

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

**CONTROL BILATERAL DE ROBOTS
TELEOPERADOS POR CONVERGENCIA DE
ESTADOS**

TESIS DOCTORAL

por

Juan Manuel Bogado Torres

Ingeniero Electrónico

2007

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

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

**CONTROL BILATERAL DE ROBOTS
TELEOPERADOS POR CONVERGENCIA DE
ESTADOS**

TESIS DOCTORAL

Autor

Juan Manuel Bogado Torres
Ingeniero Electrónico

Directores

Rafael Aracil Santonja
Doctor Ingeniero Industrial

Manuel Ferre Pérez
Doctor Ingeniero Industrial

Madrid, 2007

(D-15)

Tribunal nombrado por el Magfico. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 4 de diciembre de 2007

Presidente: D. Agustín Jiménez Avello

Vocal: D. Antonio Giménez Fernández

Vocal: D. Raúl Marín Prades

Vocal: D. Gerardo Fernández López

Secretario: D. Antonio Barrientos Cruz

Suplente: D. Carlos Balaguer Bernardo de Quirós

Suplente: D. José María Azorín Poveda

Suplente: D. José María Sabater Navarro

Suplente: D. Miguel Ángel Sánchez-Urán Gonzalez

Suplente: D. Juan Carlos Grieco

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis del día 12 de Diciembre de 2007. En la E.T.S. Ingenieros Industriales.

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mis Padres.....
A mi Hermana....
A mi Tía.....
A mi familia.....

Por todo el apoyo recibido

Agradecimientos

Pareciera que fue ayer cuando estaba haciendo las maletas para comenzar el largo camino que ya esta por culminar, recuerdo el día que mi familia fue a despedirme al aeropuerto y mis padres me acompañaron hasta el lugar que seria mi hogar durante varios años.

Rememorando esos momentos no me que más que pensar que son muchos los recuerdos, aventuras, desesperanzas, preocupaciones, alegrías, tristezas, etc. por las que he pasado a lo largo de este periodo, pero sobre todo son muchas las personas que me han ayudado, brindado apoyo y dado palabras de aliento para que yo pudiera estar en estos momentos en donde estoy. Es por eso, que estas son las palabras iniciales de la Tesis ya que sin esas personas, no fuera más que páginas en blanco.

Son muchas las personas a las que tengo que agradecer, y es realmente difícil dedicarle a todas ellas las palabras que yo quisiera en particular, es por ello que desde ya les ofrezco mis disculpas ya que de lo contrario escribiría unos capítulos extras (y para serles sincero ya estoy cansado de escribir).

A Dios todopoderoso, por haberme iluminado y dado fuerzas en los momentos en que sentía que el esfuerzo para culminar era demasiado o no valía la pena.

A mis Padres, por haberme dado todo su apoyo incondicional, tanto moral como económico para que yo pudiera lograr este objetivo. Sin ustedes no hubiese podido llegar a este punto, la verdad es que no existen palabras que puedan expresar mi agradecimiento por todo el apoyo recibido, ustedes también son autores de esta Tesis.

A mi Hermana, por tener la paciencia y entender todas las atenciones que recibía por estar lejos. Además por sobrellevar los sacrificios que tenia que hacer para poder escribir esta Tesis y así poder obtener el titulo de doctor; lamentándolo, mucho el salario de un doctor no es lo suficientemente generoso como para costearle las vacaciones en Miami Beach, así que le tocará sacar muchas muelas.

A mi Tía Dominga, mi fiel compañera en múltiples periodos de mi vida, has sido parte y testigo varios objetivos logrados en mi vida, también has sido un pilar fundamental para que yo pudiera lograr esta meta, por lo que esta también es tu Tesis.

Al resto de mi Familia, por haber estado siempre pendiente de mí, siguiendo paso a paso todas las etapas que me trajeron hasta este punto.

A mi Director de Tesis Rafael Aracil, por haberme dado la oportunidad de transitar el camino que me lleva a alcanzar esta meta.

A mi Director de Tesis Manuel Ferre “Manolo”, que puedo decirte más que no sea muchas gracias por todo tu apoyo, regaños y orientaciones para que yo pudiera lograr este objetivo. Sin ti igualmente esta tesis no fuesen más que páginas en blanco. Siempre recordaré con mucho cariño los ratos compartidos en el famoso “Melos”, espero que con la culminación de este Tesis no sea la última vez que nos comamos unas croquetas o unas empanadillas allí.

A mis amigos: Iñaqui, Maria Auxiliadora, Maria Antonieta, Luís y Cesar, mis compañeros paisanos, la verdad es que son muchos los momentos que pasamos juntos, que me apoyaron, que me dieron palabras de aliento, etc., ustedes me hicieron sentir en casa fuera de ella.

A mi compañero y amigo Jordi, sin ti igualmente esta Tesis nunca hubiese sido escrita, cada párrafo contiene una colaboración tuya. Espero que podamos escaparnos nuevamente con Manolo a tomarnos unas cañas en Melos.

A Manu, Peter y Philipe, el trabajo que cada uno hizo colaboro con esta Tesis, es por ello que todos tienen palabras escritas acá. Peter las ecuaciones del maestro son tu obra maestra, Philipe bueno gracias al traductor oficial, Jordi ;-) pude entender mejor lo que hacías. Finalmente, Manu, el reverendo de DISAM, siempre pendiente de la palabra del señor, gran amigo y también compañero de andanzas en Melos.

No puedo dejar de agradecer el apoyo y ánimo brindado a lo largo de todo este tiempo por mi amigo Rafael Acevedo, quien en todo momento estuvo pendiente de lo que hacia; igualmente a Luis Humberto, Hector, Paul, Jhonny, Enzo, Omar, Gustavo.

A Gerardo y Juan Carlos, muchas gracias por el apoyo recibido cuando decidí iniciar este camino y haber estado pendiente de que culminara la Tesis. También muchas gracias por el apoyo brindado en la etapa final para que pudiera tener un trabajo donde poder aplicar todo el conocimiento adquirido.

A mis amigos Ángel, Enrique y Jaime, por brindarme su apoyo siempre que lo necesite; especialmente Ángel, ayudándome cada vez que Manolo se le ocurría hacer cosas nuevas.

A Teresa, Rosa y Carlos, que hubiese hecho sin la ayuda de ustedes; Rosa y Teresa siempre pendiente de asegurarme un techo cada vez que viajaba, y Carlos, aparte de los almuerzos que compartimos, siempre mantenía un saldo disponible para que pudiera comprar todas las cosas que necesite para elaborar esta Tesis.

A los Profesores miembros de DISAM, muchas gracias por haberme transmitido el conocimiento y las experiencias que hoy en día enriquecen mi vida profesional.

A los Profesores de la USB: Diógenes Marcano, Juan Muci, Maribel Díaz, Mónica Huerta, Sara Wong, Guillermo Villegas, Julio Viola, Oficina Desarrollo Profesoral. Muchas Gracias por la paciencia y apoyo brindado para que pudiera culminar con éxito esta Tesis, espero poder retribuirles toda su ayuda.

A mis Compañeros del Grupo de Mecatrónica: Cappelletto, Wilfredis, Pablo, Leonardo. Gracias por haber tenido paciencia, y esperar a que terminara la tesis para contar con mi ayuda en el día a día del laboratorio.

Juan Manuel Bogado Torres
Junio 2007

RESUMEN

El control bilateral surge de la necesidad de realimentar al operador información que le sea útil para la realización de tareas remotas de manipulación. La información que se realimenta puede ser de múltiples índoles, bien sea fuerzas, sonidos, gráficos, etc. Es por ello que se trata de esquemas de control avanzados, en los que se acoplan dos bucles de control uno para el operador y otro en la zona remota del robot. Por lo tanto, de su calidad y robustez dependerá el rendimiento que tenga el operador al ejecutar una tarea remota.

El tema principal que se estudia en esta Tesis es el control bilateral en teleoperación. Se abordan diversos esquemas de control bilateral, clásicos y avanzados, haciendo un estudio en cuanto a su funcionamiento, análisis, factores que influyen en su desempeño y la condición de operación con o sin retardo en las comunicaciones. Además, la tesis aborda el diseño de una estación de teleoperación avanzada, cuya principal característica es que es totalmente abierta, basada en un sistema maestro-esclavo de aplicación industrial, lo que permite experimentar con diversas tecnologías de aplicabilidad en la Teleoperación como lo son: control, interfaces hombre-máquina, modelado de entornos, etc. Los diversos esquemas expuestos a lo largo de la Tesis son implementados en la estación de teleoperación citada por lo que los resultados que se obtienen, pueden ser extrapolables en su mayor parte, a otros sistemas de teleoperación.

ABSTRACT

Bilateral control arises from the need to provide the operator with useful information to successfully accomplish remote manipulation tasks. The provided information can be from different sources like sounds, graphics, forces, etc. That is why it is considered an advanced control scheme, in which two control loops are coupled, one for the operator and other for the remote manipulator. Therefore, the operator's performance executing the task will depend on its quality and robustness.

The main subject studied in this thesis is teleoperation bilateral control. It deals with different control schemes, classic and advanced; studying different aspects of them, such as their operation, analysis, factors that influence their performance and operation conditions with or without communication delays. Furthermore, the thesis approaches the design of an advance teleoperation station, which main feature is to be completely open, based on an industrial master-slave system, that permits the experimentation of different technologies applied in teleoperation like: control, human-machine interfaces, world modeling, etc. The different schemes explained in the thesis are implemented in the teleoperation station; therefore, most of the results obtained can be extended to other teleoperation systems.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
MARCO Y MOTIVACIÓN DE LA TESIS	1
ALCANCE DE LA TESIS	2
OBJETIVOS DE LA TESIS	2
ESTRUCTURA DE LA TESIS	3
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	5
ROBÓTICA Y TELEROBÓTICA	6
EVOLUCIÓN DE LA TELEROBÓTICA	7
COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ROBOTS TELEOPERADOS	10
<i>Zona Local</i>	10
<i>Zona Remota</i>	12
<i>Canal de comunicaciones</i>	13
MODELADO ELEMENTOS DEL SISTEMA TELEOPERADO	13
<i>Modelado Sistemas Maestro-Esclavo</i>	13
<i>Modelado del operador</i>	16
<i>Modelado del Entorno</i>	17
ALGORITMOS DE CONTROL BILATERAL	20
INTERFASES HOMBRE-MÁQUINA: HAPTICA, VISIÓN, VOZ	23
<i>Interfases Hapticas</i>	26
<i>Interfases de Visión</i>	28
<i>Interfases de Voz</i>	28
EJEMPLOS DE SISTEMAS DE TELEOPERACIÓN	30
<i>Entornos Virtuales</i>	31
<i>Utilización de Internet</i>	32
<i>Arquitecturas Basadas en técnicas de computación distribuidas</i>	34
<i>Arquitecturas con lazos de control locales</i>	41
<i>Arquitecturas Multimodales y de telepresencia</i>	44
CAPÍTULO 3 ESTACIÓN DE TELEOPERACIÓN	45
DISEÑO DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL	46
<i>Requisitos</i>	46
<i>Dispositivos</i>	46
ARQUITECTURA DEL PUESTO DE TELEOPERACIÓN	49
<i>Implementación de los algoritmos de control</i>	50
<i>Arquitecturas derivadas</i>	50
<i>Arquitectura General del Sistema Teleoperado</i>	56
CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 4 ESQUEMAS CLÁSICOS DE CONTROL BILATERAL	61
ESQUEMAS CLÁSICOS DE CONTROL BILATERAL	62
ESQUEMA DE CONTROL POSICIÓN-POSICIÓN	63
<i>Análisis del esquema Posición-Posición</i>	65
Percepción del entorno por parte del operador	65
Influencia del entorno ($E(s)$)	66
Influencia de la Dinámica del esclavo	70

Influencia de la dinámica del Maestro.....	72
Error en régimen permanente	73
ESQUEMA DE CONTROL FUERZA-POSICIÓN	75
<i>Análisis del esquema de control Fuerza-Posición</i>	<i>77</i>
<i>Percepción del Entorno</i>	<i>77</i>
<i>Influencia del entorno ($E(s)$).....</i>	<i>78</i>
<i>Influencia de la dinámica del esclavo.....</i>	<i>80</i>
<i>Influencia de la dinámica del maestro.....</i>	<i>81</i>
<i>Error en estado estacionario</i>	<i>83</i>
<i>Implementación del esquema Fuerza-Posición.....</i>	<i>83</i>
CONCLUSIONES	85
CAPÍTULO 5 ESQUEMAS DE CONTROL BILATERAL CON RETARDO TEMPORAL 87	
ANÁLISIS DEL ESQUEMA DE CONTROL FUERZA-POSICIÓN	88
<i>Modelado del retardo</i>	<i>88</i>
<i>Función de Transferencia</i>	<i>89</i>
<i>Estudio de estabilidad absoluta</i>	<i>90</i>
<i>Lugar Geométrico de las raíces.....</i>	<i>93</i>
<i>Error en régimen permanente.....</i>	<i>96</i>
ANÁLISIS DEL ESQUEMA DE CONTROL FUERZA-VELOCIDAD	97
<i>Modelo de dos puertos.....</i>	<i>97</i>
<i>Arquitectura de control de cuatro canales.....</i>	<i>98</i>
<i>Transparencia.....</i>	<i>99</i>
<i>Transparencia optimizada para el diseño.....</i>	<i>100</i>
<i>Relación de los modelos de dos y cuatro canales</i>	<i>100</i>
CONTROL FUERZA-VELOCIDAD CON RETARDOS EN LA COMUNICACIÓN.....	101
CONCLUSIONES	111
CAPÍTULO 6 DISEÑO DE REGULADORES BILATERALES MEDIANTE EL ALGORITMO DE CONVERGENCIA DE ESTADOS	115
MODELADO DE UN SISTEMA DE TELEOPERACIÓN BASADO EN EL ESQUEMA DE CONTROL DE CONVERGENCIA DE ESTADOS.....	116
CÁLCULO DE CONTROLADORES BILATERALES MEDIANTE CONVERGENCIA DE LOS ESTADOS DE MAESTRO Y ESCLAVO.....	117
<i>Condiciones de diseño del sistema de control bilateral por convergencia de estados ..</i>	<i>117</i>
<i>Ánalisis de transparencia para maestro y esclavo de segundo orden</i>	<i>123</i>
<i>Resumen del método de cálculo de los reguladores</i>	<i>128</i>
<i>Ejemplo de aplicación.....</i>	<i>129</i>
<i>Resultados Experimentales</i>	<i>131</i>
GENERALIZACIÓN DE LOS ESQUEMAS CLÁSICOS DE CONTROL	133
<i>Control Posición-Posición.....</i>	<i>134</i>
<i>Control Fuerza-Posición</i>	<i>135</i>
<i>Control Fuerza-Velocidad</i>	<i>135</i>
CONCLUSIONES	135
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	137
CONCLUSIONES Y APORTACIONES DE LA TESIS	137
TRABAJOS FUTUROS	140
CAPÍTULO 8 BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXO I.....	151
ANEXO II	159
ANEXO III.....	175

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Diversos robots industriales y teleoperados</i>	6
<i>Figura 2.2 Herrero y algunas herramientas usadas por el hombre</i>	7
<i>Figura 2.3 Raymond Goertz, a la izquierda con un maestro esclavo mecánico, a la derecha con el M1 con accionamientos eléctricos y servocontrolados.....</i>	8
<i>Figura 2.4 Prótesis humanas para el reemplazo de miembros superiores</i>	8
<i>Figura 2.5 Fotos de la serie CURV, arriba Izquierda CURV I, Arriba derecha CURV II, Abajo CURV III.....</i>	9
<i>Figura 2.6 Foto Surveyor</i>	9
<i>Figura 2.7 Elementos de un sistema teleoperado</i>	10
<i>Figura 2.8 Modelo de un sistema de un grado de libertad.....</i>	13
<i>Figura 2.9 Modelo General de un sistema bilateral.....</i>	15
<i>Figura 2.10 Modelo del entorno tipo Kelvin</i>	18
<i>Figura 2.11 Modelo del entorno tipo Maxwell</i>	18
<i>Figura 2.12 Modelo del entorno tipo Maxwell-Kevin.....</i>	19
<i>Figura 2.13 Modelo del entorno tipo Lineal estándar y sólido</i>	19
<i>Figura 2.14 Modelo del entorno tipo Kelvin simplificado.....</i>	20
<i>Figura 2.15 Arquitectura implementada en [Oboe 03]</i>	35
<i>Figura 2.16 Arquitectura empleada en [Tsumaki 02]</i>	36
<i>Figura 2.17 Esquema de la arquitectura implementada en [Mora 04]</i>	37
<i>Figura 2.18 Esquema general de la plataforma desarrollada en [Mora 04]</i>	37
<i>Figura 2.19 Arquitectura presentada en [Elhajj 03]</i>	39
<i>Figura 2.20 Esquema general de la plataforma presentada en [Elhajj 03]</i>	40
<i>Figura 2.21, Arquitectura del sistema Darts de la universidad de Tohoku</i>	41
<i>Figura 2.22 Arquitectura para la teleprogramación</i>	42
<i>Figura 2.23 Esquema general de teleoperación implementado en [Love 04]</i>	43
<i>Figura 2.24 Esquema general de la arquitectura implementada en [Zhu 00].....</i>	43
<i>Figura 2.25 Esquema general de la arquitectura implementada en [Wusheng 02]</i>	44
<i>Figura 2.26 Arquitectura del sistema implementado en [Buss 00].....</i>	45
<i>Figura 3.1 Arquitectura Sistema Grips de Kraft Telerobotics Inc.....</i>	46
<i>Figura 3.2 Manipulador Hidráulico de Kraft Telerobotics Inc. Con sus grados de libertad del esclavo</i>	47
<i>Figura 3.3 Maestro con reflexión de fuerzas de Kraft Telerobotics Inc.</i>	47
<i>Figura 3.4 Grados de libertad del Maestro</i>	48
<i>Figura 3.5 Arquitectura de control de la plataforma experimental desarrollada</i>	49
<i>Figura 3.6 Diagrama general de control.....</i>	50
<i>Figura 3.7 Esquema de control del maestro</i>	51
<i>Figura 3.8 Robot Paralelo Robmep.....</i>	51
<i>Figura 3.9 Simulador entorno de trabajo y su modelado usando las librerías SMR.....</i>	53
<i>Figura 3.10 Simulador implementado con ODE</i>	53
<i>Figura 3.11 Secuencia de imágenes de una colisión usando el simulador ODE.....</i>	54
<i>Figura 3.12 Control del esclavo</i>	55
<i>Figura 3.13 Arquitectura General del sistema teleoperado</i>	56
<i>Figura 3.14 Sistema Cámara Estereo.....</i>	57
<i>Figura 3.15 Aplicación usando Visión Estereo</i>	57
<i>Figura 3.16 Aplicación del Blending</i>	58
<i>Figura 4.1 Esquema General de control bilateral.....</i>	62

<i>Figura 4.2 Esquema posición-posición.....</i>	63
<i>Figura 4.3 Modelo del sistema de teleoperación posición-posición.....</i>	64
<i>Figura 4.4 Diagrama de bloques del esquema posición-posición.....</i>	64
<i>Figura 4.5 Diagrama de bloques del esquema posición-posición visto desde el maestro.....</i>	65
<i>Figura 4.6 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow 0$</i>	66
<i>Figura 4.7 LGR sistema BSP-PUMA, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 1900$ y $K_{ps} = 1000$.....</i>	67
<i>Figura 4.8 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 0.15$ y $K_{ps} = 10$.....</i>	67
<i>Figura 4.9 Respuesta ante una entrada tipo impulso de los sistemas vistos en: a) Figura 4.7 y b)</i>	
<i>Figura 4.8</i>	68
<i>Figura 4.10 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow \infty$.....</i>	68
<i>Figura 4.11 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 140$</i>	69
<i>Figura 4.12 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_{pm} = 140$ y b) $K_{pm} = 500$.....</i>	69
<i>Figura 4.13 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow 0$.....</i>	70
<i>Figura 4.14 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow \infty$</i>	70
<i>Figura 4.15 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $S(s) \rightarrow \infty$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 100$.....</i>	71
<i>Figura 4.16 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $S(s) \rightarrow \infty$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 1000$.....</i>	71
<i>Figura 4.17 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_{ps} = 170$ y b) $K_{ps} = 1000$</i>	71
<i>Figura 4.18 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $M(s) \rightarrow 0$.....</i>	72
<i>Figura 4.19 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 1000$</i>	73
<i>Figura 4.20 Desempeño del esquema Posición-Posición durante contacto</i>	75
<i>Figura 4.21 Esquema Fuerza - Posición</i>	75
<i>Figura 4.22 Modelo Simplificado de un sistema Maestro - Esclavo</i>	76
<i>Figura 4.23 Diagrama de bloques del esquema Fuerza-Posición.....</i>	77
<i>Figura 4.24 Diagrama de bloques del esquema fuerza-posición visto desde el maestro</i>	78
<i>Figura 4.25 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow 0$</i>	78
<i>Figura 4.26 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow \infty$.....</i>	78
<i>Figura 4.27 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 1.45$ y $K_{ps} = 100$.....</i>	79
<i>Figura 4.28 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_f = 1.45$, $K_{ps}=100$ y b) $K_f = 0.15$, $K_{ps} = 1000$</i>	79
<i>Figura 4.29 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow 0$.....</i>	80
<i>Figura 4.30 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow \infty$</i>	80
<i>Figura 4.31 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 1.7$ y $K_{ps} = 100$</i>	81
<i>Figura 4.32 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_f = 1.7$, $K_{ps}=100$ y b) $K_f = 1.7$, $K_{ps} = 1000$</i>	81
<i>Figura 4.33 Diagrama de bloques del esquema fuerza-posición visto desde el maestro</i>	82
<i>Figura 4.34 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 170$ y $K_{ps} = 1000$</i>	82
<i>Figura 4.35 Desempeño del esquema Fuerza-Posición durante el contacto.....</i>	84
<i>Figura 4.36 desempeño del esquema Fuerza-Posición después del contacto</i>	85
<i>Figura 5.1 Diagrama de bloques del esquema de control fuerza-posición con retardo en las comunicaciones.....</i>	88
<i>Figura 5.2 Respuesta escalón de un sistema de fase No Mínimo</i>	89
<i>Figura 5.3 Curva critica de estabilidad según K_f</i>	91
<i>Figura 5.4 Esquema Fuerza-Posición visto desde el Maestro con retardo</i>	93
<i>Figura 5.5 Lugar Geométrico de las raíces, sistema BSP-PUMA, $Ke=100$, $Be=100$, $K_{ps}=130$, sin retardo</i>	94
<i>Figura 5.6 Lugar Geométrico de las raíces sistema BSP-PUMA, con $Ke=100$, $Be=100$, $K_{ps} = 130$ y a) Retardo $T = 10\text{mSeg.}$, b) $T = 100\text{mSeg.}$</i>	94
<i>Figura 5.7 Lugar Geométrico de las raíces sistema BSP-PUMA, con $Ke=100$, $Be=100$, $K_{ps} = 130$ y a) Retardo $T = 0.5$, b) $T = 1$</i>	94
<i>Figura 5.8 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $Ke=1000$, $Be=1000$, $K_{ps} = 130$, $K_f=0.1$ y a) Retardo $T = 0$, b) $T = 50\text{mSeg.}$</i>	95
<i>Figura 5.9 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $Ke=1000$, $Be=1000$, $K_{ps} = 130$, $K_{ds} = 50$, $K_f=0.1$ y a) Retardo $T = 50\text{mSeg.}$, b) $T = 120\text{mSeg.}$</i>	96
<i>Figura 5.10 Modelo de dos puertos de un sistema bilateral de teleoperación</i>	97
<i>Figura 5.11 Diagrama de bloques Sistema de Teleoperación Bilateral usando modelo de 2 puertos</i>	98

<i>Figura 5.12 Canal de comunicación con retardo T.....</i>	102
<i>Figura 5.13 Descripción del flujo de potencia en un sistema mediante variables de onda.....</i>	103
<i>Figura 5.14 Línea de transmisión basada en pasividad</i>	105
<i>Figura 5.15 Línea de transmisión basada en pasividad con adaptación de impedancias.....</i>	106
<i>Figura 5.16 Implementación en Simulink del Esquema Fuerza-Velocidad basado en pasividad con adaptación de impedancias.....</i>	107
<i>Figura 5.17 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=1000$, $B_e=1000$, $K_{ps}=130$, $K_f=0.1$ y Retardo $T = 50mSeg$.</i>	108
<i>Figura 5.18 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=1000$, $B_e=1000$, $K_{ps}=130$, $K_f=0.1$ y Retardo $T = 120mSeg$.</i>	108
<i>Figura 5.19 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=10000$, $B_e=10000$, $K_{ps}=130$, $K_f=0.1$ y Retardo $T = 120mSeg$.</i>	108
<i>Figura 5.20 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=10000$, $B_e=10000$, $K_{ps}=130$, $K_f=2$ y Retardo $T = 100mSeg$.</i>	109
<i>Figura 5.21 Sistema bilateral Maestro-Esclavo con retardo de 100mSeg, con un controlador sin pasividad.....</i>	110
<i>Figura 5.22 Sistema bilateral Maestro-Esclavo con retardo de 100mSeg, con un controlador con pasividad.....</i>	111
<i>Figura 6.1 Esquema de control de convergencia de estados.....</i>	116
<i>Figura 6.2 Esquema de control simplificado.....</i>	121
<i>Figura 6.3 Esquema de simulink para el sistema bilateral.....</i>	130
<i>Figura 6.4 Evolución de posición y velocidad en el maestro (izquierda) y evolución del error de posición y velocidad (derecha). Azul posición, verde velocidad.....</i>	131
<i>Figura 6.5 Evolución de la señal del error de fuerza</i>	131
<i>Figura 6.6 Equipo de pruebas utilizado para los experimentos.</i>	132
<i>Figura 6.7 Sistema bilateral estable. Controladores según el anterior apartado</i>	132
<i>Figura 6.7 Sistema bilateral inestable. En este caso el valor de δ_1 asignado ha sido de -2000 ...</i>	133
<i>Figura 6.8 Algoritmo de control por Convergencia de Estados como una generalización de algoritmos de control bilateral</i>	134

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Parámetros de los modelos de sistemas teleoperados.....</i>	15
<i>Tabla 2.2 Parámetros del sistema BSP-Puma</i>	16
<i>Tabla 2.3 Parámetros del sistema Kyoto-Replica.....</i>	16
<i>Tabla 2.4 Parámetros del dispositivo Phantom.....</i>	16
<i>Tabla 5.1 Resumen de los rangos de estabilidad para distintos retardos en las comunicaciones....</i>	92

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Marco y Motivación de la Tesis

La presente Tesis ha sido realizada en el grupo de Robótica de la División de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISAM), de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). En dicho grupo, son varias las líneas de investigación llevadas a cabo en diversas aplicaciones de la robótica; una de ellas es la teleoperación, en la cual se tiene una larga trayectoria de trabajos realizados entre los cuales se pueden nombrar: utilización de robots teleoperados en el mantenimiento de líneas eléctricas [Aracil 95], análisis sobre la reflexión de fuerza en sistemas bilaterales para teleoperación [Peñin 97], control bilateral de robots teleoperados. Contribuciones en reflexión de fuerzas [Peñin 98], estudio sobre el control de excavadoras teleoperadas [Barrientos 97], diseño de interfaces avanzadas para robots teleoperados [Ferre 97], estudio y análisis de la influencia de los factores funcionales en la eficiencia de sistemas telerobóticos [Mora 04], entre otros.

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

1.2 Alcance e interés de la Tesis

Como se indicó anteriormente, esta Tesis se enmarca dentro del área de la Telerobótica. La misma desde sus inicios a finales de los años 40's, ha experimentado un notable desarrollo, extendiendo su aplicación de sectores como el nuclear, submarino y espacial, a otros como micro o nano manipulación, medicina, servicios, entre otros. Esto muestra claramente la vigencia que tiene esta tecnología en los tiempos actuales, además de proyectar su uso en el futuro.

Cada uno de los sectores de aplicación que se nombraron, exigen del sistema teleoperado características particulares de rendimiento, así como también involucran condiciones de funcionamiento peculiares. Por ejemplo, el sector espacial requiere de sistemas que sean robustos a los retardos en las comunicaciones y colisiones con entornos rígidos; el sector medicina puede requerir de mucha precisión y de una realimentación del entorno apropiada que eleve la percepción del mismo.

La base teórica de las áreas de conocimiento que se emplean en la teleoperación como por ejemplo: el control, guiado, realimentación de señales, implementación de interfaces, etc., es bastante amplia. Por lo que aún poseen algunas lagunas tanto teóricas como experimentales, especialmente en relación a los más recientes desarrollos teóricos que han surgido en los últimos años, aún cuando tal como se mencionó, la teleoperación es una tecnología que tiene cierto tiempo (finales de los 40's aprox.). Esto se debe en gran parte a que muchas de las investigaciones y desarrollos realizados en teleoperación, son muy dependientes de los avances que se realizan en otras tecnologías, como por ejemplo el avance en la capacidad de cálculo en la computación, aumento del ancho de banda en la comunicación, etc. Avances que hasta ahora no habían sido suficientes como para cumplir con los requerimientos mínimos que permitieran una correcta experimentación en las distintas áreas de conocimiento que se aplican en la teleoperación.

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 de la Tesis

Esta Tesis tiene como objetivo fundamental el estudio de algoritmos de control bilateral de robots teleoperados. Para la consecución del mismo se plantearon diversos objetivos específicos que han marcado la realización de esta Tesis, los cuales son:

- Realizar un estudio del estado del arte de la Teleoperación y sus tecnologías asociadas.
- Diseño e implementación de una estación de teleoperación.

- Identificación de los sistemas maestro y del esclavo que se utilizarán.
- Diseño de controladores individuales para el maestro y esclavo.
- Análisis y experimentación de los principales esquemas clásicos de control bilateral: posición-posición, y fuerza-posición.
- Análisis y experimentación de los esquemas de control bilateral fuerza-posición y fuerza-velocidad, con retardo en las comunicaciones.
- Análisis y experimentación del esquema de control bilateral basado en la convergencia de estados.
- Comparación de los distintos esquemas estudiados en la plataforma experimental.

1.4 Estructura de la Tesis

La tesis se encuentra dividida en 8 capítulos, 3 de ellos están dedicados a la introducción, conclusiones y bibliografía, los 5 restantes están dedicados al desarrollo teórico y práctico de la misma. A continuación se hace una breve descripción del contenido de cada uno de ellos:

- Capítulo 1: Se presenta el marco científico en el cual se ubica la tesis, su motivación e interés que tiene el tema en el ámbito internacional. Posteriormente se presentan los distintos objetivos de la misma, para finalmente presentar su estructura.
- Capítulo 2: Se inicia con una introducción a los sistemas teleoperados y la diferencia que tiene con la robótica industrial. Se hace una breve descripción de lo que ha sido su evolución, las aplicaciones que han impulsado su desarrollo, los principales elementos que componen un sistema teleoperado y se exponen los principales modelos usados para algunos de ellos. Seguido se expone un estado del arte de las principales áreas de interés en el marco de la teleoperación como lo son: el control, Interfases Hombre-Maquina (Háptica, Visión y Voz), entornos virtuales, el uso de Internet como canal de comunicación y arquitecturas de teleoperación.
- Capítulo 3: Se describe el desarrollo de la plataforma que sirvió como base experimental para los distintos algoritmos que se presentan en la tesis. Se establecen los requisitos que se establecieron para el sistema, los componentes disponibles y el proceso de diseño de las tarjetas controladoras necesarias para la implementación de la arquitectura adoptada. Posteriormente se describen las distintas arquitecturas que pueden derivarse mediante el uso de los distintos componentes con los cuales se dispone en conjunto con las tarjetas controladoras.
- Capítulo 4: Se presentan los esquemas clásicos de control bilateral Posición-Posición y Fuerza-Posición. El capítulo se encuentra dividido en 2 partes, la primera abarca el esquema Posición-Posición y la segunda el Fuerza-Posición, ambos casos cuando no existe retardos en las comunicaciones. De los mismos se obtiene las ecuaciones que rigen su comportamiento, luego se analiza y estudia la influencia que tiene los parámetros que forman parte del esquema sobre la percepción que tiene el operador del entorno, esto de acuerdo a las convenciones que se indican. También se estudia la influencia que tienen sobre el error en

régimen permanente. Posteriormente se presentan los resultados experimentales de la implementación de cada uno de los esquemas en la plataforma experimental diseñada.

- Capítulo 5: Se presentan 2 esquemas de control bilateral, el Fuerza-Posición y el Fuerza-Velocidad basado en pasividad, ambos cuando existen retardos en las comunicaciones. De igual manera el capítulo se encuentra dividido en 2 partes, la primera trata del esquema Fuerza-Posición y la segunda del Fuerza-Velocidad con pasividad. Inicialmente se presenta el esquema Fuerza-Posición, luego se procede a explicar el modelado y aproximación del retardo en las comunicaciones, seguido se inicia el análisis del esquema, obteniendo las ecuaciones que rigen su comportamiento, se hace el estudio de estabilidad absoluta, se estudia el lugar geométrico de las raíces y el error en estado estacionario. Posteriormente se pasa a estudiar el esquema Fuerza-Velocidad basado en pasividad, se inicia con una breve descripción de los conceptos y teorías en los cuales se basa este esquema como: las redes de 2 puertos, arquitecturas de 2 y 4 canales, transparencia, matriz de *Scattering*, variables de onda y la pasividad. Luego se presenta el esquema de control, seguido del cual se modifica el mismo haciendo uso del principio de adaptación de impedancias, se presentan simulaciones para conocer el comportamiento teórico del esquema y finalmente se presenta los resultados de las implementaciones y experimentación que se hizo de ambos esquemas sobre la plataforma experimental diseñada.
- Capítulo 6: Este capítulo trata del algoritmo de control bilateral por convergencia de estados, se inicia con la presentación del modelado de un sistema teleoperado bajo este esquema de control, seguidamente se presentan los diversos criterios de diseño para el cálculo de los reguladores. Posteriormente se expone el análisis de transparencia para maestro y esclavo de segundo orden, y se presenta un resumen del método de cálculo de los reguladores. Seguidamente se realiza un análisis de la estabilidad con las condiciones de transparencia, se muestra un ejemplo de aplicación y se presentan resultados experimentales. Finalmente, se expone el algoritmo de control bilateral por convergencia de estados, como una generalización de los sistemas clásicos de control.
- Capítulo 7: Se hace el resumen de las principales conclusiones que se han obtenido de la realización de esta Tesis, además se plantean los posibles trabajos futuros que pueden dar continuidad al trabajo realizado o que pueden desprenderse del mismo.
- Anexo I: Se describe la tarjeta de control diseñada, cada uno de los bloques que la componen y el funcionamiento específico de los sistemas que va a controlar.
- Anexo II: Se presenta una explicación detallada del proceso de identificación seguido para los sistemas Maestro y Esclavo. Se inicia con una breve descripción del proceso de identificación dentro del cual se detalla la adquisición de los datos, el procesamiento de los mismos y la obtención de los modelos de las articulaciones.
- Anexo III: Se describe el control de la plataforma mediante la implementación de 2 de los esquemas clásicos en la teleoperación como lo son el Posición-Posición y el Fuerza-Posición. Se describe el proceso de diseño de los controladores y se presentan las simulaciones junto con los resultados experimentales de su desempeño real.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo se centra en describir el contexto de la tesis, explicando la relación y diferencias que tienen la teleoperación con la robótica, sus orígenes y evolución. Se presenta el estado de la técnica en la actualidad, donde se explican los diferentes temas de investigación que son de interés hoy en día, su problemática y resultados.

La estructura a seguir será la siguiente: en primer lugar, se hace una diferenciación entre lo que es la robótica y la teleoperación; luego se describe la evolución de la teleoperación, desde sus inicios y sus primeras aplicaciones; Seguidamente, se muestran los principales componentes que integran un sistema teleoperado y se hace una breve explicación del modelado de algunos de ellos. Finalmente, se presentan los principales temas de investigación aplicados a la teleoperación en la actualidad, tratando temas como el control bilateral, las interfaces hombre-maquina, entornos virtuales, el uso de Internet y algunas arquitecturas de control usadas en la actualidad.

2.1 Robótica y Telerobótica

La robótica, es un campo multidisciplinario de la Ingeniería encargado de la investigación y desarrollo de robots. En el mismo confluyen áreas como la mecánica, automática, informática, electrónica. En la actualidad, los robots tienen múltiples variedades, clasificados de acuerdo a su arquitectura y aplicación, los mismos van desde los industriales que pueden ser encontrados en las líneas de ensamblaje de las industrias hasta robots humanoides que busca mimetizar al ser humano, así como también insectoides, aéreos, submarinos, móviles, etc. En el marco de esta tesis, el interés está centrado en los robots industriales. Según la *Robot Institute Association* “Un robot Industrial es un manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas o dispositivos especializados, a través de movimientos programados variables para la realización de una diversidad de tareas”. Otras organizaciones también han definido conceptos de lo que es un robot industrial, la *Organización Internacional de Estandares (ISO)* lo define como: “Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”. Un listado más completo de las distintas definiciones de robot industrial puede encontrarse en [Barrientos - 99]. De ahora en adelante, al hacer referencia a la palabra robot, se entenderá como Robot Industrial, de acuerdo a las definiciones mencionadas previamente.



Figura 2.1 Diversos robots industriales y teleoperados

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 cambiado a medida que se han desarrollado nuevos sensores, técnicas de control, aumentando la capacidad de cálculo, etc. Hoy en día los robots admiten cierto grado de adaptación a las tareas que ejecutan. Por ejemplo, son capaces mediante un sistema de visión 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 reorientar la herramienta de agarre para no dañar el objeto manipulado, el robot o el entorno de trabajo en operaciones de inserción.

Estos avances han ayudado a aumentar el esfuerzo orientado a expandir el campo de aplicación de los robots más allá de las fábricas, por ejemplo en sectores como medicina, construcción, mantenimiento, hogar, etc. Pero aún con ese grado de

adaptabilidad, es necesario conocer de antemano la tarea y el entorno en el cual va a trabajar el robot [Peñin-00]. Por lo tanto si una tarea no es repetitiva, no está bien estructurada y el entorno es variable, entonces el uso del robot industrial como se ha definido no es aplicable, por lo que es necesario recurrir a las capacidades de adaptación del operador humano. Pero cuando la tarea es realizada en ambientes hostiles, como puede ser entornos radioactivos, el espacio, submarino, manipulación de explosivos, etc., surge la necesidad de buscar una manera de aprovechar las ventajas de los robots y del operador humano; es allí donde surge la Telerobótica, que se centra en gobernar, u operar, un dispositivo de forma remota por parte de un operador humano para la realización de una tarea.

2.2 Evolución de la Telerobótica

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. Por ejemplo, han hecho uso de palos que le permitiera extender el alcance para hacer caer una fruta, o las tenazas del herrero que les permitiera manipular los objetos calientes. A medida que la humanidad evoluciona, se llevan a cabo nuevos descubrimientos y se desarrollan nuevas tecnologías; de igual manera van evolucionando las herramientas que ayudan al hombre a llevar a cabo las tareas que este se proponga realizar. La robótica y específicamente la Telerobótica no son la excepción a la regla.



Figura 2.2 Herrero y algunas herramientas usadas por el hombre

La teleoperación tal como la conocemos hoy en día tiene sus orígenes en los requerimientos de la industria nuclear [Vermut 85]. Inicialmente se usaban pinzas de más de medio metro para separar al operador del material radioactivo, pero a medida que el trabajo con este tipo de material se iba haciendo mayor igualmente 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 00].

En 1947 en el *Argonne National Laboratory* de Estados Unidos, se iniciaron las primeras investigaciones lideradas por Raymond Goertz, cuya finalidad era el desarrollo de sistemas de telemanipulación que facilitaran la realización de tareas remotas [Goertz

64]. En 1949, concluyó el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, llamado M1 [Vertut 85], [Goertz 64], 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.

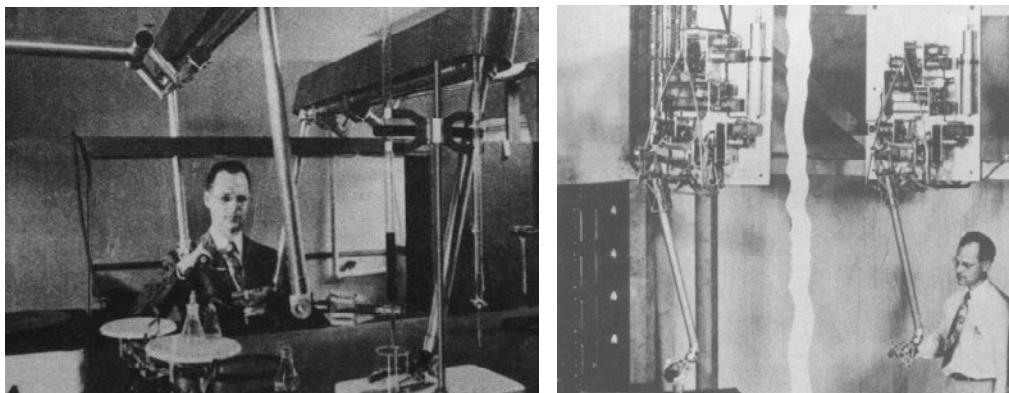


Figura 2.3 Raymond Goertz, a la izquierda con un maestro esclavo mecánico, a la derecha con el E1 con accionamientos eléctricos y servocontrolados

A partir de 1956, para la Agencia Atómica Francesa (*Commissariat à l'Energie Atomique*), Pesanti y Cherel comienzan a realizar un desarrollo de un sistema maestro-esclavo mecánico [Pesanti 59]. Ese mismo año se desarrolló el sistema teleoperado Mascot, entre un equipo Italiano y el *Argonne National Laboratory* [Azorin 03]. 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 92].

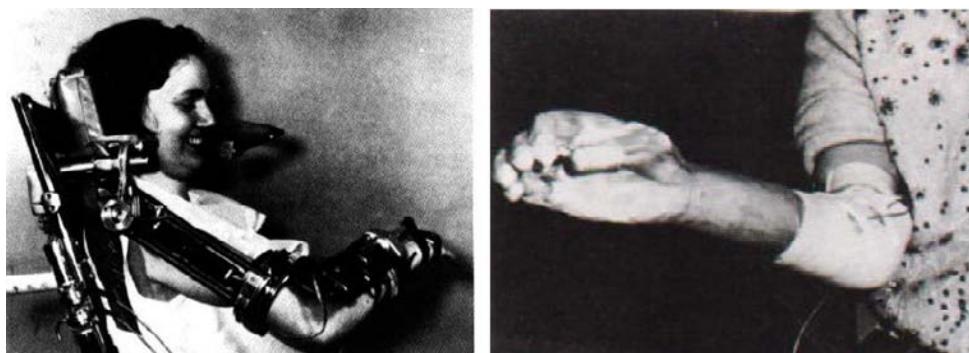


Figura 2.4 Prótesis humanas para el reemplazo de miembros superiores

En la década de los 60's se extiende las investigaciones de la teleoperación a aplicaciones submarinas [Wernli 82]. Los primeros desarrollos fueron llevados a cabo por la Armada de EE.UU., inicialmente destinados a la recogida de torpedos. Mas 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 04]. El siguiente en ser desarrollado fue el sistema CURV (*Cable Controlled Underwater Vehicle*), en el anteriormente llamado Pasadena Annex del centro de pruebas de máquinas de guerra navales, 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.

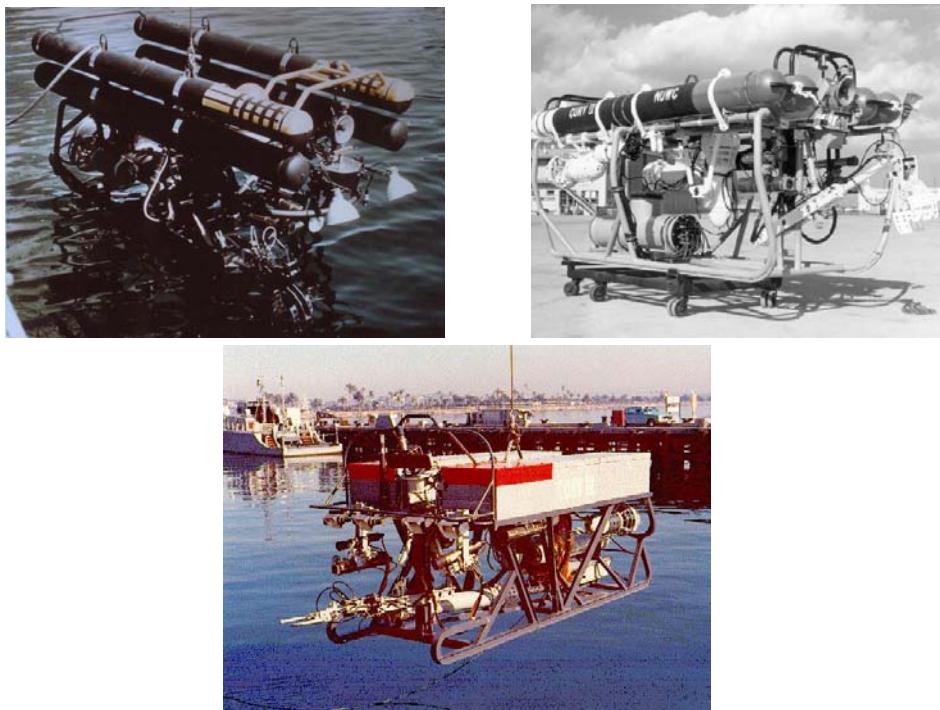


Figura 2.5 Fotos de la serie CURV, arriba Izquierda CURV I, Arriba derecha CURV II, Abajo CURV III

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 03]. Debido a la carrera espacial entre EEUU y la URSS, se experimentaron los primeros problemas relevantes de retraso 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.

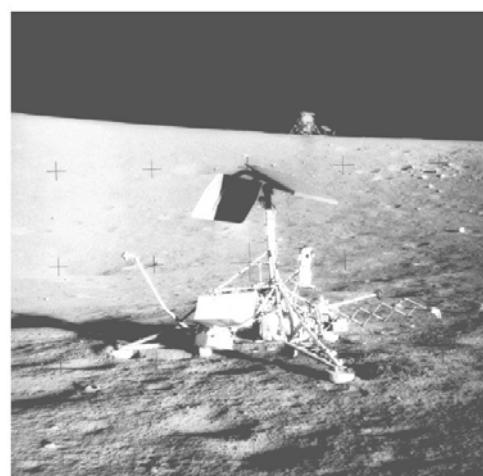


Figura 2.6 Foto Surveyor

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 02]. 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 [Hernando 02]. 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.

2.3 Componentes de un sistema de robots teleoperados

Una manera sencilla de describir un sistema teleoperado de robots es mediante un operador que envía comandos a robot remoto, el cual ejecutará las órdenes correspondientes y enviará información de su estado y del entorno en el cual se encuentra. Esta información realimentada al operador será la que le permita cerrar el bucle de control del sistema teleoperado. Dentro de este ciclo existen otros elementos que intervienen y que son vitales para el funcionamiento del sistema, por lo que es necesario que sean tratados de manera individual. Para facilitar la identificación de todos los componentes de un sistema teleoperado, se va a hacer una división del sistema de acuerdo a su localización. En la figura 2.7, se puede observar que un sistema teleoperado básicamente puede ser dividido en 3 zonas, Zona Local, Zona Remota y Canal de Comunicaciones.

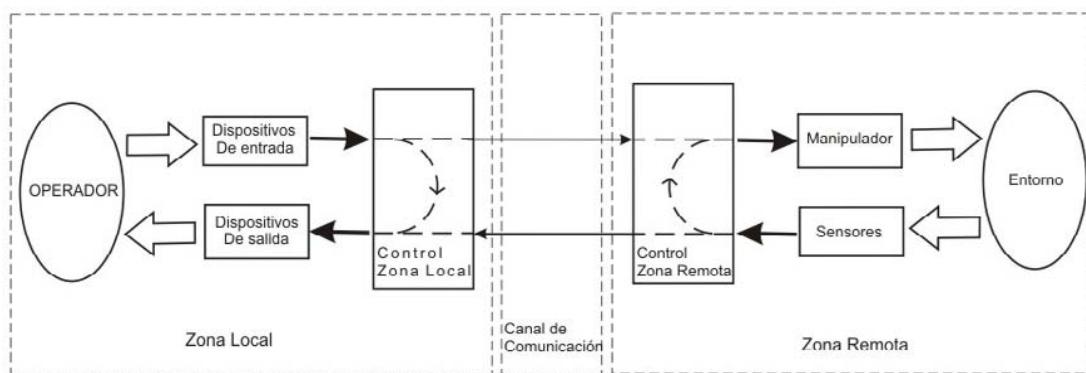


Figura 2.7 Elementos de un sistema teleoperado

2.3.1 Zona Local

En la zona local se ubica el operador humano, que es el encargado de controlar la ejecución de la tarea remota. El mismo deberá contar con dispositivos de actuación cuya función es la de generar los comandos del operador para ser enviados al robot en la zona remota. Para que el operador pueda tener conciencia del trabajo que está realizando se necesita dotar a la interfaz del sistema teleoperado de dispositivos de

realimentación con los que el operador pueda tener información de la ejecución de la tarea. Dependiendo de la complejidad de la tarea y las condiciones de operación, puede ser necesario cerrar un bucle de control en la zona local, donde se presentan al operador de ciertas ayudas que le faciliten la manipulación, bien sea para mejorar su desempeño o para superar adversidades propias de la aplicación como por ejemplo los retardos en la comunicación.

Operador

Es la persona encargada de realizar la tarea, el elemento que cierra el bucle de control. Su intervención puede ser diversa, dependiendo de la aplicación y puede ir desde un control absoluto, pasando por un control compartido hasta el control supervisado.

Dispositivos de actuación

Son los dispositivos encargados de capturar los comandos generados por el operador, para ser transmitidos al manipulador remoto. Existe una gran variedad de dispositivos capaces de realizar esta función, cada uno con características propias, ventajas y desventajas, entre los más comunes podemos nombrar: teclados, ratones, joysticks, maestros, maestros con reflexión de fuerza, paletas, pantallas táctiles, pedales, etc. Los joysticks generan habitualmente comandos de velocidad, mientras que los maestros generan comandos de posición, aunque un maestro puede ser programado de tal manera que también genere comandos de velocidad. Es posible hacer uso de otro tipo de dispositivos, simplemente cambiando el medio a través del cual se emiten los comandos, por ejemplo micrófonos para comandos de voz, cámaras para sistemas de captura de movimiento. Un estudio más detallado de los mismos puede ser encontrado en [Ferre 97].

Dispositivos de realimentación

Son los dispositivos encargados de presentarle al operador cualquier tipo de información relacionada con el desarrollo de la tarea que está realizando. Un operador no puede realizar una operación si no puede ver que es lo que está haciendo, y como en la actualidad prácticamente en todas las aplicaciones teleoperadas la zona local se encuentra físicamente separada de la zona remota, el dispositivo de salida indispensable en cualquier operación es el TV o monitor a través del cual se le presentará al operador imágenes de la tarea, los monitores también son capaces de presentarle al operador información de tipo texto, gráfico o imágenes compuestas entre realidad y simulación. Existen maestros y joysticks con reflexión de fuerzas que son capaces de presentarle al operador fuerzas de contacto y manipulación relacionadas con la tarea ejecutada aparte de cumplir la función de dispositivo de entrada. También es posible hacer uso de altavoces para emitir sonidos, alarmas o información auditiva al operador.

Control Zona Local

Cuando se quiere mejorar la calidad de la operación, mejorar el desempeño o subsanar adversidades propias de la aplicación como pueden ser los retardos en la

comunicación, en la zona local se puede ubicar un control local, que bien puede ser realizado en un computador, en el cual se le presentan ayudas al operador como displays predictivos o simulaciones en las cuales el operador tenga conocimiento del comportamiento del manipulador esclavo ante los comandos que este está enviando antes de ser llevados a cabo. También el control en la zona local puede ser representado como ayudas a la teleoperación en la cual el sistema mejorará el desempeño en la ejecución de la tarea, como por ejemplo, en el caso de efectuar un movimiento en línea recta, el sistema ayudará al operador a describir esa trayectoria mediante fuerzas que le impidan salir de la misma. Dentro de esta categoría entra el control supervisado y la teleprogramación, muy útil en el caso de aplicaciones espaciales, en las cuales los retardos son tan grandes que es imposible teleoperar en tiempo real, con lo cual el operador simplemente envía una secuencia de comandos al robot para su posterior ejecución.

