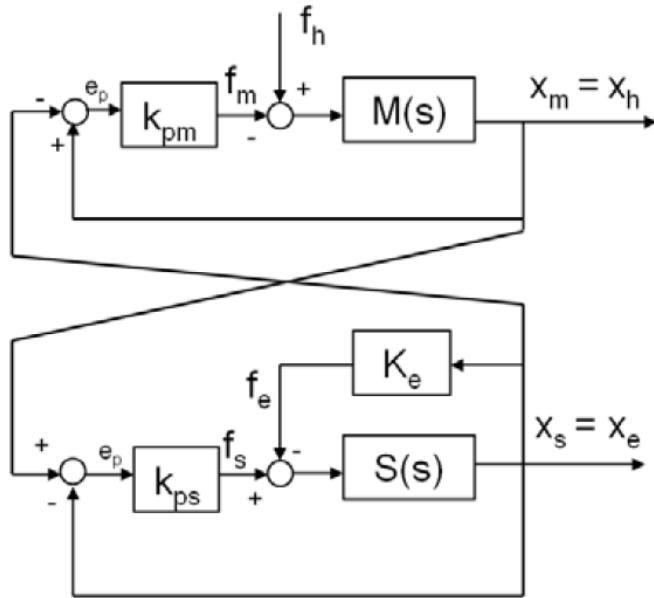
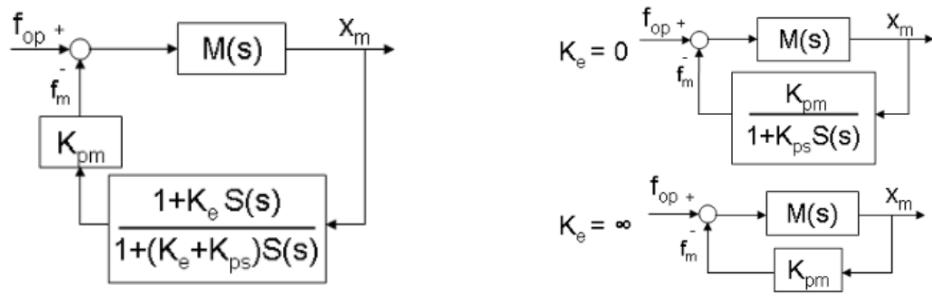


Figura 3.5: Arquitectura de control Posición - Posición



(a) Esquema visto desde el maestro

(b) Casos extremos

Figura 3.6: Diagrama de bloques para los casos extremos del control Posición - Posición

No es necesario entrar en el detalle de los modelos del maestro y esclavo para intuir la percepción por parte del operador:

- $K_e = 0$ :  $H(s)$  esta dada por  $\frac{K_{pm}}{1+K_{ps}S(s)}$  con lo cual el operador percibirá cierta fuerza a pesar de que ninguna fuerza se está ejerciendo sobre el esclavo.
- $K_e = \infty$ :  $H(s)$  esta dada por  $K_{pm}$  con lo cual la máxima impedancia que percibirá el operador está determinada por el regulador (P, PD, etc.) del maestro ( $K_{pm}$ ).

En lo que concierne a la estabilidad de este sistema se puede analizar también en los casos extremos. En aras de la sencillez se considerará el caso en que los dos reguladores  $K_{pm}$  y  $K_{ps}$  son proporcionales. Retomando el modelo del sistema de la ecuación (3.2) y aplicando la relación para expresarlo en función de la fuerza tenemos:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{4,5552}{0,0118s^2 + 2,8607s} \cdot \frac{0,16}{R_t K_t} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s} \quad (3.2)$$

- $K_e = 0$ :

$$G_r(s) = \frac{M(s)}{1 + M(s) \frac{K_{pm}}{1 + K_{ps}S(s)}} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s + 0,16(K_{pm} + K_{ps})} \quad (3.3)$$

Donde  $G_r(s)$  es la función de transferencia en lazo cerrado. Aplicando el criterio

Tabla 3.1: Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para  $K_e = 0$  (Posición - Posición)

$s_2$	0,0118	0,16( $K_{pm} + K_{ps}$ )
$s_1$	2,861	
$s_0$	0,16( $K_{pm} + K_{ps}$ )	

de estabilidad de Routh-Hurwitz (Tabla 3.1), el cual establece que para que el sistema sea estable no deben presentarse cambios de signo en la primera columna, se comprueba que el sistema es estable para todos los valores **positivos** de  $K_{pm}$  y  $K_{ps}$ .

- $K_e = \infty$ :

$$G_r(s) = \frac{M(s)}{1 + M(s) \frac{K_{pm}}{1 + K_{ps}S(s)}} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s + 0,16K_{pm}} \quad (3.4)$$

Aplicando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz (Tabla 3.2) se comprueba

Tabla 3.2: Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para  $K_e = \infty$  (Posición - Posición)

$s_2$	0,0118	0,16 $K_{pm}$
$s_1$	2,861	
$s_0$	0,16 $K_{pm}$	

que el sistema es estable para todos los valores **positivos** de  $K_{pm}$ .

### 3.1.1. Simulación del Sistema

Con el fin de comprobar el funcionamiento del sistema se ha diseñado un regulador PD para controlar tanto al maestro ( $K_{pm}$ ) como el esclavo ( $K_{ps}$ ). Se podría pensar que el regulador PID sería una mejor opción, pero la acción integral no es recomendable por varias razones, entre ellas las siguientes:

- La intención no es sólo que el regulador fuerce al sistema a ir a la posición deseada, sino que también refleje las fuerzas de la forma más clara y real posible. Con este fin, no tiene ningún sentido que ante un error de posición constante, la salida de

nuestro controlador aumente y con ello aumenten las fuerzas que se representan en el maestro, tiene más sentido que estas sean constantes pues las fuerzas a las que esta sometido el esclavo en este caso particular son constantes.

- Al ser un proceso con gran cantidad de no linealidades (p. ej. los choques del esclavo contra el entorno) habría que incluir un Wind-Up, ya que si no se controla la acción integral se perjudicaría mucho el sistema.

Para el diseño del regulador se ha considerado cada motor de manera independiente y dado que son idénticos se tiene:

$$M(s) = S(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s} \quad (3.5)$$

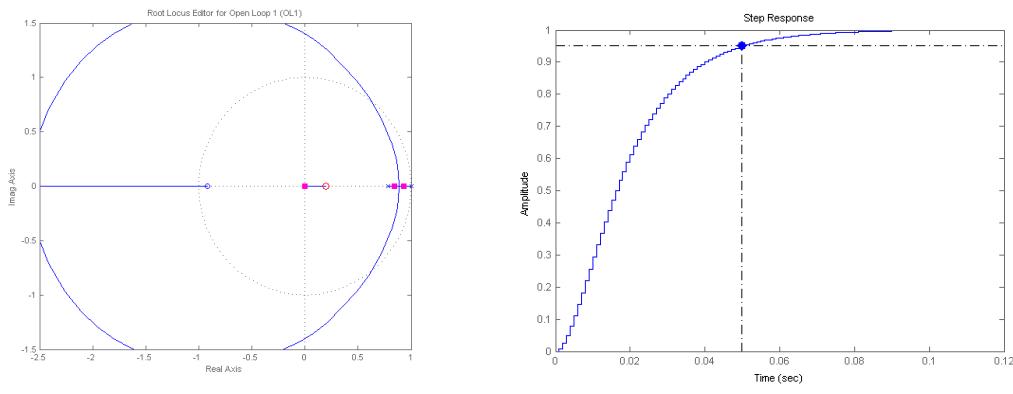
Teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo es  $T = 1$  ms, la ecuación (3.5) se discretiza como:

$$M(z) = S(z) = \frac{\theta(z)}{F(z)} = \frac{6,2634 \cdot 10^{-6}(z + 0,9224)}{(z - 1)(z - 0,7847)} \quad (3.6)$$

Utilizando la `rtool` de MATLAB y definiendo las siguientes especificaciones:

$$M_p \leq 10\% \quad t_s \leq 50\text{ms} \quad e_p = 0$$

Se ha diseñado un regulador PD que permitirá controlar en posición cada motor. En la figura 3.7 se muestra el lugar de las raíces resultante así como la respuesta del sistema en lazo cerrado ante entrada escalón unitario.



(a) Lugar de las raíces

(b) Respuesta ante entrada escalón unitario

Figura 3.7: Respuesta del PD diseñado para control en posición de cada motor

La función de transferencia de dicho regulador es:

$$R(z) = \frac{K(z - c_d)}{z} = \frac{1100(z - 0,2)}{z} \quad (3.7)$$

Se ha comprobado el funcionamiento del sistema en su conjunto en el modelo de SIMULINK que se muestra en la figura 3.8. En la figura 3.9 se muestran los resultados

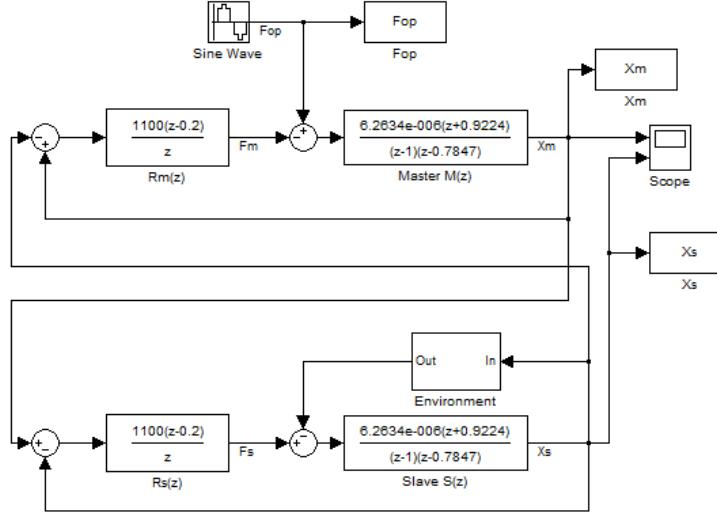


Figura 3.8: Esquema de control Posición - Posición en Simulink

obtenidos para los casos extremos que se han planteado.

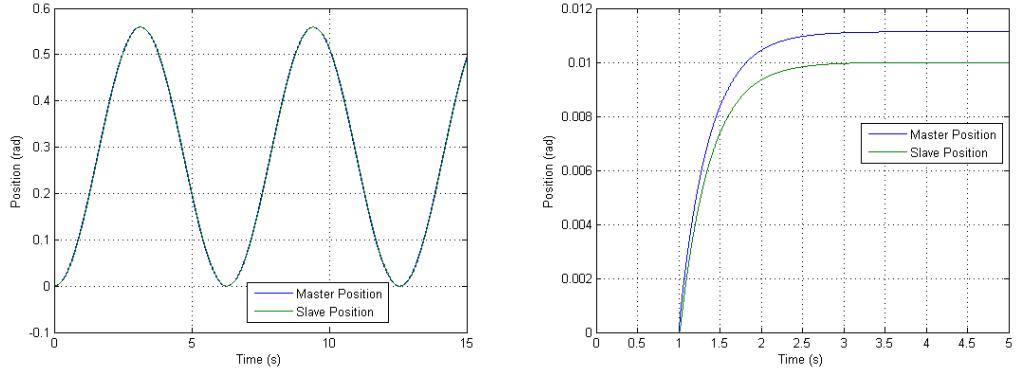


Figura 3.9: Simulación del control Posición - Posición

### 3.1.2. Experimentos

Con el regulador diseñado se han realizado experimentos para comprobar el funcionamiento del sistema.

- Movimiento libre: En la figura 3.10a se muestra como en el movimiento libre el maestro y el esclavo tienen la misma posición con error prácticamente nulo. Respecto a la fuerza percibida por el operador se aprecia que a pesar de estar en

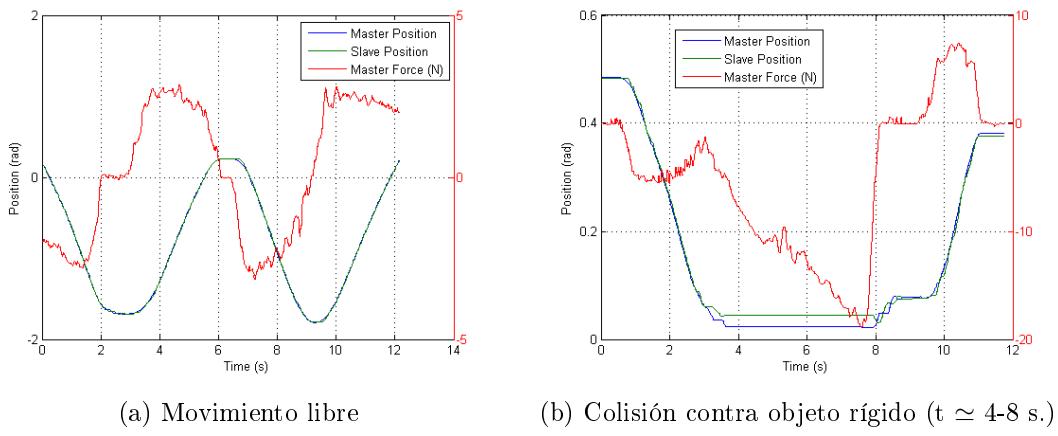


Figura 3.10: Resultados experimentales del control Posición - Posición

movimiento libre es necesario realizar hasta  $3N$  para modificar la posición del sistema.

- Colisión: En la figura 3.10b se puede observar como durante el periodo de tiempo comprendido entre 4 y 8 segundos hay un error significativo en la posición. Además por la lectura de fuerza se puede ver que el pico de fuerza realizado por el operador alcanza los -19 Newtons.

### 3.2. Control Fuerza - Posición

En esta sección se realiza en primer lugar un análisis teórico de la estabilidad y de la percepción por parte del operador en este tipo de algoritmo en sus casos extremos:

- Espacio libre: La impedancia del entorno es nula ( $K_e = 0$ ), el esclavo se mueve libremente, y la única fuerza externa que actúa sobre el sistema es la del operador sobre el maestro.
- Contacto con un objeto rígido: El esclavo está en contacto con un entorno rígido ideal ( $K_e = \infty$ ).

Posteriormente se presentan algunos resultados obtenidos en la plataforma experimental. En la figura 3.11 se muestra la arquitectura en cuestión. Con el fin de analizar los casos extremos y como serán percibidos por el operador es necesario simplificar este diagrama de bloques reemplazando el valor de  $K_e$ .

En la figura 3.12 se muestran los diagramas simplificados así como las funciones de transferencia resultantes en los casos extremos.

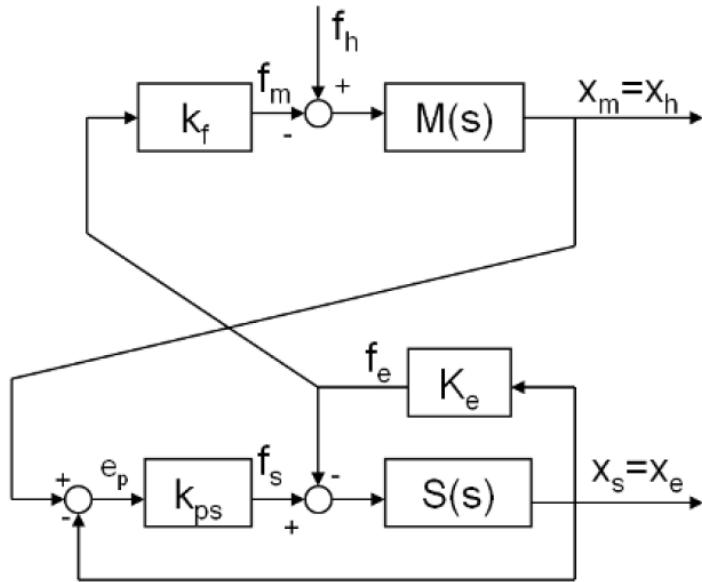


Figura 3.11: Arquitectura de control Fuerza - Posición

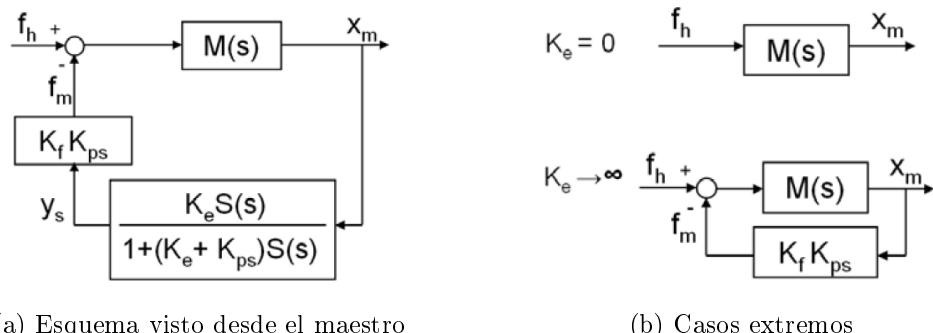


Figura 3.12: Diagrama de bloques para los casos extremos del control Fuerza - Posición

No es necesario entrar en el detalle de los modelos del maestro y esclavo para intuir la percepción por parte del operador:

- $K_e = 0$ : No hay  $H(s)$ . Con lo cual el operador no percibirá ninguna fuerza por la interacción con el entorno sino solamente las inherentes a la masa e inercia del maestro (dinámica del maestro  $M(s)$ ).
- $K_e \rightarrow \infty$ :  $H(s)$  esta dada por  $K_f K_{ps}$  con lo cual la máxima impedancia que percibirá el operador esta determinada por el regulador (P, PD, etc.) del esclavo ( $K_{ps}$ ) y el factor con el que se refleja la fuerza  $K_f$ .

En lo que concierne a la estabilidad de este sistema se puede analizar también en los casos extremos. En aras de la sencillez se considerará el caso en que el regulador  $K_{ps}$  y el factor  $K_f$  son proporcionales. Retomando el modelo del sistema de la ecuación (3.2)

y aplicando la relación para expresarlo en función de la fuerza tenemos:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{4,5552}{0,0118s^2 + 2,8607s} \cdot \frac{0,16}{R_t K_t} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s} \quad (3.8)$$

- $K_e = 0$ : Tenemos un lazo abierto de un sistema que es estable, y por lo tanto tendremos una salida acotada.
- $K_e = \infty$ : La ecuación en del sistema realimentado será:

$$G_r(s) = \frac{M(s)}{1 - M(s)K_{ps}K_f} = \frac{0,16}{0,0118s^2 + 2,861s + 0,16(K_f + K_{ps})} \quad (3.9)$$

Aplicando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz (Tabla 3.3) se comprueba

Tabla 3.3: Tabla del criterio de Routh-Hurwitz para  $K_e = \infty$  (Fuerza - Posición)

$s_2$	0,0118	0,16( $K_f + K_{ps}$ )
$s_1$	2,861	
$s_0$	0,16( $K_f + K_{ps}$ )	

que el sistema es estable para todos los valores **positivos** de  $K_f$  y  $K_{ps}$ .

### 3.2.1. Simulación del Sistema

En esta sección se utilizará el regulador obtenido en el numeral 3.1.1, correspondiente a la ecuación (3.7).

