UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE
TELEMANIPULACIÓN CON ALTO
GRADO DE ESCALADO ORIENTADAS A
LA INTERACCIÓN HOMBRE-ROBOT EN
ENTORNOS NUCLEARES**

TESIS DOCTORAL

Jose Manuel Breñosa Martínez

Ingeniero Industrial - Esp. Automática y Electrónica Industrial

Máster en Automática y Robótica

2016

**DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA,
INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE
TELEMANIPULACIÓN CON ALTO
GRADO DE ESCALADO ORIENTADAS A
LA INTERACCIÓN HOMBRE-ROBOT EN
ENTORNOS NUCLEARES**

TESIS DOCTORAL

Autor: Jose Manuel Breñosa Martínez

Ingeniero Industrial

Máster en Automática y Robótica

Director: Manuel Ferre Pérez

Doctor Ingeniero Industrial

2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS DE TELEMANIPULACIÓN CON ALTO GRADO DE ESCALADO ORIENTADAS A LA INTERACCIÓN HOMBRE-ROBOT EN ENTORNOS NUCLEARES

Autor: Jose Manuel Breñosa Martínez

Tribunal:

Presidente: Dr. Rafael Aracil Santonja

Secretario Dr. Miguel Hernando Gutiérrez

Vocal A : Dr. Antonio Giménez Fernández

Vocal B : Dr. José María Azorín Poveda

Vocal C : Dr. Raúl Marín Prades

Suplente A : Dra. Concepción Alicia Monje Micharet

Suplente B : Dr. Juan Antonio Escalera Piña

Acuerdan otorgar la calificación de:

Madrid, a 3 de Febrero de 2016

AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo de mi tesis, que ha ocupado una parte importante de los últimos años, he tenido la oportunidad de conocer y redescubrir a personas sorprendentes: sus consejos, contribuciones y su apoyo me han facilitado el desarrollo de mi personalidad a la par que lo hacía en mi labor investigadora. Estos breves párrafos son para todos ellos.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director de tesis Manuel Ferre toda la orientación recibida durante todos estos años. Tu motivación y enseñanzas me han servido para crecer como ingeniero e investigador, por toda la formación recibida, por tus proposiciones, por tu energía inagotable, por tu orientación y consejos para encontrar mi camino. Gracias.

Me gustaría agradecer a todos los miembros y profesores pertenecientes al Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Electrónica e Informática Industrial con los que he tenido oportunidad de colaborar, por la gran ayuda y apoyo recibido; así como a todo el personal del Centro de Automática y Robótica, por su dedicación.

Por supuesto, debo agradecer en particular a todos los colegas que han pasado por el Laboratorio de Telerrobótica del grupo de Robots y Máquinas Inteligentes: Jordi Barrio, Raúl Wirz, Pablo García, Patricia García, Víctor Eslava, Eva María Fernández, José Vaca, Marta Bielza, Marta Ayestarán, Pablo Cerrada, Nuria Moratalaya, Sandra Campo, Ignacio Galiana, José María Cogollor, Alex Owen-Hill, Prithvi Pagala, Ramviyas Parasunam, Javier Rojo, Elena García, Francisco Suárez, Santiago Martínez, Arturo Colina, Carlos Gutiérrez, Luis Rubio, José Luis Samper, Sofía Coloma, Joaquín Macanás, Gonzalo García, Juan Carlos Ramos (y al resto de los 47 ROMIN que no haya nombrado).

Asimismo, quiero agradecer a aquellos que me quieren y que me miran con cierta incredulidad cada vez que me embarco en una nueva aventura, porque saben que en mi caso querer es poder. Siempre he notado su apoyo incondicional: a mis padres, Marga y José Manuel, y mi hermana María, y en

definitiva al resto de la familia que me ha visto crecer, contribuyendo a que hoy en día sea tal y como soy.

Finalmente, quisiera concluir recordando a las personas más importantes en mi vida: agradecer a mi mujer, Cristina, por complementarme y aportarme la felicidad en todos y cada uno de los momentos inolvidables a lo largo de todos estos años, especialmente cuando las fuerzas en ocasiones flaqueaban; y cómo no nombrar a mis chiquitines, cuyas sonrisas y abrazos hacen que me esfuerce cada día más para darles todo lo que se merecen y más, para aprovechar al máximo los buenos y mejores momentos de mi vida y toda la felicidad que me aportan a cada instante.

Cris, Nico, Daniel y Alicia, podría faltarme cualquier necesidad excepto vosotros.

If you can imagine, it is possible...

RESUMEN

Esta tesis se centra en desarrollo de tecnologías para la interacción hombre-robot en entornos nucleares de fusión. La problemática principal del sector de fusión nuclear radica en las condiciones ambientales tan extremas que hay en el interior del reactor, y la necesidad de que los equipos cumplan requisitos muy restrictivos para poder aguantar esos niveles de radiación, magnetismo, ultravacío, temperatura... Como no es viable la ejecución de tareas directamente por parte de humanos, habrá que utilizar dispositivos de manipulación remota para llevar a cabo los procesos de operación y mantenimiento.

En las instalaciones de ITER es obligatorio tener un entorno controlado de extrema seguridad, que necesita de estándares validados. La definición y uso de protocolos es indispensable para regir su buen funcionamiento. Si nos centramos en la telemanipulación con algo grado de escalado, surge la necesidad de definir protocolos para sistemas abiertos que permitan la interacción entre equipos y dispositivos de diversa índole. En este contexto se plantea la definición del Protocolo de Teleoperación que permita la interconexión entre dispositivos maestros y esclavos de distinta tipología, pudiéndose comunicar bilateralmente entre sí y utilizar distintos algoritmos de control según la tarea a desempeñar.

Este protocolo y su interconectividad se han puesto a prueba en la Plataforma Abierta de Teleoperación (P.A.T.) que se ha desarrollado e integrado en la ETSII UPM como una herramienta que permita probar, validar y realizar experimentos de telerrobótica. Actualmente, este Protocolo de Teleoperación se ha propuesto a través de AENOR al grupo ISO de Telerobotics como una solución válida al problema existente y se encuentra bajo revisión.

Con el diseño de dicho protocolo se ha conseguido enlazar maestro y esclavo, sin embargo con los niveles de radiación tan altos que hay en ITER la electrónica del controlador no puede entrar dentro del tokamak. Por ello se propone que a través de una mínima electrónica convenientemente protegida se puedan multiplexar las señales de control que van a través del cableado umbilical desde el controlador hasta la base del robot. En este ejercicio teórico se demuestra la utilidad y viabilidad de utilizar este tipo de solución para reducir el volumen y peso del cableado umbilical en cifras

aproximadas de un 90%, para ello hay que desarrollar una electrónica específica y con certificación RadHard para soportar los enormes niveles de radiación de ITER.

Para este manipulador de tipo genérico y con ayuda de la Plataforma Abierta de Teleoperación, se ha desarrollado un algoritmo que mediante un sensor de fuerza/par y una IMU colocados en la muñeca del robot, y convenientemente protegidos ante la radiación, permiten calcular las fuerzas e inercias que produce la carga, esto es necesario para poder transmitirle al operador unas fuerzas escaladas, y que pueda sentir la carga que manipula, y no otras fuerzas que puedan influir en el esclavo remoto, como ocurre con otras técnicas de estimación de fuerzas. Como el blindaje de los sensores no debe ser grande ni pesado, habrá que destinar este tipo de tecnología a las tareas de mantenimiento de las paradas programadas de ITER, que es cuando los niveles de radiación están en sus valores mínimos.

Por otro lado para que el operador sienta lo más fielmente posible la fuerza de carga se ha desarrollado una electrónica que mediante el control en corriente de los motores permita realizar un control en fuerza a partir de la caracterización de los motores del maestro. Además para aumentar la percepción del operador se han realizado unos experimentos que demuestran que al aplicar estímulos multimodales (visuales, auditivos y hápticos) aumenta su inmersión y el rendimiento en la consecución de la tarea puesto que influyen directamente en su capacidad de respuesta.

Finalmente, y en referencia a la realimentación visual del operador, en ITER se trabaja con cámaras situadas en localizaciones estratégicas, si bien el humano cuando manipula objetos hace uso de su visión binocular cambiando constantemente el punto de vista adecuándose a las necesidades visuales de cada momento durante el desarrollo de la tarea. Por ello, se ha realizado una reconstrucción tridimensional del espacio de la tarea a partir de una cámara-sensor RGB-D, lo cual nos permite obtener un punto de vista binocular virtual móvil a partir de una cámara situada en un punto fijo que se puede proyectar en un dispositivo de visualización 3D para que el operador pueda variar el punto de vista estereoscópico según sus preferencias.

La correcta integración de estas tecnologías para la interacción hombre-robot en la P.A.T. ha permitido validar mediante pruebas y experimentos para verificar su utilidad en la aplicación práctica de la telemanipulación con alto grado de escalado en entornos nucleares de fusión.

ABSTRACT

This thesis focuses on developing technologies for human-robot interaction in nuclear fusion environments. The main problem of nuclear fusion sector resides in such extreme environmental conditions existing in the hot-cell, leading to very restrictive requirements for equipment in order to deal with these high levels of radiation, magnetism, ultravacuum, temperature... Since it is not feasible to carry out tasks directly by humans, we must use remote handling devices for accomplishing operation and maintenance processes.

In ITER facilities it is mandatory to have a controlled environment of extreme safety and security with validated standards. The definition and use of protocols is essential to govern its operation. Focusing on Remote Handling with some degree of escalation, protocols must be defined for open systems to allow interaction among different kind of equipment and several multifunctional devices. In this context, a Teleoperation Protocol definition enables interconnection between master and slave devices from different typologies, being able to communicate bilaterally one each other and using different control algorithms depending on the task to perform.

This protocol and its interconnectivity have been tested in the Teleoperation Open Platform (T.O.P.) that has been developed and integrated in the ETSII UPM as a tool to test, validate and conduct experiments in Telerobotics. Currently, this protocol has been proposed for Teleoperation through AENOR to the ISO Telerobotics group as a valid solution to the existing problem, and it is under review.

Master and slave connection has been achieved with this protocol design, however with such high radiation levels in ITER, the controller electronics cannot enter inside the tokamak. Therefore it is proposed a multiplexed electronic board, that through suitable and RadHard protection processes, to transmit control signals through an umbilical cable from the controller to the robot base. In this theoretical exercise the utility and feasibility of using this type of solution reduce the volume and weight of the umbilical wiring approximate 90% less, although it is necessary to develop specific electronic hardware and validate in RadHard qualifications in order to handle huge levels of ITER radiation.

Using generic manipulators does not allow to implement regular sensors for force feedback in ITER conditions. In this line of research, an algorithm to calculate the forces and inertia produced by the load has been developed using a force/torque sensor and IMU, both conveniently protected against radiation and placed on the robot wrist. Scaled forces should be transmitted to the operator, feeling load forces but not other undesirable forces in slave system as those resulting from other force estimation techniques. Since shielding of the sensors should not be large and heavy, it will be necessary to allocate this type of technology for programmed maintenance periods of ITER, when radiation levels are at their lowest levels.

Moreover, the operator perception needs to feel load forces as accurate as possible, so some current control electronics were developed to perform a force control of master joint motors going through a correct motor characterization. In addition to increase the perception of the operator, some experiments were conducted to demonstrate applying multimodal stimuli (visual, auditory and haptic) increases immersion and performance in achieving the task since it is directly correlated with response time.

Finally, referring to the visual feedback to the operator in ITER, it is usual to work with 2D cameras in strategic locations, while humans use binocular vision in direct object manipulation, constantly changing the point of view adapting it to the visual needs for performing manipulation during task procedures. In this line a three-dimensional reconstruction of non-structured scenarios has been developed using RGB-D sensor instead of cameras in the remote environment. Thus a mobile virtual binocular point of view could be generated from a camera at a fixed point, projecting stereoscopic images in 3D display device according to operator preferences.

The successful integration of these technologies for human-robot interaction in the T.O.P., and validating them through tests and experiments, verify its usefulness in practical application of high scaling remote handling at nuclear fusion environments.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Índice de Contenidos	XI
Acrónimos	XV
1 Introducción	1
1.1 Preámbulo.....	2
1.2 Motivación	5
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Estructura y contribuciones	8
2 Antecedentes	11
2.1 El ser humano manipulando.....	12
2.1.1 Los sentidos cuando realizamos una tarea	12
2.1.2 Importancia de las interfaces multimodales.....	15
2.2 Nociones de Sistemas Teleoperados.....	17
2.2.1 Marco histórico en teleoperación	18
2.2.2 Aplicación de la telemanipulación al sector nuclear.....	24
2.3 Principios de la Fusión Nuclear	26
2.3.1 Breve historia de la fusión.....	28
2.3.2 ITER	29
2.4 Manipulación Remota en Fusión Nuclear.....	31
2.4.1 Necesidad de manipulación remota	33
2.4.2 Diferentes tipos de sistemas de fusión	34
2.4.3 Centros de manipulación remota en nuclear.....	35
2.4.4 Requisitos de Telemanipuladores en Fusión.	40
2.4.5 Manipuladores para entornos de Fusión.....	43
3 Plataforma Abierta de Teleoperación	49

3.1 Definición de Requisitos para un puesto de Teleoperación:.....	50
3.1.1 Requisitos de la Sala de Control.....	50
3.1.2 Requisitos de morfología humana y ergonomía	53
3.1.3 Requisitos de las interfaces humano-robot	55
3.1.4 Requisitos de sistemas de visión 3D.....	56
3.1.5 Requisitos de las interfaces Hápticas:.....	57
3.2 Qué es la P.A.T.	59
3.3 Integración de Sistemas.....	62
3.3.1 Sistema de Visión	63
3.3.2 Sistema de Control de Maestro.....	64
3.3.3 Sistema de Control de Esclavo.....	67
3.3.4 Sistema de Comunicaciones	70
3.3.5 Sistema de Programación de Alto Nivel.....	72
3.3.6 Sistema de Seguridad.....	74
3.3.7 Otros subsistemas.....	75
3.4 Tests de Validación	76
4 Propuesta de Protocolo de Teleoperación	85
4.1 Estándares en Telerrobótica	86
4.2 Protocolo de Teleoperación.	86
4.2.1 Protocolos de comunicación: TCP y UDP	86
4.2.2 Procedimiento estándar	89
4.2.3 Modos de operación:	91
4.2.4 Conexiones IP.....	95
4.2.5 Base de Datos de Robots: RobDB	98
4.2.6 Criptografía y seguridad.	98
4.2.7 Protocolo de realimentación visual.....	98
4.3 Pruebas y Experimentos.....	101
4.3.1 Pruebas de interconectividad	101
4.3.2 Experimentos de Protocolos.....	104
4.4 Discusión de resultados	113

5 Solución de multiplexado para Fusión Nuclear.....	115
5.1 Diseño de soluciones para Teleoperación en Fusión Nuclear	116
5.2 Solución de Multiplexado.....	117
5.2.1 Requisitos del multiplexor:.....	118
5.2.2 Tecnología de Multiplexado.	125
5.2.3 Análisis de posibles soluciones.....	127
5.2.4 Análisis de la solución	132
6 Tecnologías hápticas para teleoperación.....	137
6.1 Tecnologías de para la reflexión de fuerza.....	138
6.1.1 Estimación de cargas en el esclavo	140
6.1.2 Diseño de algoritmo	143
6.2 Reflexión de Fuerzas en el maestro	149
6.2.1 Medición de Fuerza de forma indirecta	149
6.2.2 Diseño de la electrónica del sensor	155
6.2.1 Mediciones fuerza-corriente	159
6.3 Inmersión multimodal	161
6.4 Experimentos	162
6.4.1 Pruebas de Estimación de Fuerzas	162
6.4.2 Pruebas del control de fuerza en el maestro	167
6.4.3 Experimentos de reflexión de fuerza.....	167
6.4.4 Experimentos de estímulos multimodales	168
6.5 Discusión de los resultados.....	173
7 Reconstrucción de entornos tridimensionales.....	177
7.1 Tecnologías Visuales para inmersión.....	178
7.1.1 Reconstrucción tridimensional.....	179
7.1.2 Visualización en 3D.....	185
7.1.3 Mejora del rendimiento en Tiempo Real	189
7.2 Pruebas y experimentos	193
7.2.1 Valoración de precisión en la reconstrucción	193

7.2.2 Pruebas de rendimiento	197
7.2.3 Experimentos de experiencia 3D	201
7.3 Discusión de resultados	203
8 Conclusiones	207
Referencias bibliográficas.....	213
Apéndice A: Publicaciones.....	233
Apéndice B: Estudio del multiplexor	237
Apéndice C: Lista de figuras.....	261
Apéndice E: Lista de tablas.....	267

ACRÓNIMOS

AC	Corriente Alterna
ADC	Analog to Digital Conversion
API	Application Programming Interface
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ASIC	Application-specific integrated circuit
CERN	European Organisation for Nuclear Research
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
COTS	Commercial of-the-shelf
COTS	commercial off-the-shelf
CPU	Central Processing Unit
CR	Control Room
CURV	Cable Controlled Underwater Vehicle
DEMO	DEMOstration Power Plant
DEMUX	abreviatura de Demultiplexor
DT	Duterio Tritio
DTP	Divertor Test Platform
FOV	Field of View
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPS	Frames por segundo
g.d.l.	Grado de libertad
GLM	Análisis de Mediciones Repetidas
GSI	Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario
HD	High Definition
HDMI	High-Definition Multimedia Interface

HMD	Head Mounted Display
IC	Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
IFMIF	Fusión Materials Irradiation Facility.
IMU	inertial measurement unit
IP	Internet Protocol
IP	Internet Protocol
IRFM	Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique
ISO	International Organization for Standardization
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
IVT	In-Vessel Transporter
IVVS	In-Vessel Viewing System
JET	Joint European Torus
LAN	Local Area Network
MF3	Master Finger 3
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor
MUX	abreviatura de Multiplexor
PAT	Plataforma Abierta de Teleoperación
PC	Personal Computer
RadHard	Radiation Hardening. Protección antirradiación.
RGB-D	Red Green Blue - Depth
RHBD	Radiation Hardening by Design
RHBD	Técnicas de radiación endurecido por diseño
RHBD	Remote Handling
ROS	Robotic Operative System
RT	Real Time
RTSP	Real Time Streaming Protocol

RTT	Round Trip Time
RUDP	Reliable User Datagram Protocol
SDK	software development kit
TCP	Transport Communication Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TID	Total Ionizing Dose
TID	Dosis Totales Ionizantes
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VI	Virtual Instrument, bloque básico de programación en LabView
VTT	Technical Research Centre of Finland
WDS	Wireless Distribution System
WDS	Wireless Dsitribution System
WHMAN	Water Hydraulic MANipulator
WLAN	wireless local area network
WML	Windows Media Library
WPF	Windows Presentation Foundation

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se resume todo el trabajo realizado en esta tesis que se centra en el desarrollo y aplicación de tecnologías para la telerrobótica.

El campo concreto de aplicación para el que se han diseñado es la telerrobótica en el sector nuclear de fusión, de esta manera dichas tecnologías permitirán abordar nuevas formas de inmersión que faciliten al operador telemanipular de una forma más natural y eficiente.

Además, se expondrán las motivaciones y objetivos que han permitido su consecución, así como el planteamiento y la estructura seguidos para su diseminación en este documento.

1.1 Preámbulo

Con el título "Desarrollo de tecnologías de telemanipulación con alto grado de escalado orientadas a la interacción hombre-robot en entornos nucleares", se ha querido abarcar desde un principio a todas las técnicas, algoritmos, interfaces y medios de comunicación que permiten a un operador humano teleoperar un sistema robótico y los requisitos que se necesitan para llevarlo a cabo en un entorno tan peligroso, degradante y riguroso como es un entorno nuclear de fusión.

La teleoperación de manipuladores esclavos se lleva desarrollando desde mediados del siglo XX para llevar a cabo el manejo remoto de operaciones en determinados entornos donde el acceso humano no es posible [Queral 2011]. Estos ambientes se caracterizan por tres aspectos diferentes, a saber: condiciones peligrosas, problemática en la escala de los espacios de trabajo y problemática en la productividad o efectividad de las tareas.

Algunos ejemplos de teleoperación en condiciones peligrosas son las de manipulación remota de robots desplegados en zonas radiactivas, como en la investigación nuclear de fusión, en tareas de mantenimiento de reactores, etc. [Huihuan 2013]; por otro lado, cuando las condiciones ambientales se caracterizan por entornos inaccesibles debido al tamaño, las áreas a estudiar son: los robots de limpieza de conductos, robótica destinada al ensamblaje [Akin 2002]. De cara al punto de la productividad, puede ser más eficiente diseñar y construir un robot para ser teleoperado en un entorno remoto que llevar a cabo la misma operación por medio de la intervención humana; como por ejemplo, el mantenimiento de un parque eólico marino, rescate oilrig, operaciones submarinas, etc. [Wilson 1987]. También hay circunstancias en las que se combinan los anteriores problemas lo cual conduce a un problema importante, como por ejemplo, las condiciones de escalado con productividad, como ocurre con la robótica quirúrgica [Ballantyne 2002].

Históricamente, las operaciones con más destreza de manipulación remota se han desarrollado para la industria nuclear para evitar la exposición humana a la radiación. Han empleado brazos articulados para reproducir los movimientos humanos en el medio ambiente a distancia.

Los robots son comandados por un dispositivo maestro controlado por un operador situado en un entorno seguro tradicionalmente. La retroalimentación de fuerza al operador ha sido normalmente creada por medio del error de posición entre maestro y esclavo, aprovechando el diseño mecánico de fácil guiado de estos sistemas hápticos [Goertz 1964]. Los métodos de estimación de fuerza externa proporcionan medios de cuantificación de las fuerzas y pares ejercidos en un sistema sin el empleo de una medición directa a través de sensor de fuerza-par. Sin embargo, hoy día, la mayoría de los sensores de fuerza-par son tan avanzados que pueden proporcionar unas lecturas muy fiables en 6 grados de libertad de medición de fuerza/par uniéndolos en un efector final de robot o por medio del uso de un sensor de par en cada articulación robótica.

Estas soluciones, aunque se consideran muy fiables, no siempre son factibles, y otros métodos tienen que ser exploradas, como uno de los que se expondrán en la presente tesis. Estos métodos se basan normalmente en los observadores de la fuerza e implican un complicado proceso de modelado de robótica, identificación de parámetros, diseño e implementación final. El objetivo final de este proceso es obtener un modelo fiable que permita la predicción de las fuerzas externas aplicadas en el robot al conocer el estado actual del robot y la entrada que se envía. Las fuerzas y momentos externos estimados se pueden utilizar para diferentes propósitos, tales como monitoreo de la condición, la detección de impacto o la fuerza de respuesta. Sin embargo, demostraremos que con una correcta caracterización de los motores se puede hacer una estimación adecuada para la realimentación de fuerza en el dispositivo háptico.

La finalidad de los sistemas teleoperados es reproducir las habilidades humanas de manipulación en un entorno remoto. En la mayor parte de las aplicaciones, los robots manipulan los mismos objetos que normalmente serían manipulados por personas, pero debido al riesgo del entorno para el operador se utiliza un sistema

teleoperado [Sheridan 1992] [Ferre 2007]. En este tipo de aplicaciones, propiedades como la transparencia (reproducción fiel de impedancias) se consideran de gran interés; ya que, facilitan la manipulación remota del operador con un elevado grado de realismo.

En el contexto de este trabajo, se considera que el riesgo para el operador es debido a la radiación existente en el entorno remoto, por ello, se pretende extender las capacidades de manipulación humana a tareas en las que se realizan, tanto operaciones habituales de manipulación, como manipulación de cargas elevadas. En estos casos, es importante aislar correctamente las fuerzas referentes exclusivamente a la carga para evitar trasladar otro tipo de fuerzas al operador, lo cual conllevaría a un deterioro en su percepción del entorno remoto. Al centrarse en la reflexión de fuerzas de los objetos de la manipulación, se precisa entonces combinar conveniente la reflexión de fuerzas con la realimentación visual y auditiva para una mayor inmersión en el entorno remoto mediante estímulos multimodales, de forma que se garantice la correcta ejecución de las tareas. Entre las contribuciones realizadas se ha desarrollado una reconstrucción tridimensional de entornos no estructurados para ofrecer imágenes estereoscópicas con punto de vista y disparidad binocular adaptables de manera que se emule la visión humana y se evite la fatiga visual del operador.

La manipulación de cargas elevadas conlleva la utilización de actuadores hidráulicos en numerosas ocasiones, ya que los actuadores eléctricos equivalentes implicarían el uso de motores de elevadas dimensiones. Los actuadores hidráulicos tienen características particulares que los hacen más difíciles de controlar que los actuadores eléctricos, como pueden ser las pérdidas producidas en las tuberías y el comportamiento no lineal [Watton 2009]. Esto hace que los robots hidráulicos presenten mayor dificultad que los eléctricos para ser teleoperados, así queda reflejado en la integración de la Plataforma Abierta de Teleoperación que se ha creado para la prueba de algoritmos y el desarrollo de experimentos, y de la que se hablará en detalle más adelante.

En cuanto al campo de aplicación, en esta tesis se considera la manipulación de cargas elevadas dentro de entornos con radiación. Este tipo de aplicaciones son

propias de grandes instalaciones, como las centrales nucleares de fusión o los aceleradores de partículas. En Europa tienen especial relevancia dos centrales experimentales de fusión nuclear: el "Joint European Torus" (JET) [Douglas 2011] del Reino Unido, y el "International Thermonuclear Experimental Reactor" (ITER) [Friconneau 2011] actualmente en construcción en Francia. En cuanto a los centros de aceleradores de partículas, destacan el "European Organisation for Nuclear Research" (CERN) [Collete 2010] en Suiza, o el "Helmholtz Centre for Heavy Ion Research GmbH" (GSI) [Behr 2008] en Alemania.

Finalmente, indicar que la investigación en esta tesis se enmarca en el desarrollo de un nuevo estándar ISO de telerrobótica, realizando experimentos para la validación de las nuevas normas y estándares internacionales de ISO que están actualmente en desarrollo para telerrobótica dentro de entornos con radiación.

1.2 Motivación

La mayor motivación de esta tesis es perseguir una meta todavía inalcanzada en la telerrobótica: un ser humano pueda realizar una tarea teleoperada de la misma forma que la realizaría directamente, añadiendo el reto de la aplicación a entornos nucleares de fusión, donde los equipos tienen que cumplir con unos requisitos muy estrictos.

Sin embargo, no ha de verse como un beneficio exclusivo para la telerrobótica en fusión nuclear ya que muchas áreas en investigación se nutrirían de los avances logrados en esta disciplina.

Para comprender las necesidades del teleoperador de cara a manipular de forma natural, es necesario hacer una breve sinopsis introductoria sobre la necesidad de la robótica en los entornos nucleares así como el imperativo uso que tendrá en las futuras instalaciones nucleares, refiriéndonos con ello no sólo a las centrales de fisión, sino también a instalaciones de investigaciones científicas con radiación y las futuras y prometedoras centrales de energía basadas en fusión nuclear [Desbats 2008].

La motivación detrás de este trabajo está muy condicionado por dos áreas distintas en la literatura que, aunque no del todo carente de estudios de investigación, en

general, que sólo se trataron de manera superficial o datan de los primeros años del campo de la investigación telerrobótica [Sheridan 1989] [Abel 1990] [Rolfe 1997]. Con el impulso que está teniendo la telerrobótica para su uso en ambiente radiactivos, gracias al uso de sistemas teleoperados en instalaciones nucleares [Galbiati 1964], permitirá aplicar nuevas tecnologías que están en auge gracias a la realidad virtual en la robótica y telerrobótica.

La primera de estas áreas es la de planificación de procedimientos telerrobóticos dentro del contexto más amplio de la planificación del mantenimiento de grandes instalaciones científicas o nucleares.

Teniendo en cuenta la existencia de ciertos vacíos en las áreas de conocimiento aplicadas al diseño de sistemas teleoperados, esta Tesis pretende realizar un estudio teórico-experimental de algunas de ellas, haciendo uso de un sistema real, donde se presenten condiciones de trabajo reales, de manera que los resultados que se deriven sean concluyentes y sirvan de soporte en un futuro a la hora de diseñar un sistema teleoperado para una aplicación específica de acuerdo con sus requerimientos particulares.

1.3 Objetivos

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, además de la motivación, el objetivo global de la tesis es avanzar en el desarrollo de tecnologías que permitan al operador teleoperar un robot en entornos de radiación nuclear de forma que el usuario perciba el entorno como si estuviera realizando la tarea directamente, para ello ha de percibir los distintos estímulos visuales, auditivos y táctiles como si se encontrase situado en el entorno remoto.

Por ello, los objetivos de este trabajo se han tenido en cuenta diferentes factores en la interacción hombre-robot. Todos ellos según la filosofía de alcanzar un sistema que ayude a la inmersión del operador dentro del ambiente de trabajo y la consecución de tareas de forma natural.

Las metas que se han planteado inicialmente para el desarrollo de este trabajo han sido las siguientes:

- Desarrollo de un nuevo estándar de Telerrobótica que permita la interconectividad entre maestros y esclavos de distinta tipología.
- Diseño, construcción e integración de una interfaz háptica multidedo para teleoperación.
- Realización del control de una mano robótica de tres dedos con la interfaz háptica para tareas complejas de manipulación.
- Diseño e implementación de un sistema de visión binocular ajustable para un puesto de teleoperación.
- Desarrollo de métodos y algoritmos de control para la reflexión de fuerzas en la manipulación remota de cargas en entornos radiactivos.
- Diseño y estudio de experimentos para valorar las mejoras obtenidas en la integración de los distintos sistemas desarrollados.

El objetivo de esta tesis es obtener una mayor comprensión en la estimación de fuerzas, el control de robots teleoperados y de las cargas que manipulan. Esto permitirá un enfoque más flexible para realizar manipulación a distancia en ambientes radiactivos. Este trabajo comienza por el estudio de mecanismos para teleoperar sistemas bilaterales con necesidades de alto escalado y destinados a su uso en entornos radiactivos, así como todos los requisitos que se necesita para teleoperar en estos ambientes, abordando de forma muy breve los requisitos para el desarrollo de hardware y software para un puesto de teleoperación.

Este estudio inicial permitirá enfocar las necesidades de la telerrobótica en entornos radiactivos de fusión nuclear, ya que es primordial para el correcto funcionamiento de las instalaciones presentes y futuras de fusión nuclear, donde la mayoría de procedimientos serán realizados y supervisados mediante manipulación remota debido a las condiciones ambientales tan extremas que suponen.

Es por ello que los objetivos descritos anteriormente se centran en distintos aspectos de la telerrobótica enfocados a resolver problemas en la comunicaciones de dispositivos en teleoperación de alto escalado en esos entornos, y a proveer al operador de tecnologías que le permitan una mayor destreza y manipulabilidad al influir directa y favorablemente en su percepción e inmersión en la correcta ejecución de la tarea.

1.4 Estructura y contribuciones

En este apartado se desarrolla brevemente la estructura general de esta tesis doctoral. El presente documento se divide en un total de 7 capítulos, siendo este primer capítulo una sinopsis introductoria de las motivaciones, objetivos y contribuciones que la han guiado.

Capítulo 2, a continuación se hará una contextualización de la teleoperación en entornos nucleares, repasando todas las nociones previas necesarias como las necesidades de percepción del ser humano al manipular, o los requisitos restrictivos de las nuevas instalaciones de fusión nuclear. Para ello, se realiza un repaso de los conocimientos esenciales de la Fusión Nuclear y de los sistemas de manipulación remota desarrollados hasta el momento.

Capítulo 3. Este capítulo se centra en la integración de todos los sistemas necesarios para integrar la Plataforma Abierta de Teleoperación, que servirá para los futuros estudios en teleoperación, como banco de trabajo para probar algoritmos o realizar experimentos. Ha sido en esta Plataforma Abierta de Teleoperación donde se han validado las diferentes contribuciones de esta tesis, permitiendo valorar la inmersión del operador mediante el feedback multimodal de estímulos.

Capítulo 4. En este capítulo se aborda la primera contribución de la tesis que consiste en el desarrollo de un estándar ISO de telerrobótica que permita la interconectividad entre maestros y esclavos de distintos fabricantes y distintos modos de control. Este protocolo de comunicación para Teleoperación está siendo revisado por el comité de Telerrobótica para poder ser incluido en una nueva norma AENOR de Telerobotics en la que se está trabajando.

Capítulo 5. Debido a la problemática que presenta la electrónica ante la radiación, en este capítulo se presenta una solución de multiplexado apta para los entornos radioactivos de los futuros reactores de fusión nuclear, para que puedan soportar las altas dosis de radiación y la temperatura en los periodos de mantenimiento, de esta forma se podrán realizar las tareas de manipulación remota de forma más efectiva al eliminar la problemática de manejar grandes buses de datos.

Capítulo 6. Se han desarrollado nuevas implementaciones en la Plataforma Abierta de Teleoperación para contribuir a la inmersión del operador desde el punto de vista táctil y de la reflexión de fuerza. Mediante un algoritmo de estimación de fuerza que utiliza un sensor fuerza/par y una IMU, se calculan las fuerzas e inercias que provoca la masa que se agarra con el efector final y su influencia directa con los actuadores del robot esclavo. Por otro lado se ha desarrollado una electrónica que permite la lectura de las corrientes del dispositivo maestro para que a través de la caracterización de sus motores se pueda realizar de forma aproximada un control en fuerza sin tener que poner ningún sensor de fuerza en el maestro, evitando así sobrecostes y añadir masas e inercias indeseables que perjudiquen la percepción del operador. Además se ha experimentado sobre la inmersión del operador realizando un estudio sobre la inclusión de estímulos multimodales en tareas complejas de manipulación.

Capítulo 7. Se han desarrollado nuevas implementaciones en la Plataforma Abierta de Teleoperación para contribuir a la inmersión del operador desde el punto de vista visual, creando un algoritmo para reconstrucción tridimensional de entornos no estructurados, esto permite obtener una nube de puntos que proyecta en un monitor 3d la visualización estereoscópica del punto de vista que le interesa al operador. De esta forma podemos tener una mayor percepción del entorno sin que sea necesario tener una cámara 3D, que permite además crear puntos de vista virtuales de la escena a partir de una cámara RGB-D fija.

Capítulo 8. Finalmente en este último capítulo se analizan las conclusiones obtenidas de las aportaciones realizadas durante el desarrollo de esta tesis, valorando la consecución de objetivos y la contribución este trabajo al Estado del Arte.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Este capítulo ayuda a definir el marco del trabajo realizado, introduciendo la terminología y necesidades referente al ámbito en el que se sitúa la teleoperación y la manipulación remota en fusión nuclear.

También se verá la evolución histórica de este campo y los requisitos tan estrictos que son necesarios en los dispositivos maestros y esclavos, así como en los protocolos y canales de comunicación.

2.1 El ser humano manipulando.

El ser humano no trabaja de la misma manera cuando utiliza herramientas que cuando opera directamente con sus manos: su percepción cambia y por tanto también lo hace su forma de actuar. Cuando trabajamos con objetos, ya sea directa o indirectamente, nuestro cerebro recopila toda la información posible que obtenemos de nuestros sentidos y, según esto actúa en consecuencia valorando opciones, emitiendo juicios, tomando decisiones y ejecutando acciones.

Si trabajamos con las manos directamente y manipulamos los objetos, los percibimos a través del tacto sintiendo sus propiedades físicas como forma, temperatura, rigidez, dureza, textura. Dicha percepción cambia si por ejemplo usamos unos guantes para manipularlos, ya que mermará la percepción que tenemos de algunas de dichas propiedades o incluso dejaremos de sentirlas. En el caso de utilizar una herramienta o instrumento, como unas pinzas, la percepción cambia totalmente ya que pasamos la mayor parte de la información del objeto llega a través de la vista y parte a través de la herramienta por el principio de acción y reacción, en este último caso nuestro cerebro completa la información que falta deduciendo las propiedades físicas del objeto a partir de experiencias anteriores con las pinzas y otros objetos, o con comportamientos similares.

Del ejemplo anterior podemos extraer que no es lo mismo manipular directamente que hacerlo a través de una herramienta, por ello preferimos hacer las cosas directamente con las manos por la cantidad de información complementaria que obtenemos del entorno. Por otro lado, el control que tenemos sobre nuestras manos será mucho mayor que el que podamos conseguir con una herramienta, puesto de alguna forma tendremos que aprender a utilizarla, y sin embargo ya de bebés empezamos a controlar nuestras manos y dedos a través de la propiocepción.

2.1.1 Los sentidos cuando realizamos una tarea

El cuerpo humano posee varios sentidos a través de los cuales percibimos el entorno:

- Sentido de la vista: es la capacidad que poseemos a través de los ojos de detectar las ondas electromagnéticas incluidas en el espectro de la luz y la interpretación llevada a cabo por el cerebro que es el que construye posteriormente la imagen en nuestra mente. A través de este sentido se percibe el color (frecuencia de la luz), el brillo (energía de la luz) y la profundidad, esta última gracias a la visión estereoscópica que poseemos.
- Sentido del oído: es el sentido que permite sentir las vibraciones de ondas que oscilan entre 20 y 20.000 Hz en el medio que nos rodea o a través del cuerpo.
 - La equilibriocepción es la sensación del equilibrio y se relaciona con las tres cavidades semicirculares que contienen líquido en el oído interno.
- Sentido del gusto: Se constituye por cuatro receptores: el dulce, el salado, el amargo y el ácido. Recientemente se ha descubierto un quinto receptor para la sensación llamada *umami*, que detecta el aminoácido glutamato. Podemos considerar al gusto como uno de los dos sentidos *químicos* del cuerpo.
- Sentido del olfato: Mediante centenares de receptores olfativos asociados a moléculas determinadas, el cerebro interpreta dichas sensaciones y detecta infinidad de olores además de los mal llamados "sabores". El olfato es el segundo sentido químico del cuerpo.
- El resto de sentidos se engloban dentro del sistema somatosensorial conocido como tacto:
 - La componente táctil: a través de los mecanorreceptores de la piel detectamos presión y vibraciones.
 - La componente de propiocepción o cinestesia es la percepción del conocimiento del cuerpo o de la situación de las diferentes partes de nuestro cuerpo
 - La componente de nocicepción es la percepción del dolor mediante tres tipos de receptores: cutáneos, somáticos en articulaciones y huesos, y viscerales en los órganos del cuerpo.
 - La componente de termocepción es tanto la percepción del calor como la de su ausencia, el frío. Es tanto interna, a través de los termorreceptores homeostáticos, como externa por los termorreceptores de la piel.

El ser humano cuando interactúa con el mundo real que le rodea emplea todos los sentidos para captar la información de su entorno. Sin embargo, de los sentidos anteriores podremos descartar el sentido del gusto y el del olfato en cuanto a su importancia para la realización de una tarea de manipulación, a no ser que se necesitasen específicamente para la detección de algún tipo de sustancia. Es por esto que a la hora de interactuar con estímulos virtuales, las tecnologías se han centrado en desarrollar la vista, el oído y el tacto.

En la actualidad, la mayoría de dispositivos se centra en multimedia, pudiéndose hablar de la era de la imagen y el sonido. Las capacidades humanas han sido incluso superadas, creándose así imágenes y sonidos de mayor resolución o frecuencia de lo que el ojo y el oído pueden percibir para conseguir emular una realidad y sensaciones que realmente son ficticias.

El tacto, por el contrario, no se encuentra tan extendido a la sociedad en general, aunque en las últimas décadas empiezan a emerger dispositivos que ofrecen información al ser humano a través de este sentido, como por ejemplo mediante sistemas de vibración en móviles, o mandos de videoconsolas.

No obstante, su uso sí que está más instaurado y aceptado en campos de investigación como puede ser la telerrobótica a través de dispositivos hápticos, donde hay una necesidad de explorar nuevos caminos para interactuar con la información del entorno. En busca de una eficiencia en esta interacción multimodal, es necesario utilizar todas las capacidades sensoriales y motoras que disponemos, siendo necesario profundizar en el estudio del sentido del tacto, y desarrollar dispositivos que permitan utilizar el tacto en aplicaciones virtuales como aplicaciones de manipulación remota en las que es importante percibir el entorno.

Gracias a estos dispositivos e interfaces hápticas se consigue incrementar la sensación de inmersión del usuario dentro del entorno virtual, ya que permiten al usuario tocar, sentir o manipular objetos simulados en entornos virtuales, o sentir a través de un sistema teleoperado. Al poder interactuar con el entorno virtual o remoto se produce una transferencia bidireccional de la información en tiempo real entre el escenario y el usuario a través de dicha interfaz háptica.

La inmersión se produce gracias a los sentidos, ya que transmiten todo lo que perciben y el cerebro lo almacena, clasifica y utiliza cuando es necesario. Los sentidos son el mecanismo fisiológico de la percepción. El estudio y clasificación de los sentidos se lleva a cabo por muchos campos de la ciencia, sobre todo las neurociencias, la psicología cognitiva y la filosofía de la percepción. Todos los sentidos son igualmente importantes, pero por sus funciones especiales unos son más necesarios que otros, dependiendo de la tarea que se esté realizando.

Si una persona se ve privada de alguno de los sentidos de la vista o el oído desarrollará el sentido del tacto como mecanismo principal para adquirir la información del entorno, colisionando con él y palpándolo para determinar posiciones y formas.

En el caso de interacción persona-persona este sentido se ve desplazado por la capacidad del habla que caracteriza al ser humano, pero si se siente privado de esta, el lenguaje gestual aparece como el sustituto natural para mantener la interacción, o inclusive como refuerzo de ésta.

Es por esto, que el sentido del tacto constituye el principal mecanismo de interacción del sujeto con el entorno, desarrollándose a través de los músculos y ejerciendo una fuerza sobre los objetos con el fin de reconocerlos o de desplazarlos.

2.1.2 Importancia de las interfaces multimodales

Al igual que cuando interaccionamos directamente con el entorno, es importante que tengamos en cuenta interfaces multimodales cuando estamos interactuando con entornos virtuales o remotos, esto favorecerá la inmersión del usuario al percibir los estímulos de igual manera a como lo haría en la realidad.

En la mayoría de los estudios multisensoriales, los estímulos se sincronizan tanto en el tiempo como en el espacio, las respuestas que deben realizar los estudios suelen ser tareas muy sencillas cómo pulsar un botón o tocar un objeto. [Bresciani et al, 2008] [Diederich et al. 2004] [Fort et al. 2002b] [Frassinetti et al. 2002] [Hecht 2009] [Hecht 2008].

La importancia del sentido del tacto radica en la cantidad de información que aporta, ya que además de la presión generada en la piel permite transmitir sensaciones de temperatura a través de sus termorreceptores, dolor mediante la nocicepción y la propiocepción (o cinestesia) que da a conocer la situación de los miembros del propio cuerpo.

Un estudio sobre la importancia de la componente háptica ante reacciones a estímulos demuestra la importancia de la percepción de estímulos a través de este sentido [Galiana 2013]. Para ello se realizó un análisis estadístico mostrando mediante un contraste entre distintos sujetos que, la respuesta ante estímulos con esta componente era más inmediata que en su ausencia.

Para realizar el estudio sobre el tiempo de reacción ante estímulos unimodales, bimodales y trimodales, el efecto de la modalidad percibida y la orientación del campo del estímulo (izquierda/derecha) en cuanto al tiempo de reacción fue testeado mediante Análisis de Mediciones Repetidas (GLM). Se pueden observar los datos recogidos en el siguiente gráfico:

Ilustración 1 - Comparativa de tiempos de reacción ante estímulos unimodales, bimodales y trimodales [Galiana, 2013]

Los resultados de este estudio sugieren que la estimulación háptica lleva a respuestas temporales más rápidas que estímulos sin esta componente. Esta ventaja apareció tanto para la mano dominante como no dominante. Además, estos resultados sugieren una ventaja en el procesamiento mental para las condiciones hápticas mucho mayor en tareas de agarre que en otras condiciones.

Los análisis de este experimento también muestran que una tarea de agarre, en la cual el usuario responde activando el brazo, la mano y dos dedos de agarre, es más efectivo que con los estímulos hápticos que con la tarea de pulsar un botón.

Este procesamiento de eventos multimodales permite la realización de tareas de agarre con más rendimiento, teniendo el usuario más tiempo en las etapas cognitivas del procesamiento, pudiendo rellenar de forma creativa con información que falte, formando una experiencia más rica de su interacción con un entorno virtual.

2.2 Nociones de Sistemas Teleoperados

Podemos definir la Telerrobótica como una rama de estudio dentro de la Robótica, que se centra en gobernar, u operar, un dispositivo de forma remota por parte de un operador humano para la realización de una tarea. Más aún, la telerrobótica implicará la transferencia tanto de la capacidad sensorial, como de la destreza humana a una posición remota, y que a su vez haya una realimentación al operador de las sensaciones al interactuar con el entorno.

Ilustración 2 - Robot industrial (izquierda), y robot teleoperado (derecha)

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, mediante un sistema de visión son capaces de captar la orientación de las piezas de la cadena de producción y reorientar la herramienta de agarre para operaciones pick & place o haciendo uso de un sensor de fuerza/par sería posible reorientar la herramienta de agarre para no dañar el objeto manipulado, el robot o el entorno de trabajo en operaciones de inserción [Lippiello 2010].

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. [Peñín 2000].

Por tanto, si una tarea no es repetitiva, no está bien estructurada y el entorno es variable, el robot no tiene la suficiente capacidad para realizar este tipo de tareas complejas de forma completamente autónoma [Sheridan 1992]. En este caso es necesario recurrir a las capacidades de adaptación de un operario humano. Sin embargo, 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.

2.2.1 Marco histórico en teleoperación

A continuación se tratará la información referente a la evolución de la teleoperación, así como los sistemas más relevantes de manipulación remota que se han desarrollado recientemente para poder soportar las duras condiciones de los entornos de Fusión Nuclear. Esto permitirá al lector formar una idea del contexto de la telerrobótica en entornos nucleares al que se hará referencia en el resto de capítulos de esta tesis.

A lo largo de la historia, los seres humanos han hecho uso de herramientas que les

permitan realizar una tarea, o suplir alguna deficiencia para poder llevarla a cabo. En un principio no se trataba más que de palos para, por ejemplo, hacer caer la fruta madura de un árbol. En la actualidad existen dispositivos más complejos, como por ejemplo pértigas que, accionando un enganche o pinza a distancia, permiten alcanzar objetos que se encuentran en estanterías o lugares de almacenamiento de difícil acceso.

Pero no sólo se han venido utilizando herramientas para aumentar la capacidad de manipulación en cuanto a distancia se refiere. El uso de otro tipo de herramientas, como las pinzas de un herrero, ha sido frecuente desde muy antiguo para transportar o manipular piezas candentes o peligrosas para el ser humano.

A medida que la humanidad evoluciona, se han llevado a cabo nuevos descubrimientos y se han desarrollado nuevas tecnologías; de igual manera van evolucionando las herramientas que ayudan al hombre a llevar a cabo las tareas que este se proponga realizar. La robótica y específicamente la Telerrobótica no son la excepción a la regla.

Ilustración 3 - C. Goertz durante una demostración de funcionamiento de los primeros telemanipuladores maestro-esclavo. [Goertz 1964]

La teleoperación tal como la conocemos hoy en día tiene sus orígenes en los requerimientos de la industria nuclear [Coiffet 1985]. 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 iba incrementando, al mismo tiempo aumentaba la peligrosidad del mismo. 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 por las barreras y la visión de la tarea se realizaba a través de espejos. [Peñin 2000].

A principios de este siglo se tomó conciencia por primera vez del peligro que comporta trabajar cerca de materiales radiactivos. Los primeros dispositivos basados en pinzas y manipuladores fueron ideados para dar solución a este problema, aunque todos ellos presentaban problemas en cuanto a la lentitud con la que el trabajo se desarrollaba, y no se tenía ningún tipo de control sobre la fuerza que se ejercía con los mismos.

En 1947 comenzaron las primeras investigaciones, lideradas por Raymond Goertz del Argon National Laboratory en Estados Unidos, encaminadas al desarrollo de algún tipo de manipulador de fácil manejo a distancia mediante el uso, por parte del operador, de otro manipulador equivalente. Tras los primeros desarrollos de manipuladores teleoperados mecánicos, fue en 1954 cuando Goertz presentó el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores. Se le denominó E1 y se trataba de un sistema bilateral, es decir, funcionaba prácticamente igual si se utilizaba el manipulador esclavo como maestro o viceversa. Si se movía el extremo del esclavo de forma directa, el maestro seguía ese movimiento, o de otra manera, si el operador movía el maestro y la pinza del esclavo se encontraba con alguna resistencia, esta resistencia se transmitía a la mano del operador, impidiéndole proseguir con su movimiento [Goertz 1954a], [Goertz 1954b].

En los años siguientes distintos laboratorios de todo el mundo, especialmente de Estados Unidos y Francia, se pusieron a trabajar en este prometedor campo. Tras nuevas aplicaciones en el campo de las prótesis humanas, y aplicaciones submarinas; a finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación llegó a su mayoría de edad con su utilización en aplicaciones espaciales [Crouch 1977][Sheridan 1987] [Vertut 1985].

En los años 80 y 90, la teleoperación se extendió a casi todos los campos de trabajo, encontrándose aplicaciones en tareas tales como reparaciones en reactores nucleares, reparaciones de elementos espaciales con brazos manipulados, desactivación de explosivos, extinción de fuegos, tareas mineras, militares,

reparaciones de líneas eléctricas [Aracil et al. 2002], aplicaciones industriales relacionadas con la agricultura, exploración, etc. También encontramos aplicaciones en el campo de la educación [Marin 2003b], el arte, y en los video juegos. En el área de la medicina existen gran variedad de técnicas que se puede aplicar en las cirugías, ortopedia, prácticas endoscópicas, etc.

Ilustración 4 - Prótesis humanas para el reemplazo de miembros superiores

En 1949, concluyó el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, llamado M1 [Vertut 1985], [Goertz 1964], el mismo 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 al M1, pero no fue sino hasta 1954 cuando Goertz presentó el primer manipulador maestro-esclavo bilateral con accionamientos eléctricos y servocontrolados, llamado E1.

Ilustración 5 - Goertz, con el E1 con accionamientos eléctricos y servocontrolados.

Pesanti y Cherel comenzaron a realizar un desarrollo de un sistema maestro-esclavo mecánico [Pesanti 1959]. Ese mismo año se desarrolló el sistema teleoperado Mascot, entre un equipo Italiano y el Argonne National Laboratory [Azorin 2003]. A finales de los años 50's se comenzó a aplicar esta tecnología al campo de las prótesis humanas y la rehabilitación en general [Sheridan 1992].

En la década de los 60's se extiende las investigaciones de la teleoperación a aplicaciones submarinas [Wernli 1982]. 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 recogidas de restos de accidentes. Los primeros sistemas fueron Snoopy y SCAT, que poseían 3 grados de libertad con una o dos cámaras de video [Mora 2004]. El siguiente en ser desarrollado fue el sistema CURV (Cable Controlled Underwater Vehicle), para el rescate de implementos 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 II-B, CURV II-C y CURV III.

Ilustración 6 - Robot submarino teleoperado CURV II

En 1965 Carl Flatau del Brookhaven National Laboratory del Departamento de Energía de EE.UU., desarrolló un telemanipulador en el que se utilizó por primera vez sensores de fuerza y motores DC [Azorin 2003]. Debido a la carrera espacial entre EEUU y la URSS, se experimentaron los primeros problemas relevantes de retardo en las comunicaciones, se notó por primera vez el problema de

inestabilidad en la reflexión de fuerzas.

En 1967 el Surveyor III, que fue la segunda nave de la serie en alunizar, poseía brazos manipuladores para tomar muestras de la tierra lunar y medir la fuerza requerida para esta tarea, lo que se convirtió en la primera teleoperación en el espacio.

Ilustración 7 - Surveyor: robot espacial teleoperado con brazos manipuladores

Durante los 70's se realizaron grandes avances en la teleoperación, especialmente en las áreas submarina y nuclear una vez finalizada la carrera espacial, cabe destacar las mejoras hechas en un desarrollo de aplicación nuclear el SM-229 en EEUU, donde el control inicialmente analógico fue realizado digitalmente, convirtiéndolo en el primer sistema teleoperado maestro-esclavo con control digital [Hernando 2002]. En la década de los 80's el interés en la teleoperación estuvo un poco ralentizado, especialmente por el auge de la robótica industrial. No es sino a partir de los 90's 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 [Azorin 2003] [Hernando 2002] [Aracil 1995]. 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 por ejemplo: minería, cirugía, educación, entretenimiento, militar, vigilancia, construcción, mantenimiento, policial, etc.

2.2.2 Aplicación de la telemanipulación al sector nuclear

Como se ha puesto de manifiesto a lo largo de su historia, la teleoperación ha demostrado ser una herramienta muy útil para permitir al ser humano realizar ciertas tareas que de otra forma no hubiera sido posible realizar. Las primeras aplicaciones, y hacia donde se ha dirigido siempre la telemanipulación, ha sido en la industria nuclear o los entornos radiactivos. Pero a lo largo de los últimos años se ha extendido a numerosos campos de la tecnología.

Como se ha mencionado anteriormente, la teleoperación surgió en la industria nuclear para evitar el contacto directo con sustancias radioactivas. Actualmente, se utiliza para la experimentación y estudio de estas sustancias, para el mantenimiento de instalaciones, para tareas de descontaminación e, incluso, en desastres nucleares. Un ejemplo de este último son los robots denominados “Packbot”, utilizados en Fukushima para maniobrar por las instalaciones y medir niveles de radiación.

De hecho, el uso de técnicas de manipulación remota se lleva utilizando con éxito en instalaciones de fisión nuclear durante mucho tiempo [Desbats 2005] y también durante más de 10 años por la Joint European Torus en el mantenimiento del tokamak [Rolfe, 1999] [Rolfe, 2007]. Su uso está totalmente justificado si consideramos la mejora de la seguridad del personal al evitar exponerse a la radiación.

Normalmente en las instalaciones científicas que tienen zonas calientes con radiación nuclear, como el CERN o las nuevas instalaciones de ITER, es necesario evaluar cómo los procedimientos telerrobóticos de mantenimiento encajan dentro del marco más amplio de las actividades de mantenimiento en general.

En dichas instalaciones suele haber unos procedimientos de manipulación remota o manipulación remota (Manipulación Remota – Remote Handling) en entornos más controlados, como la de las instalaciones nucleares de fusión, donde los dichos procedimientos están incorporados en el diseño inicial de la instalación [Shibanuma 1995] [Muhammad 2007] [Alho 2011], sin embargo, las labores de mantenimiento de telemanipulación dentro de las instalaciones a menudo se lleva a cabo de una

manera más ad-hoc y adaptadas a cada caso en particular.

Ilustración 8 - Robot de mantenimiento de ISOLDE en el CERN. [Kershaw 2013]

En las primeras etapas incluso pueden ser realizadas por los ingenieros de mantenimiento, los cuales tienen poca experiencia en teleoperación con robots. Por otro lado, suele suceder que la maquinaria que se utiliza no se diseñó con la manipulación remota en mente: como por ejemplo los sistemas de fijación y conexiones están diseñados para ser manipulados por los seres humanos y no por robots, que tienen diferentes requisitos en cuanto a lo que es fácil de manipular debido principalmente a sus efectores finales.

Es por ello que podemos afirmar que los métodos de planificación sistemática para utilizar sistemas telerrobóticos no están bien integrados en las prácticas normales de trabajo y no existe una metodología estándar para evaluar si la teleoperación se podría utilizar o no en estos casos.