El conjunto formado por el control en la zona local, los dispositivos de actuación y los dispositivos de realimentación es lo que se considera la interfaz de teleoperación.

2.3.2 Zona Remota

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

Control Zona Remota

Es el encargado de que el manipulador esclavo ejecute los comandos enviados por la zona local. El control más básico es simplemente el encargado de manejar la comunicación maestro-esclavo desde la zona remota. Esquemas de control más avanzados incluyen el uso de sensores como por ejemplo el control compartido, o aumentando el grado de autonomía como el caso del control supervisado o la teleprogramación.

Robot o manipulador

Es el dispositivo a través del cual se lleva a cabo la tarea, el robot o manipulador controlado por el operador, generalmente es un brazo antropomórfico de 6 grados de libertad o más con una pinza, deben ser rápidos y de baja inercia [Mora 04].

Sensores

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

Entorno

Es el lugar o área circundante al esclavo en la cual se lleva a cabo la tarea, también llamado entorno de trabajo. Por lo general es no estructurado, hostil, variante o desconocido, lo que hace que la automatización sea extremadamente difícil o imposible de llevar a cabo, razón por la cual se hace necesario aplicar la teleoperación.

2.3.3 Canal de Comunicaciones

Es el medio a través del cual se transmiten los comandos enviados desde la zona local a la zona remota y la información de realimentación desde la zona remota a la zona local. Existen múltiples formas de ser implementado, MODEM acústicos, fibras ópticas, eléctricamente, ondas de radio, Internet, etc. Cualquiera que sea el caso, existen dos características primordiales a la hora de escoger un canal de comunicación, y esas son el ancho de banda y el retardo temporal. El ancho de banda se refiere a la cantidad de información que el canal es capaz de manejar, mientras que el retardo temporal lo determina el tiempo que tarda la información en ir desde una zona a la otra.

2.4 Modelado elementos del sistema teleoperado

2.4.1 Modelado sistemas maestro-esclavo

Para realizar el estudio de los distintos esquemas, normalmente se hace uso de un sistema de un grado de libertad, existen diversas maneras de modelar un sistema, entre los más usados para modelar sistemas bilaterales tenemos:

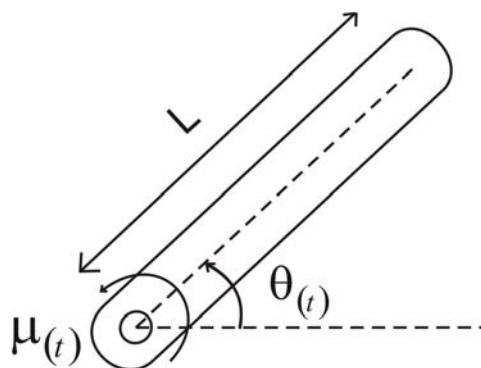


Figura 2.8 Modelo de un sistema de un grado de libertad

El modelo simplificado del mismo viene dado por la siguiente ecuación (2.1):

$$J \cdot \ddot{\theta}_{(t)} + b \cdot \dot{\theta}_{(t)} + m \cdot g \cdot L \cdot \operatorname{sen}(\theta_{(t)}) = \mu_{(t)} \quad (2.1)$$

Donde:

$J = \frac{1}{3} \cdot m \cdot L^2$, es la inercia del elemento.

b, es el coeficiente de rozamiento viscoso.

L, es la longitud del elemento.

g, es la aceleración de la gravedad.

m, es la masa del elemento.

$\theta_{(t)}$, es la posición o ángulo girado en el instante de tiempo t.

$\mu_{(t)}$, Es el par aplicado en el instante de tiempo t.

Como puede observarse de la ecuación (2.1), el modelo simplificado del sistema de la figura 2.8, es un sistema no lineal. Por lo tanto normalmente se toma en cuenta el modelo lineal de la ecuación (2.1), el cual es:

$$J \cdot \ddot{\theta}_{(t)} + b \cdot \dot{\theta}_{(t)} = \mu_{(t)} \quad (2.2)$$

En este caso, tanto el dispositivo maestro como el esclavo son modelados mediante la ecuación (2.2), y el modelo del sistema bilateral simplemente consistiría en la unión de ambos dispositivos mediante un canal de comunicación bidireccional que permita el intercambio de información entre ambos controladores.

Otro modelo usado para la representación de sistemas bilaterales es el observado en la figura 2.9, el mismo muestra el modelo mecánico habitual de cada uno de los elementos físicos de los sistemas bilaterales maestro esclavo, junto con la relación física existente en cada una de las zonas que lo componen [Yokokohji 92]. Las ecuaciones que caracterizan la física de la interacción entre los distintos elementos de este modelo son:

$$\tau_m + f_m = m_m \cdot \ddot{X}_m + b_m \cdot \dot{X}_m \quad (2.3)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \cdot \ddot{X}_s + b_s \cdot \dot{X}_s \quad (2.4)$$

$$f_s = m_e \cdot \ddot{X}_s + b_e \cdot \dot{X}_s + K_e \cdot X_s \quad (2.5)$$

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \cdot \ddot{X}_m + b_{op} \cdot \dot{X}_m + K_{op} \cdot X_m \quad (2.6)$$

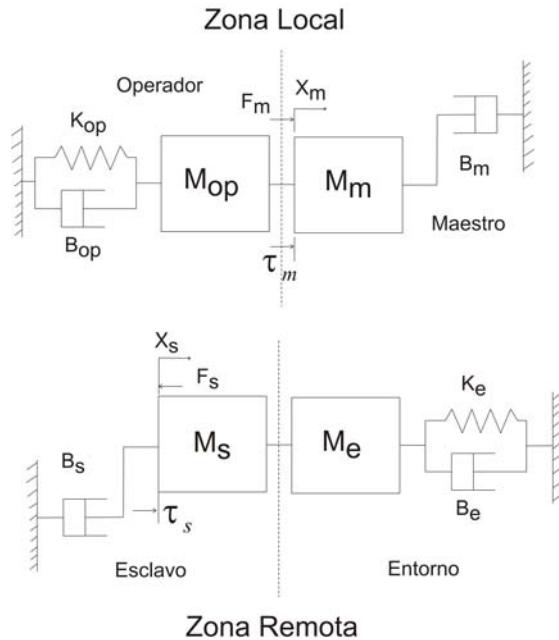


Figura 2.9 Modelo General de un sistema bilateral

Con la finalidad de realizar el análisis es necesario utilizar valores numéricos en los modelos, dichos valores es posible asignarlos a conveniencia a fin de tener un sistema con un comportamiento óptimo, pero en vista de que esta tesis tiene un alto contenido práctico, se considera importante usar valores que correspondan con sistemas reales y así tener una referencia teórica más cercana a la realidad de los sistemas teleoperador.

En [McAfee 91], se presentan los factores que intervienen en los modelos de sistemas teleoperados de acuerdo al modelo presentado en la figura 2.9, sus dimensiones y rangos. En la tabla 2.1, se presenta un resumen de los mismos junto con sus rangos de valores, suponiendo que se trabaja con maestro con valores de rozamiento viscoso y tamaño iguales o menores a los esclavos.

Parámetro	Definición	Rango	Unidades
m_m	Masa del maestro	0.1 - 10	Kg
m_s	Masa del esclavo	1 - 100	Kg
b_m	Rozamiento viscoso maestro	0,05 - 100	Ns/m
b_s	Rozamiento viscoso esclavo	0,05 - 200	Ns/m

Tabla 2.1 Parámetros de los modelos de sistemas teleoperados

En [Peñin 98], se puede encontrar los parámetros de dos sistemas comerciales, el BSP-PUMA que es un sistema comercial desarrollado por la Universidad de Oxford, el mismo consta de un maestro tipo Joystick basado en una plataforma Stewart denominado BSP y un robot comercial PUMA 560. El otro es un sistema desarrollado por la universidad de Kyoto al que le denomina Kyoto-Replica, el cual consta de 2 grados de libertad planares y tanto el maestro como el esclavo son exactamente iguales. Los valores de ambos sistemas pueden observarse en las tablas 2.2 y 2.3.

Parámetro	Definición	Valor	Unidades
m_m	Masa del maestro	1	Kg
m_s	Masa del esclavo	10	Kg
b_m	Rozamiento viscoso maestro	2	Ns/m
b_s	Rozamiento viscoso esclavo	60	Ns/m

Tabla 2.2 Parámetros del sistema BSP-Puma

Parámetro	Definición	Valor	Unidades
m_m	Masa del maestro	6	Kg
m_s	Masa del esclavo	6	Kg
b_m	Rozamiento viscoso maestro	0,1	Ns/m
b_s	Rozamiento viscoso esclavo	0,1	Ns/m

Tabla 2.3 Parámetros del sistema Kyoto-Replica

En [Mora 04], se presenta la tabla de datos obtenidas por estudios usando el manipulador Phantom, de la empresa Sensible Tech. Este dispositivo es ampliamente usado por investigadores relacionados con temas de Teleoperación e interfaces hapticas por lo que se considera importante ser tomado en consideración en los estudios realizados en la presente tesis.

Párametro	Definición	Valor	Unidades
m_m	Masa del maestro	0,075	Kg
b_m	Rozamiento viscoso maestro	0,1	Ns/m

Tabla 2.4 Parámetros del dispositivo Phantom

2.4.2 Modelado del operador

Como se pudo ver en el diagrama de la figura 2.7, la principal diferencia de un sistema teleoperado del resto es la intervención del operador. El mismo es el encargado de cerrar el bucle de control del sistema global. Por lo tanto estaría generando señales de actuación dependiendo de la realimentación visual y cinestésica que reciba del entorno remoto. Es por ello que se hace necesario utilizar el modelo del operador en el diseño de sistemas bilaterales, si se quiere contemplar un modelo del sistema más realista. Existen diversos tipos de modelos mediante los cuales se puede representar al operador, en [Peñin 98] se presenta un estudio más detallado de los distintos tipos de modelos usados.

El modelo habitualmente usado en control bilateral [Hannaford 89], [Kazerooni 93], es el mismo modelo normalmente usado en Aeronáutica para modelar el piloto de una aeronave [Peñin 98] y que viene dado por:

$$Z_{op} = m_{op}jw + b_{op} + \frac{k_{op}}{jw} \quad (2.7)$$

Donde:

m_{op} = Masa del operador

b_{op} = Rozamiento viscoso del operador

k_{op} = Rígidez del operador

A partir de este modelo otros autores por ejemplo [Anderson 89], [Daniel 95], generan modelos con modificaciones que consideran pertinentes para sus investigaciones. Es importante resaltar que el modelo mostrado y sus derivados, consideran únicamente el comportamiento mecánico del operador, es decir, la fuerza que ejerce sobre el maestro y las características dinámicas del brazo, pero no toma en cuenta en que se basa el operador para generar un valor de fuerza determinado. También son interesantes los trabajos realizados por McRuer en los que describe al operador como un integrador más un retraso en la realización de tareas de guiado [McRuer 94].

2.4.3 Modelado del entorno

Los sistemas teleoperados son usados para realizar una tarea, la misma puede variar dependiendo de la aplicación, pero usualmente se relaciona con la manipulación de algún tipo de objeto; incluso una misma aplicación puede incluir la realización de distintas tareas con características dinámicas distintas. Esta manipulación genera fuerzas originadas tanto por el objeto mismo como de su interacción con otros objetos, que influyen o forman parte del desempeño general del sistema, por lo tanto es necesario realizar un modelo que describa esa interacción, el cual es conocido como modelo del entorno.

De esta manera, conociendo el modelo del entorno, es posible realizar el diseño del sistema de control que se ajuste a las características particulares de la tarea que se quiera realizar, de tal manera que se mejore el desempeño del sistema y evitando de esta manera entrar en resonancia con los modos de vibración del entorno.

Existen varios modelos de entornos normalmente usados en la literatura, en [Peñin 98] o [Janabi 95] se puede encontrar una descripción más detallada de los mismos. Como la problemática del modelado del entorno no es el objetivo de esta tesis, simplemente se realizará una breve descripción de los principales modelos de los entornos que suelen ser usados en el campo del control bilateral.

Modelo de entorno tipo Kelvin

Es el modelo más usado en robótica [Azorin 03], el mismo es representado como una rígidez en paralelo con un elemento de disipación viscosa, figura 2.10. La ecuación que define su comportamiento ante la acción de una fuerza viene dada por:

$$F = K_e \cdot X_e(t) + b_e \cdot \dot{X}_e(t) + m_e \cdot \ddot{X}_e(t) \quad (2.8)$$

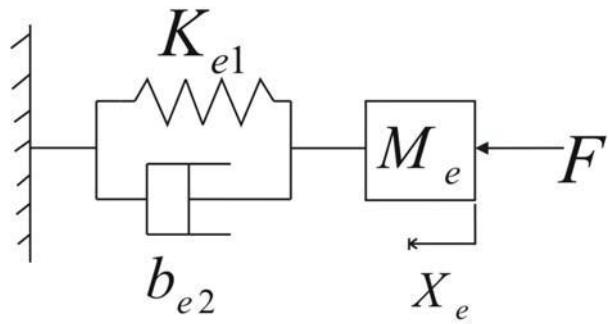


Figura 2.10 Modelo del entorno tipo Kelvin

Modelo de entorno tipo Maxwell

Usado para describir materiales plásticos o cándentes, caracterizados por un comportamiento elástico instantáneo. También posee la característica de poder representar un estado como de fluido viscoso. Es representado como una rigidez en serie con una disipación viscosa, figura 2.11. Las ecuaciones que define su comportamiento ante la acción de una fuerza viene dada por:

$$F = m_e \cdot \ddot{X}_e + K_e \cdot (X_e - X_1) \quad (2.9)$$

$$b_e \cdot \dot{X}_1 = K_e \cdot (X_e - X_1) \quad (2.10)$$

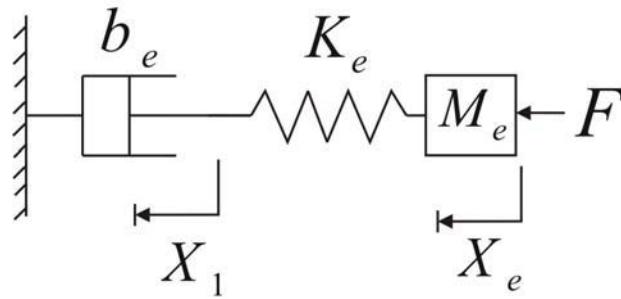


Figura 2.11 Modelo del entorno tipo Maxwell

2.4.3.1 Modelo de entorno tipo Maxwell-Kelvin

Como su propio nombre lo indica, es un modelo combinado entre el tipo Maxwell y el tipo Kelvin, usado para representar el comportamiento de materiales compuestos como estructuras de hormigón y polímeros. Las ecuaciones que definen su comportamiento ante la acción de una fuerza viene dada por:

$$F = m_e \cdot \ddot{X}_e + K_{e1} \cdot (X_e - X_1) \quad (2.11)$$

$$K_{e1} \cdot (X_e - X_1) = b_{e1} \cdot \dot{X}_2 \quad (2.12)$$

$$b_{e1} \cdot \dot{X}_2 = K_{e2} \cdot (X_1 - X_2) + b_{e2} \cdot (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) \quad (2.13)$$

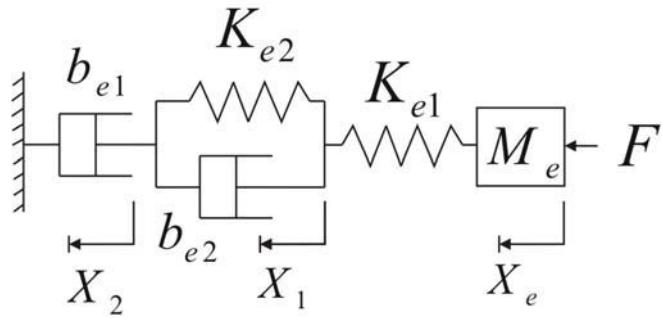


Figura 2.12 Modelo del entorno tipo Maxwell-Kevin

Modelo de entorno lineal estándar y sólido

Se puede utilizar para describir el comportamiento de materiales y estructuras compuestas como los que suelen ser manipulados por robots en operaciones del tipo “Pick and Place”. Básicamente se compone por un modelo tipo Kelvin más una rigidez en serie (figura 2.13), también es conocido como el modelo elástico de tres elementos. Las ecuaciones que definen su comportamiento ante la acción de una fuerza viene dada por:

$$F = m_e \cdot \ddot{X}_e + k_{e1} \cdot (X_e - X_1) \quad (2.14)$$

$$k_{e1} \cdot (X_e - X_1) = k_{e2} \cdot X_1 + b_{e2} \cdot \dot{X}_1 \quad (2.15)$$

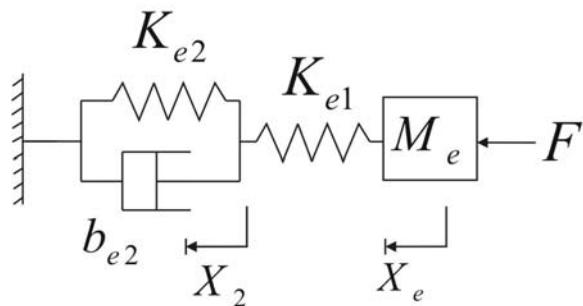


Figura 2.13 Modelo del entorno tipo Lineal estándar y sólido

Modelo Kelvin simplificado

Este modelo consiste en eliminar la masa equivalente y usar solamente la rigidez del entorno y el rozamiento viscoso. Por lo tanto la ecuación que definen su comportamiento ante la acción de una fuerza viene dada por:

$$F = k_e \cdot X_e(t) + b_e \cdot \dot{X}_e(t) \quad (2.16)$$

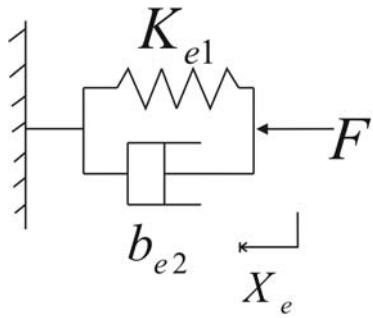


Figura 2.14 Modelo del entorno tipo Kelvin simplificado

Como se pudo observar anteriormente, existen distintas maneras de modelar el entorno. Para efectos de los análisis que se realizarán en la presente tesis se modelará el entorno usando el modelo Kelvin simplificado (figura 14). Diversos autores utilizan la simplificación como resistivo puro, como por ejemplo [Kim 92] o [Lage 94], afirmando que en el tipo de tareas que normalmente realizan los telemanipuladores, el entorno se aproxima a un medio elástico. Y los valores de rigidez varían desde 1 N/m para entornos casi de movimiento libre, hasta los 200000 N/m para el contacto con materiales duros, como por ejemplo el acero.

2.5 Algoritmos de control bilaterales

Es la principal área de investigación desde los inicios de la teleoperación, con lo cual es bastante extenso el material referente a este tema. Existen diversos esquemas aplicando control clásico, moderno, teoría de cuadripolos, variables de ondas, etc. No se detallarán esos esquemas porque en la presente tesis existen otros capítulos dedicados a estos temas donde serán tratados con mayor profundidad, simplemente se mencionarán algunos de los desarrollos que diversos investigadores han implementado en la actualidad. Vale la pena resaltar que en lo que a control se refiere un tema que se encuentra en pleno desarrollo es el del control con retardos en las comunicaciones, impulsado inicialmente por su aplicación en el sector espacial y submarino, y especialmente motivado en la actualidad por la implementación de sistemas haciendo uso de Internet como medio de comunicación.

En el trabajo realizado en [Richard 03], se hace un resumen de los principales modelos usados para describir el retardo temporal, algunos de los esquemas de control usados y problemas abiertos en este campo como por ejemplo: la implementación de los sistemas con retardo temporal de manera digital, identificación adaptativa del retardo, captura y manejo de información relacionada con el retardo, uso de las propiedades estocásticas del retardo.

Otro trabajo como el presentado por Blake Hannaford [Hannaford 02], se muestra un método basado en la energía, controlando una interfaz haptica para asegurar un contacto estable bajo una gran variedad de condiciones de operación, como el contacto con entornos de gran rigidez, limitando la fuerza de control y entorno con retardos. Se analiza la estabilidad del sistema en términos de la definición de la pasividad en el dominio del tiempo. Se define el Observador de Pasividad que mide el

flujo de energía entrante y saliente de uno o más subsistemas en tiempo real. Un comportamiento activo se verifica con un valor negativo del Observador de Pasividad en cualquier momento. También se define el Controlador Pasivo, un elemento adaptativo disipante, que en cada tiempo de muestreo, absorbe exactamente la salida de energía neta (en caso de haberla) medida por el Observador de Pasividad.

Existe un esquema de control bilateral basado en la realimentación hacia adelante (Feedforward) para telemanipuladores lineales dinámicamente parecidos, con escalado cinestésico y de potencia, el mismo se puede encontrar en [Lee 03]. La ley de control propuesta, modela al operador como una herramienta mecánica rígida pasiva con inercia aparente programable parecida al operador humano y al entorno de trabajo remoto, utilizando Feedforward bilateral de fuerza y control con realimentación de posición. La pasividad del sistema de lazo cerrado es robusta ante imprecisiones en las medidas de fuerzas y errores de modelado. La coordinación de errores y aspectos generales de movimiento de la teleoperación son controladas individualmente. El esquema propuesto es aplicable a sistemas generales teleoperados no lineales si se garantiza el uso de una alta ganancia de realimentación.

Existen otros trabajos cuyo objetivo es el estudio de ciertas condiciones de funcionamiento como por ejemplo el retardo en las comunicaciones, en este sentido, [Niculescu 02] realiza un análisis de la estabilidad de un esquema de control de teleoperación a lazo cerrado ante la presencia de retardos en la comunicación. Derivando condiciones de estabilidad en el dominio de la frecuencia analíticas y fáciles de verificar. Se estudian casos de independencia del retardo así como intervalos de retardos. La novedad de este trabajo radica en la simplicidad de la caracterización de regiones de estabilidad en términos de los parámetros del sistema. Se presentan tanto interpretaciones físicas como diversos ejemplos.

Otra metodología de control que se ha empleado es el control combinado de posición/fuerza de sistemas de telepresencia con reflexión de fuerza y retardos en la comunicación como el desarrollado en [Hirche 03]. Presentando un método de diseño de filtros por igualación de impedancias con optimización en el dominio de la frecuencia con la finalidad de conseguir la pasividad en el Operador/Entorno y transparencia en el sistema de telepresencia controlado en posición/Fuerza. De igual manera en un trabajo presentado en [Leeraphan 02] se muestra una metodología muy similar solo que la igualación de la impedancia se realiza de manera adaptativa con el tiempo.

Existen estudios detallados del uso, análisis y diseño de sistemas telemanipulados con variables de onda, los mismos se basan en el concepto de la potencia y la energía, como por ejemplo [Niemeyer 04], donde se presenta una modificación o extensión de la teoría de la pasividad, creando robustez ante retardos temporales arbitrarios. En este estudio se muestra que el uso de las variables de ondas ofrecen diversos beneficios como:

- Robustez ante retardos temporales de varias magnitudes, para retardos nulos el sistema se revierte automáticamente a una configuración de teleoperación clásica. Para retardos pequeños, el sistema se mantiene robusto y estable.

- La impedancia de la onda, o matriz de impedancia, provee un mecanismo de ajuste on-line, permitiendo al usuario configurarlo para movimientos rápidos, o reflexión de fuerza sensitiva, dependiendo de la tarea.
- Mediante el uso de las integrales de onda, el sistema puede combinar toda la información relevante, por ejemplo: posición, velocidad, aceleración, fuerza, en una simple cantidad, reduciendo los requerimientos de transmisión.
- Vale la pena resaltar que aplicando esta filosofía, los autores efectuaron la teleoperación de un robot con un retardo constante de 2 segundos, así como también retardos variables a través de Internet de 50 mSeg a 1 Segundo.

Otro trabajo relacionado con el uso de las variables de onda es el presentado en [Munir 02], donde se realiza un estudio usando las variables de ondas, pero en este caso el grueso del desarrollo se centra en la incorporación de un predictor de Smith, un filtro de Kalman y un regulador de energía al esquema con la finalidad de mejorar la estabilidad del sistema. El predictor no necesita conocer las condiciones iniciales, y el filtro de Kalman eventualmente convergerá al estado interno correcto del esclavo visto desde el lado de la comunicación del maestro. Ya que el estado del esclavo se ve afectado directamente por su interacción con el entorno, y el predictor depende del filtro del Kalman para estimar el estado interno del esclavo, no se necesita medir las fuerzas ejercidas por el entorno al maestro. Se muestra que el sistema es estable aún en la presencia de incertidumbre en el modelo del sistema remoto.

Otro trabajo relacionado con el uso del predictor de Smith, puede encontrarse en [Ganjefar 03], donde se presenta un estudio del comportamiento de un sistema de teleoperación con errores de modelado y de retardo de comunicación con el uso del predictor. Se presenta unas condiciones de estabilidad para el caso de los errores de modelado, que sirve de ayuda a los diseñadores para asegurar la estabilidad del sistema. También se realiza un estudio del efecto de la predicción del retardo en la estabilidad y se demuestra que dicha predicción puede mejorar el desempeño del sistema.

Existen otros trabajos cuya finalidad es la de obtener nuevos esquemas, como por ejemplo [Ryu 04], donde se presenta un nuevo esquema de control basado en el concepto de la pasividad, con la finalidad de garantizar la estabilidad de la teleoperación ante una gran variedad de entornos y velocidades de operación. Se ha extendido un método basado en la energía de una red de 1 puerto a una red de 2 puertos, estudiando la implementación de un observador y un controlador de pasividad. El controlador desarrollado no mejora el desempeño (transparencia), sino preserva el desempeño garantizando la estabilidad, para un sistema de gran desempeño, mediante la inclusión de un observador y un controlador de pasividad a un esquema bilateral convencional.

Con relación al tema de la transparencia en la teleoperación con retardos en las comunicaciones, en [Zaad 02] se estudia las ventajas de emplear la reflexión de fuerza local, para mejorar la estabilidad y el desempeño. Se presentan 2 esquemas de control de 3 canales, 1) Arquitectura de compensación de fuerzas por el operador y 2) Arquitectura de compensación de fuerzas por el entorno, ambas son perfectamente estables bajo condiciones ideales, y se analiza su estabilidad rigurosamente ante la presencia de retardos.

Existen desarrollos de nuevas metodologías de reflexión de fuerzas, como puede observarse en [Love 04], donde se reducen los requerimientos de energía por parte del operador sin sacrificar la estabilidad, el autor explica que la estabilidad en los sistemas de teleoperación con reflexión de fuerzas requiere altos niveles de amortiguamiento, lo que a su vez incrementa los requerimientos de energía por parte del operador. Se realiza una aproximación novedosa de modelado e identificación del entorno remoto, combinando la identificación recursiva convencional de múltiples entradas y múltiples salidas de mínimos cuadrados, identificando en tiempo real la impedancia del entorno con un modelo discretizado del entorno. Esta metodología genera una representación de la dinámica del entorno variante en el tiempo, dependiente de la posición. Seguido a la estimación del entorno, se adapta la impedancia del robot maestro, respecto al modelo dinámico del entorno. Tanto la estimación del entorno como la adaptación de la impedancia se realizan simultáneamente y en tiempo real. Se demuestra prácticamente, mediante experimentación que esta metodología disminuye lo requerimientos de energía por parte del operador, mientras que se provee de suficiente amortiguación para asegurar la estabilidad en el contacto.

Otras investigaciones estudian aspectos como por ejemplo, la relación entre los parámetros de impedancia y factor de escalado derivados del uso del concepto de máxima estabilidad y pasividad, como puede encontrarse en [Cho 02].

En la actualidad aún existen investigaciones de interés basadas en los esquemas bilaterales de control clásico, por ejemplo en [Ni 02] donde se desarrolla un esquema de control posición-posición basado en la adaptación de ganancia, con la finalidad de reducir el costo de los sistemas de teleoperación evitando el uso de sensores fuerza/par que ofrece una transparencia pobre. El mismo se basa en la detección de los cambios de impedancia en el lado del esclavo, luego las ganancias de los controladores del maestro y del esclavo son cambiadas en consecuencia. Se presentan resultados experimentales para demostrar la efectividad de este esquema.

Finalmente, en [Benedetti 01] se describe una arquitectura mejorada para el control de la teleoperación con reflexión de fuerzas, en presencia de retardos en las comunicaciones entre maestro y esclavo, está basada en la transformación de variables de onda y la identificación de las propiedades del retardo. Este esquema consigue mejor desempeño en el seguimiento de posición y fuerza que otros esquemas similares, mediante la estimación del valor actual del retardo y compensando sus variaciones ajustando un parámetro de control. También se derivan algunas propiedades analíticas de dicho esquema y demuestra el desempeño del esquema simulando un sistema teleoperado.

2.6 Interfases hombre-máquina: Haptica, Visión, Voz

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 97], 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.

Por la función vital que cumple la interfaz dentro del sistema teleoperado, se realizan gran cantidad de desarrollos e investigaciones con la finalidad de aumentar cada día más sus capacidades. Entre los principales puntos en los cuales se enfocan las investigaciones en la actualidad tenemos:

Estudio del desempeño de las Interfases: Cuando se desarrolla la interfaz de un sistema teleoperado, para poder llegar a alguna conclusión de su desempeño, no solo se tiene que evaluar por su comportamiento técnico como tal, sino al ser la conexión entre el entorno remoto y el operador, es necesario evaluar también su relación con el operador, ya que aún cuando una interfaz técnicamente sea perfecta si los operadores no pueden manejarla por su complejidad, o porque les sea muy incomoda, no se puede implementar en una aplicación real. Por ello es que se han realizado investigaciones en cuanto a la manera de evaluar el desempeño de las interfaces. En [Whalen 2003], se realiza un estudio de como determinar lo que denomina Calidad de la Experiencia, que es la relación que mantuvo la interfaz con el operador durante la realización de la tarea. Para estudiar esa relación se proponen 3 métodos de recolección de información:

1. **Medidas Sujetivas:** Se obtienen preguntando directamente al usuario como se siente. Estas preguntas pueden ser mediante cuestionario o entrevista y también se pueden clasificar: a) De hecho: son las preguntas que recogen información como la edad, años de experiencia con computadores, nivel de educación. B) Tipo opinión: Se refiere a los pensamientos del interrogando acerca de estímulos externos, otras personas u objetos. C) Preguntas de actitud: Se refieren a las respuestas internas del interrogando respecto a eventos y situaciones relacionadas con un producto en particular.
2. **Medidas de Desempeño:** Son medidas prácticas, menos propensas a errores que los cuestionarios. Las medidas pueden ser la cantidad de errores cometidos, tiempo de ejecución, precisión en las operaciones, etc.
3. **Medidas fisiológicas:** Son medidas como el estrés, la actividad cerebral, la cyber-enfermedad. Las medidas que pueden reflejar la cyber-enfermedad son: el ritmo cardiaco. Niveles de cortisona en la saliva y estabilidad postural.

En ese estudio se concluye que una buena calida de la experiencia se obtiene maximizando 3 dimensiones:

1. El disfrute de la experiencia por el operador.
2. Su habilidad de lograr sus objetivos.
3. La menor cantidad práctica de estrés e incomodidad.

A la hora de que un investigador tenga que escoger un instrumento para medir cualquiera de esas dimensiones debe escoger el mejor instrumento, a manera general propone:

1. Para el disfrute de la experiencia, como estado interno del usuario, se mide mejor con un instrumento sujettivo, como un cuestionario o entrevista.
2. El proceso hacia el objetivo, el comportamiento del usuario, generalmente se miden mejor con una observación del comportamiento.
3. El estrés, incomodidad, son medidas que se miden con instrumentos fisiológicos.

Reflexión multisensorial: Debido a la perdida de la información sensorial que ocurre por efectos de la teleoperación, se recurre a lo que se denomina sustitución sensorial, que no es otra cosa que inducir o provocar sensaciones artificiales al operador que estén controladas o generadas mediante la aplicación de las leyes físicas que rigen los movimientos o esfuerzos que se realizan para completar la tarea. Esta sustitución sensorial depende en si de la naturaleza del sentido que se quiera sustituir, por ejemplo: en el caso de la vista, debido a que el operador y el esclavo se encuentran en entornos distintos, se presenta bien sea mediante el uso de un monitor dedicado o una ventana imágenes correspondientes a la tarea que realiza el esclavo. Aparte si se quiere dar la sensación de profundidad que se pierde, se hace uso de técnicas 3D, cámaras estereo. En el caso del oído, bastaría simplemente mediante el uso de micrófonos y parlantes llevar al operador los sonidos que se generan en el entorno de trabajo (si la tarea lo requiere). Otra manera es hacer uso de señales sonoras como alarmas o avisos relacionados con la tarea que se esta realizando. Una de las técnicas que más se usa para la sustitución de este sentido es el uso del los maestros con reflexión de fuerza, que no hacen otra cosa que reflejar los esfuerzos que realiza el esclavo en el maestro.

En este sentido, en [Ferre 97] se realiza un estudio sobre la reflexión de fuerzas usando métodos gráficos (visual), auditivos (sonidos) y cinestésicos (tacto). Donde se concluye que el uso de la realimentación cinestésica de fuerzas es la mejor forma de presentarle al operador una aproximación de la fuerza ejercida y combinada con una realimentación visual o auditiva realzan la información percibida por el operador, mientras que la combinación de las 3 no mejora la percepción respecto a la obtenida por la combinación de la realimentación cinestésica con la auditiva o visual. En [Williams 02], se hace un estudio de la combinación de la realimentación cinestésica con la visual, donde se muestra una mejora significativa en el desempeño de una tarea, indicada por una reducción de la varianza entre 61% y 90% en las fuerzas de contacto, reducción de pares entre 46% y 92% usando cualquier medio de reflexión de fuerzas. Y mediante el uso de ambos tipos de reflexión simultáneamente presentaba mejores desempeños.

Interfases Multimodales: Este es un tema que ha incrementado su interés entre los investigadores. Una interfaz multimodal es aquella en la cual se le presenta al operador un flujo continuo de información en distintas modalidades de la percepción humana, cinestésica, táctil, visual, auditiva, todo con la finalidad de aumentar el grado de inmersión del operador con la tarea que esta realizando. Muchas de las

investigaciones se centran el desarrollo del hardware, en [Aleotti 02] se desarrolla una interfaz multimodal concebida para la teleexploración de entornos remotos, la misma cuenta con realimentación de video, simulador 3D, realimentación vibrotáctil y es manejada usando un guante cybertouch de Inmersion Corp. Inc. En [Preusche 02], se desarrolla un sistema de telepresencia multimodal a través de Internet que incluye realimentación visual, auditiva, cinestésica y display predictivo, logrando un gran nivel de inmersión en la manipulación con el entorno remoto. Por otro lado, existen investigaciones como por ejemplo [Kammermeier 01], en la cual se busca un modelo matemático del proceso de percepción humana para sistemas multimodales, en la terminología de la teoría de sistemas, que contribuya a converger y progresar en un campo de investigación interdisciplinario relacionado con la estructuración de problemas, planificación sistemática, evaluación de experimentos y generación de estímulos multimodales basadas en modelos.

También se investiga el uso de nuevos dispositivos como parte de la interfaz de un sistema teleoperado como es el caso de [Sgouros 02], quien realiza un estudio del diseño y la implementación de un sistema basado en tecnología WAP, para la teleoperación de un robot móvil, lo cual permite al operador controlar los movimientos del robot usando un teléfono móvil, o en [Fong 01] donde se hace lo propio haciendo uso de un PDA.

Como se mencionó anteriormente la interfaz esta compuesta por diferentes tipos de elementos, es por ello que no solo se investiga las interfaces como un conjunto sino que cada uno de los elementos que componen la interfaz también da fruto a ramas de investigación de gran importancia y para los cuales existen grupos de investigación dedicados exclusivamente a su estudio y desarrollo, entre las ramas de investigación relacionadas con las interfaces tenemos:

2.6.1 Interfaces hápticas

La realimentación háptica es uno de los elementos de diseño de interfaces hombre – máquina, basada en la sustitución del sentido del tacto. El mismo, es un sentido bastante complejo, ubicado dentro de los sentidos somáticos [Guyton 89]; es decir, reciben estímulos del propio cuerpo. Las sensaciones somáticas se clasifican en táctiles y cinestésicas. Las sensaciones táctiles son aquellas percibidas por sensores ubicados debajo de la piel, entre las mismas se pueden nombrar: temperatura, texturas, vibraciones. Las sensaciones cinestésicas vienen de los músculos, tendones y articulaciones, mediante ellas se percibe los movimientos de los miembros, peso y presión del cuerpo.

La realimentación háptica es por lo tanto de extrema importancia a la hora de implementar un sistema teleoperado, ya que busca devolverle la sensación de tacto que facilitaría y mejoraría el rendimiento del operador a la hora de realizar una tarea teleoperada. Además esta tecnología no solo es usada en el campo de la teleoperación, sino que forma en si un campo de investigación y desarrollo con vida propia, cuyo auge se ha visto impulsado en gran medida por la masificación de su uso en los videojuegos. De igual manera que el sentido del tacto se encuentra clasificado en sensaciones táctiles y cinestésicas, en la actualidad la investigación de la realimentación háptica tiene esas dos mismas corrientes.

Sensaciones cinestésicas: Comúnmente referida como reflexión de fuerzas, este campo tiene como objetivo realimentar los esfuerzos realizados bien sea por un manipulador teleoperado en un entorno real, o por un simulador en un entorno virtual. Son muchas las investigaciones realizadas en este sentido, por ejemplo se estudia la incidencia que tiene el uso de este tipo de realimentación en los picos de fuerza ejercidos por el operador en la realización de una tarea [Ferre 97], [Ferre 04], [Williams 02]. En [Kilchenman 01], se estudia los efectos de las magnitudes máximas de fuerza y el ancho de banda en la percepción háptica del tamaño de un objeto.

También existen varios investigadores trabajando en el tema de la teleoperación asistida hápticamente; por ejemplo [Turro 01] presenta un desarrollo en el cual realiza teleoperación con realimentación cinestésica de fuerzas pero a su vez incluye realimentación de fuerzas virtuales desde un simulador generando fuerzas de repulsión que eviten el contacto con objetos, y ayudas a la teleoperación como la generación de fuerzas virtuales que ayuden al operador a mantenerse dentro de una trayectoria recta. En [Sayers 99], se realiza una explicación detallada de las ayudas a la teleoperación, explicando sus aplicaciones, funcionamiento, tipos y algoritmos de generación.

Existen estudios cuyo objetivo es obtener guías de diseño de interfaces hápticas, por ejemplo en un trabajo presentado en [Sjöström 01] se hace para personas ciegas. En el mismo se encuentra que la realimentación háptica junto con el sonido se complementan bastante bien, entre las guías presenta consejos en cuanto a la navegación dentro de la interfaz, localización y comprensión de objetos, y medios de realimentación. En [Magnusson 04], se desarrolla una aplicación para la navegación háptica – auditiva de un entorno virtual modelado a partir de un entorno real de una localidad de suecia. El estudio se realizó con personas con discapacidad visual, donde se le pedían que realizaran un recorrido o encontraran un objeto primero en el entorno simulado y luego en el entorno real. En [Nagy 04], se presenta la aplicación de la reflexión de fuerzas en cirugías de invasión mínimas asistidas por robots, donde expone que es muy útil a la hora de evitar errores potencialmente dañinos. En [Schmidt 04], se muestra una interfaz háptica de locomoción, capaz de simular distintas maneras de caminar, subir escaleras e incluso tropiezos, que podría ser aplicado en terapias de rehabilitación.

Sensaciones táctiles: Este es un campo técnicamente desafiante, ya que como se menciona en [Ferre 97], las sensaciones táctiles tienen un ancho de banda de 1000 hz., y son captadas por miles de sensores ubicados bajo la piel, lo cual hace bastante difícil lograr inducir este tipo de sensaciones. Sin embargo, a medida que la tecnología avanza se ha visto un incremento significativo de logros en esta área. En [Pasquero 04], se presenta un desarrollo de un display háptico para Braile, mediante la deformación lateral de la piel, el mismo busca simular el efecto de deslizar la punta del dedo sobre una superficie con inscripciones en Braile. En [Ikei 02], se combina las sensaciones táctiles y de fuerza mediante un display táctil basado en un array de actuadores vibrotáctiles miniatura colocado en el extremo de un maestro con reflexión de fuerzas, la finalidad es el estudio de las características combinadas de ambos tipos de sensación en la presentación de texturas virtuales. En [Choi 02], se realiza un estudio dirigido a la caracterización cualitativa de la inestabilidad que el ser humano normalmente percibe de una superficie texturizada virtual generada junto con una interfaz usando reflexión de fuerzas. Se diseñó y realizó un experimento con la finalidad de medir el estímulo

generado aproximado por la textura virtual en términos de varias variables físicas como la posición, fuerza y aceleración.

2.6.2 Interfaces de visión

La realimentación visual es de vital importancia en las interfaces de teleoperación, ya que si el operador no puede ver lo que esta haciendo no puede realizar ninguna tarea. Es por esto, que muchas investigaciones realizadas buscan mejorar la calidad de la realimentación visual del operador.

La mejora en la calidad de la realimentación estereo es un punto donde se realizan grandes esfuerzos, porque la percepción de profundidad en teleoperación es vital para el buen desempeño del operador. Por ejemplo, en [Hopf 00], se realiza un diseño de un sistema estereoscópico adaptativo basándose en la aplicación de espejos esféricos y óptica colimada, el mismo presenta un alto grado de telepresencia, además mejora las condiciones de visión del operador, permitiéndole trabajar por tiempos mas prolongados. En el centro de investigación Langley de la NASA, también se han realizado investigaciones al respecto, por ejemplo en [Parrish 95], se mostró que el volumen de profundidad disponible se incrementa con el uso de óptica colimada. En [Runde 00], desarrollan un sistema estereoscópico con paralaje de movimiento para la captura y reproducción de imágenes estereo. En el mismo, no se usan dispositivos como gafas esteros o cascos estereos, ya que consideran que de esa manera la sensación es más natural. En [Mulligan 01], se realiza un estudio del desempeño de los algoritmos de generación de imágenes estereo para la telepresencia. En [Adelstein 00], por otro lado, se estudia los efectos de agregar un grado de libertad, el de roll a las plataformas de cámaras de telepresencia al conocimiento espacial del operador. En [Ferre 03], se presenta el diseño de una cámara estereo novedosa, donde la imagen es insertada directamente en la comunicación VGA entre el ordenador y el monitor, evitando consumir recursos del sistema que pueden ser usados en otras tareas, además de la generación de imágenes estereo también tiene la capacidad de efectuar blending, es decir la superposición de imágenes reales con imágenes simuladas.

Otras de las líneas de investigación con el uso de la visión es su aplicación no como medio de realimentación al operador, sino como dispositivo de entrada de los sistemas teleoperados. En [Colombo 01], se realiza un estudio de un sistema de captura y reproducción de posturas del cuerpo humano usando modelos computarizados. En [Maaoui 01], se implementa un sistema de las mismas características pero aplicado a un sistema teleoperado. El desafío en estas aplicaciones radica en el cálculo en tiempo real de la posición del operador y su mano, así como su configuración. Para poder emitir comandos de posición o movimiento de una manera más natural, mediante el uso de gestos con las manos o con el cuerpo entero.

2.6.3 Interfaces de voz

La voz es la principal manera de comunicación de los seres humano y por lo tanto la más natural. Si bien es cierto que los comandos de voz no son la manera más eficiente para el guiado de un robot [Ferre 97], si constituyen un medio ideal para la emisión de comandos de alto nivel [Marin 02] (dependiendo del grado de automatización disponible) a la zona remota o como herramienta de navegación de la

interfaz. Los comandos de voz son ideales para emitir comandos que impliquen cierto grado de automatización, un ejemplo sería la solicitud de cambio de una herramienta, en el caso de su uso como herramienta de navegación de la interfaz, en [Ferre 97] se explica que sirve como medio para desplazarse a través de los menús de la interfaz, con lo cual evitaría que el operador tenga que usar el ratón o el teclado del ordenador, y estar continuamente intercambiando entre el dispositivo maestro y los periféricos del ordenador.

Uno de los principales desafíos técnicos que se enfrenta el procesamiento del lenguaje natural es el tratamiento digital de las señales, tal como se especifica en [Juang 02], donde se hace hincapié en que para lograr que el operador actúe de una manera más natural es necesario la implementación de este tipo de sistemas con tecnología manos libres, es decir que el operador no tenga necesidad de usar ningún tipo de dispositivo para interactuar con la interfaz. Esto hace que se presenten complicaciones en su implementación como lo son el ruido ambiental, la señal acústica es función del entorno, el tipo de micrófono usado en el sistema. Se identifican los siguientes puntos en los cuales es necesario profundizar las investigaciones:

El problema del Ruido: Se considera como ruido todas las señales acústicas percibidas por el micrófono que no sean las de la persona autorizada para hablar. Esto incluye ruido ambiental, sonido de máquinas, conversaciones de fondo, etc. Aparte de estas causas existen otras que deterioran la señal acústica como por ejemplo la saturación, la fluctuación de niveles, etc. Pero el ruido es la más dañina. Por lo que es necesario desarrollar métodos para la cancelación del ruido. Entre los métodos pueden ser nombrados:

Cancelación de ruido: Es una de las primeras ideas, básicamente se fundamenta en el uso de la señal ruidosa que se quiere tratar y otra señal de ruido de referencia. Se usa una versión filtrada del ruido de referencia para cancelar el ruido de la señal que se quiere tratar. Este método es impráctico para sistemas manos libres por cuestiones de disponibilidad del ruido de referencia.

Método basado en los estimados en corto tiempo del espectro de potencia: Son considerados de alguna manera efectiva. Superficialmente se basa en la estimación del espectro de potencia de la señal de ruido, capturada durante los períodos de inactividad por parte del operador en cuanto a habla se refiere, luego se sustraen del espectro de potencia de la señal ruidosa que se quiere identificar, se resintetiza la señal aumentada usando la información de la fase ruidosa.

El problema de la comunicación duplex. La comunicación duplex es cuando 2 usuarios de dos terminales envían y reciben información simultáneamente, en el caso de la teleoperación de un manipulador remoto, esto tendría sentido solo si en la interfaz se encuentra implementado tanto el sistema de reconocimiento de voz como la emisión de señales, alarmas o avisos de manera usando voz sintética. En este caso las investigaciones se enfocan en el desarrollo de algoritmos de cancelación de eco, en pocas palabras suprimir la información proveniente de las cornetas del sistema. Estos algoritmos trabajan estimando la respuesta impulsiva de la ruta de retorno del eco, la cual es usada hacer una convolución con la señal proveniente de las cornetas para producir un estimado de la señal de eco para propósitos de cancelación. El principal desafío

planteado es la estimación de la respuesta impulso de la ruta de retorno del eco acústico. Se han investigado varios algoritmos con propiedades de convergencia rápida durante los últimos años, se han obtenido progresos en la cancelación de eco adaptativo en el dominio de la frecuencia [Benesty 00], que toma ventaja de la propiedad de una matriz circulante para una aproximación eficiente en el proceso de solución, en [Woudenberg 99] se usa un algoritmo de mínimos cuadrados en bloque, que ha sido implementada con éxito en un sistema de reconocimiento de voz automático.

El problema de la reverberación: Cuando la respuesta impulso del cuarto es larga, causa reverberación que tiene un efecto perjudicial en la percepción. Una aproximación es el procesamiento inverso, que involucra la estimación de la respuesta impulso (larga) de la zona local y el filtrado inverso. Sin embargo, se conoce que la respuesta impulso de la zona local es usualmente de fase no mínima y su correspondiente filtro inverso es por lo tanto inestable. Mas aún, ya que la respuesta impulso es también larga, la complejidad computacional tanto en la estimación como la inversión es prohibitiva. Se han propuesto varias ideas interesantes para la inversión de la respuesta impulso de la zona local. En [Wang 91], se propone el uso de múltiples transductores y análisis multibanda, desde el cual la respuesta impulso de la zona local dentro de cada banda de cada transductor es estimado. Luego es aplicada una lógica de selección para escoger un conjunto, o ser apropiado de esas respuestas impulso parciales para la síntesis final de la señal de reverberancia. En [Wang 97], se investiga un algoritmo de inversiones sucesivas también usando un arreglo multitransductor.

Un ejemplo del uso de la tecnología de voz puede encontrarse en [Marin 02], donde se realiza una implementación de un sistema de reconocimiento de voz a través de Internet, la interfaz desarrollada permite controlar un robot usando comandos de alto nivel, como por ejemplo: recoge X objeto, muévete a X posición, etc. Otra característica importante, es la capacidad de cambiar la gramática en tiempo real, es decir, una vez que el sistema está corriendo el controlador remoto envía un listado de los objetos de la escena, el módulo de reconocimiento obtiene esta lista y luego recompila la gramática acordemente. Usando esta metodología, se reduce bastante los errores de reconocimiento de voz. El módulo se entrenó con varios usuarios, mejorando el rendimiento del sistema de un 80% de éxitos en el reconocimiento al 90%, consumiendo un tiempo aproximado de 0,2 segundos en aceptar un comando verbal. Para la implementación del modulo de reconocimiento de voz, se usa la SDK de reconocimiento y síntesis de voz de Microsoft.

2.7 Ejemplos de sistemas de teleoperación

Todo estudio 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 telerobótica 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

teleróbótica, 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 arquitecturas que son usadas por investigadores alrededor del mundo.

2.7.1 Entornos Virtuales

Para entender mejor lo que es un entorno virtual es necesario conocer lo que es la Realidad Virtual. La frase de entrada puede ser algo contradictoria, realidad se asocia con algo existente, tangible, mientras que la palabra virtual solemos asociarla a algo inexistente, no tangible; siendo la unión de ambas una contradicción, algo que existe pero que a su vez no. Pero realmente, es mucho más sencillo de lo que parece, al hacer referencia a Realidad Virtual se está haciendo referencia a la representación de algo por medios electrónicos; por lo tanto al hablar de Entornos Virtuales, se está haciendo referencia a la representación de ambientes mediante computadores, aunque bien puede ser cualquier otro medio electrónico que permita la visualización e interacción de información con el usuario.

Los entornos virtuales, al igual que la realidad virtual pueden ser inmersivos o no inmersivos. Los inmersivos buscan ofrecer al usuario la máxima integración del mismo con el ambiente que se está representando, esto se logra mediante el uso de sonidos, imágenes 3D, cascos, gafas, sensaciones hapticas, guantes, cualquier tipo de dispositivo de captura de posición y orientación, etc. Los no inmersivos, aunque también ofrecen una interacción con el usuario, esta interacción no busca crear ningún tipo de sensaciones al usuario sino un simple intercambio de información con el mismo.

En la actualidad existen múltiples desarrollos en cuanto a Entornos Virtuales aplicados a la teleoperación, espacialmente en los entornos virtuales inmersivos. Unas de las aplicaciones que se encuentra en aumento en cuanto al número de investigaciones y desarrollos en este campo es el de la Medicina, simuladores quirúrgicos, que permiten el entrenamiento y mejora del desempeño de doctores en sus intervenciones, ejemplos de este tipo de aplicaciones pueden ser encontradas en [Barnes 03]. También existen desarrollos en la educación, el uso de los entornos virtuales como ayuda para la educación a distancia, que pueden ser vistos con mayor detalle en [Hoyer 04]. El uso de los entornos virtuales como displays predictivos en la teleoperación en el espacio, el entrenamiento de astronautas o para la teleprogramación son otras de las aplicaciones que pueden ser nombradas.

Para que los entornos virtuales, logren tener el desempeño y nivel de realismo necesario para que su aplicación práctica sea rentable en cuanto a beneficios obtenidos por su aplicación existen varios puntos claves en los cuales se están realizando investigaciones, entre los mismos podemos nombrar:

La calibración de los entornos. Cuando se quiere hacer uso de un entorno virtual en un sistema teleoperado, lo primero que se realiza es el modelado del mismo, es decir, convertir el entorno en un modelo que pueda ser usado por el computador para su representación, pero cuando se realiza el modelo, el primer inconveniente que se

encuentra es que el modelo obtenido no es completamente exacto a la realidad, debido a errores en las medidas, errores en los sensores, errores de calibración en el caso de hacer uso de métodos automatizados, etc. Es por esto que es necesario investigar métodos o procedimientos de calibración que permitan corregir y adaptar el modelo del entorno a la realidad o lo más próximo como sea posible (dependiendo de las exigencias de la aplicación), esto incluye tanto a la forma y dimensiones de los objetos representados como su posición y orientación en el entorno. Entre algunos de los desarrollos que tratan los temas de calibración de entornos podemos nombrar [Jonson 95], [Sayers 99]. La calibración juega un papel muy importante en lugares que sean inaccesibles pero que se cuente con una imagen o serie de imágenes que provean de la suficiente información que permitan la realización de un modelo del entorno pero que no se cuente con la información de dimensiones.