Se ha comprobado el funcionamiento del sistema en su conjunto en el modelo de SIMULINK que se muestra en la figura 3.13. En la figura 3.14 se muestran los resultados

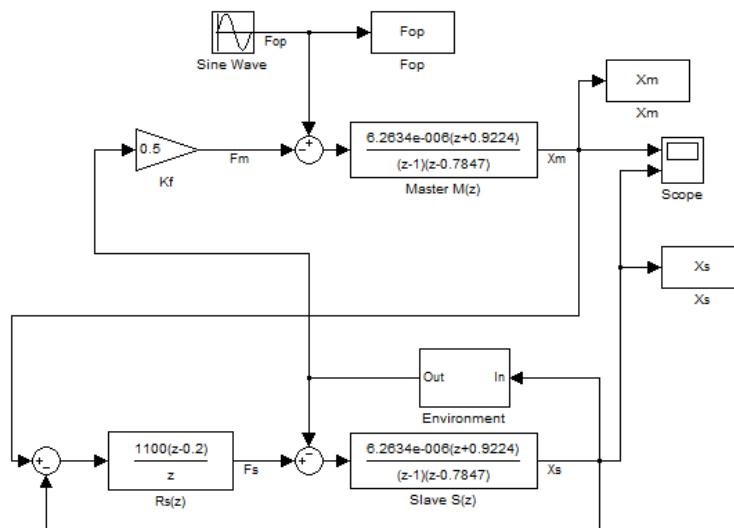
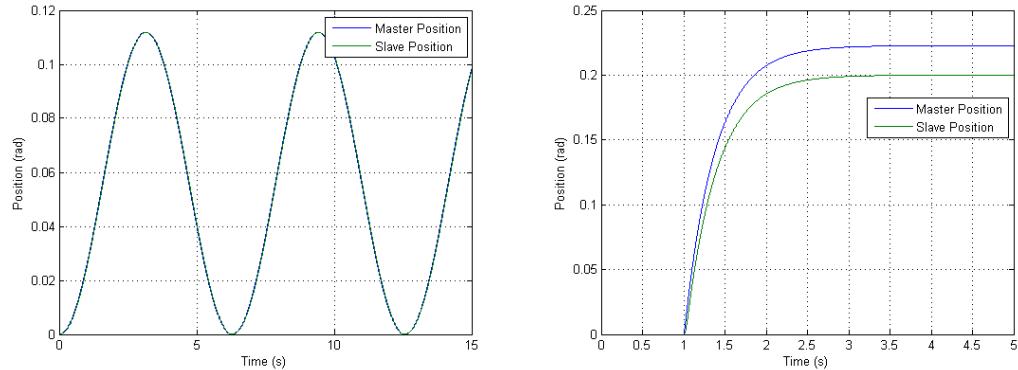


Figura 3.13: Esquema de control Fuerza - Posición en Simulink

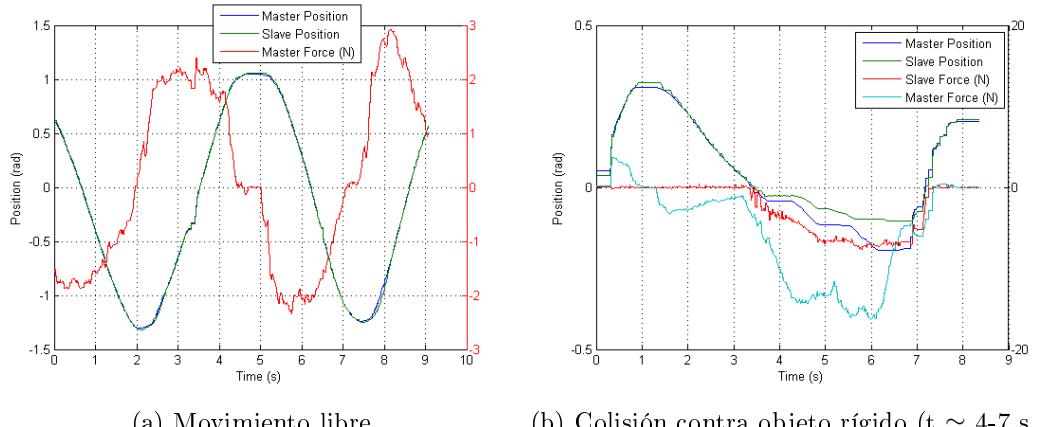
obtenidos para los casos extremos que se han planteado.


 (a)  $K_e = 0$ , entrada sinusoidal

 (b)  $K_e = 100$ , entrada escalón unitario

Figura 3.14: Simulación del control Fuerza - Posición

### 3.2.2. Experimentos



(a) Movimiento libre

 (b) Colisión contra objeto rígido ( $t \approx 4-7$  s. )

Figura 3.15: Resultados experimentales del control Fuerza - Posición

Con el regulador diseñado se han realizado experimentos para comprobar el funcionamiento del sistema.

- Movimiento libre: En la figura 3.15a se muestra como en el movimiento libre el maestro y el esclavo tienen la misma posición con error prácticamente nulo. Respecto a la fuerza percibida por el operador se aprecia que a pesar de estar en movimiento libre es necesario realizar hasta 3N para modificar la posición del sistema, aunque si se compara con el caso del control Posición - Posición (Numeral 3.1.2) el rango de posiciones alcanzadas es mayor.
- Colisión: En la figura 3.15b se puede observar como durante el periodo de tiempo comprendido entre 4 y 7 segundos hay un error significativo en la posición. Además por la lectura de fuerza se puede ver que el pico de fuerza realizado por el operador

alcanza los 17N y por otro lado la fuerza realizada por el esclavo en el entorno no supera los 8N.

### 3.3. Arquitectura de Cuatro Canales

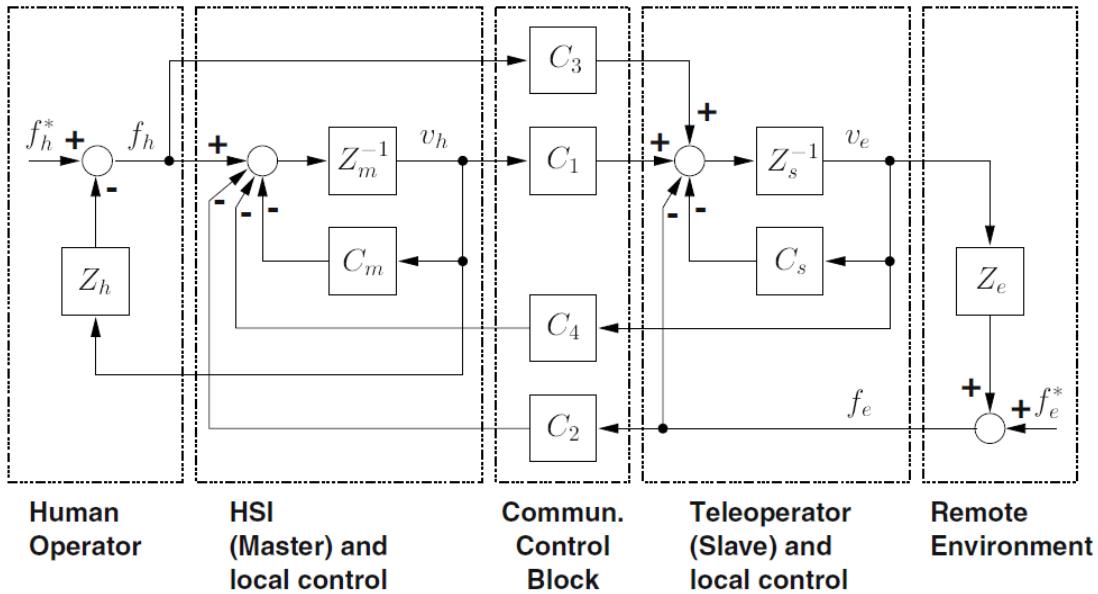


Figura 3.16: Arquitectura de control de 4 Canales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al utilizar la arquitectura de cuatro canales (figura 3.16) en la plataforma experimental de la figura 3.1.

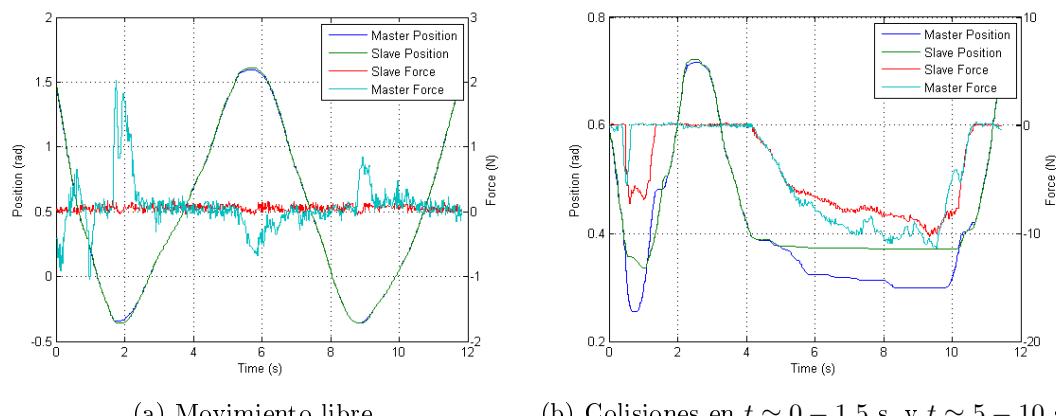


Figura 3.17: Resultados experimentales de la Arquitectura de Cuatro Canales

Se han realizado experimentos en los casos extremos que se han mencionado anteriormente:

- Movimiento libre ( $Z_e = 0$ ): En la figura 3.17a se muestra como en el movimiento libre el maestro y el esclavo tienen la misma posición con error prácticamente nulo. Respecto a la fuerza que el operador debe realizar para modificar la posición del sistema, se aprecia que tan solo es necesario aplicar fuerza cuando se cambia la dirección del movimiento y aún así la fuerza requerida es del orden de 1N. Si se comparan estos resultados con aquellos obtenidos con Posición - Posición (Fig. 3.10a) y con Fuerza - Posición (Fig. 3.15a) salta a la vista que la arquitectura de cuatro canales permite una mejor percepción del entorno.
- Colisión ( $Z_e = \infty$ ): En la figura 3.17b se muestran los resultados de dos colisiones con un entorno rígido. En  $t \approx 0 - 1,5$  seg. se puede advertir que la colisión se ha realizado a una velocidad elevada, con lo cual el sistema permite un error de posición elevado y a la hora de corregir se presenta una oscilación. Por otra parte, en  $t \approx 5 - 10$  seg., se observa una colisión a baja velocidad y en la que el operador realiza una fuerza sostenida sobre el maestro. Es interesante observar como la fuerza que realiza el esclavo sobre el entorno es transmitida de manera casi exacta al operador, con lo cual se puede afirmar que para este caso extremo la arquitectura de cuatro canales también ofrece una mejor percepción del entorno en comparación con Posición - Posición (Fig. 3.10b) y con Fuerza - Posición (Fig. 3.15b).

### 3.4. Control por Convergencia de Estados

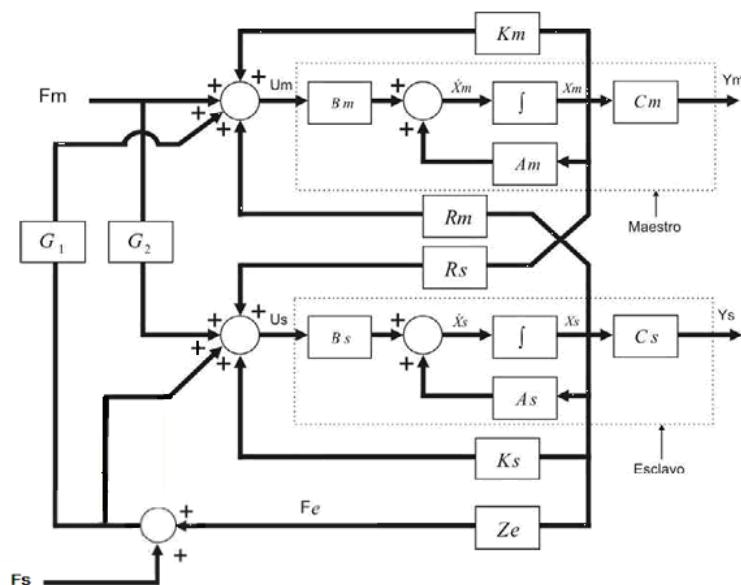


Figura 3.18: Control por Convergencia de Estados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al utilizar el control por convergencia de estados (figura 3.18) en la plataforma experimental de la figura 3.1.

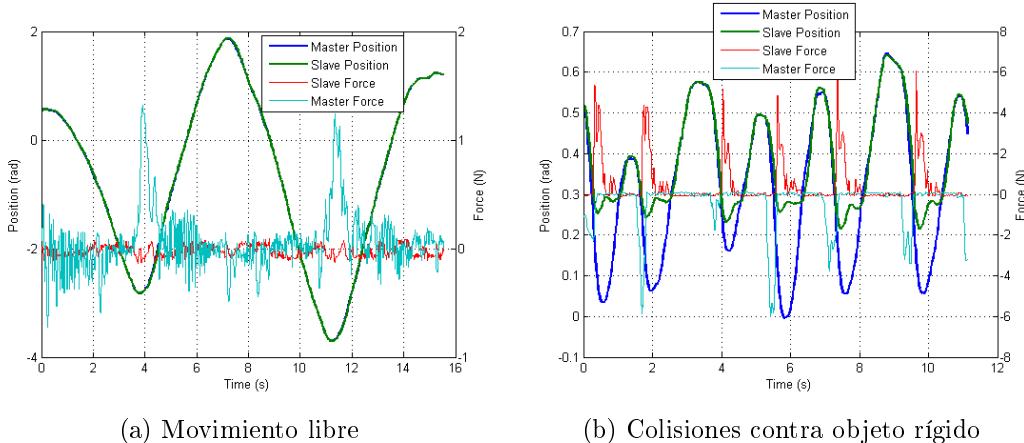


Figura 3.19: Resultados experimentales del control por Convergencia de Estados

Se han realizado experimentos en los casos extremos que se han mencionado anteriormente:

- Movimiento libre ( $Z_e = 0$ ): En la figura 3.19a se muestra como en el movimiento libre el maestro y el esclavo tienen la misma posición con error prácticamente nulo. Respecto a la fuerza que el operador debe realizar para modificar la posición del sistema, se aprecia que tan solo es necesario aplicar fuerza cuando se cambia la dirección del movimiento y aún así la fuerza requerida es del orden de 1N. Si se comparan estos resultados con aquellos obtenidos con la arquitectura de cuatro canales (Fig. 3.17a) salta a la vista que la percepción del entorno es similar pero debido a que tanto el maestro como el esclavo están constantemente corrigiendo el error el sistema es muy sensible al ruido en la medida de la fuerza.
  - Colisión ( $Z_e = \infty$ ): En la figura 3.19b se muestran los resultados de varias colisiones con un entorno rígido. Todas las colisiones son a alta velocidad y la percepción del entorno es buena por parte del operador tal como lo demuestran las medidas de fuerza. Con respecto a los resultados obtenidos con la arquitectura de cuatro canales (Fig. 3.17b) se puede decir que el control por convergencia de estados se comporta mejor en colisiones en velocidad pero aún así el ruido que inducen los sensores de fuerza en la arquitectura hacen que la estabilidad del sistema sea afectada.

## Capítulo 4

# Diseño y Construcción de la Plataforma Abierta de Teleoperación

En este capítulo se presenta la plataforma abierta de teleoperación desarrollada en el marco de este trabajo. Esta plataforma [56] se ha realizado con la intención de contar con un medio experimental en el que se pueda implementar y evaluar el rendimiento de diferentes arquitecturas de control para teleoperación y los distintos algoritmos desarrollados en este trabajo fin de máster.

El diseño de la plataforma experimental se ha realizado tomando como punto de partida los dispositivos existentes en el grupo de investigación. La realización de una plataforma experimental requiere de un gran esfuerzo en recursos y equipos, con lo cual debe ser totalmente abierta para que no solo permita comprobar experimentalmente los algoritmos presentados en este trabajo, sino que también sea útil para realizar otros tipos de trabajos e investigaciones en el área de teleoperación.

Este capítulo comienza con la descripción de los distintos dispositivos disponibles, luego se presentan los requisitos establecidos para el diseño y construcción de la plataforma planteada; posteriormente, se explica la arquitectura de la plataforma experimental lograda y se detallan las variantes desarrolladas.

### 4.1. Dispositivos Existentes

El punto de partida de la plataforma de teleoperación ha sido el Telemanipulador comercial GRIPS [57] de Kraft Telerobotics Inc. Este es un manipulador de propósito general

de tipo maestro - esclavo, diseñado para operar bajo el agua o en ambientes hostiles. Los movimientos ejercidos en el brazo maestro son reproducidos en el robot esclavo. Se caracteriza porque utiliza la arquitectura de control Fuerza - Posición discutida en la sección 3.2, con lo cual el sistema mediante el maestro refleja fuerzas (alrededor del 10 %) al operador para que pueda tener una mejor percepción de la interacción del esclavo con el entorno. La reflexión de fuerzas es posible gracias a que maestro cuenta con motores eléctricos en sus primeras cinco (5) articulaciones. Gracias a la reflexión de fuerzas el operador es capaz de realizar operaciones más complejas [58, 59].

Los componentes del sistema comercial son los siguientes:

- Esclavo
- Maestro
- Sistemas de control
- Canal de comunicaciones

En la figura 4.1 se muestra un esquema general con la arquitectura del sistema GRIPS.

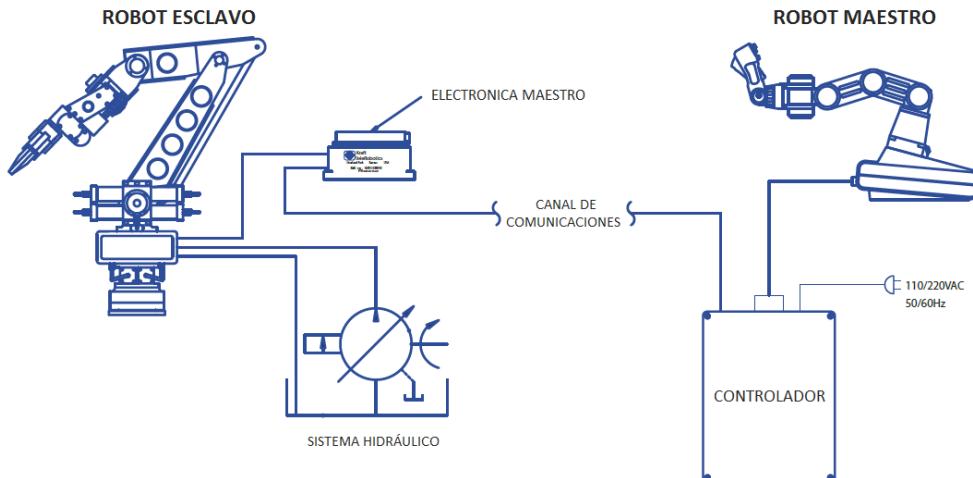


Figura 4.1: Esquema del telemanipulador GRIPS de Kraft Telerobotics Inc.

#### 4.1.1. Robot Esclavo

El robot esclavo, mostrado en la figura 4.2, es un brazo electro-hidráulico de seis (6) grados de libertad con una pinza como efecto final. En la tabla 4.1 se muestran sus especificaciones.

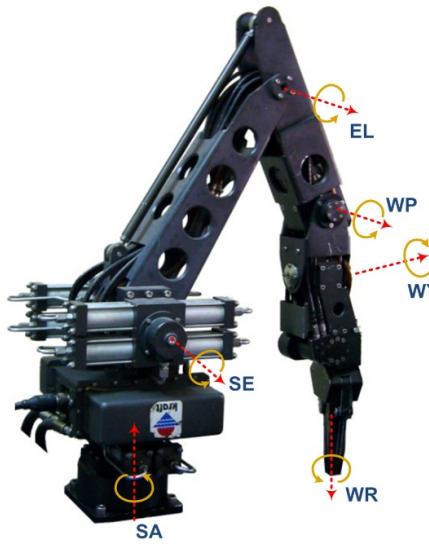


Figura 4.2: Esclavo con sus grados de libertad. GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc.

Tabla 4.1: Especificaciones del robot esclavo GRIPS

Alcance horizontal	1289 mm
Alcance vertical	1566 mm
Altura de almacenamiento	877 mm
Capacidad de carga máxima	82 Kg
Capacidad de extendido	45 Kg
Grados de libertad	6 + el gripper
Torque de rotación de la muñeca	20 N · m
<b>Efecto final</b>	Gripper paralelo
Apertura	100 mm
Fuerza de agarre	0-890 N
<b>Rango de las articulaciones</b>	
SA - Shoulder azimut	180°
SE - Shoulder elevation	120°
EL - Elbow pivot	110°
WP - Wrist pitch	100°
WY - Wrist yaw	10°5
WR - Wrist rotate:	
Modo 1 (Esclavo)	180°
Modo 2 (Continuo)	0-40 rpm
<b>Peso</b>	
En el aire	59 Kg
En el agua	41 Kg
<b>Requisitos Hidráulicos</b>	
Presión nominal	104-207 bar
Caudal nominal	11 lpm
Filtración (absoluta)	25 micrones
Línea de presión	No. 6 JIC
Línea de retorno	No. 8 JIC

La distribución de los actuadores permiten tres movimientos de brazo, tres movimientos de muñeca y la función de agarre de la pinza. Todos los movimientos, con excepción de la rotación de la muñeca (WR) y el cierre de la pinza, son transmitidos utilizando actuadores tipo piñón - cremallera. El actuador de WR esta compuesto por un pistón tipo motor junto a una reductora con lo cual es posible realizar la rotación continua. Un pistón es utilizado para abrir y cerrar la pinza.