Las tareas de telemanipulación dentro de las instalaciones no se realizan en forma aislada, debe haber una planificación del mantenimiento, indicando los procedimientos que deben realizarse en toda la instalación, que puede ir desde pequeñas acciones preventivas como sencillas operaciones de mantenimiento que duran pocas semanas y que sólo afectan a un solo lugar, o incluso podrían referirse al mantenimiento a largo plazo de toda la instalación en su ciclo de vida, que puede abarcar meses e incluso años, como las paradas largas que involucra casi todos los aspectos dentro de la instalación, y que tienen por objeto la sustitución de materiales o partes de la instalación que está muy deterioradas por la radiación.

Es en todos estos casos en los que se hace necesario el uso de la telerrobótica para poder acceder a entornos muy perjudiciales para el ser humano, y por tanto su uso está totalmente justificado para realizar estas labores de mantenimiento, que deberían estar incluidas desde un principio en los diseños iniciales de las instalaciones para que estén considerados en los protocolos de actuación regulares.

Este es el campo en que se centra esta tesis, y abarca a las grandes instalaciones de aceleradores que emitan radiaciones ionizantes. El propósito utilizando la robótica en este tipo de instalaciones es reducir la exposición a la radiación de los trabajadores humanos a un precio tan bajo como sea razonablemente posible, por razones de seguridad. La Telerrobótica es aplicable a estas instalaciones para situaciones tales como el mantenimiento y la inspección. Permite elaborar procedimientos manteniendo los beneficios del control humano, tales como la flexibilidad debido a ventajas cognitivas humanas frente a la robótica autónoma, sin necesidad de que el operador que estar físicamente presente en un entorno laboral peligroso.

2.3 Principios de la Fusión Nuclear

En las densidades y temperaturas tan extremas de las estrellas se produce la fusión. Una reacción de fusión en el núcleo del Sol hace que percibamos luz y sintamos el calor.

Los átomos de Hidrógeno están en un constante estado de agitación, cuanto más calientes están, más rápido se mueven. En el núcleo del Sol, donde las temperaturas llegan a 15.000.000°C, se producen en consecuencia choques a velocidades muy grandes, con lo que se consigue vencer la repulsión electrostática natural que existe entre las cargas positivas de sus núcleos. En estos choques donde se fusionan los átomos de Hidrógeno produciendo átomos de Helio y deprendiendo gran cantidad de energía en forma de luz y calor.

Esta cantidad de energía se puede calcular mediante la fórmula de Einstein $E = mc^2$, ya que la masa del átomo de Helio resultante no es la suma exacta de los átomos iniciales, esta ínfima diferencia de masa produce grandes cantidades de energía al estar multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (c^2).

Ilustración 9 - Reacción de fusión

Aunque en el Sol se convierten del orden de 600 millones de toneladas de Hidrógeno en Helio a cada segundo, para lograr la fusión en la Tierra se necesita un enfoque diferente. En el siglo XX se identificó la reacción de fusión más eficiente en el laboratorio, a saber: la reacción entre dos isótopos de Hidrógeno (H), el Deuterio (D) y el Tritio (T). Dicha reacción de fusión DT produce la ganancia de energía más alta a temperaturas "mínimas". Sin embargo, se requieren temperaturas de 150.000.000 ° Celsius, que son diez veces mayor que la reacción de Hidrógeno se produce en el Sol.

Es por ello, que para lograr la fusión en la Tierra es necesario utilizar la física del plasma a temperaturas tan extremas que los electrones se separan de núcleos y el gas se convierte en un plasma o estado ionizado de la materia similar a un gas. Los plasmas están compuestos de partículas cargadas (núcleos positivos y electrones negativos) y son casi un millón de veces menos densos que el aire que respiramos, en estas condiciones se dan las condiciones para que los elementos de la luz se puedan fundir y producir energía.

Para lograr la fusión en un laboratorio se tienen que cumplir estas condiciones:

- temperatura muy alta: para provocar colisiones de alta energía.
- suficiente densidad de las partículas de plasma: para aumentar la probabilidad de que las colisiones ocurran.
- suficiente tiempo de confinamiento: para mantener el plasma, que tiene propensión a expandirse, dentro de un volumen definido.

Hay distintas formas de conseguir este confinamiento del plasma, por ejemplo en ITER, se logrará en un dispositivo tokamak que utiliza campos magnéticos para contener y controlar el plasma caliente.

2.3.1 Breve historia de la fusión

Después de los primeros experimentos de fusión en la década de 1930, los laboratorios de física de fusión se establecieron en casi todas las naciones industrializadas. A mediados de los años 1950 "máquinas de fusión" estaban operando en la Unión Soviética, el Reino Unido, Estados Unidos, Francia, Alemania y Japón. A través de experimentos en estas máquinas, la comprensión de los científicos sobre el proceso de fusión se perfeccionó gradualmente.

Un gran avance se produjo en 1968 en la Unión Soviética. Los investigadores fueron capaces de alcanzar los niveles de temperatura y tiempos necesarios para el confinamiento del plasma, que son dos de los principales criterios para lograr la fusión que nunca se había alcanzado antes. La máquina soviética era un dispositivo de confinamiento magnético con forma de rosquilla llamado tokamak. A partir de entonces, el tokamak se convertiría en el concepto dominante en investigación de la fusión, y los dispositivos tokamak multiplicado en todo el mundo.

La producción de energía de fusión, pronto se hizo evidente, requeriría colaboración de esfuerzos creativos, habilidades tecnológicas, y los recursos financieros de la comunidad internacional. El Joint European Torus (JET) en el Reino Unido, en funcionamiento desde 1983, fue un primer paso en esta dirección. JET, que se utiliza en conjunto por más de 40 laboratorios europeos, logró la liberación del mundo primero controlada de la energía de fusión en 1991.

Se ha hecho un progreso constante ya que en los dispositivos de fusión de todo el mundo. El tokamak Tore Supra en Francia tiene el récord de la más larga duración de plasma de cualquier tokamak: 6 minutos y 30 segundos. El japonés JT-60 alcanza el valor más alto de la fusión respecto a densidad del producto, temperatura y tiempo de confinamiento respecto a cualquier otro dispositivo hasta la fecha. En las instalaciones de fusión de Estados Unidos se han alcanzado temperaturas de varios cientos de millones de grados centígrados.

Logros como estos han llevado a la ciencia de fusión hacia un hito: conseguir el punto de equilibrio de energía de plasma. El punto de equilibrio se describe el momento en que plasmas en un comunicado de dispositivo de fusión al menos tanta

energía como se requiere para producirlos. Plasma de equilibrio la energía nunca se ha logrado: el registro actual de la liberación de la energía está en manos de JET, que tuvo éxito en la generación de un 70% de la energía de entrada. Ahora, los científicos han diseñado el siguiente paso: ITER, que va a producir más energía de la que consume: de 50MW de potencia de entrada, se producirán 500MW de potencia de salida.

ITER comienza a liderar la tecnología de fusión del siglo XXI, no se mejora solo en las máquinas de fusión de todo el mundo, sino que investigadores de todo el mundo han reorientado sus programas científicos o modificado sus características técnicas para actuar, ya sea parcial o totalmente en apoyo de funcionamiento del ITER. Estas máquinas están llevando a cabo investigación y desarrollo de modos avanzados de funcionamiento de plasma, las interacciones plasma-pared, ensayo de materiales y métodos óptimos de extracción de energía, contribuyendo al éxito de ITER y el diseño del dispositivo de próxima fase.

2.3.2 ITER

Ya se explicó anteriormente que ITER utiliza un Tokamak para el confinamiento magnético del plasma. En el interior de este Tokamak donde se calientan las partículas de plasma que es acelerado por los diferentes tipos de métodos de calentamiento auxiliares. Con lo que estas aceleraciones provocarán la fusión entre los núcleos de Deuterio y Tritio (DT) produciendo núcleos de Helio, neutrones, y grandes cantidades de energía.

A su vez el núcleo de Helio lleva una carga eléctrica que estará sujeto a los campos magnéticos del tokamak, con lo que permanecerá confinado dentro del plasma, contribuyendo a su calentamiento continuo. Por otro lado, los neutrones al no tener carga eléctrica saldrán fuera del campo magnético y serán absorbidos por las paredes del tokamak, donde se transfiere su energía cinética en forma de calor. Los neutrones de esta forma aportan aproximadamente el 80 por ciento de la energía producida en la reacción.

En ITER, este calor será capturado por el agua de refrigeración que circula en las paredes y que se transferirá a las torres de refrigeración, utilizando este calor para

producir vapor, y finalmente generar electricidad por medio de turbinas y alternadores.

Ilustración 10 - Instalaciones del Tokamak en ITER [www.iter.org]

En términos de magnitud, el potencial energético de la reacción de fusión es superior a todas las otras fuentes de energía que conocemos en la Tierra. La fusión de los átomos juntos de una manera liberaciones controladas casi cuatro millones de veces más energía que una reacción química, tales como la quema de carbón, petróleo o gas y cuatro veces más que la fisión nuclear.

Las fases de ITER:

La construcción de las instalaciones científicas para ITER en St. Paul-lez-Durance, Francia, comenzaron en 2010 y se esperaba que durase diez años. En paralelo, la fabricación de sus componentes está en marcha en los distintos miembros de ITER, los primeros envíos de componentes terminados a ITER comenzaron a llegar desde mediados de 2014.

Inicialmente comenzará la instalación de la máquina de ITER una vez sea posible el acceso al edificio del Tokamak. Entonces comenzará la fase de montaje ITER, que incluye el montaje de la máquina principal, así como la instalación de todos los

sistemas de la planta; a esto le seguirá por una fase de puesta en marcha para asegurar la correcta integración de todos los sistemas.

Una vez se consiga el primer plasma, se espera que la fase operativa del ITER dure 20 años: con distintas fases para probar operaciones con Hidrógeno puro, otra con Deuterio y pequeñas cantidades de Tritio, y finalmente con una mezcla a partes iguales de Deuterio y Tritio para conseguir energía de fusión completa.

Las instalaciones de ITER han sido diseñada específicamente para:

- 1) Producir 500 MW de energía de fusión para pulsos de 400 s
- 2) Demostrar el funcionamiento integrado de tecnologías para una planta de energía de fusión
- 3) Lograr un plasma de Deuterio-Tritio en el que la reacción se mantiene mediante calentamiento interno
- 4) Probar la producción de Tritio
- 5) Demostrar las características de seguridad de un dispositivo de fusión

Durante esos próximos 20 años de explotación de ITER hay previstas diversas paradas de mantenimiento para acceder al interior del tokamak mediante dispositivos de manipulación remota debido a las altas dosis de radiación.

2.4 Manipulación Remota en Fusión Nuclear

En los próximos años, el establecimiento de la fusión nuclear como fuente de energía va a solicitar el desarrollo de varias tecnologías de manipulación a distancia que puedan ser autónomos o remotamente operados por un humano. Los entornos de Fusión Nuclear claramente tienen varias restricciones y ambientes peligrosos que obligan a considerar la manipulación remota para operar en estas instalaciones, como por ejemplo las dimensiones y pesos de los componentes, las altas temperaturas y sobre todo la radiación activa.

Las plantas de energía de fusión futuras (instalaciones similares a DEMO, posteriores a ITER) requerirán un sistema de manejo remoto para llevar a cabo las actividades de supervisión y mantenimiento. Esta tarea desempeñará un papel

fundamental para evitar inesperadas paradas del reactor que conllevarían a grandes pérdidas económicas.

En la actualidad, en numerosas instalaciones de fusión experimentales como el ITER y JET es muy importante la utilización de la manipulación remota para las distintas tareas a realizar en el interior de la zona radiada, a pesar del carácter experimental de los dispositivos de Manipulación Remota, es algo necesario para mejorarlos y ajustarlos continuamente [Keller et al. 2008].

Por otro lado, la manipulación remota se ha utilizado con éxito durante mucho tiempo en fisión nuclear [Desbats 2005], y durante 10 años para el mantenimiento tokamak en JET (Joint European Torus) [Rolfe et al. 1999] [Rolfe 2007]. El uso de este tipo de tecnología ha permitido la mejora de la seguridad del personal mediante la restricción de exposiciones a la radiación, así como también el uso continuado del reactor mediante el uso de equipos RadHard y que soporten las condiciones de operación.

Ilustración 11 - Robot Mascot operando dentro de JET Torus en 1996

Para valorar en cierta medida las condiciones ambientales de las que se hablan, se resumen a continuación dichas condiciones del entorno, mediante datos estimados, para tres escenarios en las futuras operaciones en ITER.

Table 1. Condiciones Ambientales de Inspección en ITER [Izard 2010] [*datos estimados]

	Inspección Programada	Inspección No-programada	Mantenimiento
Escenario hipotético	1 día tras las operaciones de plasma	1 hora tras las operaciones de plasma	2 sem. tras las operaciones de plasma
Atmósfera	Condiciones UHV ($>10^{-5}$ Pa)		Aire seco (1 bar)
Campo magnético (producida)	5 – 8 Tesla		Aprox. cero
Campo magnético (acumulado)	0.3 Tesla		Aprox. cero
Radiación* (dosis media) (producida)	1,500 Gy/h	15,000 Gy/h	300 Gy/h
Radiación* (dosis media) (acumulada)	Flujo de Neutrones Total (BPP) $5.05 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2$ Dosis Gamma (BPP) $1.41 \text{ E}+02 \text{ Gy}$ Radiación del agua de refrigeración del divertor: ^{16}N (TBD)		
Duración de inspección*	12h/semana, 2 veces al mes, en 7,5 años	12h/semana, 2 veces al mes, en 7,5 años	60h/meses, en 32 meses
Dosis total gamma	2.7 MGy	27 MGy	0.6 MGy
Dosis total neutrón	$5.07 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2$	$5.07 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2$	$5.07 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2$

Como se observa con dichas condiciones ambientales no es posible realizar las tareas de mantenimiento con personal humano. Con lo que las soluciones de manipulación remota se hacen muy necesarias.

2.4.1 Necesidad de manipulación remota

Todas las instalaciones de fusión nuclear requieren la realización de numerosas tareas de Manipulación Remota, principalmente en tareas de mantenimiento y reparación. El hombre tiene grandes dificultades para llevarlas a cabo directamente, bien porque las zonas están contaminadas por la radiación, o porque los materiales sobre los que tienen que realizarse las operaciones ya estaban contaminados. Por tanto, las normativas de seguridad internacionales limitan significativamente el acceso de personas a estas zonas “activadas”.

Ilustración 12 - Esquema de funcionamiento de las instalaciones de fusión y necesidad de Manipulación Remota

El gran número de experimentos y equipos que en los próximos veinte años se va a realizar para avanzar en la fusión nuclear va a requerir un extraordinario desarrollo de sistemas robotizados de Manipulación Remota. En la figura anterior se justifica la necesidad de la teleoperación en las instalaciones de fusión nuclear. Por tanto, se precisarán nuevas interfaces de teleoperación que mejoren las prestaciones de los actuales sistemas y permitan la realización de tareas remotas de manipulación de un modo más eficiente.

2.4.2 Diferentes tipos de sistemas de fusión

Algunas zonas de los reactores de fusión futuros estarán muy activas y se prohibirá el acceso a estas zonas a los operadores humanos ya que el nivel de radiación será demasiado alto para las personas. Por este motivo, las tareas deberán ser ejecutadas y controladas desde un entorno remoto.

Tabla 1 - Comparación de las características de los tres sistemas de fusión.

Comparación de los tres sistemas de fusión					
	Disponibilidad	Complejidad de la instalación	Tamaño y peso de los componentes	Dosis en torus (Gy/h)	Estado
JET	Importante, medio-av.	Alta	Algunas toneladas, metros	Algunos miles	En funcionamiento
ITER	Importante, medio-av.	Muy alta	Hasta 50 toneladas, decenas de metros	Cientos	En el futuro próximo
DEMO, industrial	Decisivo, alto-av.	Medio-alta	Hasta decenas de toneladas, decenas de m	Quizá miles	A largo plazo

La tabla anterior muestra una comparación de las principales características de estos sistemas de fusión. En la actualidad existen tres categorías de sistemas de fusión activos:

- 1) Sistema experimental de Tritio: Experimentos de fusión con un bajo índice de producción de neutrones que utilizan Tritio para los experimentos. El sistema conocido como “JET” es un ejemplo representativo de esta categoría.
- 2) Experimento de plasma en combustión: Experimentos de fusión que producen la mayor parte del calor en el torus a partir de las reacciones de fusión de Deuterio–Tritio. La disponibilidad de la instalación (tiempo de trabajo / tiempo de trabajo+parado) es baja debido a su carácter experimental. ITER es un ejemplo de este sistema. Se trata de experimentos y, por lo tanto, requieren un gran número de complejos diagnóstico para analizar el plasma.
- 3) Reactores comerciales: Reactores de fusión futuros para producir electricidad con una gran disponibilidad y objetivo comercial. No precisan de los complejos diagnósticos para analizar el plasma pero requieren diagnósticos de control básicos o sensores. El reactor DEMO es una demostración de reactor que se incluye en esta categoría.

Otras instalaciones necesitan también un uso muy intenso de control remoto. La Instalación internacional de irradiación de materiales de fusión (International Fusión Materials Irradiation Facility, IFMIF) es una instalación de investigación básica en uso ya que dispone de una fuente de neutrones con un espectro adecuado de energía de fusión que permite realizar las pruebas de material necesarias. IFMIF es una instalación muy activa en sí misma debido a los componentes y materiales que se utilizan en ésta y al funcionamiento del laboratorio.

2.4.3 Centros de manipulación remota en nuclear

El sector nuclear siempre ha liderado los avances de telerrobótica. En torno a estas aplicaciones se han producido grandes avances tecnológicos, tanto en el desarrollo de interfaces hombre-máquina, como en el desarrollo de nuevos telemanipuladores. Los primeros trabajos de telemanipulación fueron realizados en los años 50 en el Argonne National Laboratory de EE.UU. [Martin 1985]. Ejemplos

más recientes de los desarrollos de este sector son el telemanipulador Titanic de Schilling, el robot ROSA de Westinghouse y el Telbot de Wälischmiller (Alemania) [Ferre 2007].

Algunos laboratorios internacionales se dedican al desarrollo, prueba y mejora de los equipos y componentes necesarios para el control remoto de los dispositivos de fusión. Las tareas están relacionadas con la elevación, sustitución, reubicación, reparación, ajuste, montaje/desmontaje de los componentes. En España no hay laboratorios dedicados al control remoto en fusión pero sí existen algunas instituciones de investigación y empresas que desarrollan la teleoperación para otras aplicaciones. Las principales diferencias entre la teleoperación para la fusión y para otras aplicaciones suelen radicar en el gran tamaño y peso de los componentes que se manipulan en la fusión, así como en el entorno de radiación.

La mayoría de los laboratorios que se describen se dedican a las tareas de telemanipulación dentro del sistema ITER, anteriormente mencionado. Se debe principalmente a la urgencia y multitud de tareas teleoperadas que se tienen que validar y mejorar en la actualidad en el contexto ITER. Un ejemplo de manipulación remota son las cajas del divertor, las conexiones de puertos de diagnóstico, los módulos de cubierta, etc. Sin embargo, los nuevos proyectos de fusión como el IFMIF comienzan a tener un espacio relevante en los laboratorios de control remoto.

Los laboratorios de control remoto más significativos que trabajan en las aplicaciones de fusión nuclear y teleoperación son los siguientes:

- Divertor Test Platform 2 (DTP2) Test Facility en Tampere (Finlandia)
- ENEA Remote Handling Laboratory del centro de investigación de Brasimone (Italia)
- In-Vessel Transporter (IVT). Instalaciones en Ibaraki (Japón)

A estos centros se les adjudicó el desarrollo de los trabajos de pruebas experimentales correspondientes debido a una serie de factores determinados como fueron la excelencia de la instalación, el entorno técnico y su previo historial con éxito.

Ilustración 13 - En la izquierda, Centro DTP2 en Tampere, Finlandia. Dimensiones aproximadas del equipo e instalación $a=50\text{m}$, $b=20\text{m}$. En la derecha, lugar de trabajo del operador

La Plataforma de prueba del divertor “Divertor Test Platform 2” (DTP2) [Mattila 2007] [Ribeiro 2007] es una instalación para la prueba de sistemas de extracción/introducción y movimiento de las cajas del divertor. Sus módulos en forma de W reciben la mayor parte del calor de plasma térmico de ITER. La instalación se terminó en mayo de 2007 dentro del “Technical Research Centre of Finland” (VTT), una gran organización de investigación aplicada a distintas tecnologías que proporciona soluciones finales y servicios de innovación. VTT es una organización de investigación sin ánimo de lucro del sistema de innovación de Finlandia cuyas instalaciones se encuentran en el campus universitario de la Universidad Tecnológica de Tampere (Finlandia). La figura anterior muestra unas fotos de la instalación, su espacio y equipamiento en el ámbito de la teleoperación.

El laboratorio de control remoto del centro de investigación ENEA en Brasimone (Italia) trabaja en la actualidad en tres ámbitos de telemanipulación aplicados a los distintos sistemas de fusión. Estos sistemas son los siguientes:

- Divertor Refurbishment Platform (DRP) [Micciché 2007],
- Divertor Test Platform (DTP) [Pick 2006] y
- IFMIF tests [Damiani 2007]

La Plataforma de renovación del divertor “Divertor Refurbishment Platform” se ha compuesto por dos fases. La primera fase de renovación del divertor para el ITER 1998 (un diseño anterior de ITER) se concluyó con éxito como se demostró durante

las campañas de prueba en 1999–2003. Se utilizaron una grúa y un marco especial para estas pruebas.

Ilustración 14 - Vista general del laboratorio de manipulación remota de ENEA, centro de investigación de Brasimone (Italia).

La plataforma de prueba del divertor (DTP) fue la primera instalación para la teleoperación de maquetas de divertor en tamaño real. La instalación se utilizó durante varios años a partir de 1998 y se pudieron probar con éxito las cajas de divertor del diseño del ITER 1998. El diseño actual y definitivo de ITER se llama ITER FEAT y su nuevo divertor se probará en la DTP2 de Finlandia. La instalación internacional IFMIF, mencionada anteriormente, se está desarrollando en la actualidad y han surgido algunas necesidades de realizar pruebas con los procedimientos de control remoto. En la instalación se ha incluido un área de comprobación de componentes IFMIF, tal y como se muestra en la figura.

In-Vessel Transporter (IVT) es una compleja instalación para probar y desarrollar el manipulador cuyo objetivo es intercambiar las cubiertas de ITER [Palmer 2007]. Se tendrán que cambiar periódicamente los módulos de cubierta ya que están expuestos al plasma y a la radiación de neutrones. El cambio de cubiertas también es necesario para la mejora, así como en caso de fallo. La siguiente figura muestra una vista general de la instalación y una vista detallada del transportador de contenedor. El transportador de contenedor es un manipulador que adjunta/retira y transporta la cubierta al torus.

Ilustración 15 - (a) Vista general de la instalación IVT. El semicírculo de la foto es la barra IVT de unos 12 m de diámetro. (b) Detalle del transportador de contenedor

Todo estudio empírico requiere de algún tipo de plataforma, en la cual se pueda experimentar los conceptos o teorías sobre los cuales se está realizando una investigación, de manera tal que puedan ser demostrados en la realidad con datos concretos que prueben la veracidad de las hipótesis formuladas. El campo de la telerrobótica no difiere de esta realidad, a lo largo de la historia de este campo, se ha visto un constante cambio en la arquitectura de las plataformas de teleoperación que va relacionado directamente con el mismo avance tecnológico de la sociedad. Con cada tecnología que sea desarrollada nueva o mejorada, se abre un amplio abanico de posibilidades de aplicaciones. Es por ello, que cuando alguna tiene cabida en la telerrobótica, aún cuando la arquitectura básica o el concepto básico de funcionamiento de una plataforma de teleoperación se mantiene, su arquitectura real debe ser modificada, adaptándola de esta manera a las nuevas realidades, todo esto con el objetivo final de mejorar el desempeño del operador al momento de realizar una tarea teleoperada. A continuación se presentarán ejemplos de distintos tipos de sistemas que son usadas por investigadores en el sector nuclear de fusión, donde los principales retos son la temperatura, el campo magnético y el vacío, los cuales caen una vez se para el reactor; así como la radiación que se mantiene debido a los distintos elementos irradiados que contienen átomos radiactivos remanentes.

2.4.4 Requisitos de Telemanipuladores en Fusión.

Como ya se ha comentado previamente, algunas instalaciones de fusión experimentales como ITER y JET, han demostrado ya la importancia de este tipo de sistemas de manipulación remota para operar y realizar las tareas de mantenimiento [Keller 2008].

Las restricciones en el entorno de la fusión nuclear son muy exigentes, y los sistemas de manipulación remota y telerrobótica que operen en ellos deberán hacer frente a las altas temperaturas, vacío ultra-elevado, alta radiación y el campo magnético toroidal con el fin de poder llevar a cabo la inspección, el mantenimiento y la reparación en instalaciones como ITER, DEMO e IFMIF.

Tabla 2 - Posibles características ambientales de inspección en ITER [ITER Org. 2004]

Descripción	Radiación Gamma (Gy/hr)	Temperatura de la Primera Pared (°C)
Inspección programada	1500	120
Inspección a temperatura de cocción	1500	240
Inspección no-programada	15000	120
Mantenimiento	300	50

Teniendo en cuenta la limitación de la temperatura, todas las propiedades de los materiales como la resistencia a la tracción y el módulo elástico se deben comprobar a 120°C y a su temperatura de cocción. Por ejemplo están prohibidas la mayoría de las aleaciones de aluminio con fines estructurales, debido a sus propiedades mecánicas a estas temperaturas.

Otro problema con la temperatura surge con la lubricación, como se sabe de experiencias como la del brazo articulado de Inspección (AIA) [Keller 2009] y el Tokamak de diagnóstico [Smick 2005].

Distribución de Temperatura

Si las diferentes partes de un robot están a diferentes temperaturas puede producirse problemas de dilatación térmica que añadiría estrés adicional en el mecanismo. Una solución sería que todas las partes externas del robot actúen como cuerpos negros para mantenerse todo el robot a 120°C.

En este apartado hay que incluir los aspectos constructivos del robot pues se suelen fabricar con distintos materiales que tienen diferentes coeficientes de dilatación, con lo que los materiales deben ser seleccionados con coeficientes de dilatación muy similares.

Aislamiento de Temperatura

Como hay algunos componentes que no puedan estar expuestos a una temperatura ambiente alta, habrá que encapsular a estos componentes en una jaula hecha de material reflectante. Las articulaciones de los robots deben ser diseñadas teniendo en cuenta el aislamiento térmico con el fin de minimizar la transferencia de calor por conducción. Aunque otra posible solución es diseñar un sistema de refrigeración con un fluido frío o gas.

Ultravacío

Al considerar trabajar en vacío ultra-elevado (10⁻⁵Pa) [ITER Org. 2004], la cámara de vacío tiene que mantenerse limpia a toda costa, por ello los componentes deben estar degasificados y certificados. Además, todos los componentes expuestos al vacío deberán ser tratados con procesos no estándar, como recubrimiento de MoS₂ disulfuro de molibdeno para eliminar cualquier porosidad. También existen soluciones de sellado, como la utilizada en la AIA [Keller 2009] con Helicoflex® y sellos de metal.

Radiación

En la Tabla siguiente, se muestran las dosis de radiación del ITER.

Tabla 3 - Dosis de radiación en ITER [ITER Org. 2004] (*datos estimados)

Descripción	Dosis media* (Gy/hr)	Duración	Dosis total Gamma (MGy)	Dosis total neutrón (n/cm ²)
Inspección programada	1500	12 hr/sem durante 7.5 años	2.7	5.07·10 ¹³
Inspección no-programada	15000	12 hr/sem durante 7.5 años	27	5.07·10 ¹³
Mantenimiento	300	60 hr/mes durante 32 meses	0.6	5.07·10 ¹³

El funcionamiento de la electrónica es un problema crítico cuando hay radiación y hay que tenerlo en cuenta desde la fase de diseño como en PAC [Perrot 2004]. Todos los componentes electrónicos se tendrán que calcular de acuerdo a la vida

útil del robot, y por tanto para la radiación total acumulada que va a recibir.

De cara a los materiales que pueden tolerar mejor la radiación se han realizado varios estudios para una amplia gama de componentes que van a ser utilizados en la cámara de vacío, como por ejemplo: fibras óptica, lubricantes, actuadores, cámaras de vídeo, etc. [Leroux 2008] [Leroux 2006] [Van Uffelen 2005] [Bock 2008].

Aunque muchos sistemas de multiplexado de datos no se han cualificado para más de 10kGy, algunos transistores están clasificados para hasta 10MGy. Más adelante se hará un ejercicio de cara al equipo de multiplexación para robots esclavos, y que forma parte de la comunicación en entornos nucleares.

Además todo el material que se utilice con fines estructurales no debe verse afectado por una degradación debida a la radiación, por ello habrá que elegir adecuadamente los materiales que compondrán las estructuras y los sellados.

Como los robots, por su movilidad y maniobrabilidad, no permiten el uso de la masa como barrera eficaz contra la radiación, habrá que realizar pruebas de radiación para comprobar su funcionamiento y resistencia ante dosis altas.

Campo magnético

En los entornos de Fusión nuclear se dan condiciones de operación muy particulares, por ejemplo los robots teleoperados estarían sometidos a campos magnéticos muy elevados [Izard 2009] por ello los equipos de manipulación remota tendrán que tener características especiales.

Como los imanes superconductores que producen estos campos lo pueden hacer solamente durante un tiempo muy limitado [Kiyoshi 2006], entonces el robot simplemente tiene que esperar a que termine el pulso magnético para poder realizar su tarea.

Los robots que operan en los campos magnéticos altos no son una novedad, ya que investigadores de la Universidad Johns Hopkins han utilizado ya sistemas robóticos compatibles con equipos de resonancia MRI [Muntener 2006]. La diferencia principal en una aplicación de Fusión Nuclear o para máquinas superconductores en general es que la máquina no está en funcionamiento en el momento de la

intervención, donde la perturbación del campo local está tolerado, y por lo tanto la electrónica y sistemas electromecánicos están permitidos.

La solución de utilizar una carcasa ferromagnética en el caso de ITER no sería viable, ya que la densidad de flujo del campo magnético resultante es mayor que la magnetización de saturación de cualquier material: con lo que habría un campo dentro de la caja de confinamiento magnético produciendo fuerzas indeseables en el blindaje [Izard 2009].

2.4.5 Manipuladores para entornos de Fusión

Hoy en día aún no existe ningún robot capaz de soportar las condiciones impuestas por los entornos de fusión nuclear. 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) [Neri 2007] [Neri 2009] desarrollado por la ENEA es un ejemplo de los mencionados sistemas de diagnóstico y de lo que se puede hacer con las condiciones dadas.

Ilustración 16 - Cabeza del escáner IVVS desarrollado en ENEA

Dado que estos sistemas de diagnóstico no proporcionan la destreza necesaria para el funcionamiento en la cámara de vacío, definiremos algunos dispositivos que cumplen ciertas de las restricciones y que cuentan con niveles de destreza altos.

En fusión nuclear, el entorno de diagnóstico es aún más duro que el entorno de inspección y mantenimiento, ya que además del ultra-vacío, el sistema de diagnóstico tiene que lidiar con enormes dosis de radiación y 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 [Izard 2009].

Ilustración 17 - Acceso de los sistemas de diagnóstico de ITER al Tokamak mediante puertos.

Por estas razones, los sistemas de diagnóstico son muy robustos, sencillos y con capacidades de movimiento mínimas con el fin de evitar fallos. La regla general es el uso de actuadores neumáticos que generen 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 [Smick 2005] y está 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 [Izard 2009].

Brazo Articulado de Inspección AIA

El brazo articulado de Inspección AIA [Gargiulo 2008] [Keller 2009] [Gargiulo 2009] [Houry 2010], 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.

Ilustración 18 - Brazo articulado de Inspección AIA en el reactor Tore Supra

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 [Keller 2009].

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 [Gargiulo 2009].

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 ultravacío están encerrados en cajas anti-fugas de acero inoxidable.

Robot PAC

El robot PAC (The Porteur Articulé en Cellule) [Perrot 2004] mostrado en la figura siguiente 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 AREVANC 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 este motivo el robot tiene que resistir una dosis total de 10 kGy.

La principal característica demandada a este robot es la 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 en el cual se inspira. La diferencia es que en este caso el mecanismo de paralelogramo compensa la gravedad con un resorte de fibra de vidrio.

Ilustración 19 - Robot PAC en una celda caliente de AREVA

Manipulador WHMAN

El manipulador WHMAN (Water Hydraulic MANipulator) [Nieminen 2009] es un robot teleoperado con reflexión de fuerzas. Se caracteriza porque es hidráulico y como fluido utiliza agua. El brazo está equipado con siete articulaciones actuadas que le permiten contar con seis grados de libertad. El diseño actual pesa 185 kg y sus materiales base son aleaciones de aluminio y acero inoxidable. Funciona con una presión de línea de 210 bar y requiere un caudal de 10 lpm. Además requiere una línea neumática a 6 bar y una conexión eléctrica.

Ilustración 20 - Plataforma de prueba del Divertor para ITER en Finlandia, con un brazo manipulador WHMAN de 6 G.d.I. encima.

Tiene una capacidad de carga de 100 kg cuando está totalmente extendido, en cuyo caso alcanza una distancia de 2.5 m medidos desde la articulación de la base. En la figura anterior se muestra el diseño actual [Nieminen 2009]. 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 están basados en tecnología analógica.

Manipulador MASCOT

Los primeros MASCOT estaban basados en tecnología analógica, y han sido digitalizados a partir de 1990. El Mascot IV fue escogido en los años 80 para realizar el mantenimiento del reactor de JET. Es un sistema maestro-esclavo de 7 grados de libertad por cada brazo (pinza incluida).

El maestro y el esclavo están unidos por una línea de alta velocidad de datos que permite separarlos varios kilómetros. El esclavo se puede situar en cualquier localización interna o externa del Tokamak utilizando una plataforma de transporte adecuada que le sirva como base.

Ilustración 21 - manipulación remota en JET con un Mascot.

Se consideraba necesario aplicar una filosofía ‘man-in-the-loop’ con reflexión de fuerza para proveer al sistema de la flexibilidad necesaria para realizar gran variedad de tareas de mantenimiento en JET. El sistema de visión que se utiliza conjuntamente con el esclavo consta de una cámara "Cyclops" montada entre los dos brazos del esclavo, otras dos cámaras en las muñecas del esclavo, una unidad de cámara móvil manual, y otra cámara interna en el JET Torus.

CAPÍTULO 3

PLATAFORMA ABIERTA DE TELEOPERACIÓN

En este capítulo se aborda la integración de todos los dispositivos maestro y esclavo para poder crear una Plataforma Abierta de Teleoperación que permita el interconexionado de dispositivos maestros y esclavos.

Para su realización se han tenido en cuenta los diversos requisitos que se definen al principio del capítulo para el correcto diseño de un puesto de teleoperación: requisitos de una sala de control, requisitos de interfaces hápticas, requisitos de morfología humana y ergonomía.

La necesidad de este capítulo radica en explicar el equipo con el que se realizarán las pruebas para las validaciones de las aportaciones de esta tesis y que se detallarán en los siguientes capítulos.

3.1 Definición de Requisitos para un puesto de Teleoperación:

En este capítulo se aborda la integración de la Plataforma Abierta de Teleoperación, que a partir de ahora designaremos como PAT. Para ello, partiendo de las líneas teóricas de los apartados anteriores, será necesario definir una serie de requisitos, empezando por el caso que nos ocupa de la teleoperación en entornos nucleares.

3.1.1 Requisitos de la Sala de Control

Como ya se vio en el capítulo anterior el operador trabaja desde una Sala de Control situada en una zona segura. Desde esta Sala de Control, en ocasiones y dependiendo de las instalaciones desde varias, se llevan a cabo todas las operaciones de Manipulación Remota, con lo que habrá distintos puestos de operación desde los cuales cada operador lleva a cabo tareas individuales sobre equipamiento remoto coordinándose en todas las tareas, especialmente cuando alguna teleoperación en la zona radiada implique el uso de varios equipos de forma conjunta.

Por ejemplo, en la siguiente imagen se observa la distribución de una sala de control de manipulación remota para las instalaciones de la Hot-Cell, y que cuenta con 6 puestos de trabajo y una estación de supervisión.

Una característica de los sistemas de manipulación remota es que obligatoriamente son man-in-the-loop, esto quiere decir que están teleoperados o controlados por una persona. Por ejemplo, cuando se tienen que llevar a cabo las tareas de mantenimiento.

Los operadores de manipulación remota usan las interfaces específicas del sistema de control de alto nivel de Manipulación Remota. Todas estas operaciones son coordinadas centralmente a través del puesto de supervisor que proporciona o niega los permisos de operación para cada operador.

Para estos sistemas man-in-the-loop, se requiere de interfaces software y hardware, ya que el operador tiene que interactuar directamente con ellos. Mediante estas interfaces el operador recibe información sobre el estado de la tarea remota y

decide la respuesta correspondiente al sistema remoto para cerrar el bucle en las operaciones de Manipulación Remota.

Ilustración 22 - Servo-manipulador maestro del Mascot con reflexión de fuerza, situada a 40m. del área remota de trabajo

La información que recibe el operador puede ser de muy diversa índole, pudiendo incluir tanto los valores numéricos de las variables del sistema a través de un monitor, o información visual de las cámaras de video remotas, o incluso información táctil a través de los maestros hápticos de teleoperación.

Las interfaces de operador deberán cumplir con las especificaciones de hardware estándares propias de la sala de control de Manipulación Remota, y tienen que ser diseñados para que el operario pueda realizar las tareas lo mejor posible.

Con las interfaces humanas que suele haber en las salas de control, se abarcan distintos modos de control con el fin de controlar todos los movimientos y la forma en que se podrían realizar con el equipo de manipulación remota por el operador:

- Control independiente de articulaciones: cada G.d.l. tiene que ser capaz de ser controlado independientemente del resto.
- Movimiento articular coordinado: Se mueven de forma coordinada varios G.d.l. a la vez.
- Secuencias de movimientos predefinidos: Las secuencias son combinaciones y listas ordenadas de movimientos G.d.l. que pueden estar incluidos en un protocolo, y que pueden ser automatizados bajo la activación y supervisión del operador.

Para la realización de estos movimientos o secuencias anteriores, hay diferentes maneras de realizar la tarea por el operador y en función de la interfaz de entrada utilizado.

- Joystick: usando directamente con movimientos relativos.
- Control de comandos a través de la ventana de comandos con el teclado.
- Control de interfaz gráfica de usuario a través de la interfaz de software y con un teclado y un ratón.
- Un dispositivo maestro (háptico o no) que permita controlar los movimientos del robot esclavo remoto.

La matriz de relación entre las interfaces y los movimientos está en la tabla a continuación.

Tabla 4 - Relación entre interfaces y tipo de movimientos

	Joystick	Comandos	GUI
G.d.l. independientes	Relativa	Relativa/Absoluta	Relativa/Absoluta
Movimientos coordinados	Relativa	Relativa/Absoluta	Relativa/Absoluta
Secuencia de movimientos		Relativa/Absoluta	Relativa/Absoluta

La interfaz de la palanca de mando proporciona un movimiento relativo precisa y muy intuitiva para el usuario, también necesitará de comandos o interfaz gráfica de usuario que se utilizará para seleccionar si se utiliza para g.d.l. independiente o para coordinar el movimiento como el toroidal. Operaciones de manipulación remota se realizan más rápido, más fácil que usar la interfaz gráfica de usuario.

Los permisos de la ventana de comandos para introducir manualmente todos los comandos para realizar la tarea. Es más preciso que el joystick ya que las entradas de mando son valores numéricos, y el joystick depende de las habilidades del operador.

La opción de interfaz gráfica de usuario está programado con los comandos, por lo que el rendimiento es el mismo; Sin embargo GUI podría tener campos de entrada,

deslizadores, botones ... y así aún más atractivo para la representación de datos como gráficos o simulaciones. Esto hace que la interfaz gráfica de usuario más amigable y más intuitivo que la ventana de comandos, pero aún más lento y menos intuitivo que el joystick ya que se necesita un ratón o trackball para accionar en la interfaz gráfica de usuario.

Sin embargo, las tres interfaces no tienen que ser considerados como independientes, por otra parte deben ser utilizados en combinación. Por ejemplo, el joystick puede ser programado con la interfaz gráfica de usuario en los modos para llevar a cabo diferentes tareas tales como el movimiento toroidal de la dispositivo de manipulación remota, o el levantamiento de los casetes. Sin embargo, para los movimientos más precisos de los comandos se pueden utilizar para mover un solo grado de libertad.

Es necesario que la Control Room tenga distribuidas diversas botoneras de parada de emergencia para los dispositivos de Manipulación Remota. Un circuito de pulsador de parada de emergencia jerárquica (ES) estará implementado en el Sistema de manipulación remota. Este circuito permitirá la agrupación de equipos relacionados según la distribución de tareas en los distintos puestos, y según los distintos dispositivos remotos. Presionar una seta de emergencia significaría disparar todas las botoneras de emergencia de los dispositivos que se encuentren relacionados en ese instante.

Además, desde la botonera de emergencia del puesto de Supervisor se podrá controlar al resto de cada una de los puestos de trabajo de la sala.

3.1.2 Requisitos de morfología humana y ergonomía

Una vez definidos los requisitos de la Sala de Control será necesario definir el puesto de trabajo. Por ello, en este apartado se definirán las características que ha de tener un puesto de teleoperación, si bien además de tener que tener ciertas características orientadas a la consecución con éxito de la tarea, también se deberán de tener en cuenta para su diseño distintos aspectos ergonómicos y de morfología humana, pues será utilizado durante muchas horas de trabajo por un operador y ello influirá directamente sobre su rendimiento.

El mundo laboral está cambiando de forma constante, cada día a un ritmo más rápido; junto a estos cambios están surgiendo una gran cantidad de dolencias, molestias generales y disconformidad en el cuerpo de las personas.

Para poder adaptar el puesto de trabajo al operador es necesaria la consideración de las medidas del cuerpo humano en el dimensionamiento de los puestos de trabajo. Para ello se hace un estudio de cuál puede ser el resultado de la posición corporal, de las manos, muñecas, codo y del campo visual.

Estos estudios son muy importantes para evitar dolencias propias de una mala adecuación del puesto de trabajo. Algunas de las dolencias derivadas de una mala ergonomía más comunes son:

- Problemas en brazos y manos: síndrome del túnel carpiano, esguinces y distensiones, epicondilitis, compresión de arterias y venas, lesión de nervios, falta de riego sanguíneo, estiramiento/compresión del nervio mediano en la muñeca, lesiones en nervios y vasos sanguíneos digitales.
- Problemas en cabeza y cuello por ejemplo: compresiones de nervios, dolores musculares, tirones y distensiones musculares, problemas cervicobraquiales.
- Problemas en huesos y articulaciones: deformaciones, inflamación de la cápsula articular, bursitis, artrosis, artritis.
- Problemas de espalda como lumbalgias, dorsalgias y cervicalgias.
- Problemas de visión: miopía, vista cansada, sequedad e irritación ocular.

Ilustración 23 - Disposición ergonómica de elementos en un puesto de trabajo

A continuación figuran algunas directrices ergonómicas para el trabajo que se realiza sentado:

- El trabajador tiene que poder llegar a todo su trabajo sin alargar excesivamente los brazos ni girarse innecesariamente.

- La posición correcta es aquella en que la persona está sentada recta frente al trabajo que tiene que realizar o bien cerca de él.
- La mesa y el asiento de trabajo deben ser diseñados de manera que la superficie de trabajo se encuentre aproximadamente al nivel de los codos.
- La espalda debe estar recta y los hombros deben estar relajados.

3.1.3 Requisitos de las interfaces humano-robot

Vamos a considerar para la clasificación de requisitos las siguientes Interfaces hombre-máquina: Háptica, Visión, Voz

- Visual: Es la que más utilidad presenta, provocando siempre mejoras en la teleoperación y telepresencia. Normalmente se trata de realimentar imágenes del esclavo al operador mediante cámaras situadas en la zona remota.
- Auditiva: Se realimentan señales acústicas al operador. Puede ser de utilidad como alarma cuando ocurre algún tipo de fallo.
- Háptica (táctil y cinestésica): Se refiere a la realimentación de la sensación de contacto – ya sea de tipo táctil o de fuerzas – que el esclavo provoca al interactuar con el entorno.

La interfaz de un sistema teleoperado, es el puente que une al operador con el entorno de trabajo. Como se mencionó anteriormente, está compuesta por los dispositivos de entrada, dispositivos de salida y el control en zonal local. Debe ser sencilla de manejar, robusta, completa y sobre todo facilitar al operador la realización de las tareas remotas. En [Ferre 1997], se identifican 3 puntos que debe cumplir una interfaz, los cuales son:

- 1) Establecer todas las conexiones necesarias entre el operador y la zona remota de trabajo. Se dan dos tipos de conexiones: las de actuación del operador sobre el entorno remoto; y en sentido contrario, las de realimentación de información hacia el operador.
- 2) Facilitar la ejecución de tareas, permitiendo al operador enviar comandos de alto nivel referentes al trabajo a realizar, a la vez que posibilite su actuación directa cuando sea preciso.

- 3) Suministrar al operador toda la información necesaria del entorno de trabajo, con el fin de que alcance el mayor grado posible de transparencia. Esto le permitirá ejecutar tareas con destreza, así como facilitarle la supervisión de las tareas semiautomáticas.

3.1.4 Requisitos de sistemas de visión 3D

Los puestos de teleoperación contarán con diversos monitores situados frente al operador con contacto visual directo, y en ellos se mostrarán distintos puntos de vista en el espacio de la tarea.

En el caso de querer aplicar tecnologías de visión estereoscópica habrá que tener además en cuenta ciertas características especiales de estos sistemas, ya que para realizar una proyección de imágenes en 3D es necesario mostrar la misma imagen desde dos puntos de vista separados unos centímetros, igual que lo hacen nuestros ojos. Para entender este concepto es necesario conocer la fisiología del ojo humano, cómo funciona, y aplicarlo a la elección de los dos puntos de vista.

Para conseguir una correcta visualización y evitar efectos indeseables (como mareos), se depende directamente de la correcta configuración del espacio de trabajo según las propias condiciones fisionómicas del operador:

- Distancia normal de separación entre ojos, que comúnmente está entre los 5-7 cm.
- Distancia óptima de visión distinta, que es de unos 25 – 30 centímetros a partir de los ojos. Es en este punto donde los ojos no necesitan realizar ningún esfuerzo sensible para acomodar la retina. .
- Distancia idónea para visionar un monitor 3D [How 2004], que depende de la resolución y del tamaño de pantalla. Consultando en la siguiente tabla, para un monitor de 42” a 1080p como el utilizado en este trabajo, se necesita una distancia de entre 1,8 y 2 metros para el visionado idóneo de la imagen. Así mismo, el fabricante recomienda una distancia de 1,5 – 2 metros mínimos para el visionado 3D.

De cara a la ubicación de las cámaras en el entorno remoto también será necesario conocer:

- Distancia entre la cámara (Kinect en este caso) y el plano de trabajo del Robot. Esta distancia será decisiva para la calidad de la imagen. Debe encontrarse dentro de los valores óptimos de captura de profundidad por parte del sensor Kinect (esta entre 1.37 y 5 metros), y en un lugar adecuado para percibir en primera persona las operaciones realizadas.
- Ángulo de Visión (Field of View – FOV), ya explicado con anterioridad, y que corresponde al cono de visión que se ve en una imagen tomada por una cámara. Se suele hablar de ángulo de visión horizontal y vertical. Esto dependerá de cada cámara a utilizar y se ha de considerar para centrar el espacio de la tarea a una distancia concreta donde se ha de situar la cámara.

3.1.5 Requisitos de las interfaces Hápticas:

En el campo de la realidad virtual, el término háptica [Mandayam 2010], hace referencia a la capacidad de interactuar mediante el sentido del tacto con un mundo remoto o virtual. En estos sistemas el usuario se siente inmerso en un ambiente artificial, el cual es percibido y asimilado como un entorno real debido a la información recibida por la estimulación que se le proporciona a los órganos sensoriales.

En un dispositivo táctil ideal el usuario no debería apreciar diferencia entre la interacción con objetos reales y la interacción mediante el dispositivo háptico. La transparencia y la versatilidad de los dispositivos táctiles está afectada por una serie de criterios y requisitos de diseño que caracterizan su actuación. Las principales características que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar una interfaz háptica son [González 2006]:

- **Estructura mecánica:** existen básicamente dos tipos de estructuras, las estructuras serie y las paralelas, aunque también son posibles combinaciones híbridas entre ambas arquitecturas.
- **Tipo de actuadores:** estos irán adecuados al margen de fuerzas a aplicar y a las posiciones a las que se deba acceder.
- **Número de grados de libertad:** son el número de desplazamientos o rotaciones que permite el dispositivo y deben ser acordes a los grados de libertad que el usuario emplea en una tarea.

- **Espacio de trabajo:** es el volumen o área dentro del cual el usuario puede posicionar el efector final y dentro del cual el dispositivo puede imponer restricciones a ese movimiento.
- **Rango de fuerzas:** es el rango formado por los niveles máximo y sostenido de fuerzas que puede ejercer el dispositivo. Los valores máximos de fuerza controlable apretando con la mano varían desde 228 N para la mujer hasta los 400 N para el hombre [An 1986]. Sin embargo, si en vez de hacer un agarre fuerte se realiza un agarre de precisión, hay que hacer notar que la máxima fuerza para los dedos pulgar e índice es de 50 N, mientras que para el resto es de 40 N. Por otro lado, para que el confort del operador esté dentro de unos niveles de seguridad admisibles, las fuerzas ejercidas por la interfaz no deben exceder del ~15% de los valores máximos anteriormente citados [Wiker 1989].
- **Fricción aparente:** las pérdidas por fricción en una interfaz háptica deben ser inferiores a la mínima fuerza o al par que el usuario es capaz de percibir mientras interactúa con el entorno virtual. En caso contrario, la interfaz dejaría de ser transparente, pues no se podría diferenciar si las fuerzas percibidas por el usuario provienen de la realimentación deseada o de las pérdidas mecánicas del dispositivo en sí. Los valores de fricción aparente deben mantenerse en valores por debajo del 7 % de las fuerzas y del 12,7 % de los pares aplicados en la interacción con el entorno virtual [Doñate 2004].
- **Rigidez:** la rigidez de una interfaz háptica se relaciona íntimamente con la habilidad de la misma para generar restricciones al movimiento del operador dentro del entorno virtual, impidiendo que se penetre dentro de los distintos sólidos virtuales, y permitiendo, de este modo, su inspección y manipulación. La rigidez máxima de una interfaz depende de la fuerza máxima que pueda desarrollar y del mínimo desplazamiento que detecte. Los estudios demuestran que, en la práctica, una interfaz debe proporcionar una rigidez mínima de 20 N/m para que el operador pueda recorrer adecuadamente una superficie virtual [Massie 1994].
- **Inercia aparente:** la inercia aparente es la mínima masa percibida por el usuario cuando mueve el dispositivo háptico a través del espacio. En el caso

de que la inercia aparente del dispositivo fuese demasiado alta, podría causar en el usuario una fatiga excesiva. Un estudio piloto [Ellis 1996] indica que son aceptables masas de 50 gramos para operaciones que durasen media hora o menos, si bien, estudios recientes recomiendan valores cercanos a los 100 gramos.

- **Transparencia:** situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse físicamente en el entorno virtual. La transparencia se consigue realimentado coherentemente al ser humano suficiente cantidad de información sobre el entorno virtual. También expresa la capacidad del sistema para seguir el movimiento del usuario rápidamente y sin oposición. Es decir, el usuario no debe percibir ninguna fuerza sobre la mano en tanto que no exista interacción física con el entorno virtual.
- **Ancho de banda del dispositivo:** Muestra el rango de frecuencias dentro del cual la interfaz háptica es capaz de reflejar fuerzas de forma aceptable.

Todos estos requisitos vistos para un puesto de teleoperación, han servido para definir las líneas de integración de los distintos sistemas que han sido necesarios para construir la Plataforma Abierta de Teleoperación que se aborda a continuación.

3.2 Qué es la P.A.T.

Para la creación de la Plataforma Abierta de Teleoperación comenzaremos por describir un esquema general de la PAT y los subsistemas que la componen, así el conexionado de los distintos equipos y el software para operar con ella.

Servirá para los futuros estudios en teleoperación, como banco de trabajo para probar algoritmos o realizar experimentos. Ha sido en esta Plataforma Abierta de Teleoperación donde se han validado las diferentes contribuciones de esta tesis, permitiendo valorar la inmersión del operador mediante el feedback multimodal de estímulos, de ahí la necesidad de este capítulo.

Para su realización se han tenido en cuenta los diversos requisitos definidos en el capítulo anterior para el correcto diseño de un puesto de teleoperación: requisitos

de interfaces hápticas, requisitos de morfología humana y ergonomía. Siendo el principal requisito que la plataforma sea configurable y adaptable a las necesidades del operador.

En esta sección se describen las especificaciones de los componentes de la arquitectura de control para un sistema de teleoperación tipo maestro-esclavo 6 g.d.l. El sistema desarrollado debe contar con realimentación háptica en los primeros tres g.d.l., así como una realimentación visual y auditiva. La realimentación brindada al usuario es resultado de la interacción física con el entorno remoto.

Para lograr una transición suave en las gráficas o una realimentación visual aceptable es necesaria al menos una frecuencia de actualización de imágenes de al menos 50 Hz. en caso de requerirse una visión estereoscópica la frecuencia deberá aumentar por lo menos a 100 Hz. Uno de los requisitos de un sistema de teleoperación háptico es que la frecuencia de realimentación visual sea suficiente para que el usuario tenga una experiencia similar a la que tendría si lo estuviera manipulando directamente.

Ilustración 24 - Esquema general simplificado del sistema básico de teleoperación para un brazo con la Plataforma Abierta de Teleoperación

Es decir, el usuario experimenta de forma coherente la información visual y táctil. Asimismo, la realimentación de fuerza también requiere de una alta velocidad de actualización no solo para proporcionar una sensación realista sino también para asegurar la estabilidad. Se considera que es necesaria una frecuencia de actualización en tiempo real de al menos 1 kHz. para alcanzar una sensación háptica aceptable. Por otra parte los retardos en la transmisión de fuerzas pueden producir inestabilidades en el sistema háptico al no ser consideradas en la fase de diseño.

Para sistemas de teleoperación sin realimentación háptica, las velocidades de actualización en tiempo real no son necesarias, debido a que la información visual es realimentada al usuario de forma unidireccional, dado que no afecta el comportamiento de los controladores del robot.

El realismo de la interacción es denominado transparencia. La transparencia del sistema teleoperado es determinada por el algoritmo de control bilateral. Un requisito fundamental de un sistema de telemanipulación funcional es garantizar la estabilidad del sistema para todas las circunstancias que puedan ser encontradas durante la operación.

A continuación se describirán algunos aspectos fundamentales a cerca de la PAT y la integración de todos los sistemas que la componen, este trabajo comenzó con un sencillo sistema teleoperado [Galiana 2012], que se ha ido mejorando añadiendo sistemas, dispositivos, sensores, para crear una plataforma multiconfigurable para la realización de experimentos y prueba de algoritmos.

La Plataforma está siendo mejorada continuamente con la finalidad de conseguir un mejor rendimiento en cuanto a percepción del operador y con ello conseguir un menor tiempo en la ejecución de distintas tareas aplicando distintos algoritmos de control bilateral.

Se ha partido de dispositivos existentes en el grupo de investigación, dado que la realización de una plataforma de teleoperación supone un elevado coste y una gran inversión de tiempo. Se propone que sea totalmente abierta, con el propósito de que no solamente permita comprobar experimentalmente los algoritmos presentados,

sino que además permita realizar cualquier otro tipo de pruebas, experimentos o investigaciones en el área de teleoperación.