Modelado de entornos. Modelar un entorno requiere un conocimiento previo del mismo, el uso de herramientas que permitan la representación de los objetos de la escena, y el personal humano que dedique el tiempo a esta tarea. Sin embargo, lo ideal sería que en el momento en que un robot teleoperado llegue al lugar en el cual se va a realizar una operación, este sea capaz de realizar un reconocimiento del mismo (si cuenta con las herramientas necesarias), en el cual realiza un modelo del entorno de trabajo con la mínima intervención humana. De este modo, se estaría ahorrando tiempo en la ejecución de la tarea, y mejoraría el desempeño del operador al poder contar con todas las herramientas disponibles como ayudas a la teleoperación basadas en los modelos. En [Jonson 95], se realiza un desarrollo de una aplicación en la cual se reconoce y modela un entorno a partir de imágenes de video no calibrados. Una aplicación de este tipo de tecnología, podría ser en el uso de robots en la intervención de accidentes dentro de ambientes radioactivos, donde un operador humano no puede acceder, sin embargo se requiera de una intervención para evitar catástrofes.

Posicionamiento inteligente de la cámara. Cuando se hace uso de una simulación, una de las operaciones que disminuye en gran medida la sensación de inmersión del operador es cuando tiene que cambiar la posición y orientación de la cámara (recordar que en una simulación la cámara se refiere al punto de vista de la escena) para poder tener una mejor vista de la operación simulada que está realizando. Es por esto que se realizan desarrollos orientados en el posicionamiento y orientación de la cámara con la finalidad de que el operador no pierda la continuidad en la tarea que está realizando, un ejemplo de este tipo de desarrollo se puede encontrar en [Sayers 99].

2.7.2 Utilización de Internet

Durante los últimos años, Internet ha revolucionado la forma en que nos comunicamos y hacemos negocio, por ello su crecimiento ha sido formidable, prácticamente es posible conectarse en cualquier lugar del mundo. Es por eso que los investigadores y desarrolladores de aplicaciones teleoperadas han visto en Internet un medio perfecto para establecer comunicaciones con cualquier parte del mundo, a un costo muy económico en comparación con otros medios como lo puede ser vía satélite en un canal dedicado. Pero no todo es perfecto, al igual que todas las tecnologías, Internet para el caso de la teleoperación también tiene sus desventajas, y es allí donde están centrados la mayor parte de los esfuerzos de los investigadores para poder superarlas y lograr que esta tecnología habrá un nuevo mercado para la teleoperación.

Una de las principales líneas de investigación en la cual se están realizando gran parte de los trabajos es en el retardo temporal variable de la comunicación, como se sabe al establecer una conexión entre dos equipos vía Internet, la información viaja a través de varios servidores, routers, switchs y cada uno tiene distintos niveles de tráfico dependiendo de la cantidad de personas que estén conectadas en ese momento. Esto hace que el retraso de la información en llegar a su destino sea variable, lo cual es un inconveniente al momento de controlar cualquier telerobot y mucho más si es un control bilateral. Existen múltiples desarrollos que intentan dar una solución a este problema, algunas de ellas son:

Mediante el desarrollo de esquemas y leyes de control que sean estables ante la presencia de retardos variables en el tiempo y de distintas magnitudes, en el apartado de Control en teleoperación se nombraron varios trabajos que guardan relación con el tema de los retardos temporales, por lo que no se volverán a nombrar en este apartado. Entre las técnicas más utilizadas en la actualidad para aproximarse a este problema se encuentran el uso de los esquemas diseñados a partir del concepto de pasividad, y la codificación mediante variables de ondas, entre otras.

En este sentido, en [Mirfakhrai 01] puede encontrarse un estudio de los retardos en las comunicaciones a distintas horas del día y con servidores distintos ubicados en áreas geográficamente distintas, en la misma ciudad, en ciudades distintas, en países distintos y en continentes distintos. Mediante ese estudio obtiene un modelo de los retardos de la comunicación asumiéndolo como una respuesta ruidosa del sistema, el tipo de modelo usado es el Auto Regresivo AR. Dicho modelo es usado como un predictor de futuros valores de los retardos, para ajustar automáticamente una ganancia en el controlador optimizando de esta manera el desempeño del sistema. Existen otras aproximaciones en el modelado de los retardos temporales en las comunicaciones, por ejemplo [Ye 02] realiza un estudio estadístico de series temporales densamente muestreadas del RTT (Round Trip Delay, por sus siglas en inglés), usando métodos lineales y no lineales, valiéndose de herramientas gráficas como el espectro de potencia y autocorrelación, determinando que existe una correlación lineal fuerte entre las series y una correlación no lineal no muy fuerte, con lo cual concluye que es posible realizar predicciones con un paso de antelación (one step ahead prediction) del RTT y usan un algoritmo adaptativo lineal basado en el principio de máxima entropía para realizarlo, una explicación más detallada del mismo se puede conseguir en [Liu 02]. Otros trabajos como [Elhajj 01], consideran que no es posible modelar los retardos usando un modelo estadístico simple y específico, mencionando que el realizar cualquier predicción o asunción respecto a los mismos resultaría en una limitante.

Otra manera de manejar los retardos variables en la comunicación, es la presentada en [Oboe 03], donde se propone el uso de un buffer en la entrada tanto del lado del maestro como del esclavo, el buffer se llena de datos y luego se va alimentando de datos a los respectivos controladores a una frecuencia constante, de tal manera que el retardo se mantenga constante, de esta manera se simplifica el diseño de controladores ya que no se verán afectados por retardos variables sino constantes. Sumado a esto se desarrolla una metodología para el manejo de las comunicaciones que incluye la verificación online de los parámetros de la conexión tales como el ancho de banda y el promedio del retardo en la comunicación, con esta información se determina el tamaño

del buffer y la frecuencia de adquisición de las señales para mantener el retardo constante.

La otra problemática a la hora de realizar una teleoperación usando como Internet como medio de comunicación, es la perdida de los paquetes; principalmente cuando existe congestión en la red, aumenta la cantidad de paquetes perdidos, esto es un problema sumamente importante, ya que puede llegar a ocasionar un funcionamiento erróneo del esclavo pudiendo provocar desde el mal funcionamiento, hasta la avería tanto del manipulador esclavo como de los objetos manipulados y el entorno de trabajo. En [Oboe 03], se propone el uso de un predictor, que cuando se produce la perdida de un paquete, la salida de ese predictor es usada en su lugar.

Existen otros trabajos como el presentado en [Qihong 03], cuya aproximación es proponer un Observador de Estados Futuros (Forward Time Observer), con realimentación de posición, velocidad y fuerza para asegurar que el sistema sea robusto, asintóticamente estable y transparente. En este caso, el ruido es tratado como una perturbación o parámetro de incertidumbre y el observador de estados es usado para predecir el estado del esclavo. El resultado obtenido es un controlador fácil de realizar y con un tiempo de seguimiento del esclavo respecto al maestro más corto que usando métodos convencionales, su desempeño es bastante bueno, de hecho al final tanto en el maestro como en el esclavo no se necesita calcular la aceleración.

Cuando los valores de retardo imposibilitan el uso de una realimentación cinestésica en el maestro, bien sea porque el sistema es inestable o porque no se cuenta con los medios técnicos para llevarla a cabo, se ha recurrido a otra técnica de realimentación de fuerzas, mediante la sustitución sensorial (en [Ferre 97] hay un estudio más completo de lo que es la sustitución sensorial aplicado a la realimentación de fuerza), que no es más que transmitir al operador sensaciones a través de otros sentidos que no los naturales en la percepción de la misma. Existen varios trabajos que hacen uso de esta técnica como por ejemplo [Ferre 04], [Williams 02] y [Liu 01] que denomina esta técnica como SoftHaptics.

2.7.3 Arquitecturas basadas en las técnicas de computación distribuidas

El crecimiento que han tenido las redes de área local, junto con la evolución de los computadores personales, tanto en potencia de cálculo como en robustez y su disminución de costos, hizo posible la implementación de sistemas de teleoperación basados en las arquitecturas de computación distribuida. Tal como se presenta en [Mora 04], entre las principales arquitecturas de computación distribuida se pueden nombrar:

- Cliente-Servidor: Es una arquitectura basada en la prestación de servicios, en el cual un objeto servidor le presta un servicio a un objeto cliente en respuesta a una petición realizada.
- Modelo de tres capas: Esta arquitectura es una modificación de la arquitectura Cliente-Esclavo, dado que la misma presenta un problema de sobredimensionamiento de los objetos cuando el nivel de datos y procesamiento son muy elevados; es decir, clientes y servidores muy grandes, por lo tanto para solventar esa situación se agrega una capa intermedia entre el objeto cliente y el

servidor, disminuyendo así la carga de trabajo en ambos y como resultado también lo hace en requerimientos mínimos para su funcionamiento.

- Modelo basado en broker (gestor): Dado el crecimiento de las redes de computadoras, el problema que se presenta es que la creación y destrucción de servidores se realiza de manera muy dinámica, por lo que al cliente se le presenta el problema de saber que servicio se encuentra disponible y su ubicación. El broker básicamente es un servidor de nombres, el cual conoce cuales servidores se encuentran disponibles y que servicios ofrecen, además de facilitar la comunicación entre el cliente y el servidor porque conoce todos los protocolos de comunicación.
- Modelo de Multi-Agentes: Se puede decir que un agente es una entidad inteligente, equivalente en términos computacionales a lo que es un proceso para un sistema operativo. Son producto de las investigaciones en Inteligencia Artificial y bases de datos. Cuando en una aplicación se da la cooperación de 2 o más agentes se dice que es una aplicación Multi-Agente. En las aplicaciones multi-agentes, no se distingue muy bien quien es el servidor y quien es el cliente. Los agentes formulan problemas y la solución viene dada por la cooperación e intercambio de información entre ellos. Reaccionan a eventos internos y externos, o realizan actividades autónomas como monitorear su propia actividad o la del exterior.

Retomando la investigación vista en [Oboe 03], la misma representa un ejemplo del uso de la arquitectura basada en la computación distribuida. La arquitectura implementada puede verse en la figura 2.15, y sirve para realizar distintos estudios relacionados con: retardos en la comunicación, protocolos de comunicaciones para el intercambio de datos en redes, la pérdida de datos, estimación del ancho de banda, interfases de teleoperación, etc. En todos los casos se presentan soluciones prácticas y con su desempeño.

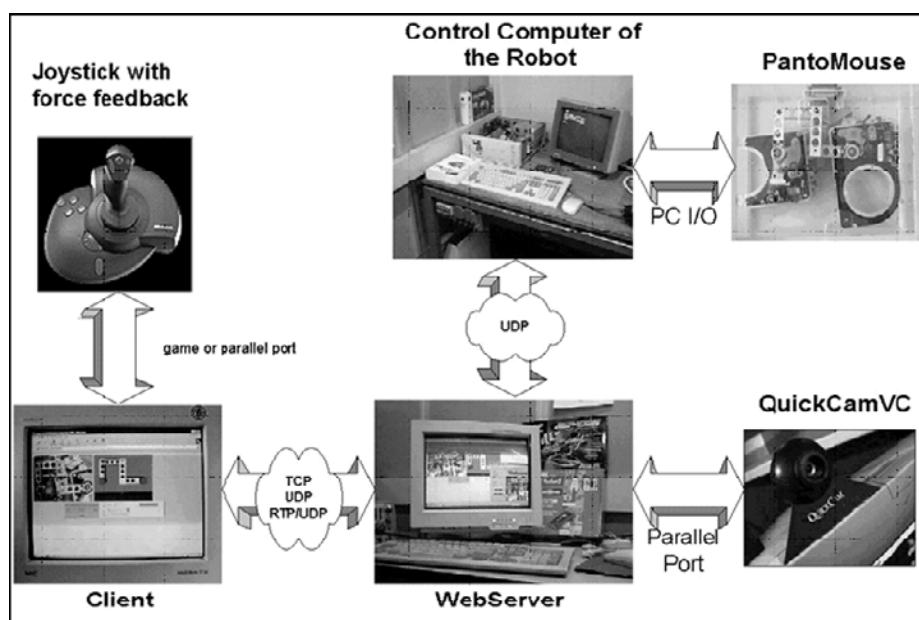


Figura 2.15 Arquitectura implementada en [Oboe 03]

Los componentes usados para implementar la arquitectura son: Como dispositivos maestro: El teclado del computador o un joystick, como dispositivo esclavo se usa un montaje realizado a partir de unos motores Direct-Drive de muy baja fricción desmontados de un disco duro los cuales ofrecen un espacio de trabajo de 3 cms-3 cms. Un servidor Web que maneja el flujo de datos provenientes de los sensores, caracterización y estimación del canal de comunicación, además de un computador para el control en tiempo real.

Otro ejemplo del uso de esquemas de teleoperación basados en las arquitecturas de computación distribuida la podemos encontrar en [Tsumaki 02]. En el cual se desarrolla un Radar Virtual, el mismo básicamente es un display donde se presenta información relacionada con los obstáculos que se puedan presentar durante la realización de una tarea teleoperada. El mismo consta de un sistema maestro basado en un robot PA-10, un sistema maestro basado en un spacemouse. El sistema Esclavo se encuentra conectado a un PC, el sistema maestro a un computador SGI y ambos se encuentran conectados usando una red Ethernet con una computadora SUN ULTRA.

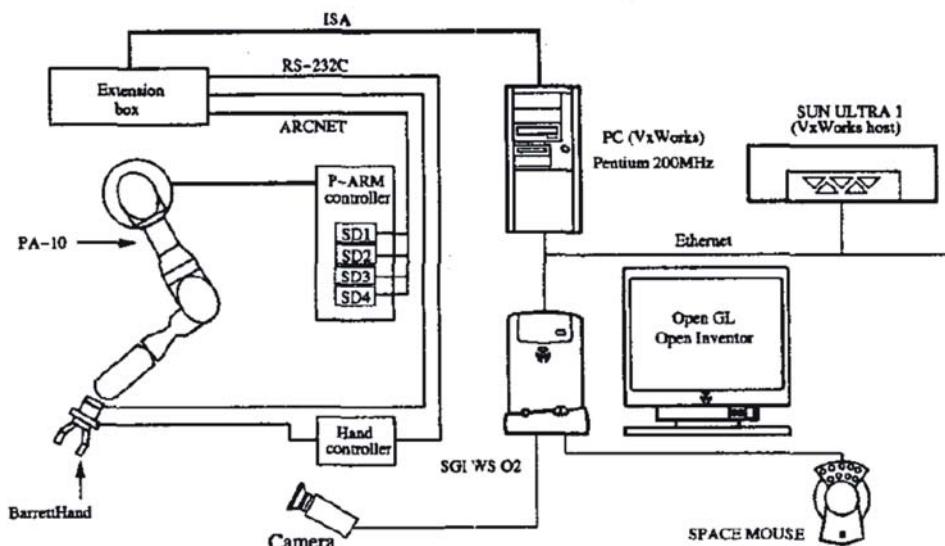


Figura 2.16 Arquitectura empleada en [Tsumaki 02]

Otra arquitectura basada en la computación distribuida puede encontrarse en [Mora 04], específicamente se trata de una arquitectura Cliente-Servidor con una topología tipo estrella, cuyo diagrama esquemático puede verse en la figura 2.17. Su funcionamiento es bastante sencillo, cada dispositivo tiene asociado un servidor cuya función es gestionar la comunicación con el resto de la plataforma. El cliente central gestiona la conexión entre dispositivos y es el encargado de la coordinación entre los diferentes servidores.

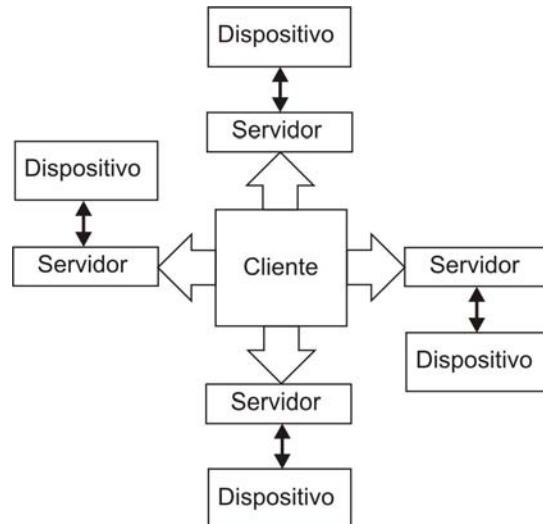


Figura 2.17 Esquema de la arquitectura implementada en [Mora 04]

La plataforma de teleoperación implementada en [Mora 04], permite el uso de distintos tipos de dispositivos maestro con distintos tipos de dispositivos esclavo. Como dispositivos maestros se tienen: Un Maestro con reflexión de fuerzas PHANTOM de la casa Sensable Inc., cuenta con 6 grados de libertad en posición, un alto ancho de banda, reflexión de fuerzas solo en los 3 primeros ejes (posición). Un Maestro Cyber Hand Controller comercializado por la empresa Cybernet Systems Corporation, el cual es un maestro cartesiano de seis grados de libertad con reflexión de fuerzas en sus seis ejes, la comunicación se realiza mediante el puerto RS-232. Finalmente, se cuenta con un Joystick con reflexión de fuerzas SideWinder Force Feedback Joystick de la empresa Microsoft Corporation, el cual posee reflexión de fuerzas en 2 ejes, y su comunicación se realiza mediante el puerto USB.

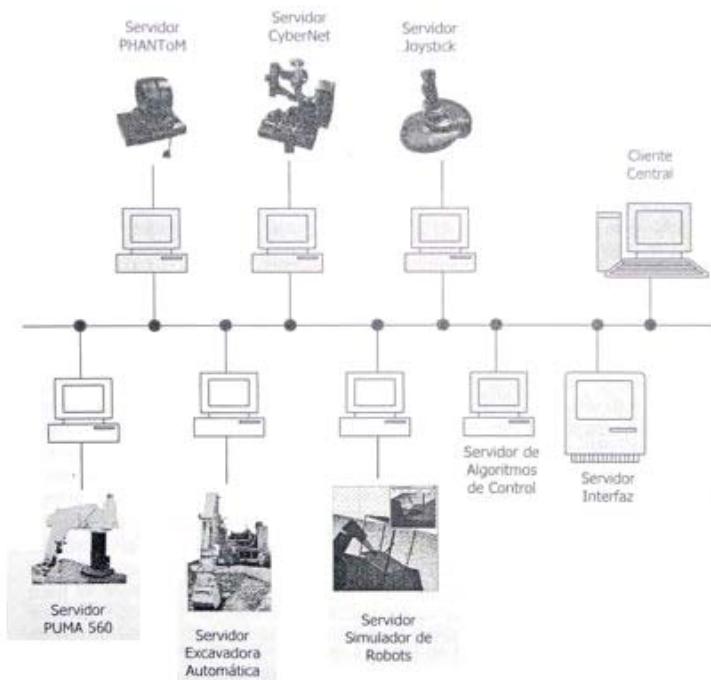


Figura 2.18 Esquema general de la plataforma desarrollada en [Mora 04]

Como dispositivos Maestro se tiene: Un robot PUMA 560, el cual es un robot industrial de seis grados de libertad. La comunicación se realiza con una línea de comunicación denominada ALTER, se trata de una línea RS-232 transmitiendo a 19200 baudios, esta comunicación es bastante rígida en cuanto a tiempos ya que requiere un intercambio cíclico de mensajes cada 28mS., en caso que el controlador envié una solicitud de comando y no tenga respuesta en máximo 17mS se producirá un error de Timeout, si se produce de forma consecutiva 3 veces, el controlador corta la línea de comunicación. Una Excavadora Teleoperada con capacidades autónomas desarrollada en la división de ingeniería de sistemas y automática de la ETSI Industriales de la UPM, la misma es una miniescavadora comercial en la que le fue sustituido su sistema de control manual por un control a través de un computador, permitiendo así su teleoperación. Finalmente, como esclavo se tiene un simulador de robots, también desarrollado en la división de Ingeniería de Sistemas y Automática de la ETSI Industriales de la UPM, el cual permite la simulación cinemática de mecanismos.

El auge que ha tenido Internet en el mundo, también ha tenido su influencia de en la telerobótica y por ende en las arquitecturas usadas, y es que al ser Internet un medio que se ha expandido de tal manera que prácticamente en cualquier lugar del mundo es posible conectarse, en su uso se ha visto como el medio más práctico y económico de teleoperar un robot. Es importante mencionar que dado que Internet básicamente es una red, todas las arquitecturas de computación distribuidas son aplicables, pero dadas sus características de funcionamiento, al usar Internet se agrava el problema del retardo en las comunicaciones, en el sentido en que anteriormente se tenía un retardo pero el mismo era mas o menos conocido y constante, en el caso del uso de Internet, el retardo en las comunicaciones es variables, lo cual hace que el problema del control se agrave. Sumado a esto se tiene el problema de la perdida de datos.

En el trabajo presentado en [Elhajj 03], se puede ver una aplicación del uso de Internet para la teleoperación. En el mismo, se realiza un estudio de un nuevo método para la planificación y control de operaciones con telerobots en tiempo real. Se fundamentan en el hecho de que los retardos temporales causan instabilidades, perdida de transparencia y desincronización dado que usan el tiempo como referencia para los distintos componentes que lo integran; es decir, el control y las señales de realimentación se encuentran muestradas respecto al tiempo. Es por ello, que proponen que si se usa un enfoque en el cual las referencias no se basan en el tiempo, los efectos de los retardos desaparecerían o se disminuirían significativamente. Pensando en este enfoque, se usa una arquitectura basada en eventos, parecido al funcionamiento de la MFC (Microsoft Foundation Class). Podría decirse que se encuentra se basa en la arquitectura Multi-Agentes de la computación distribuida, el esquema general de la arquitectura usada en este caso puede verse en la figura 2.19.

Entre los componentes usados para la implementación de la arquitectura tenemos, como dispositivo Maestro: Joystick con reflexión de fuerzas Sidewinder Force Feedback Pro de la empresa Microsoft Corporation, el mismo cuenta con 3 grados de libertad en posición y 2 grados de libertad de reflexión de fuerza, un dispositivo haptico Phantom, de 6 grados de libertad y 3 grados de libertad de realimentación de fuerza. Como dispositivos esclavos, 2 robots móviles Nomadic XR4000 con un Robot Puma 560 integrado. Entre los distintos tipos de sensores con los que se cuenta están, infrarrojos, ultrasónicos, laser, fuerza/par y cámaras Sony EVI-D30. El esquema general

de la integración de todos los componentes en la arquitectura puede verse en la figura 2.20.

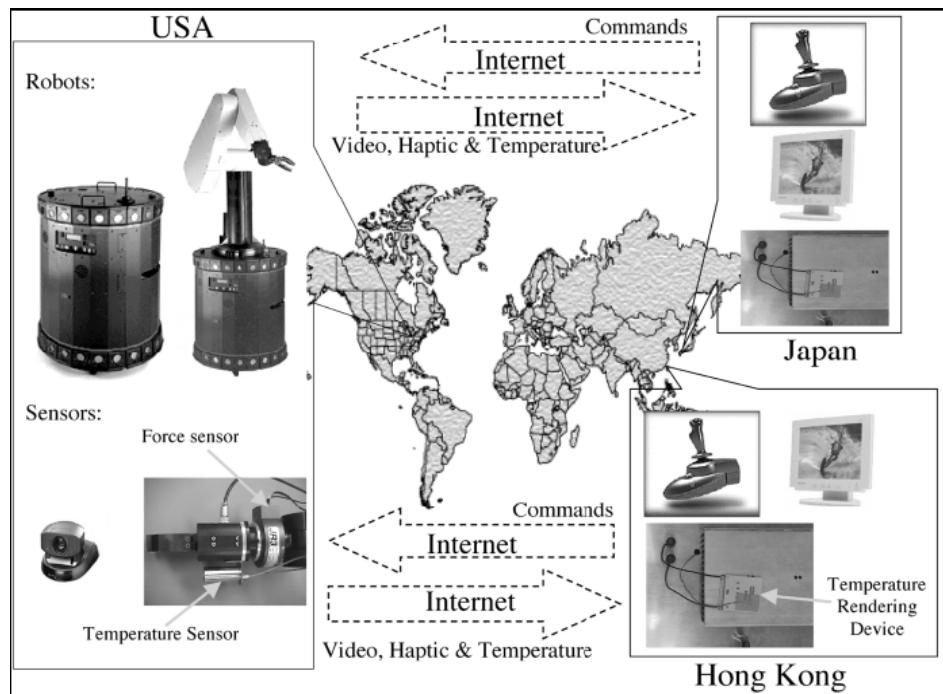


Figura 2.19 Arquitectura presentada en [Elhajj 03]

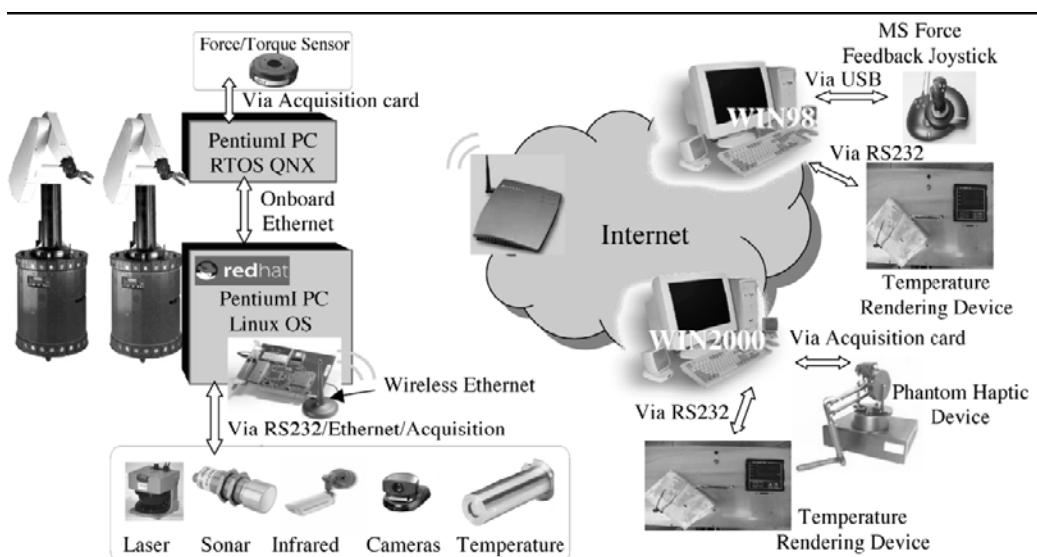


Figura 2.20 Esquema general de la plataforma presentada en [Elhajj 03]

El sistema Darts construido en la universidad de Tohoku, es otro ejemplo de la aplicación de las arquitecturas de computación distribuida en la telerobótica. El sistema Darts es un sistema que consta de 2 brazos duales como sistemas esclavos, un Joystick de 6 grados de libertad con reflexión de fuerzas. Dos cámaras y cuatro computadores conectados en una red Ethernet. El mismo fue creado pensando en aplicaciones espaciales, por lo que su arquitectura permite realizar estudios de reflexión de fuerza, guiado de telerobots, algoritmos de control bilateral, Interfaces de teleoperación, displays predictivos, etc. Todos estos elementos se interconectan entre si usando la arquitectura mostrada en la figura 2.21.

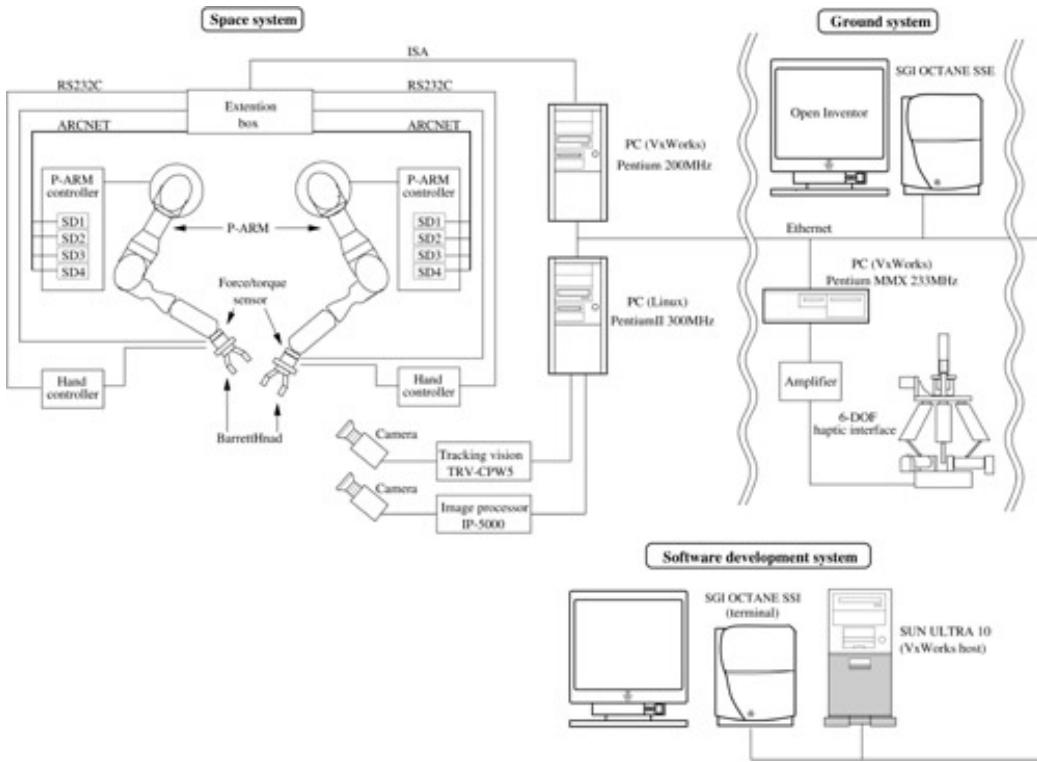


Figura 2.21, Arquitectura del sistema Darts de la universidad de Tohoku

2.7.4 Arquitecturas con lazos de control locales

En las aplicaciones donde el retardo en las comunicaciones se hace muy elevado, pero se requiere de algún tipo de trabajo teleoperado, como lo puede ser aplicaciones espaciales, la arquitectura de teleoperación debe de dotarse de cierto grado de autonomía, o realizar algún tipo de teleprogramación de tal manera de que se pueda realizar dicha tarea. Esta modificación puede observarse en la figura 2.22, donde existe un bucle que cierra un lazo de control tanto en la zona local que es donde se encuentra el operador como en la zona remota, donde se encuentra el esclavo.

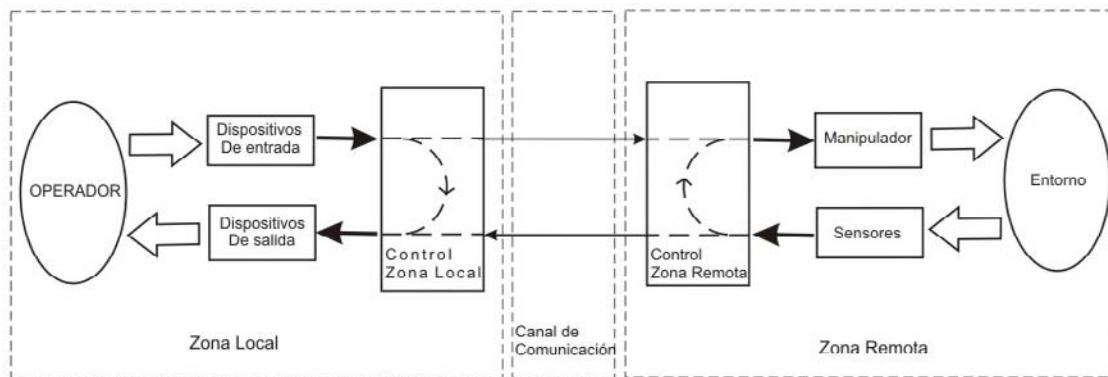


Figura 2.22 Arquitectura para la teleprogramación

Algoritmos Adaptativos

Como ya se mencionó anteriormente, con la adición de esos bucles de control se logra dotar de cierto grado de autonomía en los extremos del sistema. De tal manera que el sistema en caso de encontrarse frente algún imprevisto, este en la capacidad de subsanarla. Un ejemplo del uso que puede tener este tipo de arquitectura puede verse en [Love 04], donde se implementa un algoritmo de teleoperación con reflexión basado en el control de impedancia adaptativo. Los componentes que la integran son: como dispositivo maestro un robot con espacio de trabajo similar al de un brazo humano, un robot esclavo con un espacio de trabajo aproximadamente 50 veces el del maestro, tiene una capacidad de carga de 240 N y frecuencia natural de 4 hz. Ambos dispositivos cuentan con 2 grados de libertad. En este caso, el lazo de control local se cierra es en maestro, que es el dispositivo en el cual se implementa el control por impedancia adaptativo. El esquema general de la plataforma de teleoperación puede verse en la figura 2.23.

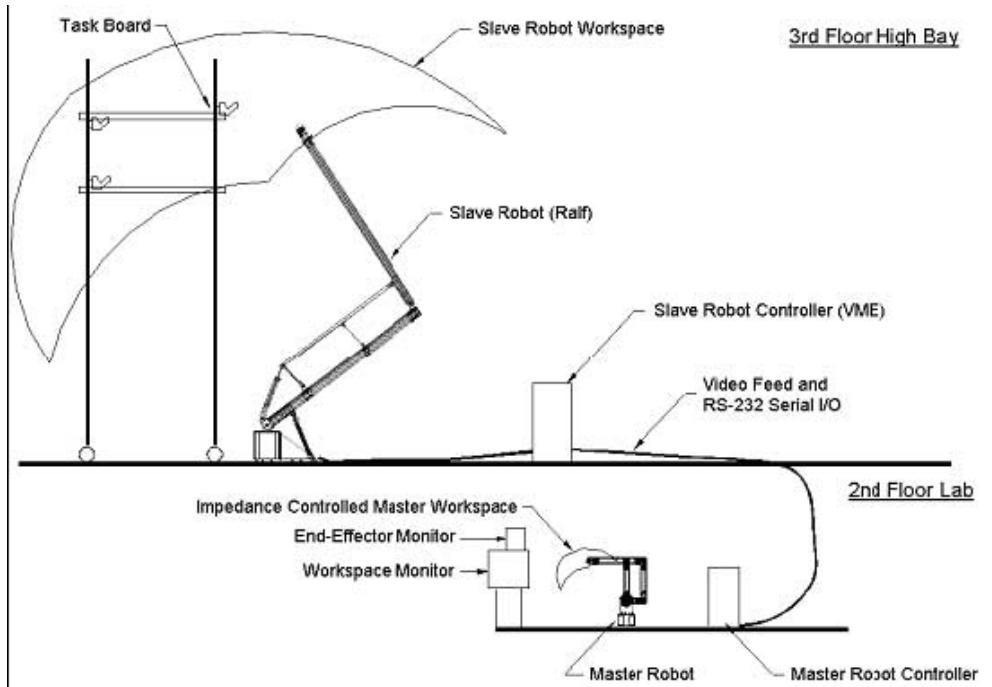


Figura 2.23 Esquema general de teleoperación implementado en [Love 04]

Otro ejemplo de la aplicación de los lazos de control locales puede encontrarse en [Zhu 00]. El esquema puede verse en la figura 2.24, en este caso se encuentran implementados los lazos de control en ambos extremos del sistema, es decir, en el maestro y en el esclavo.

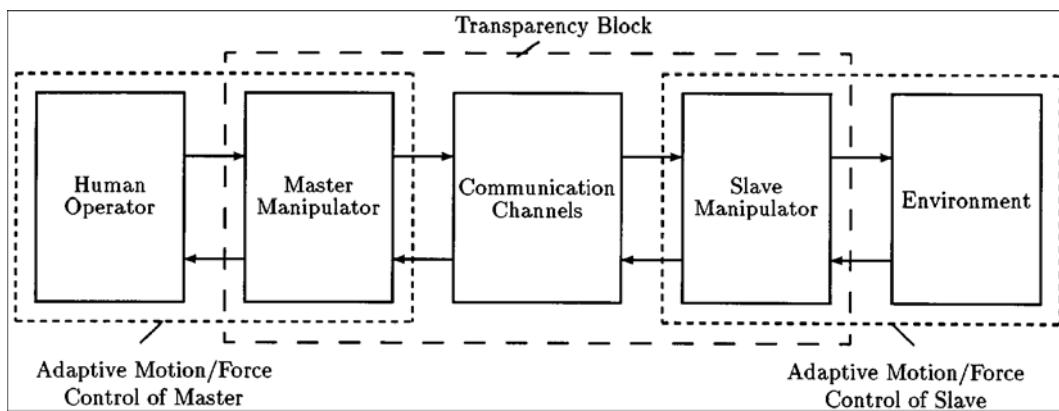


Figura 2.24 Esquema general de la arquitectura implementada en [Zhu 00]

Los elementos que componen esta plataforma son: un dispositivo maestro de 1 grado de libertad, y un dispositivo esclavo de un grado de libertad usando un motor MAXON con un encoder de 4000 pulsos. Para incrementar el par se incorporaron una caja de reducción con relación 10:1 planetario y 50:1 armónico en el maestro y esclavo respectivamente. Como sensores de fuerza se tienen 2 U560 de la empresa JR3 Inc.

Teleprogramación

Con esta arquitectura también es posible realizar la teleprogramación de robots, esto significa aumentar la autonomía del robot, lo que quiere decir que el operador ya no tiene un control directo sobre el dispositivo esclavo sino que su actuación se ve reducida a comandos de alto nivel los cuales el dispositivo esclavo debe interpretar, planificar y ejecutar las acciones necesarias para llevarlos a cabo.

Como ejemplo podemos nombrar la arquitectura implementada en [Mora 04] y fue presentada en la figura 2.17, la misma también sirvió como plataforma de teleprogramación para el trabajo realizado en [Hernando 02], el cual trata de una arquitectura de control, planificación y simulación para teleprogramación de robots.

Otro ejemplo de lo que sería la aplicación de esta arquitectura puede encontrarse en [Wusheng 02]. En este caso se trata de la implementación de control autónomo basado en sensores de tal manera que el sistema sea capaz de manejar retardos prolongados en el canal de comunicación. Los componentes que integran la plataforma son: como dispositivo esclavo un robot puma 560 al que le fue integrada una mano humanoida de 3 dedos, para un total de 15 grados de libertad en el dispositivo esclavo completo. Como dispositivo maestro se tiene un guante CyberGlove con un sensor de posición magnético. Además, cuenta con unas gafas estereo 3D, sensores de posición y velocidad en el esclavo, y cámaras CCD.

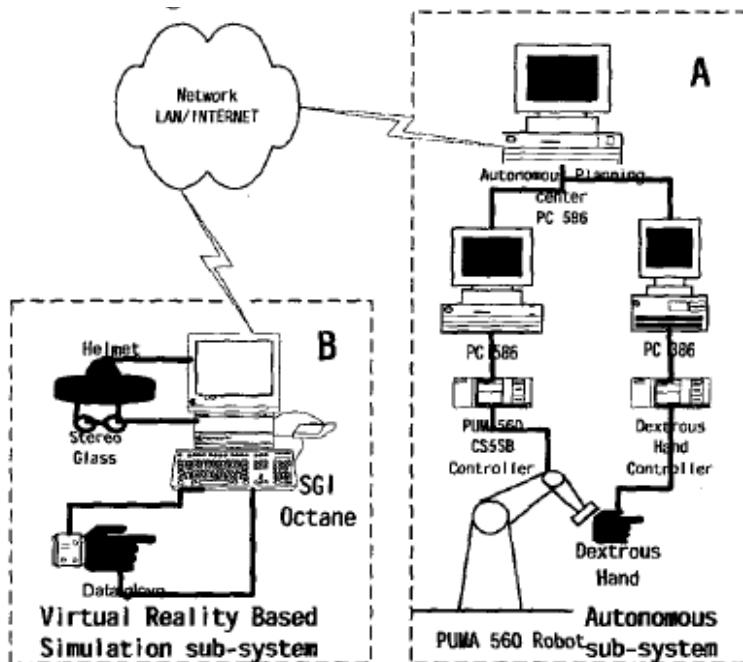


Figura 2.25 Esquema general de la arquitectura implementada en [Wusheng 02]

2.7.4.1 Arquitecturas multimodales y de telepresencia

La telepresencia trata de trasladar las sensaciones propias del entorno de trabajo remoto al operador, de tal manera que sienta que está realizando la tarea el mismo y no existe unos dispositivos entre él y la tarea que realiza. Esto requiere de técnicas de sensado apropiadas, de tal manera que sea posible no solo realizar las realimentaciones clásicas como lo son: Cinestésica, Visual y Auditiva; sino también lo relacionado con las sensaciones táctiles y de temperatura, lo cual es conocido como multimodalidad.

En el trabajo presentado en [Buss 00] se realiza un estudio de la telepresencia multimodal, en el mismo hace un análisis general de la estructura de los sistemas multimodales de telepresencia y teleacción. Analizando los principales modos de control usados como lo son: remoto, compartido, cooperativo, asistido, simbólico y semiautónomo. La arquitectura general del sistema implementado puede observarse en la figura 2.26.

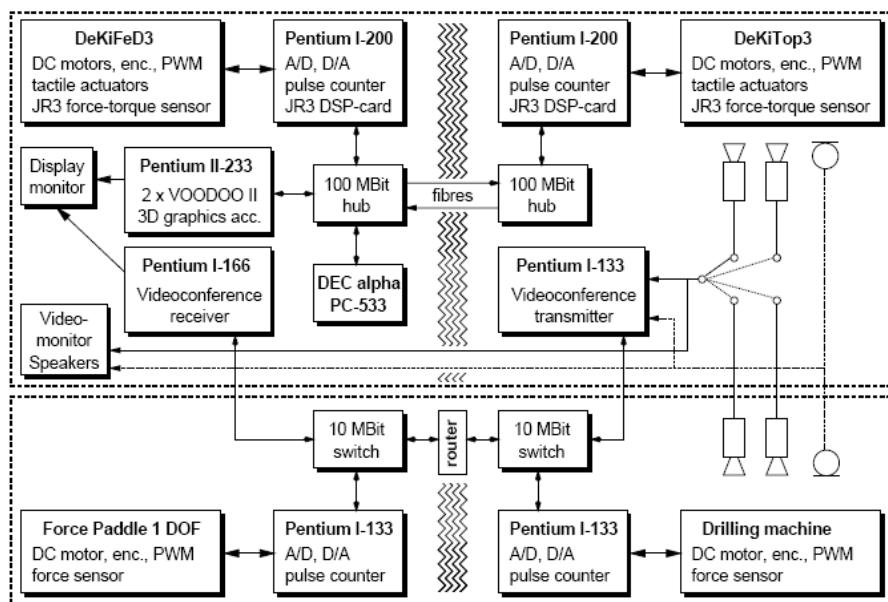


Figura 2.26 Arquitectura del sistema implementado en [Buss 00]

Los componentes que conforman el sistema implementado son: como dispositivos maestro, se tiene un maestro de un grado de libertad con motores DC, encoders y sensores de fuerza; un robot DeKiFeD3 desarrollado en la Universidad Técnica de Munich el cual cuenta con 3 grados de libertad. Como dispositivo esclavo se cuenta con: un robot DekiTop3 de 3 grados de libertad, con motores DC como actuadores, encoders y sensores de fuerza; una máquina de taladrado de un grado de libertad con un sensores de fuerza, ambos sistemas desarrollados en la universidad Técnica de Munich. Además se cuenta con monitores, proyectores, altavoces, actuadores vibrotactiles y de temperatura.

Capítulo 3

ESTACION DE TELEOPERACION

Para comprobar experimentalmente los distintos algoritmos discutidos a lo largo de la presente tesis se ha desarrollado una plataforma que permite la aplicación experimental de los mismos. Por ello, se realizó el diseño de una plataforma experimental haciendo uso de los distintos dispositivos disponibles. La realización de una plataforma experimental requiere de un gran esfuerzo en recursos y equipos, con lo cual la plataforma debe ser lo suficientemente abierta para que no solo permitiera comprobar experimentalmente los algoritmos presentados en este trabajo, sino que también permitiera realizar otros tipos de trabajos e investigaciones relacionadas con la teleoperación.

El presente capítulo se encuentra dividido de la siguiente manera: La primera parte trata del diseño y puesta en funcionamiento de una estación de teleoperación abierta. La misma comienza con la explicación de los requerimientos que tiene la plataforma planteada, luego se describen los distintos dispositivos disponibles para formar parte de la plataforma; posteriormente, se explica la arquitectura de la plataforma experimental lograda y se detallan variantes de la arquitectura desarrollada para su uso en distintas áreas de trabajo relacionadas con la teleoperación.

En el anexo I se describe el diseño de la electrónica de control requerida para la puesta en funcionamiento de la estación de teleoperación, en el anexo II se muestra el proceso de identificación de la plataforma describiéndose los distintos modelos usados para caracterizar la dinámica tanto del maestro como del esclavo, y en el anexo III se presenta el diseño de los controladores usando los modelos obtenidos del proceso de identificación.

3.1 Diseño de la plataforma Experimental

3.1.1 Requisitos

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

Debe ser totalmente abierta, que presente una arquitectura bastante modular de manera que sus distintos componentes puedan ser reconfigurados para ser usados de distintas maneras y a su vez puedan llevarse a cabo distintos tipos de tareas. Debe tener una alta capacidad de cómputo de tal manera que se puedan implementar distintos tipos de control. Debe hacer uso de los dispositivos disponibles en el laboratorio.

3.1.2 Dispositivos

Sistema maestro-esclavo

El dispositivo maestro y el manipulador esclavo a utilizar es el sistema GRIPS de Kraft Telerobotics Inc. El mismo es un sistema de teleoperación con reflexión de fuerzas, pero al ser un sistema comercial es totalmente cerrado, la arquitectura del sistema GRIPS puede observarse en la siguiente figura:

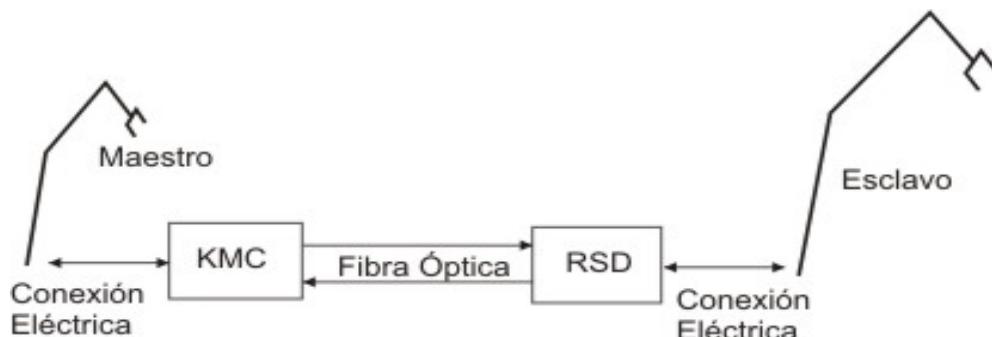


Figura 3.1 Arquitectura Sistema Grips de Kraft Telerobotics Inc.

Esclavo

El manipulador Esclavo (figura 3.2), es un robot hidráulico de 6 grados de libertad, el mismo cuenta con 7 potenciómetros, uno en cada grado de libertad más uno en la pinza, que son con los que se obtienen las medidas de posición. Además cuenta con sensores de presión en cada uno de los cilindros de cada grado de libertad, de tal manera que la diferencia de presión en los cilindros de cada grado de libertad es tomada como la medida de fuerza ejercida por cada grado de libertad individual.

En la figura 3.2, se puede observar cada uno de los grados de libertad con los cuales cuenta el manipulador esclavo, la nomenclatura usada para su identificación es la siguiente: SA- Shoulder Azimut, SE – Shoulder Elevation, EL – Elbow Elevation, WY – Wrist Yaw, WP – Wrist Pitch, WR – Wrist Rotation.

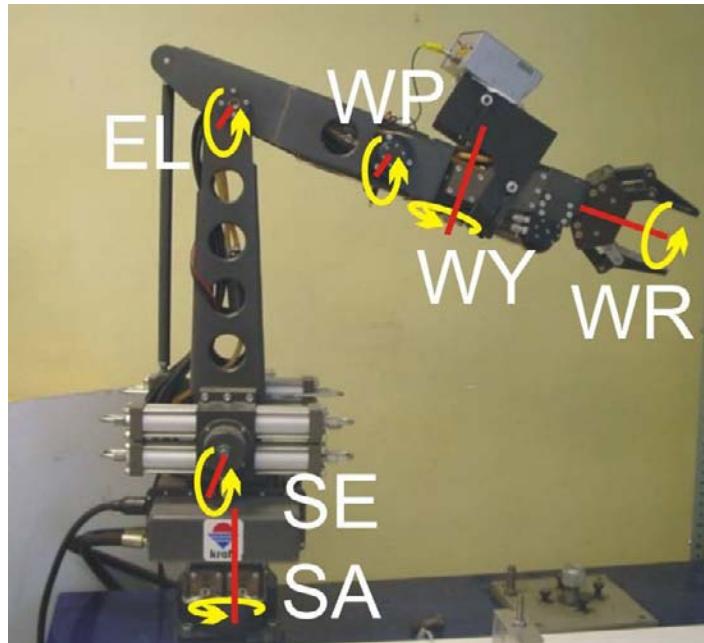


Figura 3.2 Manipulador Hidráulico de Kraft Telerobotics Inc. Con sus grados de libertad del esclavo

Maestro

El dispositivo maestro (figura 3.3) es un dispositivo antropomórfico cuyo diseño mecánico está hecho para acoplarse al brazo humano. Al igual que en el caso del esclavo el dispositivo maestro cuenta con potenciómetros para medir las posiciones, solo que en este caso cuenta con 8 en total, 6 para cada grado de libertad, uno para el cierre de la pinza y uno adicional para una opción de giro continuo de la muñeca. Sumado a esto, cuenta con leds para efectuar indicaciones del estado del sistema y botones para su interacción.



Figura 3.3 Maestro con reflexión de fuerzas de Kraft Telerobotics Inc.

Como se mencionó anteriormente, el sistema cuenta con reflexión de fuerza, la misma se logra en el maestro mediante 5 motores AC bifásicos en las cinco primeras articulaciones, es decir que el último grado de libertad, la rotación de la muñeca no cuenta con ningún tipo de realimentación de fuerzas. De igual manera, la nomenclatura usada para identificar cada uno de los grados de libertad (figura 3.4) del maestro es la siguiente: SA- Shoulder Azimut, SE – Shoulder Elevation, EL – Elbow Elevation, WY – Wrist Yaw, WP – Wrist Pitch, WR – Wrist Rotation. Es importante mencionar que existe una diferencia entre la cinemática del maestro y la del esclavo, y la misma consiste en que dos grados de libertad (WY y WP) se encuentran mecánicamente cambiados en ambos dispositivos, lo cual puede identificarse observando las figuras 3.2 y 3.4.

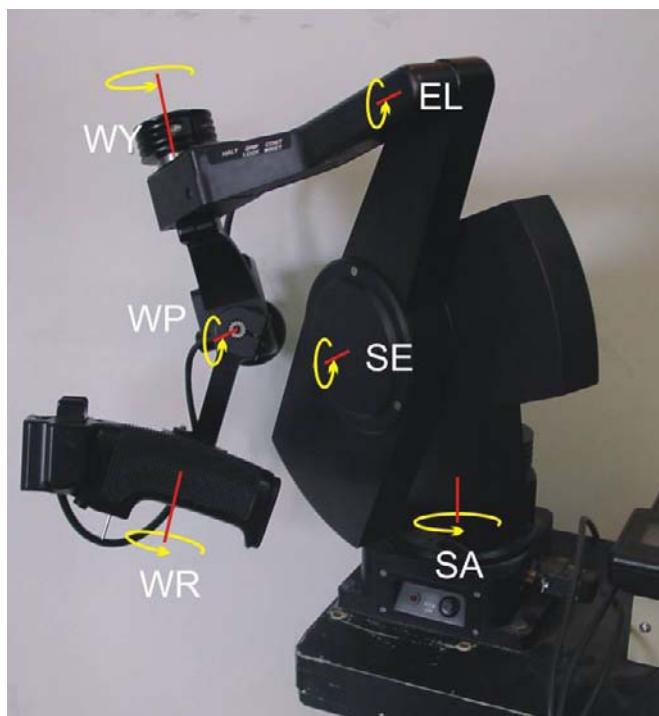


Figura 3.4 Grados de libertad del Maestro

Uno de los requisitos establecidos para la arquitectura es que fuera totalmente abierta, con lo cual para poder cumplir con el mismo fue necesario diseñar la electrónica de control que gobernaría ambos sistemas. Para ellos se establecieron otros requisitos:

- Debe tener suficiente potencia de cálculo.
- Tener varias opciones de comunicación.
- Fácil programación y depuración.
- Para ello se decidió realizar una tarjeta de control que fuera común para ambos dispositivos, y que la misma trabajara con una tarjeta con la electrónica de potencia particular de cada uno.