Cada uno de los actuadores es controlado por una servoválvula. Todas las servoválvulas hidráulicas hacen parte integral del manipulador, con lo cual se elimina la necesidad de varias líneas hidráulicas. Además de las siete (7) servoválvulas que controlan los actuadores, un valvula reductora de presión y una válvula solenoide complementan el sistema. La válvula solenoide es utilizada para encender/apagar la alimentación hidráulica mientras que por otro lado, la válvula reductora de presión permite el uso de alimentaciones hidráulicas de hasta 207 bar (3000 psi). Las características de las servoválvulas se recogen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características de las servoválvulas del esclavo

Descripción	Valor	Unidades
Caudal Nominal	1,5	gpm
$\Delta P$	1000	psi
Presión Nominal	1500	psi
Impedancia Bobina	125	$\Omega$
Corriente Bobina	20	mA

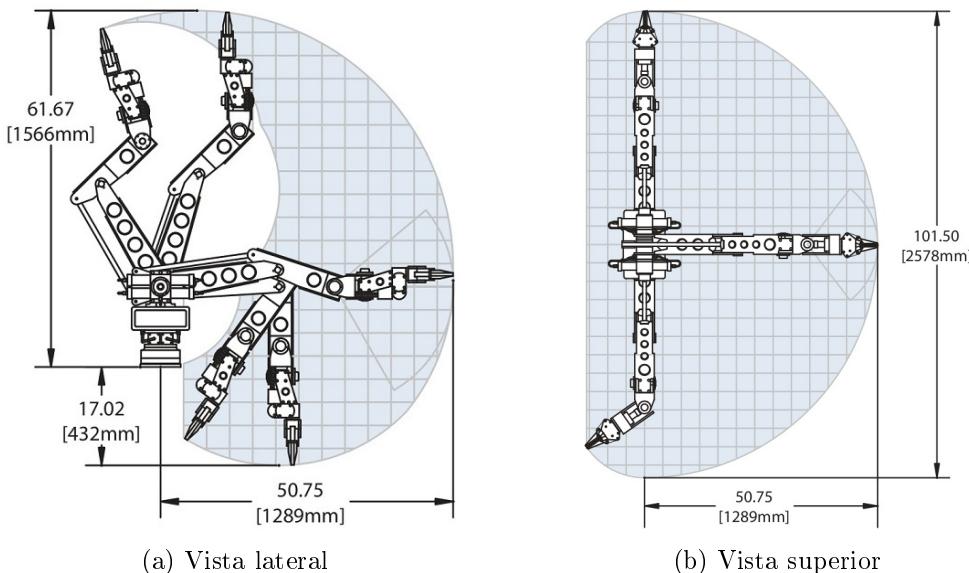


Figura 4.3: Espacio de trabajo del robot esclavo GRIPS

La posición del robot se puede determinar gracias a los seis (6) potenciómetros acoplados a cada grado de libertad. La fuerza ejercida por cada articulación y la pinza, con excepción de WR, es estimada por seis (6) transductores de presión localizados en el colector de las válvulas. Las medidas obtenidas con estos transductores tienen suficiente precisión como para cerrar lazos de control [60].

El manipulador tiene un área de trabajo de  $180^\circ$  en el plano horizontal cubriendo las distancias comprendidas entre su base y los 1289 mm respecto de su eje de rotación de azimut en el hombro tal como se muestra en la figura 4.3.

#### 4.1.2. Robot Maestro

El robot maestro, mostrado en la figura 4.4, es cinemáticamente similar al robot esclavo con tres movimientos de brazo y tres de muñeca. Dos contrapesos son utilizados para compensar el robot en las articulaciones SE y EL. Dispone de potenciómetros en cada una de las articulaciones (seis en total) con lo cual es posible obtener su posición. Adicionalmente, sus cinco primeros ejes (SA, SE, EL, WY, WP) son actuados eléctricamente para reflejar fuerza al operador así como capacidades de sincronización con el robot esclavo. Un potenciómetro en la mano permite realizar un control proporcional de la fuerza de cierre de la pinza del robot esclavo. Pulsadores adicionales en la pistola controlan el modo de rotación de la muñeca (esclavo o continuo), el bloqueo de la pinza y el bloquear o continuar de la posición del esclavo y maestro, ver figura 4.5a.



Figura 4.4: Maestro con sus grados de libertad. GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc.

Un pulsador ubicado en la base del maestro (fig. 4.5b) controla el encendido de la hidráulica. Tres LEDs localizados ubicados en el antebrazo del maestro (fig. 4.5c) indican el estado del bloqueo de la pinza (*Grip Lock*), el modo de rotación de la muñeca (*Cont Wrist*) y si el sistema esta bloqueado (*Halt*). Un LED ubicado justo al lado del pulsador de encendido de la hidráulica (fig. 4.5b) indica su estado.



Figura 4.5: Pulsadores, leds y potenciómetros del maestro GRIPS

Es importante mencionar que la diferencia cinemática entre el maestro y el esclavo consiste en que dos grados de libertad se encuentran mecánicamente cambiados. Esto se puede identificar observando las figuras 4.2 y 4.4.

## 4.2. Requisitos

El objetivo planteado es la realización de una estación de teleoperación abierta que ofrezca la posibilidad de realizar distintos desarrollos e investigaciones en diversas áreas de la teleoperación o asociadas a ella. A su vez es necesario hacer uso de los dispositivos existentes en el laboratorio que se mencionan en el apartado 4.1

En resumen, los requisitos operativos a destacar son:

- Esta plataforma debe ser totalmente abierta, con una arquitectura modular de manera que sus distintos componentes puedan ser reconfigurados para ser usados de distintas maneras y a su vez puedan llevarse a cabo distintos tipos de tareas. Debe tener una alta capacidad de cómputo de tal manera que se puedan implementar distintos tipos de control.
- Debe tener una alta capacidad de cómputo de tal manera que se puedan implementar distintos tipos de control.
- Debe hacer uso de los dispositivos disponibles en el laboratorio.
- Debe corresponderse con una solución robusta.
- Los sensores disponibles deben proporcionar de forma correcta información sobre el estado de los dispositivos utilizados, principalmente, posiciones y velocidades.

- Los equipos encargados del procesamiento y tratamiento de la información deben procesar la lectura de los sensores, ejecutar los diferentes algoritmos de control así como gestionar las comunicaciones.

## 4.3. Desarrollo Electrónico

Antes de conectar las señales provenientes de los robots maestro y esclavo, es necesario en primer lugar realizar un acondicionamiento de las señales teniendo en cuenta las características de las tarjetas de entradas y salidas digitales y analógicas. Además se debe tener en cuenta la cantidad de señales asociadas a los dispositivos así como su tipo.

En las tablas 4.3 y 4.4 se recogen de manera detallada todas las señales involucradas en el caso de los robots maestro y esclavo GRIPS.

### 4.3.1. Tarjeta de Acondicionamiento para el Maestro

Como se mencionó anteriormente el dispositivo maestro cuenta 8 potenciómetros como sensores para determinar las posiciones, 8 entradas/salidas digitales para interactuar con el usuario, y 5 motores bifásicos AC que son los encargados de reflejar la fuerza al operador.

#### 4.3.1.1. Entrada Analógicas

Los potenciómetros son los encargados de la lectura de las posiciones, los mismos están conectados de acuerdo al diagrama que se ve en la figura 4.6, de allí se puede ver que las señales tienen un rango máximo de  $\pm 10$  Voltios, con lo cual todas las señales analógicas pueden ser leídas directamente por los Convertidores Analógicos Digitales del controlador.

De la lectura de los potenciómetros, es importante mencionar que cada articulación tiene un rango máximo de funcionamiento, el cual depende del rango de trabajo mecánico del dispositivo, pero todos estos rangos se encuentran dentro de  $\pm 10$  Voltios.

#### 4.3.1.2. Salidas Analógicas

El dispositivo Maestro es el encargado de reflejar las fuerzas al operador a través de motores bifásicos AC. Los mismos son motores especiales, pero su funcionamiento es sencillo, de acuerdo al diagrama de la figura 4.7.

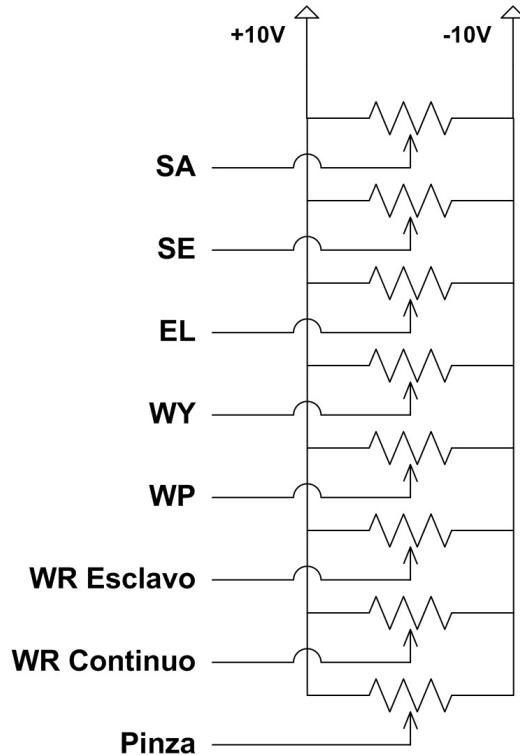


Figura 4.6: Diagrama de conexión de los potenciómetros del maestro

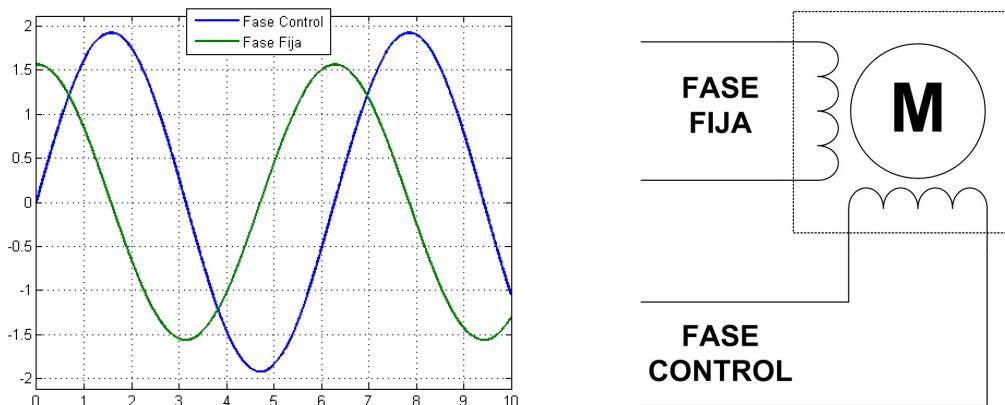


Figura 4.7: Diagrama de conexión de los motores del maestro

Del diagrama se puede observar que el par entregado por el motor depende de la magnitud de las señales de ambas fases, mientras que el sentido de giro depende de la fase de la señal de control. Si la fase de control se adelanta 90 grados a la fase fija el motor gira en un sentido, mientras que si la fase de control se atrasa 90 grados el motor gira en sentido contrario.

Tabla 4.3: Listado de señales del robot maestro

TAG	ORIGEN	DESCRIPCIÓN	TIPO SEÑAL			SEÑAL		
			DI	DO	AI	AO		
MAS-MSA	Maestro, Motor SA	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-MSE	Maestro, Motor SE	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-MEL	Maestro, Motor EL	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-MWY	Maestro, Motor WY	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-MWP	Maestro, Motor WP	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-RSA	Maestro, Motor SA	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-RSE	Maestro, Motor SE	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-REL	Maestro, Motor EL	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-RWY	Maestro, Motor WY	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-RWP	Maestro, Motor WP	Ref Motor, Salida Analógica, ±10V	Comando			1		
MAS-PSA	Maestro, Potenciómetro SA	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PSE	Maestro, Potenciómetro SE	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PEL	Maestro, Potenciómetro EL	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PWY	Maestro, Potenciómetro WY	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PWP	Maestro, Potenciómetro WP	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PWR1	Maestro, Potenciómetro WR1	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PWR2	Maestro, Potenciómetro WR2	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-PGRP	Maestro, Potenciómetro Gripper	Potenciómetro Alimentado ±10V	Medida			1		
MAS-SHALT	Maestro, Pulsador Halt / Resume	Pulsador Sostenido	Pulsador			1		
MAS-SHYD	Maestro, Pulsador Hidráulica	Pulsador	Pulsador			1		
MAS-SWR	Maestro, Pulsador Wrist Mode	Pulsador	Pulsador			1		
MAS-SGRP	Maestro, Pulsador Gripper Lock	Pulsador	Pulsador			1		
MAS-LGRP	Maestro, Led Gripper Lock	Indicación, Led 5V, 15mA	Led			1		
MAS-IWR	Maestro, Led Wrist Mode	Indicación, Led 5V, 15mA	Led			1		
MAS-LHALT	Maestro, Led Halt / Resume	Indicación, Led 5V, 15mA	Led			1		
MAS-LHYD	Maestro, Led Hidráulica	Indicación, Led 5V, 15mA	Led			1		
			<b>TOTAL</b>	4	4	8	10	

Tabla 4.4: Listado de señales del robot esclavo

TAG	ORIGEN	DESCRIPCIÓN	TIPO SEÑAL			SEÑAL		
			DI	DO	AI	AO		
SLA-VSA	Esclavo, Servo-Valvula SA	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VSE	Esclavo, Servo-Valvula SE	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VEL	Esclavo, Servo-Valvula EL	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VWY	Esclavo, Servo-Valvula WY	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VWP	Esclavo, Servo-Valvula WP	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VWR	Esclavo, Servo-Valvula WR	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-VGRIP	Esclavo, Servo-Valvula Gripper	Salida Analógica, ±10V, 200mA	Comando				1	
SLA-PSA	Esclavo, Potenciómetro SA	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-PSE	Esclavo, Potenciómetro SE	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-PEL	Esclavo, Potenciómetro EL	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-PWP	Esclavo, Potenciómetro WP	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-PWY	Esclavo, Potenciómetro WY	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-PWR	Esclavo, Potenciómetro WR	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TSA	Esclavo, Transductor SA	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TSE	Esclavo, Transductor SE	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TEL	Esclavo, Transductor EL	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TWP	Esclavo, Transductor WP	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TWY	Esclavo, Transductor WY	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-TGR	Esclavo, Transductor GR	Valor de Voltaje ±10V	Medida				1	
SLA-HYD	Esclavo, Solenoide Principal	Electroválvula, +24V, 1A	Comando				1	
<b>TOTAL</b>			0	1	12	7		

#### 4.3.1.3. Entrada y Salidas Digitales

Por ultimo quedan las 8 entradas/salidas digitales que realizan la interfaz con el operador, las mismas son conectadas a 4 leds y 4 pulsadores ubicados en el dispositivo Maestro. La conexión de las señales puede verse en el diagrama de la figura 4.8. El diagrama de funcionamiento de la tarjeta de adaptación de señales del maestro puede ser observado en la figura 4.8.

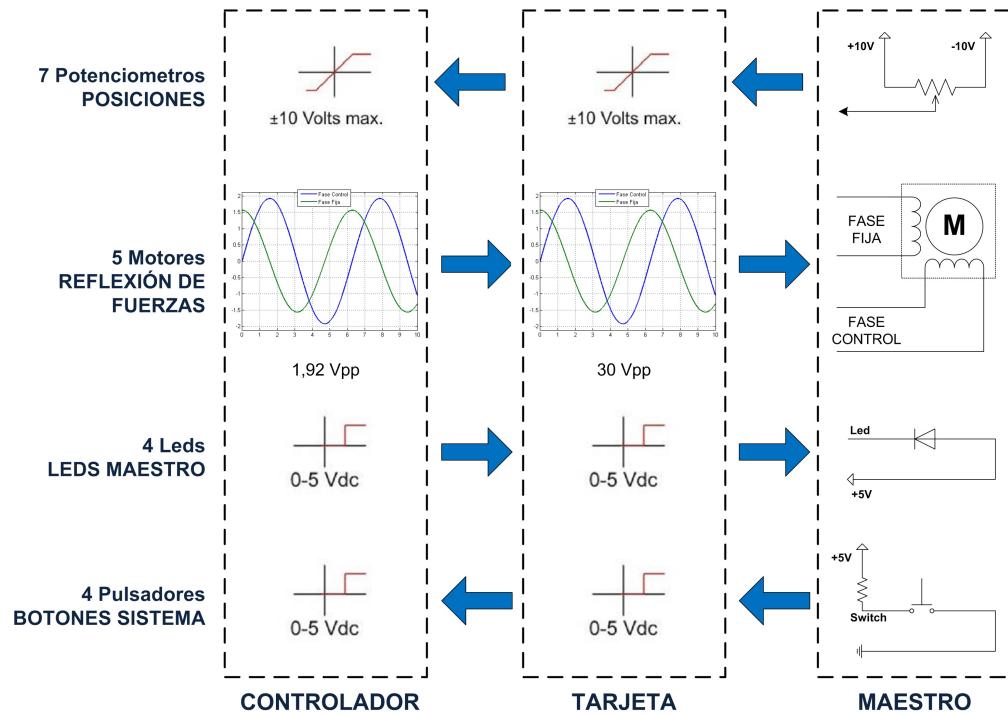
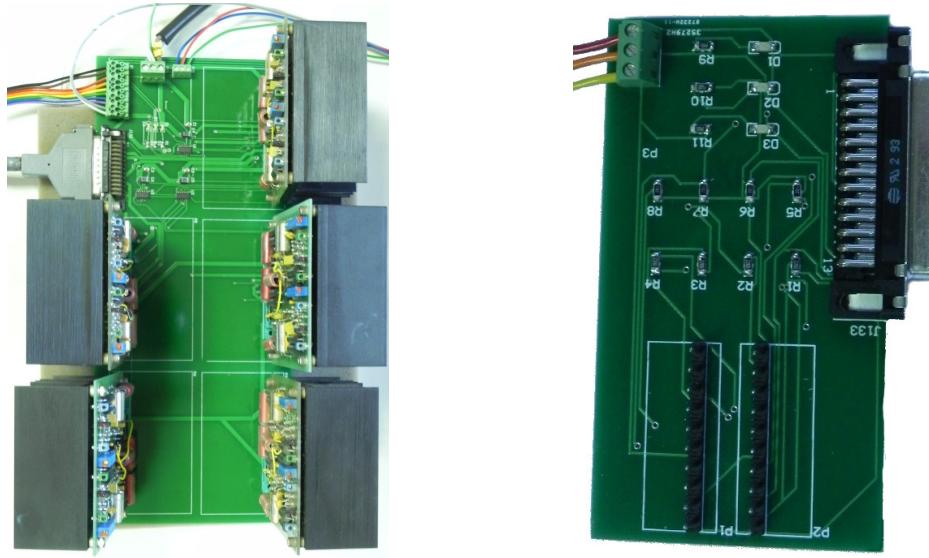


Figura 4.8: Esquema del acondicionamiento de señales del maestro

En la figura 4.9 se muestran las tarjetas del maestro en funcionamiento.

#### 4.3.2. Tarjeta de Acondicionamiento para el Esclavo

El manipulador maestro cuenta con 7 servoválvulas encargadas proporcionar el movimiento a cada grado de libertad más la pinza, 6 potenciómetros como sensores para establecer la posición de cada grado de libertad, 5 transductores de presión para estimar la fuerza aplicada por el manipulador al entorno y un solenoide para activar la alimentación de la hidráulica al manipulador.



(a) Etapa de potencia de los motores

(b) Entradas y Salidas Digitales/Analógicas

Figura 4.9: Tarjetas de acondicionamiento de señales del maestro

#### 4.3.2.1. Entrada Analógicas

Al igual que el dispositivo maestro, el esclavo cuenta con potenciómetros como sensores para la lectura de la posición articular de cada uno de los grados de libertad. De igual manera el rango máximo de funcionamiento es de  $\pm 10$  Voltios, y cada grado de libertad tiene un rango de trabajo propio dentro de ese rango general y depende de la mecánica propia del esclavo.

Es necesario leer también los transductores de presión para saber la fuerza que ejerce el manipulador sobre su entorno o viceversa. Es importante resaltar que resultados experimentales realizados dieron lecturas inferiores a los  $\pm 6$  Voltios, ya que de lo contrario se correría el riesgo de dañar el manipulador o el entorno sobre el cual se está trabajando. Por lo tanto la señal del transductor también puede ser conectada directamente a los ADC usados.

#### 4.3.2.2. Salidas Analógicas

Las salidas analógicas del controlador son usadas en el caso del manipulador esclavo para controlar la apertura de las servoválvulas. El funcionamiento es el siguiente, a mayor magnitud de voltaje mayor es la apertura de la misma, y el signo del mismo determina el sentido de la apertura, es decir a un lado u otro, según sea el caso, tal como se puede observar en la figura 4.10.

Los resultados de pruebas experimentales determinaron que usando un rango de trabajo de  $\pm 10$  Voltios se logra un buen funcionamiento del manipulador.