Se caracteriza porque utiliza la arquitectura de control Fuerza-Posición, configurado para que el maestro refleja fuerzas (alrededor del 10 %) al operador para que pueda tener una mejor percepción de la interacción del esclavo con el entorno. Y a su vez los movimientos ejercidos en el brazo maestro son reproducidos en el robot esclavo en posición.

La reflexión de fuerzas es posible gracias a que el maestro cuenta con motores eléctricos en sus primeras cinco articulaciones. Gracias a la reflexión de fuerzas el operador es capaz de realizar operaciones más complejas [Ming 1989] [Hannaford 1991].

Se parte del telemanipulador comercial GRIPS de Kraft Telerobotics Inc. del tipo maestro-esclavo, cuyas hoja de características se adjuntan en los anexos de esta tesis. Está diseñado para operar en condiciones hostiles, bajo el agua e incluso en ambientes con radiación electromagnética y nuclear bajo ciertas condiciones gracias a que el sistema esclavo es accionado hidráulicamente por válvulas reguladoras de caudal que al ser actuadas por medio de solenoides no son afectadas por dichas condiciones.

3.3 Integración de Sistemas

Para satisfacer estos requerimientos, se propone una arquitectura de red que procese las señales y realice los cálculos necesarios para el control del sistema en tiempo real. Esta arquitectura de control permite la conexión simultánea de los distintos sistemas que componen la plataforma a través de la red e incluso de Internet, lo cual es ideal para permitir una arquitectura abierta que permita a los desarrolladores programar y probar sus aplicaciones o estrategias de control.

Podemos descomponer la PAT en los siguientes sistemas:

1. Sistema de Visión
2. Sistema de Control de Maestro
3. Sistema de Control de Esclavo
4. Sistema de Comunicaciones

5. Sistema de Programación de Alto Nivel
6. Sistema de Seguridad
7. Otros subsistemas

A continuación se describen cada uno de los componentes de cada sistema y su función:

3.3.1 Sistema de Visión

Optitrack:

Cámaras Optitrack

Para el seguimiento del robot se va a intentar utilizar cámaras Optitrack Prime 41. Conforman un sistema óptico avanzado de captura de movimiento tridimensional que utiliza un set con una serie de cámaras distribuidas en un espacio, cuyos campos de visión cubren completamente éste, y unos marcadores esféricos reflectantes que sirven para una mejor visión y, por tanto, seguimiento del objeto final. Las cámaras emiten luz infrarroja, que es reflejada por los marcadores y recogida de nuevo en las propias cámaras.

Para el estudio cinemático, es necesario colocar los marcadores sobre el extremo del brazo robótico, cuyo movimiento va a ser captado por las cámaras del sistema, y analizado por triangulación para obtener sus posiciones 3D reales, fotograma a fotograma, generando así un conjunto de datos en movimiento.

De esta forma se puede comprobar las respuestas de los algoritmos de control a través de mediciones con errores por debajo del milímetro.

Cámara 3D

Una cámara con doble objetivo que permite transmitir en tiempo real imágenes con visión binocular a través de un puerto HDMI. Esto permite visualizar directamente en la pantalla 3D, y teleoperar con visión estereoscópica.

Sensor Kinect

Sensor de cámara RGB-D desarrollado por Microsoft que dispone de librerías y software dedicado para realizar desarrollos.

Pantalla 3D

Permite reproducir imágenes 3D o 2D.

La tecnología 3D que utiliza es pasiva mediante luz polarizada.

Puede reproducir vídeo 3D que entra directamente por sus puertos HDMI realizando directamente la conversión y separación de frames para su visualización.

Cámaras auxiliares

Además de la cámara 3D y las cámaras del Optitrack, que pueden ser utilizadas como cámaras de video en tiempo real. También contamos con cámaras USB y cámaras IP (para transmisión de video por red), por si se necesita tener algún punto de vista extra en concreto.

Monitores auxiliares

Además de la pantalla 3D se cuenta con monitores para mostrar otros puntos de vista de las cámaras e interfaces de usuario donde se muestran controles e indicadores de variables vía software.

También se cuenta con un switch HDMI por si se quieren conectar varias cámaras a un mismo monitor.

3.3.2 Sistema de Control de Maestro

Maestros:

El robot maestro, mostrado en la próxima figura, 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.

Un botón ubicado en la base del maestro controla el encendido del sistema hidráulico, en el antebrazo se encuentran tres LED que indican el estado de bloqueo de la pinza (Grip lock), el modo de rotación de la muñeca (Cont wrist), y el bloqueo

de la posición del sistema (Halt). Un LED ubicado al lado del botón para encender la hidráulica indica su estado.

Ilustración 25 - Maestro del sistema GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc

El sistema maestro al igual que el sistema esclavo cuenta con potenciómetros para determinar las posiciones angulares de las articulaciones.

PXI Maestros con tarjetas de adquisición de datos

La plataforma de teleoperación es gobernada mediante un controlador en tiempo real de National Instruments NI PXIe-1078 con módulos de adquisición de datos que leen las señales provenientes de los sensores de posición y de fuerza.

El módulo NI PXIe-1078 consiste en un chasis de nueve ranuras, junto con una ranura para un controlador que puede ser embebido o remoto.

El chasis PXI incorpora un controlador de tiempo real NI PXIe-8182 de doble núcleo con una frecuencia de operación de 1.9 GHZ funcionando con VxWorks. Las fuerzas de interacción provienen del entorno remoto a través de internet mediante el protocolo UDP.

El controlador es usado para realizar cálculos complejos (jacobiana, ecuaciones cinemáticas, ecuaciones de control, entre otras) que transforman la fuerza de interacción en los valores deseados en los actuadores y también para calcular la posición (x; y; z) y la orientación (Roll, Pitch, Yaw).

Para conectar los módulos de adquisición de datos con las señales provenientes de los sensores se usa un módulo de conexiones NI PXIe-6363

Ilustración 26 - Hardware PXI de National Instruments utilizado para el controlador

Controlador en LabView

Este PXI se programa en el lenguaje LabView que es un entorno de programación gráfica comúnmente extendido entre ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control. Basado en la programación modular, permite interaccionar con instrumentos de medida y posee un amplio conjunto de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos. Mediante este lenguaje se han programado los controladores de bajo nivel de los maestros.

Drivers de los motores del Fabricante

Para el control de los motores de los maestros del GRIPS de Kraft Telerobotics, se conservan los drivers del fabricante, y están conectados directamente al controlador PXI de National Instruments. Dichos actuadores son cinco motores bifásicos de corriente alterna para realimentar la fuerza ejercida en el entorno remoto al operador. Para accionarlos son necesarias dos señales de corriente alterna que son generadas por el controlador de tiempo real y posteriormente amplificadas en una etapa de potencia. El sentido de rotación del motor depende de si la fase es $+90^\circ$ o -90° . El par ejercido depende de la amplitud de ambas ondas.

Interfaz háptica MF3

Esta interfaz es un dispositivo háptico compacto y modular que permite al usuario interactuar con un entorno virtual o remoto utilizando para ello tres dedos como por ejemplo sus dedos pulgar, índice y corazón. El usuario inserta sus dedos en los dedales para realizar manipulaciones avanzada de objetos, y diferentes tipos de agarres, además a través de la interfaz MF-3 se proporciona al usuario realimentación háptica sobre el objeto que se agarra, de esta forma el operador

obtiene un elevado grado de realismo en la percepción del peso y las formas de los objetos.

Interfaz háptica Phantom

Interfaz háptica comercial de la compañía Sensable Inc. Diseño portátil, tamaño compacto, con comunicación a través de puerto FireWire.

Cuenta con seis grados de libertad con detección de posición y orientación, de los cuales tres son actuados para controlar sólo la posición del puntero. Con un espacio de trabajo compacto para la facilidad de uso y construido a base de componentes metálicos y plásticos moldeados por inyección. Su efector final tiene forma de stylus y cuenta con dos botones integrados en el lápiz para la facilidad de uso y personalización del usuario.

3.3.3 Sistema de Control de Esclavo

Esclavos:

Los robots esclavos GRIPS de Kraft Telerobotics Inc. 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 Fuerza – Posición, con lo cual el sistema mediante el maestro refleja fuerzas al operador para que pueda tener una mejor percepción de la interacción del esclavo con el entorno.

Ilustración 27 - Esclavo del sistema GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc

El robot esclavo, mostrado en la figura es un brazo electro-hidráulico de 6 grados de libertad con una pinza como efector final.

La distribución de los actuadores permite 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 está 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.

También hay que considerar las limitaciones físicas del robot así como del entorno de dentro del área de seguridad. Debido a estas restricciones, cada articulación tiene unos valores límite máximos y mínimos de seguridad, que no pueden ser sobrepasados y se adjuntan en la tabla.

Tabla 5 - Tabla de los límites articulares del robot esclavo

Notación	Nombre articulación	Tipo	Límites (rad)	
SA	Shoulder Azimuth	Rotacional	1.58	-1.58
SE	Shoulder Elevation	Rotacional	0.53	-1.58
EL	Elbow Pivot	Rotacional	2.1	-1.0
WP	Wrist Pitch	Rotacional	1.2	-0.7
WY	Wrist Yaw	Rotacional	1.2	-0.7
WR	Wrist Roll	Rotacional	1.74	-1.74

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 servoválvulas que controlan los actuadores, una válvula 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).

La posición del robot se puede determinar gracias a los seis potenciómetros acoplados a cada grado de libertad. La fuerza ejercida por cada articulación y la

pinza, con excepción de WR, es estimada por seis transductores de presión localizados en el colector de las válvulas.

El manipulador tiene un área de trabajo de 180 grados 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.

La PAT cuenta con dos robots esclavos para teleoperar bimanualmente, el izquierdo es como el descrito anteriormente, y el derecho cuenta con algunas modificaciones: se le ha incluido un sensor fuerza/par en la muñeca, y también se ha sustituido la pinza por una mano robótica de 3 dedos, para poder realizar tareas de agarre más complejas y aumentar la destreza del sistema.

Bomba hidráulica, panel hidráulico de control y mangueras

Son los elementos que alimentan de aceite a presión a los robots esclavos para su funcionamiento.

PXI Esclavos con tarjetas de adquisición de datos:

Ya comentado en la sección anterior con los dispositivos maestros.

En este caso, están conectados ambos esclavos a sus tarjetas de entrada y salida, y están programados los controladores de bajo nivel en LabView que permiten que el robot pueda realizar un control en posición.

Sensor fuerza/par de la muñeca

Este dispositivo es un transductor que mide simultáneamente las fuerzas y los pares recibidos en los tres ejes cartesianos (X, Y, Z). Está diseñado para uso industrial, ofrece numerosas posibilidades de comunicación vía Ethernet/IP, con lo que se accede a sus datos en tiempo real a través de la red local.

Ilustración 28 - Conjunto del sensor ATI Gamma SI-130-10 junto con la NET box

Mano Robotiq

Este elemento terminal sustituye a las pinzas originales del GRIPS. Consiste en una mano robótica con 3 dedos con 4 grados de libertad en total, que permite diferentes tipos de agarre, amoldando la sujeción en función de las necesidades requeridas. Las diferentes taxonomías de agarre dependen del tipo de sujeción buscado, de potencia o de precisión, 3 G.d.l. son para la apertura y cierre de cada dedo y el cuarto es para juntar o separar los dos dedos en un movimiento de tijera. Este dispositivo está diseñado para su uso industrial, con numerosas opciones de comunicación: EtherNet/IP, TCP/IP, DeviceNet, CANopen, EtherCAT, Modbus R.

Ilustración 29 - Pinza robótica de 3 dedos de Robotiq

Para el control y lectura de valores de los 4 G.d.l., accederemos a través de la red local a su dirección física IP. Los dedos cuentan con una estructura mecánica inteligente que se adapta al contorno de los objetos que agarra.

3.3.4 Sistema de Comunicaciones

Red LAN cableada Ethernet

La opción habitual de configuración y trabajo es esta. A través de una red local con routers y cableado Ethernet, se fijan IPs para los distintos dispositivos que acceden entre sí a los distintos valores o controles de la Plataforma. Sólo es necesario conocer la IP de un determinado dispositivo para poder acceder a él.

Las cámaras Optitrack del Sistema de visión cuentan con su propia red local independiente para evitar tráfico en la red que pueda alterar las lecturas.

Red WiFi

Se cuenta con dos Wireless Router TRENnet TEW-812DRU. Que permiten conexiones WiFi de alta velocidad. Uno de ellos estará del lado del maestro y otro

del lado del esclavo, se utilizan para realizar pruebas con redes inalámbricas y ver cómo influyen los distintos parámetros a las inestabilidades de la teleoperación bilateral.

Red Fibra óptica

Se cuenta con diversos routers de fibra óptica y convertidores Ethernet/fibra. Esto permite conectar todos los Sistemas a fibra óptica y poder evaluar tiempos mínimos y transferencias máximas de flujo de datos. Se suelen utilizar para pruebas a largas distancias entre maestro y esclavo.

Software de Redes

Se cuenta con un PC que tiene distintos software de redes como: sniffers o generadores de ruido, para capturar datos de la red y poder realizar pruebas de comportamiento en redes saturadas de tráfico. Dicho PC también permite realizar todas las configuraciones de red necesarias.

Protocolos

En todo sistema teleoperado hay una parte de transmisión de datos. Aquí entran en juego los protocolos de comunicaciones entre los diversos subsistemas del conjunto. Aunque en el próximo capítulo se hablará del protocolo de teleoperación, inicialmente se configuró la PAT con un protocolo de comunicaciones UDP (User Datagram Protocol) es un protocolo del nivel de transporte de la capa 4 del Modelo OSI de referencia para sistemas de comunicaciones.

Una de las principales características que diferencia a este protocolo de otros del mismo nivel como el protocolo TCP es que está orientado sin conexión, es decir, no emplea ninguna sincronización entre el origen y el destino. Esto implica que no puede asegurar la entrega de los datagramas o paquetes enviados. Otra característica es la simplicidad de los paquetes UDP que reduce la cantidad de información necesaria para poder ser utilizado, lo cual hace que el protocolo UDP sea la mejor opción en algunas aplicaciones

Este protocolo es utilizado en redes fiables sin pérdida de información y con alta tasa de transferencia de datos que no requieren o no necesitan comunicación bilateral interactiva entre los dispositivos. Ejemplo de estas redes pueden ser las redes industriales de monitorización y sensorización.

3.3.5 Sistema de Programación de Alto Nivel.

R.O.S. (Robot Operating System)

ROS es un conjunto de librerías y herramientas software en código abierto que permiten construir aplicaciones robóticas, desde drivers hasta algoritmos de control con potentes herramientas para desarrolladores.

Su ventaja principal es que los procesos pueden ser diseñados individualmente y libremente acoplados durante su ejecución. Los paquetes se publican en nodos en forma de topics. Cada topic contiene información referente a ese nodo como pueden ser sensores, control, estado, planificación, actuación u otros. Los nodos se comunican entre sí mediante mensajes. La gran ventaja de este sistema es que el lenguaje de programación de estos, no tiene que ser el mismo, ya que es el propio nodo el que lee los mensajes independientemente del idioma, y luego responde de la misma forma. De esta manera no hay que preocuparse en aprender algún lenguaje nuevo para un cierto programa o, si se está haciendo un trabajo en equipo, cada miembro podrá picar código en el lenguaje que le resulte más cómodo a la hora de trabajar con él. ROS también permite realizar simulaciones en escenarios en 3D a través de Gazebo, e incluir motores físicos.

LabView

ROS permite probar y programar nuevos algoritmos de control de forma fácil y sencilla mediante una programación gráfica. Se pueden programar algoritmos de alto nivel que usen a su vez los controladores de bajo nivel de los Controladores PXI de los robots maestros y también de los esclavos.

Además permite tener acceso a todas las variables de las entradas y salidas de las tarjetas de adquisición de datos donde están conectados los robots y la mayoría de los sensores, accediendo por tanto en tiempo real a la lectura de las variables.

Interfaces de usuario

Las interfaces de usuario vía Software se programan vía ROS o LabView, aunque esta última suele ser la más habitual por la versatilidad que ofrece utilizar sus librerías.

Ilustración 30 - Interfaz gráfica en LabView para el ajuste de reguladores.

Simulador del entorno remoto

Como simulador se utiliza Gazebo, un simulador diseñado para ROS, que permite desarrollar entornos físicos en mundos simulados para poder operar un robot y ver cómo responde a ciertos impulsos u operaciones sin la necesidad de operar con el robot real, lo que supone una mejora en la seguridad tanto del operario como del robot.

Se suelen probar primero las trayectorias en un entorno virtual en el que comprobemos que no existe ningún problema antes de operar con el robot. Primeramente se ejecutan en este medio seguro, y cuando se demuestre que funcionan sin ninguna anomalía es cuando se puede pasar a operar con el robot real.

Ilustración 31 - Simulación en Gazebo del brazo manipulador

Hecho esto, aparecerá en la pantalla el programa de Gazebo con el modelo del robot en un mundo virtual vacío (sólo se encuentra el robot encima de la mesa), y en estado de desconexión hidráulica, en reposo.

En el simulador se puede escoger que salga un solo esclavo o los dos. Posteriormente es posible conectarse directamente con cada controlador de las articulaciones, reproduciendo fielmente los movimientos en los esclavos, con lo que los robots reales realizan movimientos clones de simulación.

Algoritmos de Control de Alto Nivel:

Dotar a un sistema teleoperado de cierta inteligencia se puede hacer mediante los Algoritmos de Control de Alto Nivel, como por ejemplo en [Hernando 2003] para evitar los retardos en la comunicación, o también para desarrollar algoritmos complejos de teleoperación [Aracil et al. 2009]. Mediante un PC se pueden probar distintas formas de control en la PAT. Se puede acceder a programar en ROS mediante Python o C++, o en LabView, realizando controladores de alto nivel que usen información de distintos sensores instalados, utilizando el simulador, y utilizando o no los controladores de bajo nivel que ya están implementados en los PXI de los esclavos y de los maestros.

Algunas de las pruebas ya realizadas son:

- Rate-Position Controller
- Escalado
- Indexing
- Grasping 3-fingers
- Estimación fuerzas externas esclavo
- Estimación fuerzas de la carga

3.3.6 Sistema de Seguridad

Aislamiento de la red eléctrica:

Mediante un transformador 1:1, toda la plataforma está aislada eléctricamente de la red eléctrica evitando ruido eléctrico que afecte a la electrónica.

Además diversos fusibles protegen el sistema en caso de sobrecargas.

Botonera de parada de emergencia que desconecta la hidráulica

Dispositivo de seguridad que impide que el sistema hidráulico siga alimentando a los robots en caso de una emergencia. Consiste en un pulsador rojo que corta el suministro de presión de los robots esclavos, con lo que en caso de parada los robots caen hasta su estado de reposo.

Estructura de protección de usuarios

Como parte del sistema de protección hay instalada una estructura metálica alrededor del área de trabajo de los robots, con un panel de metacrilato que permite teleoperar directamente y evita la proyección de partículas fuera del espacio de trabajo.

Protección por Software

Se han implementado algunas medidas de protección por software:

- Bloqueo de seguridad ante errores de posición grandes: Evita que el sistema tenga movimientos muy bruscos y que pueda entrar en inestabilidades.
- Todas las variables de entrada y salida están limitadas por software a sus valores máximos admisibles para evitar fallos en la electrónica.

3.3.7 Otros subsistemas

Sensores ATI

Se cuenta con otro sensor fuerza/par como el que se encuentra instalado en la muñeca del esclavo derecho, para realización de experimentos y poder medir las fuerzas aplicadas.

Subsistema de agarre

A través de los sensores de presión Takktyle se puede calcular la fuerza además de su direccionalidad en un determinado punto de contacto.

Estos sensores colocados en los dedos de la mano robótica permiten estimar las fuerzas en el agarre y detectar el contacto con objetos, pudiendo reflejar estas fuerzas a un dispositivo háptico como el MF3 y que el usuario tenga la percepción de estar agarrando un objeto pudiendo controlar la fuerza de su agarre.

Sensor de cálculo de cargas.

A través del uso de una IMU (Adis 16405 y ADIS16405 PCBZ breakout board), acoplada al sensor fuerza/par de esclavo derecho, podremos calcular las fuerzas e

inercias que produce una carga en el extremo del robot y poder transmitir las fidedignamente al dispositivo maestro.

Ilustración 32 - Sensor ADIS 16405 utilizado para la medición de velocidades y aceleraciones

Este sensor industrial es un conjunto de sensores que incluye un giróscopo triaxial, un acelerómetro triaxial, un magnetómetro triaxial y un termómetro. Es, por tanto, un sensor capaz de medir las velocidades angulares y aceleraciones angulares necesarias para el proyecto. Además cada sensor cuenta con funciones de calibración para optimizar el comportamiento dinámico gracias a la tecnología *MEMS®*.

Control en Corriente/Fuerza en maestro

A través de una placa desarrollada para leer las corrientes consumidas por los actuadores de los dispositivos maestros, de esta manera como ya se explicará en el Capítulo 6, se podrá estimar el par en el motor y realizar un control en fuerza de cada una de las articulaciones del maestro.

3.4 Tests de Validación

Para valorar la calidad de los controladores calculados, se diseñan una serie de pruebas de validación.

Utilizaremos para ello dos trayectorias que ha de realizar el extremo del robot en el espacio de trabajo con distintas variaciones: con y sin peso, y en configuraciones del brazo extendida y encogida.

Al planificar una trayectoria con el extremo del robot conseguimos ver el error acumulado que se produce en el efector final a lo largo de las articulaciones además de poder valorar los datos individuales de cada articulación. Dichas

comprobaciones se harán tanto a través de los sensores propios del robot (potenciómetros de cada articulación), como externamente con el uso de la herramienta Optitrack que permite hacer seguimiento de distintos puntos mediante un sistema de cámaras y con precisión inferior al milímetro.

Las dos trayectorias escogidas son la Lemniscata y el Astroide, pues nos ofrecen casos opuestos en el comportamiento del robot: en el seguimiento de trayectorias curvas externas pasando por zonas centrales, y el seguimiento de trayectorias curvas internas que acaban en vértices o ángulos muy pronunciados.

En el primer caso, la lemniscata se define como el conjunto de los puntos del plano cuyo producto de las distancias a cada uno de los puntos es constante e igual a K. En este caso tenemos una lemniscata de dos focos o también conocida como lemniscata de Bernoulli.

$$(x^2 + y^2) = 2a^2(x^2 - y^2)$$

Ilustración 33 - Trayectoria y ecuación de la Lemniscata

Para la validación se hacen cuatro pruebas que ejemplifiquen si el robot tiene buena dinámica con los controladores:

- Trayectoria del robot encogido sin peso en el extremo.
- Trayectoria del robot estirado sin peso en el extremo.
- Trayectoria del robot encogido con peso en el extremo.
- Trayectoria del robot estirado con peso en el extremo.

La introducción de una variable de fuerza en el extremo del robot permitirá a verificar que es independiente de la carga, es decir, que independiente de la fuerza

aplicada el control consigue mantener el extremo el robot en la posición requerida. Los distintos estados quieren mostrar que, a pesar de que el robot cuando está más estirado tiene más inercia y soporta un momento mayor en la articulación que cuando se encuentra encogido, también en este caso el error en régimen permanente y el tiempo de respuesta han de ser parecidos en los dos recorridos.

Por lo tanto, si el controlador fuese suficientemente bueno, que es la hipótesis que se está manejando, el error en las trayectorias, en cada uno de los casos debería ser el mismo o variar muy poco. El peso que se va a utilizar es un bloque de hierro de 15 kg, lo que representa un 37,5% del peso máximo que puede levantar el brazo hidráulico, valor suficiente para influir en la dinámica del sistema.

Recogida de datos.

Los datos recogidos en LabView contienen la información de los potenciómetros de cada articulación. Además se calcula mediante ROS y el simulador de los brazos hidráulicos las trayectorias del efector final, a partir de los datos obtenidos de cada articulación.

Ilustración 34 - Simulador de los brazos hidráulicos en la herramienta Gazebo de ROS

Finalmente podremos representar las curvas de las lemniscatas: la teórica, la medida a través de los sensores internos del robot, y la observada a través de los sensores de Optitrack.

La representación final se compone de dos gráficas. En las dos se representan las coordenadas en el espacio, en unidades de metros. En la primera se encuentra las coordenadas X y Z, y en la otra están las Y y Z. de esta manera, podemos ver si el

seguimiento de la trayectoria por parte del robot es suficientemente fiel, en todas las perspectivas posibles. Los límites de las gráficas, las escalas, las leyendas o los títulos de las gráficas también son representados por el programa, y pueden ser modificadas dentro del mismo.

Dentro de éstas, se pueden medir las diferencias entre una trayectoria y la otra. Lo máximo que se separa el robot real de lo que debería estar haciendo. Ahí es donde se pueden medir los errores total del brazo en su extremo, que es lo interesante para ver la fiabilidad real, porque el error de las articulaciones sirve para ajustar el regulador pero no me da una visión real de cómo de grande puede ser el error a la hora de manipular el robot en una tarea. Por lo tanto, aquí se mira cuanto se ha separado de lo que supuestamente tendría que hacer.

Resultados para los cuatro casos.

Para los resultados de la lemniscata, como ya se ha apreciado antes se quiere preparar cuatro pruebas en las que se cubra un poco todos los posibles casos. Para verificar la validez de los resultados se han repetido cada pruebas tres veces, aunque en los resultados observamos que los datos no varían significativamente en las repeticiones.

Para esto se tiene que diseñar la trayectoria lemniscata para dos casos, encogido y estirado, porque para el caso de con o sin peso la trayectoria es la misma. Hay que tener cuidado, por tanto, en los dos casos, porque el espacio de trabajo del robot no es infinito, por lo que, si desarrollamos el recorrido del robot con el brazo demasiado alargado o, demasiado retraído, podría no alcanzar algunos puntos de la trayectoria. Estos límites del robot se han considerado a la hora de planificar la trayectoria para que todos los puntos sean alcanzables.

Si comparamos los resultados teóricos con los de los valores internos de los sensores el resultado es un error muy pequeño. También se observa que el error medido con el sistema Optitrack está muy próximo al medido por los sensores internos del robot. Con lo que se deduce que la calibración de los sensores internos del robot es la correcta, al ser validada por las cámaras de seguimiento.

Ilustración 35 - Curvas teórica y medida por el Optitrack para la lemniscata

Además se observa que el error sí que depende de la configuración del robot, si está encogido o estirado. Por consiguiente, se verifica que está influido por un error acumulado en las diferentes articulaciones, ya que el error aumenta a mayor distancia respecto de la base.

Respecto a la comparación entre la realización de las pruebas con y sin peso, apenas hay diferencia, con lo que podemos considerar que el regulador está cumpliendo con su cometido ya que estamos introduciendo fuerzas aproximadamente del 40% del valor de carga máximo del robot.

Podemos considerar que los controles son buenos ya que se trata de un control en posición sin acción integral, con lo que no se corrige el error en estado estacionario. Y la dinámica calculada con la parte derivativa es correcta pues no produce vibraciones ni saltos al seguir la trayectoria.

En la segunda trayectoria planteada, el astroide, cuyas esquinas nos ayudarán a ver mejor el régimen permanente al tener que pararse en cada una de ellas, y a observar la dinámica del sistema en estos cambios bruscos de velocidad.

Se define una trayectoria astroide como un tipo de hipocicloide que tiene cuatro vértices. Se forma al seguir a un punto de una circunferencia generatriz de radio $\frac{1}{4}$ que rueda en el interior de otra circunferencia de radio uno. Su ecuación es:

$$x^{2/3} + y^{2/3} = 1$$

Y las paramétricas:

$$x=R\cdot\cos^3\alpha$$

$$y=R\cdot\sin^3\alpha$$

Ilustración 36 - Trayectoria del astroide

Al ser las trayectorias acabadas en pico, nos es más fácil comprobar cómo funciona el régimen permanente porque el robot tiene que cambiar la dirección de la trayectoria sin que sea de manera continua como lo hacía en las anteriores, si no que lo realiza bruscamente lo que implica que tiene que realizar un cambio de sentido.

Los resultados obtenidos en los experimentos para la trayectoria astroide son los siguientes:

Ilustración 37 - Trayectorias teórica y capturada por el Optitrack para la curva del astroide

Los resultados son igual de buenos que con la lemniscata. En la perspectiva lateral se aprecia el mismo error de régimen permanente, con idéntico aumento del error en referencia a la configuración estirada o encogida del brazo robótico.

Respecto a la dinámica del sistema en las esquinas del astroide podemos considerarla correcta pues no se produce ninguna sobreoscilación y la respuesta del sistema es lo suficientemente rápida, con lo que la acción derivativa del regulador está correctamente calculada.

Otras trayectorias.

Para aportar más información a la resolución de este trabajo, se han ejecutado también trayectorias rectilíneas horizontales, verticales y diagonales, para comprobar la fidelidad en el trazado de una línea recta en el que influyen todas las articulaciones en distintos rangos de valores. Aunque como se podría adivinar por los resultados obtenidos con las curvas anteriores, se observa un pequeño error de posicionamiento debido al error en estado estacionario, pero se cumple la rectitud de la trayectoria dibujada con el extremo del robot.

Los resultados de la Plataforma Abierta de Teleoperación son satisfactorios, y han dado un gran valor añadido al laboratorio. Se cuenta con un sistema que permite disponer de un puesto de teleoperación que integra distintas tecnologías y al que se le pueden ir añadiendo nuevos algoritmos, funcionalidades y probar nuevas tecnologías.

Se han realizado una serie de experimentos con la Plataforma Abierta de Teleoperación con distintos tipos de usuarios proponiéndoles distintos tipos de retos de destreza en teleoperación.

La primera prueba consistía en introducir un disco en una varilla utilizando el maestro y el esclavo Grips de Kraft Telerobotics con un control en fuerza-posición. Fue sorprendente observar la destreza de los usuarios, pues muchos de ellos no contaban con ningún tipo de experiencia en robótica en general. Alcanzando tiempos de consecución de la tarea, muy próximos a usuarios ya experimentados. Lo cual se traduce en que el sistema es bastante intuitivo y fácil de utilizar, necesitando muy poco tiempo de aprendizaje.

Además también se encargó que realizasen la misma tarea con un esclavo Grips, utilizando un dispositivo Phantom como maestro con el controlador Rate-Position. Aquí la mayoría necesitó más tiempo para la consecución de la tarea, y los usuarios menos experimentados sí que se observó la necesidad de un entrenamiento previo para familiarizarse con la forma de trabajar del Rate-Position.

En una comparativa todos los usuarios preferían utilizar el maestro de Grips, pues les parecía más intuitivo y fácil de utilizar. Esta tendencia se vio reforzada con la tercera prueba que se detalla a continuación.

En la tercera prueba se diseñó para teleoperación bimanual, de tal forma que el brazo izquierdo utiliza el maestro Grips con esclavo con pinza, y en el brazo derecho el Phantom con la mano 3 dedos. La tarea estaba enfocada a utilizar la mano izquierda como apoyo para fijar el soporte y con la mano derecha realizar la manipulación fina para la introducción del objeto, ya que la mayoría de usuarios son diestros.

Sin embargo, todos los usuarios prefirieron utilizar el Phantom con la pinza para el bloqueo del soporte, y realizar el acercamiento fino con el brazo izquierdo. Esto se debe a que el maestro de Grips les resultaba más intuitivo y fácil de manejar.

Una vez definida la Plataforma Abierta de Teleoperación (PAT) que será la herramienta a utilizar en las pruebas y experimentos de esta tesis pasamos a los siguientes capítulos en los que se detallan las distintas contribuciones al conocimiento.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE PROTOCOLO DE TELEOPERACIÓN

En este capítulo se presenta una contribución al protocolo de comunicaciones para Teleoperación con la finalidad definir un protocolo destinado a la interconexión de distintos dispositivos maestros y esclavos en un sistema teleoperado

El objetivo de este estándar de telerrobótica es normalizar el sistema de comunicaciones sin importar el origen de los dispositivos, permitiendo simplificar todos los procedimientos de integración y configuración.

Se definen una serie de estados que coinciden con distintos protocolos, y también los tipos y niveles de comunicación existentes en cada uno de los modos según la configuración de control deseada.

4.1 Estándares en Telerrobótica

El Comité Técnico 85 de ISO ha desarrollado hasta la fecha 5 estándares relativos a sistemas de teleoperación para entornos con radiación, dichos estándares son:

- 17874- Part 1: General requirements
- 17874- Part 2: Mechanical Master-Slave Manipulators (MMSM)
- 17874- Part 3: Electrical Master-Slave Manipulators (EMSM)
- 17874- Part 4: Power Manipulators
- 17874- Part 5: Remote handling tongs

En la actualidad el Grupo de Trabajo 2 de dicho comité está trabajando en la elaboración de una nueva norma denominada “Telerobotics Systems for Nuclear Applications”. En dicha norma se definirán los estándares relativos a la interconexión de dispositivos maestro y esclavo, y las funcionalidades más relevantes que deben cumplir.

En este capítulo se presenta una propuesta con la finalidad de contribuir a las pruebas de validación de algunos aspectos del estándar. El interés de este trabajo viene avalado por AENOR.

4.2 Protocolo de Teleoperación.

Es interesante para abordar la tarea de definir un protocolo destinado a la interconexión de distintos dispositivos maestros y esclavos en un sistema teleoperado que se analice primeramente los protocolos de comunicación más utilizados en redes locales.

4.2.1 Protocolos de comunicación: TCP y UDP

Si analizamos los protocolos del modelo OSI, dentro de la capa de transporte hay dos protocolos disponibles: TCP y UDP. Por otro lado, y en el aspecto de interconectividad, el protocolo BTP propuesto por Wirz [Wirz 2009] no resolvía el problema, con lo que hubo que analizar más protocolos y crear uno nuevo.

El primero de ellos, el Protocolo de Control de Transmisión (o *Transmission Control Protocol*, TCP) es el protocolo que proporciona un transporte fiable de flujo de bits entre aplicaciones [Postel 1981], y fue diseñado para poder enviar grandes cantidades de información de forma fiable (retransmisiones, pérdida de paquetes, orden en el que llegan los paquetes, duplicados de paquetes...). Sin embargo, esta complejidad en la gestión de la fiabilidad repercute en la eficiencia, ya que hay que añadir mucha información a los paquetes que se envían a fin de verificar la información recibida. Como cada paquete de red tiene un tamaño limitado, cuanto más información añade el protocolo para su gestión, menos información útil puede contener el paquete.

El Protocolo de Datagrama de Usuario o UDP (*User Datagram Protocol*) es un protocolo que se basa en el intercambio de datagramas [Postel 1980], permitiendo el envío de paquetes a través de la red sin que se tenga que establecer una conexión con anterioridad, esto es posible porque el propio paquete de datos o datagrama incorpora toda la información necesaria para el direccionamiento en su cabecera.

El UDP es un protocolo de transporte no fiable porque no requiere de confirmación de entrega o recepción, ni de control de flujo, con lo que no se sabe si ha llegado correctamente.

El UDP se utiliza sobre todo en tareas de control y en la transmisión de audio y vídeo en tiempo real a través de una red, ya que debido a los requisitos de tiempo real y los retardos que ello supondría, no es posible realizar retransmisiones.

A modo resumen hay que se suele utilizar el UDP cuando prima la velocidad frente a la fiabilidad de recepción, sin embargo el TCP asegura la recepción en destino de la información para transmitir, por otro lado el segmento TCP tiene una sobrecarga de 20 bytes en cada segmento, mientras que UDP solo añade 8 bytes con lo que se tardará menos en enviar la misma cantidad de información.

En el caso que nos ocupa que es la aplicación al control bilateral, la velocidad del lazo de control y la transmisión de información sin retardo son dos requisitos críticos para el buen funcionamiento del sistema en términos de estabilidad y transparencia. Además el envío de confirmación y retransmisión de paquetes perdidos no son útiles en este caso, pues lo que realmente interesa es conocer el último estado en tiempo real para que ambos sistemas se sincronicen. Por ello, el

protocolo más adecuado para la transmisión de información en sistemas teleoperados con control bilateral es el UDP.

Con la aparición de nuevas tecnologías se están mejorando cada vez más los sistemas telerrobóticos, con lo que se permite aumentar la distancia física entre maestro y el esclavo, incluso teleoperando por Internet [Marin 2003]. Para ello se necesitan definir sistemas de interconexión y metodologías de comunicación para que el sistema telerrobótica quede completamente especificado.

Por lo general, los fabricantes proporcionan el sistema completo para telerrobótica (el dispositivo maestro, el esclavo y el sistema de comunicación). Sin embargo, este hecho provoca que existan numerosas soluciones a un mismo problema pero que no son compatibles entre sí. Normalmente estas soluciones son cerradas y no permiten modificaciones a no ser que el fabricante ofrezca esa solución, esto perjudica la adaptabilidad de los sistemas telerrobóticos a los problemas concretos en la teleoperación.

Ilustración 38 - Situación de las Comunicaciones en un sistema robótico teleoperado.

El estándar de telerrobótica aquí presentado tiene como objetivo normalizar el sistema de comunicación en telerrobótica. Principalmente para comunicar distintos sistemas maestro y esclavo sin importar el origen de cada uno de ellos. Haciendo que la configuración de los sistemas telerrobóticos esté más próxima al concepto de *plug & play*, y permitiendo a su vez la simplificación de todos los procedimientos de integración y configuración.

Los requisitos técnicos que se incluyen se basan en:

- Soporte basado en la comunicación con conexiones IP.
- Fiabilidad con grandes distancias entre maestro y esclavo.

- Controladores de esclavo eficientes capaces de leer comandos de alto nivel para la teleoperación.
- Controladores de maestro eficientes capaces de escribir comandos de alto nivel para la teleoperación.
- Una base de datos con información sobre la conexión de distintos dispositivos robóticos.
- Una base de datos con información sobre los sensores y su integración.

4.2.2 Procedimiento estándar

Concepto

Para estandarizar el sistema de comunicaciones en telerrobótica, hay que describir y definir todos los distintos tipos y niveles de comunicación existentes, ya que durante una tarea de teleoperación el progreso del sistema pasa por diferentes estados que producen diferentes modos de control, tal y como se describe más adelante.

Por ello, se divide la tarea en varios estados para facilitar la segmentación, clasificación y definición de señales en la comunicación.

Estados

La siguiente máquina de estados resume el protocolo de Telerrobótica planteado

Ilustración 39 - Máquina de estados del protocolo de comunicaciones para tareas de telerrobótica

Inicialización. Este primer estado se refiere a encender el equipo. Maestro y esclavo se iniciarán y se mantienen en este estado a la espera de una nueva señal de que notifique un nuevo estado. En este primer estado no es necesaria la comunicación.

Configuración. En este estado se establece la configuración entre el maestro y el esclavo. El maestro envía una señal al esclavo para iniciar la conexión y enviarle información sobre su configuración y especificaciones, a lo que el dispositivo esclavo responderá con su código identificador de robot perteneciente a la base de datos.

El dispositivo maestro comprobará esta identificación en la base de datos recogida en el estándar para recopilar toda la información del dispositivo (modelo de robot, grados de libertad, cinemática, modos de funcionamiento ...), y acto seguido se seleccionará el modo de funcionamiento para el control y se le notificará al esclavo. Quedando preparados para el intercambio de datos correspondiente a la fase de control.

Intercambio de datos. Una vez ambos dispositivos están configurados para trabajar entre ellos, el sistema iniciará el intercambio de datos. En este estado y de acuerdo con el modo de funcionamiento, el maestro enviará mensajes para dirigir al esclavo recibiendo a su vez mensajes del esclavo que le informan de su estado (posición, velocidad, fuerza ...). En este aspecto, la velocidad de transmisión de datos es muy importante para cerrar el lazo de control y la garantizar una teleoperación óptima. Por ello, y lo ya especificado en esta tesis sobre protocolos de comunicación maestro-esclavo, se selecciona el protocolo UDP como el idóneo para ser utilizado en el bucle de control de teleoperación, ya que da prioridad a la velocidad frente a la pérdida de paquetes, lo cual favorece el control y la estabilidad del sistema cuando hay un control man-in-the-loop.

Parada. Durante el estado de intercambio de datos, el operador podría parar el robot enviando una señal de interrupción. Ante este evento, el envío de mensajes será cancelado y el robot se detendrá hasta que reciba una nueva señal de interrupción para reanudar la tarea. En este estado el maestro y el esclavo se desincronizan, y el robot esclavo se detiene en función de los procedimientos definidos como los más seguros y apropiados dependiendo de la tarea a la que está

destinado; el operador podrá enviar, cuando lo estime oportuno y según el protocolo de actuación de la tarea, una señal de interrupción para reanudar el intercambio de datos entre el maestro y esclavo, o incluso enviar una señal de desconexión para detener la tarea de teleoperación si se estimase necesario.

Desconexión. Si el operador decide terminar la tarea teleoperación, se enviará una señal de desconexión de intercambio de datos o estado detenido. En este estado, el maestro y el esclavo inician sus protocolos de apagado incluyendo el guiado del esclavo a una posición segura de reposo. Finalmente todos los parámetros de comunicación, modo de funcionamiento, información de dispositivos, etc. se ponen en valor nulo, y se considera como finalizada la tarea de teleoperación.

Apagado. En este último paso se desconectan los sistemas de alimentación de los dispositivos maestro y esclavo, con lo que no es necesario ningún tipo de comunicación.

4.2.3 Modos de operación:

Los Modos de operación representan las diferentes maneras de teleoperar un robot. Tras haber completado el estado de configuración, el sistema de comunicaciones sabe las configuraciones del maestro y del esclavo, por lo que puede establecer los canales de comunicación necesarios para que el intercambio de información entre ambos dispositivos sea lo suficientemente rápido para asegurar la eficiencia en la consecución de la tarea.

Dependiendo de las necesidades y del modo de control seleccionado, los datos que se intercambian entre maestro y esclavo podrían ser divididos en canales para una transmisión según la tipología del mensaje y/o dispositivo.

Morfología de los mensajes:

Cabecera de Comunicación (Header): Aparecerá en todos los mensajes entre maestro y esclavo, conteniendo información acerca de identificador del dispositivo maestro/esclavo, el ID del mensaje y el tiempo de sincronización en el que ha sido enviado.

- **master_id/slave_id** -> **unsigned 32 int.** Identificador del maestro/esclavo
- **seq_id** -> **unsigned 32 int.** Identificador del mensaje en la secuencia

- **time_sec** -> **unsigned 32 int**. Valor de tiempo en segundos del envío.
- **time_nsec** -> **unsigned 32 int**. Valor de tiempo en nanosegundos del envío.

Posición requerida de articulación/Posición real de la articulación: Proporciona información acerca de la configuración deseada en términos de posición en las articulaciones del robot esclavo y que es requerida por el maestro; además de la posición real que proviene de la lectura directa de los valores de los sensores en el robot esclavo en ese mismo instante temporal. La información se envía a través de arrays con una longitud predefinida en el estado de configuración.

- **joint_names** -> array fijo de cadena ASCII con los nombres de todas las articulaciones ordenados desde la base hasta el terminar efector.
- **position** -> array fijo de 64 bits IEEE float que contiene la posición de cada articulación ordenadas de la misma manera que **joint_names**.

Posición cartesiana requerida/ Posición cartesiana real: Proporciona información sobre la posición y orientación requeridas del efector final, así como las reales obtenidas de las lecturas del esclavo en el mismo instante de tiempo.

- **pos_x** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada X de la posición del efector final.
- **pos_y** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Y de la posición del efector final
- **pos_z** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Z de la posición del efector final
- **rot_x** -> **64-bit IEEE float**. Primera componente del cuaternio de rotación del efector final.
- **rot_y** -> **64-bit IEEE float**. Segunda componente del cuaternio de rotación del efector final.
- **rot_z** -> **64-bit IEEE float**. Tercera componente del cuaternio de rotación del efector final.
- **rot_w** -> **64-bit IEEE float**. Cuarta componente del cuaternio de rotación del efector final.

Velocidad requerida de las articulaciones: Contiene la información de la velocidad deseada en cada uno de los puntos correspondientes a las articulaciones del esclavo. Esta información se envía a través de arrays de longitud fija predefinida en el estado de configuración, cuando se establece la comunicación entre ambos dispositivos.

- **joint_names** -> **array fijo de string ASCII**. Todas las articulaciones se nombran desde la base hasta el efector final.
- **velocity** -> **array fijo de 64-bit IEEE float**. Ordenado del mismo modo que el array joint_names.

Velocidad Cartesiana requerida: Contiene la información de la velocidad cartesiana deseada de la posición y la velocidad del vector correspondiente al efector final del esclavo, teniendo en cuenta que la información de la orientación se considera del mismo modo que en el caso de las posiciones.

- **vel_x** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada X de la velocidad del efector final
- **vel_y** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Y de la velocidad del efector final
- **vel_z** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Z de la velocidad del efector final
- **rot_x** -> **64-bit IEEE float**. Primera componente del cuaternio de rotación en velocidad del efector final
- **rot_y** -> **64-bit IEEE float**. Segunda componente del cuaternio de rotación en velocidad del efector final
- **rot_z** -> **64-bit IEEE float**. Tercera componente del cuaternio de rotación en velocidad del efector final
- **rot_w** -> **64-bit IEEE float**. Cuarta componente del cuaternio de rotación en velocidad del efector final

Par Real en las Articulaciones: Contiene información de la configuración de Par medido por los sensores del robot esclavo en cada una de sus articulaciones. Esta información se almacena y envía a través de arrays de longitud fija predefinida en el estado de configuración.

- **joint_names** -> **array fijo de string ASCII**. Nombre de todas las articulaciones, ordenadas desde la base al efector final
- **torque** -> **array fijo de 64-bit IEEE float**. Todos los valores de los pares ordenados de la misma manera que en el array joint_names.

Fuerza Cartesiana Real: Contiene la información relativa al vector cartesiano de fuerzas en el efector final.

- **force_x** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada X de la fuerza en el efector final

- **force_y** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Y de la fuerza en el efector final
- **force_z** -> **64-bit IEEE float**. Coordenada Z de la fuerza en el efector final

Par Cartesiano real: Contiene la información relativa al par cartesiano medido en el efector final del esclavo.

- **torque_x** -> **64-bit IEEE float**. Par en el efector final respecto al eje X
- **torque_y** -> **64-bit IEEE float**. Par en el efector final respecto al eje Y
- **torque_z** -> **64-bit IEEE float**. Par en el efector final respecto al eje Z

Otra información de Sensores: Transmite la información relativa a otros sensores colocados en el robot esclavo.

- **sensor_names** -> **array fijo de string ASCII**. Contiene el nombre de todos los sensores ordenados desde la base hasta el efector final.
- **sensor_value** -> **array fijo de 64-bit IEEE float**. Contiene los valores de los sensores en el mismo orden que en el array **sensor_names**.

Mensajes intercambiados según los modos de operación.

Tabla 6 - Definición de los mensajes intercambiados entre los dispositivos maestro y esclavo según el tipo de control escogido.

	MAESTRO	ESCLAVO
Control Posición-Posición	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Posición requerida de articulación	Posición real de las articulaciones
Control Posición- Posición Cartesiano	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Posición Requerida Cartesiana	Real Cartesian Position
Control Velocidad-Posición	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Velocidad Requerida en Articulaciones	Posición Real de las Articulaciones
Control Velocidad-Posición Cartesiano	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Velocidad Cartesiana Requerida	Posición Cartesiana Real
Control Fuerza-Posición	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Posición requerida en articulaciones	Par Real de las Articulaciones
Control Fuerza-Posición Cartesiano	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Posición requerida en articulaciones	Fuerza Cartesiana Real
Control Fuerza-Posición	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo

Cartesiano Completo	Posición requerida en articulaciones	Fuerza Cartesiana Real
		Par Cartesiano Real
Modo de operación personalizado (*)	Cabecera del Maestro	Cabecera del Esclavo
	Nombre_valor_medido_i	Nombre_valor_medido_j

(*) El modo de operación personalizado puede ser configurado por cada fabricante o incluso durante la fase de montaje e integración del sistema. De esta manera se puede añadir sensores al sistema a partir de las modalidades de control anteriores, o para implementar nuevos algoritmos de control.

4.2.4 Conexiones IP

El protocolo recomendado para telerrobótica debe estar basado en IP (Protocolo de Internet), ya que se requiere un protocolo de comunicación estable, extensa y accesible que permiten conectar dispositivos robóticos fácilmente. Como el protocolo IP está orientado a la comunicación de datos digitales, con una comunicación bidireccional en origen o para transmitir datos mediante un protocolo no orientado a la conexión transfiriendo paquetes conmutados a través de distintas redes físicas previamente enlazadas según la norma OSI de enlace de datos.

A continuación se tratan los distintos tipos de datagramas para implementar comunicaciones maestro-esclavo basadas en el protocolo IP.

Comunicación TCP

La comunicación en el Protocolo de Control de Transmisión (Transmission Control Protocol - TCP) proporciona fiabilidad, comprobación de errores y un esquema organizado de intercambio de datagramas a través de una red IP.

Será requisito indispensable en la etapa relativa al estado de configuración para garantizar que se reciben los mensajes de información acerca de los maestros y esclavos, y la configuración del modo de operación, así como para asegurar la recepción de las señales para el cambio de un estado a otro. Por ello es necesario un protocolo que asegure que dichos mensajes son enviados y recibidos correctamente.

Para ello, el robot esclavo y el dispositivo maestro han de estar identificados cada uno con una IP y un puerto fijos durante el estado de inicialización. A partir de este

punto, el robot esclavo funciona como un servidor en espera de una conexión desde la aplicación cliente que es el dispositivo maestro, y ya durante el estado de configuración, el maestro comienza una comunicación con el esclavo, intercambiando la información de configuración y del modo de control para su funcionamiento.

Este canal TCP también se utiliza durante el transcurso de la tarea de teleoperación para el envío de señales para cambiar entre los diferentes estados, de esta forma se asegura la recepción del mensaje en la sincronización del comienzo y paro en la tarea. Al final, en el estado de desconexión, el maestro rompe la comunicación con el esclavo una vez lo deja en una posición de reposo segura y acto seguido se desconecta.

Comunicación UDP

El protocolo Protocolo de Datagrama de Usuario, (User Datagram Protocol - UDP) se utiliza para aplicaciones que no requieren un servicio de flujo de datos fiable, es decir que no es necesario asegurar la entrega de cada paquete porque lo realmente necesario es transmitir los datos con la velocidad necesaria para asegurar la estabilidad del sistema. UDP proporciona un servicio de transmisión de datos a través de datagramas (paquete de datos mínimo) que se centra en la latencia reducida para mantener una velocidad transmisión de datos. Esto se convierte en un requisito indispensable durante las tareas de teleoperación porque una velocidad de recepción demasiado lenta puede producir sistemas inestables y los consecuentes problemas en teleoperación.

Al final del estado de configuración, el sistema del robot esclavo se une a un nuevo puerto para crear una nueva conexión mediante intercambio de datagramas UDP. Aunque esta información se envía utilizando el canal TCP para asegurar su entrega, en cuando el operador decide empezar a teleoperar el robot, se envía una señal a través del canal TCP para notificar el inicio de la comunicación UDP. Es entonces cuando dispositivos maestro y esclavo utilizan el canal UDP para los mensajes del lazo de control de acuerdo con el modo de funcionamiento seleccionado previamente.

Si la señal de parada se envía por el canal TCP, la comunicación UDP se detendrá aunque no se cierran los puertos, que se quedan a la espera por si se reiniciase si así lo decide el operador. Finalmente, si el operador decide terminar la tarea teleoperación, se enviará una señal de desconexión, con lo que se cierran los puertos y el canal UDP.

Ilustración 40 - Diagrama de la secuencia en la Comunicación en Telerrobótica

4.2.5 Base de Datos de Robots: RobDB

Una base de datos que se mantenga actualizada es necesario para evitar la saturación del canal de comunicación con información excesiva sobre los robots maestro y esclavo. De esta manera solamente es necesario enviar el número de identificación que representa a cada dispositivo. El maestro puede obtener toda la información necesaria de los controladores del esclavo en la base de datos: esta información es muy importante en los modos de funcionamiento que trabajan directamente a un nivel de articulación.

4.2.6 Criptografía y seguridad.

El hecho de utilizar conexiones IP en las comunicaciones, hace que dichas comunicaciones sean susceptibles de estar expuestas a ataques de red, como por ejemplo ataques de hacker que puedan hacerse con el control de sistema. Por ello, todos los mensajes y señales que pasan por el sistema de comunicación han de ser encriptados además de utilizar precauciones y protocolos de seguridad que permitan asegurar la comunicación bilateral entre maestro y esclavo evitando cualquier tipo de intrusión.

4.2.7 Protocolo de realimentación visual.

Para el sistema de realimentación visual del operador se tiene que dedicar un sistema independiente del sistema de control de los robots para evitar interferencias y dar estabilidad y seguridad al conjunto.

El Protocolo de Streaming en Tiempo Real (del inglés Real Time Streaming Protocol) establece y controla uno o muchos flujos sincronizados de datos, ya sean de audio o de video. RTSP es un protocolo no orientado a conexión, en lugar de esto el servidor mantiene una sesión asociada a un identificador, por ello RTSP usa TCP para transmitir datos de control y usa el UDP para los datos de audio y vídeo que envía en streaming de tiempo real, ya que lo principal es asegurar que llegue el dato más lo más actual posible lo antes posible.

Ilustración 41 - Protocolo RTSP para el envío de datos de vídeo en tiempo real

El protocolo RTSP tiene las siguientes propiedades que lo hacen idóneo para la transmisión de video en teleoperación:

- **Capacidad multiservidor.** Cada flujo multimedia dentro de una presentación puede residir en servidores diferentes, el cliente automáticamente establece varias sesiones concurrentes de control con los diferentes servidores, la sincronización la lleva a término la capa de transporte. Esto puede ser muy útil si necesitamos acceso a varios puntos de vista correspondientes a distintas cámaras en el entorno teleoperado.
- **Independiente del protocolo de transporte.** RTSP puede usar indistintamente protocolos de datagrama no fiables como el UDP, o de datagramas fiables como el RUDP.
- **Seguro.** RTSP reutiliza mecanismos de seguridad web ya sea a los protocolos de transporte (TLS) o dentro del mismo protocolo, como la autenticación por ejemplo.
- **Control de dispositivos de grabación.** El protocolo permite controlar el hardware de los dispositivos de grabación y reproducción remotamente.
- **Extensible.** nuevos métodos y parámetros pueden ser fácilmente añadidos al RTSP
- **Peticiones RTSP.** Las peticiones RTSP están basadas en peticiones HTTP y generalmente son enviadas del cliente al servidor. A continuación se describen las más útiles para la parte de visión de un sistema teleoperado.
 - **DESCRIBE:** Es la solicitud/respuesta constituye la fase de inicialización del RTSP. Con esta petición se obtiene una descripción del objeto multimedia apuntado por una URL RTSP que está situada

en un servidor concreto, que responderá con la descripción del recurso solicitado que una lista de los flujos multimedia que serán necesarios para la reproducción.

- SETUP: Realiza la configuración del transporte del flujo de datos: incluye un puerto para recibir los datos de video RTP por UDP, y otro para los meta-datos RTCP. La respuesta del servidor confirma dichos parámetros y completa los puertos del propio servidor.
- PLAY: Con esta petición se empieza a enviar datos de los flujos especificados desde el servidor a través de los puertos configurados con SETUP.
- TEARDOWN: Detiene el streaming de datos y libera todos los recursos asociados.

A continuación se describe cómo sería una sesión RTSP en Teleoperación: para inicial el envío de datos mediante RTSP el cliente tendrá que iniciar una sesión accediendo a la URL RTSP para colocar el nombre del servidor y el puerto en formato IP. De esta forma se establece una conexión TCP hacia el servidor.

El cliente mediante una petición DESCRIBE recibe una descripción de las cámaras de la URL, que a su vez contiene todos los valores de inicialización necesarios.