3.2 Arquitectura del puesto de teleoperación

Dadas las amplias capacidades de comunicación de la tarjeta controladora diseñada, es posible implementar una arquitectura bastante abierta. En lo referente a control, la arquitectura de la plataforma experimental puede ser observada en la figura 3.5.

La comunicación entre ambas tarjetas se realiza mediante el protocolo *SPI* (Serial Periferal Interface). El mismo se encuentra configurado a 800Kbps (Kilo Bits Por Segundo). Esto permite el intercambio de datos necesario en un control bilateral. A través de este canal se transmiten posiciones, velocidades, fuerzas, aceleraciones, cualquier información que sea necesaria.

Existe otra vía de comunicación y es la de las tarjetas controladoras con el Ordenador, el cual se encuentra implementado mediante el bus *USB*. Este canal es independiente para cada tarjeta, por lo que no están sincronizadas entre si. El mismo sirve para guardar datos relacionados con el funcionamiento interno de los controladores, o en caso de ser necesario el estado del dispositivo al que controla.

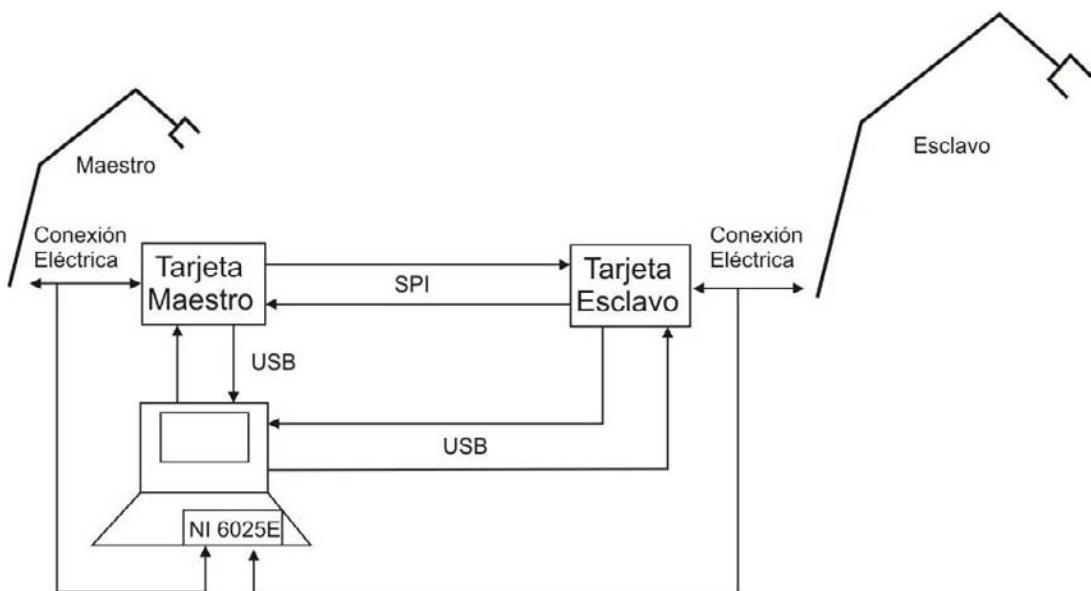


Figura 3.5 Arquitectura de control de la plataforma experimental desarrollada

Existe otra posibilidad de adquisición de datos y es una tarjeta National Instruments NI 6025-E instalada en el ordenador, la misma se encuentra configurada para una velocidad de adquisición de 2 Khz por canal. Esto ofrece una capacidad de análisis muy potente, debido a que se cuenta con 16 canales de entrada analógica, con lo que es posible realizar la lectura de las posiciones tanto del maestro como del esclavo de manera simultanea.

Tal como se puede observar, la arquitectura experimental de control implementada es lo suficientemente abierta como para ser usada en la realización de investigaciones y desarrollos. Permitiendo la implementación de distintos algoritmos de control, y a su vez con todas las señales de sensores y actuadores abiertas para conocer

el estado del sistema, mediante la misma tarjeta controladora o usando hardware externo como es el caso de la tarjeta NI.

3.2.1 Implementación de los algoritmos de control

Los algoritmos de control, y todas las rutinas que le sirven de soporte se pueden modularizar dependiendo de la función que cumplen mediante el diagrama de la figura 3.6.

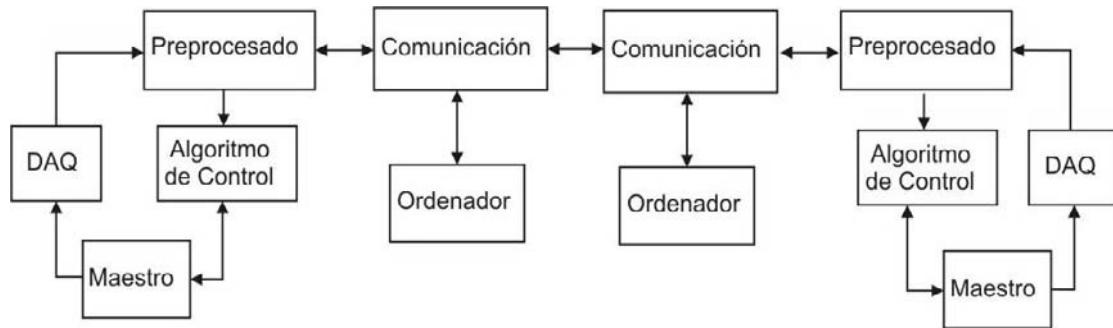


Figura 3.6 Diagrama general de control

En el diagrama se puede observar que tanto el lado maestro como el lado esclavo tienen los mismos bloques funcionales, un bloque de adquisición de señales que sirven para la realización de la lectura de las señales tanto analógicas como digitales que pertenezcan al dispositivo que se quiere controlar. Un bloque de comunicación que es el encargado de gestionar el flujo de datos entre las tarjetas y la tarjeta con el ordenador, de la misma manera se realiza la gestión de las tramas de comunicación descartándolas en caso de ser tramas erróneas mediante un protocolo implementado. El preprocesado donde se realiza el filtrado digital de las señales en caso de ser necesario. Y por ultimo, se encuentra el bloque de control que es donde se realiza el cómputo correspondiente a los algoritmos de control con los que se quiera experimentar.

3.2.2 Arquitecturas derivadas

Tal como se explicó en el epígrafe 3.1.1, uno de los objetivos planteados a la hora de establecer los objetivos de la arquitectura es que sirviera para realizar investigaciones no solo en el área de control bilateral, sino que también sirviera en otras áreas relacionadas con la teleoperación. Esta es la razón por la cual se diseñó la tarjeta con posibilidades de comunicación bastante amplias, por ello que es posible modularizar cada dispositivo usando la tarjeta controladora o ampliar la arquitectura de control bilateral presentada. Entre las configuraciones opcionales que se pueden obtener a partir de las tarjetas diseñadas tenemos:

Control del maestro

El maestro es posible utilizarlo de manera independiente de acuerdo a al esquema de la figura 3.7:

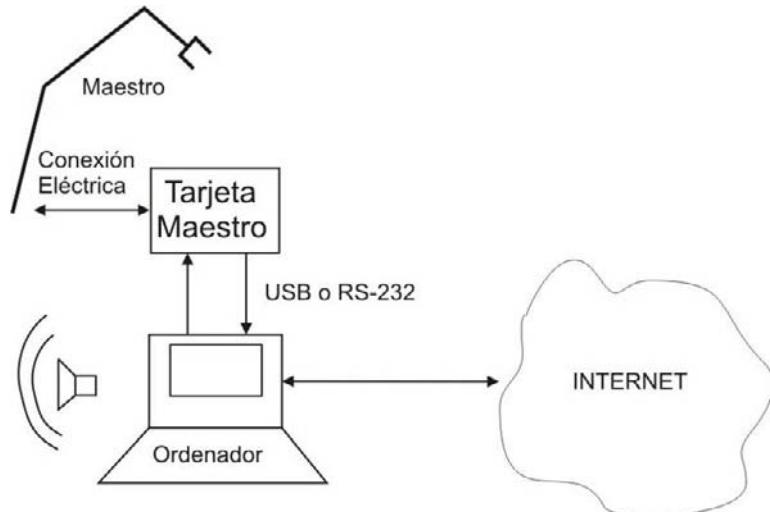


Figura 3.7 Esquema de control del maestro

Esta arquitectura permite realizar distintas investigaciones o desarrollos, como lo puede ser el estudio de interfases hápticas, el manejo de manipuladores esclavos distintos al manipulador Kraft original o la teleoperación de manipuladores remotos vía Internet. En relación al manejo de manipuladores distintos al original, vale la pena resaltar la prueba realizada teleoperando un robot paralelo como el observado en la figura 3.8.

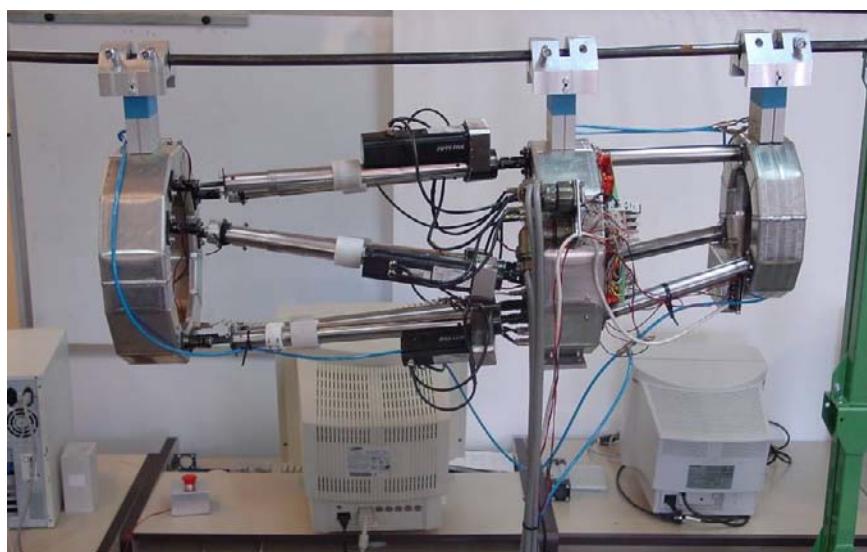


Figura 3.8 Robot Paralelo Robmep

Para poder hacer uso de esta arquitectura fue necesario desarrollar una librería que permitiera la conexión del maestro con aplicaciones software en el ordenador. La

misma, contiene todas las funciones y estructuras de datos necesarios para la comunicación, configuración y procesamiento de datos provenientes del maestro. Algunas de las funciones que contiene la librería son:

Actualizar() = Adquiere todas las posiciones articulares de los grados de libertad, estado de los switches, actualiza el estado de los leds y fuerzas reflejadas en el maestro.

ActualizaFuerzas() = Actualiza los valores de reflexión de fuerzas en todo el maestro.

ActualizaEstado() = Adquiere todas las posiciones articulares de todos los grados de libertad y el estado de los switches.

ConfiguraComm() = Configura el canal de comunicación que utilice el maestro para conectarse con el ordenador.

CalculaCinematica() = Calcula la cinemática directa del extremo del maestro respecto a su base.

CalculaJacobian() = Realiza el cálculo de la matriz Jacobiana.

CalculaJacobianTraspuesta()= Realiza el cálculo de la matriz Jacobiana transpuesta.

DevuelveEstado() = Calcula la posición en grados de cada uno de los grados de libertad.

CalculaCinematicaPunto(x,y,z) = Calcula la posición de un punto respecto al sistemas de coordenadas de la base del maestro dada sus coordenadas respecto al sistema de coordenadas del extremo.

CalculaPares(Fx,Fy,Fz,Tx,Ty,Tz) = Dado un vector de fuerzas y pares en el extremo del maestro, calcula los pares originados en cada uno de los grados de libertad.

Estos son solo algunos ejemplos de las funciones que contiene la librería, existen muchas otras funciones que sirven por ejemplo para modificar de manera individualizada la magnitud de la fuerza a ser reflejada en cada grado de libertad, su dirección, encendido o apagado de los motores, cálculo de velocidades, cálculo de las coordenadas de un punto en el espacio de coordenadas del extremo dadas sus coordenadas respecto a la base, etc.

Las funciones son bastante intuitivas, permitiendo la interacción del maestro con cualquier aplicación mediante pocas líneas de código, por ejemplo:

```
CMaestro Maestro;  
Maestro.ConfiguraComm();  
Maestro.Conectarse();  
Maestro.ActualizaEstado();  
Maestro.ActualizaFuerzas();
```

Con relación a las interfaces hapticas, se implementaron dos simuladores de prueba, el primero haciendo uso de las librerías SMR (Simulador Modular de Robots) desarrolladas por [Hernando 02], y puede observarse en la siguiente figura:

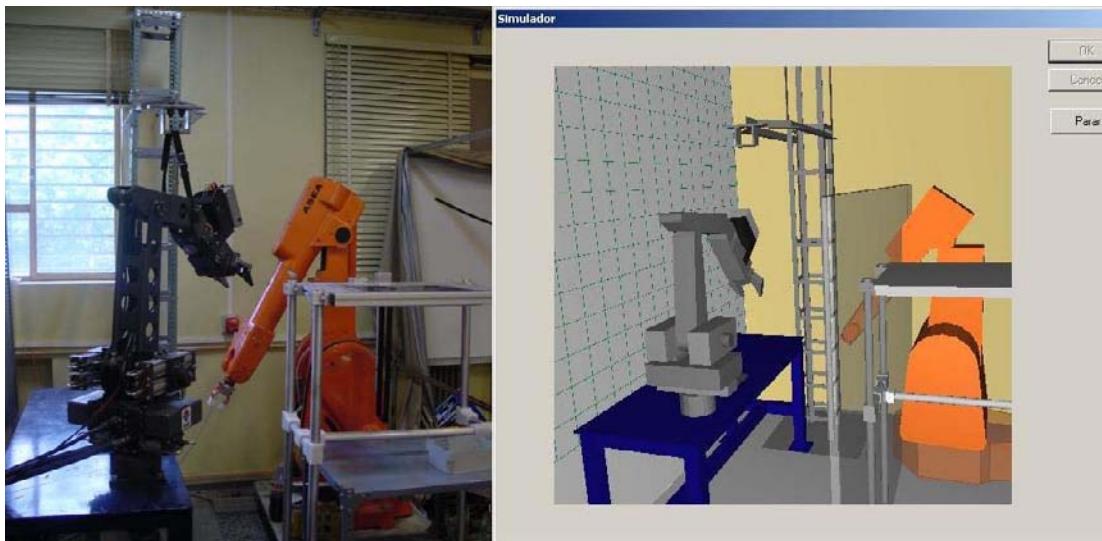


Figura 3.9 Simulador entorno de trabajo y su modelado usando las librerías SMR

El segundo simulador utilizado se realizó haciendo uso de ODE [Smith 05], por sus siglas en inglés ODE significa Open Dynamics Engine. El mismo es un simulador dinámico de cuerpos rígidos open source, es independiente de la plataforma usada con una API en c/c++, posee un motor gráfico y detección de colisiones. Su arquitectura es modular, por lo que dado el caso que solo se requiera el simulador dinámico, se puede perfectamente hacer uso de la interfaz gráfica y detección de colisiones externos.

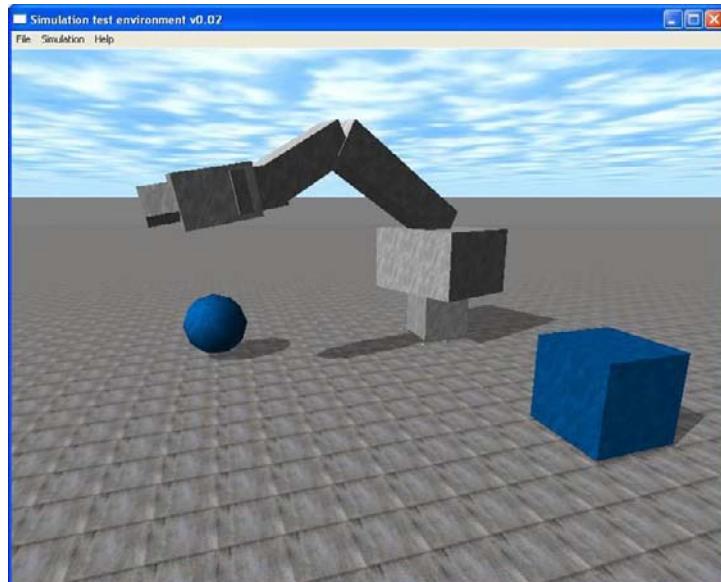


Figura 3.10 Simulador implementado con ODE

Por lo tanto, haciendo uso de la librería maestro desarrollada e integrándola con ODE es posible desarrollar aplicaciones hápticas como por ejemplo la que aparece en la figura 3.10. En ella se puede observar en un círculo rojo un cilindro que corresponde a

la normal del punto de contacto del extremo del manipulador virtual con el objeto, dada esta información junto con la penetración del extremo, es posible haciendo uso de la librería maestro, simular la colisión en el maestro.

Las secuencias de imágenes de la figura 3.11, pertenecen a la aplicación donde se puede observar la normal que se origina en el punto de contacto del extremo con el objeto. A medida que el punto de contacto se desplaza de igual manera lo hace la normal a dicho punto.

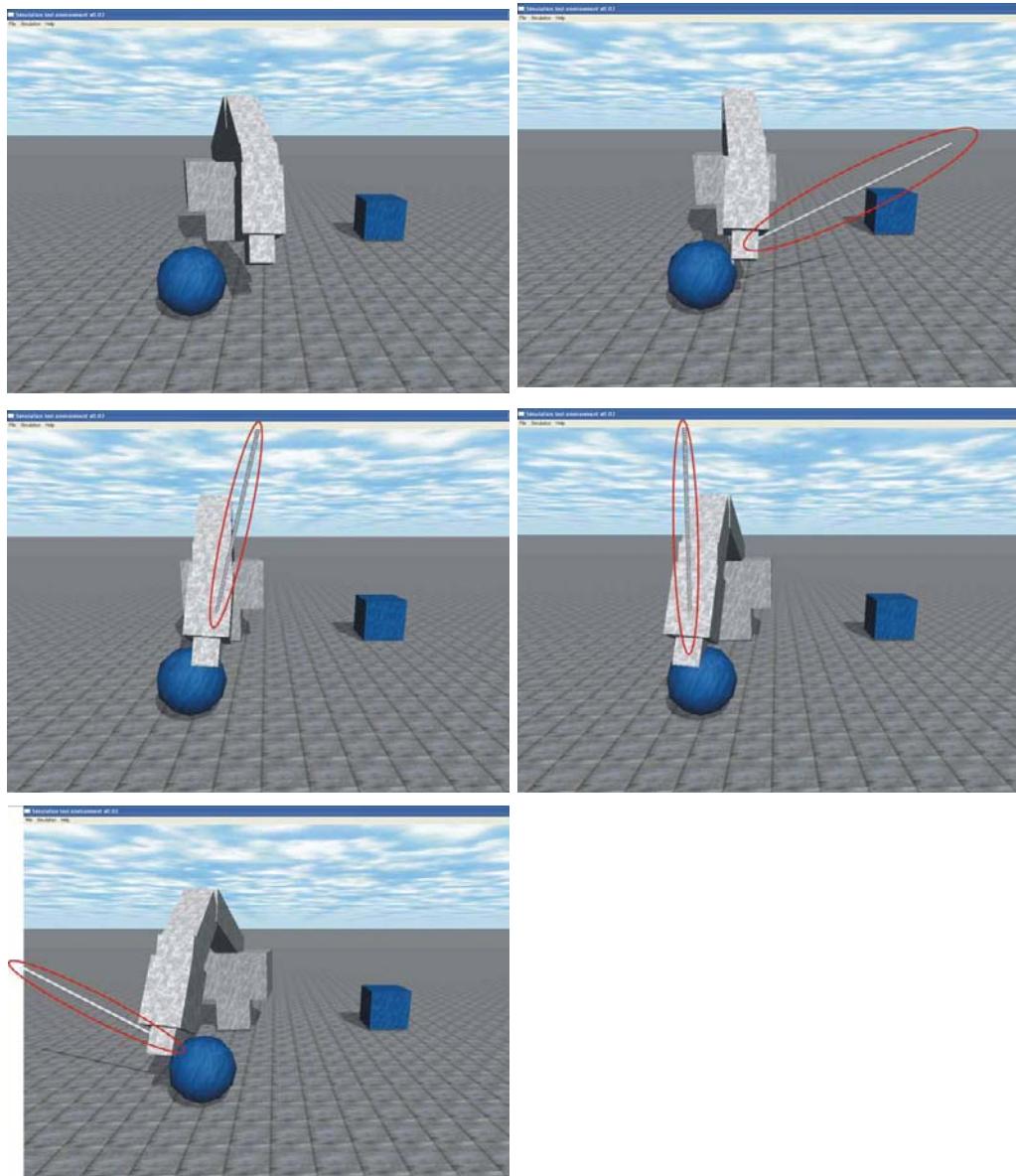


Figura 3.11 Secuencia de imágenes de una colisión usando el simulador ODE

Comunicaciones

Se han realizado pruebas de comunicación usando tanto el protocolo RS-232 como el USB. Todas las pruebas se realizaban enviando una secuencia de tramas del ordenador a la tarjeta de control y de vuelta nuevamente al ordenador, se usaban 100 tramas y el retardo se calculaba mediante el promedio que tardaban en conjunto.

En cuanto a la comunicación mediante el bus USB se obtuvo un retardo de aprox. 5 milisegundos, mientras que en el caso de la comunicación RS-232, el retardo era de aproximadamente 15 milisegundos. Estos tiempos pueden variar dependiendo de la longitud de la trama de comunicación empleada, en el caso de las pruebas realizadas, la longitud de las tramas era de 20 Bytes para la conexión Maestro-Ordenador y 12 para la conexión Ordenador-Maestro, con el siguiente formato:

Maestro-Ordenador:

- 2 Bytes de cabecera para establecer el inicio de la trama.
- 16 Bytes con la información de cada uno de los grados de libertad, el cierre de la pinza y uno extra que se emplea para realizar el giro continuo de la pinza.
- 1 Byte con la información de los botones del maestro.
- 1 Byte con el Checksum para la detección de tramas erróneas.

Ordenador-Maestro:

- 2 Bytes de cabecera para establecer el inicio de la trama.
- 10 Bytes con la magnitud y dirección de giro para reflejar fuerzas en cada grado de libertad (excepto el giro de la muñeca que no tiene motor).
- 1 Byte con la información de encendido/apagado de los Leds.
- 1 Byte con el Checksum para la detección de tramas erróneas.

Control del esclavo

Al igual que el maestro el esclavo puede ser usado de manera independiente de acuerdo al siguiente esquema:

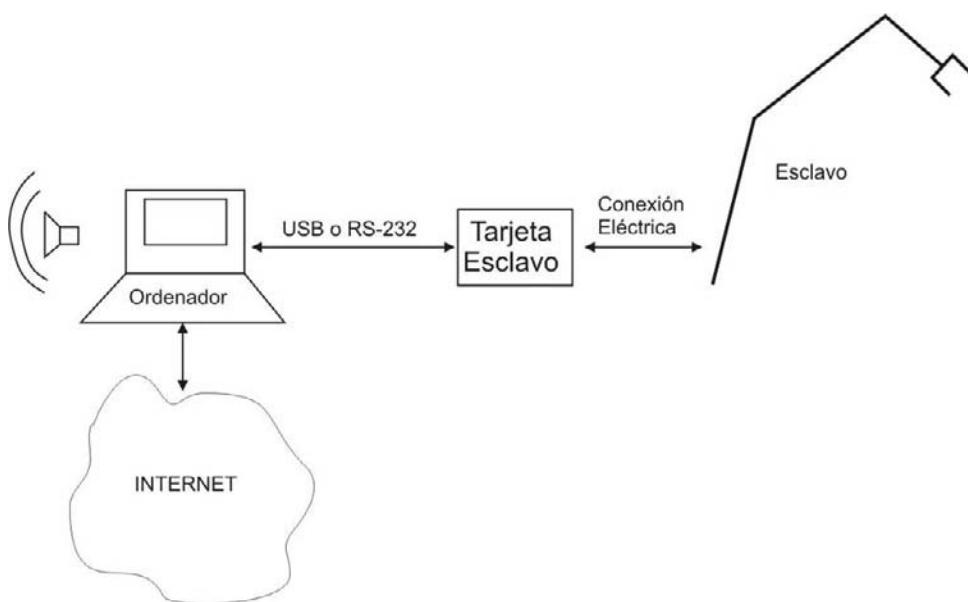


Figura 3.12 Control del esclavo

Esta arquitectura permite manejar el manipulador esclavo como un robot industrial, controlarlo usando cualquier otro dispositivo maestro o ser teleoperado usando Internet como canal de comunicación. Dado que el canal de comunicación empleado en este caso es el mismo se tienen aproximadamente los mismos retardos que los obtenidos en el caso de la arquitectura maestro, de igual manera es importante resaltar los tiempos dependen de la longitud de la trama de comunicación empleada.

3.2.3 Arquitectura General del sistema teleoperado

Finalmente, se procedió a incorporar una cámara, desarrollada en el laboratorio DISAM [Navas 04], la misma posee diversas capacidades como lo es la generación de imágenes Estereo y Blending. La arquitectura lograda mediante su incorporación puede observarse en la figura 3.13.

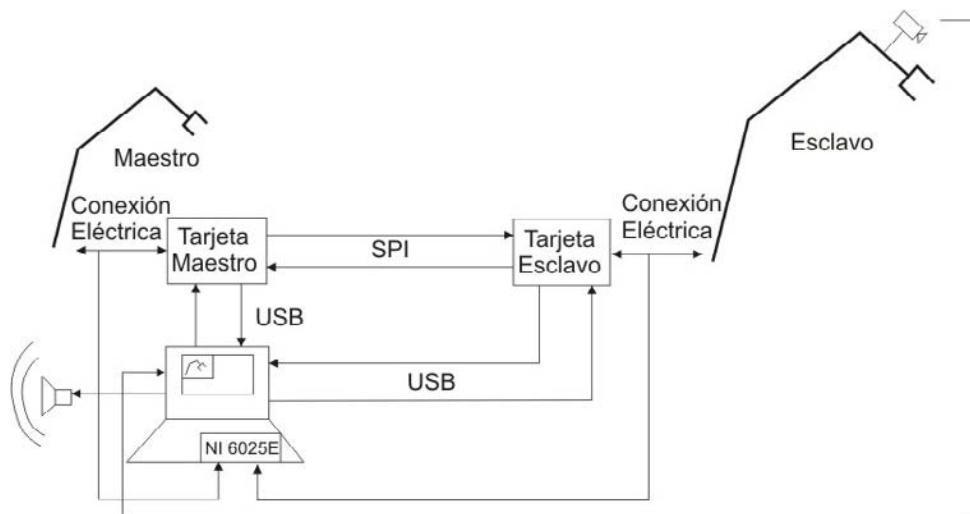


Figura 3.13 Arquitectura General del sistema teleoperado

Visión Estereoscópica

La cámara usada fue parte del desarrollo de un trabajo de fin de carrera [Navas 04], la finalidad de la misma es tener un sistema capaz de generar visión estereoscópica evitando el uso de los recursos del sistema, por lo que su principal ventaja radica en el hecho de que para su uso no es necesario usar ninguna ranura ni puerto del PC sino que basta con insertar la tarjeta de la cámara entre la conexión VGA del computador y el monitor, la misma se encarga de insertar una ventana con dimensiones preestablecidas en el monitor donde aparecerá la imagen estereo captada por la cámara. Fuera de las dimensiones de esa ventana aparece un fondo negro o la imagen proveniente del PC de acuerdo a la selección del operador.



Figura 3.14 Sistema Cámara Estereo

Tal como se mencionó en el estado del arte, cuando se teleopera un robot, el operador pierde la percepción de profundidad debido a que el monitor ofrece una imagen bidimensional. Es por ello que para efectuar tareas teleoperadas, es de suma importancia el uso de la visión estero para recuperar la percepción de profundidad. En la figura 3.15, se puede observar una aplicación implementada con el uso de esta tecnología. La tarea realizada consistía en una operación pick&place.



Figura 3.15 Aplicación usando Visión Estereo

Superposición de imágenes

La superposición de imágenes o blending es una tecnología que consiste en la superposición de imágenes simuladas sobre imágenes reales provenientes de una cámara, el resultado es la implementación de lo que en el estado del arte se denominó Teleoperación Aumentada. Esto permite incorporar ayudas visuales que sopesen alguna deficiencia o asistan al operador en caso de generarse alguna contingencia; por ejemplo, la perdida de la visión estereo puede ser compensada mediante la superposición de la simulación, sobre la imagen bidimensional proveniente de una sola cámara, el inconveniente de esta tecnología es que es necesario contar con un modelado bastante aproximado del entorno de trabajo. La implementación de ejemplo de su uso puede observarse en la figura 3.16, en la misma la imagen superior corresponde a la vista del monitor del operador donde aparece superpuesta la simulación que se realiza del robot y su entorno, sobre la imagen proveniente de una cámara que lo esta apuntando. En la imagen inferior se muestra el robot y su entorno de operación real.

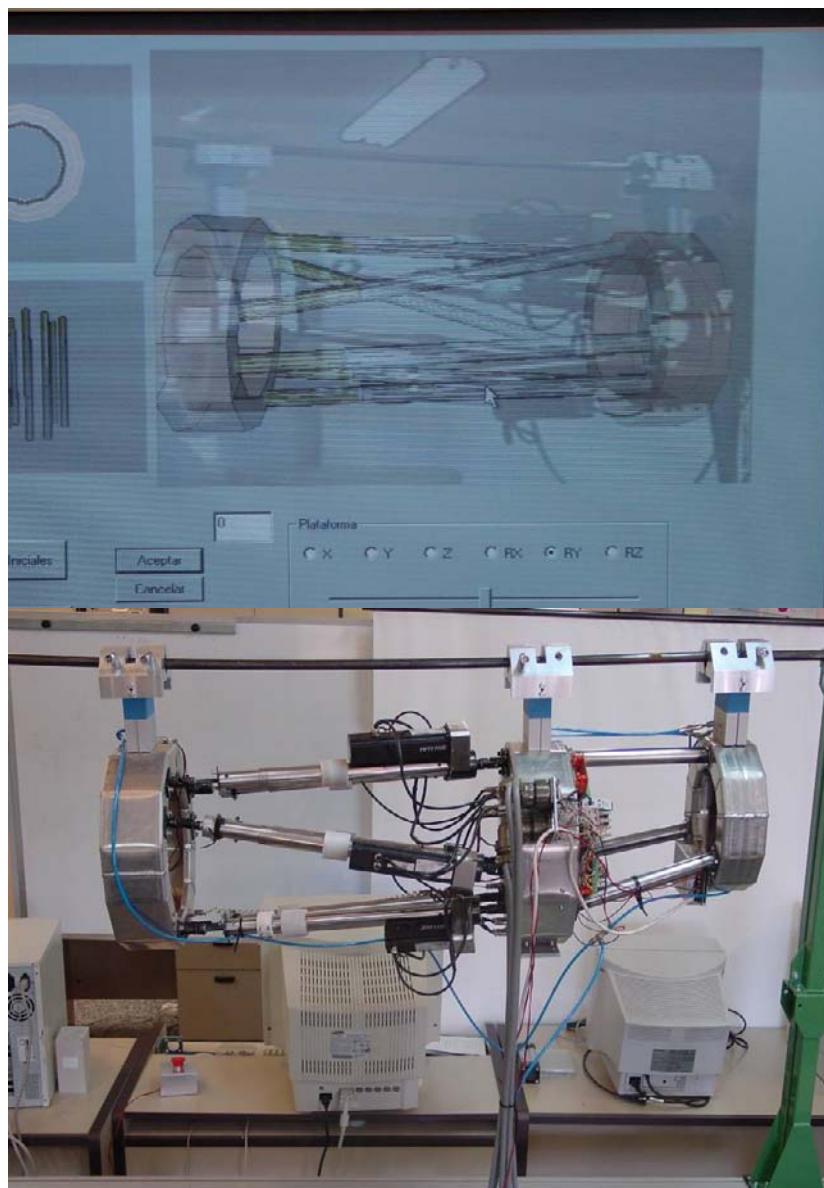


Figura 3.16 Aplicación del Blending

3.3 Conclusiones

Una vez definidos los objetivos que se querían lograr con el diseño de la plataforma de teleoperación, se procedió a implementar una arquitectura lo suficientemente abierta y flexible mediante la cual se puede acceder y/o actuar sobre cualquiera de las partes o dispositivos que la componen. La misma, no solo permite implementar una configuración maestro-esclavo, sino que también es posible hacer uso de cada elemento de manera individual, aumentando la cantidad de aplicaciones en las cuales puede ser usada.

Las pruebas realizadas con las distintas configuraciones demostraron la calidad del sistema, donde es posible ejecutar algoritmos de control a una frecuencia de 8.58 KHz. por cada grado de libertad (la implementación real se hizo a 2 KHz.), comunicación Maestro-Esclavo con un retardo inferior a los 2 mseg., comunicación Dispositivo-PC a velocidades inferiores a los 10mseg.

Gracias a las tarjetas controladoras diseñadas en el marco de la presente tesis, es muy sencillo implementar los distintos esquemas de control existentes, basta con tener conocimiento de programación en C. Otra ventaja, es que se tiene un control más preciso del tiempo de ejecución de los distintos algoritmos, por lo que no es necesario el uso de sistemas operativos en tiempo real.

Es importante resaltar las dificultades técnicas y esfuerzo realizado para lograr la implementación completa y exitosa de la plataforma:

- Se hizo uso del sistema GRIPS de Kraft Telerobotics Inc., que tal como se mencionó anteriormente es un sistema comercial por lo tanto es completamente cerrado, por lo que fue necesario un estudio profundo de su funcionamiento, a fin de lograr una apertura completa que permitiera su uso en la plataforma.
- El diseño, fabricación, montaje y programación de la tarjeta controladora y de potencia tanto del dispositivo maestro como del esclavo, supuso una fuerte inversión de tiempo y dinero, que era justificada dado que el funcionamiento particular de los elementos de la plataforma.

El control del sistema GRIPS de Kraft es una aportación de la presente tesis, dado que en la bibliografía consultada son muchos los trabajos que realizan estos tipos de prueba usando dispositivos especialmente diseñados con esas finalidades, pero existe una carencia en cuanto a la experimentación de algoritmos bilaterales usando dispositivos de aplicación industrial.

La plataforma es considerada una aportación importante dentro del marco de la presente tesis, dado que en el contenido de la bibliografía realizada no se tiene conocimiento de otro sistema con las mismas prestaciones, flexibilidad y apertura, que las obtenidas con la plataforma implementada.

La plataforma no solo demostró su utilidad en el marco de la presente tesis, sino que también está siendo usada para otros trabajos que están siendo llevados a cabo en el laboratorio.

Capítulo 4

ESQUEMAS CLASICOS DE CONTROL BILATERAL

En este capítulo se realizará un estudio teórico de dos de los esquemas de control bilateral clásicos, el posición–posición y el fuerza–posición. El mismo se realiza desde el punto de vista del maestro, de esa manera se puede estudiar la percepción que tiene el operador del entorno, también se analizan algunos factores que influyen en el rendimiento durante la interacción con el entorno.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera: se inicia con la presentación de cada esquema, se obtienen las distintas ecuaciones que gobiernan sus comportamientos y se presentan las distintas convenciones que van a ser usados; Seguidamente, se procede a analizar el esquema posición-posición, determinando la influencia que tiene cada parámetro sobre la percepción que tiene el operador del entorno, luego se determina el error en régimen permanente entre el maestro y el esclavo; por ultimo, se presenta los resultados experimentales donde se muestra el desempeño del esquema. Finalmente, se realiza un estudio paralelo con el esquema de control fuerza-posición.

4.1 Esquemas clásicos de control bilateral

Para la presentación de los distintos esquemas de control bilateral, se tomará en consideración el manipulador esclavo y el dispositivo maestro de un solo grado de libertad. Como se menciona en [Peñin 98], el análisis de un sistema de un solo grado de libertad es lo suficientemente complejo, que habitualmente se consideran los grados de libertad de los dispositivos que conforman el sistema bilateral desacoplados entre si.

En la figura 4.1, se puede observar el esquema general de un sistema bilateral teleoperado. El mismo se implementa a partir de dispositivos de un eslabón con un solo grado de libertad rotatorio y un actuador bien sea eléctrico o hidráulico; además, se tienen distintos tipos de sensores para adquirir medidas como posición, velocidad, fuerza/parr. Ambos dispositivos (maestro y esclavo), mantienen una comunicación fluida donde intercambian el estado de cada uno entre sus respectivos controladores, de tal manera que se pueda implementar distintos tipos de leyes de control.

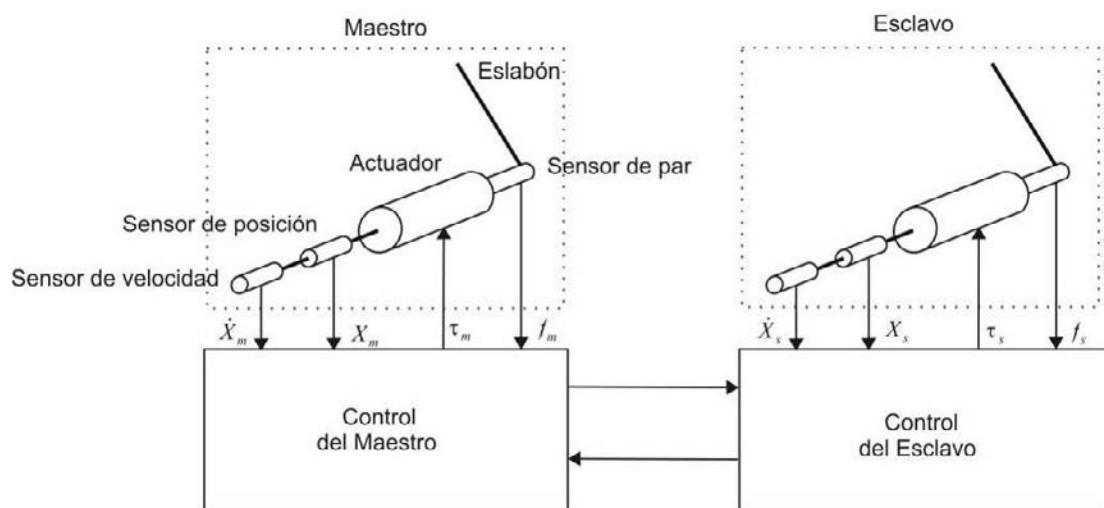


Figura 4.1 Esquema General de control bilateral

Este es un esquema general, a partir del mismo se obtienen arquitecturas más simples o complejas, dependiendo del uso que se le de a la información obtenida por los sensores disponibles en cada dispositivo.

Para el desarrollo de la presente tesis, se asumirán las siguientes convenciones:

El modelo de los sistemas maestro y esclavos se tomarán como una masa M y con una viscosidad B (Figura 2.9). Con el objetivo de simplificar los modelos del Maestro y Esclavo se expresarán de manera genérica como $M(s)$ y $S(s)$ respectivamente.

$$M(s) = \frac{1}{m_m s^2 + b_m s} \quad (4.17)$$

$$S(s) = \frac{1}{m_s s^2 + b_s s} \quad (4.18)$$

El modelo del entorno a usar será el modelo Kelvin simplificado, presentado en el epígrafe 2.4. Al igual que los modelos de los sistemas maestro y esclavo, el entorno ($B_e \cdot S + K_e$) se representará como $E(s)$.

En los casos en los cuales aplique, los reguladores del maestro y del esclavo independientemente de cual sea el tipo, serán expresados como $R_m(s)$ y $R_s(s)$. En la tesis se asumirán como controladores proporcionales.

4.2 Esquema de control posición–posición

Este esquema (Figura 4.2) se basa en el intercambio de las lecturas de posición tanto del maestro como del esclavo. En el lado maestro, se realiza la lectura de su posición y es enviada al esclavo, donde existe un bucle cerrado de posición tomando como referencia la posición del maestro. En el esclavo también se hace la lectura de posición y es enviada al maestro, donde también existe un bucle cerrado en posición tomando como referencia la posición del esclavo. Es el esquema más sencillo de implementar, dado que la reflexión de fuerzas se basa en las diferencias entre las posiciones del maestro y del esclavo, por lo que no es necesario hacer uso de sensores de fuerzas.

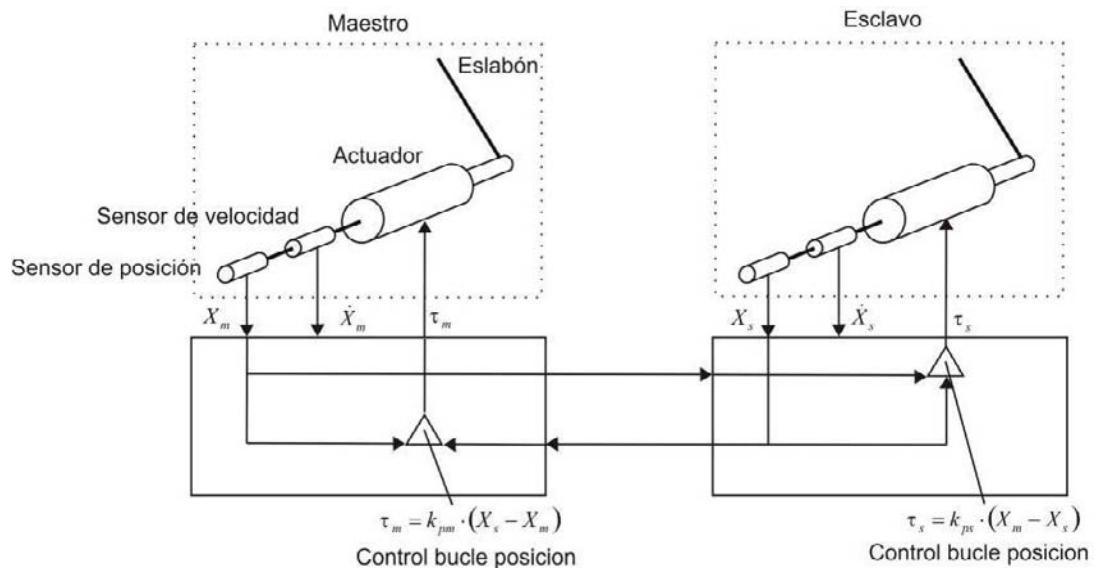


Figura 4.2 Esquema posición-posición

El modelado del esquema general de un sistema de teleoperación para un grado de libertad y control bilateral, fue presentado en el epígrafe 2.4. Del mismo se obtienen los modelos de los esquemas básicos, como es el caso del esquema posición – posición que puede ser observado en la figura 4.3.

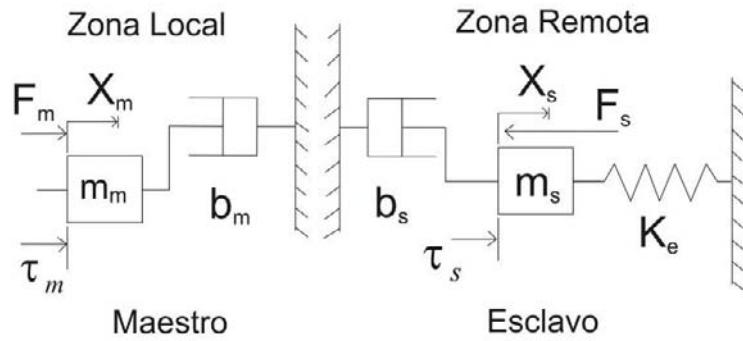


Figura 4.3 Modelo del sistema de teleoperación posición-posición

En la zona local se observa que el manipulador maestro es modelado como una masa m_m que en su movimiento debe vencer un rozamiento viscoso b_m , la fuerza ejercida por el operador viene dada por F_m , mientras que la ejercida por su accionamiento τ_m . En la zona remota se tiene que el manipulador esclavo es modelado por una masa m_s que en su movimiento debe vencer un rozamiento viscoso b_s , la fuerza ejercida por su accionamiento viene dada por τ_s . La rigidez del entorno viene dada por K_e mientras que la fuerza de reacción del entorno F_s . Las ecuaciones que rigen el comportamiento de este sistema se presentan a continuación:

$$f_m + \tau_m = m_m \cdot \ddot{X}_m + b_m \cdot \dot{X}_m \quad (4.18)$$

$$\tau_s + f_s = m_s \cdot \ddot{X}_s + b_s \cdot \dot{X}_s \quad (4.19)$$

$$f_s = K_e \cdot X_s \quad (4.20)$$

$$\tau_m = k_{pm} \cdot (X_s - X_m) \quad (4.21)$$

$$\tau_s = k_{ps} \cdot (X_m - X_s) \quad (4.22)$$

Las ecuaciones (4.18), (4.19) y (4.20) describen las interacciones físicas de los modelos, mientras que las ecuaciones (4.21) y (4.22) son las que describen el control que se ejerce, que en este caso se trata del posición – posición. Finalmente, el diagrama en bloques del esquema puede observarse en la figura 4.4.

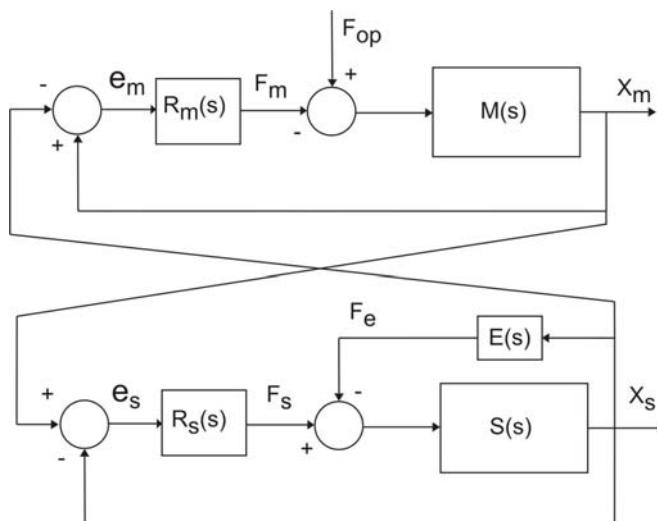


Figura 4.4 Diagrama de bloques del esquema posición-posición
Del esquema posición-posición presentado, se pueden deducir las ecuaciones que lo describen:

$$X_m(s) = M(s) \cdot (F_{op}(s) - F_m(s)) \quad (4.23)$$

$$F_m(s) = R_m(s) \cdot e_m(s) \quad (4.24)$$

$$e_m(s) = X_m(s) - X_s(s) \quad (4.25)$$

$$X_s(s) = S(s) \cdot (F_s(s) - F_e(s)) \quad (4.26)$$

$$F_s(s) = R_s(s) \cdot e_s(s) \quad (4.27)$$

$$e_s(s) = X_m(s) - X_s(s) \quad (4.28)$$

$$F_e(s) = E(s) \cdot X_s(s) \quad (4.29)$$

4.2.1 Análisis del Esquema posición – posición

Dado que se está tratando con un esquema de control bilateral, se hace necesario tomar en consideración cuales son las variables de mayor peso a la hora de evaluar su rendimiento. Por ello, es necesario considerar cual es el objetivo del control bilateral. El primero es permitir al dispositivo esclavo, seguir las trayectorias descritas por el dispositivo maestro; el segundo es reflejar de algún modo las fuerzas generadas por el contacto del dispositivo esclavo con su entorno de operación. Teniendo claro los objetivos de los esquemas bilaterales, se procederá a realizar el análisis tomando como base:

- La percepción que tiene el operador del entorno.
- Error en estado estacionario entre el maestro y el esclavo.

Dicho estudio se realizará analizando la influencia que tienen los parámetros que componen el esquema como lo son: dinámica del maestro, dinámica del esclavo, características del entorno de contacto, etc. sobre las bases mencionadas.

4.2.1.1 Percepción del entorno por parte del operador.

Para iniciar el análisis es necesario simplificar el esquema de manera tal que se puedan aislar las variables que son de interés, en este caso son la fuerza aplicada sobre el operador F_{op} y el movimiento del maestro X_m . La relación que existe entre esas variables representa la percepción que tiene el operador del entorno remoto. Realizando las simplificaciones pertinentes, se llega a un esquema reducido que puede observarse en la figura 4.5:

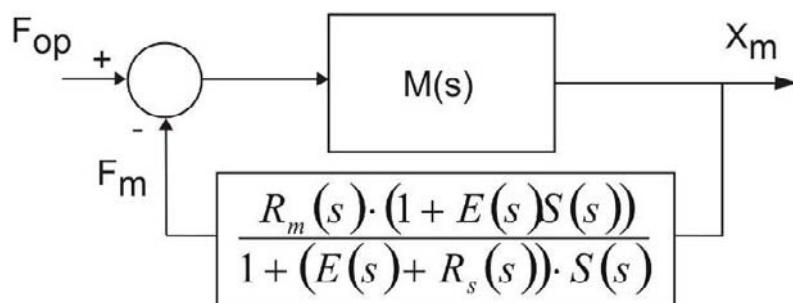


Figura 4.5 Diagrama de bloques del esquema posición-posición visto desde el maestro

Una aproximación válida para el análisis de la influencia de los parámetros que componen el esquema en el desempeño del mismo es analizar sus casos extremos. Por lo tanto esa será la metodología aplicada, analizar cuando el parámetro X de interés tienda a cero ($X \rightarrow 0$) o cuando tienda a infinito ($X \rightarrow \infty$).