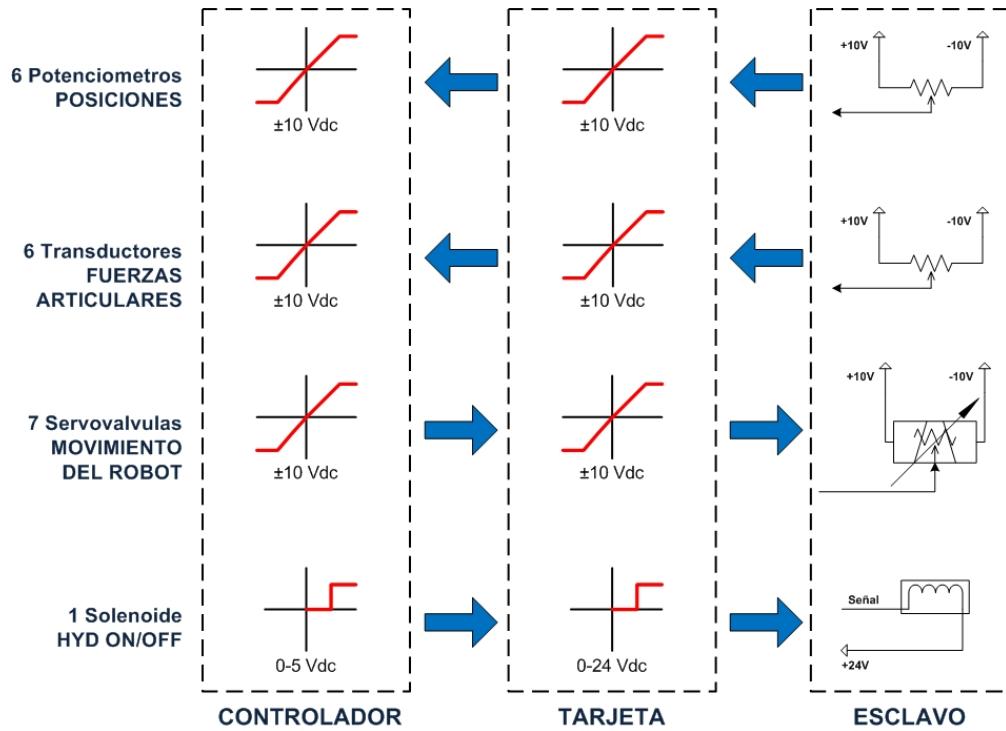


Figura 4.10: Esquema del acondicionamiento de señales del esclavo

#### 4.3.2.3. Salida Digital

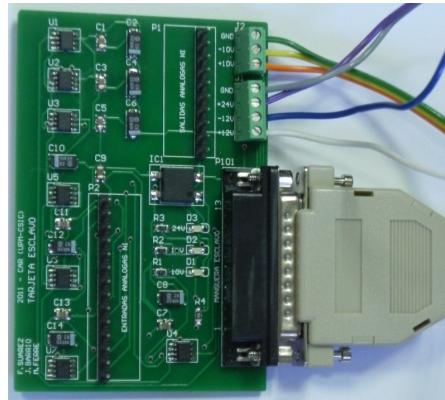


Figura 4.11: Tarjeta de acondicionamiento de señales del esclavo

Finalmente existe una última señal usada en el caso del manipulador esclavo, es una señal de salida digital necesaria para activar la hidráulica del sistema, con lo cual solo es necesario adaptar la señal para entregar más corriente ( $\simeq 0,6$  A) a la hora de accionar el solenoide. El diagrama de funcionamiento de la tarjeta de adaptación de señales del maestro puede ser observado en la figura 4.10.

En la figura 4.11 se muestran la tarjeta del esclavo en funcionamiento.

#### 4.4. Variante con Esclavo Virtual

La plataforma abierta de teleoperación es, como su nombre indica, una plataforma en la cual cada elemento es accesible de forma independiente. En la Figura 4.12 se puede observar el esquema general de la arquitectura.

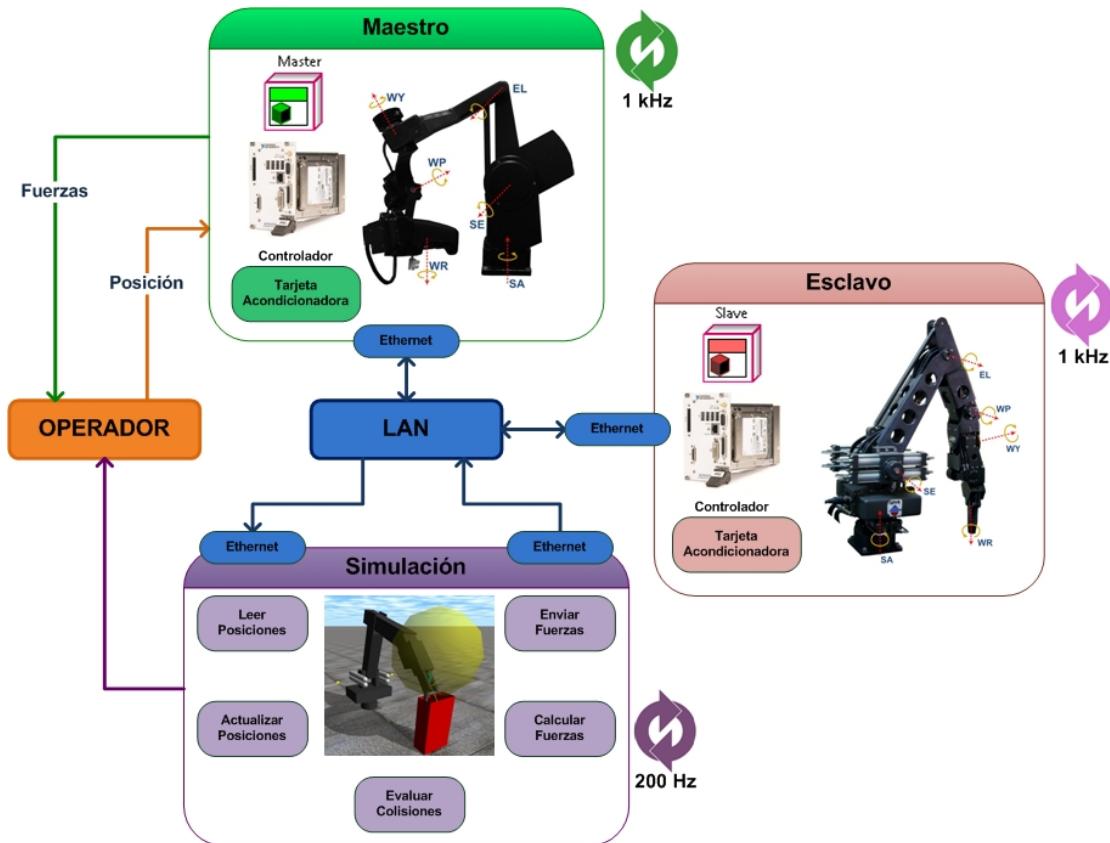


Figura 4.12: Arquitectura de la variante con esclavo virtual

Como se puede observar, el esquema se centra en emplear una red Ethernet de ámbito local para realizar las conexiones entre los diferentes elementos del sistema. Se ha escogido que la red sea local para eliminar así posibles errores y problemas derivados de la presencia de los dispositivos en internet.

El simulador se encuentra conectado a la red y recibe la información de los sensores de tantos elementos maestro o esclavo como estén conectados al sistema. El maestro y el esclavo poseen un control que funciona con una frecuencia de 1kHz que es el responsable de la adquisición de datos y del control de los motores eléctricos en el maestro y de los cilindros hidráulicos en el esclavo.

El bucle de control del simulador funciona a 200Hz, frecuencia suficiente para evaluar las colisiones entre los diferentes objetos del escenario, bien entre el robot esclavo y otros objetos como la cinemática y dinámica de los cuerpos ajenos al robot.

Este sistema permite realizar una integración con el usuario del dispositivo de forma que este genera referencias de posición en los dispositivos maestro y recibe una realimentación mediante la fuerza generada por las interfaces, así como la información visual proporcionada por el simulador.

La arquitectura presentada puede crecer indefinidamente para añadir más dispositivos y para generar más imágenes de forma que se puedan realizar tareas cooperativas entre varios operarios.

#### 4.5. Variante con Esclavo Real

En esta variante, mostrada en la figura 4.13, el sistema funciona tal como se describe en el apartado 4.4, con la diferencia que en este caso no aparece el simulador.

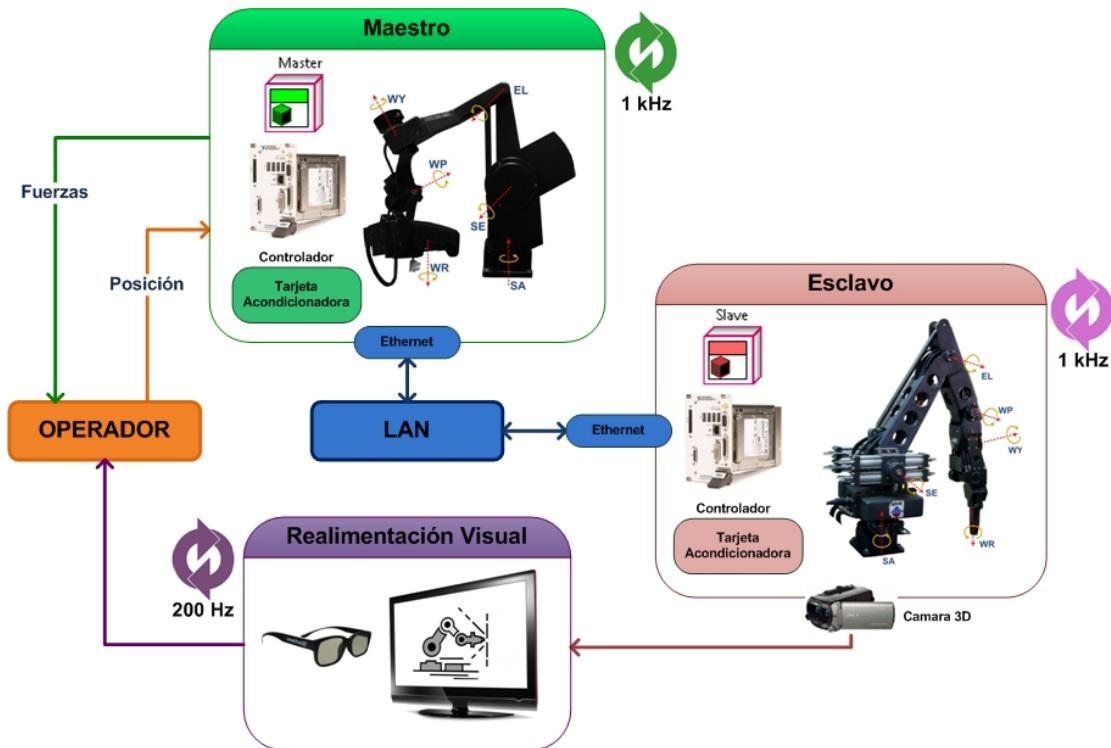


Figura 4.13: Arquitectura de la variante con esclavo real

## Capítulo 5

# Integrando ROS a la Teleoperación: Restricciones Virtuales

La integración de ROS [61] en un sistema de teleoperación puede introducir mejoras y ampliaciones valiosas en las capacidades del sistema siempre y cuando que la realimentación háptica no se vea comprometida. Atributos de ROS como los marcadores interactivos [62], permiten la adición de características versátiles en el espacio de trabajo de un robot, tales como las restricciones virtuales (*Virtual Fixtures*) para indicar un cambio en el modo de control al operador. En este capítulo se realiza un análisis del uso de ROS como un canal de comunicación implementado en un controlador bilateral existente y presenta los resultados obtenidos al utilizar restricciones virtuales, implementadas en ROS, para informar al operador un cambio en el escalado de los movimientos (*zooming*), realizado con el fin de incrementar la precisión del robot esclavo GRIPS descrito en el numeral 4.1.1, sin comprometer la frecuencia de muestreo de 1000 Hz necesaria para cerrar los lazos de control hápticos apropiadamente.

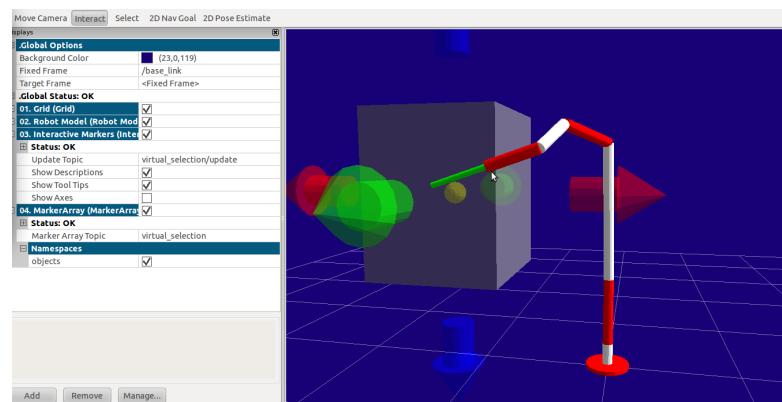


Figura 5.1: Restricción virtual y modelo simplificado del robot esclavo GRIPS. Vizualizador RViz de ROS.

## 5.1. Aplicación

El sistema de teleoperación utilizado en esta aplicación es el descrito en el numeral 4.1. Como ya se menciono, el robot esclavo GRIPS es ampliamente utilizado en la realización de tareas robustas y difiere claramente de otros tipos de telemanipuladores como [63, 64], por lo tanto su uso en la manipulación de objetos pequeños no es ideal. Sin embargo, hay ciertas aplicaciones en las que es deseable combinar la capacidad de manipular grandes cargas e interactuar con objetos pequeños.

### 5.1.1. Tareas de Mantenimiento en Entornos Radioactivos

Varias tareas de mantenimiento en ambientes nucleares se presentan como aplicaciones en las que es deseable combinar la capacidad de manipular grandes cargas e interactuar con objetos pequeños . En este tipo de ambientes hay varias zonas con niveles elevados de radiación [65] en los cuales el ingreso de personas esta prohibido o restringido a un periodo de tiempo mínimo. Es aquí donde los equipos robóticos cobran importancia, evitando la necesidad de enviar trabajadores a realizar tareas de mantenimiento. Si embargo, la solución a implementar debe ser capaz de realizar completamente la tarea ya que si es necesario enviar trabajadores para “rescatar” al robot de una tarea incompleta se eliminarían las ventajas de utilizar robots en un primer lugar.

Tareas de reemplazo de equipos en este entorno, como motores grandes, pueden involucrar tanto manipulación de elementos pesados y tareas de manipulación fina para retirar los tornillos de fijación. Es por esto que un sistema de teleoperación que consiga combinar estas dos características es ideal para este tipo de aplicación.

Durante el desarrollo de una maqueta de este tipo, se encontró que retirar los tornillos de fijación de un motor requiere de un gran esfuerzo por parte del operador, especialmente a la hora de alinear el robot esclavo con el tornillo, ya que pequeños desplazamientos en el maestro se trasladan en movimientos largos, relativos a los tornillos, en el esclavo. Este esfuerzo ha sido atribuido a la necesidad de mantener fijo el maestro para posicionar de manera precisa el robot esclavo.

Mejorar tareas con restricciones en el entorno remoto, el operador y los dispositivos maestro y esclavo es un tema de interés en la investigación de sistemas de teleoperación [66]. Sin embargo, la solución aquí propuesta, se centra en superar las limitaciones del hardware disponible. Es por esto que se plantea que al realizar un escalado del espacio de trabajo del esclavo alrededor de puntos específicos será posible realizar tareas de manipulación fina (retirar los tornillo de fijación en esta tarea) y por lo tanto completar la tarea.

## 5.2. Utilizando ROS para Teleoperación

La viabilidad de utilizar ROS para procesar información transmitida a través del canal de comunicaciones en un sistema teleoperado dependerá de sus prestaciones a la hora de enviar y recibir paquetes de datos dentro de los límites de tiempo que requiere el sistema. El propósito de hacer esto es permitir que la información de las posiciones articulares provenientes tanto del maestro como del esclavo y la información de las fuerzas ejercidas por el esclavo en el entorno sean enviadas desde el controlador a ROS para ser utilizadas en la interacción con la restricción virtual. Por tal motivo, en primer lugar se han realizado pruebas que permitan determinar si es posible usar ROS como canal de comunicación o si es necesario otro enfoque.

### 5.2.1. Arquitectura de Control Utilizada

La arquitectura de control utilizada en el sistema de teleoperación del numeral 4.1 es la Fuerza-Posición, ver el numeral 3.2. En esta arquitectura no se han incluido retrasos en las comunicaciones con lo cual todas las operaciones en fuerza y posición son realizadas en un periodo de tiempo de 1 ms., requerido para mantener el lazo de control de 1kHz. Estudios previos relacionados con la integración de ROS en controladores existentes conservando el desempeño háptico y sin añadir retrasos en las comunicaciones es un tema estudiado [67–70]. Se ha partido de la hipótesis que no es posible evitar los retrasos y por lo tanto el desempeño del sistema de teleoperación se verá afectado [71].

### 5.2.2. ROS como Canal de Comunicación

Con el objetivo de precisar la viabilidad de utilizar ROS como canal de comunicación se ha medido el RTT (*round-trip time*) entre el controlador PXI y el sistema de nodos de ROS (ejecutado en un ordenador Intel® Core™ i3 CPU 540 3.07GHz, 4GB RAM, Ubuntu 11.04, 64 bits).

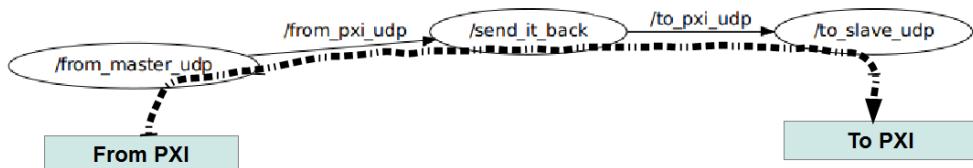


Figura 5.2: Nodos de ROS utilizados en la prueba de RTT

Los nodos de ROS utilizados en esta prueba se muestran en la figura 5.2. Todos ellos se comunican utilizando el paquete UDPROS, el cual utiliza como protocolo de comunicación UDP. Se comprobó que el uso del paquete TCPROS, el cual utiliza ROS de manera predeterminada para comunicar los nodos, y se encontró un alto numero de mensajes perdidos y una tasa de publicación muy baja para los propósitos de este trabajo.

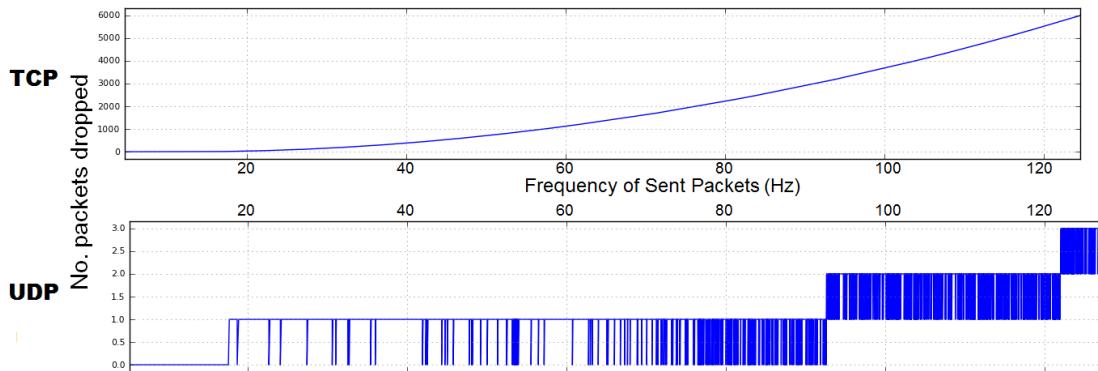


Figura 5.3: Comparación de los mensajes perdidos utilizando TCPROS y UDPROS en un *round trip*.

En la figura 5.3 se muestra una comparación de los resultados obtenidos al utilizar TCPROS y UDPROS al realizar un envío de datos ida y vuelta (*round trip*) entre nodos de ROS publicando en diferentes ordenadores. Un mensaje se ha catalogado como perdido si su respuesta no es recibida antes de enviar el siguiente mensaje. Como se puede observar, en el caso de UDP, los mensajes que llegan tarde no se han tenido en cuenta. A pesar que esta prueba no brinda un análisis completo de todas las diferencias existentes entre estos dos protocolos de comunicación, si que permite afirmar que el uso de TCPROS no sería suficiente para el sistema de teleoperación que funciona a 1kHz ya que la cantidad de mensajes perdidos incrementa exponencialmente cuando la frecuencia es superior a 20Hz.

Por otro lado se ha desarrollado un programa en Labview para emular el canal de comunicaciones entre los lazos de control del maestro y del esclavo, que envía vectores con datos aleatorios, y mide los tiempos de RTT. El flujo de estos datos a través de los nodos de ROS se muestra en la figura 5.2, donde el nodo *send\_it\_back* actúa como un reflector de datos. Con esta prueba se ha determinado el menor retardo alcanzable con ROS ya que este aumentará en la medida que sea necesario procesar los datos antes de enviarlos de vuelta.

En la tabla 5.1 se consolidan los resultados de esta prueba con los datos clasificados por su origen, maestro o esclavo, RTT y el porcentaje de mensajes perdidos. Todos los datos enviados son del tipo *double* (64 bits = 8 bytes).

Tabla 5.1: RTT. Retrasos introducidos por ROS.