El cliente selecciona el flujo de datos a reproducir mediante SETUP donde se especifican los protocolos aceptados para el transporte de los datos. Acto seguido inicializa los programas adecuados para reproducir las imágenes y lanza la petición de PLAY para que el servidor comience a enviarle datos.

El cliente tendrá que enviar la petición de TEARDOWN finalizar la conexión con el servidor, y que éste deje de enviar datos.

Ilustración 42 - Ejemplo de intercambio de peticiones en el protocolo de video RTSP.

4.3 Pruebas y Experimentos

Se realizarán dos pruebas para examinar la viabilidad del protocolo, una de conectividad entre dispositivos maestro y esclavo disimilares a través de un controlador de alto nivel, y después se harán pruebas del protocolo de red UDP para asegurar que la estabilidad del sistema no se compromete incluso en conexiones de red a través de WiFi que pueden verse afectadas por interferencias.

4.3.1 Pruebas de interconectividad

Para la interconectividad entre maestros y esclavos se ha probado la Plataforma Abierta de Teleoperación conectando cada uno de los dispositivos maestros a los esclavos, y realizando pruebas de control mediante el protocolo UDP.

Todas las conexiones entre dispositivos fueron satisfactorias y el control de la teleoperación era estable sin que hubiese ningún retardo significativo en el flujo de datos que hiciese inestable el sistema que trabajaba 1kHz.

Se probaron diferentes algoritmos de control, como posición-posición, fuerza-posición, y otros algoritmos de alto nivel como el Rate-Position que se detalla a continuación, para ello:

Para poder conectar dos dispositivos de espacio de trabajo tan disimilar y con una configuración articular tan diferente hay que proponer una arquitectura de control basada en la cinemática inversa que permita controlar la posición y orientación de los extremos de ambos robots. Esta arquitectura se presenta a continuación:

Ilustración 43 - Arquitectura de control para el Rate-Position Controller. Utilizando el Phantom Omni.

El Rate-Position Controller [Barrio, 2012] permite cambiar entre modos de control del esclavo en posición y velocidad, de tal forma que no se produce pérdida de

resolución en el área remota a pesar de tener espacios de trabajo tan distintos en tamaño.

Para su implementación se ha empleado programación en ROS del RatePosition Controller y se envían por UDP al PXI los comandos para controlar el esclavo.

Ilustración 44 - Esquema del paquete de ROS que controla el Phantom tiene el nodo del Rate-Position Controller

El bloque de Cinemática Phantom: extrae la información acerca de la posición, la orientación y la velocidad que el operador produce a través del dispositivo Phantom Omni. Esto crea comandos a controladores esclavos utilizando funciones proporcionadas por el modo de control de la frecuencia posiciones, por otra parte el uso de fuerzas virtuales y fuerzas medida esclavo para mostrar las fuerzas en el dispositivo Phantom.

El nodo "Modo de control del Rate-Position" ajusta la estrategia según las posiciones, dividiendo espacio de trabajo Phantom en dos áreas: la de control en posición y la de control en velocidad (cambiando de una a la otra sin utilizar ningún botón). Varias funciones se implementan para transformar la información en bruto proporcionada por Phantom en comandos para el controlador del esclavo.

Ilustración 45 - Paquete de ROS destinado a la simulación del manipulador esclavo

En el simulador, el Controlador de la Jacobiana Traspuesta se usa el error de posición actual del robot simulado y su velocidad. Esta información es requerida por la interfaz de comandos del Phantom. Cada dato de posición de las articulaciones del esclavo se calculan con la matriz jacobiana proporcionada por la cinemática del robot.

El bloque Actuador transforma los incrementos posición en incrementos de par motor. Y el Controlador de Simulación contiene los controladores para el robot esclavo en la simulación de Gazebo.

El simulador de Gazebo calcula la simulación del robot real utilizando el simulador de ROS por defecto (Gazebo). Este simulador está conectado por UDP con el PXI que hace que los robots reales realicen movimientos clónicos a los de la simulación. Esto se consigue mediante un nodo de Comunicación en ROS.

Ilustración 46 - Conexión de comunicaciones realizada a través del Nodo de Comunicación de ROS y el protocolo UDP que enlaza con el controlador PXI del esclavo real.

El nodo "Comunicación de red" se suscribe a los estados de información conjunta sobre el robot simulado. Esta información se serializa a través de las funciones de

Python para ser enviado por UDP a una dirección IP y el puerto en el que se unen al robot real.

Frecuencia de envío de datagramas UDP es casi 1Khz. Esta medida se ha realizado mediante el programa Wireshark en un sistema operativo Ubuntu, con todos los nodos necesarios arrancados en ROS con una CPU i7-4770, 16 GB de RAM y GeForce GTX 650 de NVIDIA Ti Tarjeta Gráfica.

Por otra parte, otro nodo de comunicaciones de red envía información sobre las fuerzas de esclavos medidos en el robot. Controladores de esclavos: Este nodo representa controladores del robot esclavo de Kraft Telerobotics, los controladores PXI con programas de LabView reciben la información de posición de las articulaciones encapsulada en datagramas UDP.

Finalmente, concluimos que todos los componentes descritos anteriormente conforman un sistema de teleoperación completo en simulación utilizando Phantom Omni como dispositivo maestro y el GRIPS como esclavo, a través de ROS y Gazebo se ha programado un controlador de alto nivel que permite que ambos dispositivos puedan trabajar juntos.

4.3.2 Experimentos de Protocolos

Como ya se comentó en el capítulo anterior, una parte destacable del sistema de teleoperación es el medio utilizado para el intercambio de datos entre maestro y esclavo. Para estas pruebas de protocolos de comunicación se han utilizado un medio inalámbrico y otro cableado, en concreto el intercambio de datos inalámbricos se realizará a través de una red local basada en el estándar IEEE 802.11 o lo que se conoce comúnmente como una red WiFi.

Para crear esta red se utilizan dos Wireless Router TRENnet TEW-812DRU. Uno de ellos estará del lado del maestro y otro del lado del esclavo.

Cada uno de los routers se conecta entonces a un CompactRIO con un cable Ethernet a través de uno de los puertos LAN. Por otro lado se conecta el PC de sobremesa donde tenemos LabView a otro puerto LAN del router del lado del

maestro, de manera que desde dicho PC se tenga acceso a la red WLAN creada y por consiguiente a los controladores.

Ilustración 47 - Esquema de red con dos routers conectados a los controladores maestro y esclavo respectivamente y a un PC con la interfaz del operador en LabView en el lado del maestro

Los routers han de configurarse para que se establezca una conexión puente entre ellos. Esto se consigue creando un WDS o Wireless Distribution System. WDS es una función que permite la interconexión inalámbrica entre routers o puntos de acceso.

Para una mejor organización, asignamos las direcciones IP de forma estática a todos los equipos de la red. La siguiente figura muestra un esquema de la red creada con las IP asignadas a cada dispositivo.

Arquitectura software

Para la implementación de los algoritmos de control se utilizó el software de LabView 2011 de National Instruments como entorno de programación.

LabView (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos.

LabView se diferencia de otros entornos de programación de aplicaciones en un importante aspecto: los lenguajes de programación como C++, Java, etc., se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabView

emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

Las ventajas que proporciona el empleo de LabView se resumen en las siguientes:

- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

Los programas desarrollados con LabView se llaman instrumentos virtuales o Vis. Para la implementación de los algoritmos en cada controlador CompactRIO tenemos una arquitectura con dos Vis, uno para programar la FPGA y otro para programar el controlador de tiempo real, además de un VI en el PC de desarrollo. La figura muestra los tres niveles de implementación que tenemos en el proyecto.

- LabView FPGA: es el nivel más bajo donde se implementan operaciones de entrada/salida con los módulos C-Series, sincronización, bucles de control de alta velocidad o procesamiento de señales. Se comunica con el controlador de tiempo real a través de un bus PCI.
- LabView Real-Time: nivel donde se programan aplicaciones de análisis y control de punto flotante deterministas así como la comunicación a través de un bus de campo con el PC conectado a la red.
- LabView Windows: para programación de interfaces de usuario, control supervisado y registro de histórico de datos.

Comportamiento en un sistema de 6 g.d.l.

El sistema sobre el que se realizará esta prueba es el Telemanipulador comercial que se emplea en la PAT descrita en el Capítulo anterior de esta tesis, utilizando el Maestro y Esclavo de GRIPS

La arquitectura del sistema que se llevó a cabo se presenta en la Figura. Es la misma arquitectura que se utilizó en el sistema de 1 g.d.l., solo cambian los dispositivos maestro y esclavo así como sus controladores.

Ilustración 48 - Arquitectura del sistema de control bilateral utilizando la PAT. Comunicación a través de la red WLAN

En la figura se muestra un momento de la realización de pruebas de control del brazo robótico. Se observa el dispositivo maestro al fondo, mientras el operador maneja el dispositivo esclavo observando en la pantalla de la derecha las imágenes de video realimentadas. Los resultados de la prueba se exponen en la siguiente figura, donde se representan las posiciones angulares de cada articulación para el dispositivo maestro y esclavo respectivamente.

Ilustración 49 - Fotografía realizando pruebas de control bilateral Fuerza-Posición con los brazos robóticos de 6 G.d.I., a través del Protocolo de Telerrobótica con realimentación de fuerzas y video.

Ilustración 50 - Posición de las 6 articulaciones de maestro y esclavo en el sistema de 6 g.d.l.. Control Fuerza-Posición a través de un medio inalámbrico con el Protocolo Telerrobótica.

El resultado de la prueba es satisfactorio, tanto en términos de estabilidad como de transparencia.

En la siguiente figura se muestra seguimiento de posición y fuerza para una articulación, en concreto para la SE.

Se observa que el seguimiento de la posición es muy bueno. Destacar que, en este caso, la fuerza representa una estimación de la fuerza ejercida por la articulación, no tiene porqué corresponderse con una colisión.

Ilustración 51 - Seguimiento de posición y fuerza ejercida en la articulación SE del sistema de 6 g.d.l.. Control Fuerza-Posición a través de un medio inalámbrico con el Protocolo de Telerrobótica

En la siguiente figura se presentan los datos obtenidos en la captura del tráfico de la red. Solo hay dos flujos de intercambio de datos, el de los controladores y el de la realimentación de vídeo. En este caso el sistema no se controla a través del panel de control de LabView, sino que está configurado para que, una vez arrancado funcione de manera automática. Es por ello que no tenemos el flujo de datos de comunicación del panel de control de LabView con los controladores

Ilustración 52 - Datos de la red con Protocolo de Teleoperación. Comportamiento del esquema Fuerza-Posición en un sistema de 6 g.d.l..

Los datos obtenidos en cuanto a número de paquetes transmitidos por segundo y tamaño de paquetes mantienen el lazo a 1kHz, y el ancho de banda en torno a 1 Mbit/s. Sin embargo, el tráfico entre controladores el que ocupa prácticamente todo el ancho de banda.

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 tanto, se trata de un tema de actualidad y de gran interés, especialmente en lo que a investigación y desarrollo se refiere.

La motivación de este trabajo es mejorar el alcance y la flexibilidad de la teleoperación utilizando como medio de comunicación una red inalámbrica. Por tal motivo se ha hecho un análisis del comportamiento de sistemas de control bilateral, con realimentación de fuerzas y vídeo, a través de una WLAN.

En primer lugar se ha creado una red inalámbrica con dos routers WiFi conectados por medio de un sistema WDS (Wireless Distribution System), que crea un puente de comunicación entre los dos puntos de acceso. Se ha establecido esta red WLAN como medio de comunicación de un sistema maestro – esclavo, en el que se han desarrollado algoritmos de control bilateral con realimentación de fuerzas, estudiando su estabilidad frente a retardos.

Por otro lado se ha implementado la realimentación de vídeo del esclavo al maestro a través del entorno de ROS, obteniendo distintos niveles de compresión de imágenes.

Por último, se estudia el comportamiento del sistema de control bilateral con realimentación de fuerzas y vídeo a través de la red inalámbrica, implementado en arquitecturas maestro – esclavo de seis grados de libertad. Además se realiza un análisis del tráfico de datos de la red WLAN.

Dado que en la teleoperación el operador humano es quien cierra el bucle de control a través de un dispositivo o manipulador maestro, si únicamente recibe información visual de la zona remota en la que se encuentra realizando una tarea el manipulador esclavo, su desempeño será pobre, deficiente y poco seguro. Es por ello que el control bilateral es un tema de gran importancia y actualidad que tiene la finalidad de lograr desarrollar sistemas teleoperados con los cuales se puedan realizar tareas de manera eficiente y segura, tanto para el manipulador esclavo como para el entorno en el cual trabaja.

Mediante el control bilateral tenemos asegurada la realimentación de fuerzas en el sistema de teleoperación. Este tipo de realimentación es muy importante a la hora

de obtener una buena transparencia o telepresencia en el sistema teleoperado. Sin embargo en la mayoría de los casos no es suficiente.

La realimentación de imágenes del maestro al esclavo es, en muchos casos, una información vital para el operador. Es por ello que, para analizar la viabilidad de la red inalámbrica como medio de comunicación es necesario incluir el flujo de vídeo, de manera que el sistema se asemeje lo más posible a un sistema de teleoperación real.

Para llevar a cabo esta parte se utiliza el entorno de ROS (Robot Operating System), ofreciendo de esta forma una solución ampliable y fácil de implementar en cualquier sistema.

Se obtienen tres tipos de compresión de imágenes que consumen distintos anchos de banda de manera que podemos elegir la opción más adecuada para cada aplicación. Para la realización de las pruebas se optó por utilizar la compresión theora que es la que menos ancho de banda y la calidad del video es más que suficiente para cualquier sistema de teleoperación que no requiera unas prestaciones de alta calidad de imágenes.

El Comportamiento del sistema de control bilateral en la red WLAN

Una vez disponibles todos los elementos del sistema de teleoperación el siguiente paso fue analizar el funcionamiento del sistema de control bilateral completo, con realimentación de fuerzas y vídeo, a través de la red inalámbrica.

En primer lugar se extraen datos de la red WLAN que influyen en las comunicaciones, como son el ancho de banda máximo – 54 Mbits/s –, tasa de pérdida de paquetes – menos del 2 % – y RTT o Round Trip Time – entre 2 y 4 milisegundos. De esta forma se comprueba que tiene las suficientes prestaciones para ser el medio de comunicación del sistema teleoperado.

A continuación se estudia el comportamiento del sistema de control bilateral, con control Fuerza – Posición, en distintas arquitecturas:

Plataforma maestro – esclavo de 1 g.d.l.: En este caso se compara el comportamiento frente a tres formas de comunicación entre los dispositivos:

- A través de un controlador: Cuando la comunicación se realiza a través del controlador el sistema tiene un buen comportamiento en términos de estabilidad y transparencia. La percepción por parte del operador es muy buena ya que en este caso el retardo en las comunicaciones es nulo al no tener que atravesar una red.

- A través de la red inalámbrica. Lo primero que se observa en la comunicación a través de la WLAN es que el funcionamiento del sistema no se ve afectado al añadir la realimentación de vídeo con la máxima compresión.

La principal conclusión que se extrae en este apartado es que el cuello de botella está en el controlador del maestro que, al ser de menores prestaciones que el del esclavo, los tiempos de ejecución de los bucles de control y comunicación son mayores y se traduce en un retardo en la recepción de la fuerza. Es por ello que se implementa la comunicación mediante variables compartidas de LabView que hacen uso del protocolo TCP. Con esto se simplifica el esquema del controlador y de esta forma se mejora el comportamiento.

Con respecto al tráfico de datos en la red, se obtienen resultados semejantes para la implementación mediante UDP y TCP aunque con el protocolo TCP el tráfico es más irregular, al producirse retransmisiones de paquetes perdidos.

Además se comprueba que el tráfico de datos que más recursos consume de ancho de banda es el de la comunicación entre el controlador y el panel de control de LabView, que se realiza por el protocolo TCP. En todo caso el ancho de banda se mantiene en torno a 1 Mbit/s.

- A través de un medio cableado: Realizando las mismas pruebas pero cableando ambos controladores al mismo router se obtienen resultados muy similares. Sigue existiendo el retraso en la recepción de la fuerza mediante UDP por parte del controlador del esclavo, por lo que el cuello de botella sigue estando en el controlador. Con esta comparación se confirma que la red inalámbrica es totalmente válida como medio de comunicación, ofreciendo los mismos resultados en cuanto a funcionamiento del sistema de control bilateral que un medio cableado.

- Saturación de la red: A pesar de que los buenos resultados obtenidos hasta ahora con la red inalámbrica, se comprueba que ante un aumento de la carga de tráfico de datos de unos 2.5 Mbits/s el comportamiento del sistema se ve afectado, lo cual

no ocurre cuando el medio es cableado. Sin embargo esta carga de tráfico sobre todo afecta al flujo de datos entre el panel de control de LabView y los controladores por lo que se solucionaría eliminando este tráfico con un arranque automático del sistema.

Sistema maestro – esclavo de 6 g.d.l.: Por último se realizan pruebas en un sistema de teleoperación maestro – esclavo de un brazo robótico de 6 grados de libertad. La principal diferencia con el sistema de un grado de libertad (aparte de la complejidad de los dispositivos maestro y esclavo) está en los controladores, de prestaciones mucho más altas en este caso.

4.4 Discusión de resultados

Los resultados de esta prueba son muy buenos, tanto en términos de estabilidad como de transparencia. Los datos del tráfico de la red muestran resultados favorables en distintas condiciones, tanto en red cableada como inalámbrica.

Se ha observado que el mayor tráfico de red se produce cuando el controlador programado en el PXI tiene que comunicarse con el Panel de Control de LabView, ya sea para actualizar los valores de las variables o para capturar los controles de la interfaz de usuario en Tiempo Real. Si se omite trabajar con dicha interfaz, no se comprometerá jamás el sistema, pues ese es el tráfico que más ancho de banda consume.

También se comprobó la interconectividad de dispositivos en la primera prueba, con lo que se podría decir que el Protocolo de Teleoperación permite establecer la comunicación entre dispositivos de distintos fabricantes y asegurar un flujo de datos ininterrumpido.

CAPÍTULO 5

SOLUCIÓN DE MULTIPLEXADO PARA FUSIÓN NUCLEAR

En este capítulo se aborda la problemática de las condiciones extremas a las que se somete el material que entra en la hot-cell de Fusión Nuclear. Se diseña un sistema de multiplexado de datos para la comunicación entre el robot esclavo o el dispositivo de manipulación remota y la Sala de Control.

Es importante tener en cuenta la cantidad de señales necesarias para poder controlar un dispositivo remoto, es por ello que para evitar el peso del cable umbilical que une el dispositivo a nuestra sala de control, se hace imperativo el uso de tecnologías de multiplexado de datos para poder reducir dicho peso y no perder de esta forma maniobrabilidad y efectividad en las tareas de manipulación remota.

El estudio se realizará para un robot manipulador genérico de 8 grados de libertad que irá montado en una plataforma base que le permita moverse por el interior del Tokamak.

5.1 Diseño de soluciones para Teleoperación en Fusión Nuclear

En la actualidad los requisitos que imponen las condiciones ambientales de la fusión nuclear aún no están presentes en ningún dispositivo de Manipulación Remota de una forma general, sino que cada solución se diseña de una forma particular: ya se presentaron en el capítulo del Estado del Arte algunas soluciones existentes para algunas de estas limitaciones con el fin de establecer una solución técnica compatible con las restricciones de fusión nuclear.

Se desprende del estudio del estado de la técnica que la restricción de campo magnético en un robot no se ha investigado hasta hace bien poco. Por otra parte, esta restricción no se ha combinado aún otra limitación tales como la temperatura, la radiación y vacío. No debían ser robots altamente diestros o bien, lo que implica que la mayoría de las tecnologías utilizadas para robots compatibles MRI será inoperante en nuestro caso.

La temperatura, ultravacío y efecto de la radiación sobre los robots en realidad se han abordado en diferentes diseños de robots con anterioridad, aunque nunca han puesto en conjunción en un mismo diseño, pero bastaría con tratarlo mediante una correcta selección de los materiales y componentes que los integran. Con los campos magnéticos las estrategias de diseño consisten en utilizar materiales que no pueden ser dañados por cualquier efecto del campo o son lo suficientemente fuertes para hacerle frente.

Por el momento, los actuadores son el principal obstáculo por el bloqueo del dispositivo de manipulación remota al someterse a un campo magnético de alta intensidad. Los motores comunes no funcionan en este entorno, y el uso de la hidráulica requeriría una gran cantidad de mejoras frente a la temperatura en particular. Aunque, alguna problemática de diseño mecánico ha sido resuelta en tanto en cuanto se ha conseguido desarrollar un robot de alta manipulabilidad de acceso limitado por aberturas muy estrechas, permitiendo mediante este diseño mecánico innovador el poder reducir el tamaño y el peso de los actuadores.

5.2 Solución de Multiplexado

Si dejamos de lado el robot esclavo como una solución *ad hoc* con unas determinadas características que vendrán impuestas por los requisitos tan restringentes del entorno en el interior de un reactor de fusión, dicho robot tendrá que ser una solución encargada a un determinado fabricante. Sin embargo es mucho más valioso el nexo de las comunicaciones entre el dispositivo remoto, que bien puede ser un robot esclavo o un determinado dispositivo de manipulación remota para alguna de las tareas en el interior del reactor.

Por ejemplo, el futuro ITER requerirá el reemplazo frecuente de componentes pesados de la vasija (in-vessel). Durante períodos de parada, los operadores del ITER tendrán que realizar operaciones de manipulación remota frecuentes dentro de la cámara de vacío del reactor, tales como inspección, reparación y sustitución periódica de los componentes. Estas operaciones se deben realizar en un entorno nuclear peligrosos que se espera que tenga una dosis gamma de un / tasa y las temperaturas h 10kGy hasta 200°C a apagar el reactor y 50°C después de varias horas. [Fernandez 2001]

Las operaciones en el interior del recipiente al vacío duran desde minutos hasta semanas. La resistencia a la radiación de la instrumentación expuestos a dosis gamma y radiación electromagnética con ello se requiere en este potencial entorno peligroso radiológica.

Este ambiente muy duro necesita el uso de equipo se maneja de forma remota para garantizar la seguridad de los trabajadores. Las interconexiones entre este equipo y la unidad de control, por lo tanto se convierten en un tema crucial en la fiabilidad de la conexión de toda la instrumentación.

Un gran volumen de cableado de todos los sensores y actuadores de los distintos dispositivos remotos la recogida de los datos de campo o para la teleoperación implica un gran problema. Trataremos de afrontar dicha tesitura de dos maneras: la multiplexación y las redes inalámbricas.

Comenzaremos con un estudio sobre una solución de multiplexado para reducir, en

lo posible, el volumen total de cable que circula al interior del reactor. Con el fin de llevar a cabo esta tarea con éxito, el sistema electrónico de multiplexación se requieren para implementar algunas funciones, como la adquisición de la señal producida por los sensores, digitalización de señales analógicas (por ejemplo-resolver-digital, analógico-digital), multiplexación y transmisión. Este estudio se aborda según:

- Viabilidad de COTS o personalizaciones de dichos COTS referentes a electrónica de multiplexación, que sean robustos, rentables y adecuados para las condiciones ambientales.
- Coste de desarrollo de una solución de multiplexación (diseño, test, cualificación de la electrónica), y también el costo de mantener una solución de multiplexación (coste frente a la esperanza de vida y facilidad de mantenimiento / reemplazo).
- Compensación entre el blindaje, la esperanza de vida, el costo, la facilidad de mantenimiento / reemplazo.

5.2.1 Requisitos del multiplexor:

- Espacio disponible: Como primera aproximación, es obligatorio saber donde tiene que encajar la electrónica de multiplexación, puesto que dependerá del espacio libre, sin poner en peligro el correcto funcionamiento de cualquier otro sistema de a bordo y teniendo en cuenta las dosis de radiación acumuladas esperadas. En función de las necesidades se podrán adoptar distintas opciones: sólo un multiplexor para todas las señales (o la mayoría de ellos), o incluso agrupar señales por tipo en varios multiplexores en diferentes lugares.

- Radiación: La radiación es el tema más comprometedor a considerar para seleccionar la solución de multiplexación. Estas partículas pueden afectar a la electrónica: a la modificación de los parámetros eléctricos, el deterioro de sus características, lo que conduce a error y fallo de los componentes de todo el sistema. Con lo que debe ser altamente testado y cualificado para la vida útil del multiplexor que ha de ser la misma que el resto del equipamiento. En temas de mantenimiento podríamos hablar como mínimo de unas 10.000h de operación, en el caso de no ser

posible se podrían estudiar opciones como el intercambio de electrónica después de cada tarea de mantenimiento.

Con estos datos y considerando zonas de mantenimiento dentro de la *hot-cell*, podríamos estar hablando de diferentes radiaciones por ejemplo de unas localizaciones teóricas ubicadas en zonas donde va aumentando gradualmente la dosis de radiación para tener distintos casos de estudio:

Tabla 7 - Casos de estudio del multiplexor: distintas dosis de radiación y su radiación acumulada según una variación lineal, para 2.000 horas equivalente a 1 inspección completa, y para 8.000 horas equivalente al acumulado de todas las inspecciones programadas en la vida de ITER.

Dosis máxima (Gy/h)	Radiación Acumulada (en 2000 horas)	Radiación Acumulada (en 8000 horas)
25	5,00 E+04 Gy	2 E+05 Gy
100	2,00 E+05 Gy	8 E+05 Gy
200	4,00 E+05 Gy	1,6 E+06 Gy
250	5,00 E+05 Gy	2,016 E+06 Gy

Esas dosis de radiación revelan la necesidad de tratamientos antirradiación para la electrónica o incluso protegerla con algún blindaje para la protección radiológica. Las dosis de radiación acumulada son muy altos, especialmente para 8.000 horas de vida útil dispositivo de manipulación remota.

- Blindaje: Como el apantallamiento de los rayos gamma requiere grandes cantidades de masa. Los rayos gamma son mejor absorbidos por materiales con alta densidad y alto número atómico como el plomo (Pb) o tungsteno (W). Una placa de plomo como un escudo gamma es sólo ligeramente mejor (20-30% mejor) que una masa igual de otro material de blindaje tal como aluminio, hormigón, el agua o el suelo; La ventaja importante de plomo no es en peso más ligero, sino más bien su compacidad debido a su mayor densidad. La misma razón vale para Tungsteno aunque es más caro. Por lo tanto, dependiendo del espacio disponible para la electrónica en el interior del escudo, que podría ser más razonable utilizar tungsteno en lugar de plomo [Ohr 2003]. Es decir, se requiere que el blindaje más grueso cuanto mayor sea la energía de los rayos gamma.

Para una primera impresión del espesor de blindaje necesario para la solución de

multiplexación, la siguiente tabla muestra el espacio disponible para la electrónica dentro de la caja de blindaje. Esos valores se han calculado para la dosis acumulativa diferente para la electrónica. El blindaje se ha evaluado preliminarmente teniendo en cuenta el espesor necesario para reducir la tasa de dosis máxima en el volumen de referencia para cada ubicación debajo de un umbral TID de 1 kGy, y luego aplicado a cada lado del volumen de referencia (enfoque conservador).

Teniendo en cuenta este primer estudio, se puede concluir que la electrónica tiene que ser tanto Radhard como sea posible. Se necesitarán electrónica pequeño como para caber dentro de la caja de protección. Otros materiales como el tungsteno tienen que ser considerados en lugar de plomo, tratando de reducir el espesor escudo para dar más espacio a la electrónica.

El uso de este elemento de protección tiene que ser discutido en función de la electrónica disponibles dureza radiación encontrados. Cuanto más Radhard es la solución, se necesita el grosor de menos de blindaje. El espesor de blindaje debe ser calculado para cada una de las soluciones cuando el nivel Radhard de cada es conocido y debe tenerse en cuenta en el análisis final de las soluciones disponibles.

- Refrigeración: Cuando se habla de la electrónica, la temperatura es un tema muy importante. La temperatura afecta directamente al rendimiento y el envejecimiento de la electrónica. Para las tareas de operaciones de mantenimiento, el dispositivo de manipulación remota trabajará bajo una temperatura máxima de 50 ° C en cualquier ubicación. Estos grados tienen que poder ser soportados por la electrónica con o sin sistemas de refrigeración. Se podrían usar elementos pasivos o activos podrían utilizarse para refrigerar la electrónica pero siempre cumpliendo con los requisitos de materiales del reactor. Teniendo en cuenta si se utiliza un blindaje, estará confinado herméticamente en una caja de plomo que es un conductor de temperatura muy malo.

En caso de que se necesitan tanto la refrigeración y el blindaje, sólo el tungsteno podría utilizarse como material de protección.

- Cableado: Longitud y tipo de señales: A la hora de multiplexar habrá que separar

los cables en categorías, para agruparlos según sean de alimentación, control, sistema de video, etc. Por las potencias que manejen y su importancia de cara a fallos y redundancia de datos en el sistema.

Las distancias a cubrir con las soluciones de multiplexación podrían ser de unos 100 metros aproximadamente, desde la sala de control hasta la situación de los sensores. Esos 100 metros comprenderían la distancia entre el multiplexor y el demultiplexor. Esta distancia tiene que ser considerada con el fin de asegurar que la señal no se atenúa por la resistencia del cable. Si esto ocurre, se necesitarán algo de electrónica de amplificación con protección antirradiación (electrónica *RadHard*) con el fin de cubrir esta distancia.

Tabla 8 - Lista de posibles señales de un robot manipulador genérico de 8 G.d.l. para fusión.

Actuador / sensor	Num. Cables	Num. Dispositivos	Señales <100mA	Señales <2A	Señales <20A
Resolver	6	16	96		
Servomotor Alimentación	2	8			16
Servomotor Freno	2	8		16	
Servomotor encoder	2	8	16		
Tacómetro	2	8	16		
Sensor Fuerza/Par	8	1	8		
Num. Total de Señales del Manipulador			136	16	16
					Total: 168

Tabla 9 - Lista de señales para el dispositivo que sirve de base móvil del robot manipulador dentro del Tokamak.

Actuador / sensor	Estimación de consumos	Frecuencia	Num. señales	Num dispositivos	Total de señales
Servomotor	181 V AC; 16 A	N/A	2	2	4
Freno	24 V DC; 0.75 A	N/A	2	2	4
Tacómetro	0-30 V DC	100 Hz mínimo	2	2	4
Válvulas	24 V DC; 1.33 A	N/A	2	5	10
Servoválvulas	± 10 mA DC	>200 Hz	2	2	4
Válvula de recuperación	24 V DC; 1.33 A	N/A	2	6	12
Switch	24 V DC	N/A	2	10	20
Detector de Fuego	-	-	-	1	-
Cámara de Ionización	<5A	-	-	1	-
Servo-Inclinómetro	+15 V; +5 A		4	1	4
LVDT	0-10 V o 4-20 mA	2.4 kHz.	4	6	24
Resolver	Supply: 2-12 V AC; Output: 1-6 V AC	6-12 kHz	6	4	24
Servomotor power supply	<20 A		2	4	8
Freno	<2 A		2	4	8
Encoder	<100 mA		2	4	8

Resolver	<100 mA		6	6	36
Tacómetro	<100 mA		2	6	12
Sensor fuerza/par	<100 mA		8	1	8
Servomotor Alimentación	<20 A		2	1	2
Break	<2 A		2	1	2
Limit switch	<100 mA		2	2	4
Tacómetro	<100 mA		2	1	2
Alimentación	<20 A		2	1	2
Alimentación	<2 A		4	1	4
Control	<100 mA		12	1	12
Cameras	Supply:100/120 V AC; Lens Contr. <12 V DC; Video out:: - 0.3to0.7 V	NTSC: 4.25 MHz PAL: 4.43 MHz	-	3	2

Algunas de las señales anteriores no deben ser considerados para la solución de multiplexación: el uso de cableado común tales como alimentación o tierras, por ejemplo, las líneas de alta tensión (2A, 20A) podrían compartirse para algunos dispositivos. Usando líneas eléctricas comunes disminuiríamos también el cableado de alimentación de los dispositivos.

Las señales a multiplex deben ser seleccionados cuidadosamente con el fin de encontrar el mejor equilibrio entre la ocupación guía de cable y la preservación de funcionalidades. El proceso de selección debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- La multiplexación de señales "críticos", tales como frenos, se debe evitar a fin de mantener los requisitos de seguridad en el sistema.
- La tasa de transmisión de datos del multiplexor debe ser lo suficientemente rápido como para preservar la integridad de las señales transmitidas. En ese sentido, los más críticos son las señales de los *resolvers* y LVDTs.

Tabla 10 - Señales a considerar para la solución de multiplexado en el robot manipulador

Actuador / sensor	Num. Cables	Num. Dispositivos	Señales <100mA
Resolver	6	16	96
Servomotor encoder	2	8	16
Tacómetro	2	8	16
Sensor Fuerza/Par	8	1	8
Num. Total de Señales del Manipulador			136
			TOTAL: 136

Tabla 11 - Señales a considerar para la solución de multiplexado para la base móvil del robot

Actuador / sensor	Estimación de consumos	Frecuencia	Num. señales	Num dispositivos	Total de señales
Tacómetro	0-30 V DC	100 Hz mínimo	2	2	4
Servoválvulas	±10 mA DC	>200 Hz	2	2	4
LVDT	0-10 V o 4-20 mA	2.4 kHz.	4	6	24
Resolver	Alimentación: 2-12 V AC; Output: 1-6 V AC	6-12 kHz.	6	4	24
Encoder	<100 mA		2	4	8
Resolver	<100 mA		6	6	36
Tacómetro	<100 mA		2	6	12
Sensor fuerza/par	<100 mA		8	1	8
Limit switch	<100 mA		2	2	4

Tacho	<100 mA		2	1	2
Control	<100 mA		12	1	12
					TOTAL: 138

Del mismo modo, las señales de la cámara no se han tenido en cuenta, ya que necesitan un hardware específico debido a que el alto flujo de los datos que las transmisiones de vídeo necesita. Las señales de vídeo tienen también unos cables en comparación con todas las señales de control y de datos. Finalmente Las señales a multiplexar son 136 del Manipulador y 138 de la base que ayuda al manipulador a moverse en el interior del Tokamak, con lo cual hacen un total de 274 señales.

5.2.2 Tecnología de Multiplexado.

Los multiplexores (MUX) son dispositivos que permiten señales digitales de entrada analógica múltiple de baja velocidad y para seleccionar, combinar y se transmiten a una velocidad superior en un solo medio compartido o dentro de un único dispositivo compartido.

La idea principal de esta aplicación es para codificar muchas señales a través de un canal; Esto permite reducir la sección y el peso de esta cantidad de cableado. Esos varias señales comparten un solo conductor tal como un cable de cobre o cable de fibra óptica. El combinado señales, analógica o digital, se consideran como una sola salida con una señal de mayor velocidad de transmisión de varios canales de comunicación (según el método de multiplexación utilizado).

Un multiplexor siempre requiere de un demultiplexor para desacoplar las señales transmitidas. Un multiplexor y un demultiplexor a menudo se combinan en un único dispositivo (comúnmente llamado multiplexor) permitiendo que el dispositivo para procesar las señales entrantes y salientes.

La electrónica de multiplexación suelen ser necesarios para poner en práctica las siguientes funciones:

- Adquisición de la señal producida por los sensores
- Digitalización de las señales analógicas (por ejemplo-resolver-a-digital, analógico a digital)
- Multiplexación y la transmisión.

Con el fin de tener un diseño adecuado de un dispositivo de multiplexación, la solución multiplexor para agrupar las señales digitales debería tener un esquema con estas funcionalidades:

- ADC para señales analógicas o otros aparatos electrónicos para el acondicionamiento de señal adicional.
- Módulo de multiplexación para el embalaje de varias señales de canal en pocos o incluso sólo una línea.
- CPU o FPGA que podría proporcionar algo de inteligencia en el sistema o cerrar algunos bucles.
- Regulador de potencia para el suministro de voltaje adecuado a los sistemas remotos
- Módulo de transceptor para la gestión de la comunicación, lo que podría tener un amplificador si la distancia a cubrir por el cable es demasiado largo. El uso de estándares de comunicación existentes es una opción viable para ser considerado en lugar de desarrollar una nueva para el envasado de todos los datos.

Todas estas funcionalidades se han representado en la siguiente diagrama de bloques:

Ilustración 53 - Esquema general de los componentes de una la solución de multiplexado

Los elementos del lado de la sala de control no necesitan ser Radhard, ya que van a estar fuera del área de la radiación. Sólo la solución de multiplexación en el dispositivo de manipulación remota tiene que ser Radhard.

Una CPU o FPGA, que podría proporcionar algo de inteligencia en el sistema o cerrar algunos bucles, es una parte muy importante del sistema, ya que puede proporcionar una comunicación más rápida en tiempo real y algunos problemas de seguridad se puede añadir al sistema con el fin de tener una solución de alta disponibilidad.

Para el desarrollo de esta solución dirigida a reducir la cantidad de cableado que se enrutan a través de la guía del cable, la han de considerarse lo siguiente:

- Viabilidad de encontrar fuera de la plataforma o de la electrónica de multiplexación desarrollados personalizado: adecuado para las condiciones ambientales del entorno de radiación gamma.
- El costo de desarrollar / adopción de la solución de multiplexación: diseño, prueba, la calificación de la electrónica y también el costo de mantener esta solución de multiplexación.

5.2.3 Análisis de posibles soluciones

Con el fin de tener una estimación de la cantidad de soluciones de multiplexación necesaria se ha escogido un robot genérico de 8 G.d.l. que irá montado sobre una plataforma móvil que le permitirá desplazarse por el interior del Tokamak hasta una zona en la que haya que realizar una acción de mantenimiento. Todas las señales analizadas de ambos dispositivos no tienen porqué materializarse en un robot y una plataforma reales, puesto que se ha hecho una estimación teórica de los posibles sistemas que podrían llevar a bordo, con el fin de realizar el ejercicio teórico y evaluar la posible solución de multiplexado.

Todos los cálculos están más detallados en los anexos de esta tesis. Para este estudio hay que tener en cuenta que se necesitan dos electrónicas: una de multiplexación y otra de demultiplexación, y como la comunicación es bilateral tiene que estar cada una de ellas en los dos extremos, tiene que ser dividido en áreas de aplicación: solución MUX (área de radiación) y solución DEMUX (área de no radiación). Sin embargo, la solución DEMUX no afectaría al precio final, ya que puede estar hecho de COTS no RadHard con protocolos de comunicación estándar.

Todas las señales de control y los datos de los sensores se conectan de esta unidad de multiplexado colocado en la dispositivo de manipulación remota. Es obligatorio para garantizar el correcto funcionamiento de esta unidad. Con este propósito, es muy importante seleccionar el lugar con menos radiación, o el más protegido, para que los componentes electrónicos (incluso componentes RadHard y blindados) se vean lo menos afectados posible. Se dependerá de la ubicación elegida y de la radiación que en ella se irradie, por ello se tiene que llegar a un buen compromiso entre la radiación y el espacio disponible para la electrónica, lo que hace posible la asignación de la solución de multiplexación con el mínimo riesgo por la radiación.

En este análisis no se considera los COTS no RadHard, ya que fueron rechazadas porque no era posible dar cabida en el espacio disponible del ejercicio real, esto ocurre porque la utilización de espacio dentro de la hot-cell, sea en el dispositivo que sea está muy valorado, y estos dispositivos suelen ser grandes, en comparación con los otros tipos de solución, y aumentarían considerablemente más de tamaño y también de peso al añadirles el blindaje protector.

Sin embargo, es importante destacar que esta solución sería factible mediante el rediseño, ya que con el blindaje apropiado este COTS no RadHard puede soportar dichos niveles de radiación, pero su gran volumen requerirá un rediseño para el alojamiento.

En una primera estimación y sobre la base de toda la información suministrada, los costes totales de una solución viable es la multiplexación entre 500.000 € y 800.000 €. Con esta estimación aproximada es necesario saber cuántas unidades tienen que ser fabricados, por lo que hay dos casos de estudio.

- El equipo puede manejar 8.000 horas de funcionamiento de 5 Tiempos operaciones en 20 años, que es la duración estimada para el funcionamiento de ITER.

- 6 soluciones MUX necesarias (1 por cada uno disponible dispositivo de manipulación remota: tres zurdo y otros tres diestro). Para 20 años de funcionamiento.

- 3 soluciones DEMUX (que están en el área de no radiación, que no necesitan componentes RadHard). Podrían ser COTS en caso de usar protocolos de comunicación estándar.
- El equipo puede manejar entre 2.000 y 8.000 horas de funcionamiento.
- En función de las horas que puede manejar:
 - Soporta desde 2,000 a 3,500 horas: 36 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 2000 horas es reemplazado 5 veces].
 - Soporta desde 3,500 a 5,000 horas: 24 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 3.500 horas es reemplazado 3 veces].
 - Soporta desde 5,000 a 8,000 horas: 18 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 5.000 horas es sustituido dos veces].
 - 3 soluciones DEMUX (están en el área de no radiación). Pueden utilizarse COTS en caso de usar protocolos de comunicación estándar.

Con el fin de disponer de sistemas tolerantes a fallos cada solución MUX debe tener la electrónica redundantes si el espacio disponible lo permite. Esto es posible con las soluciones personalizadas, pero no con las placas de COTS, ya que implica dos unidades de cada IC (Circuito Integrado) necesarios para la solución redundante, y requeriría demasiado volumen para su instalación.

Analizando las opciones electrónicas disponibles en el mercado, los no RadHard-COTS no son una solución viable ya que no pueden soportar con la radiación, y no hay suficiente espacio para el blindaje en lugares disponibles.

Sin embargo, es posible desarrollar una solución a partir de ICs RadHard comerciales para aplicaciones aeroespaciales, pero incluso siendo posible, esto no es un buen enfoque ya que los componentes están diseñados para el espacio y no para aplicaciones nucleares, y las radiaciones en estos entornos son muy diferentes.

Los ahorros en usar COTS podrían estar teniendo un enfoque más específico para las necesidades del ITER y la reducción del espesor de blindaje. Por ejemplo, existen COTS para aplicaciones aeroespaciales que tienen un bajo nivel RadHard en comparación con las dosis de radiación del interior de ITER durante períodos de mantenimiento.

utilizando esta solución COTS RadHard, es imposible para soportar las dosis de radiación para 8.000 horas, y la solución debe considerarse como un consumible, siendo obligatorio que reemplace después de cada período de 2.000 horas.

En caso de que el fabricante de los COTS decide suspender la fabricación, el rediseño de la PCB se requiere con el fin de utilizar piezas compatibles desde el fabricante.

Todos estos argumentos hacen que las soluciones con COTS aeroespaciales sea peor que las soluciones completamente personalizadas. No sólo por la sustitución de la solución de multiplexación después de cada período de 2.000 horas, sino también el aumento de los costos de fabricación de la solución ya que se considera como consumo ya que una gran cantidad de unidades que tienen que producirse, lo que hace que los costos finales más costoso y menos factible que los ASICs de las soluciones personalizadas.

Teniendo en cuenta soluciones a medida, tanto se supone que soportar un poco más de 1MGy de dosis de radiación acumulada, por lo que el espesor de blindaje puede ser muy delgada y casi todo el espacio de cada lugar podría ser utilizado en la electrónica, si es necesario. Este tipo de resistencia a la radiación también permite tener la electrónica para el conjunto de 8.000 horas de vida útil de los componentes electrónicos de la dispositivo de Manipulación Remota.

Una cuestión importante para decidir que podría ser la experiencia de ambas compañías, Aeroflex y MAGyICs; ambas compañías pueden ofrecer una buena solución de multiplexación.

– Aeroflex través Dimac tiene mucha experiencia en aplicaciones aeroespaciales que manejan requisitos más restrictivos que los requisitos para este desarrollo. Aeroflex tiene las capacidades para plantas nucleares, pero no a los productos especialmente diseñados para ellos, sin embargo, a pesar de que están invirtiendo en una nueva línea de producción para el sector nuclear. Sus componentes aeroespaciales han sido probados hasta 100krad y 300krad aunque tienen la capacidad para probar aún más si fuera necesario. Esto también es una gran empresa que puede dar un buen servicio de apoyo.

- MAGyICs tiene muy pocos años de trayectoria, pero se centra en las aplicaciones nucleares y ya se ha implicado en algunos desarrollos para el ITER. Ya se ha probado y con éxito una solución de multiplexación con requisitos muy similares (a menos que el número de señales) que el objetivo de este documento.

El análisis de los costes de los tres posibles y factibles soluciones:

- Solución personalizada con COTS cualificados, tiene la posibilidad de hacer un pedido anterior de pocas unidades para probar la fiabilidad del sistema y la posibilidad de hacer más pedidos después de algunos años y garantizando la no obsolescencia de las partes del diseño. Para facilidad de comparación, un pedido inicial de una unidad se podría hacer con un coste de 250.000 € y otro orden de 65.000 € por unidad, cinco unidades serían 325.000 €. El costo total de esta solución podría rondar los 575.000 € para esos 6 unidades.

- La segunda opción es la solución personalizada ASIC de Aeroflex tiene un pago inicial y única de más de 500.000 €, pero es una solución más compacta, dedicada e integrada.

- ASIC MAGyICs forma de solución es la más barata de las tres opciones con un costo total de 450.000 €, pero esto sólo cubren el desarrollo sin tener en cuenta el número de soluciones para construir.

Comparando ambas soluciones Aeroflex si el dinero no era un factor a considerar, sería mejor considerar la solución totalmente personalizado, ya que se desarrolló en cumplimiento con las especificaciones. Aunque la otra solución de Aeroflex es más barato y también es bueno, no habrá tanto espacio reducido como la solución totalmente personalizada. También tendrá algunos no utilizan las capacidades de los COTS originales, por lo que incluso trabajando tan fino como el totalmente personalizado, el rendimiento será un poco peor.

Comparando Aeroflex y MAGyICs, Aeroflex tiene muchas décadas de experiencia en la industria aeroespacial y electrónica militares aplicaciones con componentes RadHard. Por otro lado, MAGyICs es una compañía joven que ya ha desarrollado alguna solución de multiplexación completa que ha sido probada bajo radiación además de haber hecho alguna colaboración en otras aplicaciones de ITER.

5.2.4 Análisis de la solución

Tratando de minimizar la cantidad de cables, pasando por la guía de cable a la dispositivo de manipulación remota en el recipiente de vacío, es una buena opción para minimizar el peso y los costos de los cables, lo que afecta directamente en la tarea de mantenimiento si un cable tuviera que ser reemplazado.

Pero existen algunos riesgos a tener en cuenta, ya que algunos productos electrónicos basados silicio pueden fallar al estar en un ambiente radiactivo. La irradiación de los circuitos electrónicos se realiza mediante dos mecanismos principalmente: situaciones aisladas con efectos de Dosis Totales Ionizantes (TID). Estos efectos individuales se producen cuando una partícula cargada de alta energía penetra un circuito. Los efectos individuales se pueden dividir en errores de software y errores de hardware. Los de software introducen errores simples o múltiples bits en circuitos digitales y errores transitorios en eventos individuales (SET). Errores de hardware pueden conducir a una única situación que puede ser destructiva para el IC.

- Efectos de eventos solo pueden ser mitigados mediante el uso de técnicas RHBD y la redundancia. El efecto de estos experimentos individuales eventos tiene que ser verificado experimentalmente para obtener la confianza acerca de la tolerancia hacia estos efectos.

- Acerca de los efectos de dosis ionizante, las tecnologías CMOS estándar comerciales avanzadas están bien adaptadas para circuitos integrados de diseño tolerante a la radiación. Aunque se prevén dosis ionizantes totales (TID) efectos de la radiación en estas tecnologías, la mayoría de ellos se puede evitar mediante el empleo (RHBD) técnicas de radiación endurecido por el diseño. Técnicas RHBD se pueden aplicar en a nivel de sistema, a nivel de circuito, a nivel de transistor y de nivel de diseño, para lograr una buena garantía de la radiación.

Hay otra cuestión relevante que afecta a los circuitos basados en silicio porque los dispositivos semiconductores sufren de los efectos del envejecimiento como la degeneración movilidad del portador. La irradiación gamma se acelerará este proceso de envejecimiento debido a las cargas atrapadas en el dióxido de silicio. Afortunadamente, el proceso de envejecimiento puede ser diferida por la elección

apropiada más lenta la velocidad del sistema y el consumo de energía más bajo. Es también nuestra intención de hacerse cargo de los efectos del envejecimiento en el diseño del ciclo de vida de los dispositivos resistentes a la radiación.

Sin embargo, para reducir fallos en la electrónica de comunicación o incluso en el cableado, es necesaria cierta redundancia en la electrónica, debiéndose tener en cuenta.

Para concluir, hay que tener en cuenta que las operaciones de mantenimiento con la dispositivo de manipulación remota en el ITER requerirá el desarrollo de un enlace resistente a la radiación que permita comunicar un manipulador remoto y su base con la sala de control para que sean teleoperados. El estudio de viabilidad de la solución de multiplexación que se ha tratado en este capítulo es de gran importancia para este fin, y se concluye que es posible tener una solución de multiplexación para reducir alrededor de 200 señales.

De acuerdo con la información proporcionada por varios fabricantes y diseñadores de componentes electrónicos, es factible desarrollar un tarjeta electrónica de multiplexación de datos que sea resistente a radiación y que esté ubicado dentro del dispositivo de Manipulación Remota. Dicho dispositivo necesitará del orden de 270 señales (analógicas y digitales) y transmitir toda esta información en un formato digital mediante el uso de un Protocolo de Comunicación como el comentado anteriormente en esta tesis.

Los COTS no resistentes a radiación fue rechazada su viabilidad porque implicaría demasiado espacio y peso para dicho dispositivo móvil teniendo en cuenta que los espacios disponibles dentro de ITER son muy limitados debido a las estrictas restricciones. Si bien es cierto que la solución sería válida y factible si no hubiera limitaciones de espacio y peso.

Todas las señales de control y datos de los sensores estarán conectados a esta unidad de multiplexación colocado en la ubicación que menos dosis de radiación reciba en la plataforma de Manipulación Remota.

Dicha ubicación deberá ser fácilmente accesible para permitir un fácil reemplazo de la unidad o del cableado, si fuese necesario para las tareas de mantenimiento.

Se espera que el equipo de multiplexación debería soportar 8.000 horas de trabajo, para no tener que ser reemplazado durante su ciclo de vida durante los 5 periodos de mantenimiento programados en el ITER. Toda la electrónica resistente a radiación y blindajes deberán estar debidamente cualificados para garantizar su correcto funcionamiento durante los periodos de mantenimiento dentro del reactor

Las principales ventajas de usar este dispositivo de multiplexado son:

- Simplificación de la guía del cable que conecta al dispositivo remoto con la sala de control, pudiendo reducirse desde 270 señales hasta 60 señales como máximo.
- Menos ruido en la información proporcionada por las señales analógicas ya que estas señales están cerca de los sensores que los generan, y después se digitalizan para la transmisión multiplexada.
- Posibilidad de desarrollar sistemas redundantes que mejoran el rendimiento del multiplexor, con una mayor tolerancia a fallos.

Hay avances de la investigación en la Universidad de Lovaina que confirma la viabilidad de multiplexación bajo altas dosis de radiación [Verbeeck 2014]. También hay empresas orientadas a aplicaciones aeroespaciales y militares que se pueden desarrollar y calificar este tipo de dispositivos para su uso en aplicaciones nucleares e incluso para los niveles de radiación del ITER.

A partir de toda la información comentada previamente, se valora que la opción más adecuada para el sistema electrónico es desarrollar un ASIC personalizado. Esta opción es proporcionada por varias empresas como MAGyICs y Aeroflex. Desafortunadamente, esta solución implica un costo inicial alrededor de 500.000 euros a realizar en un solo pago. Sin embargo, se requerirá un costo adicional de 400.000 euros para fabricar la tarjeta electrónica final que implementa las funcionalidades completas del sistema multiplexor. Por lo tanto el monto total alcanzará un millón de euros. Dicho monto incluye los requisitos que permitirán avanzar en las normas del ITER, que definirán adecuadamente características tales como: rango de temperatura, condiciones de vibración, la redundancia y así sucesivamente.

Como se mencionó anteriormente, el costo total se ha estimado en torno a medio millón de hasta un millón de euros. Esta cantidad incluye el diseño, la prueba, la calificación de la electrónica, y también el mantenimiento o sustitución, ya que ha sido diseñado para todos los 5 períodos de mantenimiento de la dispositivo de manipulación remota. No obstante, esta cantidad total podría reducirse aún más entrando en más detalle y en función de la optimización y adaptación para los requisitos de ITER.

CAPÍTULO 6

TECNOLOGÍAS HÁPTICAS PARA TELEOPERACIÓN

En este capítulo se aborda el desarrollo de estimación de fuerzas producidas por una carga que se está manipulando. La estimación de fuerzas e inercias que se habrán de reflejar al dispositivo maestro se calculan a través de un algoritmo que utiliza la información de un sensor Fuerza/Par y una IMU.

Además se realiza un control en fuerza estimada a partir de los lazos de control en corriente mediante una caracterización de los actuadores del dispositivo maestro. Explicando desde el desarrollo de la electrónica hasta la validación de las fuerzas reflejadas.

Una vez completada la reflexión de fuerzas se realizan experimentos para valorar la inmersión del operador mediante estímulos multimodales durante la teleoperación.

6.1 Tecnologías de para la reflexión de fuerza

Durante los últimos años se han logrado avances significativos relativos a las interfaces multimodales de teleoperación que proveen al operador información: háptica, visual y auditiva del entorno de trabajo de los robots esclavos [Evrard 2009] [Tavakoli 2007]. Además, se han obtenido importantes avances en el control bilateral de robots teleoperados, desarrollado distintas estrategias para obtener la máxima transparencia posible en la reflexión de fuerzas [Behzad 2011] [Azorín 2008], compensación de retrasos en el canal de comunicaciones [Rodríguez -Seda 2009] [Nuño 2011], o escalado en la reflexión de fuerzas [Secchi 2008][Botturi 2009]. Así mismo, se han desarrollado numerosas aplicaciones que van desde la rehabilitación de pacientes hasta el desarrollo de laboratorios a distancia [Casals 2009] [Sales 2008].

Esta contribución se centra en el estudio de reflexión de patrones de fuerza que permitan manipular adecuadamente cargas dentro de un rango amplio de valores, a la vez que se muestra al operador la interacción del telemanipulador con el entorno. Así pues se considerarán dos tipos de tareas: la manipulación de potencia que tiene por objetivo trabajar con elementos estructurales de gran peso; y manipulaciones de precisión en tareas comunes, tales como atornillar/desatornillar, utilizar herramientas, etc.; en estas tareas se precisan fuerzas menores pero se requiere una mayor destreza.

Como se comentó anteriormente, la necesidad de realizar manipulaciones de potencia de cargas entre 1-200 Kg. hace que la reflexión de fuerzas al operador basada en técnicas de transparencia no sea posible, aplicar técnicas de escalado reduciría la percepción del operador en manipulaciones de precisión, y proveería al operador con información de la fuerza del entorno en situaciones poco relevantes para la manipulación (percepción del peso de un objeto durante su transporte, percepción de la dinámica del entorno al transportar piezas pesadas, etc.) aumentando la exigencia física al operador y reduciendo la productividad de la tarea de manipulación.

El trabajo propuesto se centra en detectar las cargas que se están manipulando a la par que los movimientos que se realizan con esa carga para detectar las fuerzas,

pares e inercias reales generados únicamente por la carga, y poder transmitir estos efectos al operador a través del maestro.

Es importante realizar un estudio de cómo el operador responde ante estímulos o eventos multimodales durante la manipulación y ver cómo influyen en su grado de inmersión en la tarea.