4.2.1.2 Influencia del Entorno ($E(s)$)

Cuando el entorno tiende a cero ($E(s) \rightarrow 0$); es decir, que existe una colisión con un entorno muy suave, o cuando es igual a cero el movimiento es libre; el diagrama visto en la figura 4.6 queda simplificado de la siguiente manera:

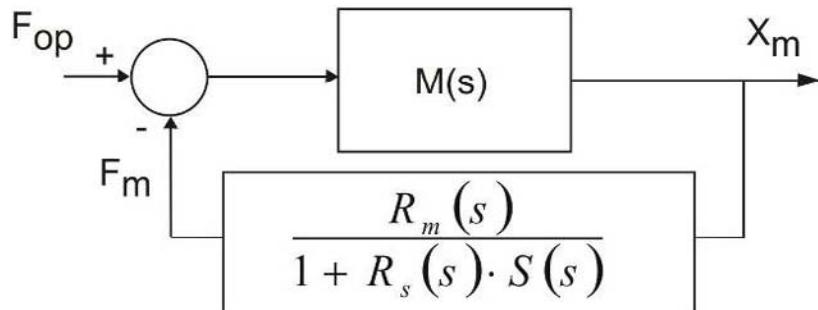


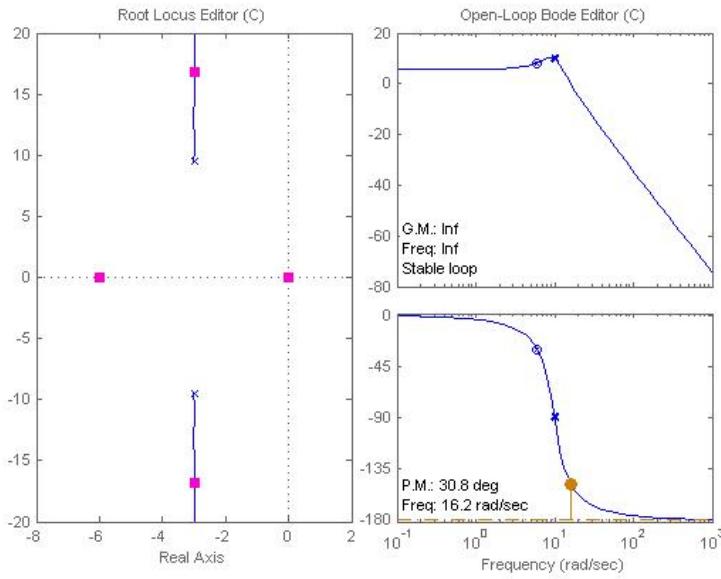
Figura 4.6 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow 0$

De los diagramas resultantes se pueden observar que cuando el entorno tiende a cero ($E(s) \rightarrow 0$), el entorno que percibe el operador viene representado por:

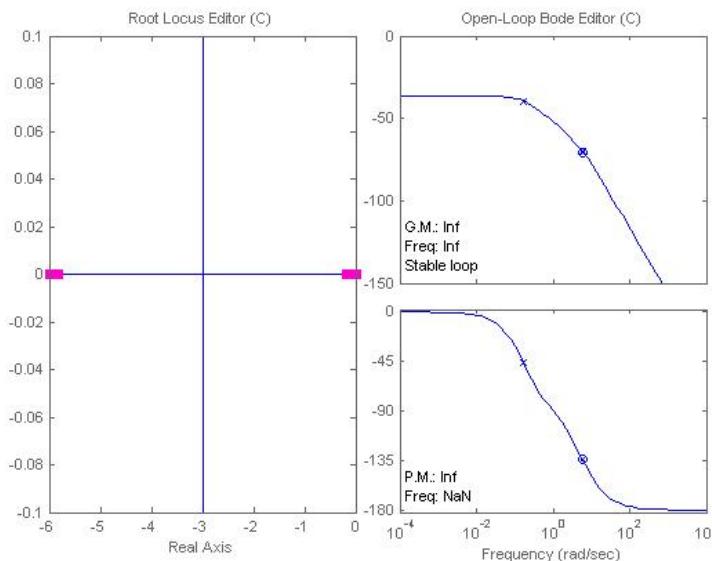
$$\frac{R_m(s)}{1 + R_s(s) \cdot S(s)} \quad (4.30)$$

En este caso, aún cuando no exista ningún tipo de colisión, el operador sentirá una realimentación dada por la ecuación (4.30), por lo que la mejor forma de reflejar un entorno muy suave es tener una K_{pm} baja y una K_{ps} elevada, de tal manera que la ganancia de la función de transferencia representada por (4.30) sea baja y por lo tanto la magnitud de su respuesta sea lo menos significativa de cara al operador.

Dado que se está realizando el análisis visto desde el punto de vista del maestro, a continuación de presenta en lugar geométrico de las raíces (Figura 4.7) en función del regulador del Maestro $R_m(s)$. Para el mismo se obtuvo usando reguladores proporcionales en los sistemas maestro y esclavo.


 Figura 4.7 LGR sistema BSP-PUMA, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 1900$ y $K_{ps} = 1000$

Del mismo se puede decir que a medida que la constante proporcional del controlador del maestro K_{pm} es mayor, la respuesta del sistema se hace más oscilatoria dado que la parte imaginaria de los polos complejos conjugados se hace más grande. Por otra parte, la constante proporcional del esclavo K_{ps} , a medida que se hace menor, el sistema dependiendo de los valores de K_{pm} puede llegar a tener todos los polos reales y la respuesta no sería oscilatoria (figura 4.8), pero si se hace grande como el caso presentado en la figura 4.7, la respuesta sería oscilatoria sin importar el valor de K_{pm} . El efecto combinado de ambas tiene influencia en la ganancia del sistema por supuesto, con una tendencia a bajar si ambas constantes bajan y a subir si ambas suben. Aunque cuando sube la constante K_{pm} hasta cierto nivel el pico de sobreoscilación aumenta demasiado sin embargo la ganancia no sube proporcionalmente. Este efecto se puede contrarrestar subiendo el valor de la constante K_{ps} , donde aumentando su valor aumenta la respuesta en régimen permanente sin aumentar la sobreoscilación (y por ende aumentando la ganancia) tal como se puede observar en la figura 4.8.


 Figura 4.8 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 0.15$ y $K_{ps} = 10$

En la figura 4.9a, se presenta la respuesta temporal del sistema ante una entrada tipo impulso para el sistema de la figura 4.7 y la figura 4.9b para el caso de la figura 4.8.

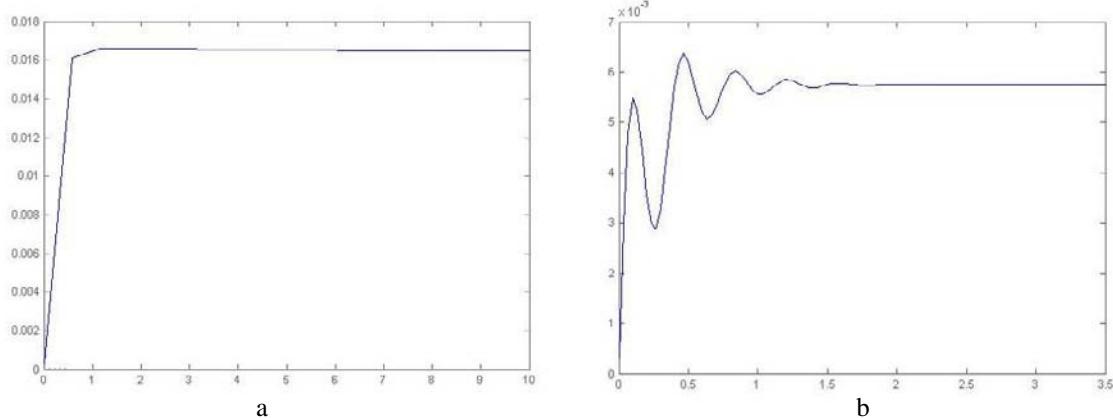


Figura 4.9 Respuesta ante una entrada tipo impulso de los sistemas vistos en: a) Figura 4.7 y b) Figura 4.8

Cuando el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$), es decir que existe una colisión con un entorno muy duro o fuerte; el diagrama visto en la figura 4.10, queda simplificado de la siguiente manera:

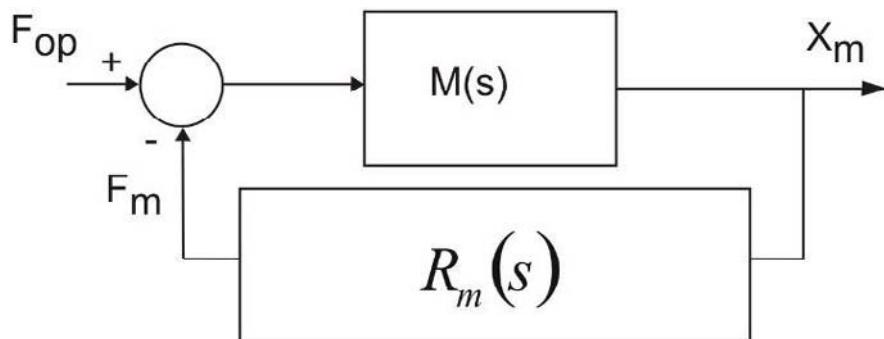


Figura 4.10 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow \infty$

En el caso en que el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$), la percepción que tiene el operador del mismo viene dada exclusivamente por el regulador del maestro $R_m(s)$. Por lo que la mejor forma de reflejar el entorno al operador es mediante una K_{pm} elevada, en este caso el resto de los parámetros son irrelevantes. Al igual que se realizó con el caso en el cual $E(s) \rightarrow 0$, a continuación se presenta el lugar geométrico de las raíces, solo que en este caso el único parámetro que influye es el propio controlador del maestro.

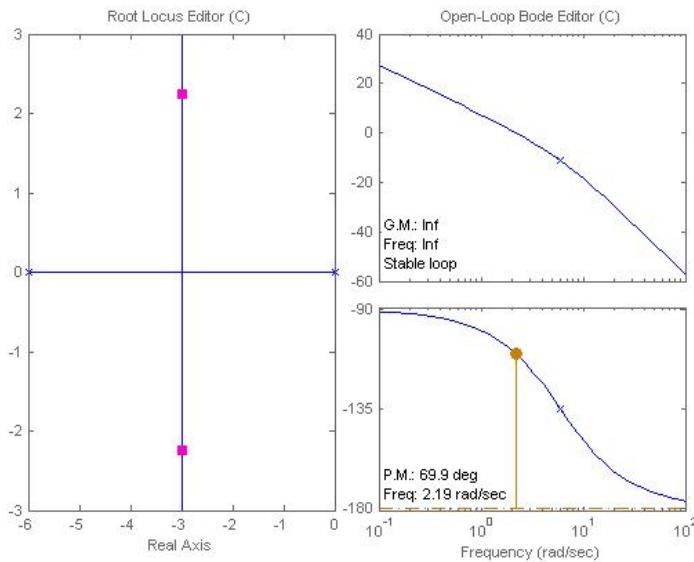


Figura 4.11 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $E(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 140$

Por lo tanto, mientras más bajo sea el valor de la constante proporcional K_{pm} , el sistema será menos oscilatorio pero más lento, mientras que si es más grande, el sistema comenzará a comportarse de manera oscilatoria dado que se origina un par de polos complejos conjugados pero el sistema se estabilizará más rápido.

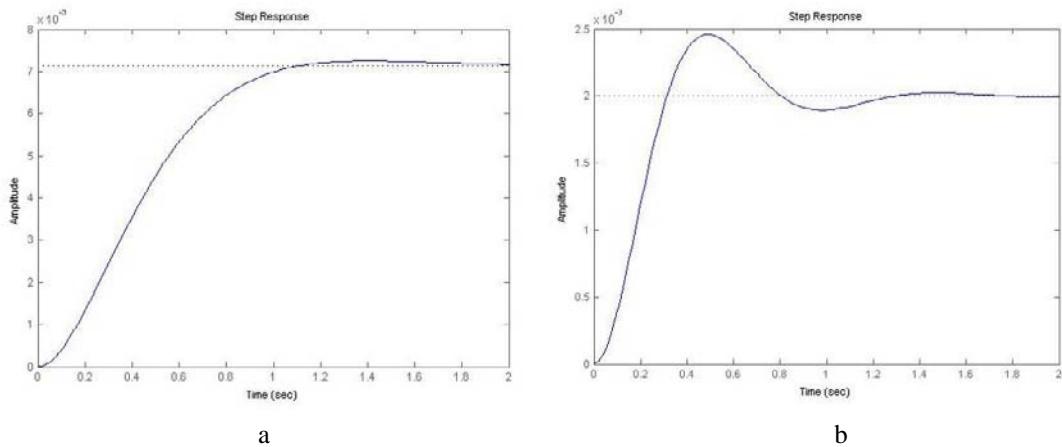


Figura 4.12 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_{pm} = 140$ y b) $K_{pm} = 500$

Observando con detenimiento los resultados de las simulaciones de las figuras 4.8, 4.9, 4.11 y 4.12, se puede notar en primer lugar que el regulador del Maestro debe tener valores bajos, especialmente si el valor del regulador del esclavo es bajo, de lo contrario el sistema Maestro tiende a ser oscilatorio, lo que no es deseable (Figura 4.9b). El regulador del esclavo puede ser elevado, y en caso de disminuir su valor lo que origina es que tanto la respuesta del maestro como la del esclavo tengan una

sobreoscilación, más suave en el esclavo; que si bien es cierto no sería lo deseable, en caso de que no sea muy pronunciada puede ser aceptable (Figura 4.12b).

4.2.1.3 Influencia de la dinámica del esclavo.

Cuando la dinámica del esclavo es muy liviana ($S(s) \rightarrow 0$), el diagrama visto en la figura 4.5 queda simplificado tal como se puede observar en la figura 4.13. En este caso la realimentación al operador viene determinada exclusivamente por la ganancia del regulador del maestro, por lo que nos encontramos con el mismo caso en el que el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$).

Es por ello que para este caso aplica el mismo análisis, lugar geométrico de las raíces y respuesta temporal que el presentado para cuando el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$), por lo que se obviara repetir el análisis.

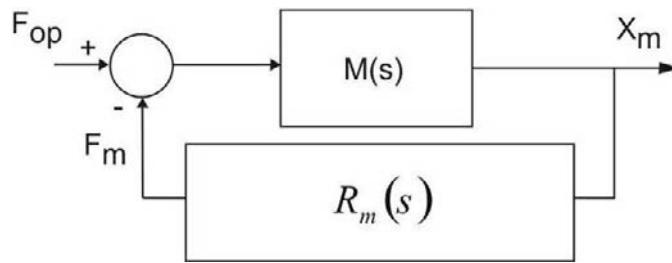


Figura 4.13 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow 0$

Cuando la dinámica del esclavo es muy elevada ($S(s) \rightarrow \infty$), el diagrama visto en la figura 4.5 queda simplificado tal como de acuerdo a la figura 4.14. Del mismo se obtiene que el entorno que percibe el operador viene determinado por:

$$\frac{R_m(s) \cdot E(s)}{R_s(s) + E(s)} \quad (4.31)$$

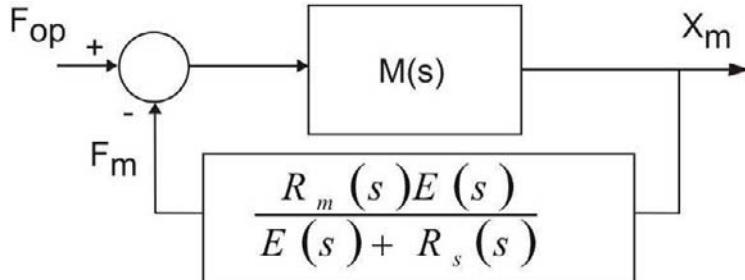


Figura 4.14 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow \infty$

En el caso en el que el dispositivo esclavo tiene una dinámica elevada ($S(s) \rightarrow \infty$) la realimentación al operador depende exclusivamente de los reguladores del maestro y del esclavo, por lo tanto la mejor forma para que el operador perciba el entorno sería que el regulador del esclavo $R_s(s)$ fuese mucho mayor que el valor del entorno y el regulador del maestro $R_m(s)$ de dimensiones equivalentes de tal manera que la simplificación de la función de transferencia F_m/X_m sea igual a $E(s)$, y por lo tanto el resultado final es que el operador perciba el entorno. Esto se cumple solo cuando el

entorno ($E(s) \rightarrow 0$), en caso de que el entorno sea elevado ($E(s) \rightarrow \infty$), puede requerir una $R_s(s)$ tan elevada que en la realidad puede que no sea implementable. Por lo tanto, en ese caso lo que se tendrá es una reflexión escalada del entorno $K \times E(s)$ donde:

$$K = \frac{R_m(s)}{R_s(s) + E(s)} \quad (4.32)$$

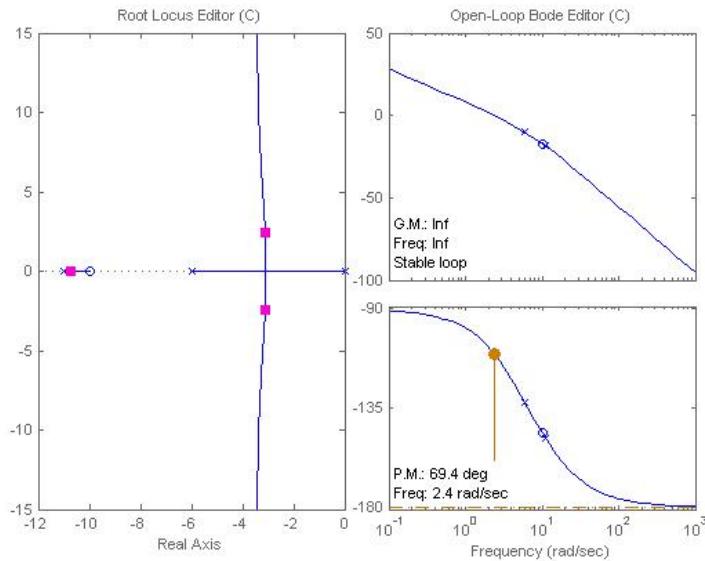


Figura 4.15 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $S(s) \rightarrow \infty$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 100$

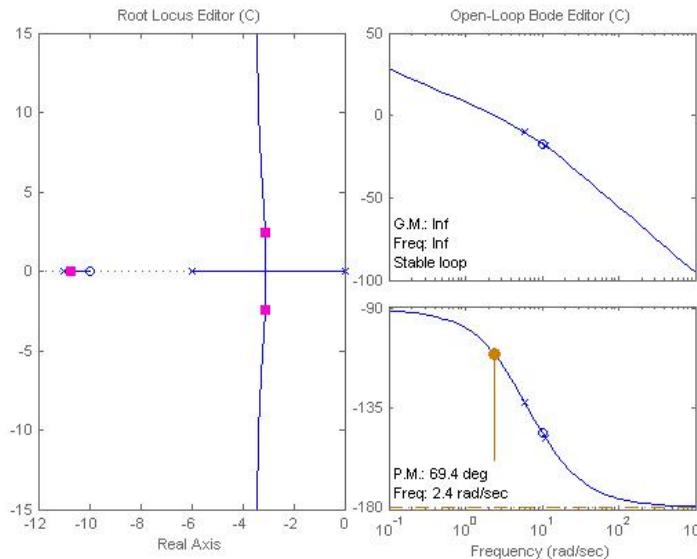


Figura 4.16 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $S(s) \rightarrow \infty$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 1000$

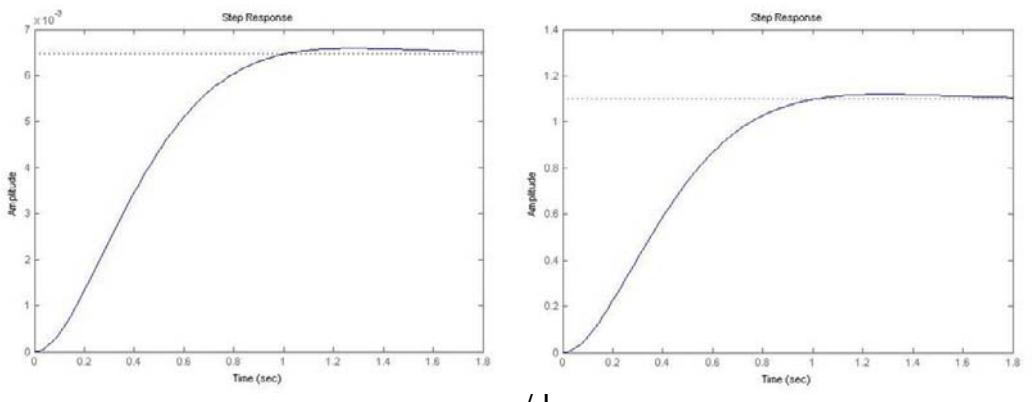


Figura 4.17 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_{ps} = 170$ y b) $K_{ps} = 1000$

En este caso los valores de K_{pm} elevados introducen sobreoscilación, mientras que el parámetro K_{ps} a medida que es más bajo la respuesta del sistema se hace más lento.

4.2.1.4 Influencia de la dinámica del maestro.

Independientemente si el dispositivo maestro usado tiene una dinámica baja ($M(s) \rightarrow 0$) o alta ($M(s) \rightarrow \infty$), el diagrama del esquema posición-posición visto desde el Maestro se mantiene igual, tal como se puede observar en la figura 4.18. Lo primero que se debe tomar en cuenta del mismo, es que el entorno que percibe el operador, es función del desplazamiento que tenga el maestro, dado que la función de transferencia del lazo de realimentación viene dada por la relación F_m/X_m . Esto quiere decir, que el operador debe ejercer una fuerza F_{op} tan elevada como la dinámica del maestro requiera para que exista un desplazamiento y efectivamente pueda comenzar a percibir el entorno. Por lo que el operador percibe los efectos combinados de la dinámica del maestro y la realimentación del entorno.

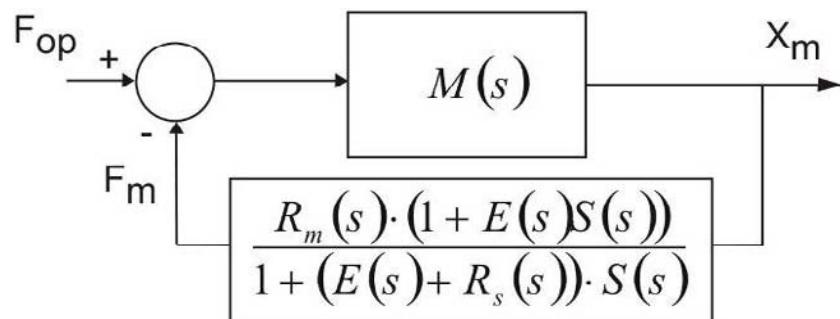


Figura 4.18 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $M(s) \rightarrow 0$

Por el contrario, si la dinámica del maestro es baja ($M(s) \rightarrow 0$), entonces se hace transparente al operador y la percepción del entorno viene dada por la función de transferencia del lazo de realimentación. En ambos casos, la percepción del entorno por parte del operador viene dada, total o parcialmente por:

$$\frac{R_m(s) \cdot (1 + E(s) \cdot S(s))}{1 + (E(s) + R_s(s)) \cdot S(s)} \quad (4.33)$$

En este caso, no es posible llegar a una solución basándose simplemente en los reguladores del maestro o el esclavo como en los casos anteriores, por lo que habría que recurrir a una combinación de los casos vistos anteriormente, para lograr una combinación que permita al operador percibir de la mejor forma el entorno $E(s)$. Un ejemplo del lugar geométrico de las raíces para este caso se puede ver en la figura 4.19.

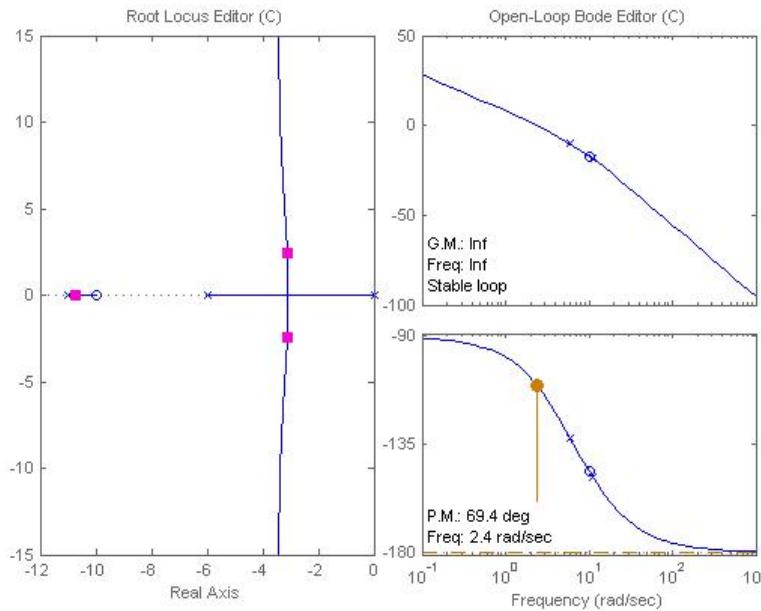


Figura 4.19 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_{pm} = 170$ y $K_{ps} = 1000$

4.2.2 Error en régimen permanente.

El objetivo del presente epígrafe, es conocer el error final que existe entre el maestro y el esclavo. Este es un parámetro que junto con el análisis dinámico de la respuesta temporal muestran la capacidad del dispositivo esclavo de seguir fielmente las trayectorias generadas a través del dispositivo maestro, y permite conocer los distintos parámetros que influyen. Suponiendo que se tiene un sistema estable con una dinámica de la respuesta temporal apropiada, se procederá a calcular el error en régimen permanente entre el dispositivo maestro y el esclavo ante una entrada por parte del operador. Lo primero que se necesita, es conocer las funciones de transferencia de lazo cerrado que rigen el comportamiento del maestro y el esclavo ante una entrada del operador, las cuales son:

$$\frac{X_m}{F_{op}} = \frac{M(s) \cdot (1 + (E(s) + R_s(s)) \cdot S(s)))}{1 + (E(s) + R_s(s)) \cdot S(s) + R_m(s) \cdot (1 + E(s) \cdot S(s)) \cdot M(s)} \quad (4.34)$$

$$\frac{X_s}{F_{op}} = \frac{M(s) \cdot S(s) \cdot R_s(s)}{1 + (E(s) + R_s(s)) \cdot S(s) + R_m(s) \cdot (1 + E(s) \cdot S(s)) \cdot M(s)} \quad (4.35)$$

Suponiendo que se tiene un sistema que sea estable, es posible determinar la posición final del sistema haciendo uso del teorema del valor final [Ogata 93] ante una entrada tipo escalón por parte del operador humano. Para realizar el análisis se hará uso de las ecuaciones (4.34) y (4.35), que representan la relación entre la respuesta del maestro y el esclavo ante una entrada por parte del operador humano. De tal manera tenemos:

$$X_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{m_s s^2 + b_s s + b_e s + K_{ps} + K_e}{s (m_m s^2 + b_m s + K_{pm}) \cdot (m_s s^2 + b_s s + b_e s + k_{ps} + K_e) - K_{pm} K_{ps}} \quad (4.36)$$

$$X_m(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_{pm} K_e} \quad (4.37)$$

$$X_s(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_{ps}}{s (m_m s^2 + b_m s + K_{pm}) \cdot (m_s s^2 + b_s s + b_e s + k_{ps} + K_e) - K_{pm} K_{ps}} \quad (4.38)$$

$$X_s(\infty) = \frac{K_{ps}}{K_{pm} K_e} \quad (4.39)$$

Las ecuaciones (4.37) y (4.39), expresan el valor final de la posición del maestro y el esclavo ante una entrada tipo escalón por parte del operador; en las mismas, se puede notar que a medida que el entorno se hace mas rígido, el valor final tenderá a disminuir, es decir que tanto el maestro como el esclavo disminuirán la magnitud de su movimiento. Dichas ecuaciones no son aplicables cuando el entorno $E(s) = 0$, dado que para ese caso en particular existiría un polo en el origen y el teorema del valor final no sería aplicable.

La importancia de conocer el valor de posición final tanto del maestro como del esclavo se encuentra en que, nos permite conocer el error en régimen permanente entre los mismos mediante su sustracción, dicho esto tenemos:

$$E(\infty) = X_m(\infty) - X_s(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_{pm} K_e} - \frac{K_{ps}}{K_{pm} K_e} = \frac{1}{K_{pm}} \quad (4.40)$$

De la ecuación (4.40), tenemos que el error en régimen permanente es completamente independiente del entorno, la dinámica del maestro y del esclavo, depende exclusivamente de la ganancia del regulador en el maestro, a mayor ganancia menor será el error en régimen permanente del sistema en general.

4.2.3 Implementación del esquema de control posición-posición.

En este apartado se presenta el resultado experimental de la implementación del esquema en la plataforma diseñada en el capítulo 3. La actuación del esclavo se realiza mediante una servoválvula hidráulica. En la figura 4.22, se muestra la evolución de la articulación WP durante el contacto, en ella se muestra la posición del maestro, del esclavo y la salida de la servoválvula. La razón por la cual se muestra esta articulación en particular, es que en ella se encuentra implícita mucha información adicional como lo es el efecto de la gravedad, y la sensibilidad de las fuerzas ejercidas dado que se encuentra cercana al extremo.

En la figura 4.20, se muestra como el esclavo ejerce fuerzas más grandes al entorno a medida que el error de posición se incrementa. Más aún, el operador percibe fuerzas mayores en este caso. Los efectos de la gravedad en esta articulación pueden ser claramente identificados en el experimento. Cuando la posición del maestro se incrementa, el error de posición se incrementa de forma más rápida, en comparación cuando la posición del maestro se decremente. Este fenómeno se debe a los efectos de la

gravedad, dado que la articulación WP se mueve en contra del efecto de la gravedad cuando la posición del maestro se incrementa. Otro efecto que puede ser observado, es que la actuación de la servoválvula es mayor cuando se mueve en contra de la gravedad. Por lo tanto, el sistema responde más lento, lo que quiere decir que el error de posición es mayor.

La poca sensibilidad es el mayor inconveniente de este tipo de control bilateral. Esto se debe al efecto de arrastre que tiene el maestro sobre el esclavo, ya que todos los movimientos implican un error de posición, de igual manera dicho error es también reflejado en el maestro. La principal ventaja es la robustez en el control y la facilidad de implementación, dado que las señales de posición son las únicas en ser transmitidas y no se necesitan sensores de fuerza.

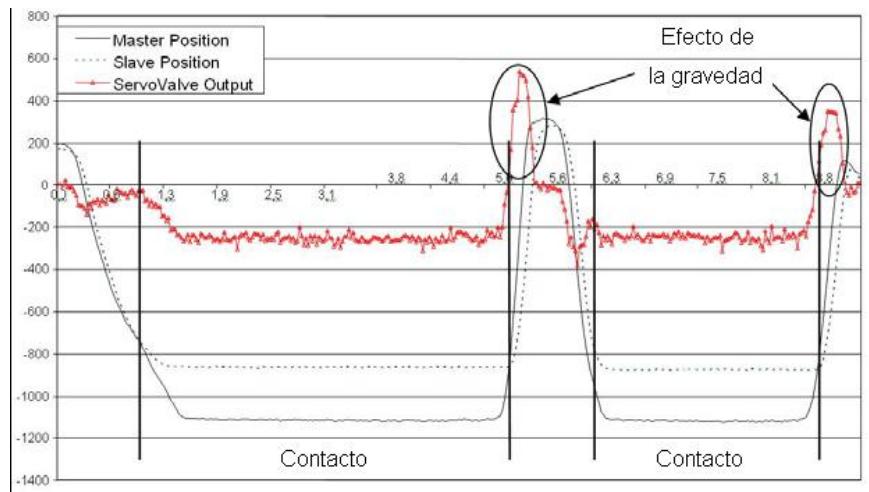


Figura 4.20 Desempeño del esquema Posición-Posición durante contacto

4.3 Esquema de control fuerza-posición.

En este esquema al igual que el posición-posición, existe un bucle cerrado de posición en el esclavo, tomando como referencia la lectura de posición del maestro. Pero su diferencia radica en la existencia de un sensor que sirva para obtener la fuerza/par que aplica el esclavo sobre su entorno o viceversa, esta información es enviada al maestro donde este refleja esa lectura en bucle abierto de fuerza sobre el operador.

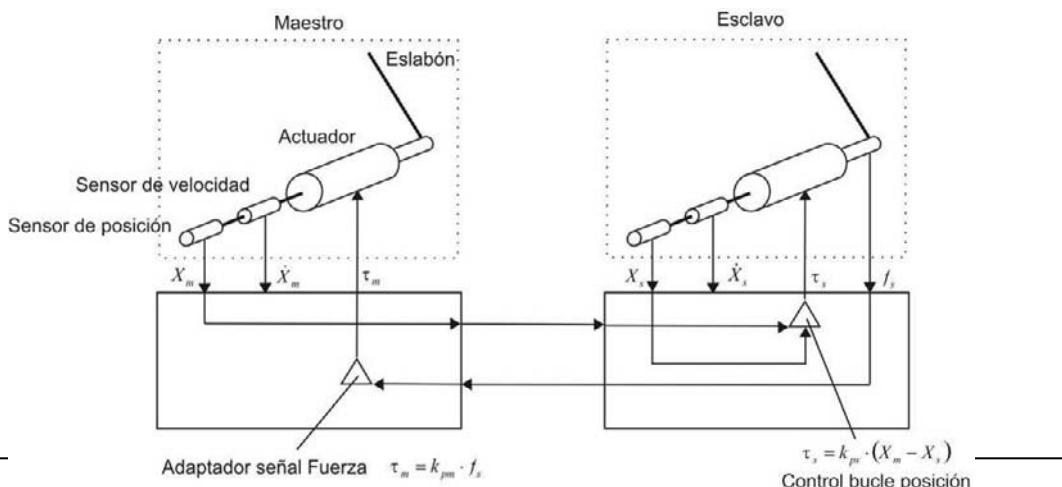


Figura 4.21 Esquema Fuerza - Posición

Nuevamente tomando como base el modelo simplificado de un sistema maestro esclavo de la figura 4.22.

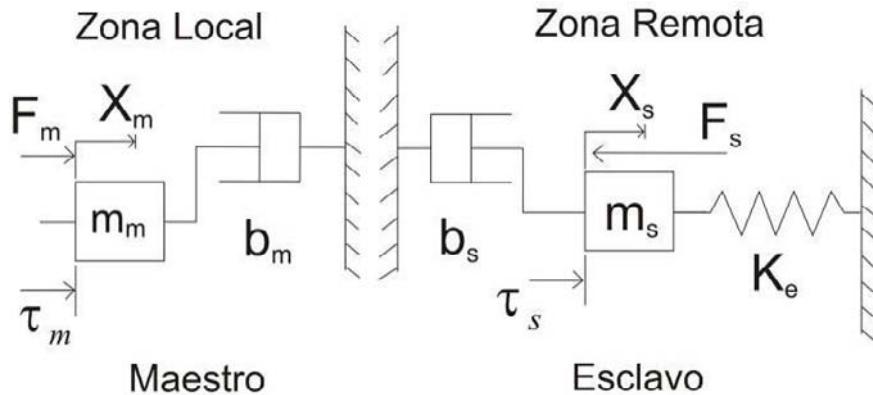


Figura 4.22 Modelo Simplificado de un sistema Maestro - Esclavo

Donde el manipulador maestro es modelado como una masa m_m que en su movimiento debe vencer un rozamiento viscoso b_m , la fuerza ejercida por el operador viene dada por F_m , mientras que la ejercida por su accionamiento τ_m . En la zona remota se tiene que el manipulador esclavo es modelado por una masa m_s que en su movimiento debe vencer un rozamiento viscoso b_s , la fuerza ejercida por su accionamiento viene dada por τ_s . La rigidez del entorno viene dada por K_e mientras que la fuerza de reacción del entorno F_s . Y consideración que se trata de un sistema Fuerza-posición, las ecuaciones que rigen el comportamiento de este sistema se presentan a continuación:

$$f_m - \tau_m = m_m \cdot \ddot{X}_m + b_m \cdot \dot{X}_m \quad (4.41)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \cdot \ddot{X}_s + b_s \cdot \dot{X}_s \quad (4.42)$$

$$f_s = K_e \cdot X_s \quad (4.43)$$

$$\tau_m = k_f \cdot f_s \quad (4.44)$$

$$\tau_s = k_{ps} \cdot (X_m - X_s) \quad (4.45)$$

Las ecuaciones (4.41), (4.42) y (4.43) describen las interacciones físicas de los modelos, mientras que las ecuaciones (4.44) y (4.45) son las que describen el control que se ejerce, que en este caso se trata del posición – posición. El diagrama en bloque del esquema fuerza – posición puede ser observado en la figura (4.23) que se muestra a continuación:

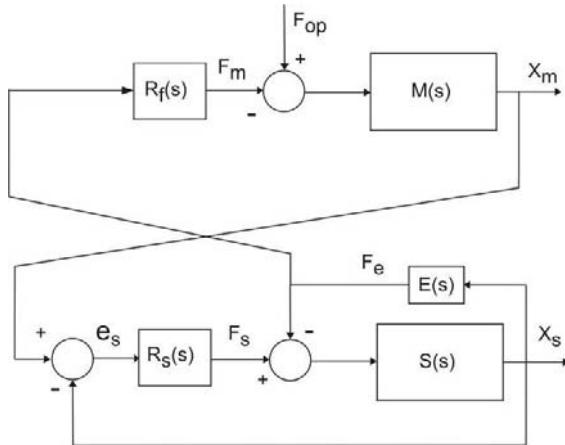


Figura 4.23 Diagrama de bloques del esquema Fuerza-Posición

Del esquema Fuerza-Posición presentado, se pueden deducir las ecuaciones que lo describen:

$$X_m(s) = M(s) \cdot (F_{op}(s) - F_m(s)) \quad (4.46)$$

$$F_m(s) = R_f(s) \cdot f_e(s) \quad (4.47)$$

$$X_s(s) = S(s) \cdot (F_s(s) - F_e(s)) \quad (4.48)$$

$$F_s(s) = R_s(s) \cdot e_s(s) \quad (4.49)$$

$$e_s(s) = X_m(s) - X_s(s) \quad (4.50)$$

$$F_e(s) = E(s) \cdot X_s(s) \quad (4.51)$$

4.3.1 Análisis del esquema de control fuerza-posición

Al igual que el esquema posición-posición, el esquema fuerza-posición es un esquema de control bilateral, por lo que se realizarán los mismos análisis, los cuales son:

- La percepción que tiene el operador del entorno.
- Error en estado estacionario entre el maestro y el esclavo.

Dicho estudio se realizará analizando la influencia que tienen los parámetros que componen el esquema como lo son: dinámica del maestro, dinámica del esclavo, características del entorno de contacto, etc. sobre las bases mencionadas.

4.3.2 Percepción del entorno

Para iniciar el análisis es necesario simplificar el esquema de manera tal que se puedan aislar las variables que son de interés, en este caso son la Fuerza aplicada sobre el operador F_{op} y el movimiento del Maestro X_m . La relación que existe entre esas variables representa la percepción que tiene el operador del entorno remoto. Realizando

las simplificaciones pertinentes, se llega a un esquema reducido que puede observarse en la figura 4.24:

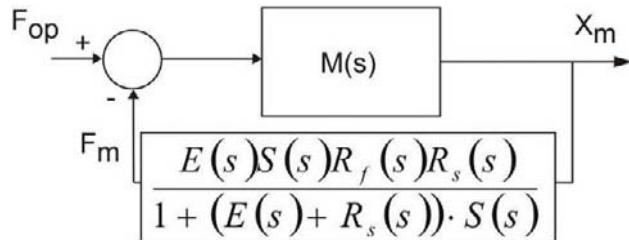


Figura 4.24 Diagrama de bloques del esquema fuerza-posición visto desde el maestro

Nuevamente, para el análisis de la influencia de los parámetros que componen el esquema en el desempeño del mismo se analizará sus casos extremos; es decir, cuando el parámetro X de interés tienda a cero ($X \rightarrow 0$) o cuando tienda a infinito ($X \rightarrow \infty$).

4.3.3 Influencia del Entorno ($E(s)$)

Cuando el entorno tiende a cero ($E(s) \rightarrow 0$), es decir que existe una colisión con un entorno muy suave, o cuando es igual a cero el movimiento es libre; el diagrama visto en la figura 4.25 queda simplificado de la siguiente manera:

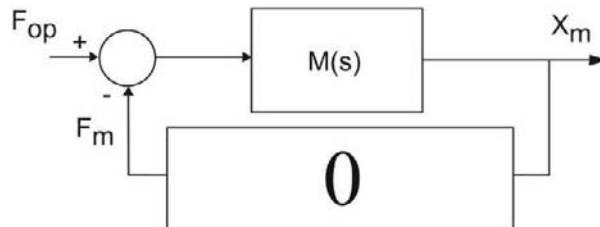


Figura 4.25 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow 0$

Por lo tanto, no existe ninguna realimentación del entorno al operador y la percepción que tiene viene dada únicamente por la propia dinámica del dispositivo Maestro (4.44).

$$M(s) \quad (4.52)$$

Cuando el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$), es decir que existe una colisión con un entorno muy duro o fuerte; el diagrama visto en la figura 4.26, queda simplificado de la siguiente manera:

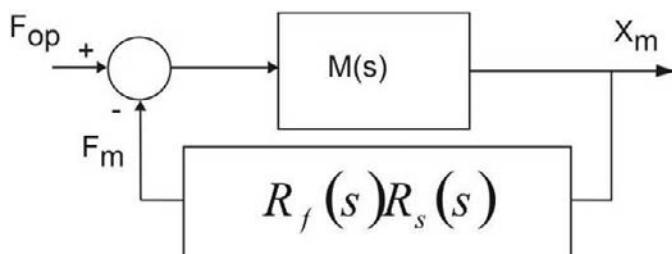


Figura 4.26 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $E(s) \rightarrow \infty$

En este caso la percepción del entorno viene dada por la relación:

$$R_f(s)R_s(s) \quad (4.53)$$

Por lo que la mejor manera de reflejar el entorno es que la combinación de los reguladores K_f y K_{ps} sean grandes, dado que teóricamente el esclavo estaría en contacto con un entorno no deformable, por lo que la realimentación debe ser elevada. A continuación se presenta un ejemplo del lugar geométrico de las raíces para el caso en estudio.

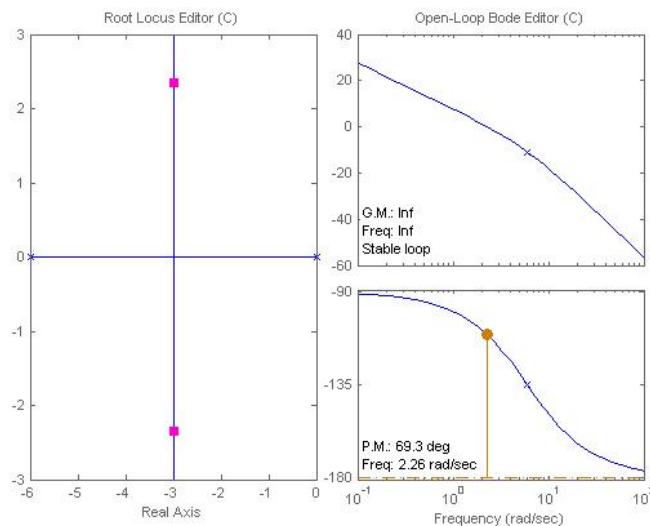


Figura 4.27 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 1.45$ y $K_{ps} = 100$

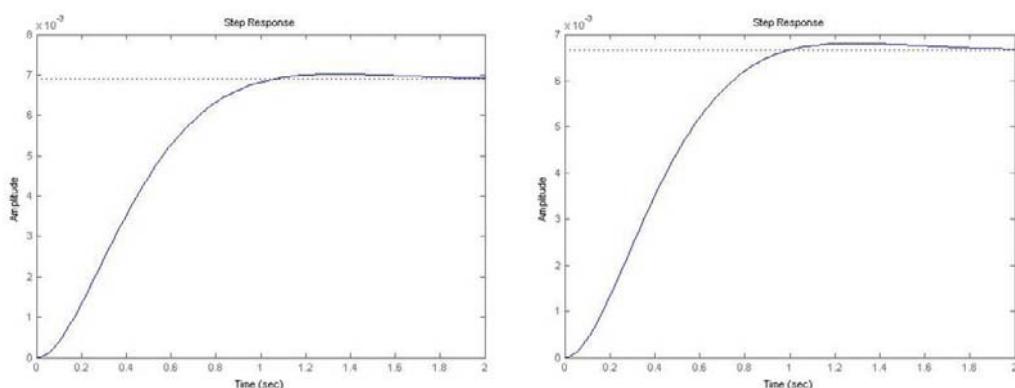


Figura 4.28 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_f = 1.45$, $K_{ps}=100$ y b) $K_f = 0.15$, $K_{ps} = 1000$

El valor de K_f fue seleccionado de manera tal que garantizara la estabilidad del sistema, mientras que se varió el parámetro K_{ps} para observar el comportamiento del sistema, que tal como se puede observar de la figura 4.27, no existe mucha diferencia

más que a medida que aumenta K_{ps} aumenta levemente la sobre oscilación en la respuesta mas no es muy significativa.

4.3.4 Influencia de la dinámica del Esclavo

En el caso en el que la dinámica del esclavo tiende a cero ($S(s) \rightarrow 0$) (figura 4.29), se tiene un comportamiento igual al obtenido cuando el entorno tiende a cero ($E(s) \rightarrow 0$). Por lo tanto, en este caso la realimentación que tiene el operador del entorno es nula, y su percepción viene dada simplemente por la que resulta de la dinámica propia del dispositivo maestro.

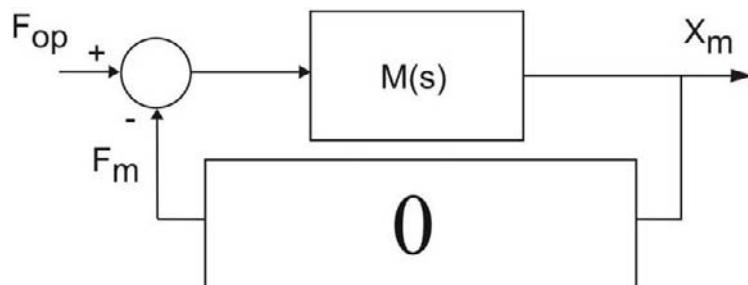


Figura 4.29 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow 0$

Cuando la dinámica del esclavo tiende a infinito ($S(s) \rightarrow \infty$), el diagrama resultante es el siguiente:

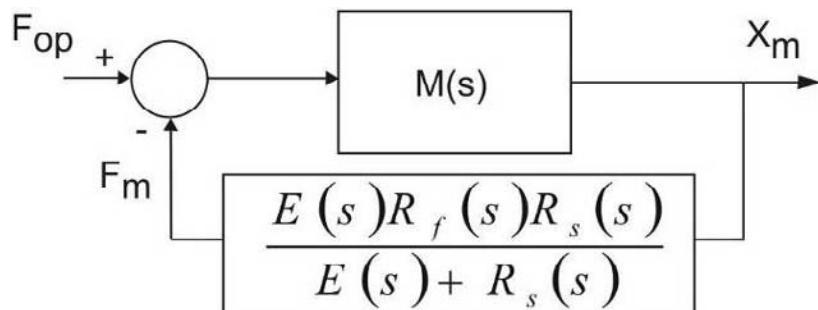


Figura 4.30 Diagrama esquema posición-posición visto desde el maestro cuando $S(s) \rightarrow \infty$

Del mismo se puede observar que la percepción que tiene el operador del entorno viene dada por:

$$\frac{E(s)R_f(s)R_s(s)}{E(s)+R_s(s)} \quad (4.54)$$

En este caso, no existe una manera directa de lograr una combinación que defina una mejor percepción del entorno por parte del operador, debido a que en el denominador se encuentra presente el modelo del entorno, una primera aproximación sería hacer que el regulador K_{ps} sea mucho mayor que $E(s)$ y $R_s(s)$ pequeño, con lo por lo que la función de transferencia del lazo de realimentación se simplificaría a $E(s)$. En otro orden de ideas, esto es válido únicamente cuando se está ante una colisión con un entorno suave, porque en el caso en que exista una colisión con un entorno rígido, la

constante K_{ps} resultaría tan grande que puede no ser implementable en la realidad, por lo que en ese caso la mejor opción sería escoger una K_{ps} lo más baja que permita una respuesta temporal adecuada para el sistema y una K_f lo más elevada posible, esto porque en el caso de una colisión la percepción que debe tener el operador es de una colisión con un entorno rígido.

A continuación se presenta un ejemplo del lugar geométrico de las raíces para el caso en estudio.

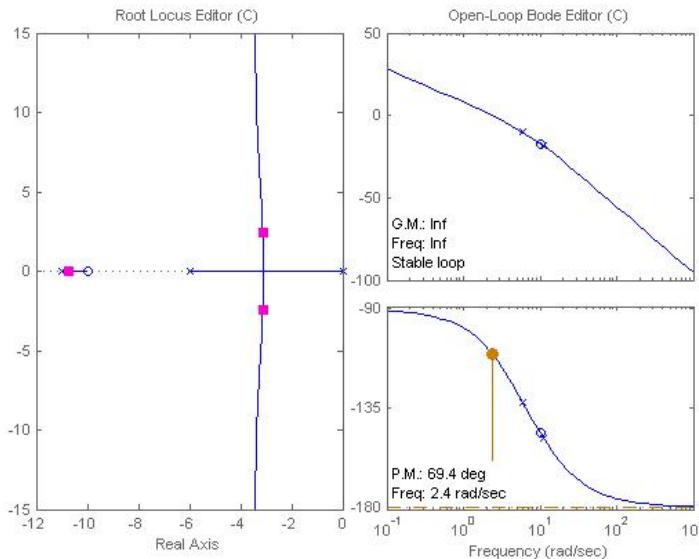


Figura 4.31 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 1.7$ y $K_{ps} = 100$

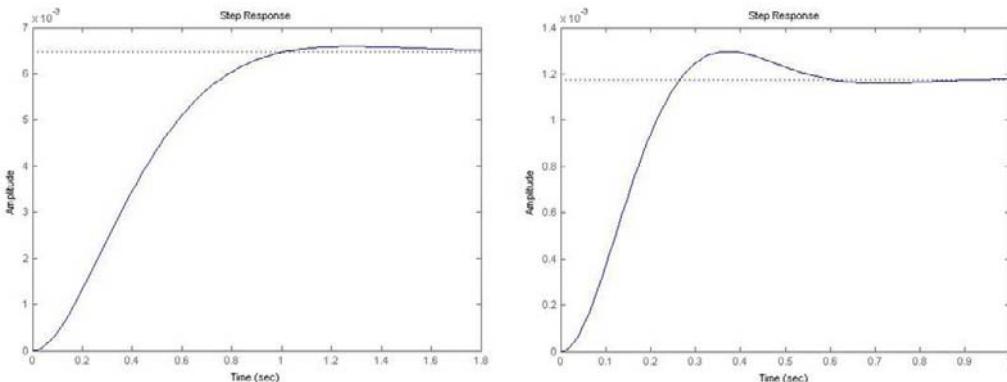


Figura 4.32 Respuesta ante una entrada tipo escalón de los sistemas con: a) $K_f = 1.7$, $K_{ps}=100$ y b) $K_f = 1.7$, $K_{ps} = 1000$

De igual manera se eligió un valor de K_f que garantizara la estabilidad del sistema, posteriormente se varió el valor del K_{ps} para observar la influencia que tenía en el comportamiento del sistema, que al igual que en el caso en que el entorno tiende a infinito ($E(s) \rightarrow \infty$), a medida que aumenta su valor aumenta la sobreoscilación en la respuesta, solo que en este caso el aumento si es significativo.

4.3.5 Influencia de la dinámica del Maestro

Al igual que en el caso del esquema posición-posición, independientemente de la dinámica del dispositivo maestro usado, el diagrama del esquema fuerza-posición visto desde el maestro se mantiene igual, tal como se puede observar en la figura 4.33. Igualmente, el entorno que percibe el operador es función del desplazamiento que tenga el maestro, dado que la función de transferencia del lazo de realimentación viene dada por la relación F_m/X_m . Esto quiere decir, que el operador debe ejercer una fuerza F_{op} tan elevada como la dinámica del maestro requiera para que exista un desplazamiento y efectivamente pueda comenzar a percibir el entorno. Por lo que el operador percibe los efectos combinados de la dinámica del maestro y la realimentación del entorno.

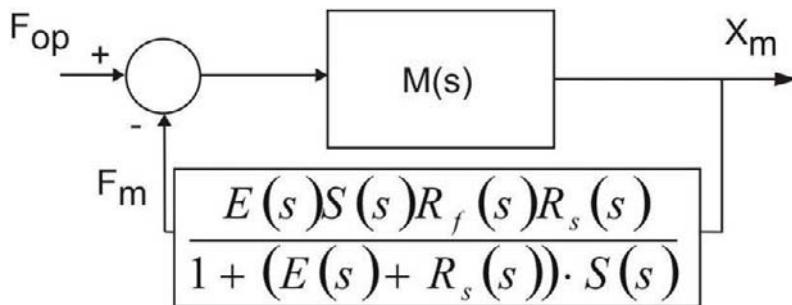


Figura 4.33 Diagrama de bloques del esquema fuerza-posición visto desde el maestro

Por el contrario, si la dinámica del maestro es baja ($M(s) \rightarrow 0$), entonces se hace transparente al operador y la percepción del entorno viene dada por la función de transferencia del lazo de realimentación. En ambos casos, la percepción del entorno por parte del operador viene dada, total o parcialmente por:

$$\frac{E(s) \cdot S(s) \cdot R_f(s) \cdot R_s(s)}{1 + (E(s) + R_s(s)) \cdot S(s)} \quad (4.55)$$

En este caso no es posible llegar a una solución basándose simplemente en los reguladores del maestro o el esclavo como en los casos anteriores, por lo que habría que recurrir a una combinación de los casos vistos anteriormente para lograr una combinación que permita al operador percibir de la mejor forma el entorno $E(s)$. Un ejemplo del lugar geométrico de las raíces para este caso se puede ver en la figura 4.34.