	<b>Maestro</b>	<b>Esclavo</b>
<b>No. Datos</b>	8	12
<b>Bytes</b>	64	96
<b>RTT medio (ms)</b>	4,39	5,44
<b>RTT máximo (ms)</b>	11,90	12,15
<b>Mensajes perdidos</b>	33,4 %	42,4 %

### 5.2.3. Efectos de los Retardos en el Desempeño del Controlador

Con el fin de determinar si los retardos medidos en la sección 5.2.2 pueden llegar a afectar el desempeño del controlador bilateral, se han introducido retardos fijos en la arquitectura de control. El valor de retardo pico, redondeando a 13 ms, ha sido aplicando ya que se puede considerar como el peor escenario posible dadas las condiciones estudiadas. Si el controlador no es robusto ante este retardo, entonces el uso de ROS como canal de comunicación no sería una opción viable para el sistema. Sin embargo, si es capaz de funcionar correctamente bajo el efecto de este retardo cualquier paquete que se transmita con un retardo menor puede ser retenido para cumplir con los 13 ms. y así no generar inestabilidad en el sistema.



Figura 5.4: Manipulador esclavo realizando fuerza de contacto durante una tarea.

El manipulador fue utilizado para aplicar fuerza en la configuración mostrada en la figura 5.4. En la figura 5.5 se muestran los valores de posición de la articulación SE para el maestro y el esclavo así como la fuerza medida en el esclavo. Se muestran dos escenarios, con y sin retardo.

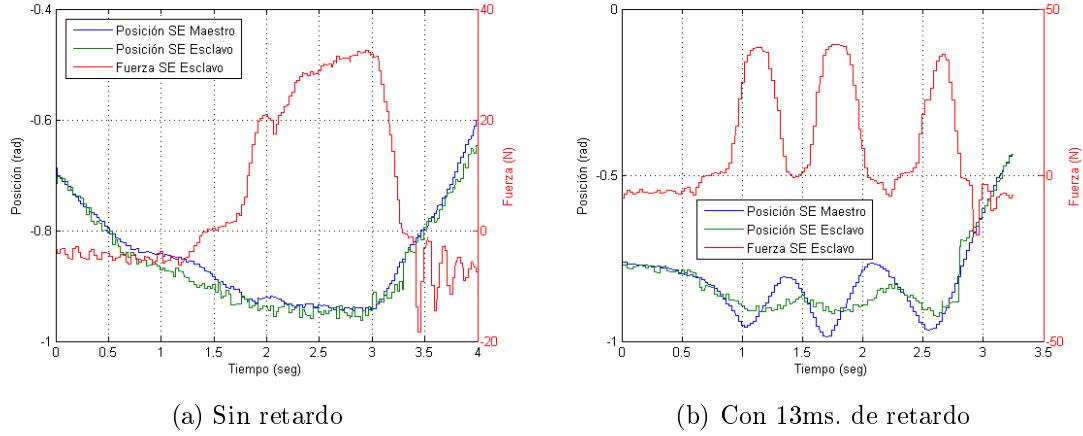


Figura 5.5: Respuesta de la articulación SE bajo el efecto de un retardo fijo de 13 ms.

Dado que esta articulación es la que ofrece mayor flexibilidad por la configuración del esclavo (figura 4.2), estos datos son los más descriptivos para este experimento.

#### 5.2.3.1. Discusión sobre los Resultados

Como se puede observar, el seguimiento [70] entre esclavo y maestro es muy bueno cuando no existe retardo en el canal de comunicaciones, con una fuerza que permite emular el movimiento del esclavo en el maestro. Por otro lado, bajo el efecto del retardo el sistema se vuelve inestable o es críticamente estable, lo cual conlleva a perdida en la percepción. Cabe aclarar que las perturbaciones amortiguadas que se observan en el segundo 3.5 en la figura 5.5a y en el segundo 3 de la figura 5.5b ocurren debido a que el esclavo debe volver a compensar su propio peso el cual era soportado parcialmente por la mesa.

#### 5.2.4. Utilizando ROS para Ajustar Parámetros de Control

Tal como se esperaba, al incluir los retardos, el desempeño del controlador se ve degradado al utilizar ROS como canal de comunicación. En lugar de modificar el controlador para que asuma los retardos, se propone otro enfoque con el cual ROS se utiliza para extender las capacidades del sistema de teleoperación, recibiendo las posiciones articulares y enviando comandos de control que permitan modificar las características del controlador tal como se muestra en la figura 5.6.

En este experimento solo se ve afectado el controlador del maestro por una señal enviada desde ROS que permite percibir la restricción virtual. Abbot y Okamura [72] afirman que el utilizar restricciones virtuales en el esclavo son más difíciles de estabilizar debido a que no se dispone del amortiguamiento ofrecido por el operador humano. Por otro lado, al aplicarse la restricción al maestro hace improbable que el sistema se inestabilice.

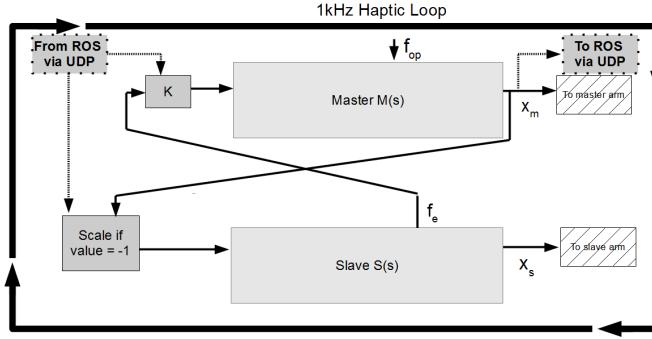


Figura 5.6: Uso de ROS para ajustar parámetros de control del maestro sin afectar la velocidad del lazo háptico.

Los valores enviados desde el controlador del maestro a ROS (utilizando un canal de comunicaciones UDP como se ha descrito) son los ángulos articulares del brazo maestro. La señal de control que devuelve ROS es un factor de penetración del efecto final en la restricción virtual. Dicho factor es utilizado para alterar la fuerza reflejada al operador y así permitir que Él detecte los bordes de la restricción virtual como un objeto con rigidez variable en función del factor de penetración. Dicha fuerza se calcula articulación por articulación de acuerdo con la ecuación (5.1) cuando se entra en la restricción y con la ecuación (5.2) cuando se sale.

$$f_e = K(p - p_0) \quad (5.1)$$

$$f_e = (1 - K)(p - p_0) \quad (5.2)$$

$K$  es el factor de penetración enviado por ROS,  $p_0$  es la posición angular del maestro al entrar en contacto con la restricción virtual y  $p$  es la posición angular actual. Esto resulta en que el usuario percibe la restricción virtual como una rigidez que incrementa de manera proporcional a la distancia que se ha penetrado la pared de la restricción virtual.

El perfil de rigidez se comporta como un muelle con lo cual no es perfecto y solo ha sido implementado en profundidad, sin tener en cuenta las posiciones relativas ni orientaciones. Además, se debe tener en cuenta que el uso del mismo factor de penetración  $K$  para todas las articulaciones genera una aproximación que puede llegar a distorsionar la percepción de las paredes.

Sin embargo, se ha partido de la hipótesis que el modelo propuesto es suficiente cuando lo que se pretende es alertar al usuario que ha ingresado en la restricción virtual y además la realimentación visual (figura 5.7) ayuda en este proceso de percepción.

Para el experimento realizado, la restricción virtual se asume que corresponde con una región del espacio libre del esclavo y por lo tanto las fuerzas de interacción con el entorno son cero.

### 5.3. Restricción Virtual

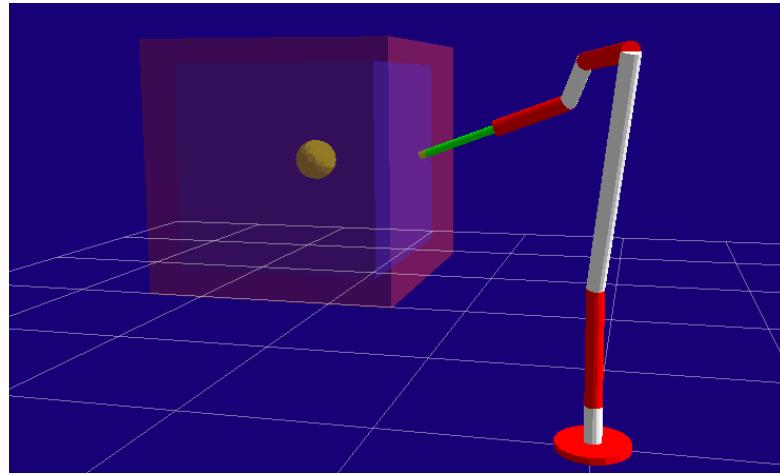


Figura 5.7: Representación de la restricción virtual. Las paredes cambian de color cuando el efecto final entra en contacto con alguna de ellas. El punto amarillo indica el centro de la restricción.

La restricción virtual ha sido implementada como un cuboide en ROS, figura 5.7 con un espesor de pared fijo igual a 10cm. Su tamaño y forma pueden ser modificados utilizando los marcadores interactivos que se muestran en la figura 5.1. El robot se dibuja utilizando las dimensiones del robot esclavo y las posiciones angulares son recibidas del controlador del maestro. Este tipo de mapeo ha sido previamente estudiado [60] y se ha encontrado que es un acercamiento valido teniendo en cuenta la similitud cinemática que existente entre maestro y esclavo.

#### 5.3.1. Factor de Penetración

El factor de penetración en la pared de la restricción virtual es calculado como la distancia perpendicular entre el efecto final y la parte exterior del cuboide más cercana, dividido entre el espesor de la pared con el fin de obtener un parámetro adimensional con un rango de valores entre 0 y 1. Por otro lado, un valor de -1 es devuelto cuando el efecto final esta dentro la parte interior de la restricción virtual con lo cual se le indica al controlador el momento de iniciar el escalado del espacio de trabajo.

#### 5.3.2. Control Escalado

El escalado en el ámbito de la teleoperación generalmente se refiere al escalado de la posición y/o fuerza [73–75] y es utilizado para permitir el uso de maestros y esclavos con diferencias importantes.

En este experimento se ha implementado un escalado a nivel articular, con el cual se consigue que cuando el maestro esta dentro de la restricción virtual el movimiento angular de cada articulación es menor en el esclavo, esto es que con los mismos movimientos del maestro el esclavo realiza desplazamientos menores. Este enfoque reduce el espacio de trabajo del esclavo (dependiendo del factor de escalado) y se ha planteado la hipótesis que con este tipo de control fino el operador puede realizar tareas de precisión con mayor facilidad y rapidez que sin el escalado.

Dado que el escalado de cada uno de los ángulos es un escalado adusto del espacio de trabajo, en este trabajo no se realizan comparaciones con escalados de movimiento y fuerza o mapeo del espacio de trabajo [76] con el cual es de esperarse la obtención de mejores resultados a la hora de mapear el espacio de trabajo del esclavo con el del maestro.

El escalado ha sido implementado articulación por articulación en función de la posición recibida del maestro, Fig. 5.6, de acuerdo con la ecuación (5.3)

$$x_s = (x_m - c_o) + S(x_{s0}) \quad (5.3)$$

$c_0$  es la posición en el maestro que coincide con el centro de la restricción virtual,  $S$  es el factor de escalado ( $S = 0,5$  en este experimento) y  $x_{s0}$  es la posición del esclavo justo cuando el maestro ingresa en la restricción virtual.

## 5.4. Montaje Experimental

Se ha realizado una serie de experimentos con el fin de validar la efectividad de implementar un escalado utilizando restricciones virtuales. Los dos factores que se han estudiado son:

1. Mejora introducida en la facilidad con la que se realiza la tarea de telemanipulación con el escalado (activado al entrar en la restricción virtual) y sin el escalado.
2. Percepción de la restricción virtual por parte del operador como método para indicar un cambio en el modo de control

Estos puntos de partida son cualitativos y han sido determinados mediante conversaciones informales con los participantes del experimentos. El factor 1 esta más relacionado con el esfuerzo requerido a la hora de alinear la pinza con el tornillo, tal con se ha discutido en el numeral 5.1.1, que con el tiempo de ejecución de la tarea. Sin embargo, dichos tiempos se han medido durante las distintas ejecuciones.

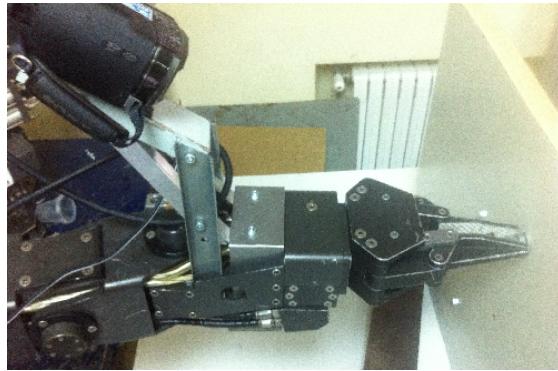


Figura 5.8: Experimento realizado. Desenroscar un perno M10 con la pinza del robot esclavo. La cámara estereoscópica ofrece realimentación visual.

El experimento consistía en ingresar a la zona de la tarea (restricción virtual) y desenroscar un perno M10, figura 5.8. Una cámara estereoscópica montada en la muñeca del esclavo, con la disparidad enfocada en la punta de la pinza, ofrece realimentación visual para el desarrollo de la tarea.

El experimento fue realizado por tres operadores previamente familiarizados con el sistema de telemanipulación. La utilización de operadores expertos asegura que las novedades descritas que se han incluido en el sistema son las que se valoran y no la arquitectura telemanipulador ni su control. La pinza, que tiene la opción de rotación continua 360°, suministra el torque necesario para desenroscar el perno.

#### 5.4.1. Discusión de los Resultados

1. *Facilidad a la hora de realizar la tarea con y sin escalado:* En la figura 5.9 se muestra la posición del efecto final proyectada en el plano X-Z durante una de las pruebas realizadas. Este plano es perpendicular al eje del perno. La distribución de los puntos, muestrados a 1Khz, muestran claramente que la precisión en la realización de la tarea se incrementa considerablemente con el escalado activo. Todos los participante indicaron que el alinear la pinza con el perno fue más fácil cuando el escalado estaba activo, ya que los errores en posicionar el maestro se transmitían en menor proporción al esclavo. El segundo participante incluso se vio con la necesidad de utilizar sus dos manos para manejar el brazo maestro cuando el escalado estaba desactivado.

Los tiempos de ejecución de la tarea para los tres operadores expertos se muestran en la tabla 5.2. Para los tres casos se puede observar una mejora en el tiempo de ejecución lo cual se explica porque cuando no había escalado se perdía la mayor parte del tiempo alineando el efecto final con el perno.

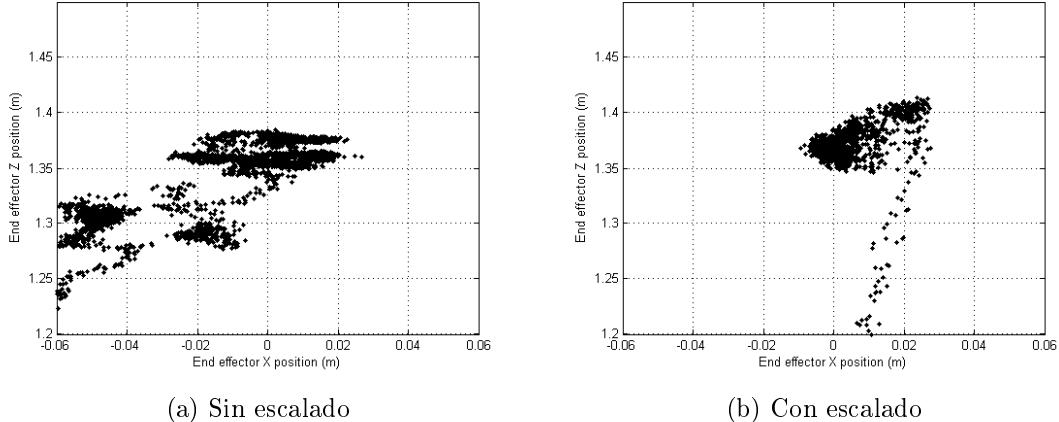


Figura 5.9: Posición del efecto final proyectada en el plano X-Z durante la tarea de desenroscar el perno. El perno esta ubicado en el punto (0 , 1.37)

Tabla 5.2: Tiempos de ejecución de la tarea de tres operadores expertos con y sin escalado.

Participante	1	2	3
Con escalado (s)	55,99	71,61	31,68
Sin escalado (s)	99,88	84,77	91,08

2. *Percepción de la restricción virtual como alerta de cambio en el modo de control:* A la hora de entrar en la restricción virtual, los tres participantes detectaron un salto en la posición del robot esclavo, lo cual distorsionó de cierta manera su percepción del espacio de trabajo. En el caso del participante 3, este efecto fue más claro ya que dicha entrada la realizó rápidamente.

Se ha planteado la hipótesis que este efecto se debe a cierta brusquedad inducida por el escalado implementado articulación a articulación, a lo cual se le debe sumar con el ruido de los potenciómetros tanto del maestro y el esclavo. Debido a este efecto de brusquedad, los participantes indicaron que la percepción de la restricción virtual se dio como un salto poco natural en posición y además no se percibió el perfil de fuerza implementado en la pared de la restricción.

Por otro lado se probó la percepción de la restricción virtual sin el esclavo, es decir, el maestro controlando la representación virtual del esclavo. En este caso la percepción del perfil de fuerza fue buena pero la sensación se asumía como una colisión y no como una alarma de cambio, lo cual puede deberse a que generalmente el usuario espera obtener estímulos hapticos cuando una colisión ocurre [77] y no como señal de indicación.

## Capítulo 6

# RaPA: Rate-Position Arquitecture

En este capítulo se presenta una arquitectura de teleoperación híbrida que combina control en velocidad y control en posición para permitir el manejo de un robot esclavo con un espacio de trabajo amplio. Se utiliza información háptica para informar al operador cuando un cambio en el modo de funcionamiento ha ocurrido. El controlador propuesto permite la realización de tareas en áreas de trabajo grandes utilizando un dispositivo háptico con un espacio de trabajo reducido como el PHANToM [78]. Se han realizado experimentos utilizando un robot esclavo virtual simulado con ODE. Una tarea real para la instalación IFMIF ha sido simulada. Dicha tarea tiene como objetivo medir los niveles de radiación de materiales en entornos nucleares. Además la arquitectura propuesta se ha comparado con el esquema clásico de control en posición en una tarea *Pick & Place* donde se ha comprobado la utilidad del método con mejores tiempos en la ejecución de la tarea. Los resultados obtenidos con esta arquitectura han sido publicados en [79–82].

### 6.1. Antecedentes

En la teleoperación, dos modos de control se utilizan generalmente para guiar a un robot: control en posición y control de velocidad. La decisión de utilizar cualquiera de los dos modos de control está influenciada principalmente por las características de la tarea y de los dispositivos maestro y esclavo. Varios trabajos se han llevado a cabo para determinar cómo la ejecución de la tarea se ve afectada por el modo de control. En [83] los autores han encontrado que el control de posición puede ser 1,5 veces más rápido que el de velocidad cuando el espacio de trabajo de maestro y esclavo son similares. En contraste, el control en velocidad alcanza un mejor rendimiento cuando el espacio de trabajo del esclavo es mayor que el del maestro.

En general, el control de posición ha demostrado ser adecuado para la tarea en la que movimientos cortos y precisos están involucrados. Por otra parte, el control en velocidad ha mostrado mejor rendimiento para realizar tareas que implican movimientos largos y precisos en una gran entorno. Un ejemplo de control en velocidad puede ser la operación manual de una grúa. La grúa en sí es el dispositivo esclavo, que es comandado por el operador utilizando varios joysticks (generalmente uno para cada grado de libertad). Estas palancas de mando sirven como dispositivo maestro. Los movimientos de cada joystick definen la velocidad y dirección de los diferentes grados de libertad de la grúa.

Por otro lado, el control en posición se utiliza con frecuencia en aplicaciones de la robótica donde se espera que los movimientos del esclavo imiten los ejecutados por el dispositivo maestro. Como se ha mencionado, este tipo de control es mejor cuando el maestro y el esclavo tienen espacios de trabajo similares, lo que significa una relación cinemática directa entre dichos dispositivos.

En la actualidad, los sistemas comerciales de teleoperación no permiten la combinación del control en posición y velocidad. De hecho, cuando hay una diferencia sustancial entre el espacio de trabajo de los dos dispositivos, se utiliza control de velocidad o el control de posición con indexación del espacio de trabajo. Indexar el espacio de trabajo del maestro consiste en desvincularlo del esclavo cuando el maestro llega a algún límite mecánico. El dispositivo maestro es trasladado a una nueva posición que se permitirá a la orientación proceso continúe. El problema con la indexación es que genera desorientación del operador desde marcos referencias se cambian. Productividad del sistema se vea afectada debido a la inactividad causada por el operador en acostumbrarse a las nuevas referencias.