En general, los manipuladores se pueden clasificar en dispositivos tipo impedancia o dispositivos tipo admitancia, dependiendo de si se comportan como fuentes de velocidad o de fuerza. Este comportamiento viene determinado principalmente por el diseño estructural y la actuación. Los dispositivos tipo impedancia se caracterizan por un diseño ligero que asegura baja fricción e inercia así como una alta ‘backdrivability’ y ancho de banda [Adams 1999], [Massie 1994]; por el contrario, los dispositivos tipo admitancia presentan un amplio espacio de trabajo, alta inercia, baja *backdrivability* y una gran capacidad de fuerza [Salcudean 1998] [Peer 2008]. La mayoría de la literatura de telerrobótica, se centra en el control de dispositivos tipo impedancia dando lugar a controladores con altas prestaciones. El uso de dispositivos tipo admitancia es raramente estudiado y las características de este tipo de sistemas son completamente diferentes ya que los modelos de impedancia no permiten caracterizar correctamente a este tipo de dispositivos [Peer 2008]. Diseñando adecuadamente control de posición o fuerza para estos dispositivos, es posible modificar el comportamiento del dispositivo de tipo impedancia a admitancia y viceversa, siendo necesario tener en cuenta consideraciones de robustez para asegurar un comportamiento absolutamente estable (estable para cualquier pareja de operador pasivo y entorno) [Hashtrudi-Zaad 2001].

En los trabajos de este proyecto se analizarán y diseñarán controladores para este tipo de dispositivos, que impidan que el robot hidráulico ejerza fuerzas bruscas de interacción que puedan dañar el entorno asegurando una operación segura y eficiente mediante la modificación del comportamiento del sistema para conseguir una cierta “flexibilidad virtual”.

El uso de sensores de fuerza en el extremo del robot está muy limitado debido a las características de radiación del entorno [Beynel 1982], con lo que resulta necesario establecer nuevos métodos de estimación de estas fuerzas de interacción utilizando

sensores internos del robot hidráulico en cada una de sus articulaciones (sensores de posición-velocidad, diferencia de presión en las válvulas, etc.) basados en modelos adaptativos del comportamiento del robot. Por ello en este trabajo, se utilizará electrónica que podrá ir blindada en el extremo del robot, además de los propios actuadores que nos darán información relevante del estado articular del robot.

En este apartado se comentarán básicamente dos desarrollos para la reflexión de fuerza en dispositivos maestros. El primero implica el cálculo de fuerzas e inercias al que se somete el extremo del robot para aislarlas de las variables de las articulaciones y poder calcular cuándo se coge un peso, cuál es su valor y sus inercias derivadas.

Por otro lado se ha desarrollado una electrónica para la lectura de las corrientes de los motores del maestro y poder estimar el par a través del consumo. De esta forma podremos hacer un control en Fuerza sencillito, de bajo costo, y que no añade pesos ni inercias indeseables en las articulaciones del dispositivo maestro para no mermar su manipulabilidad ni su transparencia.

Finalmente se elaborarán unos experimentos con distintos usuarios y sus reacciones ante estímulos multimodales para valorar la inmersión y los tiempos de reacción durante la manipulación.

6.1.1 Estimación de cargas en el esclavo

El proceso de estimación de fuerza requiere la integración de numerosos componentes y sistemas. Al margen del acondicionamiento de cada una de las señales, es necesario establecer un orden y estructura a todo el sistema.

Principalmente, la información recibida por el algoritmo proviene de dos sensores (inercial y de fuerza) y de los controladores del robot. El sensor de fuerza está situado en la muñeca, y el sensor inercial está colocado en el extremo del robot. Hay que reparar en que cada uno mide sus valores respecto a sistemas de referencia asociados a su posición, por lo que es necesaria una transformación previa antes de el uso de sus datos.

Así mismo, también hay que tener en cuenta otros efectos que afectan a las medidas de los sensores y que hay que compensar o eliminar. El sensor de fuerza registra todas las fuerzas ejercidas en la muñeca, que incluyen las ejercidas por el propio robot, las de la mano robótica y las ejercidas durante el movimiento por los efectos inerciales.

La siguiente figura muestra un esquema del sistema y la estructura general de los componentes que se han utilizado de la PAT para la estimación de fuerzas. También incluye las frecuencias de control sobre las que trabajará cada elemento, todo ello interconectado con la red LAN del laboratorio de telerrobótica.

Ilustración 54 - Esquema del sistema bilateral de control para la estimación de fuerzas externas.

Integración en la P.A.T.

Tal y como se describe en la tabla, cada sensor o transductor debe colocarse en una determinada posición y orientado adecuadamente, así como tratar correctamente sus salidas para obtener los resultados requeridos.

- Sensor inercial

Este sensor se sitúa encima de la mano robótica, sobre la PCBZ (placa soporte del sensor) a la cual se encuentra anclada. Debido a los requerimientos para la lectura de datos, es necesario que la placa de Arduino mega se encuentre cerca, por lo que esta se encuentra situada en el último segmento del brazo robótico, a su vez anclada con otro soporte al robot.

Para su colocación se ha empleado dos pequeños soportes de plástico cuya creación ha sido realizada mediante una impresora 3D. Para la lectura del sensor inercial se hace uso de un modo de funcionamiento dentro de su configuración denominado burst mode. La acción que realiza este modo es la de responder con los datos disponibles ante la recepción de una determinada señal por parte del maestro que lo controla.

Los datos obtenidos del sensor son la velocidad angular y la aceleración lineal por medida directa del sensor y de forma indirecta, por cálculos de derivación, la aceleración angular. Los seis valores de las medidas de la velocidad angular y la aceleración lineal son leídas por la placa Arduino mediante el protocolo SPI, procesadas por este, y finalmente enviadas por el puerto serial al ordenador, quien lo recibe mediante un programa de lectura de puerto serial con LabView.

- **Sensor de fuerza**

Ilustración 55 - Extremo del robot con el sensor de fuerza acoplado

El sensor de fuerza ATI se coloca en el extremo del robot, de donde se ha retirado la pinza que por defecto lleva el robot. Está atornillado al final del último segmento y con un disco metálico adaptador para la colocación de la mano robótica, tal y como se observa en la figura anterior.

De este dispositivo se toman sus seis medidas directas, a saber, los tres valores de fuerza y par en los tres ejes. El transceptor lee los datos enviados por el sensor y los manda por UDP hasta el PXI donde son procesados.

- **Odometría**

Tal y como se ha mencionado anteriormente, Grips es un brazo hidráulico manipulador de siete grados de libertad, aunque para este proyecto se sustituirá la pinza que por defecto lleva instalada, por lo que finalmente quedarán seis articulaciones. La geometría del robot es la descrita en el capítulo de la PAT.

Ilustración 56 - Montaje final de la mano robótica con sensor fuerza/par y sensor IMU

6.1.2 Diseño de algoritmo

Unificación de los sistemas de referencia

Dentro del sistema se pueden diferenciar distintos sistemas de referencia, cada uno asociado a un subíndice con la notación:

- $\{S_p\}$ Sistema de referencia asociado al centro de masas, cuyos ejes x_p , y_p , z_p , coincidentes con los ejes principales de inercia de la herramienta.
- $\{S_s\}$ Sistema de referencia asociado al sensor fuerza-par.
- $\{S_I\}$ Sistema de referencia asociado al sensor inercial.
- $\{S_W\}$ Sistema de referencia fijo, asociado a la base del robot.
- $\{S_E\}$ Sistema de referencia ligado al punto de aplicación de la fuerza externa.

Para expresar las fuerzas y momentos, a lo largo del capítulo se empleará una notación compacta, que facilitará el tratamiento de esta información. Mediante esta notación utilizada en [García 2008], las fuerzas y momentos se agrupan en un mismo vector de dimensión 6, de manera que siendo F el vector de fuerzas y N el vector de momentos:

$$U = \begin{pmatrix} F \\ N \end{pmatrix}$$

Para realizar un cambio de sistema de referencia, de una fuerza medida en un punto A a la misma fuerza expresada en B , continuando la notación definida en [García 2008], se empleará la siguiente expresión, en la que ${}^B r_A$ representa el vector posición desde B hasta A expresado en la base de B y ${}^B R_A$ es la matriz de cambio de base del sistema A al B :

$$U_B = \begin{pmatrix} F_B \\ N_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^B R_A & 0_{3 \times 3} \\ S({}^B R_A) {}^B R_A & {}^B R_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_A \\ F_B \end{pmatrix} = {}^B T_A U_A$$

En esta última expresión se ha hecho uso del operador $S(r)$, el cual representa un producto vectorial en forma matricial. Por ejemplo, siendo r y q dos vectores cualesquiera de dimensión 3, se define el operador $S(r)$ como se muestra a continuación:

$$r \times q = S(r)q = \begin{pmatrix} 0 & -r_3 & r_2 \\ r_3 & 0 & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}$$

Elección de las variables de estado

Tal y como se ha mencionado antes, el sistema puede ser representado por un modelo en variables de estado de la forma:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t))$$

$$y(t) = h(t, x(t), u(t))$$

De este modelo, la primera ecuación corresponde a la ecuación de estado (que evoluciona y cambia según el estado del sistema) y la segunda expresión corresponde con la ecuación de salida que relaciona el estado con los datos de los sensores.

A continuación se definen los valores de los elementos de la ecuación, a saber, el vector de estado x , el vector de salida y , y las entradas U_S , U_E y U_g .

$$[x] = \begin{pmatrix} p \\ q \\ v_p \\ \omega \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{13} \quad [y] = \begin{pmatrix} p \\ q \\ F_S \\ N_S \\ \omega \\ a_p \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{22}$$

$$[U_S] = \begin{pmatrix} F_S \\ N_S \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad [U_E] = \begin{pmatrix} F_E \\ N_E \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^6 \quad [U_g] = [g] \in \mathbb{R}^3$$

Quedan definidas por tanto como variables de estado, la posición (p), la orientación (q), la velocidad lineal del centro de masas (v_p), y la velocidad angular del sólido. Mencionar que q es el cuaternio que define una rotación de ángulo θ alrededor del eje definido por el vector unitario k , cuya definición según [Barrientos 2007] es:

$$[q] = [\cos(\theta/2), k_x \sin(\theta/2), k_y \sin(\theta/2), k_z \sin(\theta/2)]$$

En cuanto al vector de variables de salida contiene valores proporcionados por los sensores u obtenidos a partir de sus valores. Al final resultan, posición (p), orientación (q) fuerza y par medidas por el sensor ATI (F_S y N_S respectivamente), velocidad lineal (v_I), velocidad angular medida por la IMU (ω), aceleración medida por la IMU (a_I) y aceleración angular ($\dot{\omega}$).

La siguiente tabla resume las diferentes variables, sistema de referencia y origen.

Tabla 12 - Lista de las variables, método de obtención y su sistema de referencia natural

Variable	Nombre	Método de obtención	Sistema de referencia
p	Posición	Encoders y cinemática directa del robot	$\{S_W\}$
q	Orientación	Encoders y cinemática directa del robot	$\{S_W\}$
v_I	Velocidad lineal medida por la IMU	Integración de la aceleración medida por los acelerómetros	$\{S_p\}$
v_p	Velocidad lineal del centro de masas	Cálculo a partir de v_I	$\{S_I\}$
ω	Velocidad angular	Lectura del sensor inercial	$\{S_I\}$
F_S	Fuerza medida por el sensor ATI	Lectura del sensor de fuerza	$\{S_S\}$
N_S	Par medido por el sensor ATI	Lectura del sensor de fuerza	$\{S_S\}$
a_I	Aceleración medida por la IMU	Lectura del sensor inercial	$\{S_I\}$
$\dot{\omega}$	Aceleración angular	Derivación de la velocidad angular	$\{S_I\}$

Obtención de variables de la odometría

De la odometría del brazo robótico se debe calcular tanto la posición como la orientación del extremo donde se coloca el sensor de fuerza. La posición respecto de la base del Kraft debe tener unidades del sistema internacional y la orientación sin unidades. Además de las lecturas directas, posteriormente dentro del programa principal se obtiene como medida indirecta la velocidad lineal, mediante cálculos de derivación de la posición.

En cuanto a las medidas directas, en primer lugar se debe señalar que los controladores actuales del Kraft devuelven el estado de las articulaciones como su ángulo, por lo que es necesario hacer una cinemática directa para conocer la posición en metros del extremo respecto de la base robot. Este ángulo es obtenido por los encoders en los ejes de cada articulación y enviado por el protocolo UDP hasta el PXI donde se procesa.

Para calcular los valores de posición en metros tomando como punto de referencia la base, se aplicará el método de desplazamiento de matrices utilizado en [Denavit-Hatenberg 1955], similar al DH, cuyo resultado es la obtención de la matriz de transformación final que contiene la posición y permite el cálculo de la orientación.

Dicho algoritmo tiene la formulación siguiente:

Partiendo de la matriz identidad 3x3 y de una matriz T_n identidad 4x4, siendo n el número de grados de libertad. Recursivamente para i=1 hasta n:

1. Si la articulación es prismática

$$D_i = \begin{bmatrix} I & k_i \cdot q_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Si la articulación es rotacional (como es nuestro caso):

$$skew(k) = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_i = I \cos q_i + k_i k_i^T (1 - \cos q_i) + skew(k_i) \sin q_i$$

$$D_i = \begin{bmatrix} R_i & (I - R_i)p_i^T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Finalmente:

$$T_n = T_n D_i$$

Una vez terminado el bucle, se calcula finalmente T_n con la matriz de transformación en la posición origen T_0 .

$$T_n = T_n T_0$$

Para el cálculo de la orientación se utilizarán las librerías de robótica de LabView, ya que incorporan funciones que permiten el cálculo directo del cuaternio de orientación recibiendo como entrada la matriz T_n .

Diseño de observador

Tal y como se ha mencionado antes, para las estimación de los estados internos del sistema se utilizará el observador previamente desarrollado por el grupo de investigación. Dicho observador ha sido desarrollado y comprobado en [Borque 2014], además de que se ha demostrado la observabilidad del sistema simulado.

El observador propuesto en forma general:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= f_x(\hat{x}(t), t) + B_S U_S + B_G U_G + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= h_x(\hat{x}(t), t) + D_S U_S + D_G U_G\end{aligned}$$

Siendo K la matriz de ganancias del observador:

$$K = \begin{pmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,22} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,22} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{13,1} & k_{13,2} & \cdots & k_{13,22} \end{pmatrix}$$

Definiendo el error del observador del estado del sistema $\varepsilon_x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ y el error de salida $\varepsilon_y(t) = y(t) - \hat{x}(t)$:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_x(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = f_x(x(t), t) + f_x(\hat{x}(t), t) + B_E U_E - K \varepsilon_y(t) + v_x \\ \varepsilon_y(t) &= y(t) - \hat{x}(t) = h_x(x(t), t) + h_x(\hat{x}(t), t) + D_E U_E + v_y\end{aligned}$$

Despejando la componente $\hat{U}_E$ de la ecuación se obtiene la expresión del observador:

$$\hat{U}_E = D_E^+(\varepsilon_y(t) - h_x(x(t), t) + h_x(\hat{x}(t), t))$$

Donde D_E^+ representa la matriz pseudoinversa de Moore–Penrose de D_E (y por tanto $D_E^+ D_E = 1_{6 \times 6}$) y sustituyendo el término del error en la ecuación finalmente se obtiene despejando:

$$\hat{U}_E = U_E + D_E^+ v_y$$

Algoritmo implementado:

Aquí se expone el algoritmo estimador de fuerzas en diferentes etapas. Como ya se ha mencionado antes, el algoritmo se repite cíclicamente a excepción de la primera etapa de introducción de variables iniciales.

Establecimiento de valores iniciales de $\hat{x}_0^+$ y P_0^+ :

$$\hat{x}_0^+ = E[x_0]$$

$$P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$$

Reiterativamente, la predicción a priori del estado del sistema mediante integración numérica de las expresiones:

$$\dot{\hat{x}}(t) = f_x(\hat{x}(t), t) + B_s U_s + B_G U_G$$

$$\dot{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) + Q(t)$$

Estableciendo como límites de integración en la primera ecuación $\hat{x}_{k-1}^+$ y $\hat{x}_k^-$, y para la segunda P_{k-1}^+ y P_k^+ .

Cálculo del vector salida con la estimación del estado anterior:

$$\hat{y}_k = H_x(\hat{x}_k^-) + D_s U_s + D_G U_G$$

Actualización de la matriz de ganancias del observador:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

Nueva estimación actualizada a posteriori del estado del sistema y reprocesamiento de la matriz de incertidumbre:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h_k(\hat{x}_k^-, u_k))$$

$$P_k^+ = (I_{13 \times 13} + K_k H_k) P_k^- (I_{13 \times 13} + K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T$$

Estimación de la fuerza aplicada al robot:

$$\dot{U}_e = D_E^+ (\varepsilon_{y_y} + h_x(x_k^+) - h_x(x_k))$$

Nuevos valores en el modelado del ruido de los sensores

El filtro de Kalman es muy sensible a los valores de las covarianzas del ruido de las señales. Para su estudio se tomarán datos de los sensores, las variables derivadas de estos y serán analizados con MATLAB. Particularmente se analizarán las señales creadas por la odometría (posición y la orientación), la fuerza, el par, la velocidad angular, la aceleración angular, la velocidad lineal y la aceleración lineal. De estos análisis se formarán entre otras, las matrices R, Q del filtro de Kalman

Con el uso de la mejora referente a la introducción de un transformador en la red del laboratorio, Se redujo considerablemente el ruido eléctrico y los resultados mejoraron.

6.2 Reflexión de Fuerzas en el maestro

6.2.1 Medición de Fuerza de forma indirecta

El control de la fuerza juega un papel importante en el rendimiento y la versatilidad de los sistemas robóticos en entornos complejos que les proporcionan una respuesta inteligente en situaciones donde no hay visibilidad y permitiendo la interacción humano-robot [Ferre 2007].

El control de las interacciones físicas entre el robot y su entorno es crucial para la ejecución de tareas en el que el efector final del robot tiene que realizar tareas [Waldron 2003] o manipular objetos en una superficie. Otras aplicaciones que requieren control de la fuerza operaciones de montaje o de mecanizado. Una clasificación completa de las tareas que requieren control de la fuerza, incluyendo aplicaciones no industriales, es prácticamente imposible debido al gran número de ellos existente, así sería necesario no esta clasificación para desarrollar una estrategia para controlar la interacción con el ambiente [Rolfe 2007] [Suarez-Ruiz 2011].

El diseño de una tarjeta electrónica para la medición de corriente en los motores de maestros es una de las aportaciones de este trabajo para adquirir el reflejo de fuerzas en el sistema principal. El sistema maestro es operado por motores de corriente alterna de dos fases en cada uno de sus grados de libertad. Las señales de

corriente alterna se generan a través de una placa de adquisición de datos en tiempo real controlador (PXI) y posteriormente se amplifican en un amplificador de potencia para suministrar la corriente necesaria a los motores [López 2012].

En este trabajo se describe el diseño de un control de la fuerza económica en un sistema bilateral utilizando una aproximación bucle de corriente. De esta manera evitamos necesidad de sensores de fuerza / torque en cada dispositivo maestro conjunta; también incluye el diseño e implementación de una placa electrónica con sensores de corriente para analizar las ondas que comandan cada unidad conjunta.

La principal contribución de este trabajo se refiere al diseño del control escalable desde el control actual de la fuerza. El control de la fuerza juega un papel importante en el rendimiento y la versatilidad de los sistemas robóticos en entornos complejos que les proporcionan una respuesta inteligente en situaciones donde no hay visibilidad y permitiendo la interacción humano-robot [Ferre 2007].

En este trabajo se describe el diseño de un control de la fuerza económica en un sistema bilateral utilizando una aproximación bucle de corriente. De esta manera evitamos necesidad de sensores de fuerza / torque en cada dispositivo maestro conjunta; también incluye el diseño e implementación de una placa electrónica con sensores de corriente para analizar las ondas que comandan cada unidad conjunta.

La principal contribución de este trabajo se refiere al diseño del control escalable desde el control actual del control de la fuerza por ser también extensiva a otros tipos de control. La solución implementada en el hardware y el software de definir el control de la fuerza de un sistema de retroalimentación de fuerza teleoperación bilateral [Kawasaki 2003].

Esta solución ofrece una solución significativamente bajo costo y lo suficientemente precisa para dispositivos hápticos telemanipulación, en comparación con el uso de varios sensores de fuerza de cara / de par en cada máster Grados de libertad (g.d.l.), con el consiguiente incremento de los pesos indeseables e inercias que afectan directamente a la percepción del operador y de inmersión.

En las últimas tres décadas la investigación en el control de fuerzas ha avanzado significativamente debido al gran interés de dotar a los sistemas robóticos de información y capacidades sensoriales. Los sensores de tacto, fuerza, distancia junto con la realimentación visual permiten la operación autónoma en entornos no estructurados.

Desde de las primeras investigaciones en el área de teleoperación el uso de la realimentación de fuerza fue concebido para ayudar al operador humano a manipular objetos en un entorno remoto con un manipulador esclavo. Recientemente se vienen utilizando sistemas robóticos cooperativos consistentes en dos o más manipuladores apoyándose entre sí para la realización de las tareas.

El control de fuerza juega un papel muy importante en el comportamiento y versatilidad de los sistemas robóticos en entornos abiertos dotándoles de una respuesta inteligente en situaciones donde no hay visibilidad y permitiendo la interacción hombre-robot.

El control de la interacciones físicas entre el robot y su entorno es crucial para la ejecución de tareas donde el efector final del robot tiene que manipular objetos o realizar tareas en una superficie. Un ejemplo claro puede ser el pulido de una pieza recién pintada de un coche, donde la herramienta de pulido tiene siempre que estar en dirección normal a la superficie de trabajo. Otras aplicaciones donde se requiere el control de fuerza son operaciones de ensamblaje o mecanizado. Una clasificación completa de las tareas que requieren de un control de fuerza, incluyendo aplicaciones no industriales, es prácticamente imposible, debido a la gran cantidad de estas existentes, además de que no sería necesaria dicha clasificación para desarrollar una estrategia para controlar la interacción con el ambiente.

Diseño de una tarjeta para medir la corriente en los motores del maestro: la principal aportación de este trabajo fue la reflexión de fuerzas en el sistema maestro. Como se mencionó en el apartado de descripción de la plataforma de teleoperación, el sistema maestro es actuado por motores bifásicos de corriente alterna en cada uno de sus grados de libertad. Las señales de corriente alterna son generadas a través de una de las tarjetas de adquisición de datos del controlador de tiempo real (PXI) y posteriormente amplificadas en una etapa de potencia para suministrar la corriente necesaria a los motores.

Dado que el dispositivo maestro está equipado con motores bifásicos de AC que giran en un sentido o en otro dependiendo del desfase de las señales de entrada, el par será proporcional a la amplitud de la corriente.

Ilustración 57 - Señales de entrada al motor para controlarlo.

El controlador del sistema esclavo toma mediciones de la fuerza aplicada en cada una de las articulaciones por medio de unos transductores de presión instalados en el interior de los actuadores hidráulicos. La información de los sensores de presión se encuentra disponible en variables compartidas a través de Ethernet por medio del protocolo UDP.

Para reflejar y tener control sobre las fuerzas ejercidas en el dispositivo maestro la idea inicial fue medir la corriente directamente en cada una de las dos fases de cada motor. Un primer intento fue medir directamente el voltaje a través de los sensores de corriente que entregan a su salida un voltaje proporcional a la corriente que circula por cada una de las dos fases. Para obtener una realimentación de la fuerza en cada uno de los cinco grados de libertad disponibles en el dispositivo fueron necesarios diez sensores de corriente.

Ilustración 58 - Tarjeta para leer la corriente a través de los motores del dispositivo maestro

En esta sección se describe el control de la fuerza basada en el bucle de corriente. Para ello, es importante tener en cuenta los requisitos de control para este tipo de sistemas de teleoperación.

Requisitos del sistema de control.

El sistema desarrollado debe tener retroalimentación háptica en el dispositivo maestro por lo que la retroalimentación proporcionada para el usuario es el resultado de la interacción física con el medio ambiente a distancia [Ming 1989].

El usuario experimenta la información en una retroalimentación visual y táctil coherente. Centrándose en el sentido táctil, la retroalimentación de fuerza requiere una alta tasa de actualización para proporcionar no sólo una sensación realista, pero también para asegurar la estabilidad. Se considera que una actualización en tiempo real al menos 1 kHz. es necesaria para lograr una sensación háptica aceptable [Galiana 2012]. Sin embargo, los retrasos en la transmisión de fuerzas pueden causar inestabilidad en el sistema háptico no ser considerado en la etapa de diseño. Por esta razón, todo el hardware y el software añadido al sistema tiene que cumplir con este requisito en tiempo real [Hannaford 1991].

El realismo de la interacción entre el operador y el medio ambiente a distancia está influenciada por la transparencia del sistema. Si el sistema de teleoperación sería idealmente transparente de modo que los operadores se sentirían como si interactúan directamente con la tarea a distancia o virtual [Raju 1989]. De hecho, un sistema se considera transparente si la posición y la fuerza de las respuestas del maestro y del esclavo son idénticos, respectivamente, no importa lo que la dinámica de objetos son [Yokokohji 1992], o incluso, un sistema transparente requiere que la impedancia transmitida o "sentía" por el operador es igual a la impedancia del medio ambiente el operador humano está interactuando con [Lawrence 1993].

Pero lograr una transparencia perfecta, significa que los dispositivos hápticos deben tener ni la inercia ni fricción, y ancho de banda infinito. Desafortunadamente, estas características son inalcanzables y comprometen entre sí. Debido a esto, la transparencia del sistema teleoperado está muy influenciada por el algoritmo de control bilateral, por lo que un requisito obligatorio de un sistema de manipulación

a distancia funcional es asegurar la estabilidad del sistema para todas las circunstancias que puedan producirse durante la operación.

Para satisfacer estos requisitos, una arquitectura de red que procesa las señales y realizar los cálculos necesarios para el control de sistema en tiempo real. Esta arquitectura de control permite la conexión simultánea de sistemas en la LAN o Internet, lo que es ideal para permitir una arquitectura abierta que permite a los desarrolladores para desarrollar y probar sus aplicaciones o estrategias de control [Mallat 2009].

Control Fuerza basado en Control de Corriente

Para un sistema de teleoperación en tiempo real con la fuerza de respuesta es obligatorio contar con algún tipo de fuerza reflexión, para que el operador sienta el entorno remoto.

La mejor manera de poner en práctica esta es la adición de sensores de fuerza / par de torsión en todas las articulaciones, pero esta solución es costosa y presenta efectos negativos en la percepción operación y maniobrabilidad desde pesos e inercias debido a los sensores de disminuir el rendimiento del dispositivo maestro.

Otra opción menos precisa es la medición de la corriente de los motores para calcular el consumo y estimar el par en cada articulación mediante el uso de las curvas características del motor que se correlacionan esta a variables [Phillips 1972] [Blaabjerg 1999] [Berendsen 1993] [Sakata 2007]. Esta solución se aplica a nuestra Plataforma Abierta Telemanipulación, haciéndose necesario medir 2 ondas de corriente para cada motor estimando el par y también el sentido de giro del motor [Sen 1990] [Ryan 1995] [Matsui 1993].

El sistema controlador esclavo toma mediciones de la fuerza aplicada en cada una de las articulaciones por medio de transductores de presión instalados en el interior de los actuadores hidráulicos. La información relativa a los sensores de presión está disponible en variables compartidas a través de Ethernet a través del protocolo UDP.

Con el fin de controlar y reflejar las fuerzas ejercidas en el dispositivo maestro, se ha diseñado un placa electrónica con sensores de corriente, integrándola posteriormente en el sistema.

6.2.2 Diseño de la electrónica del sensor

Sensor de corriente

El diseño de la placa electrónica incluye el acondicionamiento de señal con el fin de convertir la corriente sinusoidal que fluye a través del motor en una tensión continua para ser capturado fácilmente por la tarjeta de adquisición de datos del controlador en tiempo real PXI.

Como se mencionó anteriormente, el sistema maestro se controla a través de dos señales de corriente alterna en fase para cada uno de los motores situados en sus grados de libertad actuados. El sentido de rotación depende de la fase entre ambas ondas que podrían ser $+ 90^\circ$ / -90° . El par y la velocidad del motor están directamente dirigidos por la amplitud de la tensión establecida en las salidas PXI, y también se calcula la carga y la corriente consumida, para después utilizarlo en la caracterización de los motores, y por tanto en el control de fuerza final.

Las ondas de los motores son señales de AC medidas a través del sensor de corriente colocado en una etapa previa a la tarjeta del controlador en tiempo real (PXI) y posteriormente se amplifican en un amplificador de potencia para suministrar la corriente necesaria para los motores.

Debido a que el dispositivo principal está equipado con motores de corriente alterna de dos fases que giran en una dirección u otra [Kraft Telerobotics], dependiendo de la compensación de las señales de entrada, el par es proporcional a la amplitud de la corriente.

Las tarjetas electrónicas diseñadas para el control en corriente, leen el valor RMS o valor efectivo de la corriente, dando a la salida un valor DC en un rango de $-10V$ a $+ 10V$. La negativa o positiva indica el sentido de giro del motor: levógiro o dextrógiro.

Implementación del control en LabView

Por último, una vez que las placas se han integrado en el sistema, el lazo de control se ha hecho en LabView, se ejecuta en tiempo real en los maestros gracias a los controladores PXI de National Instruments.

Para este control se necesitaba un poco de acondicionamiento de señal ya que los valores de la placa del sensor tiene un ruido de alta frecuencia, y también un ruido blanco que se amplificaba cerca del valor cero (cuando los motores no están en movimiento), e incluso también afecta a la recepción de los valores de las curvas en su paso por cero. Los filtros que reducen el ruido de las señales se han situado antes de los controladores PID.

El control PID de lazo de corriente ha resultado ser sólo un PI, con una acción integral muy baja para la corrección del error, este error es producido principalmente por los componentes reales de los sensores que no captan la onda sinusoidal de la misma manera cuando es positiva que cuando es negativa.

La conversión del control en corriente a un control en fuerza se lleva a cabo a través de las curvas extraídas de la prueba de par. Se han caracterizado todos los motores obteniendo sus curvas aproximadas, que han resultado ser modelados linealmente a partir de rectas, y añadiendo estas ecuaciones directamente a través de bloques en el bucle de control actual, se consigue una conversión directa entre potencia consumida, a partir de la tensión y corriente medidas, y el par ejercido por el motor.

Para verificar el correcto control en fuerza se han realizado algunas pruebas experimentales con el fin de validar los modelos de motor y la retroalimentación de fuerza basada en el control de bucle de corriente.

A. Lazo de corriente.

Algunas pruebas se llevaron a cabo la medición de la corriente y la aplicación del control PID. Durante varios rangos de valores de entrada, se aplicaron distintos valores de fuerza al maestro a la par que se medían con un sensor ATI de fuerza/par.

El PID realiza un buen control, manteniendo el valor actual estabilizado en el valor nominal de trabajo actual. la ganancia proporcional y de la acción de control derivativa se fija para tener la respuesta más rápida sin rebasamiento, y se requiere algún tipo de acción integral para evitar el error de estado estacionario. El tiempo de estabilización fue establecido finalmente en 2 ms en todos los motores, ya que este retraso no introduce ninguna inestabilidad en este sistema de 1kHz.

Se han calculado los cinco reguladores PI en cada dispositivo maestro, ya que todos los motores tienen diferentes curvas características (aun siendo muy similares) y también debido a la influencia de las diferencias de los equipos electrónicos de medición en cada articulación. Por ello los valores PI son ligeramente diferentes en cada articulación. Esto significa que la calibración del bucle de control para las placas de sensores tiene que ser calculado de forma independiente en cada articulación motor si se desea aplicar esta metodología a un nuevo dispositivo maestro.

B. Caracterización de motores

Como se mencionó en la sección anterior, es necesario extraer las curvas de los motores para hacer una correcta relación entre control de bucle de corriente y el control en Fuerza.

La figura muestra una de las configuraciones que se llevaron a cabo en esta etapa para encontrar la relación entre la corriente que fluye a través del motor y el par ejercido por el eje del motor. El montaje utiliza un sensor de fuerza ATI® SI-130, que permite la medición de la fuerza y de par en seis ejes con su carga de varios ejes celular. El sensor tiene un sistema de adquisición de datos inteligente que se puede acceder a través de una interfaz Ethernet / DeviceNet, y puede manejar fuerzas de hasta 130 N en todos sus ejes, lo cual resulta suficiente para nuestros propósitos que es manejar un dispositivo háptico. La fuerza está directamente relacionada con el par dividido por la distancia al eje SA, en un dispositivo háptico no interesa que las fuerzas muy grandes para evitar el cansancio del operador.

Ilustración 59 - Montaje para la caracterización de curvas Tensión-Corriente-Par en la articulación SA

La obtención de modelo de curva cuadrática entre la entrada de corriente y el par en la salida es la manera de obtener directamente el par de torsión de la medición actual. Por supuesto, cada motor tiene su propio modelo, así que tienen que ser calculado nuevamente de forma independiente para cada articulación.

En la figura anterior se muestra la puesta a punto para la medición de los pares en una de las articulaciones del maestro. La siguiente figura muestra las curvas de la corriente y la fuerza obtenidos a partir de esta prueba en el motor SA. En este ejemplo ambas curvas presentan un área de estabilización más de 1000 ms, debido al límite máximo de sensores de corriente. También hay algo de oscilación en la curva de la fuerza debido a la electrónica de KRAFT telerrobótica que construyen las olas actuales para controlar los motores como sus juntas no hacen una conversión lineal de la amplitud.

Ilustración 60 - Curvas de Corriente-Par para la articulación SA

El desarrollo del bucle de control de fuerza sólo tiene que añadir el modelo de par de torsión actual obtenida en el paso anterior en el bucle de corriente para cada uno de los motores. De esta manera podemos establecer un control de consigna de par mediante el control de corriente a través de las placas de sensores.

La forma de hacerlo es introducir los modelos en el software de control implementado en LabView, justo antes de lazo de control para transformar las unidades de punto de ajuste y la función inversa correspondiente en lazo cerrado. Desde el exterior funciona como un bucle de control de fuerza, como hemos establecido un par para el motor (la fuerza depende de la distancia desde el eje par

aplicado) y comparar el par transformado de la medición actual. Pero internamente que todavía tiene el bucle de corriente y las transformaciones del modelo de curvas características del motor.

6.2.1 Mediciones fuerza-corriente

Para encontrar la relación entre la corriente que fluye por el motor y el par ejercido por el mismo se decidió montar un experimento y obtener mediciones. Para ello se utilizó el sensor de fuerza ATI®SI-130, asignándose valores de corriente a través de los motores a cada par y así encontrar una relación aproximada entre el par y la corriente consumida.

El sensor ATI ®permite mediciones de par y fuerza en seis ejes gracias a su celda de carga multieje. El sensor cuenta con un sistema de adquisición de datos inteligente al que se puede acceder a través de una interfaz Ethernet/DeviceNet.

Para realizar la adquisición de datos fue necesario crear una interfaz en LabView para capturar de manera paralela las lecturas de los sensores de corriente y la información acerca de la fuerza en un eje del sensor ATI.

El VI diseñado está encargado de establecer una conexión Ethernet entre ambos dispositivos y capturando los datos en un archivo .mat de Matlab, para posteriormente hacer el tratamiento de los mismo y hacer un ajuste de curva.

Ilustración 61 - Montaje del sensor fuerza/par en el extremo para validación de modelos corriente-par.

Modelo del motor Corriente-Par: con los datos obtenidos a partir de las mediciones del experimento se obtuvo un ajuste de curva usando Matlab. El eje de las X es el tiempo transcurrido durante el experimento mientras que el eje de las Y corresponde a los valores obtenidos de ambos sensores.

A partir de una aproximación por mínimos cuadrados se encontró la ecuación que relaciona la fuerza de los motores con la corriente, obteniendo que la diferencia entre el modelo lineal y el modelo cuadrático no es significativa, con lo cual es preferible usar el modelo lineal para simplificar el control.

Bucle de Control en Fuerza

Para la reflexión de fuerzas en el maestro del manipulador Grips se propone el uso de un regulador proporcional integral con las siguientes ganancias:

$$K = 3;00 \quad T_i = 0;001s \quad dt = 0;001s$$

Finalmente se realizaron algunas pruebas de medición de la fuerza con el sensor de ATI y la aplicación de diferentes estímulos externos al dispositivo, al configurar diferentes consignas de par.

Los resultados fueron un control correcto con muy poco y asumible error entre la estimación de fuerza y los valores medidos con el sensor de ATI. Esto se debe principalmente a los diferentes componentes electrónicos usados que introducir varios errores de la resolución y también de que no tienen una respuesta lineal perfecta.

Añadiendo también la oscilación debido a las placas generador de onda de corriente de KRAFT que los motores utilizan, todos estos efectos produce algún error que oscila entre el par medido en el sensor de ATI y el par calculado a través de la retroalimentación de corriente. Este error es siempre menor que 5% del valor medio del par: esto significa que, por ejemplo 100N manejo hay un error máximo de 5N, aunque ser humano podría percibir esta variación, que no es muy significativa [Jones 2006] [Ferre 2012], se podría considerarse como insignificante en la mayoría de las aplicaciones de teleoperación; pero puede ser esta solución no sería adecuado para aplicaciones con requisitos muy precisos y diestros teleoperación. Para el control de la fuerza de propósito general se puede concluir que el control PID aplica para forzar votaciones se implementa con éxito, tener una buena respuesta y la estabilización de los valores de consigna de fuerza / torque, sin añadir

peso en cada articulación accionada debido a los sensores caros fuerza / torque necesarios para el bucle de control de fuerza / par de torsión.

6.3 Inmersión multimodal

En este apartado se aplican estímulos multimodales para aumentar la inmersión del usuario. De esta forma se evaluará mediante experimentos los efectos de las señales hápticas, auditivas y visuales tienen sobre el operador durante la teleoperación.

Para que un entorno sea lo más inmersivo posible ha de ser multimodal. Como ya se explicó en el Capítulo 2, el ser humano recibe estímulos a través de sus cinco sentidos, pero cuando manipula objetos la información más relevante para el usuario es la visual, auditiva y háptica [Zhou 2007], [Widmer 2010], [Hecht 2006], [Bresciani 2008], [Kuschel 2010], [Ruffaldi 2008], [Tenzer 2008], [Cogollor 2012]. Ya que la capacidad de procesar señales correlacionadas con la manipulación de objetos es crucial para la percepción coherente y acción en entornos físicos y virtuales [Widmer 2010], [Frisoli 2011].

Por ejemplo, si estamos tocando un piano es necesaria una correlación temporal entre el sonido y el estímulo de pulsar la tecla, en el supuesto caso de que no podamos escuchar los sonidos la forma de realizar la tarea es totalmente diferente, puesto que aumenta la probabilidad de error y disminuye el rendimiento. [Bresciani et al. 2008] [Diederich et al. 2004] [Fort et al. 2002b] [Frassinetti et al. 2002] [Hecht 2009] [Hecht 2008].

Slater sugiere que cuanto más multimodal es un entorno simulado, mayor es la credibilidad de los eventos por parte del usuario, aumentando las contingencias sensomotoras entre el entorno real y el entorno virtual [Slater 2009], haciendo que la sensación realista en dicho entorno aumente cuanto más multimodal sea [Bimboin et al, 2009], esto producirá un mayor rendimiento en la realización de la tarea [Hecht 2006]. Incluso las respuestas humanas son más rápidas cuando los mecanismos nerviosos reaccionan ante estímulos multimodales en comparación con las reacciones a estímulos unimodales. Esto implica que esos mecanismos neuronales subyacentes se aceleran ante interacciones multimodales, aumentando por tanto el rendimiento en el tiempo de respuesta [Birnboim, 2009].

Ernst y Banks [Ernst 2002] propusieron una aproximación teórica mediante un modelo probabilístico para modelar combinaciones de estímulos, asumiendo que todos los estímulos visuales, auditivos y hápticos que aparecen simultáneamente se

correlacionan con un determinado evento, de la misma forma que el sonido, el tacto y la vista se correlacionan para tocar el piano. Esto se puede explicar ya que cada estímulo por sí solo es una perturbación a analizar para extraer su significado y lo que implica para reaccionar en consecuencia, sin embargo con una combinación de estímulos la incertidumbre será menor ante el ruido. Ernst utilizó estadísticas Bayesianas para explicar como el ser humano percibe y responde al entorno [Ernst, 2002].

En la mayoría de los estudios multisensoriales, los estímulos se sincronizan tanto en el tiempo como en el espacio, las respuestas que deben realizar los estudios suelen ser tareas muy sencillas cómo pulsar un botón o tocar un objeto. [Bresciani et al, 2008] [Diederich et al , 2004] [Fort et al, 2002b] [Frassinetti et al, 2002] [Hecht 2009] [Hecht et al, 2008]. Sin embargo las tareas implicadas en la teleoperación no suelen ser tan sencillas, por ello, al contrario que en estudios previos [Hecht 2006], en este estudio se comprueban los tiempos de respuesta de diferentes usuarios realizando una tarea relativamente compleja, durante la cual, los usuarios deben responder ante estímulos uni, bi, tri-modales en un entorno completamente controlado.

La tarea requerirá la utilización completa de las extremidades superiores además de la destreza del operador para la realización de una inserción de una pieza en otra.

6.4 Experimentos

6.4.1 Pruebas de Estimación de Fuerzas

- Limitaciones del sistema real

Como se ha mencionado antes, a continuación se muestra una lista de las diferencias entre el sistema simulado y el sistema real:

- Las pruebas han sido realizadas con el controlador a 1 kHz, y a 200 Hz la IMU por limitaciones de su hardware. Hubiese sido conveniente tener el sensor inercial a la misma frecuencia que el controlador que es la óptima para la teleoperación del robot [Ishii 2007].
- Mayores errores y retrasos de los esperados en la lectura de los sensores, especialmente del sensor inercial. Esta cuestión será estudiada más en detalle en el siguiente apartado.

- Mayor ruido del esperado en un primer momento de todo el sistema en general, que posteriormente se mejoró con la instalación de un transformador para el aislamiento del resto de la red de los equipos del laboratorio
- Comportamiento anómalo de la articulación WR. Ocasionalmente el último grado de libertad del robot puede producir pequeños reposicionamientos y oscilaciones durante la teleoperación. De la misma forma, durante esos momentos y durante un periodo de tiempo aleatorio, arroja valores de odometría confusos.

Medida de los retardos en los sensores

En teleoperación uno de los aspectos cruciales son los retardos entre el operador y el manipulador. Hay numerosas técnicas y métodos para mejorar este problema si llega a ser de gran importancia o necesidad, pero primero se debe conocer la situación del sistema mediante estudios diversos.

Aunque los retardos de tiempo se pueden presentar en diversos lugares por diferentes causas (tanto en el propio estado como en las entradas del sistema), la implementación de este conjunto hace que los principales puntos de retraso sean los sensores. Otros factores como la comunicación o retrasos dentro del algoritmo se despreciarán al ser órdenes de magnitud inferiores a los tiempos de retraso de los sensores.

Por tanto, para comprobar la estabilidad y fiabilidad del algoritmo, es necesario conocer la respuesta temporal de los sensores, ya que es una de las limitaciones que ha afectado al comportamiento del sistema.

Los primeros prototipos del algoritmo reflejaron unos retrasos desmesurados que rondaban los 900 ms, cosa que es absolutamente inaceptable para un sistema de teleoperación. Para reducir el gran retraso existente, se tuvieron que tomar una serie de medidas adicionales que no estaban contempladas inicialmente, como son:

- Reprogramación de la placa de Arduino para reducir el flujo de paquetes e información enviada hacia el ordenador.

- Reprogramación de la lectura del puerto serial a través de LabView. En ocasiones los paquetes de datos no se leían correctamente, lo cual producía una pérdida de información e inestabilidad.
- Cambios en el método de intercambio de variables entre los diferentes programas para la transferencia de datos. Esto incluía una gestión diferente de las variables locales y métodos de escritura en ellas.
- Eliminación o sustitución de determinados filtros empleados durante el algoritmo.
- Cambio de la placa de Arduino UNO, por otra con mayores prestaciones, que en este caso se eligió finalmente la placa Arduino MEGA.
- Modificación parcial de la entrada de datos del sensor inercial.

Finalmente los cambios producidos han mejorado las estimaciones iniciales y se ha conseguido unos resultados apropiados para las lecturas de los datos, cuyos resultados se muestran a continuación, separando las distintas formas de obtención de cada dato para tener una visión de conjunto de los retrasos de las señales. En principio, tan sólo se mostrarán unas pruebas para conocer los valores de tiempo de retraso aproximados, sin entrar en estudios excesivamente detallados y elaborados.

Corrección de la posición de la muñeca

El modo por el cual la mano robótica se acopla al extremo de la muñeca del robot real difiere de los modelos previamente calculados. El sistema mecánico de sujeción añade un elemento intermedio extra (que modifica la distancia e inercia de la muñeca) y además las restricciones de los anclajes entre la mano y el disco intermedio, impiden la alineación correcta de la mano respecto al resto de robot.

Estas variaciones requieren de un incremento longitudinal de la medida de la muñeca de 1,1 Cm y otro ajuste de una rotación de 0,36 radianes del valor de la articulación WR.

Test de Validación del algoritmo:

Se han realizado 40 test combinando diferentes pesos, posiciones y movimientos para la validación de la anulación completa y absoluta de las partes dinámicas y estáticas del movimiento del robot no es siempre posible con la configuración actual disponible y requeriría mejoras en el propio sistema robótico y en los

sensores, esto se debe a que una articulación en concreto, la SA, da problemas debido a las mangueras hidráulicas del robot que no se han considerado en el modelo inicial y ofrecen una resistencia al movimiento de la articulación.

De la misma forma, tampoco es necesaria la supresión total de las partes estáticas y dinámicas (basta una atenuación de las componentes no deseadas), ya que los sistemas maestros de control no pueden reflejar fuerzas de valores muy reducidos. Adicionalmente durante el control de un robot esclavo, una ligera percepción de la inercia puede resultar beneficiosa para la inmersión en la realización de la tarea a un operador, ya que ayuda a diferenciar cuando existe movimiento.

Tras el análisis de las pruebas y de los datos registrados, queda hacer una valoración general de todo el sistema real, atendiendo a su comportamiento y los resultados obtenidos. También hay que tener en cuenta las conclusiones extraídas con los ensayos sobre el sistema simulado, aunque estas no tengan la misma importancia que el sistema real y que no fuesen concluyentes en un primer momento. De esta evaluación general se pueden extraer una serie de conclusiones:

El algoritmo puede trabajar a mayores frecuencias, recomendables para teleoperación. Aunque finalmente las pruebas del sistema real se han realizado a 100 Hz en el principal bucle de control, se podrían haber realizado también a 200 Hz, aunque con cierta inestabilidad por parte de la IMU. Al margen de esto, los datos de las simulaciones han sido procesados a 500 Hz sin ningún problema, por tanto el algoritmo implantado no tiene un problema de excesiva computación ni memoria consumida.

Diferencia entre los resultados obtenidos por las simulaciones y el sistema real. Una de las conclusiones que se pueden alcanzar tras los ensayos sobre el sistema real, es la presencia de diferencias en el comportamiento de un mismo algoritmo ante la introducción de los datos de un sistema simulado y de un sistema real. Las diferencias entre ambos remarcaadas anteriormente, parecen influir en el desarrollo general del algoritmo. El cúmulo de diferencias finalmente crea una situación en la que no es posible la obtención de idénticos resultados. Hay que mencionar que los datos de las simulaciones no ofrecen la posibilidad de analizar todas las situaciones deseadas, por la limitada disponibilidad de los datos.

El sensor inercial es un cuello de botella para los retrasos y frecuencia del sistema. El comportamiento dinámico de todo el sistema respecto a los retrasos podría ser mejorado con modificaciones en la parte del sensor inercial, ya que el retraso en las lecturas del sensor y su limitación en la frecuencia de trabajo, perjudican y lastran al resto del sistema.

El retraso del flujo de datos de la IMU puede ser reducido enormemente utilizando un nuevo dispositivo que ofrezca las prestaciones necesarias o rediseñando el método de lectura del actual sensor. Esto último podría ser posible con el uso de un Arduino junto con una ampliación de Ethernet, ó con lectura de valores a través de otro dispositivo como por ejemplo una Raspberry Pi.

Los resultados de una aplicación de una fuerza externa son estimados correctamente. El algoritmo realiza todas las estimaciones de fuerza producidas por una aplicación externa de forma acorde a la esperada, es decir, con el robot inmóvil el algoritmo refleja los valores registrados por el sensor de fuerza compensando de forma precisa las partes estáticas de las mediciones del sistema. Si además se ejecuta un movimiento, los valores de fuerzas y pares externos presentan perturbaciones, pero siguen manteniendo los valores esperados.

Algunos movimientos son compensados peor que otros. Analizando las gráficas de los ensayos cabe señalar que algunos movimientos y en especial los movimientos que requieren del uso de la articulación SA, tienen una peor compensación que otros movimientos, llegando solo a una atenuación de un 30% en los peores casos. Este peor comportamiento es indiferente de aplicación o ausencia de carga aplicada. El resto de componentes tienen una atenuación entre el 60 y el 100% de los valores no deseados.

Uso a día de hoy para teleoperación: Ante esta afirmación, hay que reconocer que aunque se podría encontrar alguna aplicación directa, aún se necesita más trabajo para perfeccionar el sistema. Además el factor crucial de la frecuencia del lazo de control lo hace ineficiente para labores muy exigentes de teleoperación.

6.4.2 Pruebas del control de fuerza en el maestro

Se ha diseñado una placa electrónica para medir las corrientes de cada articulación con el fin de cerrar los lazos de control. Esta placa proporciona información sobre el consumo de corriente y la dirección de rotación en cada accionamiento del motor.

El control de la fuerza sobre la base de lazo de control actual se ha desarrollado, calibrado correctamente y ha integrado en una plataforma abierta teleoperación. Los reguladores PI se aplican al control en corriente y la fuerza de respuesta se regula con éxito, con un buen seguimiento y con la estabilización de los valores con un ligero error respecto valor a controlar.

Este control de la fuerza de bajo costo proporciona una buena retroalimentación háptica para el operador, ya que en tareas de teleoperación al haber un man-in-the-loop, el humano suele tener una percepción limitada y no notaría unos incrementos inferiores al 5%, sin embargo esta tecnología no es adecuada para aplicaciones que requieren error de menos de 5% en el control de bucle fuerza.

Otra de las ventajas de esta tecnología es evitar poner sensores de fuerza en las articulaciones del dispositivo maestro, con lo que no sacrificará la maniobrabilidad del maestro ni la inmersión del operador, ya que masas e inercias añadidas al sistema perjudicarían su percepción.

6.4.3 Experimentos de reflexión de fuerza

Se han hecho pruebas con distintos usuarios levantando una caja muy pesada y escalando la reflexión de fuerza que sentían en el maestro de Grips.

Los usuarios no expertos han calificado la experiencia como muy realista. Los más expertos han criticado la maniobrabilidad, pues al percibir el peso se va restando eficacia en la tarea, esto se debe al cansancio de estar soportando el peso constantemente.

Tras varios experimentos se ha visto que las cargas más adecuadas y dependiendo de las preferencias de cada usuario, para teleoperar normalmente y sentir el peso lo han fijado entre 200 gr. y 500 gr. Se ha observado que puede estar relacionado con

la capacidad de fuerza de los sujetos, siendo los que menos aguantan los que tienden a ir a percepciones de peso inferiores.

Estos valores tienen una relación importante con el cansancio del sujeto y el tiempo que prevee estar realizando la tarea de manipulación, se observó también que los usuarios con más peso acusaban un cansancio previo a los que realizaban las tareas repetitivas con menos peso inicialmente. No obstante, también cuando se realizaban tareas repetitivas sin reflexión de fuerza, simplemente moviendo el dispositivo maestro, los usuarios percibían cansancio debido a la repetitividad de las operaciones y porque al realizar una tarea de manipulación con una herramienta como es un robot manipulador hay que concentrarse porque no se hace de forma natural, esta concentración exige al cuerpo realizar fuerza en los miembros superiores para afinar la destreza, con lo que al cabo del tiempo se traduce en cansancio y molestias.

Otro factor que influye en el cansancio también es las inercias del dispositivo maestro, pues aunque tenga compensación de pesos, hay que estar constantemente trasladando una masa.

Respecto a la maniobrabilidad de la reflexión de fuerzas que los usuarios expertos criticaban se debe a que la destreza del individuo disminuye conforme tenemos un peso mayor puesto tenemos que ir convirtiendo el agarre de destreza en agarre de potencia para transferir fuerza al maestro y poder levantar el objeto pesado.

6.4.4 Experimentos de estímulos multimodales

Para la realización del experimento se utilizará la Plataforma Abierta de Teleoperación comentada previamente, utilizando para ello los maestros y esclavos del Grips, la visión estereoscópica y un multímetro que proporcionará señales auditivos cuando se produzca contactos entre piezas.

Este experimento ha sido diseñado para medir el tiempo de reacción de los participantes. Para ello la forma de proceder será la siguiente:

- 1) El usuario parte de una posición inicial predeterminada.
- 2) Cuando recibe un estímulo tiene que ir hacia un disco de pesa y cogerlo.

- 3) Deberá insertar el disco por su orificio central en un vástago, cuando el disco toque el vástago recibirá estímulos informativos de que hay contacto entre las piezas para la inserción.

Ilustración 62 - Experimento de multimodalidad: operador esperando al estímulo con el robot en la posición inicial, y punto de vista del operador.

Los distintos estímulos que tendrá el usuario podrán ser:

- a) auditivo: mediante guiado mediante instrucciones para realizar la inserción, y señales auditivas de tipo beep para indicar el estímulo.
- b) visual: mediante una cámara estereoscópica y una pantalla 3D que ofrecen visión estéreo del entorno remoto, y una señal luminosa de una bombilla para indicar un estímulo.
- c) háptica: la información de reflexión de fuerzas de pesos y colisiones a través del dispositivo maestro Grips, y una vibración para indicar estímulos.

En el experimento participaron 16 personas de ambos sexos, comprendidas entre 32 y 36 años con perfiles profesionales variados totalmente diferentes a la robótica, y que nunca han manejado ningún dispositivo de teleoperación, ni interfaz háptica.

Cada usuario realizará la prueba descrita anteriormente en repetidas ocasiones según este orden detallado, primero con la mano de destreza dominante y después con su otra mano (este orden se ha definido según el nivel de dificultad de cada una de ellas):

- 1) Realización de la tarea de forma manual directa.

- 2) Tres intentos con visión directa como entrenamiento inicial.
- 3) Estímulo bimodal Visual-Háptico (VH).
- 4) Estímulo trimodal Visual-Háptico-Auditivo (VHA).
- 5) Estímulo bimodal Visual-Auditivo (VA).
- 6) Estímulo unimodal Visual (V).
- 7) Estímulo bimodal Háptico-Auditivo (HA).
- 8) Estímulo unimodal Auditivo (A).
- 9) Estímulo unimodal Háptico (H).

Conviene aclarar que en el entrenamiento inicial del paso 2, se realiza sin realimentación de fuerzas ni estímulos auditivos, y en cuanto a la parte visual se realiza mediante visión directa y no a través del sistema de visión estereoscópica descrito anteriormente; de esta forma se pretende que el usuario se familiarice con el sistema mediante un breve aprendizaje que no condicione el resto de pruebas.