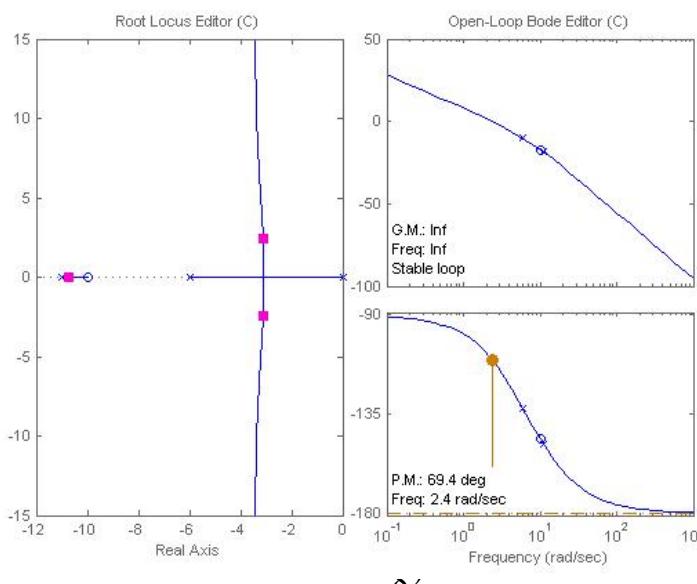


Figura 4.34 Lugar Geométrico de las raíces, cuando $M(s) \rightarrow 0$, $K_f = 170$ y $K_{ps} = 1000$

4.3.6 Error en estado estacionario.

Al igual que se realizó en el esquema posición-posición, suponiendo que el sistema sea estable y la dinámica de la respuesta temporal es adecuada, es posible determinar la posición que asumirá tanto el maestro como el esclavo ante una entrada del operador usando el teorema del valor final. Para realizar el análisis se hará uso de las ecuaciones (4.56) y (4.57), que representan la relación entre la respuesta del maestro y el esclavo ante una entrada por parte del operador humano. De tal manera tenemos:

$$\frac{X_m}{F_{op}} = \frac{(m_s \cdot s^2 + b_s \cdot s + K_{ps} + K_e)}{(m_m \cdot s^2 + b_m \cdot s) \cdot (m_s \cdot s^2 + b_s \cdot s + K_{ps} + K_e) + K_e \cdot K_f \cdot K_{ps}} \quad (4.56)$$

$$\frac{X_s}{F_{op}} = \frac{K_{ps}}{(m_m \cdot s^2 + b_m \cdot s) \cdot (m_s \cdot s^2 + b_s \cdot s + K_{ps} + K_e) + K_e \cdot K_f \cdot K_{ps}} \quad (4.57)$$

$$X_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{m_s s^2 + b_s s + K_{ps} + K_e}{s \cdot (m_m s + b_m) \cdot (m_s s^2 + b_s s + k_{ps} + K_e) + K_e K_f K_{ps}} \quad (4.58)$$

$$X_m(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_e K_f K_{ps}} \quad (4.59)$$

$$X_s(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_{ps}}{s \cdot (m_m s + b_m) \cdot (m_s s^2 + b_s s + k_{ps} + K_e) + K_e K_f K_{ps}} \quad (4.60)$$

$$X_s(\infty) = \frac{1}{K_e K_f} \quad (4.61)$$

Observando con detenimiento las ecuaciones (4.59) y (4.61), se observa que al momento de ocurrir alguna colisión el sistema convergerá a un valor definido, el cual depende tanto de K_f como de K_e . En el caso del maestro, se ve influenciado también por K_{ps} . Igualmente si $E(s) = 0$, no se puede aplicar el teorema del valor final a dichas ecuaciones puesto que se tendría un polo en el origen.

El error en régimen permanente entre el maestro y el esclavo, se obtiene mediante la sustracción del valor final del maestro y el esclavo, dicho esto tenemos:

$$E(\infty) = X_m(\infty) - X_s(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_e K_f K_{ps}} - \frac{1}{K_e K_f} = \frac{1}{K_f K_{ps}} \quad (4.62)$$

Lo primero que se puede decir es que el régimen permanente no se ve influenciado por el entorno ni por la dinámica del Maestro o el Esclavo, sino por las constantes de reflexión de fuerzas K_f y la ganancia del controlador del esclavo K_{ps} , además siempre existirá un error independientemente si se encuentra en colisión o no.

4.3.7 Implementación del esquema fuerza-posición

La implementación de este esquema de control requiere el conocimiento de las fuerzas aplicadas por el esclavo, es por ello que se hace necesario el uso de algún tipo de sensor para medirla. En el caso de la plataforma implementada en el capítulo 3, en la misma se hizo uso del telemanipulador Hidráulico Kraft como esclavo, el mismo tiene incorporado sensores de presión que miden la diferencia de presión en los cilindros que junto con las servoválvulas permiten el movimiento de un lado u otro de cada articulación. Es un promedio de la medida del par aplicado en la articulación correspondiente.

La figura 4.35, muestra un experimento implementando el esquema fuerza-posición cuando existe una colisión. La referencia en el lazo de control del esclavo es la posición del maestro, por lo tanto, la actuación sobre sus articulaciones es proporcional a su error de posición. Esto explica el porque cuando sucede una colisión y el esclavo se detiene, las fuerzas medidas por el sensor de fuerza es proporcional al error de posición. En la figura 4.35, muestra dos etapas durante el contacto: La primera es elástica, donde la posición del maestro y del esclavo son muy similares y el sensor de fuerza incrementa de manera casi lineal. La segunda etapa, el contacto deja de ser elástico, tanto el maestro y el esclavo se detienen, y en tal caso el par reflejado se mantiene constante.

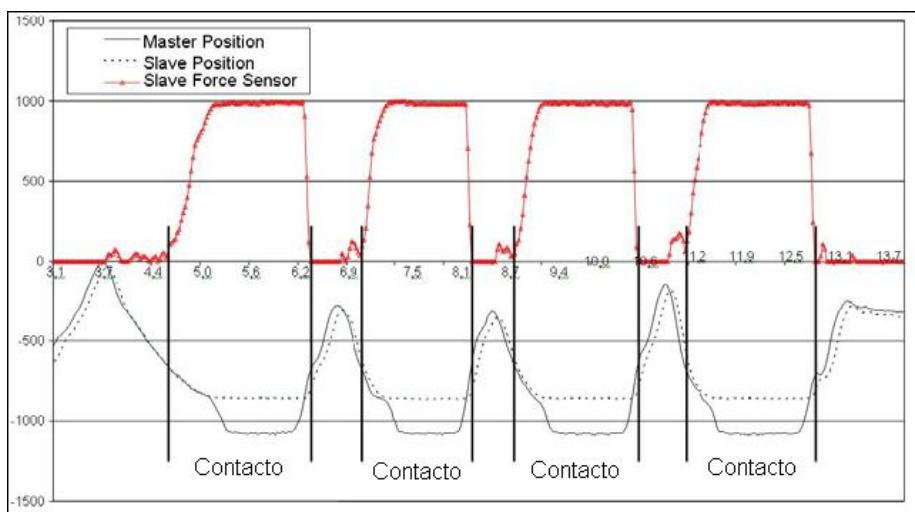


Figura 4.35 Desempeño del esquema Fuerza-Posición durante el contacto

En la figura 4.36, se muestra el comportamiento del sistema bilateral después de ejercer una fuerza en la articulación SA del esclavo. Una vez se ejerce una fuerza sobre el esclavo, esta es reflejada sobre el maestro, lo que produce un par en la articulación correspondiente produciendo un movimiento en consecuencia. El movimiento mencionado en el maestro produce un movimiento en el esclavo, lo cual es un flujo inverso en el sistema. Esto quiere decir que el aplicar un par en el esclavo mueve al maestro. La gran sensibilidad de este comportamiento se muestra por el control fuerza-posición en su control de la reflexión a pesar de tener una gran diferencia en los dispositivos escalados. Este comportamiento reverso del sistema (un movimiento en el esclavo implica un movimiento en el maestro), también es posible con el esquema posición-posición. Si el sistema es dimensionado de manera tal que un dispositivo pequeño mueve uno grande, entonces los dispositivos escalados juegan un papel

importante en su comportamiento reverso, ya que las fuerzas son reproducidas en una escala reversa.

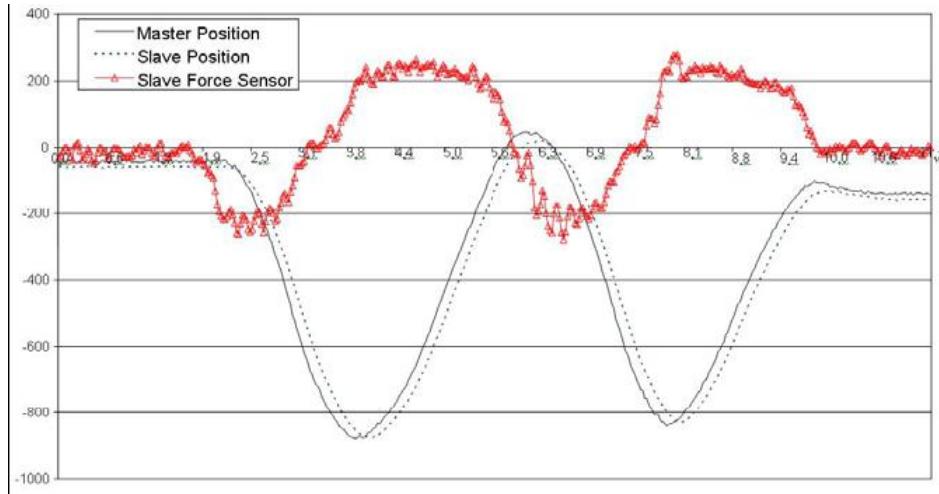


Figura 4.36 desempeño del esquema Fuerza-Posición después del contacto

4.4 Conclusiones

En el presente capítulo se ha expuesto un estudio de dos de los esquemas bilaterales básicos, el posición-posición y el fuerza-posición. Para cada uno de ellos, se realizó un análisis de los distintos factores que influyen en la percepción que tiene el operador del entorno de teleoperación, dicho análisis representa una aportación original de la presente tesis.

Para el análisis de la influencia de los factores que influyen en la percepción del entorno, se toma en consideración los casos extremos para cada uno de ellos; como conclusión, a continuación se presenta las tablas resumen para cada uno de los esquemas:

Esquema Posición-Posición:

Parámetro	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$
$E(s)$	Requiere un regulador Kpm bajo y uno Kps alto.	Requiere un regulador Kpm elevado, Kps no influye.
$S(s)$	Requiere un regulador Kpm elevado, Kps no influye.	Depende del entorno de colisión, si $E(s)$ es bajo, se requiere de un regulador Kps elevado y Kpm bajo. Si $E(s)$ es elevado, se tiene una percepción escalada por $KE(s)$, donde $K = Kpm/(E(s)+Kps)$.
$M(s)$	No influye al hacerse despreciable. La percepción depende exclusivamente de los casos correspondientes a $E(s)$ y $S(s)$.	Existe un efecto combinado del esfuerzo por parte del operador al manipular $M(s)$ y la percepción del entorno (originada por el desplazamiento de $M(s)$), que viene dada por el caso en que se encuentre $E(s)$ y $S(s)$.

Esquema Fuerza-Posición:

Parámetro	$\rightarrow 0$	$\rightarrow \infty$
E(s)	No se tiene ninguna percepción	Requiere una combinación de un regulador K _f y uno K _{ps} elevada
S(s)	Mientras más baja es la dinámica del esclavo S(s), más baja es la percepción del entorno. Requiere una K _{ps} elevada para compensar.	Depende del entorno de colisión, si E(s) es bajo, se requiere de un regulador K _{ps} elevado y K _f bajo. Si E(s) es elevado, se requiere de un regulador con un K _f lo más elevado posible y un K _{ps} lo más bajo posible.
M(s)	No influye al hacerse despreciable. La percepción depende exclusivamente de los casos correspondientes a E(s) y S(s)	Existe un efecto combinado del esfuerzo por parte del operador al manipular M(s) y la percepción del entorno (originada por el desplazamiento de M(s)), que viene dada por el caso en que se encuentre E(s) y S(s).

Respecto al esquema posición-posición puede concluirse que no ofrece una percepción adecuada al operador de cualquier tipo de entorno, viendo necesario realizar un ajuste de los controladores dependiendo de las características del entorno con el cual se colisiona. Una metodología de diseño de controladores de utilidad es la escogencia de un valor elevado de K_f que garantice la estabilidad del Maestro sin estar conectado al esclavo. K_{ps} debe ser ajustado a un valor elevado de manera que se logre obtener una buena percepción de los entornos suaves y mejorar la precisión del esclavo. La dinámica del maestro debe ser lo mas rápida posible, mientras que la del esclavo dependerá de la tarea que deba llevar a cabo.

En relación al esquema fuerza-posición, respecto a las variaciones del entorno, a diferencia que el esquema Posición-Posición es capaz de reflejar el entorno con el mismo controlador K_{ps} y constante de reflexión de fuerzas K_f. Las variaciones en la dinámica del esclavo si tiene una influencia determinante tanto en la percepción del entorno, por lo que se hace necesario la escogencia de K_{ps} y K_f acorde al caso.

Tanto el esquema posición-posición como el fuerza-posición cuando se encuentran en un movimiento libre de colisión, convergen a un valor que es independiente de la dinámica del maestro o del esclavo en ambos casos, y depende únicamente del regulador del maestro en el caso del posición-posición, del regulador del maestro y de la constante de reflexión de fuerzas en el caso del fuerza-posición.

Capítulo 5

ESQUEMAS DE CONTROL BILATERAL CON RETARDO TEMPORAL

En este capítulo se realizará un estudio de los esquemas de control bilateral fuerza–posición y fuerza–velocidad incorporando el efecto del retardo en las comunicaciones. Se presentarán los conceptos y análisis correspondientes a cada esquema, además de las simulaciones y aplicaciones reales para demostrar los conceptos vistos.

El capítulo estará estructurado en dos partes de la siguiente manera: La primera, se inicia con la presentación del esquema fuerza-posición con retardo en las comunicaciones, seguido se realiza el modelado del retardo obteniendo una aproximación del mismo. Posteriormente, se obtienen las distintas ecuaciones que gobiernan sus comportamientos. Luego se procede a estudiar la estabilidad del sistema y el efecto que tiene el retardo sobre el lugar geométrico de las raíces, acabando con el estudio del error en estado estacionario. La segunda parte realiza el estudio del esquema fuerza-velocidad, se inicia con una introducción de lo que es el modelo de dos puertos, la arquitectura de cuatro canales y la transparencia, luego presenta la relación que existe entre los modelos de 2 y 4 canales. Posteriormente, se explica lo que es el control bilateral fuerza-velocidad con retardos en las comunicaciones, se describe lo que son las variables de onda y matriz de *scattering*, se explica el control basado en el concepto de pasividad y la adaptación de impedancia. Finalmente se presentan las simulaciones y los resultados experimentales de la aplicación de ambos esquemas de control y se presentan las conclusiones del capítulo.

5.1 Análisis del esquema de control fuerza-posición

El diagrama en bloque del esquema fuerza-posición con retardo en las comunicaciones puede ser observado en la figura que se muestra a continuación:

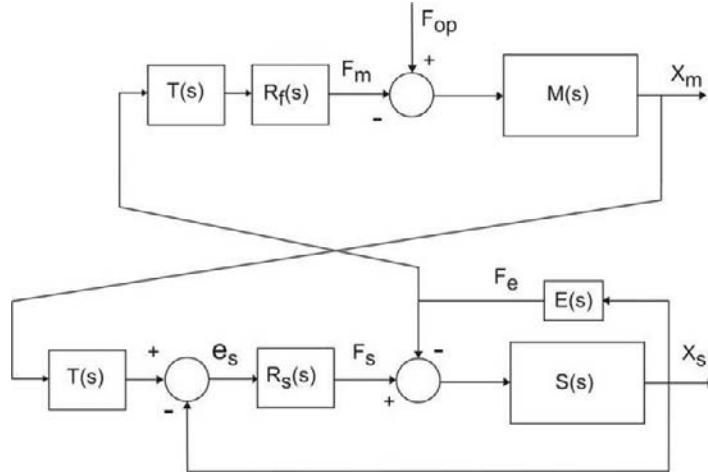


Figura 5.1 Diagrama de bloques del esquema de control fuerza-posición con retardo en las comunicaciones

Del esquema fuerza-posición presentado, se pueden deducir las ecuaciones que lo describen:

$$X_m(s) = M(s) \cdot (F_{op}(s) - F_m(s)) \quad (5.1)$$

$$F_m(s) = R_f(s) \cdot f_e(s) \cdot T(s) \quad (5.2)$$

$$X_s(s) = S(s) \cdot (F_s(s) - F_e(s)) \quad (5.3)$$

$$F_s(s) = R_s(s) \cdot e_s(s) \quad (5.4)$$

$$e_s(s) = X_m(s) \cdot T(s) - X_s(s) \quad (5.5)$$

$$F_e(s) = E(s) \cdot X_s(s) \quad (5.6)$$

Donde $T(s)$, representa el retardo en la línea de comunicación

5.1.1 Modelado del retardo

El retardo en la comunicación se modela como e^{-Ts} . La misma es una función trascendente, esto es irracional (no se puede escribir como un cociente de polinomios), por lo tanto no se le pueden aplicar muchas de las herramientas de análisis y síntesis de control. Por tal razón, se suele aproximar a través de una función racional. Una de las más frecuentes es la aproximación de Padé, que se muestra a continuación:

$$T(s) = e^{-Ts} = \frac{e^{\frac{-Ts}{2}}}{e^{\frac{Ts}{2}}} = \frac{1 - \frac{Ts}{2} + \frac{T^2 s^2}{2^2 \cdot 2!} - \dots}{1 + \frac{Ts}{2} + \frac{T^2 s^2}{2^2 \cdot 2!} + \dots} = \frac{1 - \frac{Ts}{2} + \frac{T^2 s^2}{8} - \dots}{1 + \frac{Ts}{2} + \frac{T^2 s^2}{8} + \dots} \quad (5.6)$$

La aproximación de primer orden seria:

$$T(s) = e^{-Ts} = \frac{e^{\frac{-Ts}{2}}}{e^{\frac{Ts}{2}}} = \frac{1 - \frac{Ts}{2}}{1 + \frac{Ts}{2}} \quad (5.7)$$

De la aproximación de Padé puede decirse que mientras mayor sea el orden de la aproximación mejor será esta. No obstante, esto también aumenta en forma significativa la complejidad del modelo. La aproximación de primer orden posee un cero en el semiplano derecho (fase no mínimo). Por lo tanto, la respuesta al escalón presenta un subpico tal como se puede observar en el círculo rojo de la Figura 5.2.

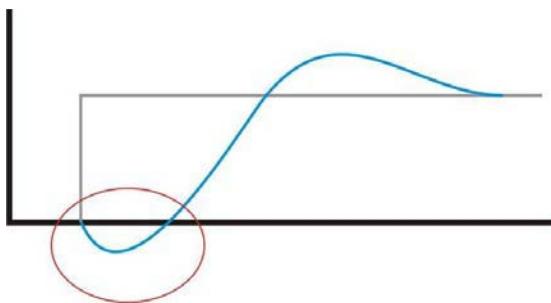


Figura 5.2 Respuesta escalón de un sistema de fase No Mínimo

5.1.2 Función de transferencia

Con la finalidad de realizar los análisis que permitan el estudio de la influencia del retardo en la comunicación en el desempeño del esquema, es necesario conocer las funciones de transferencia de interés. Para ello, hay que identificar las entradas y salidas del sistema.

De acuerdo a la descripción del funcionamiento del esquema y el modelo usado, la entrada del sistema a efectos prácticos es la fuerza que ejerce el operador F_{op} . En cuanto a las salidas, dado que un sistema teleoperado debe seguir de la manera más fiable posible los movimientos efectuados por el operador, existen 2 salidas inminentes a ser tomadas en consideración las cuales son X_m y X_s que reflejan las posiciones del maestro y el esclavo respectivamente. Por lo tanto las funciones de transferencia X_m/F_{op} y X_s/F_{op} son:

$$\frac{X_m}{F_{op}} = \frac{\left(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_{ps} + K_e\right) \left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2}{\left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2 \left(m_m s^2 + b_m s\right) \left(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_e + K_{ps}\right) + \left(1 - \frac{Ts}{2}\right)^2 (b_e s + K_e) K_f K_{ps}} \quad (5.8)$$

$$\frac{X_s}{F_{op}} = \frac{\left(1 - \frac{Ts}{2}\right) \left(1 + \frac{Ts}{2}\right) K_{ps}}{\left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2 \left(m_m s^2 + b_m s\right) \left(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_e + K_{ps}\right) + \left(1 - \frac{Ts}{2}\right)^2 (b_e s + K_e) K_f K_{ps}} \quad (5.9)$$

5.1.3 Estudio de estabilidad absoluta

Para el estudio de la estabilidad absoluta del sistema, es necesario conocer la ecuación característica del sistema de lazo cerrado. Para esto se tomarán las ecuaciones (5.8) y (5.9). Las dos ecuaciones tienen el mismo denominador con lo cual el polinomio característico es el mismo para las dos, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$P(s) = \left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2 \left(m_m s^2 + b_m s\right) \left(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_e + K_{ps}\right) + \left(1 - \frac{Ts}{2}\right)^2 (b_e s + K_e) K_f K_{ps} \quad (5.10)$$

La ecuación característica se obtiene igualando a cero el polinomio característico (Ec. 5.10), teniendo dicha ecuación es posible aplicar el criterio de Routh para conocer las condiciones de estabilidad del sistema. Si la misma se evalúa simbólicamente, el resultado son coeficientes de longitud significativa, y más aún al aplicar el criterio de estabilidad de Routh. Es por ello que para simplificar el análisis se usarán los valores del sistema BSP-Puma presentado en el epígrafe 2.4.1. Dado que este capítulo trata del retraso en las comunicaciones, y con la finalidad de tener un término de referencia primero se presentará la estabilidad del sistema sin ningún retraso en las comunicaciones.

Obviamente, si el sistema se encuentra en movimiento libre, la estabilidad del sistema viene dada por la estabilidad del sistema esclavo. Por lo tanto resolviendo la ecuación 5.10, con los valores numéricos indicados, sin retardos en las comunicaciones y tomando un entorno bajo ($K_e = 0.1$, $B_e = 0.1$) la ecuación característica queda de la siguiente manera:

$$P(s) = 10 \cdot S^4 + 80.1 \cdot S^3 + 250.3 \cdot S^2 + (2.6K_f + 260.2) \cdot S + 13K_f \quad (5.11)$$

Partiendo de la ecuación 5.11, tenemos que los coeficientes de la primera columna de acuerdo al criterio de Routh son:

$$S^4 = 10 \quad (5.12)$$

$$S^3 = 80.1 \quad (5.13)$$

$$S^2 = \frac{17444.03 - 130K_f}{80.1} \quad (5.14)$$

$$S^1 = \frac{-1690K_f^2 + 109499.26K_f + 4544169.815}{17444.03 - 130K_f} \quad (5.15)$$

$$S^0 = 13K_f \quad (5.16)$$

Resolviendo para los coeficientes S^2 , S^1 y S^0 se obtiene que el sistema es estable para el rango de K_f comprendido entre: $0 < K_f < 93.538$. Siguiendo el mismo procedimiento, para una colisión con otro entorno bajo ($K_e = 1$, $B_e = 1$) tenemos que el sistema es estable para el rango de K_f comprendido entre: $0 < K_f < 9.57$. Lo que indica una tendencia a disminuir el máximo valor de K_f a medida que el entorno con el cual colisiona es más rígido. Para una colisión con un entorno medio ($K_e = 1000$, $B_e = 1000$), tenemos que el sistema es estable para el rango de K_f comprendido entre: $0 < K_f < 1.79$.

Finalmente para la colisión con un entorno elevado ($K_e = 10000$, $B_e = 10000$), se tiene que el sistema es estable para el rango de K_f comprendido entre: $0 < K_f < 22.43$.

Esto muestra que el rango de estabilidad para el coeficiente de reflexión de fuerza es mayor cuando la colisión es con un entorno suave, luego disminuye a un mínimo a medida que aumenta la dinámica del entorno de colisión para luego aumentar paulatinamente de forma moderada a medida que aumenta la dinámica del entorno. Por lo que se corrobora lo establecido en [Peñin 98], donde obtuvo una curva de estabilidad para el esquema fuerza-posición cuyo comportamiento puede observarse en la figura (5.3).

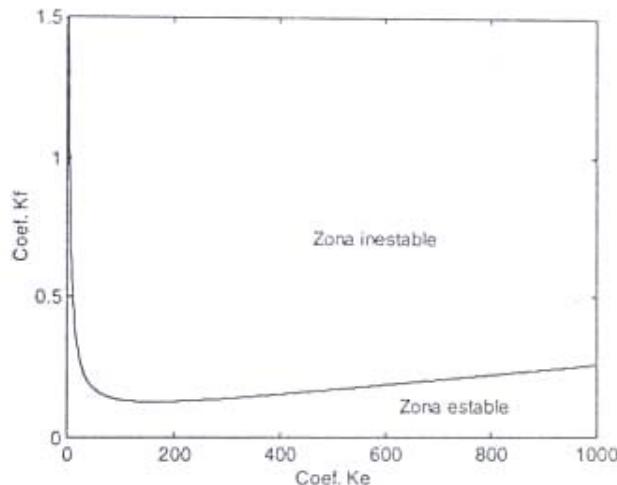


Figura 5.3 Curva crítica de estabilidad según K_f .

La diferencia de los rangos de estabilidad entre la figura (5.3) y los obtenidos por las ecuaciones (5.12) a (5.16) se debe a la diferencia entre los parámetros y modelos del entorno usados.

A continuación, se procederá a realizar el mismo estudio siguiendo el criterio de estabilidad de Routh, pero tomando en consideración el retardo en las comunicaciones. Usando como referencia una colisión con un entorno bajo ($K_e = 0.1$, $B_e = 0.1$), sin retardo el cual es estable para el rango de K_f comprendido entre: $0 < K_f < 93.538$, tenemos que la ecuación característica (5.10) con un retardo de 1mSeg queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P(s) = & 2.5 \cdot T^2 \cdot S^6 + (80.1 \cdot T^2 + 20 \cdot T) \cdot S^5 + (250.3 \cdot T^2 + 160.2 \cdot T + 10) \cdot S^4 \cdots \\ & \cdots + (13 \cdot K_f \cdot T^2 + 260.2 \cdot T^2 + 500.6 \cdot T + 80.1) \cdot S^3 \cdots \\ & \cdots + ((13 \cdot T^2 - 26 \cdot T) \cdot K_f + 520.4 \cdot T + 250.3) \cdot S^2 + ((13 - 26 \cdot T) \cdot K_f + 260.2) \cdot S \cdots \\ & + 13 \cdot K_f \end{aligned} \quad (5.17)$$

Aplicando el criterio de estabilidad de Routh se tiene:

$$S^6 = 2.5 \times 10^{-6} \quad (5.18)$$

$$S^5 = 1002.0025 \times 10^{-5} \quad (5.19)$$

$$S^4 = 10.0601 - 8.1087 \times 10^{-10} - 10 \cdot K_f \quad (5.20)$$

$$S^3 = \frac{-2.6353 \times 10 - 15 \cdot K_f^2 + 1.9532 \times 10^{-4} \cdot K_f + 805.8239}{10.0601 - 8.1087 \times 10^{-10} \cdot K_f} \quad (5.21)$$

$$S^2 = \frac{-6.94 \times 10^{-30} \cdot K_f^4 + 6.86 \cdot K_f^3 - 7.17 \times 10^{-10} \cdot K_f^2 - 0.33 \cdot K_f + 44.14}{1.64 \times 10^{-23} \cdot K_f^2 - 0.4 \times 10^{-12} \cdot K_f + 0.00253} \quad (5.22)$$

$$S^1 = \frac{-7.51 \times 10^{-102} \cdot K_f^8 + 1.02 \times 10^{-90} \cdot K_f^7 - 3.88 \times 10^{-80} \cdot K_f^6 + 6.42 \times 10^{-70} \cdot K_f^5}{1.36 \times 10^{-95} \cdot K_f^5 - 8.49 \times 10^{-85} \cdot K_f^4 + 2.10 \times 10^{-74} \cdot K_f^3 - 2.61 \times 10^{-64} \cdot K_f^2} \dots \\ \dots \frac{-4.86 \times 10^{-60} \cdot K_f^4 + 1.31 \times 10^{-50} \cdot K_f^3 + 6.88 \times 10^{-42} \cdot K_f^2 - 7.68 \times 10^{-40} \cdot K_f - 1.82 \times 10^{-38}}{+1.62 \times 10^{-54} \cdot K_f - 4.02 \times 10^{-45}} \quad (5.23)$$

$$S^0 = 13 \cdot K_f \quad (5.24)$$

NOTA: Por motivo de espacio se limitó el uso de los decimales a 2 dígitos.

Como puede se puede observar de las ecuaciones (5.17) a (5.23), la complejidad para determinar la estabilidad absoluta del sistema incorporando retardo al sistema aumenta de manera considerable. Realizando los cálculos pertinentes se obtuvieron los rangos de estabilidad para el sistema BSP-PUMA con distintos retardos cuando colisiona con distintos entornos, el resumen de los resultados obtenidos pueden ser observados en la tabla 5.1.

Rangos de Estabilidad					
Retardo	Sin Retardo				
	BSP-PUMA				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 93,538	0 < Kf < 9,57	0 < Kf < 0,4935	0 < Kf < 1,79	0 < Kf < 22,49
Retardo	1mSeg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 131,83	0 < Kf < 13,5032	0 < Kf < 0,7011	0 < Kf < 2,2104	0 < Kf < 7,78797
Retardo	10mSeg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 117,8366	0 < Kf < 12,0534	0 < Kf < 0,5458	0 < Kf < 0,8687	0 < Kf < 1,1296
Retardo	100mSeg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 67	0 < Kf < 6,8332	0 < Kf < 0,199	0 < Kf < 0,1437	0 < Kf < 0,1387
Retardo	500mSeg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 44,7996	0 < Kf < 4,5264	0 < Kf < 0,096	0 < Kf < 0,0555	0 < Kf < 0,0514
Retardo	1 Seg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 47,6631	0 < Kf < 4,8098	0 < Kf < 0,0956	0 < Kf < 0,0527	0 < Kf < 0,0484
Retardo	1,5 Seg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 24,8022	0 < Kf < 2,5027	0 < Kf < 0,0485	0 < Kf < 0,0254	0 < Kf < 0,0230
Retardo	2 Seg.				
Sistema	Ke = 0,1, Be = 0,1, Kps = 130	Ke = 1, Be = 1, Kps = 130	Ke = 100, Be = 100, Kps = 130	Ke = 1000, Be = 1000, Kps = 130	Ke = 10000, Be = 10000, Kps = 130
Rango	0 < Kf < 15,189	0 < Kf < 1,5313	0 < Kf < 0,0284	0 < Kf < 0,0144	0 < Kf < 0,013

Tabla 5.1 Resumen de los rangos de estabilidad para distintos retardos en las comunicaciones

De los resultados presentados en la tabla 5.1 se puede observar como el retardo influye en la estabilidad del sistema, haciendo que disminuya considerablemente los valores máximos que puede tener el coeficiente de reflexión de fuerzas K_f . Pero existe una consideración que se puede obtener que resulta menos predecible, la primera es que el rango de los primeros 500 ms de retardo resultan críticos para la estabilidad, mientras que en el rango comprendido entre 500 ms. y 1 s. el valor máximo que puede alcanzar K_f tiende a estabilizarse con una leve tendencia al alza. A partir de 1 s. de retardo, continúa la tendencia decreciente en el valor máximo que puede alcanzar K_f .

Con la presencia del retardo se mantiene la forma de la curva crítica de estabilidad que se presentó en la figura 5.3, donde se tiene la consideración que aún cuando los entornos duros poseen un rango de estabilidad para K_f más pequeño que para los entornos suaves, estos son más críticos dado que el rango de estabilidad se ve afectado en un orden de magnitud mucho mayor que los entornos duros, cuya tendencia es al alza de una manera moderada. De acuerdo a la tabla 5.1, esta consideración es cierta, para retardos de comunicación menores a 100 ms. dado que para retardos mayores si es significativa la influencia cambiando la tendencia a la baja, pero de una manera moderada por lo que continua siendo más critico los entornos suaves.

5.1.4 Lugar Geométrico de las raíces

A continuación se hará el análisis del lugar geométrico de las raíces dependiendo del retardo temporal. Para ello, se simplificará el esquema visto en la figura 5.1 de manera que la entrada sea la fuerza del operador (F_{op}), y la salida la posición del Maestro (X_m) (Figura 5.4). El análisis se realizará tomando como referencia K_f ($R_f(s)$), el modelo del retardo se sustituirá por su modelo de Padé visto en el epígrafe 5.1.1.

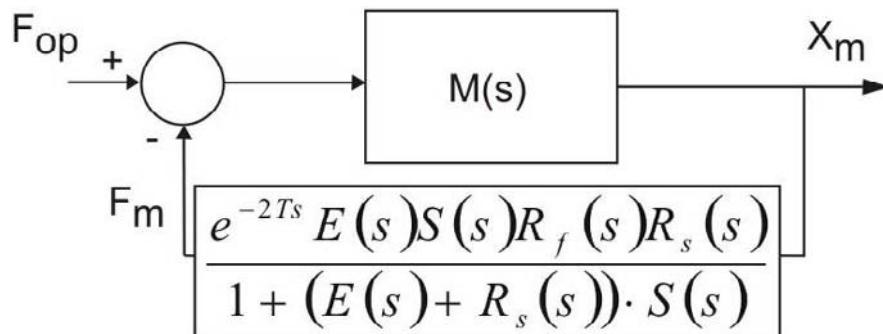


Figura 5.4 Esquema Fuerza-Posición visto desde el Maestro con retardo

Lo primero es conocer el lugar geométrico de las raíces para el sistema cuando no existe ningún tipo de retardo. De esta manera, es posible conocer el efecto que tiene su incremento. Tomando como referencia el sistema BSP-PUMA, y un entorno con $K_e = 100$, $B_e = 100$; se tiene que el lugar geométrico de las raíces viene dado por:

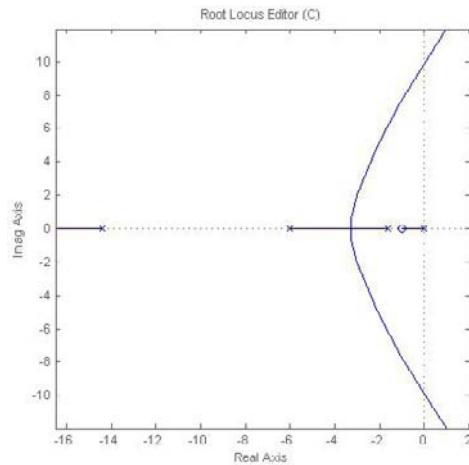


Figura 5.5 Lugar Geométrico de las raíces, sistema BSP-PUMA, $Ke=100$, $Be=100$, $Kps=130$, sin retraso

A continuación se presentarán una serie de gráficos en los cuales se podrá observar el comportamiento del lugar geométrico de las raíces respecto al retraso.

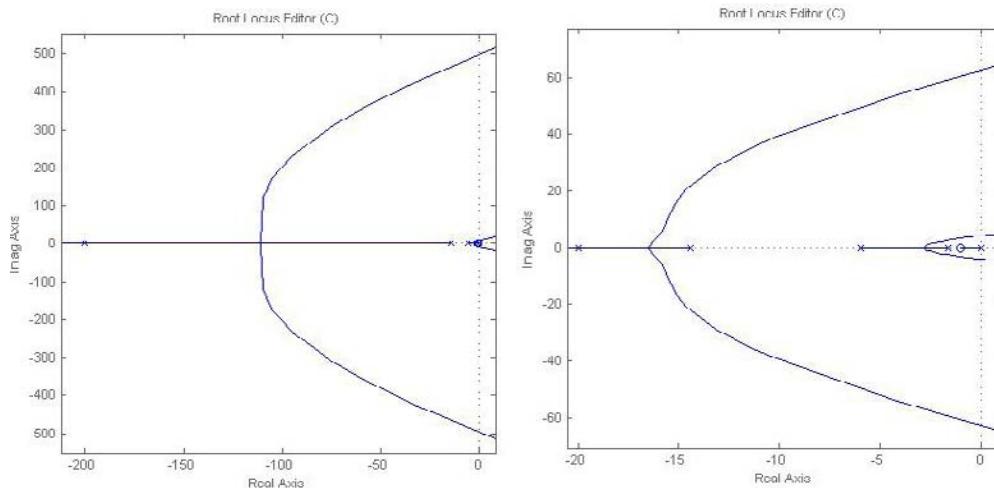


Figura 5.6 Lugar Geométrico de las raíces sistema BSP-PUMA, con $Ke=100$, $Be=100$, $Kps = 130$ y a) Retardo $T = 10\text{mSeg.}$, b) $T = 100\text{mSeg.}$

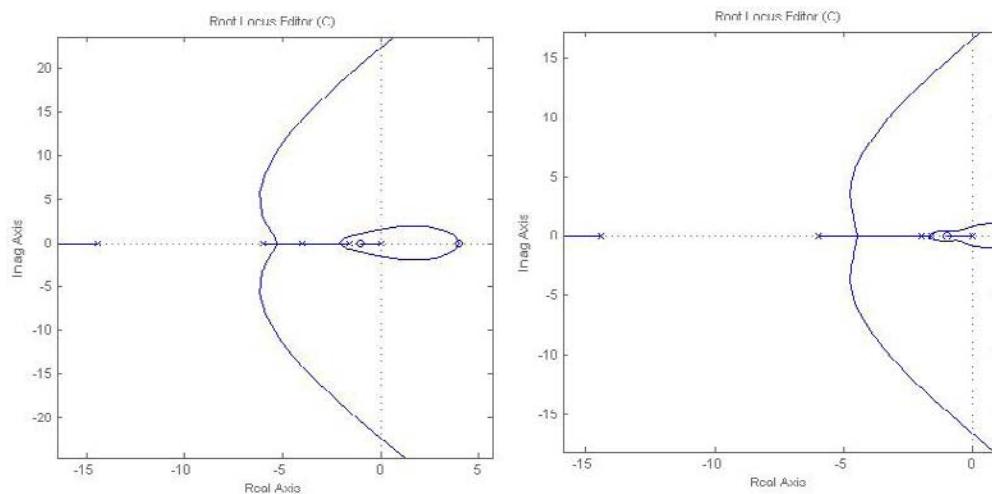


Figura 5.7 Lugar Geométrico de las raíces sistema BSP-PUMA, con $Ke=100$, $Be=100$, $Kps = 130$ y a) Retardo $T = 0.5$, b) $T = 1$

De las figuras 5.6 y 5.7 se puede observar como la estabilidad se ve limitada debido a los nuevos polos y ceros que aparecen al incluir el retardo, estos forman una nueva rama cercana al origen limitando por consiguiente el rango que puede alcanzar la constante K_f . Sin embargo, hay que destacar que los resultados son solo una aproximación, dado que el retardo ha sido modelado como tal, si se quisiera obtener resultados más precisos, en el caso de la aproximación del retardo usada, sería necesario aumentar el orden de la aproximación; pero tal como se mencionó anteriormente, esto aumentaría considerablemente la complejidad del sistema. En cualquier caso, los resultados obtenidos sirven para ilustrar la influencia que tiene el retardo sobre el comportamiento del sistema, que observando las figuras 5.6 y 5.7, se nota que a medida que el retardo aumenta, el lugar geométrico de las raíces tiende a desplazarse a la derecha. Otro hecho de importancia que hay que destacar, es que aún cuando el sistema sea estable, es decir, que el valor de la constante K_f se encuentra dentro de los rangos de estabilidad mostrados en la tabla 5.1, no quiere decir que el sistema tenga un comportamiento apropiado, por lo que el rango real de K_f se ve aún más disminuido.

Del lugar geométrico de las raíces de las figuras 5.6 y 5.7, se ve como ante la presencia del retardo, aparecen 2 pares de polos complejos conjugados, y a medida que aumenta estos se aproximan al semiplano derecho. Este hecho trae como consecuencia que el comportamiento dinámico de la respuesta temporal tienda a ser más oscilatoria, lo que perjudica la percepción que tiene el operador del entorno ya que físicamente se traduce en oscilaciones (vibraciones) por parte del dispositivo maestro. En la figura 5.8a, se observa la respuesta de un sistema BSP-PUMA sin retardo, mientras que en la figura 5.8b corresponde a la respuesta de ese mismo sistema con un retardo de 50mSeg.

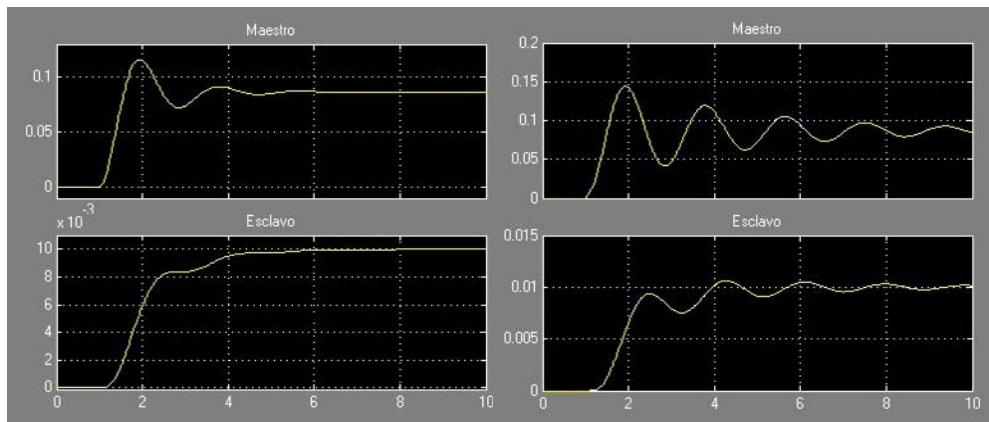


Figura 5.8 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $Ke=1000$, $Be=1000$,
 $Kps = 130$, $K_f = 0.1$ y a) Retardo $T = 0$, b) $T = 50mSeg$.

Tal como se mencionó anteriormente, el sistema se volvió más oscilante, para eliminar o compensar este efecto se pueden nombrar 2 posibilidades. La primera sería bajar el valor de la constante de reflexión K_f , lo cual traería como consecuencia una disminución de la percepción que tiene el operador del entorno. Otra opción es considerar el uso de un controlador del tipo PD en el esclavo, en capítulos anteriores se mencionó que para efectuar los análisis en la presente tesis se van a tomar en consideración reguladores del tipo proporcional únicamente. En [Peñin 98], se puede encontrar un análisis completo de la influencia que tiene la adición del efecto derivativo al controlador, por lo que se va a partir de las conclusiones que se presentan en ese

trabajo para continuar el análisis. Por lo tanto, dado que el controlador PD mejora el comportamiento dinámico del sistema, el mismo puede ser usado para compensar el efecto del retardo hasta cierto punto.

En la figura 5.9, se presenta la respuesta temporal del mismo sistema visto en la figura 5.8 con la diferencia que se utilizó un regulador del tipo PD, con la misma constante proporcional y con una constante derivativa de 50.

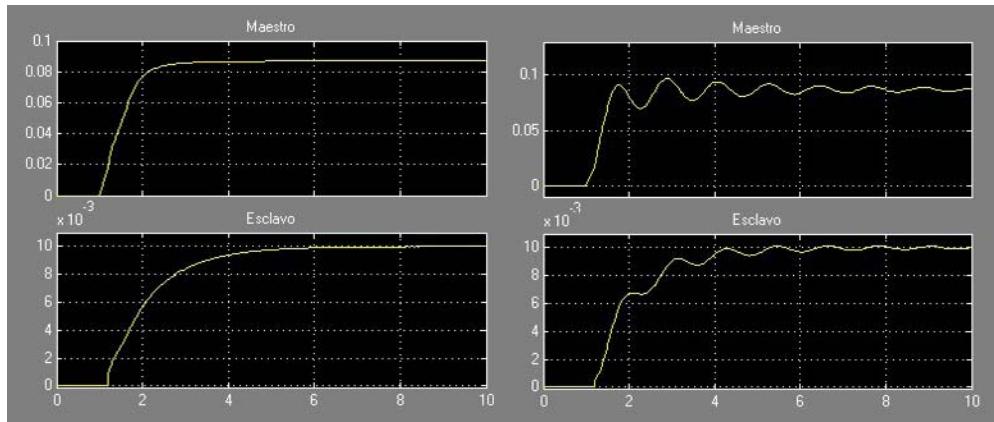


Figura 5.9 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=1000$, $B_e=1000$, $K_{ps} = 130$, $K_{ds} = 50$, $K_f = 0.1$ y a) Retardo $T = 50\text{mSeg.}$, b) $T = 120\text{mSeg.}$

Como era de esperarse la adición del efecto derivativo mejora la dinámica de la respuesta temporal, tal como se observa en la figura 5.9a, incrementando el rango de estabilidad. Pero si el retardo aumenta vuelve a presentarse el mismo problema (figura 5.9b) por lo que sería necesario volver a ajustar el controlador, este procedimiento no es válido de manera indefinida, puesto que si el retardo continua aumentando llegará un nivel en el cual el sistema se hace inestable no importa que acciones se tomen.

5.1.5 Error en régimen permanente

En este epígrafe, se estudiará el efecto que sobre el retardo tiene el error en estado estacionario del sistema, es decir, el error que existe entre el maestro y el esclavo. Suponiendo que se tiene un sistema estable con una dinámica de la respuesta temporal apropiada, se procederá a calcular el error en régimen permanente entre el dispositivo maestro y el esclavo ante una entrada por parte del operador. Para ello se hará uso de las ecuaciones (5.8) y (5.9), aplicando el teorema del valor final [Ogata 93] ante una entrada tipo escalón por parte del operador humano, de manera que se tiene:

$$X_m = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_{ps} + K_e) \left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2}{s \left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2 (m_m s^2 + b_m s) (m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_e + K_{ps}) + \left(1 - \frac{Ts}{2}\right)^2 (b_e s + K_e) K_f K_{ps}} \quad (5.25)$$

$$X_m(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_f K_e K_{ps}} \quad (5.26)$$

$$X_s = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\left(1 - \frac{Ts}{2}\right) \left(1 + \frac{Ts}{2}\right) K_{ps}}{s^2 \left(1 + \frac{Ts}{2}\right)^2 \left(m_m s^2 + b_m s\right) \left(m_s s^2 + (b_s + b_e)s + K_e + K_{ps}\right) + \left(1 - \frac{Ts}{2}\right)^2 \left(b_e s + K_e\right) K_f K_{ps}} \quad (5.27)$$

$$X_s(\infty) = \frac{1}{K_e K_f} \quad (5.28)$$

Las ecuaciones (5.26) y (5.28) corresponden expresan el valor final de la posición del maestro y del esclavo respectivamente, por lo que el error en estado permanente sería:

$$E(\infty) = X_m(\infty) - X_s(\infty) = \frac{K_{ps} + K_e}{K_{ps} K_e K_f} - \frac{1}{K_e K_f} = \frac{1}{K_{ps} K_f} \quad (5.29)$$

De la ecuación (5.29), tenemos que el error en régimen permanente es el mismo que en el caso cuando no se tenía retardo. Por lo que la influencia que tiene el retardo en el régimen permanente viene dado indirectamente por la influencia del mismo sobre el parámetro K_f . Tal como se vio en la tabla 5.1, el máximo valor que puede alcanzar K_f disminuye a medida que aumenta el retardo, por lo que si el valor de K_f es menor que 1, el error en estado permanente será mayor, y continuará aumentando a medida que K_f se haga más pequeño (siempre que sea menor que 1).

5.2 Análisis del esquema de control fuerza-velocidad

En la sección 5.1, se observó como el retardo origina inestabilidad, lo cual normalmente causa oscilaciones cuando el esclavo se encuentra en contacto con objetos en el entorno remoto. La teoría de control clásica, muestra limitaciones en el análisis de estos sistemas, por lo que se ha optado modelar el sistema bilateral como una red de 2 puertos y aplicar la teoría de pasividad, esto con el objetivo de garantizar la estabilidad del sistema ante la presencia de retardos en las comunicaciones.

5.2.1 Modelo de dos puertos

La teoría de 2 puertos se caracteriza por el uso de 2 variables en cada lado de la red ($f_i, v_i, i=h, e$), que se refieren a las señales de entrada/salida mostradas en la figura 5.10.

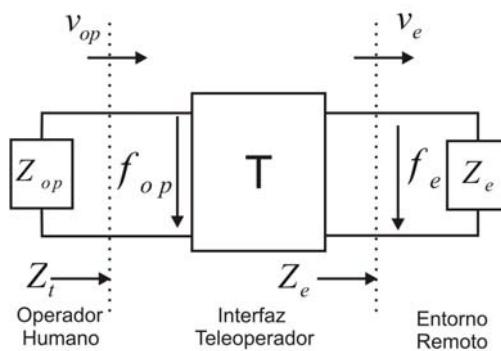


Figura 5.10 Modelo de dos puertos de un sistema bilateral de teleoperación

La relación entre estas entradas y salidas puede ser representada (entre otros operadores [Melchiorri 96]), por la llamada Matriz Hibrida $H(s)$. Esta matriz relaciona el esfuerzo y el flujo de las variables en cada puerto de la red. La misma es definida, de acuerdo a la convención de las señales de la figura 5.10 por:

$$\begin{bmatrix} f_{op} \\ -v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(s) & h_{12}(s) \\ h_{21}(s) & h_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{op}(s) \\ f_e(s) \end{bmatrix} = H(s) \begin{bmatrix} v_{op}(s) \\ f_e(s) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Resolviendo para F_{op} y V_{op} en términos de V_e y F_e , usando la versión linealizada de la ecuación $F_e = Z_e(s) \cdot V_e(s)$, eliminando V_e y usando las propiedades de Laplace a conveniencia, se llega a:

$$f_{op} = Z_t v_{op} = \left(h_{11} - h_{12} h_{21} (h_{22} + Z_e^{-1})^{-1} \right) v_{op} \quad (5.31)$$

5.2.2 Arquitectura de control de cuatro canales

El diagrama de un control bilateral basado en la arquitectura de cuatro canales, se muestra en la figura 5.11. Las fuerzas f_{op}^* , f_e^* son externas al maestro, y al esclavo, respectivamente. Los bloques son la impedancia del dispositivo maestro Z_m , su velocidad v_h igual a la de la mano del operador humano, la impedancia del dispositivo esclavo Z_s , su velocidad v_s , igual a la del entorno de contacto v_f , el controlador local del esclavo C_s , la impedancia del entorno remoto Z_e . Los cuatro bloques C_1 , C_2 , C_3 y C_4 denotan los cuatro canales de comunicación para velocidad directo, fuerza inversa, fuerza directo, velocidad inversa (siendo directo hacia la derecha en la figura e inverso hacia la izquierda). Puede observarse que todos los bloques de la figura 5.11 pueden ser no lineales y pueden involucrar dinámica. En este caso se considerará el caso lineal con $f_e^* = 0$.