Sin embargo, algunos enfoques que hacen un control híbrido de velocidad-posición se han desarrollado para robots móviles [84] y aplicaciones hápticas virtuales [85]. En el campo de robots esclavos con un sistema de referencia fijo (sin plataformas móviles) se referencia al lector a [86] donde se han revisado varios trabajos de este tipo. Además en [86] se propone un sistema híbrido reconfigurable donde el controlador basado en eventos se utiliza para determinar el cambio en la configuración del sistema. Otros métodos típicos de escalado e indexación requieren que el usuario pulse un botón para pasar de un método a otro, sin embargo el aquí algoritmo propuesto no requiere botones para cambiar el modo de control. Debido a estas características, el método propuesto se considera más intuitivo para los operadores, ya que puede fluir de un modo de control a otro con más naturalidad.

## 6.2. Descripción del Algoritmo

El algoritmo propuesto permite cambiar entre dos modos de control: Posición y Velocidad. Dicho cambio se realiza de manera automática sin necesidad de utilizar botones o movimientos especiales. Con el fin de mantener al operador informado de las transiciones entre los modos Posición y Velocidad se utiliza información háptica.

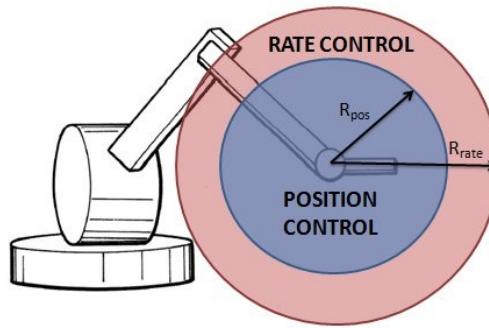


Figura 6.1: Definición de las zonas de control en posición y velocidad en el dispositivo maestro

El espacio de trabajo del dispositivo háptico maestro se ha dividido en una zona de control en posición y otra de control en velocidad como se muestra en la figura 6.1. Esto implica que se conseguirá una mayor precisión cuando el robot esclavo es controlado utilizando la zona de posición. Además es posible realizar grandes desplazamientos utilizando la zona de velocidad. Como resultado de la combinación de estos dos métodos, es posible realizar tareas de precisión en un espacio de trabajo amplio utilizando un dispositivo maestro de tamaño reducido.

### 6.2.1. Estados del Algoritmo

Diferentes estados han sido definidos con el fin de implementar las transiciones de posición a velocidad y viceversa. En la figura 6.2 se muestran los estados y como el algoritmo RaPA avanza de un estado al otro dependiendo de los eventos que ocurren durante la teleoperación. Algunos de estos estados han sido configurados para informar al operador de manera háptica los cambios que han ocurrido en el modo de control y el estado actual del robot remoto (esclavo). Adicionalmente se han definido transiciones entre los estados con el fin de asegurar la estabilidad del sistema.

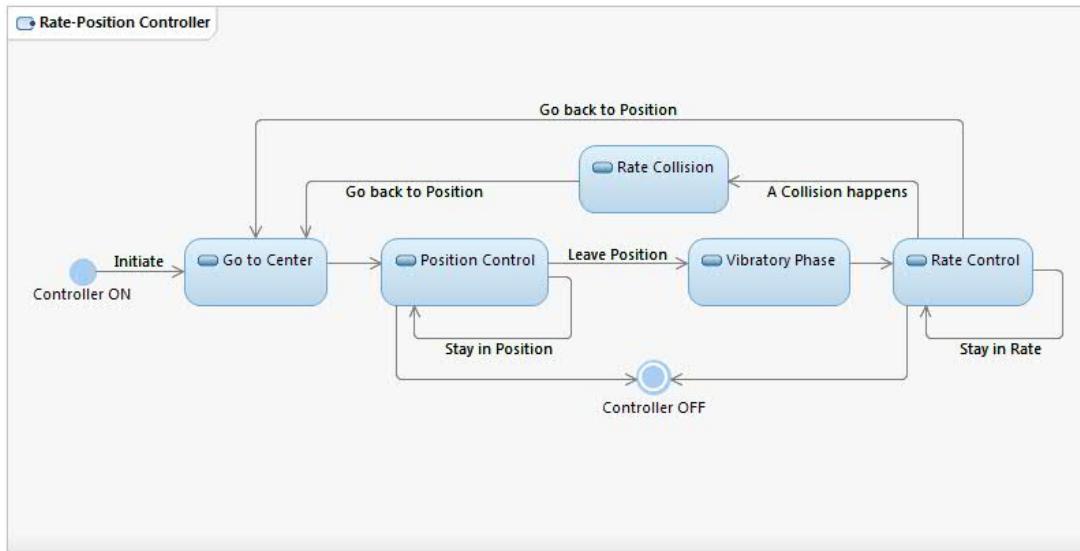


Figura 6.2: Maquina de estados del algoritmo RaPA

### 6.2.1.1. Ir al Centro

En este estado una fuerza es aplicada al operador con el fin de llevar el dispositivo maestro al centro de su espacio de trabajo. Dicha fuerza es proporcional a la distancia entre la posición actual y el punto que se quiere alcanzar. Generalmente se activa después de ingresar a la zona de posición viniendo desde la zona de velocidad. Durante esta transición el robot esclavo mantiene su posición actual y no se ve afectado por los movimientos ocurridos mientras el maestro es llevado a su centro.

Adicionalmente este estado es importante durante la inicialización del sistema ya que permite sincronizar el centro del espacio de trabajo del maestro con la posición inicial del esclavo. En esta inicialización el maestro es forzado a ir al centro hasta que el operador lo permita, con lo cual se garantiza tanto que el operador conozca la posición cero como que la sincronización se realizará sin saltos en la posición del esclavo y por lo tanto se garantiza la estabilidad del sistema.

Una vez que el error de sincronización es aproximadamente cero el controlador avanza al siguiente estado: *Control en Posición*.

### 6.2.1.2. Control en Posición

En este estado el robot esclavo es controlado en posición y adicionalmente se reflejan al operador las fuerzas de interacción con el entorno. La precisión de los movimientos puede ajustarse dependiendo de las características de los dispositivos maestro y esclavo

así como la tarea a realizar. La posición del esclavo es controlada en lazo cerrado tomando como referencia la posición del dispositivo maestro.

El controlador verifica constantemente si la posición del dispositivo maestro se mantiene dentro de la zona de control en posición. Por lo tanto, la distancia actual  $d$  del maestro al centro de su espacio de trabajo es continuamente calculada y comparada con el radio del espacio de trabajo en posición como se expresa en (6.1).

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ d &\leq R_{pos} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Dado el caso en el que el operador sale de la zona de control en posición ( $d > R_{pos}$ ), el controlador pasa por el estado *Fase de Vibración* antes de alcanzar la zona de velocidad.

#### 6.2.1.3. Fase de Vibración

Esta *Fase de Vibración* informa al operador cuando una transición de control en posición a control en velocidad ocurre. Básicamente, se genera un estímulo vibratorio al operador para que este informado que el nuevo modo de control ha sido activado. El uso de este estímulo haptico evita la necesidad de pulsadores para realizar el cambio de posición a velocidad por consiguiente la teleoperación resulta más natural. Asimismo, esta vibración juega un papel muy importante ya que el operador está al tanto del cambio en el modo de control y así se evitan comportamientos inesperados del sistema. El estímulo vibratorio es generado como una señal amortiguada (6.2), donde  $A$  es la amplitud,  $C$  el factor de amortiguamiento y  $\omega$  es la frecuencia natural de la señal.

$$F_{vib} = A \cdot e^{-C \cdot t} \sin(\omega t) \quad (6.2)$$

#### 6.2.1.4. Control en Velocidad

En este estado se controla el robot esclavo utilizando consignas de velocidad. Una fuerza proporcional a la velocidad es reflejada al operador de acuerdo con la ecuación (6.3) a fin de que el operador puede estimar la velocidad del robot esclavo. El parámetro  $K_{rate}$  representa un muelle a la hora de reflejar la fuerza,  $d$  es la posición actual medida desde el centro del dispositivo maestro,  $R_{pos}$  es el centro de la esfera que contiene la zona de control en posición y  $d_{hys}$  es una distancia considerada como zona de histéresis.

$$F_{rate} = \begin{cases} K_f(d - R_{pos} - d_{hys}) & \text{Si } d > R_{pos} + d_{hys} \\ 0 & \text{Si } d \leq R_{pos} + d_{hys} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\dot{x}_{rate} = K_{rate}(d - R_{pos} - D_{hys}) \quad (6.4)$$

Tal como se refleja en la ecuación (6.4), entre mayor sea la distancia  $d$  mayor será la velocidad con la que se mueve el robot esclavo.

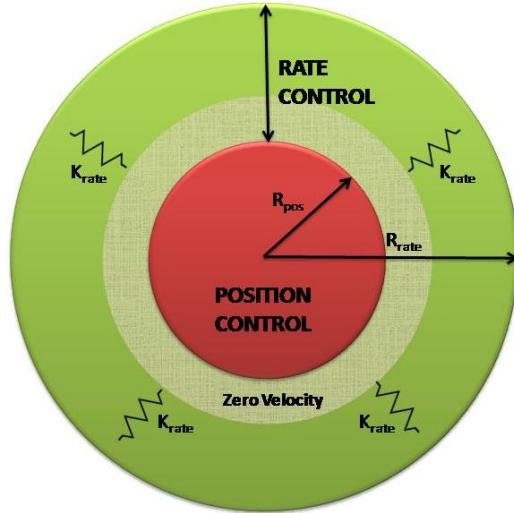


Figura 6.3: Detalle de la zona de control en velocidad

Como se muestra en la figura 6.3, la zona de histéresis  $d_{hys}$  que ha sido definida, evita fuerzas innecesarias por cambios accidentales de posición a velocidad y viceversa. En esta área, no se envían señales de velocidad al esclavo así como tampoco se refleja ninguna fuerza al operador. Un control continuo en velocidad requiere que el operador mantenga el maestro en la zona de velocidad. En caso que se quiera modificar la dirección de la velocidad del esclavo es tan solo necesario modificar la dirección el maestro sin abandonar la zona de velocidad.

Adicionalmente, si durante este estado ocurre una colisión el controlador mediante el dispositivo maestro solicita al operador un cambio a control en posición para una mejor interacción con el entorno. Por lo tanto, esta colisión activara el estado *Ir al Centro* para sincronizar el maestro y esclavo.

#### 6.2.1.5. Colisión en Velocidad

Una colisión del robot esclavo con el entorno cuando se está controlando en velocidad puede ser una situación muy peligrosa para todos los componentes involucrados en la teleoperación, por lo tanto, el envío de órdenes de velocidad al esclavo son detenidas y una fuerza proporcional a la colisión es reflejada al operador justo antes de realizar el cambio a control en posición.

El objetivo principal de este estado es informar al operador que la colisión ha ocurrido y cambiar el estado del controlador a *Ir al Centro*, de esta manera se realizará el cambio al control en posición y esto permitirá al operador interactuar de una manera más segura con el entorno.

### 6.2.2. Consideraciones acerca del Robot Esclavo

El robot esclavo recibe como referencia la posición y orientación del dispositivo háptico maestro. Debido a que el método propuesto esta dirigido para combinaciones de maestro y esclavo con claras diferencias en espacio de trabajo es de esperarse que esto represente también diferencias cinemáticas. Si se llega a este caso, una solución precisa de la cinemática inversa del esclavo es necesaria para calcular los ángulos de cada articulación para alcanzar la referencia de posición y velocidad impuesta.

Dependiendo de la disposición de los grados de libertad del esclavo el problema cinemático puede ser más o menos complejo. Por ejemplo, en el caso de un robot con seis grados de libertad, para obtener una solución analítica son condiciones suficientes [87]:

1. Tres articulaciones consecutivas de revolución se interceptan en un punto común (como es el caso de una muñeca esférica).
2. Los ejes de tres articulaciones consecutivas de revolución son paralelos.

Por otro lado, cuando el robot sea más complejo, probablemente sea necesario utilizar métodos numéricos para estimar adecuadamente los ángulos de las articulaciones [87–89]. Es importante tener en cuenta que dependiendo la complejidad de los cálculos realizados el desempeño del sistema se puede ver afectado.

Por último, el robot esclavo debe ser dotado de sensores de fuerza que permitan determinar las fuerzas de interacción con el entorno para reflejarlas al operador en caso de contactos. Esta información háptica también es útil para prevenir daños en el sistema cuando una hay colisión durante el control en velocidad.

## 6.3. Montaje Experimental

Se ha realizado una simulación con el fin de evaluar el desempeño del algoritmo propuesto. El dispositivo háptico comercial PHANToM ha sido utilizado como maestro para controlar un robot esclavo virtual. El robot esclavo simulado ha sido una versión modificada del robot esclavo GRIPs descrito en 4.1.1. Adicionalmente, se ha desarrollado un

escenario en el que el objetivo es introducir una probeta (*Rig*) en un contenedor (*Container*). Este escenario requiere de la realización de movimientos precisos a la hora de introducir la probeta, lo cual es bueno para probar el desempeño del algoritmo propuesto.

### 6.3.1. Dispositivo Háptico Maestro



Figura 6.4: Dispositivo háptico comercial PHANToM OMNI

El dispositivo háptico comercial PHANToM OMNI [78], mostrado en la figura 6.4, ha sido utilizado para controlar el robot esclavo. Tiene seis grados de libertad, de los cuales tres son actuados y permiten reflejar fuerzas al operador. A pesar de su espacio de trabajo reducido, es una opción adecuada para evaluar las mejoras en el desempeño introducidas por el algoritmo propuesto. Uno de los pulsadores del dispositivo se ha configurado para abrir / cerrar la pinza del robot esclavo. El segundo pulsador es utilizado para bloquear el sistema en una posición de descanso.

### 6.3.2. Robot Esclavo

El robot esclavo utilizado es una versión modificada del robot esclavo GRIPS descrito en 4.1.1. En la simulación, su cinemática fue modificada con el fin de conseguir la condición 1 del numeral 6.2.2 y así tener la posibilidad de obtener una solución analítica de su cinemática inversa.

### 6.3.3. Tarea Simulada

Una tarea típica realizada en el proyecto IFMIF es la manipulación de materiales de prueba que tienen que ser irradiados en un ambiente nuclear [90]. Esta aplicación requiere el uso de un sistema de teleoperación para manipular remotamente la probeta (*Rig*) para introducirla/extraerla del contenedor donde se realiza la irradiación dependiendo del experimento. Esta tarea requiere el movimiento de la probeta en un espacio de trabajo

amplio pero en el momento de introducirla/extraerla del contenedor se requiere una elevada precisión. Estas características de la tarea la hacen ideal para probar el método propuesto.

En cuanto al entorno de simulación, se ha utilizado el motor dinámico ODE [91] en un ordenador Intel® Core™ i3 CPU 540 3.07GHz, 4GB RAM, Windows 7, 64 bits. Varios componentes han sido modelados como parte del entorno virtual: la probeta, el contenedor y el robot esclavo. Además, se han localizado diferentes cámaras alrededor del entorno virtual con el fin de facilitar el desempeño de la tarea. El operador puede cambiar entre las distintas cámaras utilizando una tecla.

Cada uno de los elementos ha sido diseñado utilizando formas básicas, con excepción de la probeta que fue hecha utilizando mallas triangulares. La principal ventaja de utilizar formas básicas es que sus colisiones y movimientos se evalúan con un coste computacional menor que en el caso de las mallas.

Respecto al robot esclavo virtual, este ya ha sido descrito en el numeral 4.1.1. Para realizar el control de este esclavo se ha establecido un canal de comunicaciones con el dispositivo maestro sin retrasos de tiempo. El maestro envía su posición al esclavo, el cual por su parte le regresa su posición y la fuerza aplicada para cerrar los lazos de control.

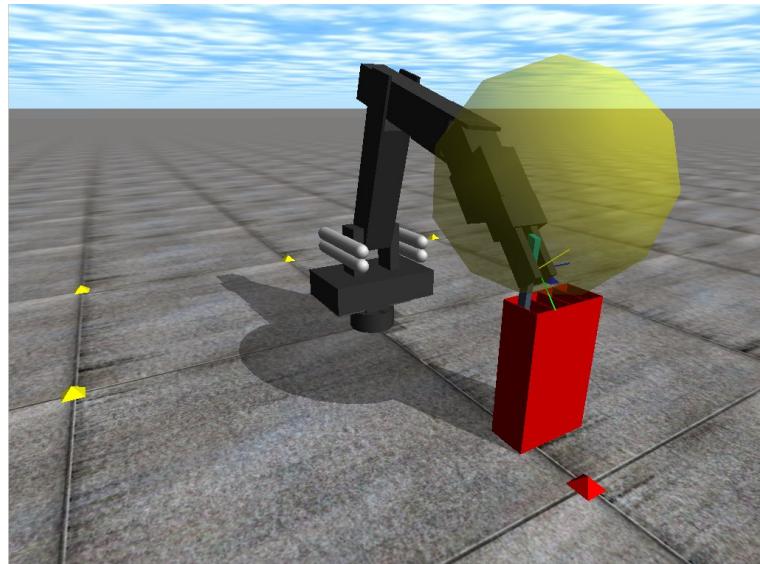


Figura 6.5: Robot virtual introduciendo la probeta en el contenedor. La esfera amarilla muestra el límite de la zona de control en posición.

La simulación se ejecuta a 200 Hz aunque el modulo gráfico a 50 Hz. Las comunicaciones entre los dispositivos maestro y esclavo se realizan a 1000 Hz con el fin de garantizar la estabilidad del sistema a la hora de reflejar fuerzas [92–94]. En la figura 6.5 se muestra al robot virtual realizando la tarea.

### 6.3.3.1. Probeta y Contenedor

La probeta es un elemento de 17 x 50 x 350 mm utilizada para sostener los materiales que serán sometidos a irradiación. Es similar a un tubo de prueba con zonas de contacto en su parte superior lo cual lo hace un elemento de manipulación frágil.

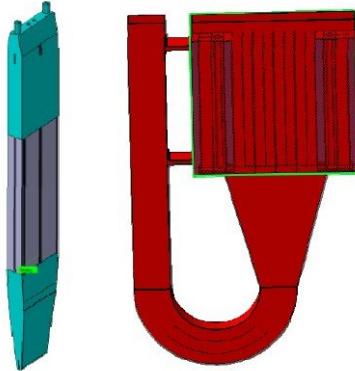


Figura 6.6: Probeta (izquierda) y contenedor (derecha) de la tarea simulada (proyecto IFMIF)

El contenedor es una caja de 52 x 152 x 370 mm que puede llegar a contener hasta 12 probetas. Estará ubicado justo frente al muelle de radiación. En la figura 6.6 se muestran los componentes utilizados en la simulación de la tarea.

### 6.3.3.2. Requisitos de la Tarea

El primer requisito es que tanto la probeta como el contenedor deben ser manipulados con el mayor cuidado posible. Es imperativo evitar un posible daño de estos elementos. Adicional a esta tarea, es de esperarse que el robot esclavo sea capaz de realizar otras tareas, lo cual explica el porque un robot tipo SCADA no ha sido considerado. Un robot de seis grados de libertad es el más indicado si se espera que ofrezca la posibilidad de recuperar probetas con las que se tenga problemas durante su traslado.

## 6.4. Resultados Obtenidos

Varios experimentos fueron realizados con el propósito de determinar el desempeño del sistema. En primer lugar, la evolución del controlador se ha analizado cuando cambia de un estado a otro, después, se han comparado los tiempos de ejecución de la tarea del esquema clásico de control en posición con el método híbrido de velocidad y posición propuesto y finalmente se ha valorado la seguridad del sistema cuando hay una colisión en el modo de control por velocidad.

### 6.4.1. Evolución de los Estados del Controlador

El método RaPA cambia su estado dependiendo del modo de control actual: posición o velocidad. También se han definido estados intermedios que informan hápticamente al operador cuando una transición esta sucediendo y un modo de control será activado. Como ya se ha mencionado, esta información háptica elude la necesidad de pulsadores que realizan los cambios.

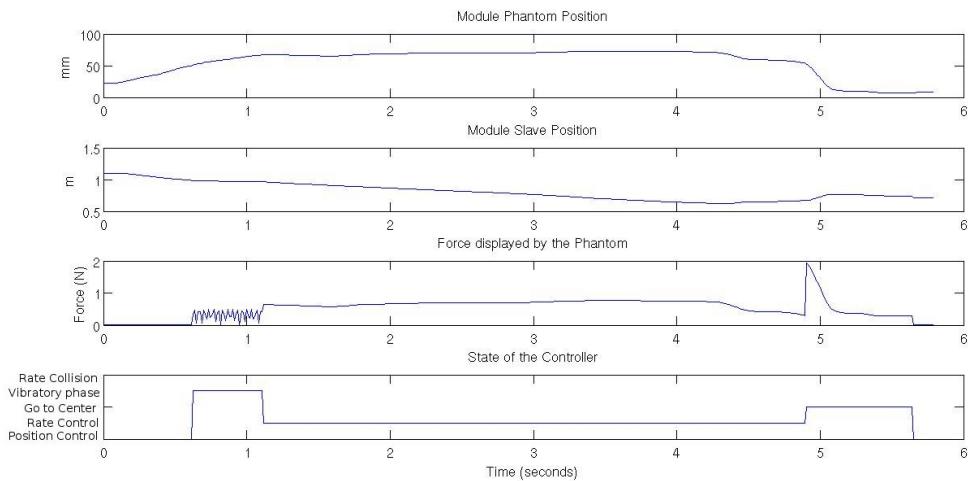


Figura 6.7: Fuerzas reflejadas al usuario durante los cambios de estado del controlador

En la figura 6.7 se muestra una breve interacción en la que el sistema cambia del control en posición al control en velocidad para finalmente regresar al control en posición. Esta figura permite el desempeño del sistema durante cada uno de los estados. Cabe aclarar que durante esta prueba no se presentaron contactos ni colisiones con el entorno, por lo cual la fuerza de interacción de robot esclavo no se muestra.