Además después de la realización de las pruebas se les entregaba un breve cuestionario cuyas preguntas se detallan a continuación:

Puntúa de 0 a 10 las siguientes preguntas:

1. El sistema resultaba fácil de utilizar:
2. El sistema era confortable:
3. El aprendizaje me resultó rápido:
4. Después de un tiempo, olvidé que estaba utilizando un dispositivo:
5. Puntúa el realismo de las fuerzas táctiles respecto la realidad:
6. Puntúa la utilidad de las fuerzas táctiles en la realización de la tarea:

Ahora contesta a las siguientes preguntas:

7. ¿Qué estímulo te ha resultado imprescindible?
8. ¿Qué estímulo bimodal te ha ayudado más en la tarea?
9. ¿Qué estímulo era más fácil de percibir?
10. ¿Qué estímulo resultaba más difícil de percibir?
11. Respecto a la inmersión, que combinación de estímulos prefieres:
12. ¿Habías utilizado con anterioridad algún sistema de teleoperación?
13. ¿Habías utilizado con anterioridad algún dispositivo háptico?
14. ¿Añadirías algo al sistema para que sea más fácil e intuitivo?
15. Cómo te sientes: Zurdo 0 1 2 3 4 Ambidiestro 6 7 8 9 10 Diestro.
16. Algún problema de movilidad/percepción reseñable:
17. Algo que creas conveniente comunicarnos:

5.1.3. Resultados

Realizando análisis estadísticos de los datos se extrajeron diversas conclusiones:

Tabla 13 - Valores medios de tiempos de respuesta ante estímulos

Estímulo	Brazo Dominante (ms)	Desviación Típica (ms)	Brazo NoDominante (ms)	Desviación Típica (ms)
A	683,4	169,7	723,7	227
V	679,6	172,4	715,9	185,9
H	512	142,3	550,5	194,8
HA	408,1	176,8	452,5	160,4
VA	639	186,4	651,7	208,1
VH	356,4	158,7	378,2	193,5
VHA	354,9	149,6	367,3	188,9

La respuesta ante estímulos de aviso o alerta que incluyen la componente háptica era mucho menor que cualquier otra.

La respuesta ante información visual para la consecución de la tarea no es imprescindible con un guiado adecuado, pero influye considerablemente en el rendimiento.

El tiempo de respuesta a un estímulo háptico era significativamente menor que el tiempo de respuesta a un estímulo auditivo, visual o auditivo-visual.

Ilustración 63 - Relación de tiempos de respuesta para estímulos unimodales, bimodales y trimodales. A=Auditivo, V=Visual, H=Háptico. Con mano no dominante (nd) y dominante (d)

La estimulación bimodal con señal háptica (audio-háptico y visual-háptico) lleva a respuestas temporales significativamente más rápidas con respecto a exclusivamente estimulación háptica. Como consecuencia, el tiempo de reacción ante estímulos háptico-auditivos fueron más rápidos que a estímulos unimodales hápticos, y el tiempo de respuesta ante estímulos Háptico-Visuales resultó ser menor que para estímulos hápticos.

Además, el tiempo de respuesta medio ante estímulos trimodales háptico-auditivo-visuales fue menor que ante estímulos hápticos.

No se encontraron diferencias significativas entre los tiempos de respuesta con estímulos trimodales y bimodales: auditivo-háptico, o visual-háptico. Aunque en este caso la mayoría de usuarios indicó que el trimodal ofrecía mayor inmersión e información de cara a la teleoperación, con lo que les parecía más útil.

Tampoco se encontraron diferencias significativas entre los estímulos auditivos y visuales, pero sí que se observaron diferencias entre la estimulación bimodal audio-visual y la estimulación unimodal auditiva o visual.

Ilustración 64 - Tiempos de respuesta para estímulos unimodales, bimodales y trimodales.
A=Auditivo, V=Visual, H=Háptico

Las diferencias entre las respuestas obtenidas con la mano izquierda o derecha no fueron significativas en cuanto al tiempo de reacción ante estímulos de aviso, aunque si lo fueron respecto al tiempo de consecución de la tarea, esto se achaca

sobre todo a la destreza necesaria para la inserción del vástago, ya que existe una correlación entre el tiempo de consecución y la puntuación de destreza en cada mano por parte del usuario.

Resulta interesante que la mayoría de usuarios prefiere el estímulo trimodal de los participantes respondió que fue el estímulo trimodal, mientras que 3 usuarios preferían la combinación bimodal visual-auditiva,

6.5 Discusión de los resultados

Estos resultados muestran la evidencia de una ventaja en el procesamiento mental para las señales con componente háptica cuando se está manipulando objetos. En estudios previos ya se había comprobado que se producen respuestas temporales más rápidas ante estímulos bimodales para señales visual-Auditiva [Fort et al, 2002], [Doyle 2001] y para señales Háptico-Visuales [Honore 1989] [Forster et al, 2002].

En otro estudio anterior realizado por Galiana en [Galiana 2013] ya se extendieron estos resultados a combinaciones trimodales Háptico-Auditivo-Visuales para estímulos percibidos durante agarres realizados con las manos; secundando los estudios de Birnboim [Birnboim 2009] que encontró que las interacciones trimodales comienzan incluso antes de 30 ms en comparación con las bimodales que lo hacen entre los 40ms y los 80ms [Honore 1989], [Frassinetti 2002], [Fort 2002].

En los experimentos de telemanipulación realizados en esta tesis se amplía la relevancia de la información multimodal que recibe el operador para la manipulación, tanto en términos de inmersión en el entorno remoto como en el rendimiento para la correcta realización de la tarea.

La diferencia radica en considerar diferentes tipos de estímulos, aquellos cuya función es la de alertar al cuerpo de una determinada situación que cambia en un determinado instante, de aquellos que proporcionan información del entorno durante la realización de la tarea. Por ejemplo, en los primeros podríamos englobar las situaciones de colisión/no colisión en las que un estímulo nos indica el cambio de estado; en las segundas estaríamos manipulando dentro de un estado y

controlando una determinada variable a través de un sentido, como la posición del objeto al transportarlo hacia el vástago mediante la vista cuando no hay colisión, o el control de fuerza en la colisión cuando intentamos introducir el vástago en el disco mediante el tacto.

Los resultados citados anteriormente sugieren que la estimulación háptica lleva a respuestas temporales mejores en situaciones en el que el estímulo se toma como una información que estamos esperando, como una señal de alarma. Sin embargo, en cuanto a la información que recibimos de la manipulación el sentido de la vista cobra más importancia tratándose de información unimodal.

Si bien hablando de manipulación multimodal la combinación de los tres sentidos es la que cobra más importancia al tener más información del entorno, pudiendo percibir mejor el entorno. En el caso de la manipulación la realimentación táctil cobra más importancia que la auditiva puesto que nuestro cerebro está controlando los miembros superiores y en el intercambio de información con ellos es más relevante el tacto para la percepción de fuerzas, sin menospreciar a la información auditiva que permite salvar obstáculos en algunas situaciones en las que por ejemplo la percepción visual y háptica no ofrecen toda la información necesaria del entorno.

La importancia de la reflexión háptica cobra sentido y adquiere mayor importancia que la visual y la auditiva en los momentos que se producen contactos entre cuerpos para poder percibir, analizar y controlar las fuerzas con las que se están trabajando. Esta información es relevante en la manipulación para evitar fuerzas indeseadas que puedan perjudicar tanto al entorno como al esclavo o incluso que puede depender la correcta consecución de la tarea.

La acción de "manipular" es de carácter único: es a la vez un acto de control del motor, y está relacionado con el procesamiento cognitivo, situándose a niveles superiores en la cognisciencia, como otras actividades superiores como el habla o la representación numérica. [Olivier 2007], [Ehrsson 2000], [Begliomini 2007], [Castiello 2005] , [Jeannerod 1995]. En [Davare 2007] se demuestra que la dominancia hemisférica izquierda no sólo se refiere a los procesos de alto nivel como las interacciones mano-herramienta, y también se aplica a los aspectos más

elementales de movimientos, como la representación de la dinámica de objetos, que participan en la manipulación descrita en estos experimentos. Además dependiendo de la subtarea que se esté realizando en cada momento cambia considerablemente la importancia de cada sentido y la información que a través de él se proporciona, por tanto en teleoperación se debería considerar la introducción de estímulos trimodales para que el cuerpo se adapte a cada determinada situación tal y como lo haría en la realidad.

En cuanto a la percepción de estímulos se ha observado que no depende de si se trata del lado dominante, la velocidad de reacción es independiente de este valor. Sin embargo la destreza del miembro dominante/no-dominante influirá directamente en la consecución de la tarea tal y como lo reflejan los tiempos. Podemos por tanto afirmar que los tiempos de reacción a través de las redes neuronales y la respuesta comandada por nuestro cerebro es independiente, sin embargo el dominio que tengamos sobre el miembro dominante/no-dominante sí que influye debido a la precisión con que nuestro cuerpo está acostumbrado a trabajar con dicho miembro: en los resultados se podía observar cómo la diferencia de tiempos entre ambos miembros era directamente proporcional a la valoración que el usuario puntuaba sobre la destreza de sus miembros derecho e izquierdo.

CAPÍTULO 7

RECONSTRUCCIÓN DE ENTORNOS TRIDIMENSIONALES

En este capítulo se presenta una tecnología de reconstrucción de entornos no estructurados para teleoperación.

Esta solución permite recrear un entorno virtual remoto a partir de un punto de vista fijo de una cámara RGB-D, obteniendo una superficie virtual tridimensional que puede ser visualizada con visión binocular desde puntos de vista diferentes al de la cámara.

El operador acomoda el punto de vista a una localización óptima en cada instante, pudiendo manipular con más naturalidad durante el transcurso de la tarea.

7.1 Tecnologías Visuales para inmersión.

La realimentación visual de imágenes es un punto crítico que condiciona el rendimiento de un sistema teleoperado [Marín 2002]. El robot de telecirugía daVinci [Nguan 2008] es un buen ejemplo de un sistema teleoperado que realiza tareas de manipulación sólo con realimentación visual estereoscópica. Esto es debido a que las imágenes de los tejidos deformándose aportan más información que las débiles fuerzas de interacción que se producen. Entonces consideramos entornos en los que se manipularán objetos rígidos, en los que se producen deformaciones mínimas, pero en cualquier caso la información visual es fundamental para la correcta ejecución de las tareas.

No existe un consenso sobre la utilización de imágenes estereoscópicas en teleoperación. Esto es debido a que existen aplicaciones en las que se han utilizado exitosamente sistemas estereoscópicos [Aracil 2002], y otros en los que se han rechazado por provocar cansancio al operador. Normalmente, el cansancio en el operador se produce porque la disparidad de las imágenes visualizadas no se corresponde con las imágenes que habitualmente vemos. La forma de evitar dicho cansancio es disminuir la disparidad en las imágenes de forma que se emule la visión humana o al menos no se visualicen imágenes con elevada disparidad [Ferre et al. 2003].

La forma más simple de visualizar imágenes estereoscópicas es utilizando un par de cámaras separadas 6–7 centímetros, con los ejes paralelos una óptica equivalente a la del ojo humano [Ferre 2008]. En la figura siguiente se muestra la evolución de la disparidad en función de la distancia de un objeto a la cámara. Las imágenes binoculares se fusionarán correctamente cuando dicha disparidad sea inferior a la disparidad máxima admisible. Esto determina la zona en la cual es posible visualizar objetos correctamente. En la reconstrucción tridimensional se pueden ajustar los puntos de vista de las cámaras para que el operador no sufra estos efectos indeseables.

Si se desea disminuir la disparidad de las imágenes, y con ello aumentar la zona de trabajo, se puede conseguir acercando las cámaras entre sí o haciendo zoom. Es

necesario evaluar la disparidad de los objetos centrales de la imagen [Bernardino 2007] y adecuar la distancia de los ejes de las cámaras a un valor aceptable de disparidad con lo que se realiza la profundidad de los objetos visualizados sin provocar cansancio en el operador.

Ilustración 65 - Variación de la disparidad de un objeto situado en la parte central de 2 de cámaras cuyos ejes son paralelos. Los objetos alejados se perciben correctamente hasta una distancia M, donde la disparidad es superior a la que se genera por nuestra propia visión (unidades en mm.).

Por otro lado, en teleoperación de entornos nucleares de fusión las cámaras que se pueden introducir dentro del reactor tienen que cumplir con unos requisitos muy estrictos además de tener que ir protegidas con un blindaje especial. En la actualidad no se usan cámaras estereoscópicas por estas limitaciones, es preferible situar las cámaras en distintos puntos de vista colocados estratégicamente para cubrir el mayor área posible.

En este capítulo se plantea el uso de una cámara de profundidad para la generación tridimensional de la nube de puntos y poder contar con imágenes estereoscópicas que puedan ayudar en la teleoperación del entorno nuclear. De esta forma conseguiremos hacer una reconstrucción tridimensional de un entorno no estructurado [Pérez 2015] y poder adaptar el punto de vista binocular a las necesidades en la tarea a realizar.

7.1.1 Reconstrucción tridimensional

Para realizar la reconstrucción tridimensional de entornos no estructurados se ha utilizado un sistema de visión 3D que proporciona a un usuario un entorno de realidad virtual, para el planteamiento inicial de la reconstrucción, utilizaremos la Plataforma Abierta de Teleoperación para la realización de las tareas, y el sistema

de visión 3D que tiene integrado, por otro lado se añade un sensor Kinect para ser utilizado como cámara de profundidad, que nos permitirá capturar la nube de puntos del entorno.

Ilustración 66 - Situación del sensor Kinect respecto del espacio de trabajo del robot, proporcionando un plano picado de la escena.

Kinect, al igual que cualquier otra cámara de profundidad, proporciona un flujo de datos que incluye información de una matriz de profundidad que proviene del sensor de infrarrojos y una matriz RGB de la cámara a color.

Mediante la utilización de la SDK de Kinect podremos obtener los datos en forma de vectores, en los que cada parámetro del vector corresponde a un pixel de la imagen.

A. Reconstrucción de la nube de puntos

En primer lugar, partimos de la matriz RGB, que viene codificada en 1 vector de bytes, con la información RGB (colores rojo-verde-azul de cada pixel) y un valor nulo para el valor de transparencia (alpha).

Una imagen se compone de un conjunto de píxeles. Cada pixel de la imagen tiene 4 componentes que representan los valores de los colores rojo, verde y azul más una componente que corresponde con el valor de transparencia (alfa), en el caso de imágenes RGBA, o un valor vacío, si es de tipo RGB. Este valor de transparencia indica el grado de opacidad. No todas las cámaras lo soportan, y Kinect no envía información referente a dicho campo.

Cada componente del píxel tiene un valor decimal de 0 a 255 lo que corresponde a un byte. De esta forma el vector de bytes que se obtiene del sensor, en el caso de la cámara *RGB*, es una representación de esos píxeles organizados de arriba abajo y de

izquierda a derecha donde los 4 primeros elementos del vector serán los valores rojo, verde, azul y alfa del píxel de arriba a la izquierda mientras que los 4 últimos serán del píxel de abajo a la derecha.

Es decir, cada píxel cuenta con 4 bytes del vector. Para saltar de un píxel a otro, se necesitará realizar un desplazamiento de 4 bytes en el vector.

Ilustración 67 - Organización de píxeles de color en el vector proporcionado por Kinect. Cada píxel cuenta con 4 bytes correspondientes a la descomposición RGB de un píxel.

El sensor Kinect capta 30 imágenes por segundo, y cada imagen cuenta con: $(1.920 \times 1.080 \text{ pix}) \cdot 4 = 8.294.400$ Bytes; con lo que el procesamiento de la imagen ha de ser fluido para poder proporcionar la imagen 3D en tiempo real que es lo que se requiere en teleoperación.

Ilustración 68 - Organización de píxeles de profundidad en el vector proporcionado por Kinect. Cada píxel cuenta con 2 bytes correspondientes a la distancia de dicho píxel hasta el plano de la cámara.

Cuando se quiere usar las cámaras de profundidad, el propio hardware de Kinect ofrece la distancia de los objetos al plano vertical del sensor [Mouri 2005], sin necesidad de tener que realizar una triangulación de cada píxel para obtener la profundidad real del objeto, y no la profundidad respecto del punto donde se encuentra el sensor. Al tener dos cámaras de infrarrojos, cada píxel se corresponde con 2 bytes en el vector siendo éstos el valor de la distancia de ese píxel a cada cámara, en total un vector de: $(512 \times 424 \text{ pix}) \cdot 2 = 434.176$ Bytes

B. Mapeado de Imagen

Como la información de RGB y de profundidad tienen distintas resoluciones, se necesita realizar un mapeado [Mouri 2006] para corresponder los píxeles de color

con los píxeles de profundidad. De esta forma obtendremos un mapa de puntos en 4D, que contiene la información de la posición (X,Y,Z) a través de la profundidad y la información de color.

C. Nube de Puntos – Windows Media Library

La programación en aplicaciones WPF de Microsoft restringe a la utilización de la librería Windows Media 3D para la creación de la nube de puntos la cual se visualiza por pantalla a tiempo real. Una vez se recogen los datos con Kinect, se cuenta con N puntos, de los cuales se tiene información de las coordenadas X, Y, Z y del color. A partir de aquí, los pasos tomados para la realización de una nube de puntos son los siguientes.

D. Triangulación de puntos

Se cuenta con 512 x 424 (resolución de cámara de profundidad) puntos, los cuales van a formar una imagen. Sin embargo estos puntos deben ser sólidos, para poder darles un color.

Se realiza una triangulación de cada uno de los puntos con dos adyacentes, uno el de su inmediata derecha y otro el superior o inferior a este. Este solido triangular es el que se verá finalmente, coloreado con el color correspondiente al procedente de la cámara RGB. Se crearan N triangulaciones, siendo N el número de píxeles que se quieren mostrar [Desbats 2005].

De esta manera se puede ver la imagen desde diferentes perspectivas ya que el triángulo tomará el ángulo adecuado para ajustarse a la demanda de posiciones de los tres píxeles de los que está compuesto.

E. Profundidad

Una vez creados “N triángulos”, el siguiente paso es recorrerlos e ir asignando una profundidad en función de los datos obtenidos con Kinect.

La Windows Media Library mostrará por pantalla una representación 2D de la reconstrucción tridimensional desde el punto de vista elegido para la cámara virtual.

Ilustración 69 - Visualización de la nube de puntos creada desde un ángulo diferente al que el sensor capta la imagen.

La importancia de la creación de una nube de puntos reside en que al haber obtenido un espacio tridimensional con la reconstrucción, puedes visualizar dicho espacio desde cualquier punto de vista y no necesariamente desde el punto de vista de la cámara con la que tomas la imagen. Utilizando dos puntos de vista adyacentes como si fuesen los ojos humanos, obtendremos una visualización virtual binocular de la nube de puntos.

F. Color

La asignación de color a cada triángulo se realiza mediante el mapeado del espacio de pixeles color al un espacio de pixeles de profundidad y por tanto se realizará a la vez que la asignación de profundidad.

Ilustración 70 - Reconstrucción de brazo robótico con asignación de color

G. Filtrado de Imagen

En la representación que mostremos por pantalla no es necesaria la reconstrucción completa, y esto puede ayudar en la velocidad del procesamiento de la nube de puntos. Para optimizar el algoritmo será necesario filtrar la imagen RGB-D [Rolfe 2007] al marco de imagen que se quiere mostrar. Los filtros que aplicaremos son:

- *Filtro de Área*: Definir un área más pequeña que la escena completa que ofrece Kinect, con la información realmente interesante, es decir ajustando el marco de la escena a lo que realmente interesa para la tarea. A la hora de realizar el procesamiento de la imagen, únicamente se realiza un bucle por esta área más reducida, lo cual aporta un mayor rendimiento y velocidad de procesamiento.
- *Filtro de Profundidad*: Se establece un rango de profundidad mediante el cual se eliminan los píxeles demasiado cercanos o demasiado lejanos respecto de la cámara RGB-D, además de eliminar objetos no relevantes en la manipulación, se evitan introducir en la escena objetos demasiado cercanos que pueden producir mareos en la visualización 3D.
- *Filtro estática*: evita el procesamiento de objetos estáticos de la escena en cada iteración, con lo que no se destina CPU a la actualización de la posición por pantalla, sino que se mantiene la posición de la imagen anterior tomada, ahorrando tiempo de ejecución.

Se tiene en cuenta para este filtro el ruido del sensor de infrarrojos que produce una ligera oscilación en los valores y que produciría un temblor en la imagen reproducida [Yang 2013]. En este caso se utiliza el incremento de profundidad para el filtro. Definiendo un algoritmo que filtra dichas oscilaciones mediante la ecuación:

$$\Delta = fabs((depthN - depthN-1) + (depthN-1 - depthN-2))$$

donde Delta es cero cuando el pixel oscila.

- *Filtro de densidad*: reduce el número de píxeles a mostrar, con lo que empeora la calidad de la imagen mientras que aumenta la velocidad de ejecución del programa y que en ocasiones se hace necesario para asegurar el requisito de tener video en tiempo real.

Ilustración 71 - Comparación de imagen sin (izquierda) y con "filtro de densidad" al 50% (derecha)

H. Imagen en Espejo

En el caso particular de Kinect ha sido necesario introducir este tratamiento de la imagen, puesto que Kinect presenta la imagen en formato espejular para que nos veamos en la pantalla como en un espejo, sin embargo para utilizar el sensor como una cámara RGB-D al uso, será necesario deshabilitar esta característica. Basta con recorrer los píxeles de derecha a izquierda en lugar de izquierda a derecha.

7.1.2 Visualización en 3D

Para poder ver imágenes en formato 3D tendremos que utilizar dispositivos que soporten dicha tecnología. Estos dispositivos se encargan de proyectar imágenes sincronizadas a cada ojo, dichas imágenes tendrán que tener la distancia focal apropiada para que no se produzca disparidad y nuestro cerebro pueda reconstruir la imagen como lo haría normalmente.

Entre los dispositivos que podemos encontrar están los monitores y pantallas 3D que tienen una velocidad de refresco mayor para ir alternando las imágenes que van a cada ojo y que no se produzca parpadeo en la imagen.

Otros dispositivos que permiten proyectar distintas imágenes a ambos ojos a la vez y recrear el efecto 3D de la visión binocular son los Head Mounted Display de gran campo de visión que comienzan a salir al mercado de la Realidad Virtual, algunos ejemplos son: Oculus Rift, HTC Vive, Sony Morpheus, Microsoft Hololens.

Dependiendo de la tecnología escogida para su visualización tendrá que realizarse una configuración diferente del espacio de trabajo del operador, y esto repercutirá de forma directa en su inmersión y forma de trabajar al teleoperar.

A. Visualización mediante pantalla 3D

Como ya se adelantó, una vez obtenida la nube de puntos a color que se puede visualizar desde cualquier ángulo, para la visualización en un monitor 3D, sólo es necesario generar dos puntos de vista adyacentes y separados unos centímetros al igual que nuestros ojos.

Para ello, utilizaremos los datos comentados en el Capítulo 2 sobre la visión humana:

- Distancia normal de separación entre ojos entre los 5-7 cm.
- Distancia óptima de visión humana de unos 25 – 30 cm desde los ojos.
- Distancia entre Kinect y los datos relevantes de la escena entre 1.37 y 5 m.
- Ángulo de Visión de 70° horizontales.
- Distancia idónea para visionar un monitor [How 2004], para monitor de 42" a 1080p debe ser entre 1,8 y 2 m.

Con todos estos datos se ha creado un algoritmo que calcula donde deben estar los dos puntos de vista de los ojos para que la reconstrucción tridimensional sea la óptima adaptada a la configuración del puesto de teleoperación.

Con todos estos datos, es necesario realizar un algoritmo que permita seleccionar de la nube de puntos los dos puntos de vista separados una distancia óptima para su posterior proyección en el monitor 3D, se necesitarán entonces: la anchura real que representa cada pixel (para conocer la separación entre ambas imágenes), y la distancia del punto de vista al plano de trabajo del robot.

Ilustración 72 - Elección de puntos de vista en la nube de puntos, separados unos centímetros simulando al ojo humano (izquierda), y relación entre pixel y medida real (derecha)

Con el algoritmo propuesto por Perrot se obtiene el valor en mm de la variable denominada “opposite” en la imagen [Perrot 2004]. Por tanto, para determinar cuántos píxeles hay que desplazar el segundo punto de vista respecto del primero, simplemente hay que dividir los 6cm de distancia entre los ojos por la anchura de cada píxel.

Emisión de imágenes al monitor

Existen varias técnicas para proyectar imágenes en una pantalla con tecnología 3D: en nuestro caso el monitor acepta la entrada de imágenes side-by-side por el puerto HDMI, con lo que bastará con poner ambos puntos de vista uno al lado del otro en cada frame que se envíe al monitor, y ya se encargará la propia pantalla de generar las imágenes 3D compatibles con la tecnología de gafas que estemos utilizando (activa o pasiva).

Ilustración 73 - Imagen binocular side-by-side que se envía a la pantalla por HDMI.

Cuando el operador trabaje con una pantalla en 3D tendrá que llevar puestas las gafas 3D, ya sean de tecnología activa o pasiva, para la correcta visualización de las imágenes. Con estas gafas no tendrá ningún problema para ver el resto de elementos de su espacio de trabajo, como indicadores, otros monitores con otras cámaras, simulaciones, o variables de parámetros que tiene que controlar.

B. Visualización de mediante HMD

En este apartado se utiliza uno de los nuevos dispositivos Head Mounted Display con amplio ángulo de visión (FOV - Field of View de 110°) creando una gran experiencia de inmersión al operador, sintiéndose como si estuviese en el entorno remoto manipulando directamente.

Ilustración 74 - Diferencia de opacidad entre Oculus Rift (izquierda) y Microsoft HoloLens (derecha)

En este caso, el operador solo puede visualizar la pantalla del dispositivo, no permitiéndole observar los monitores o instrumentos de su puesto de control, tendría que quitarse el HMD para poder verlos. Esta situación que a primera vista podría ser un gran inconveniente tiene una solución directa, que sería en lugar de utilizar un HMD opaco como Oculus Rift diseñado para Realidad Virtual, sería usar un HMD diseñado para Realidad Aumentada, como Microsoft HoloLens, el cual sí que permite ver a través de las pantallas sin problema.

No obstante, en el caso de tener un HMD opaco, las debilidades se convierten en fortalezas si se considera el potencial de crear un escritorio para teleoperar propio del usuario: el operador puede diseñar su escritorio de teleoperación a su antojo creando un escritorio virtual a su alrededor configurándolo con todas las ventanas de instrumentación y puntos de vista de cámaras como desee, accediendo a ellos tal y como lo haría en su escritorio real, lo podría customizar según sus necesidades y preferencias.

Con este fin se ha utilizado el HMD Oculus Rift que posee tracking de posición y ángulo de los movimientos de la cabeza. Además de el dispositivo se ha utilizado el *freeware* VRDesktop [Virtual Desktop 2015] con el que podemos configurar el entorno a nuestro antojo, pudiendo colocar a nuestro alrededor todas las variables e indicadores de la interfaz de usuario en LabView, así como los distintos puntos de vista de las cámaras, siendo posible incluso activar alguno de los videos en *streaming* para verlo directamente en primera persona.

El VRDesktop proporciona un entorno virtual que rodea al operador y es totalmente configurable, como si se tratase de una pantalla de cinemascope o tipo dome, la sensación ofrecida es la de estar rodeado por el entorno virtual. De esta forma no es

necesario tener que montar distintos monitores y paneles de usuario reales alrededor del puesto de teleoperación, sino que basta con añadir una nueva ventana en nuestro escritorio virtual inmersivo. El operador configura su escritorio según sus preferencias y necesidades ubicando cada punto de vista donde desee tenerlo accesible, o incluso una ventana con un simulador o las variables que le pueda ofrecer el sistema.

Ilustración 75 - Escritorio virtual envolvente

En el caso de reproducir la visión binocular de la reconstrucción 3D que nos ocupa, se podría poner en pantalla completa dicho punto de vista y visualizarlo en primera persona, controlando el punto de vista virtual desde el software.

El resultado de lo anterior es una inmersión absoluta en la realidad virtual creada en la reconstrucción tridimensional, ya que no solo estamos viendo una realidad aumentada en 3D, sino que podemos decidir el ángulo desde el cual queremos trabajar con el robot. Esto, como ya se explicó en apartados anteriores, es importante, ya que el modo de funcionamiento humano es similar a este, y por tanto la sensación de inmersión aumenta considerablemente.

7.1.3 Mejora del rendimiento en Tiempo Real

El alto nivel de procesamiento requerido por una aplicación que en tiempo real toma datos del entorno y debe mostrar una reconstrucción tridimensional por pantalla obliga a la optimización del funcionamiento del programa.

La forma de procesamiento normal de cualquier programa es secuencial. Las tareas se van realizando una detrás de la otra, siguiendo un orden de prioridades y con posibles interrupciones y saltos a otras tareas. Sin embargo esta forma de

procesamiento no permite obtener un resultado satisfactorio para el propósito del trabajo, debido al tiempo de ejecución. Debemos disminuir y optimizar el tiempo que tarda el programa en mostrar por pantalla una imagen. Para ello, se debe saber qué es un hilo (thread) [Albahari 2015].

Los ordenadores no están capacitados para realizar tareas a la vez, sino que realizan una detrás de otra a una alta velocidad dando la falsa sensación de multi-tarea. Sin embargo, los procesadores múltiples (Intel i3, i5, i7, AMD Phenom II X3, ...) permiten realizar una verdadera programación multitarea.

Un hilo no es sino una línea de tareas que deben realizarse secuencialmente y que son realizadas por uno o varios procesadores. Por tanto, varios hilos pueden ejecutarse en paralelo. Como ejemplo se puede tomar una tarea que tarde 10 ms en realizarse secuencialmente. Dicha tarea, si se pudiera descomponer en 4 sub-tareas independientes, y una quinta tarea que tome los resultados de las otras cuatro y llegue a una conclusión, se podría realizar una programación en hilos. Asignamos un hilo a cada una de estas cuatro sub-tareas, y la quinta se asigna al hilo principal. En un primer momento, se inician los cuatro hilos en paralelo. Puede ser que no todas las tareas de estos hilos tengan la misma duración, por lo que habrá una tarea de estas cuatro que sea la más lenta, la cual será el cuello de botella del algoritmo. La quinta tarea no empezará hasta que esta tarea más lenta haya concluido. El tiempo total de ejecución se ve reducido al tiempo de la sub-tarea más lenta, más la quinta tarea final.

Para plantear la programación de aplicaciones WPF en Visual Studio, se realiza mediante una inicialización de dos hilos, uno denominado principal, que lleva el grueso del programa, y otro que contiene la información gráfica mostrada por pantalla, denominado API [Cannaday 2009]. Como hay que utilizar recursos del hilo gráfico (API), no se deben utilizar recursos de este hilo secundario a partir de otro secundario.

Asignar un hilo independiente a la adquisición de datos desde Kinect permite que no haya interferencias en ningún momento en la ejecución del programa principal. Pudiendo trabajar a una velocidad diferente a la velocidad de recepción de datos desde el sensor, que es de 30 FPS (imágenes por segundo). Por tanto, la velocidad de

reproducción de imágenes por pantalla no tiene por qué coincidir con la de recepción de datos desde el hardware, pudiendo desincronizar ambos procesos y aumentando el rendimiento del programa.

Para ello, se va a hacer uso de flujogramas que aportan una fácil comprensión de la dinámica del software. Así mismo, la explicación seguirá una ordenación lineal, de acuerdo con la secuencia de operaciones que el programa realiza.

En primer lugar, el programa inicializa la ventana principal. Dicha ventana, tiene un tamaño en píxeles de 1920 x 1080 para adecuarse a los monitores HD en los que se va a proyectar la imagen. Dentro de esta, se divide la pantalla en dos, para mostrar la imagen tridimensional side-by-side: cada mitad contendrá una clase de visualización de imágenes en 3D denominada “Viewport3D”. Esta clase es la que permite representar nubes de puntos por pantalla. Se asignará un punto de vista a las visualizaciones de cada ojo.

Para no influir en el rendimiento de la ejecución en Tiempo Real, la recogida de datos del sensor Kinect se ha realizado en un hilo diferente al principal. Por tanto existirá un hilo totalmente independiente que irá actualizando los dos vectores de datos que se utilizan, el de profundidad, y el de color, creándose una clase que contiene toda la información necesaria con respecto a los “Frames” (imágenes) que Kinect capta. En esta clase es donde definimos el tamaño del área de visualización, es decir, el filtro de área.

A continuación, se procede a triangular cada uno de los píxeles que se van a mostrar, y a crear todos triángulos sólidos que se mostrarán por pantalla. La función encargada de realizar esta tarea se denomina SetData(), y recorre sólo los píxeles que se quieren mostrar, creando un triángulo en cada uno con vértices en los píxeles adyacentes. Así mismo, se dota de solidez y un color opaco a cada pixel para que posteriormente pueda ser visualizado.

En este momento hemos llegado a un punto en el que se tiene el mapa de píxeles que se van a mostrar, a falta de asignarles color y profundidad. Se cuenta con un continuo flujo de datos entre Kinect y el ordenador. Por tanto, el siguiente paso, es comenzar la reconstrucción y asignar a cada pixel su color y profundidad

obtenidos por el sensor Kinect. Esta se inicia cuando el usuario pulsa Start dentro de la ventana de ajustes.

Al realizar esta acción, se activa un temporizador que llamará a la función de actualización de la nube de puntos cada cierto tiempo. Este tiempo de refresco de pantalla, en segundos, es el inverso del número de imágenes por segundo (FPS), y se adecua para optimizar el funcionamiento general del programa.

Cuando se refresca la pantalla, es decir, cuando ha pasado el tiempo establecido por el temporizador, se realiza un bucle que recorre cada triángulo que se está mostrando por pantalla, y si es necesario, actualiza su profundidad y su color. El funcionamiento de dicho bucle es el siguiente.

Ilustración 76 - Diagrama de flujo de la función principal

Con todo lo anterior se ha conseguido una reproducción de la reconstrucción tridimensional por pantalla, lo que es el grueso del programa. Existen interrupciones que aportan de seguridad al programa ante posibles errores.

Por último mencionar que la ventana de ajustes trabaja en un hilo separado. Esta contiene el algoritmo de distancia entre puntos de vista, y todos los ajustes necesarios para mostrar la imagen. Al cambiar un parámetro en esta ventana, lo que realmente se modifica es la clase anteriormente mencionada que contiene la información del frame. En esta clase es en la que se apoya el bucle central de creación de la imagen. Por tanto, al modificar los ajustes en esta ventana, se actualizará la nueva visualización elegida en el siguiente refresco de imagen.

7.2 Pruebas y experimentos

Esta sección se dividirá en los distintos experimentos que se han realizado con usuarios para valorar e intentar cuantificar los resultados. Las dos primeras tratarán sobre diferentes algoritmos que mejoran el rendimiento de la reconstrucción tridimensional y que permiten la visualización de la imagen en 3D. Además se versará sobre la experiencia de usuarios con el sistema. El tercer apartado aborda la dinámica de funcionamiento del software en particular. El cuarto apartado versa sobre la precisión de la reconstrucción obtenida.

7.2.1 Valoración de precisión en la reconstrucción

En esta primera prueba se va a valorar la precisión de las reconstrucciones realizadas, parámetro muy relevante pues es un indicador de la realidad de las dimensiones visualizadas y reconstruidas con respecto a la imagen real tomada. Para poder cuantificar esta variable, se ha diseñado un experimento que permite definir de manera precisa el error cometido en dicho proceso de reconstrucción tridimensional del entorno.

El experimento consiste en la reconstrucción de varios objetos sencillos y cuyas dimensiones son conocidas. Se han utilizado dos objetos: una caja de cartón que simboliza un paralelepípedo grande, y una lata de refresco que simboliza un cilindro pequeño, ambos objetos con colores llamativos diferenciadores del entorno. Se han

elegido estos dos objetos debido a que el primero aporta una medida exacta de una superficie plana, mientras que el cilindro requiere de una reconstrucción más difícil por tener un contorno curvo.

Se posicionan los objetos mencionados a una distancia conocida del plano de la cámara. Esta distancia se irá variando con posterioridad, y se comprobarán las mediciones de distancia a los objetos con un medidor láser. Así mismo, es importante que el centro óptico de la cámara se encuentre totalmente alineado con el centro del rectángulo que forma la cara de la caja de cartón a medir, y el eje del cilindro que forma la lata de refresco.

Aplicando un filtrado de profundidad, se muestran únicamente los píxeles que se encuentran entre un rango de distancia a la cámara. Como vamos a posicionar los objetos a una distancia conocida, este rango será de $\pm 2\text{cm}$ por delante y por detrás del plano del objeto. En el caso de la lata de refresco, el rango es mayor, ya que para tomar la imagen del cilindro, necesitamos de un rango de al menos la mitad del diámetro del cilindro. También se aplica un filtrado de área, para evitar tomar imágenes de objetos que se encuentren a la misma distancia de la cámara, pero que no nos interese medir. El resultado del filtrado es el siguiente.

Ilustración 77 - Reconstrucción de objetos conocidos a una distancia determinada.

Una vez tenemos esta reconstrucción, el paso siguiente es medir “digitalmente” el ancho de la caja, y el diámetro del cilindro. Para ello se recurre a un concepto explicado con anterioridad. Mediante el ángulo de visión (FOV) de la cámara, la distancia de posicionamiento del objeto (conocida y utilizada como variable) se obtiene la anchura real que cada píxel representa. A continuación se cuenta vía software cuantos píxeles forman la anchura de cada reconstrucción. Una vez obtenidos estos parámetros, únicamente deberemos multiplicar el número de píxeles que constituyen la reconstrucción por la medida real de anchura que cada

pixel representa, y tendremos la medida que la reconstrucción estima que tendrá el objeto. Mediante comparación con la medida real, que también es conocida, obtendremos la precisión que tiene la reconstrucción.

Mediante estas mediciones se ha detectado un error en las mediciones de distancia que proporciona el sensor, con lo que la distancia que Kinect ofrece no corresponde exactamente con la realidad: específicamente se ha realizado un pequeño ensayo para cuantificar el error del SDK. En forma de gráfica, los resultados son los siguientes:

Ilustración 78 - Gráfico que muestra el error cometido por los datos proporcionados por Kinect, con respecto a la distancia real a la que se encuentra el objeto

Como se puede apreciar, el error es totalmente lineal, lo que corresponde a un factor K multiplicado por la distancia real, que nos da la distancia que Kinect nos ofrece. Para nuestro caso, este factor $K = 1,2466$; con este dato, se realizó el experimento principal sin mayor dificultad.

Para el cálculo de la distancia virtual, se cuenta vía software del número de píxeles que componen la imagen a través de un algoritmo. Dicho algoritmo selecciona los píxeles que se encuentran dentro de una profundidad determinada (es decir, están posicionados a la distancia que se ha decidido) en todas las filas de cada frame, promediando dicho valor en varios frames consecutivos.

Las distancias a la cámara escogida han seguido los criterios de posible realidad del uso de la aplicación para teleoperación. Es decir, la cámara se va a encontrar posicionada en un determinado punto, y el plano mínimo y máximo de trabajo estará limitado por la extensión del brazo hidráulico. Por tanto, se han realizado progresiones periódicas de distancia desde los 0,75m hasta los 2,5m. Más allá de esta distancia el brazo robótico no tendrá capacidad de operación, pues está cercana a los límites mecánicos del espacio de trabajo.

Tabla 14- Resultados obtenidos en el experimento de precisión. Se miden el número de píxeles que componen la anchura de cada objeto

Distancia (m)	Nº píxeles (anchura)	
	caja	lata
0,75	144	34
1	127	23
1,25	98	15
1,5	80	12
1,75	72	10
2	61	-
2,5	45	-

Los datos obtenidos en este experimento, como ya se ha comentado, son el número de píxeles, que tras múltiples iteraciones componen la anchura de los objetos. Este resultado depende de la distancia a la que se encuentra el objeto en cuestión. Se puede apreciar fácilmente en una tabla:

Ilustración 79 - Objetos utilizados para la comprobación de error de Kinect a través del ancho real y virtual pixwlado

Para tratar estos datos, simplemente se vuelve a acudir a la anchura que cada pixel representa en la realidad, para cada distancia. Es decir, para la distancia a la que se

encuentra el objeto, mediante el ángulo de visión de la cámara y esta propia profundidad se obtiene el valor que cada pixel representa en la realidad. A continuación se multiplica este valor por el total de los pixeles que componen la imagen. Se obtiene la anchura de la caja o de la lata que la reconstrucción ha representado. Al comparar esta medida con la real, se obtiene la precisión que la reconstrucción ha realizado así como el error cometido. La medida de los objetos reales se muestra a continuación:

Tabla 15 - Resultados experimento de precisión. Se muestra la medida que la reconstrucción proporciona del objeto, y el error cometido frente a la real

Distancia (m)	Anchura del objeto		Error cometido (%)	
	Caja	Lata	Caja	Lata
0,75	295,92	69,87	14,96	7,5
1	347,98	63,02	0,58	3,04
1,25	335,65	51,375	3,54	20,96
1,5	328,8	49,32	5,5	24,12
1,75	345,24	47,95	0,79	26,23
2	334,28	-	3,94	-
2,5	308,25	-	11,42	-

Como se puede apreciar en los resultados, encontramos que dentro de la franja del metro y los dos metros se encuentran los mejores resultados. El alto porcentaje de error en la lata es normal, debido a que la anchura de esta es muy pequeña en comparación con el ancho de la imagen total que Kinect toma. Sin embargo, en la caja obtenemos errores totalmente asequibles. El valor de distancia de 0.75 tiene un gran error, debido a que la cámara no obtiene unos resultados fiables a una distancia tan pequeña. El valor de error a los 2,5m concluye que a partir de esa distancia, el error en objetos pequeños como puede ser la caja comienza a ser considerable. No se ha realizado una medición del error en distancias grandes con la lata, debido a que carece de sentido, pues el error será muy grande

7.2.2 Pruebas de rendimiento

En estas pruebas se va a valorar el rendimiento del algoritmo de reconstrucción con distintos parámetros para escoger la configuración más favorable para la reconstrucción en Tiempo Real.

Mejora de la imagen

En este apartado se abordará la calidad de la imagen mostrada en el monitor 3D. Los temas tratados se explicarán a continuación.

Calidad de la Imagen: La calidad de la imagen es un tema importante debido a que el usuario se basa en esta imagen para realizar las tareas. Existen diferentes factores que influyen sobre dicha calidad.

En primer lugar, existe una primera problemática referida a la captura de la imagen. Como ya se ha comentado, pese a que Kinect cuenta con una cámara a color de alta definición, la cámara de profundidad limita la resolución de captura. Esta cámara infrarroja únicamente aporta una resolución máxima de 512 x 424 píxeles, la cual queda muy por debajo de las resoluciones full HD (1920 x 1080) a las que ahora cualquiera está acostumbrado.

Otro factor que influye en la calidad es la resolución de la pantalla que muestra la imagen. Se cuenta con un monitor LG de alta resolución, lo cual quiere decir que es capaz de mostrar un total de 1920 x 1080 píxeles.

Como se van a sacar dos imágenes a la vez una al lado de la otra, la resolución máxima de cada imagen puede ser de 960 x 1080 píxeles. Estas imágenes proceden de Kinect, cuya máxima resolución es menor que esta, por lo que el factor de resolución de pantalla no afecta.

Velocidad de la Imagen: Otro factor es el número de imágenes por segundo (FPS – “Frames” por segundo) que afecta a la sensación de parecido con la realidad. Como se sabe, un video es una sucesión de imágenes, pero al tener una velocidad tan elevada, el cerebro no es capaz de diferenciar las imágenes y las capta como si fuera una secuencia continuada, un video, como la visión de una realidad y no la sucesión de diferentes imágenes.

Para la mejora de estos aspectos se cuenta con los filtros ya mencionados, y la programación en hilos que agilizan el proceso.

En general, a mayor cuadro de imagen mostrado (menor filtro de área aplicado), mayor es el número de píxeles que hay que procesar. Esto implica una mayor calidad de imagen frente a una peor tasa de refresco, o un menor índice de FPS. Por tanto, es necesario encontrar el equilibrio entre ambos factores.

Así mismo, un filtrado de densidad aporta una gran velocidad de procesamiento, y por tanto mayor número de FPS, pero empeora la calidad de la imagen, al verse más difuminado.

La programación en hilos, filtrado de profundidad, filtrado estático y cualquier mejora en el rendimiento del programa favorecen la velocidad de procesamiento y por lo tanto aumenta el índice de FPS.

Modos de Funcionamiento. La velocidad de Imagen, y la calidad de imagen son inversamente proporcionales. Esto quiere decir que si se quiere aumentar la calidad de imagen, se deben mostrar más píxeles por pantalla que aumenten la resolución. Esto obliga a que el número total de estos píxeles que deben ser procesados sean mayores, lo que necesita más tiempo en cada imagen y perjudica gravemente a la velocidad de imágenes por segundo o FPS.

Por tanto es necesario encontrar un equilibrio que garantice el correcto funcionamiento del programa.

Para poder modificar los valores de calidad y velocidad, contamos con diferentes ajustes que permiten aumentar la calidad, aumentar la velocidad o mejorar ambas. A continuación se adjunta una tabla con la influencia de diferentes filtros en dichas cualidades de la imagen. En esta tabla, el signo “+” representa incrementar, mientras que el signo “-” representa decrementar.

Tabla 16 - Influencia de los filtros en la calidad de la imagen y en la tasa de refresco

Descripción	Calidad (resolución)	Velocidad (FPS)
Filtro de Densidad – Aumentar el filtrado	-	++
Filtro de Área – Aumentar la superficie mostrada	=	--
Filtro de Profundidad – Aumentar la profundidad visionada	=	-
Filtro Estático – Activado	+	+

Mediante esta prueba se ha definido la mejor combinación para obtener el máximo rendimiento: modificando cada uno de estos parámetros, medimos la velocidad que la imagen nos ofrece (FPS) y el rendimiento de CPU utilizado. Es importante destacar que las pruebas se han realizado filmando una escena en movimiento, ya que al utilizar el filtro estático, una escena sin ningún movimiento no tendría costo computacional.

Los parámetros utilizados como variables son los siguientes:

- Área mostrada: N° de pixeles que se muestran y porcentaje del total mostrado
- Filtro de densidad: Implementación o no del mismo
- Filtro estático: Implementación o no del mismo
- Filtro de profundidad: Mostrar o no el fondo de la escena

Los resultados son los siguientes:

Tabla 17 - Comparativa de rendimientos según la aplicación de distintos filtros

Área Mostrada	Filtro Densidad	Filtro Profundidad	Filtro Estático	FPS	%CPU
512x424 100%	0%	SI	SI	2 4	34
		NO	NO	-	Fallo
		NO	SI	2 4	35
	50%	SI	SI	11	32
		NO		7	35
384x318 56,25%	0%	SI	SI	6	34
		NO		4	35
	50%	SI	SI	13	27
		NO		10 11	32
320x265 40%	0%	SI	SI	7	35
		NO		4	35
	50%	SI	SI	15	27
		NO		13	29
256x212 25%	0%	SI	SI	9	34
		NO		7	34
	50%	SI	SI	17	28
		NO		14	30
192x159 14%	0%	SI	SI	11	31
		NO		8	34
	50%	SI	SI	20	27
		NO		17	28

Una vez conocidos los valores que se pueden modificar para obtener la mejor calidad y velocidad de imagen, se ha llegado a la conclusión de que existen dos modos de funcionamiento óptimos:

Modo 1:

- Filtro de densidad: 50% (filtra la mitad de pixeles de la imagen)
- Filtro de área: Muestra el 40% (Resolución de 320 x 265)

- Filtro de Profundidad: Depende de Usuario
- Filtro Estático: Activado

Modo 2:

- Filtro de densidad: Desactivado
- Filtro de área: Muestra el 14% (Resolución de 192 x 159)
- Filtro de Profundidad: Depende de Usuario
- Filtro Estático: Activado

Una vez elegidos ambos modos principales de funcionamiento, debido a sus mejores resultados en de resolución y velocidad frente a los recursos utilizados, se va a proceder a detallar algunas características de estos modos. Para ello, se tiene en cuenta que el plano principal de captura de imagen, o lo que es lo mismo, el plano perpendicular a la cámara donde trabajará el robot, está a 1.5m. A partir de esta medida, y con la utilización del ángulo de visión (FOV) ya explicado, se llega a la siguiente tabla:

Tabla 2 – Características Detallas de los dos modos principales de funcionamiento a 1.5m de distancia al plano de trabajo.

Modo de funcionamiento	FPS	Resolución	Densidad (píxeles/cm ²)	Área mostrada (cm ²)
1	15	320x265	6.22	3406.898
2	11	192x159	24.893	1226.356

7.2.3 Experimentos de experiencia 3D

La inmersión en la sensación 3D depende en gran medida de cada usuario. No solo en su experiencia personal con el sistema, sino en su morfología propia de los ojos (distancia entre estos, ángulo de visión, distancia al punto óptimo...). Todo ello lleva a que existan diferencias en la sensación de realidad percibida.

Para cuantificar la sensación de 3D se va a realizar una prueba con sujetos, en la que se les expone a la misma imagen tridimensional, variando los modos de funcionamiento ya mencionados en la parte superior, y también la distancia entre cada ojo, adecuándola a cada sujeto. Las pruebas tienen una gran parte subjetiva, debido a que la percepción de cada persona es única. Se le realiza a cada sujeto la

misma pregunta referida al fragmento de imagen tridimensional que han visto. Pueden puntuar del 1 al 5, donde el uno es muy bajo, y el cinco muy alto, la percepción que han tenido respecto a la pregunta efectuada.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 3 - Experimento de Realidad 3D

Sujeto	Modo	Calidad Imagen	Velocidad (FPS)	Mareo	Sensación de Profundidad
1	1	4	8	NO	8
	2	7	2	NO	10
2	1	4	8	NO	8
	2	8	3	NO	9
3	1	2	6	NO	8
	2	8	3	NO	10
4	1	6	7	NO	7
	2	9	3	NO	8
5	1	3	7	NO	8
	2	6	2	NO	8
6	1	4	8	NO	8
	2	9	3	NO	9
7	1	3	7	NO	8
	2	7	4	NO	10
8	1	2	8	NO	7
	2	7	3	NO	9
9	1	4	8	NO	8
	2	7	3	NO	10
10	1	3	8	NO	8
	2	8	4	NO	8
MEDIA	1	3,5	7,5	NO	7,8
	2	7,6	3	NO	9,1

Además de utilizar la pantalla 3D para la visualización, que es el dispositivo 3D al que está más acostumbrado el usuario, también se han hecho pruebas con el HMD Oculus Rift DK2 que tiene una resolución de 980x1080 por ojo, proporcionando un amplio campo de visión de 110°. El Rift tiene seguimiento rotacional y posicional. El seguimiento de posición se realiza mediante un sensor de IR estacionario conectado a un puerto USB, lo que permite su uso mientras se está sentado, de pie o incluso caminando en la misma habitación. Además la separación

de las lentes es ajustable por un dial en la parte inferior del dispositivo, con el fin de poder adaptarse a la distancia interpupilar de cada usuario.

Para poder utilizar las Oculus Rift de cara a Teleoperación se ha buscado un software que permita configurabilidad, por eso se ha escogido Virtual Desktop, pues es una pequeña utilidad que mejora su experiencia de realidad virtual en el propio escritorio de Windows. Al replicar eficientemente escritorio en el Rift, la aplicación le permite ver el escritorio en una pantalla virtual gigante que envuelve al usuario, realmente la sensación es como tener un único monitor envolvente.

A los usuarios del experimento primero se les enseñó el escritorio con distintas ventanas que mostraban la misma información que en los monitores del puesto de teleoperador real, y posteriormente se les puso en vista completa la reconstrucción tridimensional de la misma forma que lo habían visto en la pantalla 3D.

7.3 Discusión de resultados

De cara a las pruebas iniciales de fiabilidad y rendimiento en la reconstrucción tridimensional, se han conseguido los objetivos establecidos al tener una reconstrucción tridimensional de un espacio de trabajo de un robot, la cual se muestra por pantalla 3D en tiempo real y permite a un usuario realizar tareas remotamente con el robot.

La eficiencia conseguida en la programación mediante aplicaciones WPF en C#, ha sido satisfactoria gracias a la programación multihilo, pudiendo conseguir representaciones en Tiempo Real.

La utilización de librerías de nubes de puntos da gran potencial al uso de cámaras para tratar los datos en el espacio de trabajo, pudiendo representarlas por pantalla ofreciendo una versión binocular virtualizada del espacio de trabajo, que es de gran ayuda al operador. Además estos datos podrían utilizarse posteriormente para el cálculo de colisiones vía software, se podría hacer mediante la Programación de Control de Alto Nivel en la PAT aplicando los algoritmos descritos en [Hernando 1999]. Lo que daría un valor añadido al sistema pudiendo visualizar por pantalla alertas de posibles puntos de choque.

En cuanto a las valoraciones de los modos de funcionamiento, los usuarios han valorado ambos modos considerando que el primero otorga una adecuada velocidad de imagen, aunque se ve penalizado por una menor densidad de píxeles y por tanto peor calidad de imagen. Por el contrario, el segundo modo de funcionamiento brilla por una adecuada calidad de imagen, aunque la velocidad de refresco de imagen se ve perjudicada.

En cuanto a la visualización de la sensación 3D, el resultado es muy satisfactorio tanto en la pantalla 3D como en HMD. Ambos modos otorgan una sensación 3D adecuada, aunque se puede mencionar que a mayor calidad de imagen, la sensación es mayor. Es decir, el Modo 2 de funcionamiento produce más realismo 3D que el Modo 1, y los usuarios tenían una mejor sensación de visión tridimensional.

Ningún sujeto ha percibido sensación alguna de mareo o mal estar con las gafas de tecnología pasiva usando la pantalla 3D, sin embargo sí que un usuario experimentó malestar con el HMD, se cree que por una incorrecta configuración de la distancia de las lentes ya que dicho usuario utilizaba gafas de ver.

Los usuarios valoraron muy positivamente la sensación de profundidad conseguida en la reconstrucción 3D en ambos dispositivos, aunque los usuarios percibían como más inmersiva la experiencia con el HMD, con lo que la visión binocular es más realista y más cercana a la visión humana.

De cara a la valoración de entorno Virtual inmersivo para teleoperación, los usuarios comentaron que les parecía que estaba muy bien, de cara a poder ver los distintos puntos de vista y poder cambiar muy rápidamente de uno a otro solo con girar la cabeza. Aunque dos usuarios veían incómodo el no tener percepción del entorno real del operador, justificaban su incomodidad en la necesidad de ver también cosas tangibles, como ya se comentó anteriormente una solución sería utilizar las gafas de realidad aumentada Microsoft Hololens, para que puedas ver a través de ellas y puedas también ver la situación real y no sólo lo virtual.

Algunas ideas que se comentaron además de lo ya dicho, fue que la resolución del DK2 todavía tiene que mejorar, pues se veían los píxeles de color, y esto a algunos

de ellos les resultaba muy molesto. En general, los resultados de validación del escritorio Virtual para teleoperación es muy positivo, tal y como lo expresaron los sujetos del experimento por las posibilidades de configuración que ofrece este sistema, de poner los puntos de vista a gusto de cada teleoperador. De cara a la configuración en el HMD se ha valorado que lo más cómodo para teleoperar sería configurar la pantalla para que rodee al operador solamente 180° (90° de giro de cabeza a la izquierda y otros 90° a la derecha).

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Finalmente en este capítulo se concluye la presente tesis presentándose de forma resumida las principales contribuciones del trabajo realizado, valorando la consecución de los objetivos propuestos inicialmente.

El objetivo principal de esta tesis es avanzar en el desarrollo de tecnologías que permitan al operador teleoperar un robot en entornos de radiación nuclear, tal y como lo indica el título de este trabajo.

En los entornos nucleares de fusión, debido a las grandes dimensiones de sus instalaciones, es necesario aplicar teleoperación de alto escalado. Por ello, en el desarrollo del trabajo investigador se han tenido en cuenta los diferentes factores de alto escalado en la interacción hombre-robot, como por ejemplo en la interconectividad de dispositivos maestro-esclavo y la necesidad de crear un protocolo que les permita establecer una comunicación bilateral.