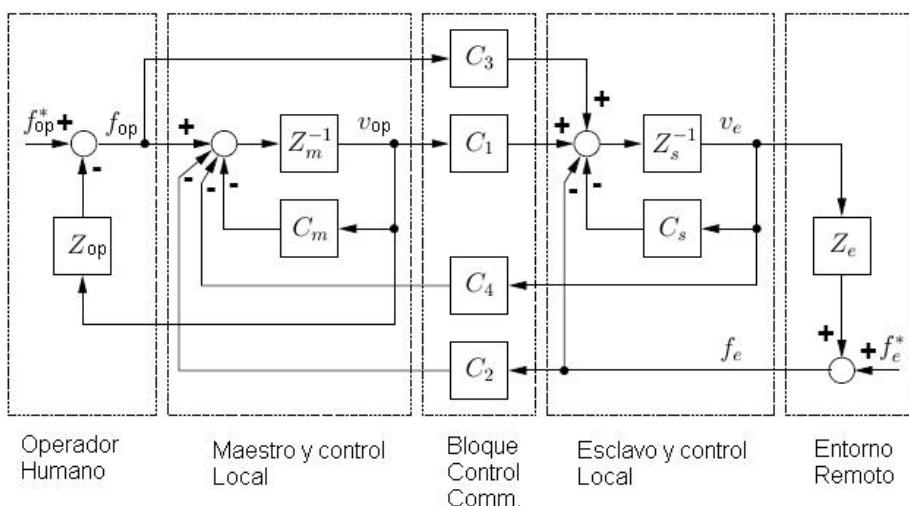


Figura 5.11 Diagrama de bloques Sistema de Teleoperación Bilateral usando modelo de 2 puertos

Nótese que los bloques de la figura 5.11, que contiene los bloques maestro con control local, bloque de control de las comunicaciones, y bloque Esclavo con control local representan a la interfaz teleoperador en la figura 5.10. El parámetro de la matriz híbrida (ecuación 5.30), en el modelo de 2 puertos de la interfaz teleoperador derivan directamente la arquitectura de cuatro canales vista en la figura 5.11.

$$h_{11} = (Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4)(Z_{cs} - C_3C_4)^{-1} \quad (5.32)$$

$$h_{12} = (C_2Z_{cs} - C_4)(Z_{cs} - C_3C_4)^{-1} \quad (5.33)$$

$$h_{21} = -(C_3Z_{cm} + C_1)(Z_{cs} - C_3C_4)^{-1} \quad (5.34)$$

$$h_{22} = (1 - C_2C_3)(Z_{cs} - C_3C_4)^{-1} \quad (5.35)$$

donde $Z_{cm} = Z_m + C_m$ y $Z_{cs} = Z_s + C_s$, [Zaad 99]

5.2.3 Transparencia

El objetivo final del diseño de control en teleoperación es que la sensación del operador sea como si el mismo estuviera interactuando con el entorno remoto [Raju 89]. Esto se logra si las propiedades mecánicas del entorno son reflejadas exactamente al operador. Si esto se logra, se dice entonces que el sistema es *transparente*. Las propiedades mecánicas del entorno pueden ser representadas por su impedancia mecánica Z_e , que relaciona la Velocidad del entorno de contacto con la fuerza de interacción del entorno F_e mediante:

$$f_e = Z_e(v_e) \quad (5.36)$$

La interfaz teleoperador como la presentada en la figura 5.11, es usada para reproducir la impedancia del entorno Z_e al operador, donde es reflejada al mismo como impedancia transmitida Z_t . La interfaz teleoperador contiene el robot esclavo y el dispositivo maestro, incluyendo los lazos de control local y los datos de transmisión. La fuerza F_{op} y la velocidad V_{op} de la mano del operador, que es igual a la velocidad V_m del robot maestro, se relacionan por la impedancia transmitida como $f_{op} = Z_t(v_{op})$. La transparencia se logra si el operador siente exactamente la impedancia mecánica del entorno remoto, esto es como si la interfaz teleoperador de la figura 5.11 no existiera. Formalmente la transparencia puede ser escrita como [Lawrence 93]:

$$Z_t = Z_e \quad (5.37)$$

Las implicaciones de los requisitos de transparencia para el diseño de un control transparente pueden ser obtenidas de una manera elegante mediante el modelo de 2 puertos de la interfaz teleoperador de la figura 5.10. Por lo tanto, la transparencia de acuerdo a la ecuación (5.37) se logra cuando se cumplen las condiciones de las ecuaciones (5.38) y (5.39), obtenidas directamente de la ecuación (5.31), de allí se obtiene que $h_{12}h_{21} = -1$ será suficiente, desde el punto de vista cinemático, para que el robot esclavo siga al robot maestro en la misma dirección, por consiguiente $h_{12} = -h_{21} = 1$.

$$h_{11} = h_{22} = 0 \quad (5.38)$$

$$h_{12} = -h_{21} = 1 \quad (5.39)$$

Se ha demostrado que la transparencia requiere que la interfaz teleoperador posea la arquitectura de cuatro canales vista en la figura 5.11 ([Lawrence 93], [Zaad 99], [Zaad 99]). Los 4 canales son necesarios para obtener una teleoperación transparente, lo que requiere que los movimientos y fuerzas tanto del operador como del entorno remoto sean medidos, no siendo posible plantear la transparencia en un modelo de 2 canales. Los esquemas de 2 canales pueden a lo sumo reproducir con mayor o menor fidelidad la impedancia bajo determinadas condiciones, como se estudió en el capítulo anterior.

5.2.4 Transparencia optimizada para el diseño

Los compensadores C_1 , C_2 , C_3 y C_4 presentados en la figura 5.11 deben ser diseñados apropiadamente. La ley de control optimizada para la transparencia se deriva de la siguiente manera ([Lawrence 93], [Zaad 99]):

$$C_1 = Z_{cs} \quad (5.40)$$

$$C_2 = 1 \quad (5.41)$$

$$C_3 = 1 \quad (5.42)$$

$$C_4 = -Z_{cm} \quad (5.43)$$

Sustituyendo los valores de C_1 , C_2 , C_3 y C_4 en las ecuaciones (5.32) a (5.35) satisface los requerimientos de transparencia de los parámetros de la matriz híbrida, por lo que las ecuaciones (5.38) y (5.39) son satisfechas. Consiguiendo de esta manera una transparencia perfecta en los términos que se describe en [Lawrence 93]. Una interpretación física de la ley de control, se basa en el hecho que para obtener transparencia, la dinámica del maestro y del esclavo deben ser canceladas usando la dinámica inversa. Las fuerzas realimentadas hacia delante deben ser iguales a las fuerzas ejercidas por el operador y el entorno. En este caso, las dinámicas del maestro y esclavo son removidas efectivamente, por lo que el operador y el entorno remoto son conectados virtualmente.

Una meta alternativa de diseño es introducir una herramienta de intervención dinámica. Por lo que la impedancia transmitida consistiría en este caso en la impedancia del entorno más la impedancia de la herramienta de intervención dinámica.

5.2.5 Relación de los modelos de 2 y cuatro canales

Los esquemas Posición-Posición y Fuerza-Posición (que son esquemas de 2 canales), pueden ser representados también como casos especiales de arquitecturas de 4 canales. Para el esquema Posición-Posición todos los compensadores para los canales de fuerza son llevados a 0 ($C_2=C_3=0$), acordemente $C_1 = K_{ps}/s$ y $C_4 = -K_{pm}/s$. Calculando los parámetros de la matriz híbrida de la ecuación 5.35 se obtiene:

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4}{Z_{cs}} \quad (5.44)$$

$$h_{12} = -\frac{C_4}{Z_{cs}} \quad (5.45)$$

$$h_{21} = -\frac{C_1}{Z_{cs}} \quad (5.46)$$

$$h_{22} = Z_{cs}^{-1} \quad (5.47)$$

Por lo que la impedancia transmitida usando la ecuación (5.31) para la arquitectura Posición-Posición es:

$$Z_t = Z_{cm} + C_1C_4(Z_e + Z_{cs})^{-1} \quad (5.48)$$

Donde $Z_t = \frac{K_{pm}}{s} + \frac{1}{sM(s)}$ y $Z_{cs} = \frac{K_{ps}}{s} + \frac{1}{sS(s)}$. Si todos estos valores son reemplazados en la ecuación 5.48, entonces se obtiene el valor correspondiente del control Posición-Posición de 2 canales.

Para el esquema Fuerza-Posición se mantiene $C_3=C_4=0$, y $C_1 = K_{ps}/s$, $C_2 = K_f$. Por lo que los parámetros de la matriz híbrida de la ecuación (5.35) son:

$$h_{11} = Z_{cm} \quad (5.49)$$

$$h_{12} = C_2 \quad (5.50)$$

$$h_{21} = -\frac{C_1}{Z_{cs}} \quad (5.51)$$

$$h_{22} = Z_{cs}^{-1} \quad (5.52)$$

La impedancia transmitida para el esquema Fuerza-Posición es:

$$Z_t = Z_{cm} + C_1C_2Z_e(Z_e + Z_{cs})^{-1} \quad (5.53)$$

Donde $Z_{cm} = \frac{1}{sM(s)}$ y $Z_{cs} = \frac{K_{ps}}{s} + \frac{1}{sS(s)}$. Si estos valores son reemplazados en la ecuación (5.53) entonces se obtienen los valores correspondientes al esquema de control Fuerza-Posición de 2 canales.

En ambos casos, la influencia de la dinámica del maestro y del esclavo en la impedancia transmitida es observable. La transparencia perfecta no se puede alcanzar mediante las arquitecturas de 2 canales.

5.2.6 Control fuerza-velocidad con retardos en la comunicación

Los retardos en un sistema bilateral originan inestabilidades, por ejemplo oscilaciones incontroladas especialmente cuando el esclavo se encuentra en contacto con objetos en el entorno remoto. Se han propuesto diversas técnicas de control para

solventar este problema, considerando también que el retardo puede no ser constante durante la ejecución de una tarea ([Arcara 02], [Arcara 04]). Entre los diversos esquemas que se han propuesto, aquellos basados en el concepto de pasividad son bastante interesantes, ya que la pasividad permite describir de una manera relativamente sencilla cosas como: el intercambio de energía entre los diferentes sistemas, tratar con dinámicas tanto lineales como nolineales, interactuar de manera estable con distintos tipos de entornos (posiblemente incluso desconocidos).

El concepto de pasividad usado para modelar el sistema en el espacio de estados (explicado más adelante), es usado para diseñar el controlador fuerza-velocidad y el canal de transmisión para garantizar la estabilidad global. Para este propósito, los modelos de 2 puertos son usados para entender mejor y definir el flujo de energía en el sistema.

En este contexto, los principales problemas para la estabilidad se derivan del canal de comunicación. Si tal como se representa en la figura 5.12, las señales de velocidad y fuerza son transmitidas directamente, sin ningún tipo de procesado en particular, por ejemplo:

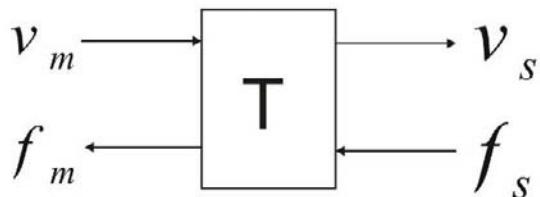


Figura 5.12 Canal de comunicación con retardo T

$$\begin{cases} f_m(t) = f_s(t - T) \\ v_s(t) = v_m(t - T) \end{cases} \quad (5.54)$$

Donde T es el retardo temporal debido al canal de comunicación, y el causante de inestabilidades con gran facilidad. Esto es debido al hecho que en cualquier instante de tiempo las variables de fuerza y velocidad en ambos puertos de la línea no son físicamente consistentes, porque se refieren a fenómenos físicos en instantes de tiempo distintos. Por lo tanto, puede ser fácilmente comprobado que esta red de dos puertos no se comporta como un sistema pasivo y puede entonces originar inestabilidades del sistema global [Melchiorri 96].

Matriz de scattering y variables de onda

Aparte de la matriz híbrida definida en (5.30), es conveniente introducir la llamada matriz de *scattering* (también llamado operador de scattering S). Dicho operador conecta las variables de flujo y esfuerzo (v, f) en cada lado del puerto. La transformación de estas variables en variables de onda permite describir el balance de potencia como la diferencia de 2 términos positivos, la potencia de entrada P_{in} y salida del sistema P_{out} . De hecho, la potencia en la línea de comunicación es definida como:

$$P = P_{in} - P_{out} = f^T v = [f_m, f_s] \begin{bmatrix} v_m \\ -v_s \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (u^T u - w^T w) \quad (5.55)$$

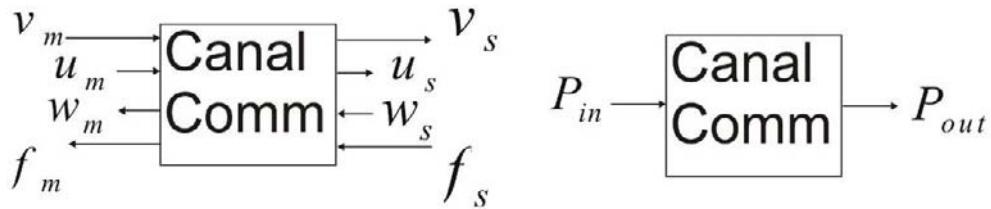


Figura 5.13 Descripción del flujo de potencia en un sistema mediante variables de onda

Donde $u = [u_m, u_s]^T$ es la onda de entrada y $w = [w_m, w_s]^T$ la onda de salida. Las ecuaciones previas definen las siguientes transformaciones entre las variables de potencia y de onda:

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2}} (f_m + v_m) \quad (5.56)$$

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{2}} (f_m - v_m) \quad (5.57)$$

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{2}} (f_s + v_s) \quad (5.58)$$

$$w_s = \frac{1}{\sqrt{2}} (f_s - v_s) \quad (5.59)$$

o, para ser consistente con las dimensiones físicas,

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_m + bv_m) \quad (5.60)$$

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_m - bv_m) \quad (5.61)$$

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_s - bv_s) \quad (5.62)$$

$$w_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (f_s + bv_s) \quad (5.63)$$

donde b es la impedancia característica de la línea de comunicación. Con la introducción de las variables de onda, para una red de dos puertos lineal e invariante en el tiempo, la matriz de *scattering* se define como:

$$w(t) = S(t)u(t) \quad \longleftrightarrow \quad f(t) - bv(t) = S(t)[f(t) + bv(t)] \quad (5.64)$$

o, equivalentemente:

$$w(s) = S(s)u(s) \quad \longleftrightarrow \quad f(s) - bv(s) = S(s)[f(s) + bv(s)] \quad (5.65)$$

La matriz de *scattering* se relaciona con la matriz híbrida mediante la siguiente relación:

$$S(s) = \begin{bmatrix} I_n & 0_n \\ 0_n & -I_n \end{bmatrix} [H(s) - I][H(s) + I]^{-1} \quad (5.66)$$

Se puede demostrar que una red de dos puertos es pasiva, si y solo si la norma de su matriz de *scattering* es menor o igual que uno $\|S\| \leq 1$, [Anderson 89b].

Control basado en la Pasividad

A continuación se presentan definiciones de la teoría de pasividad. Las mismas son abordadas desde una perspectiva general, para conocer las definiciones formales y completas se recomienda referirse a ([Williems 72], [Desoer 75], y [Schaft 00]). Suponiendo que las funciones de entrada/salida de algún modelo dinámico satisfacen asunciones simples y generales de integrabilidad, continuidad y normalidad. Se asume que todas las funciones están definidas en espacios propios $\ell_{2e}^n(\tau)$ (espacios lineales normales de funciones medidas en el sentido de Lebesgue), siendo τ el dominio del tiempo. Considerando un sistema dinámico descrito en el espacio de estados como:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (5.67)$$

donde $x \in \ell_{2e}^n(\tau)$, $y \in \ell_{2e}^m(\tau)$, $u \in \ell_{2e}^m(\tau)$. Se asume las funciones f , g , h suaves en x , con $f(0)=0$, $h(0)=0$.

El sistema [5.67] se dice que es pasivo si existe una función continua, llamada función de almacenamiento, $V(x) \geq 0, V : \ell_{2e}^n(\tau) \rightarrow \mathbb{R}_+$ que satisface $V(0)=0$, de manera que:

$$\int_{t_0}^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau \geq V(x(t)) - V(x(t_0)) \quad (5.68)$$

El sistema se dice que es estrictamente pasivo si existe una función de almacenamiento continuo $V(x) \geq 0, V : \ell_{2e}^n(\tau) \rightarrow \mathbb{R}_+$, el cual satisface $V(0)=0$, y una función definida positiva, llamada razón de disipación, $\phi(x(t))$, $\phi > 0$, $\phi : \ell_{2e}^n(\tau) \rightarrow \mathbb{R}_+$ tal que:

$$\int_{t_0}^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau = V(x(t)) - V(x(t_0)) + \int_{t_0}^t \phi(x(\tau))d\tau \quad (5.69)$$

La definición de pasividad dada en (5.68), frecuentemente se encuentra en la bibliografía en su forma diferencial como:

$$\dot{V}(x(t)) \leq y^T(t)u(t) \quad (5.70)$$

o, introduciendo explícitamente la función de razón de disipación ϕ , de la siguiente manera:

$$\dot{V}(x(t)) = y^T(t)u(t) - \phi(x(t)) \quad (5.71)$$

La cual refleja el concepto de conservación de energía de un sistema físico. La pasividad y la estabilidad de Liapunov son conceptos relacionados. De hecho, el siguiente resultado se mantiene [Krstic 95]: Suponiendo el sistema (5.67) es estrictamente pasivo. Si la función de almacenamiento $V(x)$ es definida positiva, no acotada radialmente, y decreciente, entonces, para $u \equiv 0$, el punto de equilibrio $x=0$ de (5.67) es globalmente uniforme (asintóticamente) estable.

Los resultados de la teoría de *scattering* y pasividad son usados para estudiar las propiedades de estabilidad en el canal de comunicación que causan inestabilidad del sistema en general cuando el retardo en la comunicación está presente. De hecho, puede ser verificado fácilmente que la matriz de *scattering* de un canal de comunicación como el de la figura 5.12, donde las fuerzas y velocidades son transmitidas sin ninguna transformación particular, tiene una norma mayor que uno ($\|S\| \geq 1$) y por lo tanto el canal no es pasivo, contribuyendo por lo tanto a desestabilizar el sistema.

Se ha demostrado que la definición de una red de comunicación basada en líneas de transmisión libres de pérdidas provee al sistema con las características de pasividad para cualquier retardo ([Anderson 89a], [Anderson 89b], [Niemeyer 98], [Niemeyer 97], [Niemeyer 04]). Obviamente, el resto de los componentes del sistema deben ser pasivos (un sistema que englobe solo subsistemas pasivos es pasivo) y por lo tanto se asume que un algoritmo de control apropiado es implementado en el maestro y en el esclavo, con el objetivo de hacer estos dispositivos pasivos.

Con la finalidad de obtener un canal de transmisión pasivo, las variables de onda u y w tienen que ser transmitidas en lugar de las variables de potencia f y v . En este sentido, es posible demostrar que la norma de la matriz de *scattering* es igual a uno ($\|S\|=1$) garantizando el hecho de que el canal de comunicación no cambie la propiedad de pasividad del sistema global. Para este propósito, el esquema de transmisión de la figura 5.14 debe ser implementado.

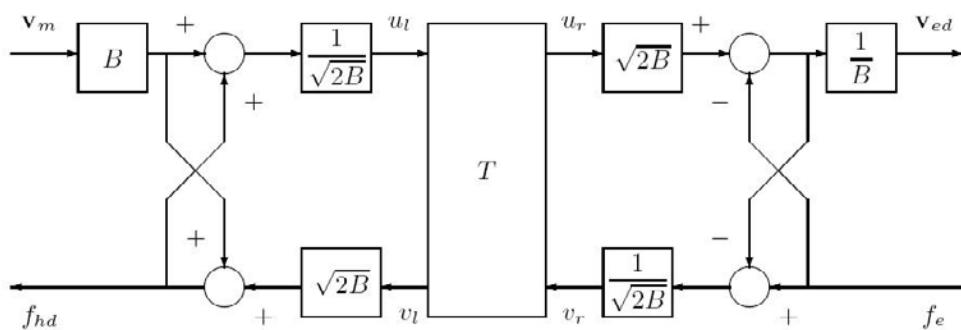


Figura 5.14 Línea de transmisión basada en pasividad

En términos de variables de onda, la pasividad basada en el canal de comunicación se describe como (figura 5.14):

$$\begin{cases} f_{hd}(t) = bv_m(t) + \sqrt{2b}v_l(t) \\ v_{ed}(t) = -\frac{1}{b}[f_e(t) - \sqrt{2bu_s(t)}] \end{cases} \quad (5.72)$$

Adaptación de impedancias en el modelo de 2 puertos.

Es ampliamente conocido de la teoría de redes eléctricas que es necesario adaptar impedancias al final de una línea eléctrica. De igual manera, la aplicación de pasividad en teleoperación implica prestar atención a la reflexión de potencia en ambos lados del telemanipulador. De hecho, cuando se genera dicha reflexión la línea no es estrictamente pasiva, por lo que contribuye a la desestabilización del sistema en general.

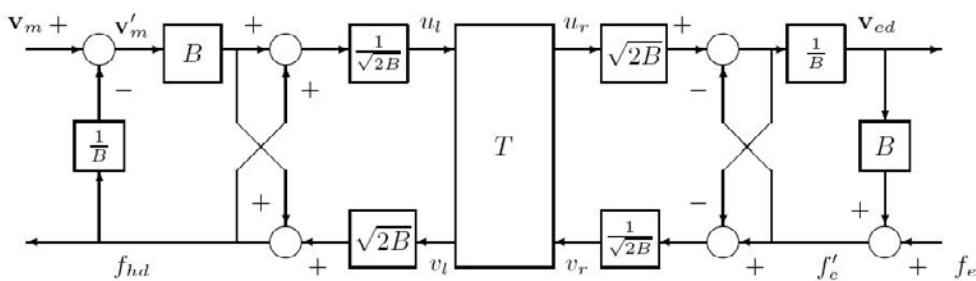


Figura 5.15 Línea de transmisión basada en pasividad con adaptación de impedancias

Con el fin de superar el problema de la reflexión, se usan elementos de adaptación de impedancia al final de ambos lados de la línea ([Niemeyer 90], [Niemeyer 91]). Estos elementos deben ser ajustados a la impedancia característica B de la línea de transmisión libre de pérdidas. La descripción de esta adaptación es la siguiente:

$$v'_m(t) = v_m(t) - \frac{1}{B}f_{hd}(t) \quad (5.73)$$

$$f'_e(t) = f_e(t) + Bv_{ed}(t) \quad (5.74)$$

Donde v'_m y f'_e son las variables de entrada para el canal de comunicación en ambos lados de la red después de la adaptación de impedancia B y $1/B$. El esquema de control basado en la pasividad con adaptación de impedancia se muestra en la figura 5.15. La inserción de los elementos de adaptación se debe a la modificación de la red usada para controlar los dispositivos maestro y esclavo, aunque estén descritos en términos de variables de potencia o variables de onda. En particular, las características de estabilidad se modifican también. En referencia a la descripción de las variables de onda, la red de comunicación se describe como:

$$f_{hd}(s) = \frac{B}{2} v_m(s) + \frac{1}{2} e^{-sT} f_e(s) \quad (5.75)$$

$$v_{ed}(s) = \frac{1}{2} e^{-sT} v_h(s) - \frac{1}{2B} f_e(s) \quad (5.76)$$

Con la finalidad de comparar el comportamiento del esquema fuerza-velocidad basado en pasividad con el esquema fuerza-posición, cuando se tienen retardos en las comunicaciones, se procedió a implementar el esquema en Simulink (figura 5.16). Para ello se utilizó los mismos parámetros numéricos usados para simular el comportamiento del esquema Fuerza-Posición.

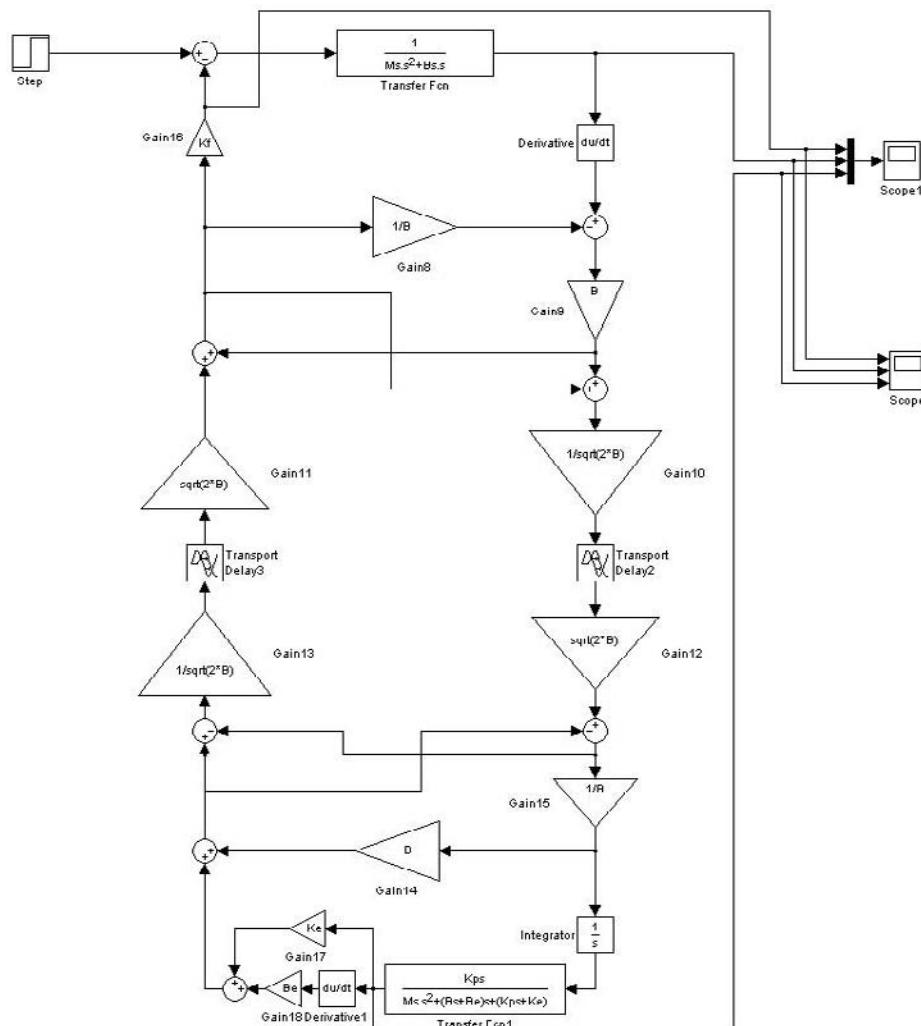


Figura 5.16 Implementación en Simulink del Esquema Fuerza-Velocidad basado en pasividad con adaptación de impedancias

A continuación se presentan los resultados de varias simulaciones realizadas con distintos valores de retardo y cambiando la dinámica del entorno de colisión.

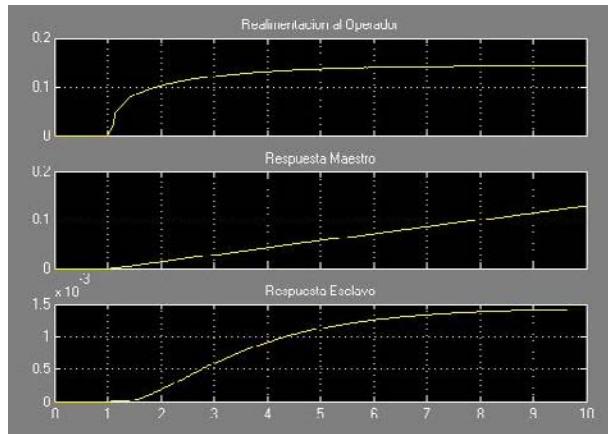


Figura 5.17 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=1000$, $B_e=1000$, $K_{ps} = 130$, $K_f= 0.1$ y Retardo $T = 50\text{mSeg}$.

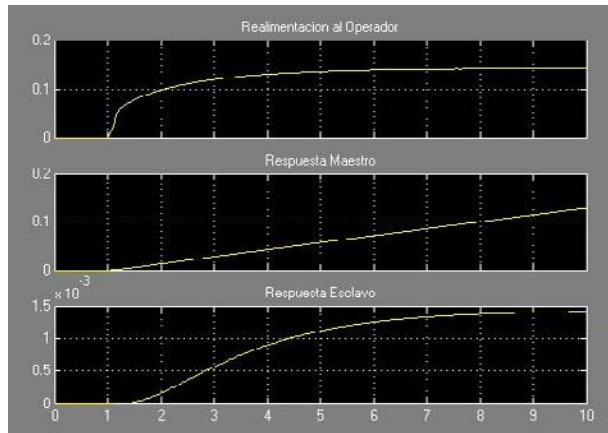


Figura 5.18 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=1000$, $B_e=1000$, $K_{ps} = 130$, $K_f= 0.1$ y Retardo $T = 120\text{mSeg}$.

En las figuras 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20, se observan 3 respuestas, la primera corresponde a la señal de realimentación de fuerza al operador, la segunda corresponde a la respuesta del sistema maestro y la tercera la respuesta del sistema esclavo.

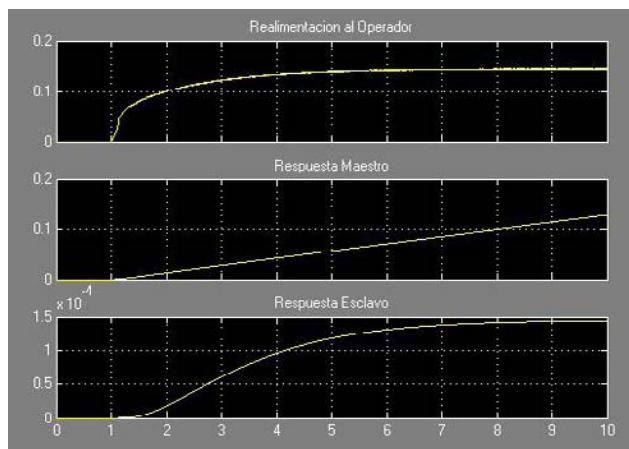


Figura 5.19 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=10000$, $B_e=10000$, $K_{ps} = 130$, $K_f= 0.1$ y Retardo $T = 120\text{mSeg}$.

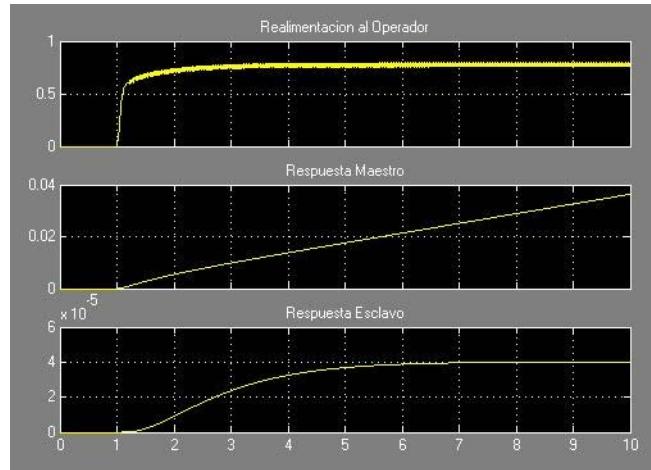


Figura 5.20 Respuesta temporal de sistema BSP-PUMA, con $K_e=10000$, $B_e=10000$, $K_{ps} = 130$, $K_f= 2$ y Retardo $T = 100\text{mSeg}$.

De la figura 5.17, se puede observar como desaparece la oscilación en la respuesta del esclavo, en comparación con la respuesta del sistema controlado con el esquema fuerza-posición (figura 5.8b). También es importante resaltar varios hechos, lo primero es que la señal de realimentación de fuerza al operador se satura en un punto, por lo que tiene un límite superior en la magnitud de la fuerza que puede reflejar. También, el esclavo se estabiliza en un punto, sin embargo el maestro continúa su recorrido. Este es el comportamiento originado debido a la técnica de pasivización de la línea de comunicación y lo que permite que el sistema sea estable.

En la figura 5.18, se puede observar como al aumentar el retardo de 50 ms. a 120 ms. el sistema aún sigue comportándose de manera estable, sin necesidad de modificar la constante de reflexión de fuerzas ni la ganancia del regulador del esclavo K_{ps} , la figura 5.19 muestra que el sistema también se mantiene estable cuando cambia la dinámica del entorno de colisión haciéndose más rígido. Este comportamiento constituye una diferencia y mejora importante respecto al esquema fuerza-posición, ya que este último si requiere ajustar, bien sea la constante de reflexión de fuerzas o la ganancia del regulador del esclavo para que el sistema tenga un comportamiento adecuado ante un entorno en particular, debiendo ser ajustados nuevamente cuando las características del entorno cambian.

La figura 5.20 muestra el comportamiento del sistema cuando se tiene un retardo de 100mSeg., un entorno rígido de $K_e = 10000$ y $B_e = 10000$, pero la constante de reflexión de fuerzas se aumentó a 2. En este caso, se puede notar que el aumento de la constante de reflexión de fuerzas al operador comienza a dar orígenes a pequeñas oscilaciones. Este comportamiento demuestra que el esquema también posee límites en cuanto al rango de valores de la constante de reflexión de fuerzas, pero estos límites son mayores en magnitud en comparación con los que corresponden al esquema fuerza-posición vistos en la tabla 5.1.

Resultados Experimentales

Para lograr una aplicación exitosa de este algoritmo de control, es importante cumplir con algunos requerimientos con relación a la comunicación entre el maestro y el esclavo, como por ejemplo garantizar un retardo constante y evitar la perdida de

datos. Para estos casos, existen algoritmos de control cuyo estudio no son motivo de la presente tesis.

Tal como se pudo observar en las figuras 5.14 y 5.15, los datos son representados por las variables de estado u_m , u_s , w_m y w_s . Las mismas describen la transferencia de energía entre el maestro y el esclavo. Este es el fundamento de los controladores basados en pasividad. Es importante considerar que la velocidad (v) y la fuerza (f) son variables que caracterizan un telerobot bilateral. Por tales razones, la aplicación de las ecuaciones (5.72), son requeridas para implementar el esquema de control de la figura 5.14 sin adaptación de impedancias. Por otro lado, las ecuaciones (5.75) y (5.76) deben ser aplicadas cuando se requiere adaptar impedancias tal como se mostró en la figura 5.15. Estas ecuaciones aseguran la pasividad tanto del dispositivo maestro como del esclavo, y son definidas de acuerdo a su fuerza y velocidad.

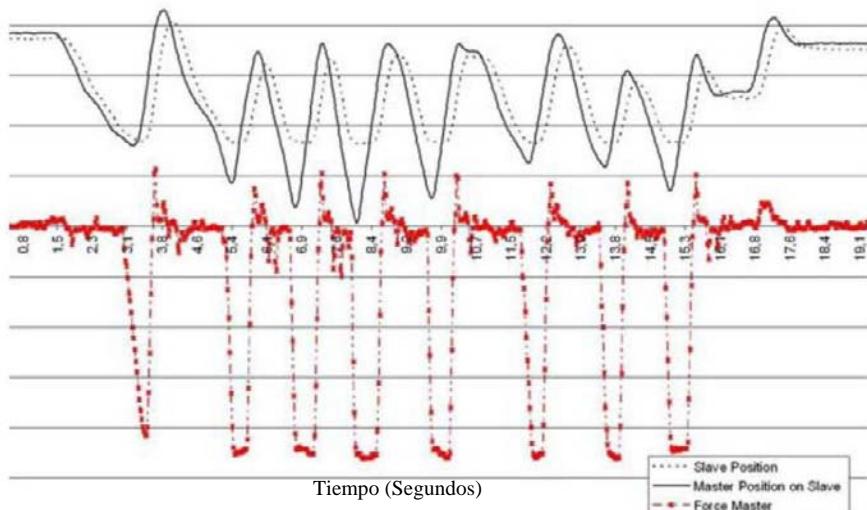


Figura 5.21 Sistema bilateral Maestro-Esclavo con retardo de 100mSeg, con un controlador sin pasividad

En la figura 5.21 se muestra los resultados obtenidos de la teleoperación del sistema Kraft con un retardo de 100 ms. En este caso no se ha aplicado pasividad. Tal como se puede observar en dicha figura, el sistema se vuelve inestable cuando colisiona con objetos rígidos. Una vez que ocurre la colisión, el maestro refleja una fuerza retardada al operador la cual no corresponde con el movimiento actual del maestro. Ello trae como consecuencia una reflexión excesiva de fuerza al operador. Consecuentemente, el maestro y el esclavo tienen movimientos oscilatorios alrededor del punto de contacto. Debido al retardo, si no es aplicada la teoría de pasividad cuando el esclavo colisiona con un objeto rígido, se refleja una fuerza excesiva a través del maestro, lo cual hace difícil controlar el sistema bilateral después de la colisión.

La figura 5.22 muestra el comportamiento del sistema al cual se le incluye un controlador basado en pasividad. En este caso, se muestra como el sistema se comporta de manera estable luego de colisionar con un objeto rígido a pesar del retardo de 100 ms.

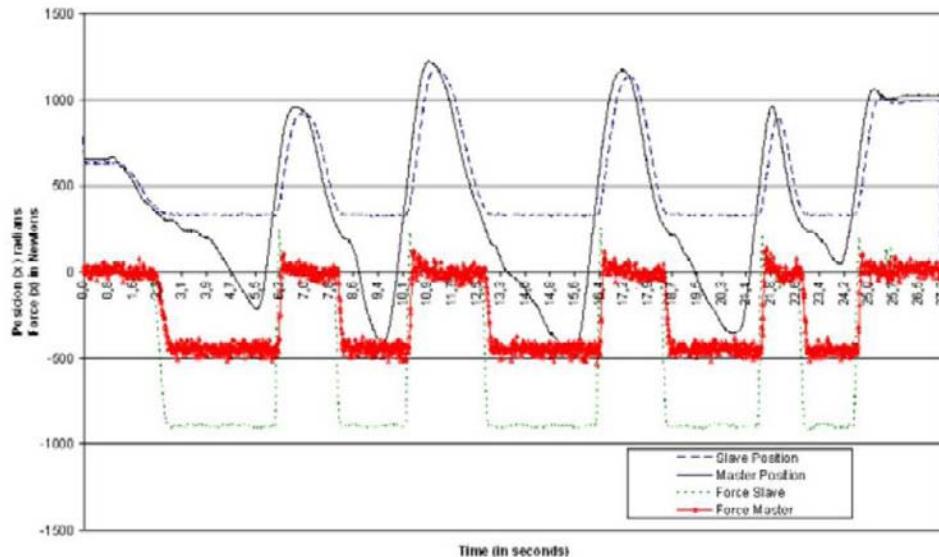


Figura 5.22 Sistema bilateral Maestro-Esclavo con retardo de 100mSeg, con un controlador con pasividad

En la figura 5.22, el retardo entre la posición del maestro y el esclavo es conocido. Por otro lado, puede observarse que luego de la colisión, que la fuerza reflejada por el maestro es limitada independientemente de la posición que ha alcanzado el maestro. Esto se debe fundamentalmente al regulador que corrige la fuerza reflejada sobre el maestro, y por la corrección de la posición del esclavo (ecuaciones 5.75 y 5.76). Estas correcciones permiten limitar las fuerzas aplicadas luego de la colisión con el entorno. Las mismas son realizadas mediante la corrección de la velocidad del esclavo (v_{ed}) y también por la fuerza reflejada al operador (f_{hd}). Tal comportamiento es lo que hace estable al sistema.

La estabilidad del sistema muestra claramente el hecho que el telerobot puede mantenerse balanceado a pesar del retardo en la comunicación. Esto se puede observar claramente en presencia de una colisión permanente donde el balanceo se realiza sin que el sistema se haga inestable. Si no se aplicara pasividad el contacto hiciera repeler al operador, tal como se observa en la figura 5.21. Es por esto que el sistema bilateral se mantiene estable aún cuando exista un error claro de posición entre el maestro y el esclavo. Dicho error desaparece cuando el esclavo no colisiona con el entorno.

5.3 Conclusiones

En el presente capítulo se presentó el control bilateral con retardos en las comunicaciones. Específicamente se presentaron, analizaron e implementaron los esquemas bilaterales fuerza-posición y fuerza-velocidad con pasividad. Es necesario remarcar, que debido a que se hace uso de modelos simplificados y linealizados, las conclusiones serán válidas con las restricciones oportunas.

Respecto al esquema fuerza-posición:

Se estudió la estabilidad haciendo uso del criterio de Routh, del mismo se determinó que el límite máximo del rango del coeficiente de reflexión es mucho más dependiente de la rigidez del entorno de colisión cuando esta es más suave que cuando es más fuerte. El valor máximo que puede tener el coeficiente de reflexión es menor a medida que aumenta la rigidez del entorno. El efecto del retardo en las comunicaciones muestra también este mismo comportamiento, por lo cual el coeficiente de reflexión máximo que puede usarse garantizando la estabilidad del sistema, depende del efecto combinado de la rigidez del entorno y el retardo.

Se analizó el efecto que tiene el retardo sobre el lugar geométrico de las raíces, pudiéndose observar la aparición de unos polos complejos conjugados cuya parte imaginaria se hace más grande a medida que el retardo aumenta, por lo que uno de los efectos inmediatos de este fenómeno es que la respuesta temporal del sistema se hace cada vez más oscilatoria respectivamente. Igualmente se pudo comprobar como el hecho de sumar un efecto derivativo al controlador del esclavo, es posible disminuir el efecto oscilatorio en la respuesta del esclavo, pero solo cuando se tienen retardos relativamente pequeños, y dado para cada condición de rigidez del entorno y magnitud de retardo, el uso del efecto derivativo en el controlador del esclavo para una aplicación real requeriría de la implementación de un algoritmo del tipo adaptativo.

También se estudió el efecto que tiene el retardo sobre el error en estado estacionario, notándose que el mismo tiene una influencia indirecta a través del coeficiente de reflexión de fuerzas; ya que en si, el error en estado estacionario sería el mismo que el esquema fuerza-posición sin retardo. Solo que como se mencionó, el retardo causa que el valor máximo del coeficiente disminuya para garantizar la estabilidad y si el mismo desciende por debajo de 1 el error comienza a aumentar. El esquema se implementó en la plataforma experimental descrita en el capítulo 3, donde se pudo comprobar como el sistema se inestabiliza al colisionar con objetos rígidos, al requerir de una constante de reflexión de fuerzas más pequeña, tal como se esperaba de los análisis teóricos. Despues de la colisión el sistema refleja la fuerza retardada que no corresponde con los movimientos del maestro, además de aplicar una fuerza excesiva.

Los análisis teóricos y resultados experimentales presentados representan aportaciones originales de la tesis.

Respecto al esquema fuerza-velocidad basado en pasividad:

La técnica basada en la pasividad demostró su utilidad a la hora de garantizar la estabilidad del sistema bilateral en la presencia de retardos en las comunicaciones significativos.

Se pudo observar la característica principal del comportamiento práctico del comportamiento del esquema, que es lo que le permite garantizar la estabilidad. Del lado del maestro, el sistema no refleja una fuerza excesiva sino que satura el nivel máximo reflejado al operador, pero que es lo suficientemente elevado como para que el mismo sienta la colisión, esto trae como consecuencia que aunque el esclavo colisione con un entorno excesivamente rígido el sistema no reflejara una fuerza que intente

cancelar la fuerza ejercida por el operador sobre el maestro. En cuanto al esclavo, el mismo al momento de colisionar, el mismo estabiliza su movimiento deteniéndose, aún cuando el maestro continúe su movimiento.

El esquema fuerza-velocidad permite aumentar el valor del coeficiente de reflexión de fuerzas, en comparación con el esquema fuerza-posición, sin embargo también tiene un límite, llegado el cual el sistema también comienza a mostrar oscilaciones, que aunque sean menores en comparación con las presentadas en el esquema fuerza-posición, son indeseadas.

Los resultados experimentales presentados representan aportaciones originales de la tesis, dado que existe una deficiencia en relación a la implementación de este algoritmo en sistemas industriales reales, y por ende el comportamiento que sobre los mismos origina.

Capítulo 6

DISEÑO DE REGULADORES BILATERALES MEDIANTE EL ALGORITMO DE CONVERGENCIA DE ESTADOS

En este capítulo se presentará un nuevo planteamiento del algoritmo de diseño de reguladores mediante convergencia de estados. Este algoritmo ofrece ciertas ventajas en cuando al diseño sobre los algoritmos presentados hasta el momento. Este nuevo planteamiento se basa en el análisis de transparencia realizado al método de convergencia de estados. Como resultado se obtienen unos criterios de diseño para los reguladores del sistema bilateral que permiten alcanzar un equilibrio entre transparencia y estabilidad del sistema.

Las modificaciones realizadas pretenden dar más generalidad al algoritmo de forma que los esquemas clásicos de control de 2 y 4 canales pueden ser derivados fácilmente a partir de este nuevo esquema.

6.1 Modelado de un sistema de teleoperación basado en el esquema de control de convergencia de estados

El esquema de control basado en la convergencia del estado entre maestro y esclavo de un sistema bilateral fue presentado inicialmente por R. Aracil y J.M. Azorín [Azorin 03]. En este apartado se muestra un esquema más general que será utilizado sobre el que se realizará un análisis de la transparencia del sistema.

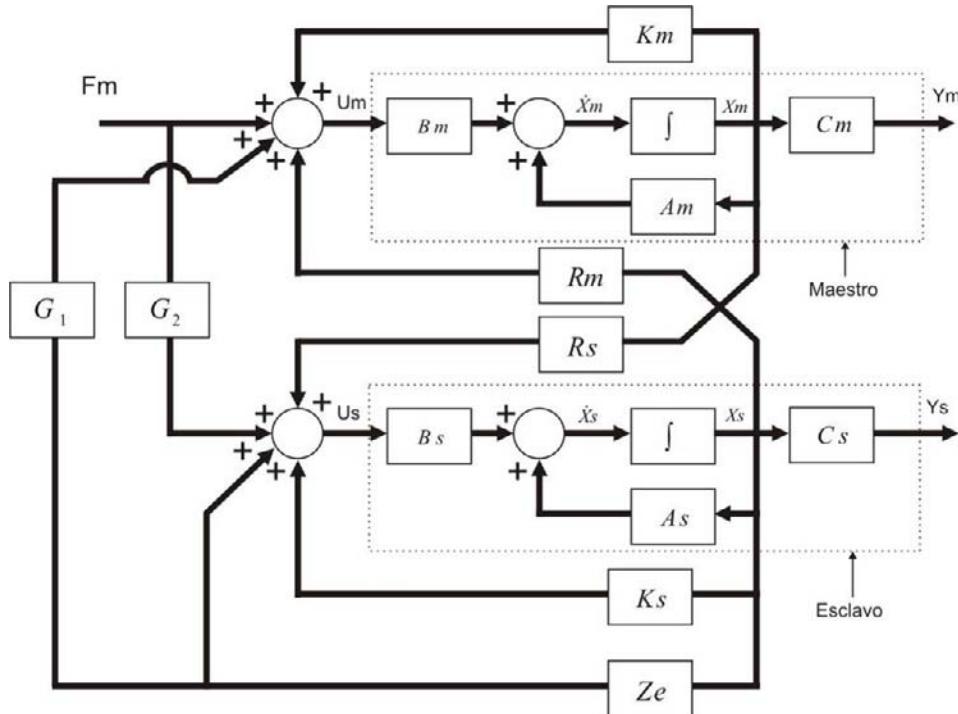


Figura 6.1 Esquema de control de convergencia de estados

Esta nueva versión del esquema de control basado en la convergencia del estado de maestro y esclavo incluye las matrices G_1 y Z_e . G_1 representa un escalar que representa la ganancia entre la fuerza ejercida y la reflejada, y Z_e es una matriz que representa el entorno con el que interacciona el esclavo. El esquema de control propuesto es el mostrado en la figura 6.1. Como se puede observar maestro y esclavo son representados en el espacio de estados por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \quad (6.1)$$

$$y_m(t) = C_m x_m(t) \quad (6.2)$$

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s u_s(t) \quad (6.3)$$

$$y_s(t) = C_s x_s(t) \quad (6.4)$$

En el anterior esquema de control aparecen las siguientes señales:

$f_m(t)$: representa la fuerza aplicada por el operador.

$u_m(t)$ y $u_s(t)$: son las señales de entrada a los dispositivos maestro y esclavo.

$x_m(t)$ y $x_s(t)$: son vectores que representan el estado de maestro y esclavo respectivamente.

$y_m(t)$ y $y_s(t)$: representan las variables de salida de maestro y esclavo que se obtienen a partir de las anteriores variables de estado.

Las siguientes matrices son datos de partida del sistema bilateral, y representan la dinámica de maestro y esclavo. La dimensión de estas matrices dependerá del grado del estado, que en un principio se considerará de grado n

$A_{m(n \times n)}$ y $A_{s(n \times n)}$ son las matrices de estado de maestro y esclavo.

$B_{m(n \times 1)}$ y $B_{s(n \times 1)}$ son las matrices de entrada de maestro y esclavo.

$C_{m(n \times n)}$ y $C_{s(n \times n)}$ son las matrices de salida de maestro y esclavo.

Las siguientes 6 matrices representan los parámetros de diseño del sistema de control bilateral:

$G_1(1 \times 1)$: Proporción de la fuerza del entorno que se refleja al operador.

$G_2(1 \times 1)$: Proporción de la fuerza del operador que se pre-alimenta al esclavo.

$K_m(n \times 1)$: Matriz de realimentación de estado del maestro, permite ajustar la dinámica del maestro.

$K_s(n \times 1)$: Matriz de realimentación de estado del esclavo, permite ajustar la dinámica del esclavo.

$R_m(n \times 1)$: Matriz de realimentación del estado del esclavo sobre el maestro.

$R_s(n \times 1)$: Matriz de realimentación del estado del maestro sobre el esclavo.

6.2 Cálculo de controladores bilaterales mediante convergencia de los estados de maestro y esclavo

El problema del cálculo de reguladores consiste en obtener el valor de las matrices G_1 , G_2 , K_m , K_s , R_m y R_s que permitan obtener el comportamiento deseado del sistema bilateral. En este caso, el objetivo de los reguladores será maximizar la percepción del entorno remoto, lo cual se definirá en términos de transparencia.

6.2.1 Condiciones de diseño del sistema de control bilateral por convergencia de estados

Teniendo en consideración los modelos del sistema teleoperado, el modelo del entorno y el modelo de la reflexión de fuerzas, se procederá a realizar el diseño del sistema de control por convergencia de estados. Tomando como punto de partida el modelo del sistema teleoperado de la figura 6.1, se tienen las siguientes ecuaciones para el maestro y el esclavo:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \quad (6.5)$$

$$u_m(t) = K_m x_m(t) + (R_m + G_1 Z_e) x_s(t) + f_m(t) \quad (6.6)$$

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m (K_m x_m(t) + (R_m + G_1 Z_e) x_s(t) + f_m(t)) \quad (6.7)$$

$$\dot{x}_m(t) = (A_m + B_m K_m) x_m(t) + B_m (R_m + G_1 Z_e) x_s(t) + B_m f_m(t) \quad (6.8)$$

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s u_s(t) \quad (6.9)$$

$$u_s(t) = (K_s + Z_e)x_s(t) + R_s x_m(t) + G_2 f_m(t) \quad (6.10)$$

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s ((K_s + Z_e)x_s(t) + R_s x_m(t) + G_2 f_m(t)) \quad (6.11)$$

$$\dot{x}_s(t) = (A_s + B_s(K_s + Z_e))x_s(t) + B_s R_s x_m(t) + G_2 B_s f_m(t) \quad (6.12)$$

Definiendo como $x(t)$ el vector de estado que incluye el estado de maestro y esclavo se tiene:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bf_m(t) \quad (6.13)$$

desarrollándolo matricialmente la anterior ecuación se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m(t) \\ \dot{x}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m + B_m K_m & B_m(R_m + G_1 Z_e) \\ B_s R_s & A_s + B_s(K_s + Z_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ G_2 B_s \end{bmatrix} f_m(t) \quad (6.14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m(t) \\ \dot{x}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} f_m(t) \quad (6.15)$$

donde las submatrices de las matrices A y B son:

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_m + B_m K_m \\ A_{12} &= B_m(R_m + G_1 Z_e) \\ A_{21} &= B_s R_s \\ A_{22} &= A_s + B_s(K_s + Z_e) \\ B_{11} &= B_m \\ B_{21} &= G_2 B_s \end{aligned} \quad (6.16)$$

Realizando una transformación lineal de la representación de estados en función de una matriz T:

$$x(t) = T \tilde{x}(t) \quad (6.17)$$

$$T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} = T^{-1} \quad (6.18)$$

El nuevo vector de estados tendrá la forma:

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_m(t) - x_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_s(t) \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

La anterior transformación permite definir una nueva variable x_e ($x_e = x_m - x_s$), que será denominada error de estados, ya que representa el error entre el estado del maestro x_m y el estado del esclavo x_s .