Inicialmente el sistema esta en *Control en Posición*, pero cuando el operador se mueve hacia afuera de una esfera de radio 50mm el algoritmo pasa al estado *Fase de Vibración*. Este estado emite un estímulo vibratorio al operador para informarle que está cambiando a *Control en Velocidad*, el cual será activado justo al terminar la vibración. El estímulo vibratorio se puede observar alrededor de  $t = 1$  seg. en la gráfica que muestra la fuerza reflejada por el PHANTOM.

Después de alcanzar el estado de *Control en Velocidad*, en la figura 6.7 se muestra como el robot se mueve en velocidad. El operador percibe una fuerza proporcional a la velocidad del robot durante este estado. Una vez que el operador regresa a la zona de posición, el algoritmo inicia la transición hacia *Control en Posición*. Primero el estado intermedio *Ir al Centro* será alcanzada con el fin de llevar el dispositivo maestro al centro de su espacio de trabajo y así sincronizar adecuadamente la posición con el esclavo sin que

este ultimo realice desplazamientos abruptos. En la figura 6.7 se puede apreciar como la máxima fuerza realiza al operador ha sido la correspondiente al estado *Ir al Centro*. Al alcanzar el centro, el algoritmo pasará al modo de *Control en Posición* nuevamente. Durante el *Control en Posición* solo se reflejan fuerzas al operador en caso de contacto y/o colisiones con el entorno.

#### 6.4.2. Experimento *Pick & Place*

Un experimento tipo *Pick & Place* se ha realizado con el fin de evaluar los tiempos de ejecución del algoritmo propuesto. Como se detallo en el numeral 6.3.3, el objetivo de esta tarea es recoger una probeta e introducirla en el contenedor, véase la figura 6.5.

A cada uno de los participantes en el experimento realizó la tarea dos veces. Una utilizando el esquema clásico de control en posición y la otra utilizando el algoritmo híbrido velocidad-posición propuesto. En el caso del esquema clásico de control en posición se ha hecho un escalado para que el espacio de trabajo del esclavo pueda ser cubierto por el espacio de trabajo del maestro. Diez operadores diferentes fueron los responsables de realizar la tarea propuesta registrándose el tiempo de ejecución en todos los casos. Se dieron entre 5 y 10 minutos para que los participantes se familiarizaran con cada uno de los métodos de control antes de realizar la tarea. En primer lugar se utilizo el algoritmo velocidad-posición y después el método de control solo en posición.

Tabla 6.1: Tiempos de ejecución de una tarea *Pick & Place*

	Tiempo (segundos)	
	Control Velocidad-Posición	Control Clásico en Posición
1	57,80	63,87
2	49,71	53,19
3	51,39	78,34
4	40,16	70,30
5	49,10	65,19
6	47,86	81,74
7	46,96	57,55
8	41,34	56,30
9	56,59	62,60
10	40,15	75,62

En la tabla 6.1 se muestran los tiempos de ejecución para cada participante con los dos métodos a comparar. El tiempo medio para el control velocidad-posición es 48,11 segundos y en el caso de esquema clásico de control en posición es 66,47 segundos. De acuerdo con estos resultados el algoritmo propuesto genera una mejora del 27,63 % en

términos de tiempo de ejecución. Además, si se analiza la desviación estándar para cada método, en el caso del control solo en posición la desviación estándar es de 9,75 segundos mientras en el caso del velocidad-posición es 6,27 segundos, un 35,67% menos. Esto implica que el esquema de control en posición se ve afectado en mayor medida por la falta de precisión y la diferencia de tiempos entre ejecuciones de la tarea es más significativa. Estos resultados son congruentes con los comentarios realizados por los participantes, los cuales se quejaron de la baja precisión ofrecida por el algoritmo clásico de control en posición en comparación con el de velocidad-posición que por su parte les permitía realizar la tarea con mayor seguridad.

#### 6.4.3. Colisión en Velocidad

El algoritmo aquí propuesto, también tiene en cuenta la seguridad de todos los componentes involucrados en el sistema de teleoperación, teniendo especial cuidado cuando el robot esclavo colisiona con el entorno remoto durante el modo de control en velocidad.

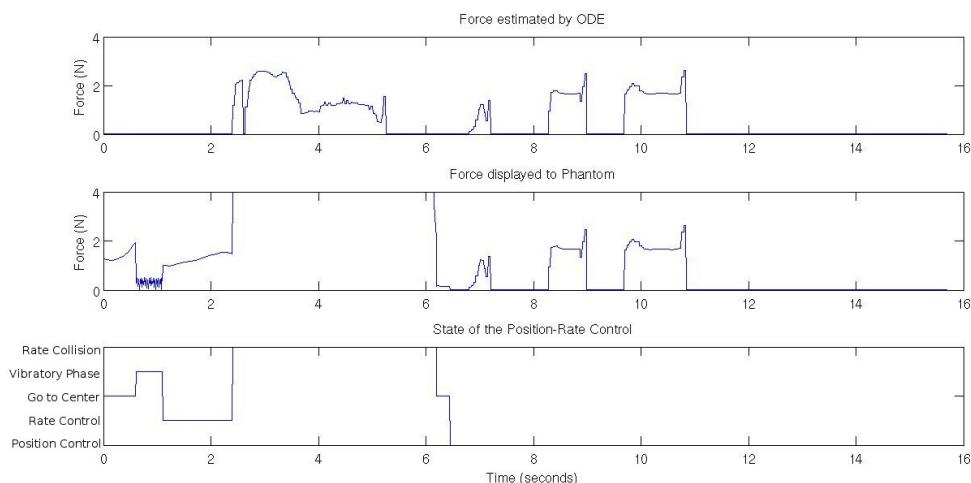


Figura 6.8: Evolución de los estados del controlador y fuerzas de interacción cuando hay una colisión en velocidad

Como se muestra en la figura 6.8 el controlador identifica cuando ocurre una colisión (aprox.  $t = 2,3$  seg.), en cuyo caso se detiene la interacción con el entorno y se lleva al maestro a la zona de control en posición. En la figura 6.8 es posible identificar que justo después que ocurre la colisión, el estado *Colisión en Velocidad* es activado. En este estado una fuerza importante es reflejada al operador con el fin de llevarlo al centro del espacio de trabajo del maestro y cambiar al modo de control en posición, todo esto ocurre sin modificar la posición del robot esclavo. Una vez que se cambia al *Control en Posición*, el operador puede interactuar de una manera más segura con el entorno tal como lo muestra la figura 6.8.

La fuerza reflejada durante la *Colisión en Velocidad* es la máxima que puede ejercer el dispositivo maestro (4N en este caso por limitaciones del PHANToM). Además, es importante resaltar que las fuerzas de interacción durante la *Colisión en Velocidad* están en el mismo rango que las presentes en el *Control en Posición*, con lo cual se comprueba que el algoritmo propuesto es capaz de manejar adecuadamente este tipo de eventos inesperados.

## 6.5. Discusión

Un algoritmo híbrido de control velocidad-posición se presenta en este capítulo. Este método está especialmente diseñado para la teleoperación de un robot esclavo en una amplia área de trabajo, utilizando un robot maestro con un espacio de trabajo más pequeño. El robot maestro es capaz de controlar al esclavo mediante el uso de ambos modos de control: posición y velocidad, cambiando de un método a otro. El operador es consciente sobre el modo de control utilizado, debido a la información háptica reflejada.

Una simulación virtual del robot esclavo y el entorno remoto ha sido desarrollada para evaluar el método propuesto mediante la realización de una tarea *Pick & Place*. Los resultados experimentales se llevaron a cabo con un grupo de diez participantes, que muestra que el algoritmo RaPA es 27,63 % mejor que el algoritmo clásico de posición en términos de tiempo. Además, la baja desviación estándar mostrada por el algoritmo de velocidad-posición se debió a una mayor resolución proporcionada por este método, por lo que los operadores se sienten más seguro con la tarea a realizar.

Por último, el rendimiento del algoritmo se analizó a lo largo de todos sus estados, mostrando un funcionamiento seguro en todas las condiciones, especialmente cuando una colisión se produce en el modo de control en velocidad. Los datos analizados mostraron que las fuerzas de interacción con el entorno remoto en velocidad estaban en el mismo intervalo que las fuerzas de interacción típicas en el modo de control en posición.

## Capítulo 7

# Conclusiones

La Teleoperación es una tecnología que ha evolucionado a la par de la robótica, y ha tenido un resurgir en los últimos años debido principalmente a la gran cantidad de aplicaciones no tradicionales que han surgido. La misma, promete ser un campo con grandes perspectivas a futuro en cuanto a nuevas aplicaciones, por lo tanto se trata de un tema de actualidad y de gran interés, especialmente en lo que a investigación y desarrollo se refiere.

Una vez concluido este trabajo fin de máster, se puede afirmar que los objetivos iniciales han sido cumplidos de forma satisfactoria. La motivación de este trabajo es la necesidad de realizar tareas de manipulación remota en entornos hostiles. A partir del sistema comercial GRIPS se han realizado las tareas necesarias para contar con una plataforma abierta de telemanipulación.

Por tal motivo se ha hecho un estudio de los principales esquemas de control bilateral tradicionalmente usados en la Teleoperación se ha desarrollado un entorno virtual que sirve como banco de pruebas de las labores de manipulación y, por último, se ha aportado una arquitectura de control híbrida para satisfacer las necesidades propias del manejo de grandes cargas en el entorno remoto pero conservando un entorno local de dimensiones reducidas. A continuación, se desarrollan las conclusiones de cada uno de los diferentes aspectos mencionados.

## 7.1. Evaluación de Diferentes Arquitecturas de Control para Teleoperación

En el capítulo 3 se ha evaluado el comportamiento de un dispositivo de teleoperación en función de las estrategias de control utilizadas. Para esto, se han utilizado las arquitecturas de control clásicas.

Los resultados demuestran que dependiendo del tipo de entorno con el que se vaya a interactuar resulta más conveniente una arquitectura u otra. De esta forma, se explica que la utilización de controladores locales tipo fuerza de lugar a un bajo rendimiento en términos de transparencia mientras que en la teoría clásica de control para dispositivos en impedancia este tipo de controladores pueden implementarse obteniendo un alto rendimiento en la interacción con el entorno.

## 7.2. Plataforma Abierta de Teleoperación

La plataforma desarrollada (Capítulo 4), completamente flexible, modular y abierta, permite la experimentación de diversas tecnologías aplicables a la teleoperación. Dicha plataforma ha permitido la experimentación de algoritmos de control bilateral y está basada en un sistema maestro-esclavo lo cual permite la experimentación con componentes industriales, ofreciendo la ventaja de trabajar sobre una plataforma real, cuyos resultados pueden ser extrapolables a las condiciones de trabajo real con mayor facilidad.

La arquitectura implementada, por otro lado, permite contar con tantos dispositivos como sea necesario, así como utilizar diferentes modos de trabajo. De esta forma, el usuario puede optar por trabajar con el dispositivo esclavo real, o bien operar sobre un entorno simulado.

En el desarrollo del proyecto se ha demostrado que la conexión mediante Ethernet cumple ampliamente los requisitos planteados de tiempo y estabilidad cuando se emplea sobre una red local. Además, esta red de comunicación permite la conexión punto a punto entre los diferentes elementos, sin necesidad de coordinador central que ralentice la transmisión de datos.

Esta plataforma se ha aprovechado para implementar una monitorización en un simulador en el que se muestra al operario una representación del mundo real. Una gran ventaja de este sistema es que se puede dotar al sistema esclavo de restricciones virtuales, que se pueden utilizar como medida de seguridad para evitar colisiones con el entorno y consigo mismo.

### 7.3. ROS y Restricciones Virtuales

En el capítulo 5 se ha mostrado que aunque ROS no puede ser utilizado directamente como un canal de comunicación para el controlador bilateral existente, sin comprometer el desempeño del sistema de telemanipulación, es posible incluir funcionalidades de ROS en un sistema teleoperado para extender sus capacidades. Se ha suministrado un ejemplo de dichas funcionalidades en la forma de una restricción virtual reconfigurable de manera interactiva con el fin de indicar al operador un cambio en el escalado del espacio de trabajo del esclavo. Todo esto ha resultado en un incremento en la sencillez a la hora de realizar tareas de manipulación fina utilizando un robot esclavo industrial.

Dado que la efectividad del escalado del espacio de trabajo ha sido demostrada, trabajos adicionales en la implementación de un mejor algoritmo de escalado puede mejorar la propiocepción dentro de la restricción virtual y eliminar el efecto de salto experimentado por los participantes a la hora de activar el escalado. Además, el estudio de perfiles o texturas hápticas aplicadas a restricciones virtuales como medio de indicación puede permitir que se consiga una percepción más natural en el lado del operador.

### 7.4. Arquitectura híbrida velocidad - posición

Un algoritmo híbrido de control velocidad-posición ha sido presentado en el capítulo 6. Este método está especialmente diseñado para la teleoperación de un robot esclavo en una amplia área de trabajo, utilizando un robot maestro con un espacio de trabajo más pequeño. El robot maestro es capaz de controlar al esclavo mediante el uso de ambos modos de control: posición y velocidad, cambiando de un método a otro. El operador es consciente sobre el modo de control utilizado, debido a la información háptica reflejada.

Una simulación virtual del robot esclavo y el entorno remoto ha sido desarrollada para evaluar el método propuesto mediante la realización de una tarea *Pick & Place*. Los resultados experimentales se llevaron a cabo con un grupo de diez participantes, que muestra que el algoritmo RaPA es 27,63 % mejor que el algoritmo clásico de posición en términos de tiempo. Además, la baja desviación estándar mostrada por el algoritmo de velocidad-posición se debido a una mayor resolución proporcionada por este método, por lo que los operadores se sienten más seguro con la tarea a realizar.

Por último, el rendimiento del algoritmo se analizó a lo largo de todos sus estados, mostrando un funcionamiento seguro en todas las condiciones, especialmente cuando una colisión se produce en el modo de control en velocidad. Los datos analizados mostraron

que las fuerzas de interacción con el entorno remoto en velocidad estaban en el mismo intervalo que las fuerzas de interacción típicas en el modo de control en posición.

## 7.5. Difusión del trabajo realizado

El trabajo realizado ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

### Revistas referenciadas en el JCR

- J. Barrio, **F. Suarez-Ruiz**, M. Ferre and R. Aracil. A Novel Remote Handling Rate-Position Controller for telemanipulating in a large workspace. *Fusion Engineering and Design*. ISSN 0920-3796. (*Aceptado para su publicación*)

### Patentes

- M. Ferre, R. Aracil, J. Barrio and **F. Suárez-Ruiz**. Método de guiado de dispositivos robóticos teleoperados para alternar modo de control en posición y modo de control en velocidad, P201132146, 2011. (*En trámite*)

### Artículos en Conferencias

- **F. Suárez-Ruiz**, M. Ferre and R. Aracil. Telerobotics for Nuclear Fusion Environment. In *III Workshop de Robótica: Robótica Experimental*, pages 1-6, Sevilla, Spain, 2011.
- J. Barrio, **F. Suarez-Ruiz**, M. Ferre and R. Aracil. A Rate-Position Haptic Controller for Large Telemanipulation Workspaces. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012 (IROS)*, Algarve, Portugal, 2012. (*Aceptado para su publicación*)

### Capítulos de Libro

- M. Ferre, R. Aracil, **F. Suárez-Ruiz**, Jorge Barrio, J.M. Breñosa and V. Queral. Robot requirements for nuclear fusion facilities. In A. Ibarra, J.M. Perlado and M. Ferre, editors, *1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, chapter 8, pages 135-150. Madrid, Spain, 2011. ISBN 978-84-7484-239-5.

- V. Queral, L. Rios, J. Barrio, **F. Suárez-Ruiz**, and M. Ferre. Proposal of a fusion RH procedure for simulation and real servomanipulator tests relevant for IFMIF and ITER pipe angles. In A. Ibarra, J.M. Perlado and M. Ferre, editors, *1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, chapter 10, pages 167-174. Madrid, Spain, 2011. ISBN 978-84-7484-239-5.
- J. Barrio, **F. Suárez-Ruiz**, A. Owen-Hill, M. Ferre and R. Aracil. An innovative Rate-Position Controller for Performing Remote Fusion Tasks in a Large Workspace. In *2nd Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, Spain, Madrid, 2012.

### Páginas Web de fabricantes

- I. Galiana, M. Ferre, J. Barrio and **F. Suárez-Ruiz**. Arquitectura de Control Bilateral para Manipulación Remota en Instalaciones de Fusión Nuclear, 2012. URL <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14427>.

# Bibliografía

- [1] JJ Gibson. *The ecological approach to visual perception*. Houghton, Mifflin and Company, Boston, MA, US, xiv edition, 1986.
- [2] L Sciavicco and B Siciliano. Modelling and Control of Robot Manipulators. *Measurement Science and Technology*, 11(12):1828, 2000.
- [3] John J Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd Edition)*. Pearson/Prentice Hall, 3rd edition, 2004. ISBN 0201543613.
- [4] E S Duff, J M Roberts, and P I Corke. Automation of an underground mining vehicle using reactive navigation and opportunistic localization. In *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 4, pages 3775 – 3780 vol.3, 2003. doi: 10.1109/IROS.2003.1249742.
- [5] L Briones, P Bustamante, and M A Serna. Wall-climbing robot for inspection in nuclear power plants. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1409 –1414 vol.2, May 1994. doi: 10.1109/ROBOT.1994.351292.
- [6] T B Sheridan. Space teleoperation through time delay: review and prognosis. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 9(5):592–606, October 1993. ISSN 1042-296X. doi: 10.1109/70.258052.
- [7] P G Backes, M K Long, and R D Steele. The modular telerobot task execution system for space telerobotics. In *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 524 –530, May 1993. doi: 10.1109/ROBOT.1993.292225.
- [8] J Yuh. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey. *Autonomous Robots*, 8(1):7–24, 2000. ISSN 0929-5593. URL <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008984701078>.
- [9] Bruce A Aikenhead, Robert G Daniell, and Frederick M Davis. Canadarm and the space shuttle. *Journal of Vacuum Science Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1(2):126–132, 1983. ISSN 0734-2101. doi: 10.1116/1.572085.

- [10] R Mamen. Applying space technologies for human benefit; the Canadian experience and global trends. In *Recent Advances in Space Technologies, 2003. RAST '03. International Conference on. Proceedings of*, pages 1–8, 2003. doi: 10.1109/RAST.2003.1303381.
- [11] T Matsueda, K Kuraoka, K Goma, T Sumi, and R Okamura. JEMRMS system design and development status. In *Telesystems Conference, 1991. Proceedings. Vol.1., NTC '91., National*, pages 391–395, March 1991. doi: 10.1109/NTC.1991.148052.
- [12] European Space Agency. ERA: European Robotic Arm Factsheet, 2009. URL [http://www.esa.int/esaHS/ESAQEIOVMOC\\_iss\\_0.html](http://www.esa.int/esaHS/ESAQEIOVMOC_iss_0.html).
- [13] Laryssa Patten, Lindsay Evans, Layi Oshinowo, Marius Ochisor, Nara Kazuharu, Aris Lodewijk, and Ed Tabarah. International Space Station Robotics: A Comparative Study of ERA, JEMRMS and MSS. In *7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2002'*, pages 1–8, Noordwijk, The Netherlands, 2002. ESTEC. URL [http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2002/Papers/astra2002\\_1.3-1.pdf](http://robotics.estec.esa.int/ASTRA/Astra2002/Papers/astra2002_1.3-1.pdf).
- [14] T B Sheridan. Telerobotics. *Automatica*, 25(4):487–507, 1989. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/0005-1098(89)90093-9. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109889900939>.
- [15] Y Shimomura. The present status and future prospects of the ITER project. *Journal of Nuclear Materials*, 329-333(0):5–11, 2004. ISSN 0022-3115. doi: 10.1016/j.jnucmat.2004.04.004. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311504001187>.
- [16] Chris Llewellyn Smith. The need for fusion. *Fusion Engineering and Design*, 74 (1-4):3–8, 2005. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2005.08.015. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379605003996>.
- [17] T Honda, Y Hattori, C Holloway, E Martin, Y Matsumoto, T Matsunobu, T Suzuki, A Tesini, V Baulo, R Haange, J Palmer, and K Shibanuma. Remote handling systems for ITER. *Fusion Engineering and Design*, 63-64(0):507–518, 2002. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/S0920-3796(02)00202-8. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379602002028>.
- [18] R.C. Goertz. Fundamentals of general-purpose remote manipulators. *Nucleonics*, 10(11):36–42, November 1952.
- [19] R.C. Goertz. Mechanical master-slave manipulator. *Nucleonics*, 12(11):45–46, November 1954.