La primera tarea de esta tesis fue integrar una Plataforma Abierta de Teleoperación que permitiese realizar todas las pruebas y experimentos. Esta PAT ofrece muchas características de interconectividad entre maestros y esclavos, además de ofrecer la posibilidad de validar nuevos algoritmos de control, dicha PAT se ha probado con algoritmos clásicos como control posición-posición y fuerza-posición además de con un algoritmo para el alto escalado de dimensiones del espacio de trabajo entre dispositivos: el Rate-position Controller; e incluso se han ido integrando dispositivos a lo largo de la tesis para incluir los trabajos y aportaciones realizados.

Con la PAT verdaderamente se ha conseguido que el usuario perciba el entorno como si estuviera realizando la tarea casi directamente, percibiendo los distintos estímulos visuales, auditivos y táctiles como si se encontrase situado en el entorno remoto. Esto ha sido posible gracias a la definición de los requisitos y nociones previas sobre la teleoperación en entornos nucleares, que han ayudado a entender la complejidad de las condiciones ambientales en el reactor nuclear de fusión, así como las distintas formas de precepción del ser humano y cómo estimularlas correctamente para aumentar la inmersión.

Al establecer el marco de los entornos nucleares de fusión, se vio cómo eran necesarios ciertos requisitos en la comunicación entre el robot maestro y el esclavo, ya que al aplicar la manipulación remota en este caso las disimilitudes entre las dimensiones, fuerzas e inercias generadas en el entorno remoto se requiere de un gran escalado. Como los dispositivos maestro y esclavo son tan diferentes se crea

una carencia natural respecto a la interconectividad entre dichos dispositivos. Por ello, la primera contribución que se validó en la PAT fue un Protocolo de Teleoperación que está siendo examinado y evaluado por el comité de Telerrobótica para poder ser incluido en un nuevo estándar ISO de Telerrobótica que permita la comunicación bilateral entre dispositivos de distintos fabricantes y sea posible aplicar el modo de control más conveniente según la tarea a realizar.

La problemática de tener que entrar en el reactor de fusión para realizar tareas de mantenimiento por manipulación remota, implica la necesidad de la segunda aportación de esta tesis: el estudio teórico de la posibilidad de utilizar un multiplexor para todas las señales de control necesarias en las tareas de inspección y mantenimiento, ya que no sólo implica el uso de un brazo manipulador robótico, sino también la necesidad de una plataforma que sirva de base móvil de ese esclavo para poder moverse en el interior del Tokamak. Esto implica que podemos estar hablando de unos 500 cables de los cuales casi 300 señales serían de control y el resto de alimentación de todos los sistemas. La dificultad que resultaría de mover un cable umbilical de dichas dimensiones y características implica plantearse el uso de un multiplexor que facilite el movimiento por el interior de la cámara. Se ha comprobado a nivel teórico que sí es posible su desarrollo e implementación con las tecnologías actuales aunque todavía no se ha hecho realidad, sin embargo su uso podría disminuir el número de cableado a 50, de los cuales 40 aproximadamente serían de control, con lo que el uso de esta tecnología facilitaría enormemente las tareas de desplazamiento del manipulador y su base móvil.

Como ya se ha comentado, debido a la manipulación de alto escalado no se pueden transmitir las fuerzas de las cargas que manejan los dispositivos esclavos a los maestros, además el uso de medidas indirectas a través de los actuadores de dichos dispositivos pueden llevar a no transmitir los pesos e inercias reales de la carga. Por ello, se ha desarrollado un algoritmo que estima dichas fuerzas a partir de un sensor de fuerza/par y una IMU que deberían de ir convenientemente blindadas y tratadas por endurecimiento RadHard, para que sean tolerantes a la radiación. En este apartado también se ha trabajado en el dispositivo maestro para conseguir transmitir de forma efectiva dichas fuerzas escaladas, es por ello que se ha trabajado en un control de fuerzas estimado y basado a partir de un control de

corriente mediante una correcta caracterización de los actuadores del maestro. Con la electrónica desarrollada, se consigue eliminar los pesos e inercias referentes a los sensores fuerza/par que sería necesario acoplar a la estructura del maestro para poder realizar dicho control en fuerza. No obstante, para ayudar a la correcta inmersión del operador y por tanto hacer que perciba correctamente las fuerzas y estímulos hápticos se ha valorado satisfactoriamente el uso de estímulos multimodales a través de la vista, oído y tacto para la realización de tareas, como ya se demostró en el Capítulo 6 que afectaba favorablemente al rendimiento de la manipulación.

A propósito de conseguir una mayor inmersión del operador, se ha trabajado en el sistema de visión estereoscópica, para ofrecer nuevas posibilidades aplicando nuevas tecnologías que han surgido recientemente en el campo de la Realidad Virtual. En esta línea se han desarrollado nuevas implementaciones en el PAT para contribuir a la inmersión del operador desde el punto de vista visual además del háptico ya comentado. Para ello, se ha creado un algoritmo que a partir de los datos obtenidos de un sensor RGB-D, obtiene una nube de puntos que se proyecta en un monitor 3d para su visualización estereoscópica, de esta forma podemos tener una mayor percepción del entorno sin que sea necesario tener una cámara 3D. El potencial de esta tecnología va desde la generación de puntos de vista binoculares virtuales que permite visualizar la escena en 3D desde puntos diferentes al de la cámara, también pudiéndose tratar dicha nube de puntos para analizar los datos de la escena y poder plantear un algoritmo predictor de colisiones por ejemplo. Además gracias a esa visualización binocular también se ha creado un espacio de trabajo virtual para el operador personalizable mediante un escritorio virtual envolvente al que podemos acceder mediante una realidad virtual inmersiva con unas gafas de realidad virtual tipo HMD que tengan un campo de visión ancho: esto permite al operador tener accesibilidad a todos los datos y puntos de vista que necesite del entorno remoto a su alrededor teniendo que solo mover la cabeza para visualizarlos.

Por tanto, según todo lo expuesto se puede considerar como cumplidos todos los objetivos de la tesis, pues el objetivo global de la tesis es avanzar en el desarrollo de tecnologías que permitan al operador teleoperar un robot en entornos de radiación

nuclear de forma que el usuario perciba el entorno como si estuviera realizando la tarea directamente, para ello su cuerpo ha de sentir los distintos estímulos visuales, auditivos y táctiles como si se encontrase situado en el entorno remoto pese a la dificultad añadida de las limitaciones de operar en entornos nucleares de fusión, donde los equipos tienen que cumplir con unos requisitos muy estrictos.

Se ha conseguido cumplir el objetivo de esta tesis de obtener una mayor flexibilidad y transparencia de los sistemas telerrobóticos para que el operador sienta la inmersión en el entorno remoto, permitiendo un enfoque más flexible para realizar manipulación a distancia en ambientes radiactivos.

Sin embargo, no ha de verse como un beneficio exclusivo para la telerrobótica en fusión nuclear ya que la telerrobótica en general y otras áreas de su aplicación también se nutrirían de los avances logrados en esta tesis.

También el beneficio de contar con una Plataforma Abierta de Teleoperación que permita llevar a cabo nuevas pruebas y experimentos, y que se vaya nutriendo de futuros trabajos de investigación aumentando su valor añadido para el Departamento de Automática de la ETSI Industriales de la UPM, y el Centro de Automática y Robótica al que pertenece.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Abel 1990] Abel, E., & Siva, K. (1990, July). Nuclear telerobotics and dextrous controllers. In Intelligent Robots and Systems' 90.'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS'90. IEEE International Workshop on (pp. 363-371). IEEE.

[Adams 1999] Stable haptic interaction with virtual environments. IEEE Transactions on Robotic and Automation Vol. 15, pp 465-474

[Adelstein 2000] Bernard D. Adelstein y Stephen R. Ellis. "Rotation and direction judgment from visual images head slaved in two and three degrees of freedom". IEEE transactions on systems, man and cybernetics – Parte a: Systems and humans, vol. 30, no. 2. Marzo 2000.

[Akin 2002] Akin, D. L., & Bowden, M. L. (2002). EVA, robotic, and cooperative assembly of large space structures. In Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE (Vol. 7, pp. 7- 599). IEEE.

[Albahari 2015] Albahari, "Threading in C#," 15 06 2015. [Online]. Available: <http://www.albahari.com/threading/>.

[Aleotti 2002] Jacopo Aleotti, Stefano Caselli y Monica Reggiani. "Multimodal user interface for remote object exploration with sparse sensory data". Proceedings of the IEEE International workshop on robot and human interactive communication. Berlin, Alemania. Septiembre 2002.

[Alho 2011] P. Alho et al. "Planning of Dependable Remote Handling Control System Architecture for ITER". In: European Nuclear Young Generation Forum, ENYGF 2011. Prague, Czech Republic, 2011.

[An 1986] An, K-N., Askew, L. y Chao, E. "Biomechanics and Functional Assessment of Upper Extremities", Trends in Ergonomics/Human Factors III, El-sevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 573-580, 1986.

[Analog Devices] Analog Devices, "Conexionado interno de Adis16405 PCBZ", [En línea]. Disponible en: <http://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/inertial-mems/imu/adis16imu1-pcb>

[Aracil 1995] Aracil, R., Penin, L. F., Feme, M., Jimenez, L. M., Barrientos, A., Martinez, P., & Tudun, A. (1995). ROBTET: A new teleoperated system for live-line maintenance. In Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance, 1995. ESMO-95 Proceedings., Seventh International Conference on (pp. 205-211). IEEE.

[Aracil et al. 2002] Aracil, R., Ferre, M., Hernando, M., Pinto, E., & Sebastian, J. M. (2002). Telerobotic system for live-power line maintenance: ROBTET. Control Engineering Practice, 10(11), 1271-1281.

- [Aracil et al. 2009] Aracil, R., Ferre, M., Azorín, J. M., & Pea, C. (2009, October). Bilateral controller design based on transparency in the state convergence framework. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 4603-4608). IEEE.
- [Arduino SPI library] Arduino, "SPI library", [En línea]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>
- [Azorin 2003a] Azorin, J. M., Reinoso, O., Sabater, J. M., Neco, R. P., & Aracil, R. (2003, June). Dynamic analysis for a teleoperation system with time delay. In *Control Applications, 2003. CCA 2003. Proceedings of 2003 IEEE Conference on* (Vol. 2, pp. 1170-1175). IEEE.
- [Azorin 2003b] José Maria Azorin Poveda. "Control bilateral por convergencia de estados de sistemas teleoperador con retardos en la transmisión". Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernandez. Elche 2003.
- [Azorin 2004] Azorin, J. M., Sabater, J. M., Paya, L., & Garcia, N. (2004, June). Kinematics correspondence & scaling issues in virtual telerobotics systems. In *Automation Congress, 2004. Proceedings. World (Vol. 15, pp. 383-388). IEEE.*
- [Azorín 2008] Azorin, J. M., Aracil, R., Sabater, J. M., Perez, C., & Garcia, N. M. (2008). Transparent bilateral control architecture by state convergence for teleorobotics. *Proc. 17th IFAC World Congr*, 12721-12726.
- [Ballantyne 2002] Ballantyne, G. H. (2002). Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 16(10), 1389-1402.
- [Barrientos 1997] Antonio Barrientos, Rafael Aracil, Oscar Luengo y Ernesto Gambao. "Teleoperation of a backhoe excavator through force reflection and pressure measurements". *International Advanced Robotics Programme*.
- [Barrientos 2007] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer, y R. Aracil, "Fundamentos de robótica". McGraw-Hill, Interamericana de España, 2007.
- [Barrio 2012] Barrio, J., Suarez-Ruiz, F., Ferre, M., & Aracil, R. (2012, October). A rate-position haptic controller for large telemanipulation workspaces. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 58-63). IEEE.
- [Begliomini 2007] Chiara Begliomini, Matthew B Wall, Andrew T Smith, and Umberto Castiello. Differential cortical activity for precision and whole-hand visually guided grasping in humans. *The European journal of neuroscience*, 25(4):1245-1252, February 2007. ISSN 0953-816X. doi: 10.1111/j.1460-9568.2007.05365.x. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17331220>.

- [Behr 2008] Remote-handling systems at the high-radiation areas of the GSI fragment separator FRS. K.-H. Behr, B. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. Vol. 266, pp 4280–4283. 2008
- [Behzad 2011] Shared control architectures for haptic training: Performance and coupled stability analysis. K. Behzad, Hashtrudi-Zaad Keyvan. Int. Journal of Robotics Research. Vol. 30 (13), pp: 1627-1642. 2011.
- [Benesty 2000] J. Benesty y D. R. Morgan. “Frequency domain adaptive filtering revisited, generalization to the multi-channel case, and application to acoustic echo cancellation”. ICASSP. Istanbul. Junio 2000.
- [Berendsen 1993] Berendsen, C. S., Champenois, G., & Bolopion, A. (1993). Commutation strategies for brushless DC motors: influence on instant torque. Power Electronics, IEEE Transactions on, 8(2), 231-236.
- [Bernardino 2007] Stereoscopic image visualization for telerobotics: Experiments with active binocular cameras. A. Bernardino, J. Santos-Victor, M. Ferre, M. A. Sanchez-Uran. in Advances in Telerobotics (Springer Tracts in Advanced Robotics), Springer-Verlag. Vol. 31, pp. 77–90. 2007.
- [Beynel 1982] Compilation of Radiation Damage Test Data. Part III: Materials used around high-energy accelerators. P.Beynel, P. Maier, H Schönbacher. Informe del CERN. 1982.
- [Birnbom 2009] I Birnbom, M Reiner, and H Pratt. Early Multimodal Interaction in Natural Perception: An ERP study with Source Estimations. Journal Basic. Clin. Physiol. Pharmacol., 20:286, 2009.
- [Blaabjerg 1999] Blaabjerg, F., Kjaer, P. C., Rasmussen, P. O., & Cossar, C. (1999). Improved digital current control methods in switched reluctance motor drives. Power Electronics, IEEE Transactions on, 14(3), 563-572.
- [Bock 2008] W.J. Bock, I. Gannot, S. Tanev, F. Berghmans, B. Brichard, A.F. Fernandez, A. Gusarov, M.V. Uffelen, and S. Girard, “An Introduction to Radiation Effects on Optical Components and Fiber Optic Sensors ,” Optical Waveguide Sensing and Imaging, W.J. Bock, I. Gannot, and S. Tanev, eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, pp. 127-165.
- [Borque 2014] G. Borque, “Estudio de fuerzas externas para manos robóticas”. TFG en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, septiembre 2014.
- [Botturi 2009] Perception-centric Force Scaling function for Stable Bilateral Interaction. D. Botturi, S. Galvan, M. Vicentini M, C. Secchi. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA. 2009.
- [Bouzit 2002] Bouzit M., Burdea G., Popescu G., Boian R. “Rutgers Master II-new design force-feedback glove”, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, vol. 7, (2) pp. 256 – 263, Junio 2002.

- [Bresciani 2008] Jean-Pierre Bresciani, Franziska Dammeier, and Marc O Ernst. Tri-modal integration of visual, tactile and auditory signals for the perception of sequences of events. *Brain research bulletin*, 75(6):753{60, April 2008. ISSN 0361-9230. doi: 10.1016/j.brainresbull.2008.01.009. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.brainresbull.2008.01.009>.
- [Burdea 1994] Burdea, G. and Coiffet, P. “Virtual Reality Technology”, New York: John Wiley and Sons, Inc. 1994.
- [Cannaday 2009] B. Cannaday, “Working With The WPF Dispatcher,” 2009. [Online]. Available: <http://tech.pro/tutorial/800/working-with-the-wpf-dispatcher>. [Accessed 5 6 2015].
- [Casals 2009] A. Casals. “Robots in surgery”. In: *Autonomous Robotic Systems*. Ed. by A. de Almeida and O. Khatib. Springer London, 236, pp. 222–234.
- [Castiello 2005] Umberto Castiello. The neuroscience of grasping. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9):726{736, September 2005. ISSN 1471-003X.
- [Choi 2002] Seungmoon Choi y Hong Z. Tan. “A study on the sources of perceptual instability during haptic texture rendering”. *Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation*. Washington, USA. Mayo 2002.
- [Cogollor 2011] Jose M Cogollor, Charmayne Hughes, Manuel Ferre, Javier Rojo, Joachim Hermsd orfer, Alan Wing, and Sandra Campo. Handmade Task Tracking Applied to Cognitive Rehabilitation. *Sensors*, 12(10):14214{14231, 2012.
- [Cogollor 2012] Jose M Cogollor, Charmayne Hughes, Manuel Ferre, Javier Rojo, Joachim Hermsd orfer, Alan Wing, and Sandra Campo. Handmade Task Tracking Applied to Cognitive Rehabilitation. *Sensors*, 12(10):14214{14231, 2012..
- [Coiffet 1985] J. V. y. P. Coiffet, «Teleoperation and Robotics. Evolution and Development,» Kogan. Londres, 1985.
- [Collete 2010] Active quadrupole stabilization for future linear particle colliders. C. Collette, et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*. Vol. 621, pp: 71–78. 2010.
- [Colombo 2001] Carlo Colombo, Alberto Del Bimbo y Alessandro Valli. “Real time tracking and reproduction of 3D human body Motion”. 0-7695-1183-X/01. IEEE 2001
- [Crouch 1977] Crouch D.S. “Mars Viking Surface sampler Subsystem”, *ANS 25th Conference on Remote Systems Technology*, 1977.
- [Damiani 07] ‘ITER Remote Handling EU Procurement Packages’. Carlo Damiani; Presentation in Tampere meeting ; Tampere, Finland; December 2007

- [Davare 2007] Marco Davare, Michael Andres, Emeline Clerget, Jean-Louis Thonnard, and Etienne Olivier. Temporal Dissociation between Hand Shaping and Grip Force Scaling in the Anterior Intraparietal Area. *J. Neurosci.*, 27(15):3974{3980, April 2007.
- [Debelle 2013] Thierry Debelle, Ravi Marawar. " Environmental Testing of NI Products for Big Physics Applications". ni.com, March 2013. [En línea] Disponible: ftp://ftp.ni.com/pub/gdc/tut/environmental_test.pdf
- [Denavit-Hatenberg 1955] J. Denavit and R.S Hatenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrix". En: "Trans of the ASME. Journal of applied Mechanics" 22 (1955), pp215-221.
- [Desbats 2005] 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.
- [Desbats 2008] Desbats, P., Garrec, P., Perrot, Y., Measson, Y., Geffard, F., David, O., ... & Piolain, G. (2008, March). Overview of robotic technologies for nuclear hazardous environments. In Proceedings of ANS Joint topical meeting. Emergency Management & Robotics for Hazardous Environments, March (pp. 9-12).
- [Diederich 2004] Diederich A, Colonius H (2004): Bimodal and trimodal multisensory enhancement: Effects of stimulus onset and intensity on reaction time. *Perception and Psychophysics* 66:1388-1404.
- [Doñate 2004] Martín Doñate C. "Interfaces hápticas. Aplicaciones en entornos virtuales", XVI congreso de Ingeniería Gráfica.
- [Douglas 2011] High level integration of remote handling control systems at JET". Paul Douglas Murcutt, Stephen Collins, Peter Allan. *Fusion Engineering and Design*. Vol. 86, pp: 1911–1914. 2011.
- [Doyle 2001] Doyle Melanie C and Snowden Robert J. Identification of visual stimuli is improved by accompanying auditory stimuli: The role of eye movements and sound location. *Perception*, 30(7):795 1 2 810, 2001
- [Ehrsson 2000] H Henrik Ehrsson, GranWestling, Roland S Johansson, Hans Forssberg, H Henrik, Anders Fagergren, Tomas Jonsson, S Johansson, and Hans Forssberg Cortical. Cortical Activity in Precision- Versus Power-Grip Tasks: An fMRI Study. *J Neurophysiol*, 83:528{536, 2000.
- [Ellis 1996] Ellis R.E., Ismaeil O.M. "Design and evaluation of a high performance haptic interface", *Robotica* vol. 4, pp. 321-327, 1996.
- [Ernst 2002] Marc O Ernst and Martin S Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870):429{433, January 2002. ISSN 0028-0836. doi: 10.1038/415429a.

[Evrard 2009] Intercontinental, multimodal, wide-range tele-cooperation using a humanoid robot. P. Evrard, N. Mansard, O. Stasse, A. Kheddar, T. Schauss, C. Weber, A. Peer, M. Buss. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009.

[Fernandez 2001] A. Fernandez Fernandez^{a,b,1}, F. Berghmans^{a,d}, B. Brichard^a, M. Van Uffelen^a, M. Decré^a, P. M'egret^c, M. Blondel^c and A. Delchambre^b. "Radiation-tolerant data links for fusion reactors: from serial electrical data link to parallel optical data link."

[Ferre 1997] Ferre M. "Diseño de Interfaces Avanzadas para Robots Teleoperados. Desarrollo de un Entorno de Teleoperación con Características Multimedia", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1997.

[Ferre 2004] Manuel Ferre, Rafael Aracil; Juan Manuel Bogado y Roque Saltaren. "Improving force feedback perception using low bandwidth teleoperation devices". Proceedings of Eurohaptics. Munich, Alemania 2004.

[Ferre 2007a] Ferre, M., Buss, M., Aracil, R., Melchiorri, C., Balaguer, C., "Advances in Telerobotics". Springer, 2007.

[Ferre 2007b] M. Ferre, J. Barrio, C. Melchiorri, J. Bogado, P. Castedo, and J. Ibarra, "Experimental results on Bilateral Control Using an Industrial Telemanipulator," in Advances in Telerobotics, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, M. Ferre, M. Buss, R. Aracil, C. Melchiorri, and C. Balaguer, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2007, vol. 31, pp. 177-190. [En línea]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71364-7_12

[Ferre 2008] Stereoscopic Human Interfaces. Advanced Telerobotic Applications for Telemanipulation. Manuel

Ferre, Rafael Aracil, Miguel A. Sánchez-Urán. IEEE Robotics & Automation Magazine. Vol. 15, pp: 50-57. 2008"

[Ferre 2012] Ferre, M., Cerrada, P., Barrio, J., & Wirz, R. (2012). "Haptic Rendering Methods for Multiple Contact Points". In Immersive Multimodal Interactive Presence (pp. 157-169). Springer London.

[Ferre et al. 2003] Ferre, M., Aracil, R., Navas, M., & Escalera, J. (2003, September). Real time video image processing for teleoperation: Image Blending and stereoscopy. In Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference (Vol. 2, pp. 539-544). IEEE.

[Ferrell 1965] W. R. Ferrell, «Remote Manipulation with Transmission Delay,» IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, vol. 6, pp. 24-32, 1965.

[Fong 2001a] T. Fong, T. Thorpe y C. Baur. "Advanced interfaces for vehicle teleoperation: Collaborative control, sensor fusion displays and remote driving tools". Autonomous Robots No. 11, pp. 75-85. 2001.

- [Fong 2001b] T. Fong. et. al., «Novel interfaces for remote driving: gesture, haptic and PDA,» *Autonomous robots*, pp. 75-85, 2001
- [Force Dimension] Force Dimension. “Force dimension DELTA-OMEGA”, Web.: <http://www.forcedimension.com/products/index.html>.
- [Forster et al. 2002] Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S., & Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental Brain Research*, 143(4), 480–487
- [Fort 2002] A Fort, C Delpuech, J Pernier, and M Giard. Dynamics of cortico-subcortical cross-modal operations involved in audio-visual object detection in humans. *Cereb Cortex*, 12(10):1031{1039, 2002. *Cortex*, 12(10):1031{1039, 2002.
- [Fort et al. 2002b] Fort A, Delpuech C, Pernier J, Giard M (2002b). Early auditory–visual interactions in human cortex during nonredundant target identification. *Cognitive Brain Research* 14:20-30. [aah Frassinetti F, Bolognini N, Làdavas E (2002): Enhancement of visual perception by crossmodal visuo-auditory interaction. *Experimental brain research* 147:332-343.
- [Frassinetti 2002] Francesca Frassinetti, Nadia Bolognini, and Elisabetta Ladavas. Enhancement of visual perception by crossmodal visuo-auditory interaction. *Experimental Brain Research*, 147(3):332{343, 2002. ISSN 0014-4819. doi: 10.1007/s00221-002-1262-y.
- [Friconneau 2011] ITER remote maintenance system configuration model overview. J.P. Friconneau, C. Conesa, C.H. Choi, A. Damman, I. Kuehn, B. Levesy, J.P. Martins, M. Nakahira, J. Palmer, G. Rigonia, A. Tesini, C. Damiani, C. Gonzalez Gutierrez, D. Locke. *Fusion Engineering and Design*. Vol. 86, pp: 1903–1906 2011.
- [Frisoli 2011] Antonio Frisoli, Massimiliano Solazzi, M Reiner, and Massimo Bergamasco. The contribution of cutaneous and proprioceptive sensory modalities in haptic perception of orientation, 2011.
- [Frisoli 2012] Antonio Frisoli, Massimiliano Solazzi, M Reiner, and Massimo Bergamasco. The contribution of cutaneous and proprioceptive sensory modalities in haptic perceptionof orientation, 2011.
- [Galbiati 1964] L. Galbiati. “A compact flexible servo-system for master slave electric manipulators”. In: *Proceedings of the 12th Conference on Remote Systems Technology*. San Francisco, CA, USA: American Nuclear Society, 1964.
- [Galiana 2012] I. Galiana, M. Ferre, J. Barrio, and F. Suárez-Ruiz, “Arquitectura de ControlBilateral para manipulación remota en Instalaciones de Fusión Nuclear,” 2012. [En línea]. Available: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14427>
- [Galiana 2013] Galiana Bujanda, I. (2013). Design and control of multi-finger haptic devices for dexterous manipulation (Doctoral dissertation, Industriales).

- [Garcia 2008] J. G. Garcia, A. Robertsson, J. G. Ortega, y R. Johansson, “Sensor fusion for compliant motion control”. *Robotics, IEEE Transactions on* vol. 24, no. 2, pp. 430–441, 2008.
- [Gargiulo 2008] L. Gargiulo, P. Bayetti, V. Bruno, J.-J. Cordier, J.-P. Friconneau, C. Grisolia, J.-C. Hatchressian, M. Houry, D. Keller, and Y. Perrot, “Development of an ITER relevant inspection robot,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 83, no. 10-12, pp. 1833–1836, Dec. 2008. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.06.039>
- [Gargiulo 2009] L. Gargiulo, P. Bayetti, V. Bruno, J.-C. Hatchressian, C. Hernandez, M. Houry, D. Keller, J.-P. Martins, Y. Measson, and Y. Perrot, “Operation of an ITER relevant inspection robot on Tore Supra tokamak,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, no. 2-6, pp. 220–223, Jun. 2009. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.11.043>
- [Gimenez 2003] Giménez, A., Balaguer, C., Sabatini, A. M., & Genovese, V. (2003, October). The MATS robotic system to assist disabled people in their home environments. In *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 3, pp. 2612-2617). IEEE.
- [Goertz 1954a] Goertz, R.C. Electronically controlled manipulator, *Nucleonics* 12 (1954a) (11), pp. 46–47.
- [Goertz 1954b] Goertz, R.C., Mechanical master–slave manipulator, *Nucleonics* 12 (1954b) (11), pp. 45–46.
- [Goertz 1964] Goertz R.C. “Manipulator Systems Development at ANL”, *Proceedings of the 12th Conference on Remote Systems Technology*, ANS, Noviembre 1964.
- [Gonzalez 2006] Gonzalez C., Ferre M., Barrio J., Cobos S., Aracil R. “Interfaz háptica multidedo para tareas colaborativas”, *XXVII Jornadas de automática*. Universidad de Almería, 2006.
- [Guyton 1989] Arthur C. Guyton. “Tratado de fisiología medica”. W.B. Saunders Company.
- [Hannaford 1991] 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*, vol. 21, no. 3, pp. 620–633, 1991.
- [Hayt 2006] W. Hayt and J. Buck, *Teoría Electromagnética*, Mc Graw Hill., 2006.
- [Hashtrudi-Zaad, 2001]. *Analysis of Control Architectures for Teleoperation Systems with Impedance / Admittance Master and Slave Manipulators*. Keyvan Hashtrudi-Zaad and Septimiu E. Salcudean. *The Int. Journal of Robotics Research* 2001
- [Hecht 2006] David Hecht, Miriam Reiner, and Gad Halevy. *Multimodal virtual environments: response times, attention, and presence*. Presence: Teleoper. Virtual Environ.,

15(5):515{523, 2006. ISSN 1054-7460. doi: 10.1162/pres.15.5.515. URL <http://dx.doi.org/10.1162/pres.15.5.515>.

[Hecht 2008] Hecht D, Reiner M, Karni A (2008): Enhancement of response times to bi- and tri-modal sensory stimuli during active movements. *Experimental Brain Research* 185:655-665.

[Hecht 2009] Hecht D, Reiner M (2009): Sensory dominance in combinations of audio, visual and haptic stimuli. *Experimental Brain Research* 193:307–314.

[Hernando 1999] Hernando, M., Gambao, E., Pinto, E., & Barrientos, A. (1999). Collision control in teleoperation by virtual force reflection. An application to the ROBTET system. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 565-570). IEEE.

[Hernando 2002] Miguel Hernando Gutierrez. “Arquitectura de Control, Planificación y Simulación para Teleprogramación de Robots”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2002.

[Hernando 2003] Hernando, M., & Gambao, E. (2003, July). A robot teleprogramming architecture. In *Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME International Conference on* (Vol. 2, pp. 1113-1118). IEEE.

[Honore 1989] J Honore, M Bourdeaud'hui, and L Sparrow. Reduction of cutaneous reaction time by directing eyes towards the source of stimulation. *Neuropsychologia*, 27(3): 367{371, 1989.

[Hopf 2000] Klaus Hopf. “An autostereoscopic display providing comfortable beijing conditions and a high degree of telepresence”. *IEEE transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 10, no. 3. Abril 2000.

[Houry 2010] M. Houry, P. Bayetti, D. Keller, L. Gargiulo, V. Bruno, J. Hatchressian, C. Hernandez, J. 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*, vol. 85, no. 10-12, pp. 1947–1951, Dec. 2010. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.06.030>

[How 2004] J. How, “Chapter 5: Viewing/Metrology,” in *Design Description Document DDD23: Remote handling equipment. N_23_DD_56_R0.3: ITER*, 2004, ch. 5, pp. 1–11.

[Huihuan 2013] Huihuan, Q., Yangsheng, X., & Wenfu, X. (2013, July). The state-of-arts and key technologies for telerobotics in nuclear applications. In *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese* (pp. 6016-6021). IEEE.

[Ikei 2002] Yasushi Ikei y Masashi Shiratori. “TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures”. *Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Haptic Interfaces for virtual environments and teleoperator systems*. 2002.

- [Immersion Co] Immersion co. "CyberGraps", Web.: <http://www.inition.co.uk/>.
- [Ishii 1993] Ishii M., Sato M. "A 3D Interface Device with Force Feedback: A Virtual Work Space for Pick-and-Place Tasks", IEEE, Seattle, pp. 331-335, 1993.
- [Ishii 2007] E. Ishii, h Nishi, y K. Ohnishi, "Improvements of Performances in Bilateral telemanipulation by using FPGA". En: IEEE, "translations on industrial electronics" 54.4 (agosto 2007), pp 1876-1884.
- [ITER Org, 2004] ITER Org., "Chapter 5: Viewing/Metrology," Design Description Document: Remote Handling Equipment (DDD 23), N 23 DD 56 R 0.3: 2004, pp. 1-11.
- [Izard 2009] J. Izard, Y. Perrot, and J. Friconneau, "Review of design principles for ITER VV remote inspection in magnetic field," Fusion Engineering and Design, vol. 84, no. 2-6, pp. 969-973, Jun. 2009. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.02.016>
- [Izard 2010] J. 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, vol. 20, no. 3, pp. 1767-1772, 2010. [En línea]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5433261
- [Jeannerod 1995] M Jeannerod, M A Arbib, G Rizzolatti, and H Sakata. Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. Trends in Neurosciences, 18 (7):314-320, 1995. ISSN 0166-2236.
- [Jones 2006] Jones, Lynette A., and Susan J. Lederman. "Human hand function". Oxford University Press, 2006.
- [Juang 2002] B. H. Juang. "Ubiquitous Speech Communication Interface". IEEE. 2002.
- [Kammermeier 2001] Peter Kammermeier, Martin Buss y Günther Schmidt. "A systems Theoretical model for human perception in multimodal presence systems". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 6, no. 3. Septiembre 2001.
- [Kawasaki 2003] H. Kawasaki, J. Takai, Y. Tanaka, C. Mrad, and T. Mouri, "Control of multifingered haptic interface opposite to human hand," in Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 2707-2712.
- [Keller 2008] D. Keller, Y. Perrot, L. Gargiulo, J.P. Friconneau, V. Bruno, R. Le, B. Soler, M. Itchah, D. Ponsort, P. Chambaud, J. Bonnemason, S. Lamy, and Y. Measson, "Demonstration of an ITER relevant remote handling equipment for Tokamak close inspection," 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2008, pp. 1495-1500.
- [Keller 2009] 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*, vol. 84, Jun. 2009, pp. 1015-1019.

[Kilchenman 2001] Marcia Kilchenman y Michael Goldfarb. “Force saturation, system bandwidth, information transfer and surface quality in haptic interfaces”. *Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation*. Seoul, Korea. Mayo, 2001.

[Kiyoshi 2006] 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*, vol. 81, Nov. 2006, pp. 2411-2415.

[Kraft Telerobotics] K. Telerobotics, «Grips Remotely Operated Force Feedback Manipulator Arm System.,» 2012. [En línea]. Available: <http://krafttelerobotics.com/products/grips.htm>.

[Kuschel 2010] M Kuschel, M Di Luca, M Buss, and R L Klatzky. Combination and Integration in the Perception of Visual-Haptic Compliance Information. *Haptics*, IEEE Transactions on, 3(4):234{244, 2010. ISSN 1939-1412. doi: 10.1109/TOH.2010.9.

[Lawrence 1993] Lawrence, D.A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, p. 624-637.

[Leroux 2006] 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*, vol. 53, Aug. 2006, pp. 2033-2039.

[Leroux 2008] P. Leroux, W. De Cock, M. Van Uffelen, and M. Steyaert, “Design and Radiation Assessment of Optoelectronic Transceiver Circuits for ITER,” *Topical Workshop on Electronics for Particle Physics*, Naxos, Greece: 2008, pp. 167-171.

[Lippiello 2010] V. Lippiello, F. Ruggiero, B. Siciliano y L. Villani, «Preshaped visual grasp of unknown objects with a multi-fingered hand,» *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE/RS, 2010

[Lopez 2012] J. López, J. Breñosa, I. Galiana, M. Ferre, A. Giménez, and J. Barrio, “Mechanical design optimization for multi-finger haptic devices applied to virtual grasping manipulation,” *Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering*, vol. 58, no. 7-8, pp. 431–443, 2012.

[Maaoui 2001] Choubeila Maaoui y Ryad Chellali. “Localization and tracking people for telerobotics”. *IEEE International workshop on robot and human interactive communication*. 2001.

[Magnusson 2004] Charlotte Magnusson y Kirsten Rassmus-Gröhn. “A dynamic Haptic – audio traffic enviroment”. *Proceedings of EuroHaptics*. Munich, Alemania. Junio 2004.

[Mallat 2009] S.Mallat, “A wavelet tour of Signal Processing. The Sparse Way”, 3rd edition, Academic Press, New York, USA, 2009.

[Mandayam 2010] Mandayam A. Srinivasan, “What is Haptics? Director”, Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab. Massachusetts Institute of Technology. Web.: <http://touchlab.mit.edu>.

[Marin 2002a] Marín, R., Sanz, P. J., & Del Pobil, A. P. (2002). A predictive interface based on virtual and augmented reality for task specification in a Web telerobotic system. In Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on (Vol. 3, pp. 3005-3010). IEEE.

[Marin 2002b] R. Marin, P. Vila, P. J. Sanz y A. Marzal. “Automatic Speech Recognition to Teleoperate a robot via Web”. Proceedings of the IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems. Lausanne, Suiza. Octubre 2002.

[Marin 2003] Marín, R., Sanz, P. J., Nebot, P., & Esteller, R. (2003, October). Multirobot Internet-based architecture for telemanipulation: experimental validation. In Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on (Vol. 4, pp. 3565-3570). IEEE.

[Marin 2003b] Marín, R., Sanz, P. J., Nebot, P., & Esteller, R. (2003, October). The Internet-based UJI tele-lab: system architecture. In Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on (Vol. 5, pp. 4904-4909). IEEE.

[Martin 85] ‘Teleoperated Robotics in Hostile Environments’. Eds. By H. L. Martin and D. P. Kuban. Published by Robotics Int. of SME. EE.UU. 1985.

[Martin 2007] San Martin J. “Aportaciones al diseño mecánico de los entrenadores basados en realidad virtual”, Tesis Doctoral, Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Marzo 2007.

[Massie 1994] Massie T.H., Salisbury J.K. “The Phantom haptic interface: a device for probing virtual objects”, Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, symposium on Haptic interfaces for virtual environments and teleoperator systems, 1994.

[Matsui 1993] Matsui, N., Makino, T., & Satoh, H. (1993). Autocompensation of torque ripple of direct drive motor by torque observer. Industry Applications, IEEE Transactions on, 29(1), 187-194.

[Mattila 07] ‘TEKES ITER-projects since1994. ITERRemote Handling interests’. Jouni Mattila; Presentation in Tampere meeting; Tampere, Finland ; December 2007

[MatWeb Database] MatWeb LLC., “Online Materials Information Resource - MatWeb Database.”

[Miccichè 07] ‘The plasma-facing components transporters (PFCT): A prototype system for PFC replacement on the new ITER 2001 cassette mock-up’. G. Miccichè et al., ENEA; Fusion Engineering and Design; January 2007

- [Ming 1989], O.-Y. Ming, D. V. Beard, and J. 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*, May 1989, pp. 1462–1466 vol.3.
- [Mitome 2011] F. Mitome y K. Ohnishi, «Bilateral Control with Bluetooth and Its Evaluation,» 4th International Conference on Human System Interactions (HSI), pp. 346,351, 2011.
- [Mora 2004] Alvaro Adrian Mora Casas. “Estudio y análisis de la influencia de los factores funcionales en la eficiencia de sistemas telerroboticos”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2004.
- [Mouri 2005] T. Mouri, H. Kawasaki, and K. Umebayashi, “Developments of new anthropomorphic robot hand and its master slave system,” in *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2005, pp. 3225–3230.
- [Mouri 2006] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Kigaku, and Y. Ohtsuka, “Novel control methods for multi-fingered haptic interface robot,” in *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 1576–1581.
- [Mouser electronics] Mouser electronics, “Adis16405 PCBZ breakout board specifications”, [En línea]. Disponible en: <http://www.mouser.es/ProductDetail/Analog-Devices/ADIS16405-PCBZ/?qs=BpaRKvA4VqGqBAImZRzDwQ%3D%3D>
- [Muhammad 2007] A. Muhammad et al. “Development of Water Hydraulic Remote Handling System for Divertor Maintenance of ITER”. In: 2007 IEEE 22nd Symposium on Fusion Engineering (June 2007), pp. 1–4.
- [Mulligan 2001] Jane Mulligan, Volkan Isler y Kostas Daniilidis. “Performance evaluation of stereo for telepresence”. IEEE, 0-7695-1143-0/01. 2001.
- [Muntener 2006] M. Muntener, A. Patriciu, D. Petrisor, D. Mazilu, H. Bagga, L. Kavoussi, K. Cleary, and D. Stoianovici, “Magnetic resonance imaging compatible robotic system for fully automated brachytherapy seed placement,,” *Urology*, vol. 68, Dec. 2006, pp. 1313-1317.
- [Nagy 2004] István Nagy, Hermann Mayer y Alois Knoll. “Application of force feedback in robot assisted minimally invasive surgery”. *Proceedings of EuroHaptics*. Munich, Alemania. Junio 2004.
- [National instruments] National instruments spain, "Ayuda y soporte técnico de NI", [En línea]. Disponible en: <http://spain.ni.com/>
- [Neri 2007] C. Neri, L. Bartolini, A. Coletti, M. F. 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*,

vol. 82, no. 15-24, pp. 2021–2028, 2007. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379607000208>

[Neri 2009] C. Neri, A. Coletti, M. F. de Collibus, G. Fornetti, and F. Pollastrone, “The upgraded laser in vessel viewing system (IVVS) for ITER,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, no. 2-6, pp. 224–228, 2009. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379609001094>

[Nguan 2008] Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype. Christopher Nguan, Brian Miller, Rajni Patel, Patrick P. W. Luke, Christopher M. Schlachta. *Int. Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. Vol. 4, pp: 304-309. 2008.

[Nieminen 2009] P. Nieminen, S. Esque, A. Muhammad, J. Mattila, J. Väyrynen, M. Siuko, and M. Vilenius, “Water hydraulic manipulator for fail safe and fault tolerant remote handling operations at ITER,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 84, no. 7-11, pp. 1420–1424, 2009. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379608004377>

[Nikitas 2002] S. G. Nikitas M. Sgouros, «Integrating WAP-based Wireless Devices in Robot Teleoperation,» *Proceedings of the 2002 IEEE. International Conference on Robotics & Automation*. Washington, DC, May 2002

[Nuño 2011] E. Nuño, L. Basañez, and R. Ortega. “Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial”. In: *Automatica* 47.3 (Mar. 2011), pp. 485–495

[O'Hara 2005] A. P. B. O'Hara, «IEEE 802.11 Handbook- A Designer's Companion,» IEEE Press

[Ohr 2003] Kenneth Ohr, Robert Thompson, Don Barker. “The effective use of Tungsten as a shielding material in nuclear applications”. Exelon Generation Company.

[Olivier 2007] Etienne Olivier, Marco Davare, Michael Andres, and Luciano Fadiga. Precision grasping in humans: from motor control to cognition. *CURRENT OPINION IN NEUROBIOLOGY*, 17(6):644–648, 2007. ISSN 0959-4388. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.conb.2008.01.008>.

[Palmer 07] ‘Overview of ITER Remote Handling’; ESC04-001/ITA 23-28 Task Motivation, ITER IDM, Remote Handling and Assembly Engineering Support (277VHR_v1_0), Appendix 1-1-Overview of ITER Remote Handling. Dr. J. D. Palmer; 2007

[Parrish 1995] R. V. Parrish, S. P. Williams y D. E. Nold. “Depth and size judgements within uncollimated and collimated stereoscopic displays”. *Society for Information displays digest*, pp 293-296. Mayo 1995.

[Pasquero 2004] Jérôme Pasquero, Vincent Lévesque, Vincent Hayward y Maryse Legault. “Display of virtual Braille dots by lateral skin deformation: A pilot study”. *Proceedings of EuroHaptics*. Munich, Alemania. Junio 2004.

- [Peer 2008] Design and Control of Admittance-Type Telemanipulation Systems. Tesis doctoral de Angelika Peer de la Technische Universität München (TUM). 2008
- [Peñin 2000]. Force reflection for time-delayed teleoperation of Space robots Penin, L.F.; Matsumoto, K.; Wakabayashi, S. Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on Year: 2000, Volume: 4 Pages: 3120 - 3125 vol.4, DOI: 10.1109/ROBOT.2000.845143 Cited by: Papers (18) IEEE Conference Publications
- [Pérez et al. 2015] Perez, J., Sales, J., Penalver, A., Fornas, D., Javier Fernandez, J., Garcia, J. C., ... & Prats, M. (2015). Exploring 3-D Reconstruction Techniques: A Benchmarking Tool for Underwater Robotics. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 22(3), 85-95.
- [Perrot 2004] Y. Perrot, L. Chodorge, P. Desbats, J. 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, vol. 28, p. 31, 2004.
- [Pesanti 1959].
- [Phillips 1972] Phillips, K. P. (1972). Current-source converter for AC motor drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, (6), 679-683.
- [Pick 06] 'What we do in The Vessel in-Vessel Field'. Michael A. Pick. EFDA activities 2006
- [Postel 1980] «RFC 768. User Datagram Protocol,» [En línea]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc768.txt>.
- [Postel 1981] «RFC 793. Transmission Control Protocol. Darpa Internet Program. Protocol Specification.,» [En línea]. Available: <http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>
- [Preusche 2002] Carsten Preusche, Jens Hoogen, Detlef Reintsema, Günther Schmidt y BERD Hirzinger. "Flexible multimodal telepresent assembly using a generic interconnection framework". Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation. Washington, USA. Mayo 2002.
- [Puerto 2004] C. del Puerto Riquelme, R. García y M. Malumbres, «Analyzing the behavior of a real-time telerobotic system on IEEE 802.11b wireless networks,» IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2004.
- [Queral 2011] V. Queral, L. Rios, J. Barrio, F. Suárez-Ruiz, and M. Ferre, "Proposal of a fusion manipulación remota procedure for simulation and real servomanipulator tests relevant for IFMIF and ITER pipe flanges," in 1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN, A. Ibarra, J. M. Perlado, and M. Ferre, Eds. Madrid, Spain: Seccion de Publicaciones de la ETSII, 2011, ch. 10, pp. 167–174.
- [Raju 1989] Raju, G.J., Verghese, G.C., Sheridan, T.B.(1989). Design issues in 2-port network models of bilateral remote teleoperatio. IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 1317-1321

[Ribeiro 07] ‘Manipulación Remota Activities of the EURATOM/IST Association Portugal’. Isabel Ribeiro et al.; Presentation in Tampere meeting; Tampere, Finland ; December 2007

[Robotiq Inc] Robotiq, "Hoja de especificaciones técnicas y uso de la mano robótica", [En línea]. Disponible en: <http://support.robotiq.com/display/IMB/6.+Specifications>

[Rodriguez-Seda 2009] Experimental Comparison Study of Control Architectures for Bilateral Teleoperators. E. J. Rodríguez -Seda, Dongjun Lee, Mark W. Spong. IEEE Trans. on Robotics, Vol. 25, pp: 1304-1318. 2009.

[Rolfe 1997] A. Rolfe. “Remote handling on fusion experiments”. English. In: Fusion engineering and design 36.1 (1997), pp. 91–100.

[Rolfe 2007] A. Rolfe, “A perspective on fusion relevant remote handling techniques,” Fusion Engineering and Design, vol. 82, no. 15-24, pp. 1917–1923, Oct. 2007. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.04.049>

[Rolfe 1999] A. 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, vol. 46, no. 2-4, pp. 299–306, Nov. 1999. [En línea]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-3796\(99\)00022-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-3796(99)00022-8)

[Rualdi 2008] E Rualdi, C A Avizzano, P Tripicchio, A Frisoli, and M Bergamasco. Surface perception in a large workspace encounter interface. In Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008. The 17th IEEE International Symposium on, pages 21{26, 2008.

[Ruffaldi] E Ruffaldi, C A Avizzano, P Tripicchio, A Frisoli, and M Bergamasco. Surface perception in a large workspace encounter interface. In Robot and Human Interactive Communication, 2008. RO-MAN 2008. The 17th IEEE International Symposium on, pages 21{26, 2008.

[Runde 2000] Detlef Runde. “How to realize a natural image reproduction using stereoscopic displays with motion parallax”. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, vol. 10, no. 3. Abril 2000.

[Ryan 1995] Ryan, M. J., & Lorenz, R. D. (1995, June). A high performance sine wave inverter controller with capacitor current feedback and “back-EMF” decoupling. In Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC'95 Record., 26th Annual IEEE (Vol. 1, pp. 507-513). IEEE.

[Sakata 2007] Sakata, K., & Fujimoto, H. (2007, April). Perfect tracking control of servo motor based on precise model with PWM hold and current loop. In Power Conversion Conference-Nagoya, 2007. PCC'07 (pp. 1612-1617). IEEE.

- [Salcudean 1998] S. E. Salcudean. Control for teleoperation and haptic interfaces In: Control Problems in Robotics and Automation. Ed. by B. Siciliano and K. Valavanis. Vol. 230. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 5166.
- [Sales 2008] The UJI Industrial Robotics Telaboratory: Real-time Vision and Networking. J. Sales, R. Beltran, P.J. Sanz, R. Marin, R. Wirz, G. Leon, J. Claver, J. Alemany, IEEE/RSJ Int. Conf. IROS. 2008.
- [Salisbury 1998] Salisbury J. K., Srinivasan M.A. “Proceedings of the Third PHANTOM”, Users Group Workshop, AI Lab Technical Report No. 1643 and RLE Technical Report, no. 624, MIT, December 1998.
- [Sayers 1999] Craig Sayers. “Remote Control Robotics”. Editorial Springer. 1999.
- [Schmidt 2004] Henning Schmidt. “HapticWalker – A novel haptic device for walking simulation”. Proceedings of Eurohaptic. Munich, Alemania. Junio 2004.
- [Secchi 2008] Variable delay in scaled port-Hamiltonian telemanipulation. Cristian Secchi, Stefano Stramigioli, Cesare Fantuzzi. Mechatronics. Vol. 18, pp: 357–363. 2008
- [Sen 1990] Sen, P. C. (1990). Electric motor drives and controlpast, present, and future. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 37(6), 562-575.
- [Sgouros 2002] Nikitas M. Sgouros y Stelios Gerogiannakis. “Integrating WAP – based gíreles devices in robot teleoperation enviroments”. Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. Washington, USA. Mayo 2002.
- [Sheridan 1987] Sheridan T.B. et al. “MIT research in telerobotics”, en Proceedings Workshop on Space Telerobotics, JPL Publications, vol. 2, Julio 1987.
- T. B. Sheridan. Telerobotics. In: Automatica 25.4 (1989), pp. 487507.
- [Sheridan 1992] T. Sheridan, «Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control,» The MIT press, Cambridge, MA, 1992.
- [Shibanuma 1995] K. Shibanuma, T. Burgess, and R. Haange. “Overview of ITER remote handling”. In: 1995 IEEE 16th symposium on fusion engineering. 1 (1995), pp. 280–283.
- [Sjöström 2001] Calle Sjöström. “Designing haptic computer interfaces for blind people”. International symposium on Signal Processing and its applications ISSPA. Kuala Lumpur, Malasia. Agosto 2001.
- [Slater 2009] Slater, M., (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. 10.1098/rstb. Phil. Trans. R. Soc. B 12 December 2009 vol. 364 no. 1535 3549-3557

- [Smick 2005] N. Smick, B. LaBombarda, and C. Pitcher, "Plasma profiles and flows in the high-field side scrape-off layer in Alcator C-Mod," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 337-339, pp. 281–285, Mar. 2005. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.09.035>
- [Suarez-Ruiz 2011] F. Suárez-Ruiz, M. Ferre, and R. Aracil, "Telerobotics for Nuclear Fusion Environment," in *III Workshop de Robótica: Robótica Experimental*, Sevilla, Spain, 2011, pp. 1–6.
- [Tavakoli 2007] High-Fidelity Bilateral Teleoperation Systems and the Effect of Multimodal Haptics. M. Tavakoli, A. Aziminejad, R. V. Patel, M. Moalle. *IEEE Tran. on SMC*, part B. Vol. 37(6). 2007.
- [Tenzer 2008] Y Tenzer, B Davies, and F y Baena. Investigation into the effectiveness of vibrotactile feedback to improve the haptic realism of an arthroscopy training simulator. *Stud Health Technol Inform*, 132, 2008.
- [Turro 2001] Nicolas Turro, Oussama Khatib y Eve Coste-Maniere. "Haptically augmented Teleoperation". *Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation*. Seul , Korea. Mayo 2001.
- [Van Uffelen 2005] 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*, 2005, pp. 58970C.1- 58970C.14.
- [Verbeeck 2014] Verbeeck, J., Cao, Y., Van Uffelen, M., Mont Casellas, L., Morales, E. R., Santana, R. R., ... & Leroux, P. (2014). Design and qualification of a MGy tolerant front-end chip in 65 nm CMOS for the read-out of remotely operated sensors and actuators during maintenance in ITER. status: published.
- [Vertut 1985] Vermut J., Coiffet P. "Teleoperation and Robotics. Applications and Technology", Kogan Page, Londres 1985.
- [Virtual Desktop] <http://www.vrdesktop.net/>
- [Vlachos 2003] Vlachos K., Papadopoulos E., Mitropoulos D. N. "Design of a 5-dof Haptic Simulator for Urological Operations", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 5, Octubre 2003.
- [Waldron 2003] K. T. K.J. Waldron, "Mechanical Characterization of the Immersion Corp. Haptic Bimanual, Surgical Simulation Interface,," in *8th International Symposium on Experimental Robotics (ISER02)*, vol. 5. , 2003, pp. 106–112.
- [Wang 1991] H. Wang y F. Itakura. "An approach to dereverberation using multimicrophone sub-band envelope estimation". *ICASSP*, paginas 953-956, vol. 2H. 1991.

- [Watton 2009] An integrative approach to cerebrovascular disease healthcare: IT for cerebral aneurysms Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2009. ISBI '09. IEEE International Symposium on Year: 2009 Pages: 378 - 381, DOI: 10.1109/ISBI.2009.5193063 IEEE Conference Publications
- [Wernli 1982] R. L. Wernli. "Robotics Undersea". Mechanical Engineering Magazine, Agosto 1982.
- [Whalen 2003] Thomas E. Whalen, Silvie Noël y John Stewart. "Measuring the human side of virtual reality". International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurements Systems. Lugano, Suiza 2003.
- [Widmer 2010] A. Widmer and Yaoping Hu. Effects of the Alignment Between a Haptic Device and Visual Display on the Perception of Object Softness. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 40(6):1146-1155, 2010. ISSN 1083-4427.
- [Wiker 1989] Wiker S.F., Hershkowitz E., Zilk J. "Teleoperator comfort and psychometric stability: criteria for limiting master controller forces of operation and feedback during telemanipulation", Proc. Nasa conference on space telerobotics vol 1. pp 99-107 Pasadena, CA, USA.
- [Williams 2002] Loreine E. P. Williams, R. Bowen Loftin, Hal A. Aldridge, Ernst L. Leiss y William J. Bluethmann. "Kinesthetic and visual force display for telerobotics". Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation. Washington, USA 2002.
- [Wilson 1987] Wilson, J., & Muirhead, M. (1987). Subsea telerobotic manipulation. In Proceedings of the international topical meeting on remote systems and robotics in hostile environments.
- [Winfield 2000] A. F. T. Winfield y O. E. Holland, «The Application of Wireless Local Area Network Technology to the Control of Mobile Robots,» Microprocessors and Microsystems, Mar. 2000
- [Wirz 2009] Wirz, R., Marín, R., Ferre, M., Barrio, J., Claver, J. M., & Ortego, J. (2009). Bidirectional transport protocol for teleoperated robots. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 56(9), 3772-3781.
- [Woudenberg 1999] E. Woudenberg, F. K. Soong y B. H. Juang. "A block least squares approach to acoustic echo cancellation". ICASSP. Phoenix, USA. Marzo 1999.
- [Yang 2013] R. Yang, Y. H. Chan, R. Gong, M. Nguyen, A. Strozzi, P. Delmas, G. Gimel'farb and R. Ababou, "Multi-Kinect scene reconstruction: Calibration and depth inconsistencies," in Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), 2013 28th International Conference of, New Zealand, 2013

[Yokokohji 1992] Yokokohji, Y., Yoshikawa, T. (1992). Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling formulation and experiment. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 5, p. 605-620.

[Yokokohji 1999] Yokokohji Y., Hollis R.L., Kanade T. “WYSIWYF Display: A Visual/Haptic Interface to Virtual Environment”, PRESENCE, Teleoperators and Virtual Environments, Vol.8, No.4, pp.412 - 434, 1999.

[You 2003] e. a. Bum-Jae You, «Development of a Home Service Robot 'ISSAC',» Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Oct. 27-31, 2003.

[Zhao 2006] F. ZHAO and Z. YE, “Contrast analysis of udp and tcp and improvement of udp in reliability [j],” Computer Technology and Development, vol. 9, pp. 225–227, 2006.