- [20] R.C. Goertz and F. Bevilacqua. A force-reflecting position servomechanism. *Nucleonics*, 10(11):43–45, November 1952.
- [21] R.C. Goertz and W.M. Thompson. Electronically controlled manipulator. *Nucleonics*, 12(11):46–47, November 1954.
- [22] A.C Rolfe. A perspective on fusion relevant remote handling techniques. *Fusion Engineering and Design*, 82(15-24):1917–1923, October 2007. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2007.04.049. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.04.049>.
- [23] AFT Winfield. Future directions in tele-operated robotics. *Telerobotic applications*, 2000. URL <http://citeseerkx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.144.6045&rep=rep1&type=pdf>.
- [24] Y Measson, O David, F Louveau, and J P Friconeau. Technology and control for hydraulic manipulators. *Fusion Engineering and Design*, 69(1-4):129–134, 2003. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/S0920-3796(03)00280-1. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379603002801>.
- [25] D Weimer and S K Ganapathy. A synthetic visual environment with hand gesturing and voice input. *SIGCHI Bull.*, 20(SI):235–240, 1989. ISSN 0736-6906. doi: 10.1145/67450.67495.
- [26] Sharon Oviatt, Antonella DeAngeli, and Karen Kuhn. Integration and synchronization of input modes during multimodal human-computer interaction. In *Referring Phenomena in a Multimedia Context and their Computational Treatment*, ReferringPhenomena '97, pages 1–13, Stroudsburg, PA, USA, 1997. Association for Computational Linguistics.
- [27] P. Desbats and G. Piolain. Overview of remote handling technologies developed for Inspection and maintenance of spent fuel management Facilities in France. In *ENC 2005*, Versailles, France, 2005.
- [28] A.C Rolfe, P. Brown, P. Carter, R. Cusack, A. Gaberscik, L. Galbiati, B. Haist, R. Horn, M. Irving, D. Locke, A. Loving, P. Martin, S. Mills, R. Minchin, J. Palmer, S. Sanders, S. G. Sanders, and R. Stokes. A report on the first remote handling operations at JET. *Fusion Engineering and Design*, 46(2-4):299–306, November 1999. ISSN 09203796. doi: 10.1016/S0920-3796(99)00022-8. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-3796\(99\)00022-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-3796(99)00022-8).
- [29] Manuel Ferre, Rafael Aracil, Francisco Suárez-Ruiz, Jorge Barrio, Jose M. Breñosa, and Vicente Queral. Robot requirements for nuclear fusion facilities. In Angel Ibarra,

- José Manuel Perlado, and Manuel Ferre, editors, *1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, chapter 8, pages 135–150. Sección de Publicaciones de la ETSII, Madrid, Spain, 2011. ISBN 978-84-7484-239-5.
- [30] Francisco Suárez-Ruiz, Manuel Ferre, and Rafael Aracil. Telerobotics for Nuclear Fusion Environment. In *III Workshop de Robótica: Robótica Experimental*, pages 1–6, Sevilla, Spain, 2011.
- [31] V. Queral, L. Rios, J. Barrio, F. Suárez-Ruiz, and M. Ferre. Proposal of a fusion RH procedure for simulation and real servomanipulator tests relevant for IFMIF and ITER pipe flanges. In Angel Ibarra, José Manuel Perlado, and Manuel Ferre, editors, *1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, chapter 10, pages 167–174. Sección de Publicaciones de la ETSII, Madrid, Spain, 2011. ISBN 978-84-7484-239-5.
- [32] J. How. Chapter 5: Viewing/Metrology. In *Design Description Document DDD23: Remote handling equipment*, chapter 5, pages 1–11. ITER, N\_23\_DD\_56\_R0.3, 2004.
- [33] Y. Perrot, L. Chodorge, Ph. Desbats, J.P. Friconneau, and G. Piolain. Scale one field test of a long reach articulated carrier for inspection in spent fuel management facilities. *Advances in nursing science*, 28:31, 2004.
- [34] J. Campbell. *Radiation Hardness Manual (RAD)*. ITER Org., ITER\_D\_222RR8, v1.0, 2007.
- [35] M. Van Uffelen, S. Geboers, P. Leroux, and F. Berghmans. High total dose gamma radiation assessment of commercially available SiGe Heterojunction Bipolar Transistors. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, pages 58970C.1–58970C.14, 2005. ISSN 0277-786X. URL <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=18145309>.
- [36] P. Leroux, M. Van Uffelen, F. Berghmans, and A. Giraud. Design and Assessment of a High Gamma-Dose Tolerant VCSEL Driver With Discrete SiGe HBTs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(4):2033–2039, August 2006. ISSN 0018-9499. doi: 10.1109/TNS.2006.880946. URL [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1684055](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1684055).

- [37] Wojtek J. Bock, Israel Gannot, Stoyan Tanev, Francis Berghmans, Benoît Brichard, Alberto Fernandez Fernandez, Andrei Gusarov, Marco Van Uffelen, and Sylvain Girard. An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors . In Wojtek J. Bock, Israel Gannot, and Stoyan Tanev, editors, *Optical Waveguide Sensing and Imaging*, NATO Science for Peace and Security Series, pages 127–165. Springer Netherlands, Dordrecht, 2008. ISBN 978-1-4020-6950-5. doi: 10.1007/978-1-4020-6952-9. URL <http://www.springerlink.com/content/p6q1083m376n7218/>.
- [38] L. Worth, R. Pearce, D. Sands, Y. Kim, and N. Holtkamp. *ITER Vacuum Handbook*. ITER Org., ITER\_D\_2MV v2.2, 2009.
- [39] G Aiello, A Meier, T Scherer, S Schreck, P Spaeh, D Strauss, and A Vaccaro. Outgassing measurements for the ITER EC H&CD Upper Launcher. *Fusion Engineering and Design*, In Press,:–, 2011. ISSN 0920-3796. doi: DOI:10.1016/j.fusengdes.2011.01.128. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379611001402>.
- [40] D. Keller, P. Bayetti, J. Bonnemason, V. Bruno, P. Chambaud, J.P. Friconneau, L. Gargiulo, M. Itchah, S. Lamy, and R. Le. Real time command control architecture for an ITER relevant inspection robot in operation on Tore Supra. *Fusion Engineering and Design*, 84(2-6):1015–1019, June 2009. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.11.044. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.11.044>.
- [41] H. Ogawa, A. Iwamae, T. Sugie, S. Kasai, Y. Kawano, S. Kajita, and Y. Kusama. Research and Development of Optical Diagnostics for ITER. In *Proceedings 22nd IAEA Fusion Energy Conference (Geneva, Switzerland, 13-18 October 2008)*, 2008. URL [http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2008/papers/it\\_p6-23.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2008/papers/it_p6-23.pdf).
- [42] W.O. Winer. Molybdenum disulfide as a lubricant: a review of the fundamental knowledge. *Wear*, 10(6):422–452, 1967. doi: doi:10.1016/0043-1648(67)90187-1. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164867901871>.
- [43] L. Cizaire, B. Vacher, T. Le Mogne, JM Martin, L. Rapoport, A. Margolin, and R. Tenne. Mechanisms of ultra-low friction by hollow inorganic fullerene-like MoS<sub>2</sub> nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 160(2-3):282–287, 2002. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897202004206>.
- [44] N. Smick, B. LaBombarda, and C.S Pitcher. Plasma profiles and flows in the high-field side scrape-off layer in Alcator C-Mod. *Journal of Nuclear Materials*, 337-339: 281–285, March 2005. ISSN 00223115. doi: 10.1016/j.jnucmat.2004.09.035. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.09.035>.

- [45] J.B. Izard, Y. Perrot, and J.P. Friconeau. Review of design principles for ITER VV remote inspection in magnetic field. *Fusion Engineering and Design*, 84(2-6): 969–973, June 2009. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2009.02.016. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.02.016>.
- [46] T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Kosuge, M. Yuyama, H. Nagai, and F. Matsumoto. Generation of high magnetic fields using superconducting magnets. *Fusion Engineering and Design*, 81(20-22):2411–2415, November 2006. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2006.07.063. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2006.07.063>.
- [47] Michael Muntener, Alexandru Patriciu, Doru Petrisor, Dumitru Mazilu, Herman Bagga, Louis Kavoussi, Kevin Cleary, and Dan Stoianovici. Magnetic resonance imaging compatible robotic system for fully automated brachytherapy seed placement. *Urology*, 68(6):1313–1317, December 2006. ISSN 1527-9995. doi: 10.1016/j.urology.2006.08.1089. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.urology.2006.08.1089>.
- [48] J.B. Izard, L. Gargiulo, D. Keller, and Y. Perrot. Hardening inspection devices to ultra-high vacuum, temperature and high magnetic field. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 20(3):1767–1772, 2010. URL [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5433261](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5433261).
- [49] C Neri, L Bartolini, A Coletti, M Ferri de Collibus, G Fornetti, F Pollastrone, M Riva, and L Semeraro. The laser in vessel viewing system (IVVS) for iter: Test results on first wall and divertor samples and new developments. *Fusion Engineering and Design*, 82(15-24):2021–2028, 2007. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2006.12.006. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379607000208>.
- [50] C Neri, A Coletti, M Ferri de Collibus, G Fornetti, and F Pollastrone. The upgraded laser in vessel viewing system (IVVS) for ITER. *Fusion Engineering and Design*, 84 (2-6):224–228, 2009. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2009.01.096. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379609001094>.
- [51] Laurent Gargiulo, Pascal Bayetti, Vincent Bruno, Jean-Jacques Cordier, Jean-Pierre Friconeau, Christian Grisolia, Jean-Claude Hatchressian, Michael Houry, Delphine Keller, and Yann Perrot. Development of an ITER relevant inspection robot. *Fusion Engineering and Design*, 83(10-12):1833–1836, December 2008. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.06.039. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.039>.

- [52] Laurent Gargiulo, Pascal Bayetti, Vincent Bruno, Jean-Claude Hatchressian, Caroline Hernandez, Michael Houry, Delphine Keller, Jean-Pierre Martins, Yvan Measson, and Yann Perrot. Operation of an ITER relevant inspection robot on Tore Supra tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 84(2-6):220–223, June 2009. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.11.043. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.11.043>.
- [53] M. Houry, P. Bayetti, D. Keller, L. Gargiulo, V. Bruno, J.C. Hatchressian, C. Hernandez, J.P. Martins, Y. Measson, and Y. Perrot. Development of in situ diagnostics and tools handled by a light multipurpose carrier for tokamak in-vessel interventions. *Fusion Engineering and Design*, 85(10-12):1947–1951, December 2010. ISSN 09203796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.06.030. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.06.030>.
- [54] Peetu Nieminen, Salvador Esque, Ali Muhammad, Jouni Mattila, Jukka Väyrynen, Mikko Siuko, and Matti Vilenius. Water hydraulic manipulator for fail safe and fault tolerant remote handling operations at ITER. *Fusion Engineering and Design*, 84 (7-11):1420–1424, 2009. ISSN 0920-3796. doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379608004377>.
- [55] K. Chinzei and K. Miller. MRI guided surgical robot. In *Australian Conference on Robotics and Automation*, pages 50–55, Sydney, Australia, 2001.
- [56] Ignacio Galiana, Manuel Ferre, Jorge Barrio, and Francisco Suárez-Ruiz. Arquitectura de Control Bilateral para Manipulación Remota en Instalaciones de Fusión Nuclear, 2012. URL <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14427>.
- [57] Kraft Telerobotics. Grips Remotely Operated Force Feedback Manipulator Arm System, 2012. URL <http://krafttelerobotics.com/products/grips.htm>.
- [58] O.-Y. Ming, D V Beard, and Jr. Brooks F.P. Force display performs better than visual display in a simple 6-D docking task. In *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*, pages 1462 –1466 vol.3, May 1989. doi: 10.1109/ROBOT.1989.100185.
- [59] B Hannaford, L Wood, D A McAfee, and H Zak. Performance evaluation of a six-axis generalized force-reflecting teleoperator. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 21(3):620–633, 1991. ISSN 0018-9472. doi: 10.1109/21.97455.
- [60] Manuel Ferre, Jordi Barrio, Claudio Melchiorri, Juan Bogado, Pedro Castedo, and Juan Ibarra. Experimental Results on Bilateral Control Using an Industrial Telemanipulator. In Manuel Ferre, Martin Buss, Rafael Aracil, Claudio Melchiorri, and Carlos Balaguer, editors, *Advances in Telerobotics*, volume 31 of *Springer Tracts in*

- Advanced Robotics*, pages 177–190. Springer Berlin / Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-71363-0. URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7_12).
- [61] M Quigley, K Conley, B Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, and A. Ng. ROS: an open-source Robot Operating System. In *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.
- [62] D Gossow, A Leeper, D Hershberger, and M Ciocarlie. Interactive Markers: 3-D User Interfaces for ROS Applications [ROS Topics]. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 18(4):14–15, 2011. ISSN 1070-9932. doi: 10.1109/MRA.2011.943230.
- [63] Chih-Hung King, Marc Killpack, and Charles Kemp. Effects of Force Feedback and Arm Compliance on Teleoperation for a Hygiene Task. In Astrid Kappers, Jan van Erp, Wouter Bergmann Tiest, and Frans van der Helm, editors, *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, volume 6191 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 248–255. Springer Berlin / Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-14063-1. URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14064-8\\_36](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14064-8_36).
- [64] Koen Buys, Steven Bellens, Wilm Decre, Ruben Smits, Enea Scioni, Tinne De Laet, Joris De Schutter, and Herman Bruyninckx. Haptic coupling with augmented feedback between two KUKA Light-Weight Robots and the PR2 robot arms. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3031–3038, 2011. doi: 10.1109/IROS.2011.6094925.
- [65] D Forkel-Wirth, M Magistris, S Roesler, C Theis, L Ulrici, and Others. Radiation protection issues after 20 years of LHC operation. *EuCARD-AccNet-EuroLumi Workshop: The High-Energy Large Hadron Collider*, pages 134–136, 2010.
- [66] Carolina Passenberg, Angelika Peer, and Martin Buss. A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems. *Journal of Mechatronics*, 2010.
- [67] R J Anderson. Bilateral control of teleoperators with time delay. *Control, IEEE Transactions on*, 34(5), 1989.
- [68] P A Prokopiou, S G Tzafestas, and W S Harwin. Towards Variable-Time Delays-Robust Telemanipulation Through Master State Prediction. In *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics*, pages 305–310, 1999.
- [69] G Slotine Niemeyer and Jean-Jacques E. Telemanipulation with Time Delays. *The International Journal of Robotics Research*, 23(9):873–890, 2004. ISSN 0278-3649. doi: 10.1177/0278364904045563.

- [70] Michel Franken, Stefano Stramigioli, Sarthak Misra, C Secchi, and A Macchelli. Bilateral Telemanipulation With Time Delays: A Two-Layer Approach Combining Passivity and Transparency. *Robotics, IEEE Transactions on*, 27(4):741–756, 2011.
- [71] Sandra Hirche and Martin Buss. Human perceived transparency with time delay. In *Advances in Telerobotics*, pages 191–209. Springer, 2007.
- [72] Jake J Abbott and Allison M Okamura. Stable Forbidden-Region Virtual Fixtures for Bilateral Telemanipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128(1):53, 2006. ISSN 00220434. doi: 10.1115/1.2168163.
- [73] Kan Chinl, M A Dahleh, and G Verghese. Stable Teleoperation with Scaled Feedback. In *LIDS Technical Reports*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1993.
- [74] Moussa Boukhnifer. Stability and transparency for scaled teleoperation system. *Intelligent Robots and Systems*, 2006.
- [75] Cristian Secchi, Stefano Stramigioli, and Cesare Fantuzzi. Intrinsically passive force scaling in haptic interfaces. *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2121–2126, 2006. doi: 10.1109/IROS.2006.282491.
- [76] A Pérez and Jan Rosell. An assisted re-synchronization method for robotic teleoperated tasks. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 886–891. IEEE, 2011.
- [77] William A McNeely, Kevin D Puterbaugh, and James J Troy. Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, 2005. ACM. doi: 10.1145/1198555.1198605. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1198555.1198605>.
- [78] Thomas H Massie and Kenneth J Salisburg. The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects. In *Proceedings of the 1994 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, volume DSC 55-1, pages 295–302, Chicago, IL, USA, 1994.
- [79] Manuel Ferre, Rafael Aracil, Jorge Barrio, and Francisco Suárez-Ruiz. Método de guiado de dispositivos robóticos teleoperados para alternar modo de control en posición y modo de control en velocidad, 2011.
- [80] Jorge Barrio, Francisco Suarez-Ruiz, Manuel Ferre, and Rafael Aracil. A Rate-Position Haptic Controller for Large Telemanipulation Workspaces. In *IEEE/RSJ*

- International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012 (IROS)*, Algarve, Portugal, 2012.
- [81] Jorge Barrio, Francisco A. Suárez, Alex Owen-Hill, Manuel Ferre, and Rafael Aracil. An innovative Rate-Position Controller for Performing Remote Fusion Tasks in a Large Workspace. In *2nd Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN*, Spain, Madrid, 2012.
  - [82] Jorge Barrio, Francisco Suarez-Ruiz, Manuel Ferre, and Rafael Aracil. A Novel Remote Handling Rate-Position Controller for telemanipulating in a large workspace. *Fusion Engineering and Design*, 2012. ISSN 0920-3796.
  - [83] W. S. Kim, F. Tendick, S. R. Ellis, and L. W. Stark. A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(5):426–436, October 1987. ISSN 0882-4967. doi: 10.1109/JRA.1987.1087117. URL [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=1087117](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1087117).
  - [84] I Farkhatdinov and Jee-Hwan Ryu. Hybrid position-position and position-speed command strategy for the bilateral teleoperation of a mobile robot. In *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07. International Conference on*, pages 2442–2447, 2007. doi: 10.1109/ICCAS.2007.4406773.
  - [85] Lionel Dominjon, Anatole Lecuyer, Jean-Marie Burkhardt, Guillermo Andrade-Barroso, and Simon Richir. The "Bubble"Technique: Interacting with Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, WHC '05, pages 639–640, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-2310-2. doi: 10.1109/WHC.2005.126.
  - [86] Adrián Mora and Antonio Barrientos. Re-configurable Control Scheme for Guiding Telerobotics. In Manuel Ferre, Martin Buss, Rafael Aracil, Claudio Melchiorri, and Carlos Balaguer, editors, *Advances in Telerobotics*, volume 31 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 289–301. Springer Berlin / Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-71363-0. URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7\\_18](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7_18).
  - [87] Kenneth Waldron and James Schmiedeler. Kinematics. In Bruno Siciliano and Oussama Khatib, editors, *Springer Handbook of Robotics*, chapter 1, pages 9–33. Springer Berlin / Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
  - [88] J U Korein and N I Badler. Techniques for Generating the Goal-Directed Motion of Articulated Structures. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2:71–81,

1982. ISSN 0272-1716. doi: <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MCG.1982.1674498>.
- [89] Michael Meredith and Steve Maddock. Adapting motion capture data using weighted real-time inverse kinematics. *Comput. Entertain.*, 3(1):5, 2005. ISSN 1544-3574. doi: 10.1145/1057270.1057281. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1057270.1057281>.
- [90] H Takeuchi, M Sugimoto, H Nakamura, T Yutani, M Ida, S Jitsukawa, T Kondo, S Matsuda, H Matsui, T E Shannon, R A Jameson, F W Wiffen, J Rathke, C Piaszczyk, and S Zinkle. *Staged Deployment of the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)*, 2000.
- [91] Russell Smith. Open Dynamics Engine v0.5. Manual de Usuario, 2006. URL <http://www.ode.org/ode-latest-userguide.htm>.
- [92] Margaret Minsky, Ouh-young Ming, Oliver Steele, Frederick P Brooks Jr., and Max Behensky. Feeling and seeing: issues in force display. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(2):235–241, 1990. ISSN 0097-8930. doi: 10.1145/91394.91451. URL <http://doi.acm.org/10.1145/91394.91451>.
- [93] J E Colgate, P E Grafing, M C Stanley, and G Schenkel. Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*, pages 202–208, September 1993. doi: 10.1109/VRAIS.1993.380777.
- [94] M C Cavusoglu and F Tendick. Multirate simulation for high fidelity haptic interaction with deformable objects in virtual environments. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2458 –2465 vol.3, 2000. doi: 10.1109/ROBOT.2000.846397.