[Zhou 2007] Z Y Zhou, A D Cheok, Yan Qiu, and Xubo Yang. The Role of 3-D Sound in Human Reaction and Performance in Augmented Reality Environments. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 37 (2):262{272, 2007. ISSN 1083-4427. doi: 10.1109/TSMCA.2006.886376.

APÉNDICE A

Publicaciones

En este anexo se detallan las publicaciones realizadas durante la realización de esta tesis:

Revistas:

Alexander Owen-Hill, José **Breñosa**, Manuel Ferre, Jordi Artigas and Rafael Aracil. *A Taxonomy for Heavy-Duty Telemanipulation Tasks Using Elemental Actions*. International Journal of Advanced Robotic Systems. Volume 10, Issue 371; Oct;2013.. Nivel de impacto:0,821

Javier López, Jose **Breñosa**, Ignacio Galiana, Manuel Ferre, Antonio Giménez, Jorge Barrio. Mechanical Design Optimization for Multi-Finger Haptic Devices Applied to Virtual Grasping Manipulation. Journal of Mechanical Engineering. 2012. Nivel de impacto: 0,466

José M. Cogollor, Matteo Pastorino, Javier Rojo, Alessio Fioravanti, Alan Wing, Maria Teresa Arredondo, Manuel Ferre, Jose **Breñosa**, Joachim Hermsdörfer, Javier De Teresa, Clare Walton, Andrew Worthington, Christos Giachritsis. *An Innovative Solution Based on Human-Computer Interaction to Support Cognitive Rehabilitation*. Revista: Journal of Accessibility and Design for All. 4(3), 238-254; Nov;2014

Conferencias:

Javier Rojo, José M. Cogollor, Matteo Pastorino, Alessio Fioravanti, Jose **Breñosa**, María Teresa Arredondo, Manuel Ferre, Rafael Aracil, Jose María Sebastián and Zúñiga. *Sistema de rehabilitación cognitiva para la asistencia en actividades cotidianas de pacientes tras sufrir un accidente cerebro-*

vascular. 12^o Workshop Robocity 2030, Robótica Cognitiva. 7/2013. Madrid, Spain.

José M. Cogollor, Matteo Pastorino, Javier Rojo, Alessio Fioravanti, Alan Wing, Maria Teresa Arredondo, Manuel Ferre, Jose **Breñosa**, Joachim Hermsdörfer, Javier De Teresa, Clare Walton, Andrew Worthington, Christos Giachritsis. *An Innovative Solution Based on Human-Computer Interaction to Support Cognitive Rehabilitation*. V International Congress on Design, Research Networks, and Technology for all. 9/2013. Madrid, Spain.

Ignacio Galiana, Jose **Breñosa**, Jorge Barrio and Manuel Ferre. *New Control Architecture based on PXI for a 3-Finger Haptic Device Applied to Virtual Manipulation*. EuroHaptics 2012 (Accepted for Publication). 6/2012. Tampere, Finland.

Jose **Breñosa**, Pablo Cerrada, Manuel Ferre and Rafael Aracil. *Design Of An Ergonomic Three-finger Haptic Device For Advanced Robotic Hands Control*. . IEEE - World Haptics Conference (WHC) 2011. 6/2011. Istanbul, Turkey.

P.Cerrada, J.**Breñosa**, I.Galiana, J.López, M.Ferre, A.Giménez and R.Aracil. *Optimal Mechanical Design of Modular Haptic Devices*. Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference. 7/2011. Budapest, Hungary.

Ignacio Galiana, Jose **Breñosa**, Pablo Cerrada, Manuel Ferre, Raúl Wirz and Rafael Aracil. *Control Architecture for a Multifinger Haptic Interface: MasterFinger 3*. ROBOT 2011. Robótica Experimental. 11/2011. Sevilla, España.

Breñosa, J., & Ferre, M. *Haptics force feedback based on current control loop for remote manipulation*. IMEKO2014. Atmosphere, 11, 12. Benevento, Italia.

Capitulos de libro:

M. Ferre, R. Aracil, F. Suárez-Ruiz, J. Barrio, J.M. **Breñosa**, and V. Qeral. *Chapter 8. Robot requirements for nuclear fusion facilities*. 1st Workshop on Fusion Technologies and the contribution of TECHNOFUSIÓN. A. Ibarra, J. M. Perlado and M. Ferre. Seccion de Publicaciones de la ETSII. 2011. P. 135-150. ISBN: 978-84-7484-239-5

Galiana, I., Barrio, J., **Breñosa**, J. M., & Ferre, M. (2013). Modular Multi-finger Haptic Device: Mechanical Design, Controller and Applications. In Multi-finger Haptic Interaction (pp. 55-83). Springer London.

APÉNDICE B

Estudio del Multiplexor

En este estudio de soluciones posibles para el desarrollo de un Multiplexor para su utilización en manipulación remota en Fusión Nuclear, se analizarán todas las opciones disponibles una por una y al final se analizarán y discutirán los datos a través de unas tablas comparativas.

COTS.

El nivel de radiación en estos lugares es un tema muy importante porque electrónica nuclear no tienen que ser calificado si se encuentran en menos de radiación 100Gy, por lo que las soluciones comerciales podrían utilizarse. Pero este límite se reduce a 10 Gy se trate de componentes a base de silicio debido a la degradación de la radiación desde el silicio no es totalmente Radhard.

Por desgracia, todas las soluciones comerciales en el mercado de la industria están basados silicio. En los casos de los componentes basados en el silicio, el escudo de plomo debe ser más gruesa, por lo que esta opción no es viable porque no hay espacio disponible para la electrónica, por lo que el equilibrio entre la protección y la dureza de radiación no se puede lograr sin el rediseño de la dispositivo de manipulación remota. La mayoría de los multiplexores COTS no son RadHard y por lo general son componentes basados en silicio.

Soluciones de tipo COTS no Radhard

Antes de filtrar por la limitación RadHard restrictiva, no multiplexores RadHard COTS con el fin de analizar las dimensiones habituales de este tipo de equipos se pueden resumir.

Hay diversos tipos de soluciones de multiplexación en función de las tecnologías que utilizan y los datos de las señales que gestionan, así que las dimensiones varían en diferentes rangos. Una unidad de rack (U o RU) es una unidad de medida que se utiliza para describir la altura de los equipos destinados para el montaje en un rack

de 19 pulgadas o un rack de 23 pulgadas (El de 19 pulgadas (48,26 cm) o 23 pulgadas (58.42 cm) dimensión se refiere a la anchura del marco en el bastidor, incluyendo el bastidor de montaje de equipos; la anchura de los equipos que se puede montar en el interior del bastidor es menos). Una unidad de rack es de 1,75 pulgadas (44,45 mm) de altura. La profundidad de la rejilla puede variar dependiendo del equipo, la aplicación o el fabricante. En muchos casos, tal profundidad no está especificado en la documentación del fabricante (el estándar sólo menciona menor que la anchura).

En estas soluciones de bastidor del chasis por lo general (dependiendo de modelos y aplicaciones) tiene diferentes ranuras para las tarjetas con el fin de dar más capacidad de configuración en el equipo.

Algunos ejemplos para mostrar la variedad de dimensiones se describen en el cuadro 6:

Tabla 18 - Multiplexores comerciales No RadHard

Imagen	Descripción	Cableado	Dimensiones
64 canales sobre fibra óptica	fibra óptica	482 x 260 x 264 [6U - 19"]
80 canales en un multiplexor modular	cobre	585 x prof. x 180 [4U - 23"]
128 canales multiplexor sobre fibra óptica	fibra óptica	482 x prof. x 140 [3U - 19"]

Por lo general, estas soluciones no son Radhard; En estos casos, es posible tener rack de almacenamiento blindaje de plomo. Pero para lograr el 100Gy debe ser muy gruesa y no cabría en las posibles ubicaciones de la dispositivo de manipulación remota, como se demostró en la Tabla 3 no hay espacio suficiente para la asignación de estos equipos.

Aunque no se especifica como la electrónica RadHard, algunos equipos de National Instruments ha sido probado con la radiación y los resultados fueron mejores de lo esperado.

PXIe System Irradiation Test Summary

cRIO System Irradiation Test Summary

Ilustración 80 - Resultados de Tests de radiación Gamma en equipos de NI [Debelle 2013]

PXI y el chasis cRIO son realmente una buena solución teniendo en cuenta los espacios disponibles para los módulos multiplexores, y pueden ser utilizados como IO remoto o mando a distancia, por lo que la funcionalidad de multiplexación se proporciona de una manera inteligente. Con este fin, el chasis tiene que ser equipado con tarjetas de adquisición de datos adecuados, específicos para las señales para adquirir (o para generar). Sin embargo, algunos de los componentes es el fracaso cerca de 30 Gy.

Por otro lado, bastidores comerciales utilizadas en los propósitos generales, como las transmisiones de telecomunicaciones o video no cumplen los requisitos y se han descartado (pocas soluciones están pendientes de la respuesta fabricante para Radhard). Incluso teniendo en cuenta la dimensión, otras soluciones de rack fabricante son más grandes y menos configurable que los sistemas PXI o cRIO.

Ilustración 81 - Sistemas PXI y cRIO de National Instruments

La altura del chasis excede las dimensiones de todos los lugares excepto para la ubicación 3. La elección de sistema de cRIO o incluso un solo tablero de RIO, que son FPGA integrado, sería muy comprometer entre el blindaje y el espacio de la electrónica disponible para, como la conexión de la líneas para ser multiplexados tiene que ser considerado.

Usando las capacidades de Crio, es factible diseñar un enfoque sofisticado. Por ejemplo, el cRIO podría funcionar como un controlador de automatización local, cerrando el bucle de control local en el dispositivo de manipulación remota, y el intercambio de datos con un supervisor remoto.

Este sistema cRIO no tiene multiplexación módulos per se de National Instruments. La solución es tener módulos de adquisición y programar el multiplexor en FPGA. Se puede programar utilizando un código multiplexado general a partir de los ejemplos de NI. Otra opción podría ser el uso de módulos realizados por una tercera empresa, que son compatibles con el chasis cRIO.

Por desgracia, todas las soluciones comerciales en el mercado de la industria se basan silicio, por lo que el escudo de plomo deben ser más gruesas como se especifica en el apartado 2.3, en consecuencia, disminuir el espacio disponible para la electrónica y haciendo de esta opción para COTS no RadHard no viables. Incluso con no basa silicio electrónica, no hay suficiente espacio para una caja de blindaje para atenuar 100Gy dentro de cualquiera de los cuatro lugares disponibles.

El rediseño de la marca comunitaria para el alojamiento de controlador COTS es también una posibilidad. Tener un blindaje más grueso permite el equipo de National Instruments para resistir a la radiación, sin embargo se necesita el rediseño ya que el volumen final con blindaje será más grande que cualquiera de los lugares disponibles.

En caso de considerar el rediseño de la marca comunitaria para el alojamiento no COTS RadHard, se recomiendan los equipos de National Instruments, ya que han hecho prueba de radiación para su electrónica. Dos opciones están disponibles desde el punto de vista, PXI y cRIO viabilidad:

– Las especificaciones del equipo PXI:

- chasis PXI de 5 ranuras con I / O DAQ tarjetas (analógicas y digitales):
 - Chasis 5 ranuras: (1slot para el controlador): 1.300 €
 - 1 en tiempo real PXI Express Controller: 2.700 €
 - 2 placas analógicas con 80 canales: 4.800 €
 - 2 tableros digitales con 96 canales: 1.200 €
- dimensiones totales de equipos PXI: 250mm x 220mm x 170mm
- Dimensiones del cuadro de protección de plomo:
- Precio de blindado funcional de PXI para la multiplexación: 17.000 €

– Las especificaciones del equipo cRIO:

- cRIO chasis de 8 ranuras con módulos DAQ E / S (análog. y dig.):
 - Chasis 8 ranuras: 2.400 €
 - 1 Real-Time Controller y FPGA: 3.400 €
 - Módulos:
 - 4 analógicas con 32 canales cada uno: 3.300 €
 - 4 tableros digitales con 32 canales cada uno: 1.900 €
- Dimensiones totales de equipos cRIO: 275mm x 90mm x 90mm
- Dimensiones del cuadro de protección de plomo:
- Estimación de blindado del cRIO para la multiplexación: 16.000€.

Para utilizar este equipo no RadHard será necesario el rediseño de la dispositivo de manipulación remota. Por esta razón COTS no RadHard no se les permite soportar los requisitos de radiación ambiental, aun Nacional equipamiento Instrumentos que pueden manejar 100Gy no es posible utilizarlo debido a la compensación entre las limitaciones de radiación y el espacio,

COTS con protección Radhard

Algunas compañías tienen multiplexores RadHard comerciales, pero todos estos productos están más orientados a la industria aeroespacial y militar aplicaciones que el sector nuclear. Por otra parte, sólo venden el chip MUX, como por ejemplo, un multiplexor RadHard aeroespacial.

Varias empresas se han puesto en contacto, por ejemplo: Maxwell Technologies, Aeroflex o Intersil. Aeroflex ha proporcionado un diseño en bruto de la solución de PCB y el precio estimación de los componentes, ofreciendo para desarrollar toda la solución a medida final a partir de sus propios chips. Teniendo en cuenta el endurecimiento de radiación, utilizan física (por ejemplo, cambiando el silicio por el dióxido de silicio [SOI] y el zafiro [SOS]), así como las técnicas lógicas.

Se ha pedido a muchas otras compañías electrónicas nucleares sobre la solución de multiplexación en este tipo de entorno de radiación, pero no se recibieron respuestas positivas con los equipos múltiplex.

En este punto, la única manera de tener una solución con RadHard COTS es construir una PCB personalizado. Como los componentes son COTS en este PCB, es por ello que se ha considerado en esta sección. La siguiente sección cubrirá "soluciones personalizadas", que son todos los que los componentes del IC no cunas tampoco. Por ejemplo, esta compañía es capaz de proporcionar todos los componentes que pueden caber los requisitos y de hacer todo la cualificación necesaria, pero esto también implica desarrollar personalizado IC y las pruebas. Tal es por eso que también se tratará en la sección "Soluciones a medida".

Los componentes RadHard ofrecidos por todas estas empresas han sido probados y diseñados para aplicaciones aeroespaciales y militares, por lo que esto implica algunas diferencias con los requisitos del ITER.

Aunque estos RadHard COTS podría caber en los requisitos del ITER utilizando algún blindaje, es importante entender las diferencias en requisito entre Aeroespacial y ITER.

- La mayoría de los componentes aeroespaciales son probados principalmente para alfa y radiación beta, no para gamma. Pero esto no es un problema porque las tecnologías de fabricación son similares.

- Límites de radiación gamma en las pruebas de calificación están a punto 100krad (Si) o 300krad (Si) pero en la dispositivo de manipulación remota se manejan radiaciones entre 1mrad (Si) y 50 Mrad (Si). Con el fin de soportar esta diferencia, es obligatorio el uso de un blindaje que reduce la radiación gamma.
- Temperatura límites IC para el sector aeroespacial se prueban sobre 200°C aunque su temperatura de trabajo es de aproximadamente 125°C. Los componentes para la CMT no requieren de pruebas a temperaturas tan altas ya que la temperatura máxima dentro de la VV será de hasta 50 ° C (se establece por RQ88).
- Aplicaciones aeroespaciales necesitan el sistema de redundancia, ya que no se permite el fracaso. El sistema tiene que ser "vivo" el 100% del tiempo de operación. Circuitos de mantenimiento o sustitución dañados no pueden ser toleradas. En nuestro caso, la solución de multiplexación podría considerarse como un consumible y se sustituye después de un mínimo de 2.000 horas 8.000 horas de vida si no se puede manejar.
- Algunos requisitos mecánicos muy restrictivas también son evitables con respecto a las aplicaciones aeroespaciales, tales como vibraciones o tirar a cabo las pruebas. Solución de multiplexación no requiere este tipo de restricciones, ya que no tiene que soportar el aterrizaje o el lanzamiento de grandes fuerzas.

Ilustración 82 - Esquema PCB para solución de multiplexado propuesta a compañías de COTS

Empresas con componentes RadHard únicamente venden circuito IC. Sólo Aeroflex, a través de su distribuidor Dimac en Europa, ofrece un apoyo adicional en el desarrollo de la solución. Por tal razón, hay dos maneras posibles de obtener una solución con RadHard COTS:

- Diseñar y desarrollar nuestro propio tablero con Radhard COTS de una de estas empresas con Aeroespacial y COTS militares.
- La misma empresa de diseño y construcción de la placa con los componentes Radhard IC de su catálogo. Ellos le darán el producto final construido con los COTS aeroespaciales. Estos COTS pueden ser personalizados en las calificaciones en función de los requisitos.

En ambas opciones, el diseño no es un problema porque los requisitos nucleares RadHard COTS sólo afectan a componentes y no a la forma en que la placa está diseñada. Resistencias o condensadores podrían utilizarse, el único problema es con componentes a base de silicio como circuitos integrados de transistores, digitales y analógicos.

Todos los componentes RadHard pueden resistir la radiación en sus propios límites de especificación. Estos circuitos integrados se ponen a prueba bajo la Agencia de Logística de Defensa de Estados Unidos, siendo una certificación fiable para los

componentes RadHard ya que estos componentes han sido probados en el espacio y aplicaciones militares durante años.

Inicialmente, si se RadHard los componentes de la junta directiva, la solución de tablero entero será RadHard también. Para diseñar y desarrollar el esquema verá más adelante, el costo es de unos 250.000 €, y el costo de fabricación de cada tabla es de unos 70.000 €, lo que resulta de la suma de su RadHard COTS y en función del número de unidades fabricadas.

El BOM preliminar es el siguiente, teniendo en cuenta el uso de la versión prototipo (misma radiación endureció el chip, pero probó solamente a temperatura ambiente y no proyectada). Este cálculo previo no es fijo, y debe utilizarse sólo como una referencia:

- 4x MUX8501, 5.000 € cada uno;
- 2x UT54ACS164245SEI, 1.200 € cada uno;
- 1x UT08SC14ADV045HT, 5.000 €;
- 1x UT6325, 4.200 €;
- 2x UT54LVDM055LV, 1.200 € cada uno (uno está prevista en el lado DEMUX, para hacer coincidir el montado en el lado MUX).
- 1x VRG8602, 1.200 €;
- 1x VRG8684, 2.000 €;
- 1x VRG8688, 3.500 €;
- Componentes SIE adicionales (relojes, diodos, transistores), 25.000 €.

Con estos componentes totales estiman un costo preliminar: 65.000 €. Pero la construcción de la solución diseñada por terceras empresas, el costo de la tarjeta con PCB y montaje de componentes podría rondar los 130.000 €.

Los componentes utilizados para esta estimación son componente estándar del catálogo Radhard, pero en la versión proto, lo que significa mismo silicio del espacio totalmente calificado, pero sin detección / pruebas especiales: son simplemente funcional probado a temperatura ambiente. Por supuesto, los componentes del mismo lote de obleas han sido probados con éxito bajo la

radiación, hasta 300Krad o 1mrad (dependiendo del tipo de componente). Dado que estos componentes son utilizados por las comunidades militares y espaciales, la obsolescencia es muy rara, la mayoría de ellos están todavía en producción después de 25 años.

Ilustración 83 - Propuesta de Aeroflex para la solución Radhard COTS

Tiene las capacidades para plantas nucleares, pero no los productos especialmente diseñados para ellos todavía. Sus componentes aeroespaciales han sido probados

desde 100krad hasta 300krad ya que ninguna cualificación más RadHard había sido requerido para aplicaciones espaciales. Sin embargo, se puede llevar a cabo la prueba más allá de los niveles mencionados si es superior RadHard se requiere con las tecnologías manufacturados utilizados, sus ICs RadHard pueden soportar varias magnitudes de Mrad (Si) sin problemas (pero no han sido aún probados). La alta fiabilidad de la utilización de esta tecnología investigado durante varios años en la industria aeroespacial con requisitos muy restrictivos en el diseño de circuitos integrados para el sector aeroespacial también es muy valioso. Esto le da la opción de calificar la solución final a bordo si el cliente quiere. "Aeroflex Rad" es su división especial para las pruebas de radiación y el apoyo de analógico a digital de convertidores, MOSFETs y otros componentes basados en silicio.

COTS customizados para Fusión Nuclear

Es posible proporcionar una solución más personalizada basada en COTS ya que algunas de las pruebas en COTS aeroespaciales regulares podrían evitarse para reducir los costos por unidad. Esta solución sería utilizar COTS regulares del catálogo aeroespacial con algunas modificaciones en las pruebas realizadas. La placa PCB está diseñado y ya montado con RadHard COTS, por lo que el diseño y los costes de desarrollo estará cerca de 200.000 €, el mismo como se mencionó anteriormente. Además, la reducción de la calidad de los componentes se reducirá el coste por unidad ya que no hay necesidad de algunos requisitos altos para un uso aeroespacial, como algunos requisitos mecánicos.

El requisito de la radiación para el ITER es el que es más alto que aeroespacial. El silicio es exactamente el mismo ya que los procedimientos de fabricación de radiaciones gamma son también los mismos que para alfa y beta; los prototipos facilitados tienen el mismo silicio del mismo lote probado para la radiación como para la industria aeroespacial, a pesar de que no se clasificaron para las mismas pruebas.

Los componentes del IC se pondrá a prueba durante 25 grados (que está muy bien para asegurar la operación bajo los 50°C del mantenimiento VV de ITER), no 125 grados de la industria aeroespacial.

Algunas pruebas mecánicas como vibraciones, pruebas de hermeticidad y sacando fuerzas podría evitarse, ya que sólo son necesarios para el espacio y el militar. Tomando todas estas pruebas deben ser discutidos con el fin de cumplir con los requisitos del ITER, pero el precio reducido podían ir a 45.000 € por tarjeta.

Una calificación especial en la radiación se podría hacer para cumplir con los requisitos del ITER con radiación gamma a la dispositivo de manipulación remota. La mayoría de COTS están calificados para 300krads ya que no necesitan de más, pero es posible llegar a una mayor cualificación, como 100 Mrad (Si), pero algunas pruebas se debe hacer antes. Empresas COTS no saben dónde están los límites de la Dureza radiación IC son.

La prueba reducida (mecánica y eléctrica) ya está disponible como flujo estándar, pero la prueba de radiación adicional es diferente: muchos componentes han sido probados hasta 1mrad sin problemas, y algunos de ellos han sido radiada hasta 10Mrad sin degradación sensible. 100Mrad (Si) son todo un reto y, probablemente, se puede soportar altas dosis. Es difícil hacer previsiones ya que nadie los ha probado hasta esas dosis. Pero incluso no alcanzar el 100Mrad, un plomo o tungsteno blindaje más grueso podría ser utilizado para soportar con entorno de radiación.

Las pruebas de radiación adicional tiene un costo estimado de 10.000 € para cada tipo de componente, más el costo de al menos 4 componentes (3 para ser radiada y uno como una referencia para el equipo de prueba). Considerando una campaña de pruebas completo, podría negociarse un precio diferente, pero en esta fase inicial el precio por solución podría ser 55.000 € con las calificaciones específicas.

Es posible hacer pedidos de piezas para algunas primeras unidades y órdenes posteriores para unidades adicionales, pero teniendo en cuenta que la prueba de la radiación es normalmente aplicable a partes del mismo lote de obleas, y también para al menos reservar algunos dados de la radiación mucho la prueba de los futuros pedidos .

Con este tipo de solución, es posible hacer un pedido inicial de pocas unidades, y pedir más tarde; Las empresas Radhard COTS pueden garantizar por contrato que las partes necesarias en el diseño no serían obsoletos. Posteriormente, es posible continuar con la fabricación de la misma solución sin rediseño.

Soluciones Radhard completamente customizadas

En esta sección se explican las soluciones totalmente personalizadas. Sólo dos empresas se encontraron con suficientes capacidades para desarrollar IC personalizado para el uso particular (ASIC) en señales de multiplexación en el entorno nuclear ITER.

- MAGyICs, ofrecen la posibilidad de diseñar, desarrollar, probar y calificaciones sobre el tablero solución final.

- Aeroflex también tiene la capacidad para diseñar, construir y calificar este tipo de solución ASIC.

Todas estas soluciones tienen la ventaja significativa de ser diseñado para resistir la radiación de cada lugar, por lo que el espesor del blindaje podrían reducirse considerablemente.

Solución completamente customizada de MAGyICs

El grupo de investigación MAGyICs, ubicado en KU Leuven ESAT / MICAS, RELIQUA y SCK-CEN, tiene una fuerte competencia en el desarrollo de los circuitos de ultra-altas totales de radiación dosis tolerantes integrados analógicos / de señal mixta.

El grupo lleva a cabo su investigación dentro de la cooperación de KU Leuven, SCK-CEN (Centro de Investigación Nuclear de Bélgica). Desde su concepción en 2008, el grupo ha entregado muchos proyectos exitosos de SCK-CEN y el ITER.

El este caso MAGyICs desarrolla la solución completa y lo testea en radiación para el proyecto ITER. La tarjeta de instrumentación consta de un amplificador de muestreo doble correlacionado (CDS) instrumentación, un ADC sigma-delta y 256-a-1 multiplexor. El circuito interior está diseñado para su uso en equipos de manejo remoto en el reactor de fusión ITER y será sometido a una radiación ionizante y ambiente de alta temperatura.

Tecnologías CMOS estándar comerciales avanzadas están bien adaptados para circuitos integrados de diseño tolerante a la radiación. Aunque se prevén totales dosis ionizante (TID) efectos de la radiación en estas tecnologías, la mayoría de ellos se puede evitar mediante el empleo (RHBD) técnicas de radiación endurecido por el diseño. Técnicas RHBD se pueden aplicar en a nivel de sistema, a nivel de circuito, a nivel de transistor y de nivel de diseño, para lograr una buena garantía de la radiación.

Ilustración 84 - Diseños de MAGyICs para IC's tolerantes Radiación del orden de MGy.

En términos generales, para las tecnologías en general nodo ($> 180\mu\text{m}$), TID efectos son más graves que las tecnologías en pequeña nodo ($< 180\mu\text{m}$). Lamentablemente, los procesos de alta tensión son por lo general en el nodo tecnología grande. Esto significa que, los componentes off-the-shelf comerciales normales para el manejo de esta especificación de tensión no son adecuados para aplicaciones en ambientes de radiación. Por lo tanto, las técnicas especiales RHBD son muy necesarias para poder llevar a cabo esta tarea diseñada.

Propuesta MAGyICs se basa en tres componentes electrónicos radiación endurecido necesarios para esta misión; que tienen que separar sensores, que funcionan puramente digital o analógico.

Teniendo en cuenta los dispositivos de las tablas del ejemplo anterior, los sensores se han dividido en tres subgrupos, a saber, grupo de conmutación (S), baja tensión analógica (ALV) y el grupo de alto voltaje analógico (AHV).

La división en grupos es importante a fin de elegir la tecnología CMOS adecuado para los sensores. Si el rango de funcionamiento de los sensores es entre 0 y 1,8 V, se puede elegir para un proceso de baja tensión. Para rangos de operación de alta tensión se requieren procesos de alta tensión. En los procesos de baja tensión generales son más tolerantes con la radiación ionizante de procesos de alta tensión

como se ha indicado anteriormente. Se propondrá una solución para el ALV y HLV y el grupo de conmutación.

Para la solución sobre ALV y el grupo AHV, la misma topología y los componentes pueden ser utilizados: multiplexor de señal analógica, convertidor de analógico a digital, y lógica de control. Algunos de los componentes que se necesitan son:

- Amplificador con acondicionamiento de señal requerido para leer de salida de los diferentes sensores
- El convertidor de analógico a digital (ADC) convierte la señal de salida del amplificador a una señal digital. La señal digital es ideal para la transmisión de datos en un entorno duro y a través de largas distancias.
- Un multiplexor de señal digital se conecta a diferentes sensores, y multiplexa todas las señales de entrada a una salida de señal de acuerdo con una secuencia predefinida.
- La lógica de control proporciona los relojes al multiplexor y el ADC.
- Si se requiere un multiplexor analógico para una conexión por cable a un sensor. Se debe tomar en cuenta que la señal analógica se puede distorsionar las condiciones severas y cuando viajan largas distancias mínimas.

El grupo ALV hará uso de un proceso de baja tensión (menos de 1,8 V). Para los sensores en el grupo de alto voltaje analógico, tres soluciones posibles:

- El uso de una división resistiva antes de la señal entra en el IC y un cable de alta tensión (más de 1,8 V) de la sala de control para el sensor, para suministrar la tensión de referencia. El límite aquí será la resolución requerida de la señal del sensor. Debido a que el nivel de ruido de los sensores determinará la resolución máxima alcanzable. Será necesario realizar pruebas para determinar los límites de resolución de estos sensores.
- El uso de un proceso de alto voltaje (HV) ($> 12\text{V DC / AC}$) para fabricar los tres componentes. Sin embargo, los procesos de alta tensión son normalmente más vulnerables a los efectos de la radiación que LV ($< 1,8\text{ V DC / AC}$) procesos. Se necesitan técnicas especiales de diseño a la radiación para asegurar su rendimiento.
- Elija sensores con rango de tensión baja ($< 1,8\text{ V}$).

Como se mencionó anteriormente, un proceso de baja tensión es, en general, más radiación tolerante que el proceso de alta tensión. Por lo tanto MAGyICs proponen utilizar sensores que se pueden utilizar con los procesos de baja tensión (<1,8 V), ya que los procesos LV son mucho más robusto a los daños por radiación ionizante en contra de la dosis.

MAGyICs sugiere la elección de sensores que pueden operar con señales de baja tensión (<1,8V). A modo de ejemplo, se muestra una posible reducción de cable para los LVDT y finales de carrera en la tabla

Tabla 19 - Ejemplo de relación de multiplexado en señales con redundancia

Sensores	Numero de Instrumentos	Numero de Señales	Numero de señales con multiplexor
LVDT	13	78	10
Limit switches	32	64	12

Normalmente 14 LVDT requieren 78 cables con cable a la sala de control. Con una solución de multiplexor se requerirá sólo 10 cables. Para 13 instrumentos se requerirá una señal de control de 4 bits ($= 2^4$ o 16 selecciones). MAGyICs proponen para transmitir la señal de multiplexor diferencialmente (2 hilos) y construido en cierta redundancia (x3), como resultado se requerirán 6 hilos para la transmisión de la señal. La suma total de los LVDT será de 10 señales, como se muestra en la tabla anterior. Que implica una relación de multiplexación de aproximadamente de 7: 1 con una línea de redundancia para evitar fracasos. Hacer finales de carrera para terminar con 12 señales, señales de control 6 (2^6 o 64 selecciones) y señales de datos 6.

Para el grupo de conmutación solución, la salida de señales de conmutación una señal puramente binario (0 o 1, encendido o apagado). Será posible utilizar división resistiva para acondicionar la señal de alta tensión, procedente del interruptor de límite de sensor de proximidad y, a una señal de tensión baja (<1,8 V). Por lo tanto, esto hará que sea posible el uso de un proceso de baja tensión. Serán necesarios los siguientes componentes:

- Un multiplexor de señal digital se conecta a diferentes interruptores y sensores, y multiplexa todas las señales de entrada a una salida de señal de acuerdo con una secuencia predefinida.
- La lógica de control que ofrece relojes al multiplexor.

Todos los circuitos integrados desarrollados por MAGyICs pueden soportar las condiciones ambientales de mantenimiento ITER: con un rango de temperatura de -40 a 125 ° C y una tolerancia a la radiación gamma más de 1MGy. Sólo han probado hasta 1,6 MGy, y hasta 5MGy con algunos circuitos integrados.

Aunque debido a la tolerancia a la radiación de la electrónica, no se requerirá un pesado y voluminoso blindaje de plomo. Sería mejor ser conservador y pasar un buen cuadro de blindaje para la mejor protección. Desde la electrónica pueden ser colocados en los módulos de peso fácil reemplazables, luz, conectores serán elegidos de acuerdo con el cliente. Con estos valores de blindaje de espesor podría ser muy delgada para la mitigación de las dosis gamma.

Con respecto a cubrir la longitud del cable sin la mitigación de las señales, cuando se utilizan señales digitales para la transmisión de datos, es posible transmitir señales de baja frecuencia a través de 110 metros de cable sin ningún otro amplificación. Lo han hecho algunos experimentos con la transmisión de señales digitales a través de 10 metros de cable a una frecuencia de 50MHz. Idealmente, esto significa que 5MHz transmisión de señales digitales será posible de 100 metros, pero en el peor de los casos podría ser necesario algunos amplificadores de señal adicionales. En este punto, no hay ningún problema en la adición de algunos amplificadores de señal RadHard con el fin de asegurar que no pérdida de la señal puede ocurrir.

MAGyICs experimentos anteriores han demostrado que nuestros ICs tolerante a la radiación pueden trabajar correctamente sin ningún fallo, incluso después de la dosis total de 5MGy gamma (en tasa de dosis 1 kGy / h y 30kGy / h). Para el funcionamiento de la solicitud de marca comunitaria, esto significa que puede tener un tiempo de vida más largo de 8.000 horas. Sin embargo, esto necesita confirmación experimental aún más si una tecnología diferente tiene que ser utilizado.

La electrónica de copia de seguridad o de redundancia se pueden colocar en el mismo módulo como los que funcionan. Esto puede reducir significativamente el coste y el tiempo de mantenimiento, una vez que hay un fallo en el equipo.

Para los costos de estimación MAGyICs de la solución, se han programado sus actividades en esta tarea de diseño, que son:

1. Prototipo de diseño de chips (8 meses, 3 pers.): Esquema de diseño, simulación y diseño
2. la fabricación de prototipos Chip (3 meses): Fabricado en una fundición de semiconductores
3. Embalaje y diseño de PCB (1 mes, 2 pers.)
4. Pre-radiación de medición (2 semanas, 2 pers.): Evaluación del desempeño
5. Evaluación de Radiación (2 semanas de preparación + 2 semanas experimento, 2 pers.): radiación evaluación robustez
6. En vivo-evaluación (3 semanas, 2pers.): Verificación con el cliente
7. Re-diseño y de producción (3 meses, 3 pers.)

En general, se espera que sea de 1,5 años con el fin de llevar a cabo esta tarea diseñada. El costo total se estima en alrededor de 450.000 euros (incluido el coste de personal, costos de software, el costo del hardware, el coste de fabricación, costo de la prueba, el coste del material, etc.).

Solución completamente customizada de Aeroflex

Esta solución debe tener en cuenta el desarrollo de un ASIC sensor inteligente totalmente dedicado que incluye todos los canales y toda la electrónica para la interfaz de los sensores, lo que hace un cierre de bucle y el envío de toda la información digitalizada a la unidad de DEMUX.

Aunque el desarrollo de ASIC normalmente se reserva para aplicaciones caracterizadas por altos volúmenes mientras FPGA son los preferidos para los números pequeños como en el caso de dispositivo de manipulación remota, el desarrollo de un ASIC para la solución de multiplexación dispositivo de manipulación remota podría resolver los problemas de compromiso entre la

radiación y el espacio disponible para la electrónica mientras que da más espacio para considerar una solución de multiplexación redundante con tolerancia a fallos con la no aumento del precio correspondiente..

Unos electrónica podrían añadirse a la junta como circuitería externa, como condensadores y resistencias, pero sin aumentar el coste importante.

En este caso, para el desarrollo del ASIC, Dimac y Aeroflex recibirán los requisitos y habilidades de función para la calificación y proporcionan toda la solución probada, sondeado y calificado.

El precio estimado aproximado podría ser más de 500.000 € para una gran cantidad de unidades, incluyendo el diseño y desarrollo los costos. Dicho pago puede ser duro, pero garantiza el cumplimiento de todos los requisitos y minimiza el espacio ocupado por la junta.

Por otra parte, se podría añadir una cubierta de protección si es necesario. El esquema funcional sería similar a la versión COTS pero con soluciones y fiabilidad más integrados. Por otra parte, la relación de multiplexación entre entradas y salidas será el máximo que se puede lograr con las tecnologías Radhard.

Como se mencionó anteriormente, es posible garantizar la resistencia a la radiación de los circuitos integrados en el orden de magnitud MegaGray, aunque no han probado sus ICs aeroespaciales porque no había necesidad de eso. Están desarrollando una nueva línea de negocio sobre la CPU independiente para aplicaciones nucleares especialmente diseñadas para soportar condiciones ambientales extremas.

Análisis de posibles soluciones

Con el fin de tener una estimación de la cantidad de soluciones de multiplexación necesaria, tiene que ser dividido en áreas de aplicación: solución MUX (área de radiación) y solución DEMUX (área de no radiación). Sin embargo, la solución DEMUX no afectaría al precio final, ya que puede estar hecho de COTS no RadHard con protocolos de comunicación estándar.

Todas las señales de control y los datos de los sensores se conectan de esta unidad de multiplexado colocado en la dispositivo de manipulación remota. Es obligatorio

para garantizar el correcto funcionamiento de esta unidad. Con este propósito, es muy importante seleccionar un lugar con menos radiación que puede afectar a los componentes electrónicos (incluso componentes RadHard y blindados). Se dependerá de la ubicación elegida y de la radiación que en él se irradie, por ello se tiene que llegar a un buen compromiso entre la radiación y el espacio disponible para la electrónica, lo que hace posible la asignación de la solución de multiplexación con el mínimo riesgo por la radiación.

En este análisis no se considera los COTS no RadHard, ya que fueron rechazadas porque no era posible dar cabida en el espacio disponible del ejercicio real. Ya al principio del capítulo esta solución fue rechazada por no cumplir con el compromiso entre la radiación y el espacio disponible, incluso con el equipo de National Instruments probado hasta 100Gy de radiación.

Sin embargo, es importante destacar que esta solución sería factible mediante el rediseño de la marca comunitaria, con el grueso blindaje apropiado este COTS no RadHard pueden soportar con la radiación, pero su gran volumen requerirá un rediseño para el alojamiento. Cada unidad de blindado tiene un costo estimado en torno a 17.000 € aproximadamente, aunque dependerá del tamaño del equipo multiplexor.

En una primera estimación y sobre la base de toda la información suministrada, los costes totales de una solución viable es la multiplexación entre 500.000 € y 800.000 €. Con esta estimación aproximada es necesario saber cuántas unidades tienen que ser fabricados, por lo que hay dos casos de estudio:

- El equipo puede manejar 8.000 horas de funcionamiento de 5 Tiempos operaciones en 20 años.
 - soluciones 6 MUX necesarios (1 por cada uno disponible dispositivo de manipulación remota: tres en izquierdo y otros tres en derecho). Este número viene durante 20 años de funcionamiento.
 - 3 soluciones DEMUX (que están en el área de no radiación, que no necesitan componentes RadHard). Estos podrían ser COTS en caso de usar protocolos de comunicación estándar.
- El equipo puede manejar entre 2.000 y 8.000 horas de funcionamiento.
 - En función de las horas que puede manejar:

- Soporta desde 2,000 a 3,500 horas: 36 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 2000 horas: cambiar 5 veces].
- Soporta desde 3,500 a 5,000 horas: 24 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 3.500 horas: cambiar 3 veces].
- Soporta desde 5,000 a 8,000 horas: 18 soluciones MUX.
[Reemplazar cada 5.000 horas: cambiar 2 veces].
- 3 solución DEMUX (están en el área de no radiación). Estos podrían ser COTS en caso de usar protocolos de comunicación estándar.

Con el fin de disponer de sistemas tolerantes a fallos cada solución MUX debe tener la electrónica redundante si el espacio disponible lo permite. Esto es posible con las soluciones personalizadas, pero no con las placas de COTS, ya que implica dos unidades de cada IC (Circuito Integrado) necesario para la solución redundante.

Analizando las opciones electrónicas disponibles en el mercado, no RadHard-COTS no son una solución viable ya que no pueden soportar con la radiación, y no hay suficiente espacio para el blindaje en lugares disponibles. Sin embargo, es posible descubrir y desarrollar una solución con ICs RadHard comerciales para aplicaciones aeroespaciales, pero incluso siendo posible, esto no es un buen enfoque ya que los componentes están diseñados para el espacio y no para aplicaciones nucleares. Los ahorros en tomar COTS podrían estar teniendo un enfoque más específico para las necesidades del ITER y la reducción del espesor de blindaje. Aeroespacial COTS tienen un bajo nivel RadHard en comparación con las dosis de radiación VV durante periodos de mantenimiento.

utilizando esta solución COTS RadHard, es imposible para soportar las dosis de radiación para 8.000 horas, y la solución debe considerarse como un consumible, siendo obligatorio que reemplace después de cada período de 2.000 horas.

En caso de que el fabricante de los COTS decide suspender la fabricación, el rediseño de la PCB se requiere con el fin de utilizar piezas compatibles desde el fabricante.

Todos estos argumentos hacen que las soluciones con aeroespacial COTS peor que las soluciones personalizadas completas. No es sólo acerca de la sustitución de la solución de multiplexación después de cada período de 2.000 horas, sino también

el aumento de los costos de fabricación de la solución ya que se considera como consumo ya que una gran cantidad de unidades tienen que ser producidos, lo que hace que los costos finales más costoso y menos factible que los ASICs soluciones personalizadas.

Teniendo en cuenta soluciones a medida, tanto se supone que soportar un poco más de 1MGy de dosis de radiación acumulada, por lo que el espesor de blindaje puede ser muy delgada y casi todo el espacio de cada lugar podría ser utilizado en la electrónica, si es necesario. Este tipo de resistencia a la radiación también permite tener la electrónica para el conjunto de 8.000 horas de vida útil de los componentes electrónicos de la dispositivo de manipulación remota.

Una cuestión importante para decidir que podría ser la experiencia de ambas compañías, Aeroflex y MAGyICs; ambas compañías pueden ofrecer una buena solución de multiplexación.

- Aeroflex través Dimac tiene mucha experiencia en aplicaciones aeroespaciales que manejan requisitos más restrictivos que los requisitos para este desarrollo. Aeroflex tiene las capacidades para plantas nucleares, pero no a los productos especialmente diseñados para ellos, sin embargo, a pesar de que están invirtiendo en una nueva línea de producción para el sector nuclear. Sus componentes aeroespaciales han sido probados hasta 100krad y 300krad aunque tienen la capacidad para probar aún más si fuera necesario. Esto también es una gran empresa que puede dar un buen servicio de apoyo.
- MAGyICs tiene muy pocos años de trayectoria, pero se centra en las aplicaciones nucleares y ya se ha implicado en algunos desarrollos para el ITER. Ya se ha probado y con éxito una solución de multiplexación con requisitos muy similares (a menos que el número de señales) que el objetivo de este documento.

El análisis de los costes de los tres posibles y factibles soluciones:

- Solución personalizada con COTS cualificados, tiene la posibilidad de hacer un pedido anterior de pocas unidades para probar la fiabilidad del sistema y la posibilidad de hacer más pedidos después de algunos años y garantizando

la no obsolescencia de las partes del diseño. Para facilidad de comparación, un pedido inicial de una unidad se podría hacer con un coste de 250.000 € y otro orden de 65.000 € por unidad, cinco unidades serían 325.000 €. El costo total de esta solución podría rondar los 575.000 € para esos 6 unidades.

- La segunda opción es la solución personalizada ASIC de Aeroflex tiene un pago inicial y única de más de 500.000 €, pero es una solución más compacta, dedicada e integrada.
- ASIC MAGyICs forma de solución es la más barata de las tres opciones con un costo total de 450.000 €, pero esto sólo cubren el desarrollo sin tener en cuenta el número de soluciones para construir.

Comparando ambas soluciones Aeroflex si el dinero no era un factor a considerar, sería mejor considerar la solución totalmente personalizado, ya que se desarrolló en cumplimiento con las especificaciones. Aunque la otra solución de Aeroflex es más barato y también es bueno, no habrá tanto espacio reducido como la solución totalmente personalizada. También tendrá algunos no utilizan las capacidades de los COTS originales, por lo que incluso trabajando tan fino como el totalmente personalizado, el rendimiento será un poco peor.

Comparando Aeroflex y MAGyICs, Aeroflex tiene muchas décadas de experiencia en la industria aeroespacial y electrónica militares aplicaciones con componentes RadHard. Sin embargo, MAGyICs ya ha desarrollado una solución de multiplexación completa y totalmente probado bajo radiación, y hecho alguna colaboración en otras aplicaciones del ITER.

APÉNDICE C

Lista de figuras

Ilustración 1 - Comparativa de tiempos de reacción ante estímulos unimodales, bimodales y trimodales [Galiana, 2013].....	16
Ilustración 2 - Robot industrial (izquierda), y robot teleoperado (derecha) ..	17
Ilustración 3 - C. Goertz durante una demostración de funcionamiento de los primeros telemanipuladores maestro-esclavo. [Goertz 1964]	19
Ilustración 4 - Goertz, con el E1 con accionamientos eléctricos y servocontrolados.	21
Ilustración 5 - Prótesis humanas para el reemplazo de miembros superiores.	21
Ilustración 6 - Robot submarino teleoperado CURV II	22
Ilustración 7 - Surveyor: robot espacial teleoperado con brazos manipuladores	23
Ilustración 8 - Robot de mantenimiento de ISOLDE en el CERN. [Kershaw 2013].....	25
Ilustración 9 - Reacción de fusión.....	27
Ilustración 10 - Instalaciones del Tokamak en ITER [www.iter.org]	30
Ilustración 11 - Robot Mascot operando dentro de JET Torus en 1996	32
Ilustración 12 - Esquema de funcionamiento de las instalaciones de fusión y necesidad de Manipulación Remota.....	34
Ilustración 13 - En la izquierda, Centro DTP2 en Tampere, Finlandia. Dimensiones aproximadas del equipo e instalación a=50m , b=20m. En la derecha, lugar de trabajo del operador	37
Ilustración 14 - Vista general del laboratorio de manipulación remota de ENEA, centro de investigación de Brasimone (Italia).	38
Ilustración 15 - (a) Vista general de la instalación IVT. El semicírculo de la foto es la barra IVT de unos 12 m de diámetro. (b) Detalle del transportador de contenedor	39
Ilustración 16 - Cabeza del escáner IVVS desarrollado en ENEA	43
Ilustración 17 - Acceso de los sistemas de diagnóstico de ITER al Tokamak mediante puertos.	44

Ilustración 18 - Brazo articulado de Inspección AIA en el reactor Tore Supra	45
Ilustración 19 - Robot PAC en una celda caliente de AREVA	46
Ilustración 20 - Plataforma de prueba del Divertor para ITER en Finlandia, con un brazo manipulador WHMAN de 6 G.d.l. encima.	47
Ilustración 21 - manipulación remota en JET con un Mascot.	48
Ilustración 22 - Servo-manipulador maestro del Mascot con reflexión de fuerza, situada a 40m. del área remota de trabajo.....	51
Ilustración 23 - Disposición ergonómica de elementos en un puesto de trabajo	54
Ilustración 24 - Esquema general simplificado del sistema básico de teleoperación para un brazo.....	60
Ilustración 25 - Maestro del sistema GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc.....	65
Ilustración 26 - Hardware PXI de National Instruments utilizado para el controlador	66
Ilustración 27 - Esclavo del sistema GRIPS de Kraft TeleRobotics Inc.....	67
Ilustración 28 - Conjunto del sensor ATI Gamma SI-130-10 junto con la NET box.....	69
Ilustración 29 - Pinza robótica de 3 dedos de Robotiq.....	70
Ilustración 30 - Interfaz gráfica en LabView para el ajuste de reguladores...	73
Ilustración 31 - Simulación en Gazebo del brazo manipulador	73
Ilustración 32 - Sensor ADIS 16405 utilizado para la medición de velocidades y aceleraciones	76
Ilustración 33 - Trayectoria y ecuación de la Lemniscata.....	77
Ilustración 34 - Simulador de los brazos hidráulicos en la herramienta Gazebo de ROS	78
Ilustración 35 - Curvas teórica y medida por el Optitrack para la lemniscata	80
Ilustración 36 - Trayectoria del astroide.....	81
Ilustración 37 - Trayectorias teórica y capturada por el Optitrack para la curva del astroide	81
Ilustración 38 - Situación de las Comunicaciones en un sistema robótico teleoperado.	88
Ilustración 39 - Máquina de estados del protocolo de comunicaciones para tareas de telerrobótica	89

Ilustración 40 - Diagrama de la secuencia en la Comunicación en Telerrobótica	97
Ilustración 41 - Protocolo RTSP para el envío de datos de vídeo en tiempo real	99
Ilustración 42 - Ejemplo de intercambio de peticiones en el protocolo de video RTSP.	100
Ilustración 43 - Arquitectura de control para el Rate-Position Controller. Utilizando el Phantom Omni.....	101
Ilustración 44 - Esquema del paquete de ROS que controla el Phamton tiene el nodo del Rate-Position Controller	102
Ilustración 45 - Paquete de ROS destinado a la simulación del manipulador esclavo	103
Ilustración 46 - Conexión de comunicaciones realizada a través del Nodo de Comunicación de ROS y el protocolo UDP que enlaza con el controlador PXI del esclavo real.	103
Ilustración 47 - Esquema de red con dos routers conectados a los controladores maestro y esclavo respectivamente y a un PC con la interfaz del operador en LabView en el lado del maestro	105
Ilustración 48 - Arquitectura del sistema de control bilateral utilizando la PAT. Comunicación a través de la red WLAN	107
Ilustración 49 - Fotografía realizando pruebas de control bilateral Fuerza-Posición con los brazos robóticos de 6 G.d.l., a través del Protocolo de Telerrobótica con realimentación de fuerzas y video.	108
Ilustración 50 - Posición de las 6 articulaciones de maestro y esclavo en el sistema de 6 g.d.l.. Control Fuerza-Posición a través de un medio inalámbrico con el Protocolo Telerrobótica.....	108
Ilustración 51 - Seguimiento de posición y fuerza ejercida en la articulación SE del sistema de 6 g.d.l.. Control Fuerza-Posición a través de un medio inalámbrico con el Protocolo de Telerrobótica	109
Ilustración 52 - Datos de la red con Protocolo de Teleoperación. Comportamiento del esquema Fuerza-Posición en un sistema de 6 g.d.l....	109
Ilustración 53 - Esquema general de los componentes de una la solución de multiplexado.....	126
Ilustración 54 - Esquema del sistema bilateral de control para la estimación de fuerzas externas.	141

Ilustración 55 - Extremo del robot con el sensor de fuerza acoplado	142
Ilustración 56 - Montaje final de la mano robótica con sensor fuerza/par y sensor IMU	143
Ilustración 57 - Señales de entrada al motor para controlarlo.	152
Ilustración 58 - Tarjeta para leer la corriente a través de los motores del dispositivo maestro	152
Ilustración 59 - Montaje para la caracterización de curvas Tensión-Corriente-Par en la articulación SA.....	157
Ilustración 60 - Curvas de Corriente-Par para la articulación SA	158
Ilustración 61 - Montaje del sensor fuerza/par en el extremo para validación de modelos corriente-par.....	159
Ilustración 62 - Experimento de multimodalidad: operador esperando al estímulo con el robot en la posición inicial, y punto de vista del operador..	169
Ilustración 63 - Relación de tiempos de respuesta para estímulos unimodales, bimodales y trimodales. A=Auditivo, V=Visual, H=Háptico. Con mano no dominante (nd) y dominante (d)	171
Ilustración 64 - Tiempos de respuesta para estímulos unimodales, bimodales y trimodales. A=Auditivo, V=Visual, H=Háptico	172
Ilustración 65 - Variación de la disparidad de un objeto situado en la parte central de 2 de cámaras cuyos ejes son paralelos. Los objetos alejados se perciben correctamente hasta una distancia M, donde la disparidad es superior a la que se genera por nuestra propia visión (unidades en mm.)....	179
Ilustración 66 - Situación del sensor Kinect respecto del espacio de trabajo del robot, proporcionando un plano picado de la escena.....	180
Ilustración 67 - Organización de píxeles de color en el vector proporcionado por Kinect. Cada pixel cuenta con 4 bytes correspondientes a la descomposición RGB de un pixel.....	181
Ilustración 68 - Organización de píxeles de profundidad en el vector proporcionado por Kinect. Cada pixel cuenta con 2 bytes correspondientes a la distancia de dicho pixel hasta el plano de la cámara.	181
Ilustración 69 - Visualización de la nube de puntos creada desde un ángulo diferente al que el sensor capta la imagen.	183
Ilustración 70 - Reconstrucción de brazo robótico con asignación de color..	183
Ilustración 71 - Comparación de imagen sin (izquierda) y con "filtro de densidad" al 50% (derecha).....	185

Ilustración 72 - Elección de puntos de vista en la nube de puntos, separados unos centímetros simulando al ojo humano (izquierda), y relación entre pixel y medida real (derecha).....	186
Ilustración 73 - Imagen binocular side-by-side que se envía a la pantalla por HDMI.....	187
Ilustración 74 - Diferencia de opacidad entre Oculus Rift (izquierda) y Microsoft Hololens (derecha).....	188
Ilustración 75 - Escritorio virtual envolvente	189
Ilustración 76 - Diagrama de flujo de la función principal.....	192
Ilustración 77 - Reconstrucción de objetos conocidos a una distancia determinada.....	194
Ilustración 78 - Gráfico que muestra el error cometido por los datos proporcionados por Kinect, con respecto a la distancia real a la que se encuentra el objeto	195
Ilustración 79 - Objetos utilizados para la comprobación de error de Kinect a través del ancho real y virtual pixwlado.....	196
Ilustración 80 - Resultados de Tests de radiación Gamma en equipos de National Instruments.....	239
Ilustración 81 - Sistemas PXI y cRIO de National Instruments	240
Ilustración 82 - Esquema PCB para solución de multiplexado propuesta a compañías de COTS.....	244
Ilustración 83 - Propuesta de Aeroflex para la solución Radhard COTS.....	246
Ilustración 84 - Diseños de MAGyICs para IC's tolerantes Radiación del orden de MGy.	250

APÉNDICE D

Lista de tablas

Tabla 1 - Comparación de las características de los tres sistemas de fusión..	34
Tabla 2 - Posibles características ambientales de inspección en ITER [ITER Org. 2004]	40
Tabla 3 - Dosis de radiación en ITER [ITER Org. 2004] (*datos estimados)	41
Tabla 4 - Relación entre interfaces y tipo de movimientos.....	52
Tabla 5 - Tabla de los límites articulares del robot esclavo	68
Tabla 6 - Definición de los mensajes intercambiados entre los dispositivos maestro y esclavo según el tipo de control escogido.	94
Tabla 7 - Casos de estudio del multiplexor: distintas dosis de radiación y su radiación acumulada según una variación lineal, para 2.000 horas equivalente a 1 inspección completa, y para 8.000 horas equivalente al acumulado de todas las inspecciones programadas en la vida de ITER.	119
Tabla 8 - Lista de posibles señales de un robot manipulador genérico de 8 G.d.l. para fusión.....	121
Tabla 9 - Lista de señales para el dispositivo que sirve de base móvil del robot manipulador dentro del Tokamak.....	122
Tabla 10 - Señales a considerar para la solución de multiplexado en el robot manipulador	124
Tabla 11 - Señales a considerar para la solución de multiplexado para la base móvil del robot	124
Tabla 12 - Lista de las variables, método de obtención y su sistema de referencia natural	145
Tabla 13 - Valores medios de tiempos de respuesta ante estímulos.....	171
Tabla 14- Resultados obtenidos en el experimento de precisión. Se miden el número de píxeles que componen la anchura de cada objeto.....	196
Tabla 15 - Resultados experimento de precisión. Se muestra la medida que la reconstrucción proporciona del objeto, y el error cometido frente a la real .	197
Tabla 16 - Influencia de los filtros en la calidad de la imagen y en la tasa de refresco	199

Tabla 17 - Comparativa de rendimientos según la aplicación de distintos filtros	200
Tabla 18 - Multiplexores comerciales No RadHard.....	238
Tabla 19 - Ejemplo de relación de multiplexado en señales con redundancia	252