Sustituyendo la transformación lineal T en la ecuación 6.17, se tiene:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = T^{-1}AT\tilde{x}(t) + T^{-1}Bf_m(t) \quad (6.20)$$

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} \tilde{x}(t) + \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} f_m(t) \quad (6.21)$$

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \begin{bmatrix} A_{11} + A_{12} & -A_{12} \\ A_{11} - A_{21} + A_{12} - A_{22} & A_{22} - A_{12} \end{bmatrix} \tilde{x}(t) + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{11} - B_{21} \end{bmatrix} f_m(t) \quad (6.22)$$

Realizando la correspondiente sustitución, se tiene que:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}f_m(t) \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_m(t) \\ \dot{x}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m(t) \\ x_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_{11} \\ \tilde{B}_{21} \end{bmatrix} f_m(t) \quad (6.23)$$

Donde:

$$\tilde{A}_{11} = A_{11} + A_{12} = A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) \quad (6.24)$$

$$\tilde{A}_{12} = -A_{12} = -B_m(R_m + G_1 Z_e) \quad (6.25)$$

$$\tilde{A}_{21} = A_{11} - A_{21} + A_{12} - A_{22} = \quad (6.26)$$

$$A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) - A_s - B_s(R_s + K_s + Z_e)$$

$$\tilde{A}_{22} = A_{22} - A_{12} = A_s + B_s(K_s + Z_e) - B_m(R_m + G_1 Z_e) \quad (6.27)$$

$$\tilde{B}_{11} = B_{11} = B_m \quad (6.28)$$

$$\tilde{B}_{21} = B_{11} - B_{21} = B_m - G_2 B_s \quad (6.29)$$

A partir de la ecuación (6.27) se tiene que:

$$\dot{x}_e(t) = \tilde{A}_{21}x_m(t) + \tilde{A}_{22}x_e(t) + \tilde{B}_{21}f_m(t) \quad (6.30)$$

En un sistema bilateral es deseable que la evolución del error sea independiente tanto de la señal de entrada como del estado del esclavo; esto implica que la señal de error debería evolucionar como un sistema autónomo, lo cual requiere que:

$$\tilde{A}_{21} = \tilde{B}_{21} = 0 \quad (6.31)$$

Es decir, la ecuación del error del estado se convertirá en una ecuación homogénea, dada por:

$$\dot{x}_e(t) = \tilde{A}_{22}x_e(t) \quad (6.32)$$

La matriz \tilde{A}_{22} fija la dinámica del error, sus valores propios determinan la estabilidad y respuesta transitoria del sistema. Si se logra ubicar estos en el semiplano izquierdo del plano S, entonces la señal de error tendrá un comportamiento asintóticamente estable y para todos los $x_e(0) \neq 0$, $x_e(t)$ tenderá a 0 según t tienda a

infinito de esta manera se logra que el esclavo siga al maestro. Para que lo dicho se cumpla, se tiene que verificar que:

$$\tilde{A}_{21} = 0 \text{ y } \tilde{B}_{21} = 0 \quad (6.33)$$

Expresando la anterior ecuación en base a los componentes del diagrama de bloques de la figura 6.1. Se tiene:

$$\tilde{A}_{21} = A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) - A_s - B_s(R_s + K_s + Z_e) = 0 \quad (6.34)$$

$$\tilde{B}_{21} = B_m - B_s G_2 = 0 \quad (6.35)$$

Las ecuaciones anteriores suponen 2 importantes condiciones de diseño para el sistema bilateral, que se van a exponer seguidamente.

Condición de diseño 1 (evolución del error como sistema autónomo I)

La primera condición viene dada por la relación entre las dinámicas y realimentaciones de maestro y esclavo según la siguiente relación:

$$A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) = A_s + B_s(K_s + R_s + Z_e) \quad (6.36)$$

Si en la anterior ecuación se cumple que el valor de $B_m G_1 Z_e = B_s Z_e \Rightarrow B_m G_1 = B_s$, entonces se puede eliminar la influencia externa ya que así se garantiza que se cumplirá para cualquier entorno; de esta forma la primera condición de diseño queda como:

$$\begin{aligned} A_m + B_m(K_m + R_m) &= A_s + B_s(K_s + R_s) \\ B_m G_1 &= B_s \end{aligned} \quad (6.37)$$

En el caso de ser $B_m G_1 \neq B_s$, se puede conseguir que la condición 1 sea independiente del entorno mediante el valor asignado a la realimentación dada por R_m ; es decir:

$$\begin{aligned} B_m(R_m + G_1 Z_e) &= B_s Z_e \Rightarrow R_m = (G_2^{-1} - G_1)Z_e \\ A_m + B_m K_m &= A_s + B_s(K_s + R_s) \end{aligned} \quad (6.38)$$

Esta segunda opción implica que R_m depende del entorno, lo cual da lugar a un caso más complejo.

Condición de diseño 2 (evolución del error como sistema autónomo II)

El término (6.35) representa una adaptación de la entrada del operador; dicha adaptación implica que la entrada del operador aparece escalada en el esclavo. Este escalado viene definido por la ecuación 6.35, lo que se traduce en la siguiente condición:

$$B_m = G_2 B_s \quad (6.39)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el esquema de control bilateral cuenta con 6 parámetros de diseño (G_1 , G_2 , R_m , R_s , K_m y K_s) a calcular. Hasta ahora se han obtenido 3 relaciones, por lo que se precisa imponer más condiciones de diseño. Para completar el diseño del sistema bilateral se precisa imponer nuevas condiciones. Estas condiciones determinarán el comportamiento que se desea alcanzar. En esta Tesis se busca aquellas condiciones que mejor reflejen el entorno remoto, así pues se busca el máximo grado de transparencia del sistema bilateral, con el objeto de encontrar relaciones que optimicen la percepción del entorno remoto al operador.

Esta es una aportación de la tesis doctoral en la metodología del cálculo de reguladores mediante convergencia de estados, ya que las versiones anteriores no se contemplaba el análisis de la transparencia del sistema bilateral, si no que se basaban en la evolución de la señal de error.

Condición de diseño 3 (análisis de transparencia)

El mayor grado de transparencia se obtiene cuando la impedancia vista desde el lado del operador es igual a la impedancia del entorno remoto. Como se ha visto en capítulos anteriores, se requiere cumplir que:

$$\frac{f_m(s)}{v_m(s)} = Z_e(s) \quad (6.40)$$

La función de transferencia anterior no aparece directamente en el esquema de control de la figura 6.1, pero es posible aplicar el concepto de función de transferencia al esquema de control de convergencia de estados. La siguiente figura muestra diagrama de bloques simplificado, que se obtiene a partir del esquema de control de la figura 6.1. Utilizando las ecuaciones 6.23 a 6.29 se llega al siguiente esquema de control:

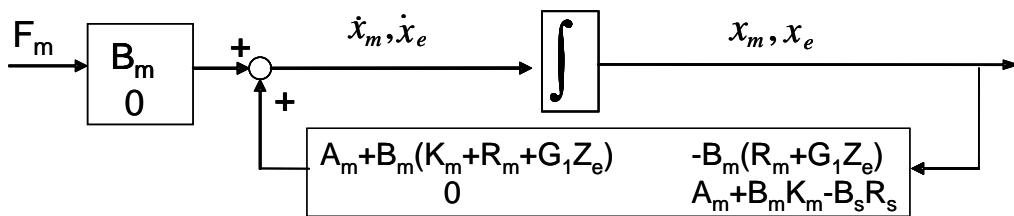


Figura 6.2 Esquema de control simplificado

En el anterior esquema es posible definir la función de transferencia entre la entrada F_m , y las distintas salidas que definen los estados del maestro y del esclavo. La matriz de funciones de transferencia de un sistema modelado en el espacio de estados viene dada por:

$$G(s) = \tilde{C}[sI - \tilde{A}]^{-1} \tilde{B} + \tilde{D} \quad (6.41)$$

Según el esquema de la figura 6.2, y teniendo en cuenta las ecuaciones 6.36 y 6.39, los valores de las anteriores matrices son:

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} \\ 0 & \tilde{A}_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) & -B_m(R_m + G_1 Z_e) \\ 0 & A_m + B_m K_m - B_s R_s \end{pmatrix} \\ \tilde{B} &= \begin{pmatrix} \tilde{B}_{11} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_m \\ 0 \end{pmatrix} \\ \tilde{C} &= I \\ \tilde{D} &= 0\end{aligned}\tag{6.42}$$

Así pues la matriz de funciones de transferencia vendrá definida como:

$$\begin{aligned}G(s) &= I[sI - \tilde{A}]^{-1} \begin{pmatrix} B_m \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} sI - \tilde{A}_{22} & \tilde{A}_{12} \\ 0 & sI - \tilde{A}_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_m \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \\ G(s) &= \frac{1}{|sI - \tilde{A}_{11}| |sI - \tilde{A}_{22}|} \begin{pmatrix} (sI - \tilde{A}_{22}) B_m \\ 0 \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{6.43}$$

Existen varios puntos que conviene destacar de la matriz de funciones de transferencia:

- $\tilde{C} = I$. Se ha tomado como salida el estado del maestro y la señal de error.
- La matriz \tilde{B} tiene nulos la submatriz de sus elementos. Esto indica que es un sistema no controlable, lo cual es un resultado lógico ya que según las anteriores condiciones de diseño la evolución de la señal de error es independiente de la entrada; por tanto no existe relación entre la señal de error y la entrada del operador.

La condición estricta de transparencia aplicada a las anteriores FdT requiere que para todo momento:

$$\frac{f_m(s)}{v_m(s)} = Z_e(s)\tag{6.44}$$

En esta Tesis se van aplicar unas condiciones menos estrictas de transparencia de modo que solo se impone que las componentes elástica y viscosa sean percibidas por el operador en régimen permanente, es decir:

- Para un entorno predominantemente elástico:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x_m(t)}{f_m(t)} = \frac{1}{k_e}\tag{6.45}$$

- Para un entorno predominantemente viscoso:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_m(t)}{f_m(t)} = \frac{1}{b_e}\tag{6.46}$$

6.3 Análisis de transparencia para maestro y esclavo de segundo orden

Para poder aplicar las condiciones de transparencia se precisa definir más concretamente las matrices anteriores que modelan a maestro y esclavo. En esta sección se modelan maestro y esclavo mediante sistemas de orden 2, en los que las variables de estado son la posición y la velocidad. Así pues, las matrices A_m y B_m , que definen el comportamiento del maestro, tendrán la forma:

$$A_m = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix}, B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ b_{m2} \end{pmatrix} \quad (6.47)$$

Definiendo el entorno $Z_e = [k_e \ b_e]$ y las incógnitas a calcular como:

$$\begin{aligned} G_1 &= g_1, G_2 = g_2, K_m = [k_{m1} \ k_{m2}], \\ K_s &= [k_{s1} \ k_{s2}], R_m = [r_{m1} \ r_{m2}], R_s = [r_{s1} \ r_{s2}], \end{aligned} \quad (6.48)$$

Sustituyendo los anteriores valores en la ecuación 6.42 se tiene:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{11} &= A_m + B_m(K_m + R_m + G_1 Z_e) = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{m2} \end{pmatrix} (k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e \quad k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e) = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e) & b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e) \end{pmatrix} \Rightarrow \quad (6.49) \\ \tilde{A}_{11} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e) & a_{m22} + b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{22} &= A_m + B_m K_m - B_s R_s = A_m + B_m \left(K_m - \frac{1}{g_2} R_s \right) = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{m2} \end{pmatrix} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \quad k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) = \quad (6.50) \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) & a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \end{pmatrix}$$

Sustituyendo los valores de las anteriores matrices en la ecuación 6.43 se tiene:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} (sI - \tilde{A}_{22})B_m \\ 0 \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} s & -1 \\ -a_{m21} - b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) & s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ b_{m2} \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -b_{m2} \\ s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} b_2
 \end{aligned} \tag{6.51}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 \Delta &= |sI - \tilde{A}_{11}| |sI - \tilde{A}_{22}| = \\
 &= \begin{vmatrix} s & -1 \\ -a_{m21} - b_{m2} \left(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e \right) & s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e \right) \right) \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} s & -1 \\ -a_{m21} - b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) & s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) \end{vmatrix} = \\
 &= \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e \right) \right) \right) \\
 &\quad \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{6.52}$$

Así pues, las funciones de transferencia que se obtienen son:

$$\begin{aligned}
 \frac{x_m(s)}{f_m(s)} &= \frac{-b_{m2}}{\left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e \right) \right) \right)} \\
 &\quad \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) \right) \\
 \frac{v_m(s)}{f_m(s)} &= \frac{\left(s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) \right) b_{m2}}{\left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e \right) \right) \right)} \\
 &\quad \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) \right) \\
 \frac{x_e(s)}{f_m(s)} &= 0 \\
 \frac{v_e(s)}{f_m(s)} &= 0
 \end{aligned} \tag{6.53}$$

Las dos últimas FdT son igual a 0. Esta es la parte no controlable del sistema, ya que las condiciones de diseño relativas al comportamiento autónomo de la señal de error fuerzan a que no exista relación entre la fuerza de entrada y el error.

Las FdT de $\frac{x_m(s)}{f_m(s)}$ y $\frac{v_m(s)}{f_m(s)}$ tienen el mismo polinomio característico que viene dado por:

$$\begin{aligned}\Delta = & \left| sI - \tilde{A}_{11} \right| \left| sI - \tilde{A}_{22} \right| = \\ & \left(s^2 - s(a_{m22} + b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e)) - (a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e)) \right) \\ & \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) \right)\end{aligned}$$

La estabilidad de ambas FdT requiere que los polos queden en el semiplano negativo, lo cual se cumple imponiendo que los coeficientes (δ_i) de los dos polinomios de segundo grado sean positivos; es decir:

$$a_{m22} + b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e) = -\delta_1 < 0 \quad (6.54)$$

$$a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e) = -\delta_2 < 0 \quad (6.55)$$

$$a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) = -\delta_3 < 0 \quad (6.56)$$

$$a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) = -\delta_4 < 0 \quad (6.57)$$

El objetivo de transparencia aplicado a las anteriores FdT, tal y como se citó anteriormente es:

- Para un entorno predominantemente elástico:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x_m(t)}{f_m(t)} = \frac{1}{k_e} \quad (6.58)$$

- Para un entorno predominantemente viscoso:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_m(t)}{f_m(t)} = \frac{1}{b_e} \quad (6.59)$$

Este objetivo puede ponerse como la condición que debe cumplir la correspondiente FdT en régimen permanente; así pues, si la entrada es una fuerza modelada como un escalón para un entorno puramente elástico, se tiene que cumplir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_m(t) = \frac{1}{k_e} \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s x_m(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} x_m(s) = \lim_{s \rightarrow 0} x_m(s) = \frac{1}{k_e} \Rightarrow$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\begin{array}{c} -b_{m2} \\ \left(s^2 - s(a_{m22} + b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 k_e)) - (a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e)) \right) \\ \left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) \right) \end{array} \right) = \frac{1}{k_e} \Rightarrow \quad (6.60)$$

$$\frac{1}{k_e} = \frac{-b_{m2}}{\left(a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e) \right) \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right)}$$

Evaluando la ecuación 6.60 se tiene que:

$$\frac{1}{k_e} = \frac{-b_{m2}}{\left(a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1}) \right) \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right)} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} g_1 \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) = -1 \\ a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1}) = 0 \end{array} \right\} \quad (6.61)$$

$$\left. \begin{array}{l} g_1 \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) = -1 \\ a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1}) = 0 \end{array} \right\}$$

Analizando la anterior ecuación, se pueden realizar las siguientes consideraciones:

$$\left. \begin{array}{l} a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) = -1 \\ a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1}) = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} -g_1 \delta_4 = -1 \\ b_{m2} g_1 k_e = -\delta_2 \end{array} \right\} \quad (6.62)$$

Por tanto se obtienen 2 nuevas consideraciones de diseño que son:

$$\left. \begin{array}{l} k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} = \frac{-\left(a_{m21} + \frac{1}{g_1} \right)}{b_{m2}} \\ k_{m1} + r_{m1} = -\frac{a_{m21}}{b_{m2}} \end{array} \right\} \quad (6.63)$$

Para un entorno predominantemente viscoso, en el que el efecto elástico tenga poca importancia. Ante una entrada modelada por un escalón de fuerza, se tiene que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_m(t) = \frac{1}{b_e} \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} v_m(s) = \frac{1}{b_e} \Rightarrow$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{s - \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right)}{\left(s^2 - s(a_{m22} + b_{m2}(k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e)) - (a_{m21} + b_{m2}(k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e)) \right)} \right) = \frac{1}{b_e} \Rightarrow$$

$$\left(s^2 - s \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) \right) - \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right) = \frac{1}{b_e} \quad (6.64)$$

La evaluación de la ecuación anterior requiere tener en cuenta los valores de la ecuación 6.54 a 6.57, y se tiene que:

$$\frac{1}{b_e} = \frac{- \left(a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) \right) b_2}{\left(a_{m21} + b_{m2} (k_{m1} + r_{m1} + g_1 k_e) \right) \left(a_{m21} + b_{m2} \left(k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} \right) \right)} = \frac{\delta_3}{\delta_2 \delta_4} b_{m2} \quad (6.65)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores debería cumplirse que:

$$\delta_3 = \frac{\delta_2 \delta_4}{b_e b_{2m}} = \frac{-b_{m2} k_e \frac{1}{g_1}}{b_e b_{m2}} = \frac{-k_e}{b_e g_1} \quad (6.66)$$

Así pues, una vez calculado el valor de δ_2 se obtendrá el valor de δ_3 , y con ello se obtiene la siguiente relación:

$$a_{m22} + b_{m2} \left(k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} \right) = -\delta_3 = \frac{-k_e}{b_e g_1} \Rightarrow$$

$$k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} = \frac{-\frac{k_e}{b_e g_1} - a_{m22}}{b_{m2}} \quad (6.67)$$

A las anteriores condiciones se precisa añadir la condición de la ecuación 6.54, quedando:

$$a_{m22} + b_{m2} (k_{m2} + r_{m2} + g_1 b_e) = -\delta_1 \Rightarrow$$

$$k_{m2} + r_{m2} = \frac{-\delta_1 - a_{m22}}{b_{m2}} - g_1 b_e \quad (6.68)$$

El valor de δ_1 se debe fijar de forma que la dinámica del maestro tenga la menor influencia posible en la transparencia. Es decir, conviene un valor elevado de δ_1 , pero sin que llegue a producir saturaciones en el sistema de control, para que se alcance lo antes posible el régimen permanente y de esta forma mejore la transparencia del sistema.

Resumiendo todas las ecuaciones anteriores, las condiciones de transparencia impuestas requieren que se cumpla el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{m1} + r_{m1} = -\frac{a_{m21}}{b_{m2}} \\ k_{m2} + r_{m2} = \frac{-\delta_1 - a_{m22}}{b_{m2}} - g_1 b_e \\ k_{m1} - \frac{r_{s1}}{g_2} = \frac{-\left(a_{m21} + \frac{1}{g_1}\right)}{b_{m2}} \\ k_{m2} - \frac{r_{s2}}{g_2} = \frac{-\frac{k_e}{b_e g_1} - a_{m22}}{b_{m2}} \end{array} \right\} \quad (6.69)$$

Las condiciones de transparencia añaden 4 ecuaciones sobre la condición anterior de evolución del error como un sistema autónomo. En total para un sistema de orden 2, se tienen 10 incógnitas y 7 ecuaciones; por tanto, es necesario dar valor a 3 parámetros. Teniendo en cuenta como se comentó en el apartado anterior y se expresó en la ecuación 6.37:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 = 1 \\ r_{m1} = r_{m2} = 0 \end{array} \right. \quad (6.70)$$

Con todo esto se ha conseguido un sistema con el mismo número de ecuaciones e incógnitas.

6.3.1 Resumen del método de cálculo de los reguladores

Para un sistema de orden 2 en el que las matrices A y B están modeladas como:

$$A_m = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix}, A_s = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{s21} & a_{s22} \end{pmatrix}$$

$$B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ b_{m2} \end{pmatrix}, B_s = \begin{pmatrix} 0 \\ b_{s2} \end{pmatrix}$$

Como resumen de los cálculos del apartado anterior, agrupando los resultados de las ecuaciones 6.37, 6.39 y 6.69 se tiene que asignar en primer lugar el valor de δ_1 de forma que la dinámica del maestro no influya sobre el resto del sistema, recomendándose un valor alto del orden de varias veces a_{m22} .

$$\begin{aligned}
 g_1 &= 1 \\
 g_2 &= \frac{b_{m2}}{b_{s2}} \\
 R_m &= [0 \quad 0] \\
 K_m &= \left[\begin{array}{cc} -\frac{a_{m21}}{b_{m2}} & \frac{-\delta_1 - a_{m22}}{b_{m2}} - g_2 b_e \\ 0 & 0 \end{array} \right] \\
 R_s &= \left[\begin{array}{cc} \frac{k_e}{b_e} - \delta_1 & 0 \\ \frac{1}{b_{s2}} & \frac{\frac{k_e}{b_e} - \delta_1}{b_{s2}} - g_2 b_e \end{array} \right] \\
 K_s &= \left[\begin{array}{cc} 0 & \frac{k_e}{b_e} + a_{s22} \\ -\frac{1+a_{s21}}{b_{s2}} & -\frac{\frac{k_e}{b_e} + a_{s22}}{b_{s2}} \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{6.71}$$

El valor de K_s se ha obtenido a partir de la ecuación 6.37, de la que se obtiene:

$$\begin{aligned}
 A_m + B_m K_m &= A_s + B_s (K_s + R_s) \Rightarrow \\
 A_m - A_s + B_s (G_2 K_m - R_s) &= B_s K_s \Rightarrow \\
 \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{m21} & a_{m22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{s21} & a_{s22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_{s2} \end{pmatrix} (g_2 k_{m1} - r_{s1} \quad g_2 k_{m2} - r_{s2}) = \\
 \begin{pmatrix} 0 \\ b_{s2} \end{pmatrix} (k_{s1} \quad k_{s2}) &\Rightarrow \\
 \left\{ \begin{array}{l} a_{m21} - a_{s21} + b_{s2} (g_2 k_{m1} - r_{s1}) = b_{s2} k_{s1} \\ a_{m22} - a_{s22} + b_{s2} (g_2 k_{m2} - r_{s2}) = b_{s2} k_{s2} \end{array} \right. &\Rightarrow \\
 \left\{ \begin{array}{l} k_{s1} = g_2 k_{m1} - r_{s1} + \frac{a_{m21} - a_{s21}}{b_{s2}} \\ k_{s2} = g_2 k_{m2} - r_{s2} + \frac{a_{m22} - a_{s22}}{b_{s2}} \end{array} \right.
 \end{aligned} \tag{6.72}$$

6.3.2 Ejemplo de aplicación

Seguidamente se aplica el algoritmo de cálculo para un sistema bilateral de un grado de libertad en el que maestro y esclavo están compuesto por dos motores de corriente continua idénticos, modelados por:

$$A_m = A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -250 \end{bmatrix}, B_m = B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 2600 \end{bmatrix} \quad (6.73)$$

El entorno se supone caracterizado por $Z_e = [-1.0 \quad -0.1]$, entonces la dinámica de la interacción del esclavo con el entorno viene dada por la ecuación, cuyos valores se muestran en 6.74. Como valor de δ_1 se ha tomado 250.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 250 \\ g_1 &= 1, g_2 = 1, R_m = [0 \quad 0] \\ K_m &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\delta_1 + 250}{2600} - b_e \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.0 \quad 0.1000] \\ R_s &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2600} & \frac{k_e - \delta_1}{2600} - b_e \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.384 \times 10^{-3} \quad 7.69 \times 10^{-3}] \\ K_s &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{k_e - 250}{2600} \\ -\frac{1}{2600} & -\frac{b_e}{2600} \end{bmatrix} = [-0.384 \times 10^{-3} \quad 92.3 \times 10^{-3}] \end{aligned} \quad (6.74)$$

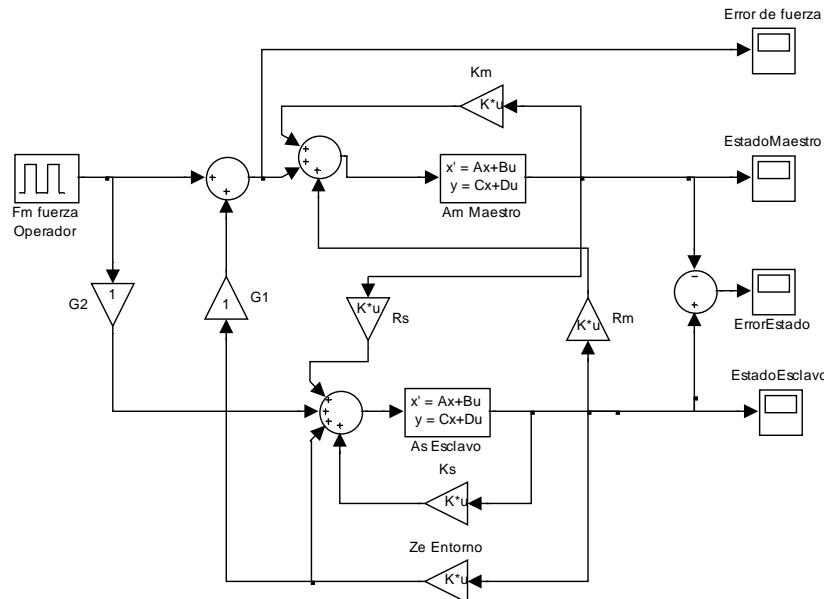


Figura 6.3 Esquema de simulink para el sistema bilateral.

El modelo construido en Matlab para simular el sistema es el representado en la figura 6.3. Como se observa la entrada del operador se modela mediante un tren de pulsos. Esta entrada se aplica a maestro y esclavo, y se han definido los valores de los reguladores (G_1 , G_2 , R_m , R_s , K_m y K_s) según la ecuación 6.74.

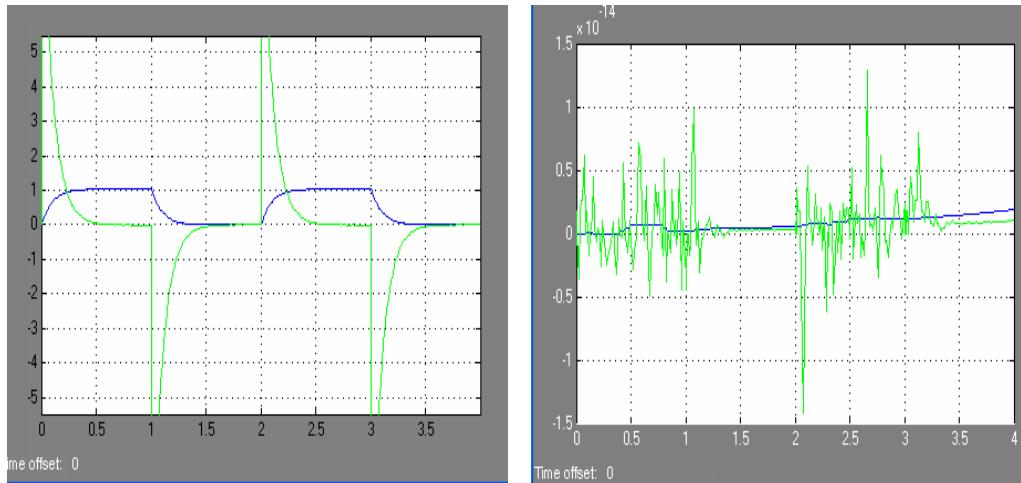


Figura 6.4 Evolución de posición y velocidad en el maestro (izquierda) y evolución del error de posición y velocidad (derecha). Azul posición, verde velocidad

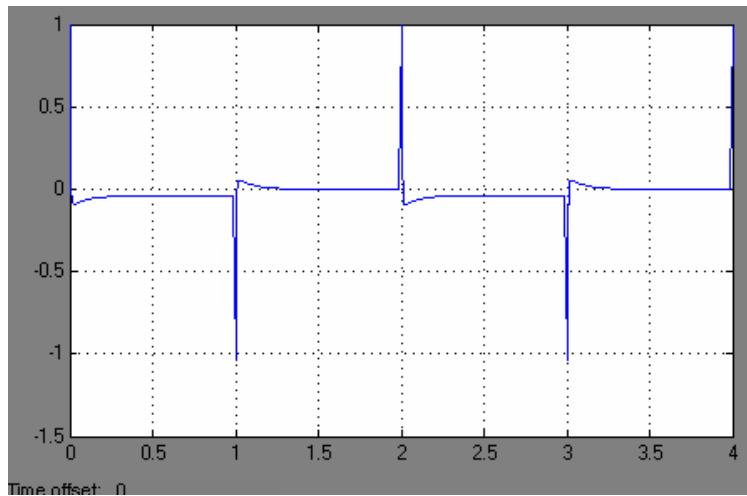


Figura 6.5 Evolución de la señal del error de fuerza

Una señal importante es la del error de fuerza, que se muestra en la figura 6.5. Como se puede apreciar existe una pequeña diferencia entre la fuerza aplicada por el operador y la fuerza reflejada, lo cual garantiza la transparencia que se busca del sistema bilateral.

6.3.3 Resultados experimentales

Los siguientes resultados se han obtenido mediante un sistema bilateral de 1 gdl. Este equipo es mostrado en la figura 6.6, y como se observa, tanto maestro como esclavo constan de un motor eléctrico de Maxon Motors, de un sensor de fuerza de FlexiForce, y de un controlador electrónico basado en un DSP de Texas Instruments.

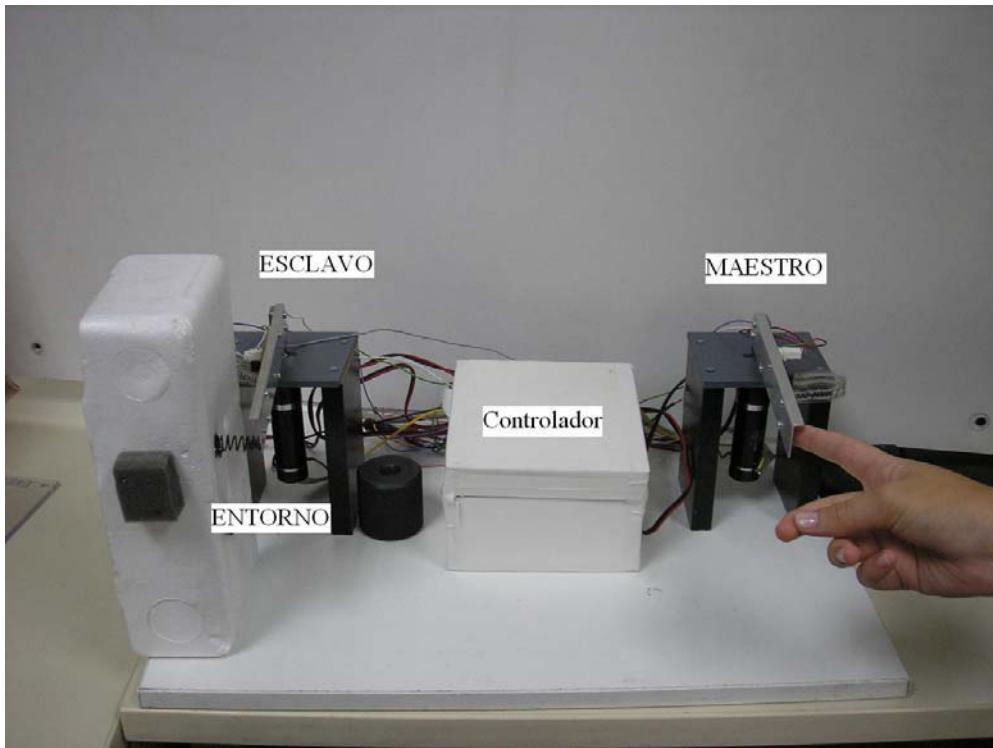


Figura 6.6 Equipo de pruebas utilizado para los experimentos.

Las pruebas se han realizado muestreando las señales de posición, velocidad y fuerza a la frecuencia de 1 kHz. El algoritmo de control es implementado en el DSP citado.

El sistema ha mostrado un comportamiento estable y una buena reflexión de fuerzas cuando se han utilizado como reguladores los calculados en el apartado anterior. El sistema admite cierta variación de algunos parámetros, lo cual conlleva un pequeño deterioro en la percepción de fuerzas.

posición maestro-esclavo

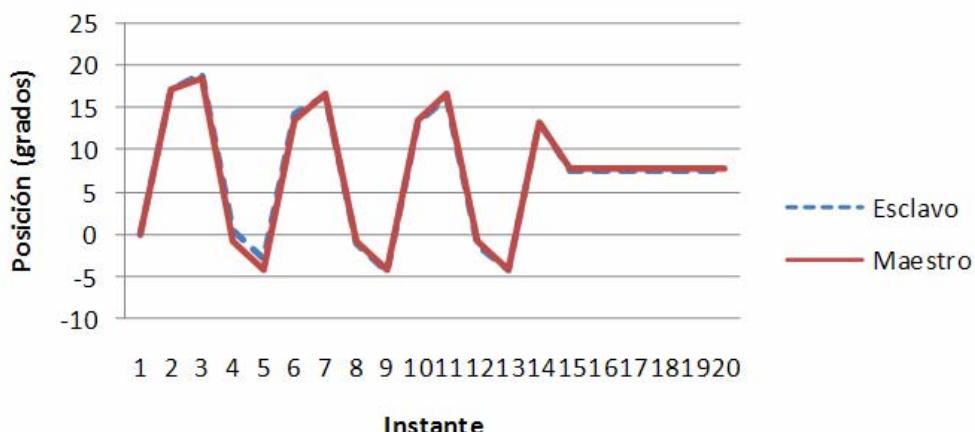


Figura 6.7 Sistema bilateral estable. Controladores según el anterior apartado

El parámetro más sensible a la variación es el valor de δ_1 . Cuando este pasa a tomar valores negativos el sistema muestra una clara tendencia a la inestabilidad. En la figura se muestra una prueba en la que el valor de δ_1 es igual a -2000.



Figura 6.7 Sistema bilateral inestable. En este caso el valor de δ_1 asignado ha sido de -2000

6.4 Generalización de los Esquemas Clásicos de Control

Las inclusiones hechas al algoritmo de convergencia en el marco de la presente tesis, permiten ver al algoritmo de control por convergencia de estados, como una generalización de los algoritmos de control bilateral.

Si el modelado del algoritmo de convergencia presentado en la figura 6.1, se modela al sistema maestro y al esclavo como una FdT, tendríamos, tal como se muestra en la figura 6.8, que el maestro y el esclavo se intercambian 3 variables, posición, velocidad y fuerza. Todas las variables intercambiadas pasan a través de las matrices, R_m , R_s , y las constantes G_m , G_s ; es por ello que se podría pensar que dependiendo de los valores que se asignen a cada una de estas matrices y variables es posible obtener cualquiera de los algoritmo de control bilateral vistos hasta el momento.

Algo que es importante resaltar es que en la figura 6.8, el operador se une al sistema Maestro a través de las constantes G_1 y G_2 , en caso de ambas tener valores igual a 0, no quiere decir que el operador quede aislado del sistema maestro. Este efecto se debe a las simplificaciones gráficas hechas para hacer la ilustración más sencilla.

Los reguladores R_m y R_s realimentan el vector de estados al Maestro y Esclavo respectivamente, es decir, a través de ellas fluye la información de Posición y Velocidad. Las constantes G_1 y G_2 , realimentan las fuerzas de interacción del Maestro y el Esclavo, es decir, a través de ellas se intercambia la información de fuerza.

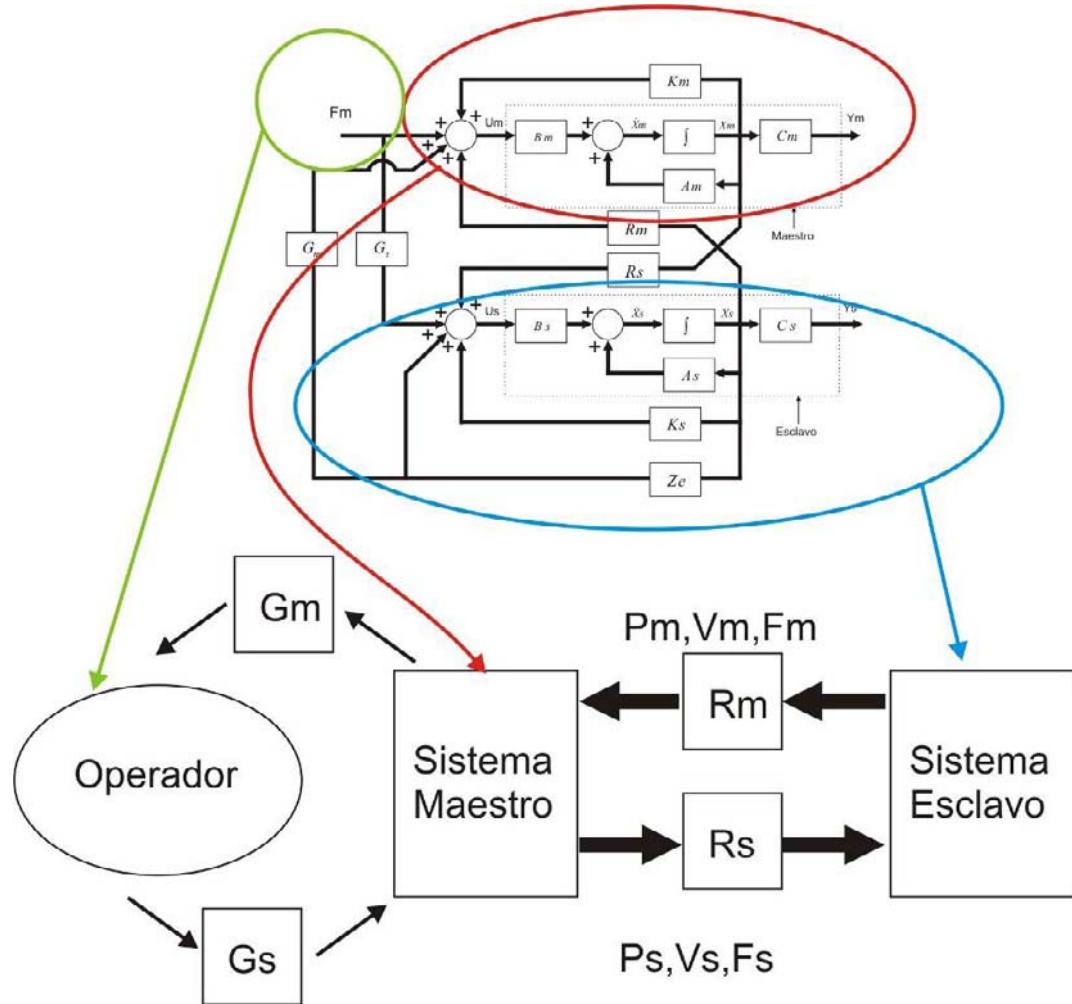


Figura 6.8 Algoritmo de control por Convergencia de Estados como una generalización de algoritmos de control bilateral

A continuación se presenta el procedimiento para obtener 3 algoritmos de control bilateral partiendo del algoritmo de control por convergencia de estados sin transparencia.

6.4.1 Control Posición-Posición

En el esquema Posición-Posición, la única información que intercambian los sistemas maestro y esclavo son la posición. Por ello, es necesario fijar ciertos valores a R_m , R_s , G_1 y G_2 , de manera tal que la única información que se intercambie sean las posiciones. Siguiendo este precepto, se obtiene:

$$G_1 = 0 \quad (6.4)$$

$$G_2 = 0 \quad (6.5)$$

$$R_s = [1 \ 0] \quad (6.6)$$

$$R_m = [1 \ 0] \quad (6.7)$$

Nota: La primera variable de estado es la posición.

Tanto G_1 como G_2 permiten el flujo de información referente a las fuerzas, por lo tanto al ser ambas 0, no existe intercambio de fuerzas entre el maestro y el esclavo. Se recuerda al lector, que aún existe interacción entre el operador y el sistema maestro; es decir, tanto el operador puede ejercer fuerzas sobre el maestro como el maestro puede reflejarlas al operador.

6.4.2 Control Fuerza-Posición

En el esquema Fuerza-Posición, la referencia que recibe el esclavo es la posición del maestro y la referencia que recibe el maestro es la fuerza de interacción del esclavo con el entorno. Fijando los valores de R_m , R_s , G_1 y G_2 , se obtiene:

$$G_1 = K_f \quad (6.16)$$

$$G_2 = 0 \quad (6.17)$$

$$R_s = [1 \ 0] \quad (6.18)$$

$$R_m = [0 \ 0] \quad (6.19)$$

6.4.3 Control Fuerza-Velocidad

El esquema Fuerza-Velocidad es muy parecido al Fuerza-Posición, se diferencian únicamente en que la referencia que recibe el esclavo es la Velocidad del maestro y la referencia que recibe el maestro es la fuerza de interacción del esclavo con el entorno. Fijando los valores de R_m , R_s , G_1 y G_2 , se obtiene:

$$G_1 = K_f \quad (6.26)$$

$$G_2 = 0 \quad (6.27)$$

$$R_s = [0 \ 1] \quad (6.28)$$

$$R_m = [0 \ 0] \quad (6.29)$$

6.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó una metodología de diseño de control por convergencia de estados basada en la transparencia. Dicha metodología, se desarrolló partiendo de un modelado del control por convergencia modificado. Al igual que el control por convergencia original, esta metodología logra que el esclavo siga al maestro, pero tiene el valor agregado que mejora la percepción que tiene el operador del entorno con el cual interactúa el esclavo. Esto constituye un aporte original presentado en la tesis.

Otro aspecto importante que se conserva igual que el control por convergencia original, es que la solución viene dada por un simple sistema de ecuaciones. Con relación al grado de transparencia que alcanza el sistema utilizando esta metodología de diseño, se mostró que en régimen permanente la diferencia entre la fuerza reflejada al operador, y la aplicada por el esclavo al entorno es casi nula, por lo que el sistema alcanza un elevado grado de transparencia.

La metodología de diseño de controladores por convergencia de estados basada en la transparencia, fue implementada de forma experimental. Tal como se pudo observar, el sistema tiene un comportamiento estable, donde el esclavo sigue fielmente los movimientos del maestro, y se obtiene una buena reflexión de fuerza gracias al diseño basado en la transparencia. De igual manera, el algoritmo provee al sistema de cierto grado de robustez ante la variación de sus parámetros, siendo el más crítico el parámetro δ_1 . La demostración experimental de la metodología de diseño es otro aporte de la tesis.

Las modificaciones incorporadas al algoritmo, toman en consideración el entorno con el cual se encuentra interactuando el esclavo de manera independiente, y no asociadas a las matrices de realimentación de estado propias del algoritmo. De igual manera, se incorporó la realimentación de la interacción del esclavo con el entorno al maestro. Dichas modificaciones, permiten ver al algoritmo de control por convergencia de estados, como una generalización de los algoritmos de control bilateral clásicos, como los son: Posición-Posición, Fuerza-Posición y Fuerza-Velocidad. También se presentó el procedimiento de obtención de cada uno de los algoritmos nombrados a partir del modelo de control por convergencia. Esto constituye otro aporte de la tesis.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones y Aportaciones de la Tesis

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

En esta Tesis se ha hecho un estudio de los principales esquemas de control bilateral tradicionalmente usados en la Teleoperación, así como también de novedosos esquemas avanzados que permiten superar ciertas deficiencias que tienen los esquemas clásicos ante determinadas circunstancias. Dado que en la Teleoperación el operador humano es quien cierra el bucle de control a través de un dispositivo o manipulador maestro, si el mismo recibe únicamente 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.

Durante la ejecución de la presente Tesis se han realizado varias aportaciones, con las cuales se han obtenido diversas conclusiones, cuyo propósito es aportar soluciones que permitan desarrollar sistemas teleoperados cada vez más avanzados y con mejores prestaciones. A continuación, se presenta un compendio de aquellas consideradas más

importante, y en el mismo orden en el cual fueron presentadas a lo largo de la Tesis. Para facilitar la lectura serán clasificadas en función de la aportación a la cual se encuentra asociada.

1. Diseño de la plataforma de teleoperación. La arquitectura implementada, completamente flexible, modular y abierta que permite la experimentación de diversas tecnologías aplicables a la teleoperación.
 - La arquitectura implementada, permitió la experimentación de algoritmos de control con y sin retardo en las comunicaciones, al igual que sirvió para implementar displays predictivos e interfaces hápticas.
 - La arquitectura basada en un sistema Maestro-Esclavo comercial permitió la experimentación con sistemas industriales, ofreciendo la ventaja de trabajar sobre una plataforma real, cuyos resultados pueden ser extrapolables a las condiciones de trabajo real con mayor facilidad.
 - Las tarjetas controladoras diseñadas permiten el uso tanto del maestro como del esclavo de manera individual. Ofreciendo un desempeño en la ejecución de algoritmos de control de aproximadamente 8Khz por cada grado de libertad.
2. Identificación y Control de la plataforma de teleoperación. Se estableció un marco de trabajo mediante el cual es posible realizar la identificación y control de manipuladores.
 - Se identificaron los sistemas maestro y esclavo de manera individual, obteniendo modelos desacoplados de los mismos, con los cuales es posible diseñar algoritmos de control basados en ellos.
 - Se implementaron algoritmos de control bilateral sobre una plataforma industrial comercial, apta para su empleo en aplicaciones reales.
 - El marco de trabajo documentado en la Tesis, puede servir de “Tutorial” a la hora de identificar y controlar sistemas de teleoperación Maestro-Esclavo.
3. Estudio de la percepción del entorno por el operador. Se realizó un estudio teórico sobre la influencia que tienen los distintos parámetros de los esquemas clásicos bilaterales sobre la percepción del entorno por parte del operador.
 - Se obtuvo las distintas expresiones teóricas que definen el comportamiento de los esquemas Posición-Posición y Fuerza-Posición, visto desde la perspectiva del dispositivo Maestro.
 - Se realizó una tabla comparativa analizando la influencia individual que tienen cada uno de los distintos elementos que forman parte de los esquemas.
 - Se determinó de manera teórica y aproximada, la magnitud que debe tener los controladores para maximizar la calidad de la percepción que tiene el operador del entorno.

4. Estudio del esquema Fuerza-Posición con retardo en las comunicaciones. Se realizó un estudio teórico sobre el efecto que tiene el retardo en las comunicaciones sobre el desempeño del esquema Fuerza-Posición.
 - Se realizó un análisis del efecto del retardo sobre la estabilidad del sistema mediante el criterio de Routh, determinando la manera en que influye sobre el límite máximo del coeficiente de reflexión y su relación con la rigidez del entorno.
 - Se analizó el efecto que tiene el retardo sobre el lugar geométrico de las raíces, apreciando las condiciones sobre las cuales la respuesta del sistema se hace más o menos oscilatoria. De igual manera se corroboró el efecto que tiene el efecto derivativo sobre la dinámica de la respuesta temporal y como puede ayudar cuando se tienen retardos de magnitudes pequeñas.
 - Se estudió el efecto que tiene el retardo sobre el error en estado estacionario del sistema Maestro-Esclavo, notándose una influencia indirecta a través del límite máximo que puede tener el coeficiente de reflexión de fuerzas.
 - Se comprobó el desempeño del esquema Fuerza-Posición con retardo en las comunicaciones de manera experimental.
5. Estudio del esquema Fuerza-Velocidad con retardo en las comunicaciones. Se comprobó de manera experimental las principales características que ofrece el empleo de la técnica de pasivización de la línea de comunicación en sistemas teleoperados bilaterales.
 - Se demostró la utilidad que tiene la técnica de pasivización de la línea de comunicación en sistemas teleoperados bilaterales a la hora de garantizar la estabilidad del sistema ante retardos moderados en las comunicaciones.
 - Se demostró y documentó el comportamiento característico del sistema cuando se emplea la técnica de pasivización de la línea de comunicaciones en la ejecución de tareas teleoperadas. Donde el maestro no refleja fuerzas excesivas sino que aplica un efecto de saturación sobre la misma.
 - Se comprobó que esta técnica ofrece límites máximos superiores del coeficiente de reflexión de fuerzas, superiores a los que permite los esquemas clásicos de control bilateral.
6. Desarrollo de reguladores bilaterales mediante el algoritmo de convergencia de estados. Se presentó una metodología de diseño de controladores basados en el concepto de transparencia.
 - Se demostró que los controladores diseñados mediante esta metodología, alcanzan un elevado grado de transparencia en régimen permanente, mejorando de esta manera la percepción que tiene el operador del entorno con el cual interactúa el esclavo.

- Se demostró el funcionamiento de los controladores diseñados de manera experimental, mostrando un comportamiento estable y obteniendo una buena reflexión de fuerzas.
- Se presentó el procedimiento de obtención de los algoritmos de control bilateral clásicos a partir del algoritmo de control bilateral por convergencia de estados modificado, demostrando que el mismo puede considerarse como una generalización de los algoritmos de control bilateral clásicos.

7.2 Trabajos Futuros

Obtener modelos acoplados de los sistemas Maestro y Esclavo, que permitan estudiar las posibles mejoras en el desempeño de los controladores que puedan ser diseñados.

Incorporar el Modelo del operador en los estudios analíticos, de manera que pueda estudiarse el efecto que tiene sobre el desempeño general del sistema.

Realizar el estudio analítico y experimental cuando el retardo en las comunicaciones no es constante sino variable.

Desarrollar una librería basada en la arquitectura Cliente-Servidor que permita programar aplicaciones usando Internet como medio de comunicación tanto para el Maestro como para el Esclavo de una manera sencilla.

Capítulo 8

BIBLIOGRAFIA

[Adelstein 00] 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.

[Aleotti 02] 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.

[Anderson 89] R. J. Anderson y M. W. Spong. “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay”. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No.5, Mayo 1989.

[Aracil 95a] Rafael Aracil, Luis F. Peñin, Manuel Ferre y L. Jiménez. “Teleoperated System for Live Line Maintenance”. Proceedings of the SPIE. Telemanipulator and Telepresence Technologies II. Vol.2590. 1995.

[Aracil 95b] Rafael Aracil, Luis F. Peñin, Manuel Ferre y L. Jiménez. “Teleoperated System for Live Line Maintenance”. The 7th International Conference on Transmisión and Distribution Construction and Live Maintenance. ESMO. 1995.

[Arcara 02] Paolo Arcara y Claudio Melchiorri. “Control Schemes for teleoperation with time delay: A comparative Study”. Robotics and Automation Systems, No. 38, pp. 49-64. 2002.

[Azorin 03] José María Azorin Poveda. “Control bilateral por convergencia de estados de sistemas teleoperador con retardos en la transmisión”. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernandez. Elche 2003.

[Barnes 03] Barnes, Bobby Menon, Anil S. Mills, Rose Bruyns Cynthia D. Twombly, Alexander Smith Jeff, Montgomery y Boyle, Richard. “Virtual Reality Extensions into Surgical Training and Teleoperation”. Proc of 4th Annual IEEE Conf on Information Technology Applications in Biomedicine. Reino Unido 2003.

[Barrientos 97] Antonio Barrientos, Rafael Aracil, Oscar Luengo y Ernesto Gambao. “Teleoperation of a backhoe excavator through force reflection and pressure measurements”. International Advanced Robotics Programme.

[Benesty 00] 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.

[Buss 00] Martin Buss y Günter Schmidt. “Multimodal Telepresence”. Proceedings of the 17th International Mechatronics Forum. PP. 24-33. Universidad Kagawa , Japon. 2000.

[Cha 96] D.H. Cha y H.S. Cho. “Design of a force reflection controller for telerobot system using Neural Networks and Fuzzy Logic”. Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 16, No. 1, 1996.

[Cho 02] Hyun Chul Cho y Jong Hyeon Park. “Impedance controller design of internet based teleoperation using absolute stability concept”. Proceedings of the IEEE/RSJ International conference of Intelligent robot and systems. Lausanne, Suiza. Octubre 2002.

[Choi 02] 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.

[Colombo 01] 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

[Daniel 95] R. W. Daniel y P. R. McArre. “Fundamentals Limits of Performance for Force Reflecting Teleoperation”, International Journal of Robotic Research, Agosto 1995.

[Domínguez 02] Sergio Domínguez, Pascual Campoy José María Sebastián y Agustín Jiménez. “Control en el Espacio de estado”. Prentice Hall, España, 2002.

[Elhajj 01] I. Elhajj, N. Xi, W. K. Fung, Y.H. Liu, Y. Hasegawa y T. Fukuda. “Modeling and control of internet based cooperative teleoperation”. Proceedings of the IEEE Internacional conference on Robotics and Automation. Seul, Korea. Mayo 2001.

[Elhajj 03] Imad Helhajj, Ning Xi, Wai Keung Fung, Yun-Hui Liu, Yasuhisa Hasegawa y Toshio Fukuda. “Supermedia Enhanced Internet Based Telerobotics”. Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation, Vol. 91, No. 3. Marzo 2003.

[Fernandez 96] J. Fernandez Pello. “Simulación y análisis del comportamiento de los sistemas básicos de control para teleoperación maestro-esclavo con reflexión de fuerzas”. Aula Iderdrola-DISAM. Universidad Politécnica de Madrid, 1996.

[Ferre 97] Manuel Ferre. “Diseño de interfaces avanzadas para robots teleoperados. Desarrollo de un entorno de teleoperación con características multimedia”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 1997.

[Ferre 03] Manuel Ferre, Rafael Aracil, Manuel Navas y Juan A. Escalera. “Real time video image processing for teleoperation: Image Blending and Stereoscopy”. 9th IEEE International conference on emerging technologies and factory automation. Lisboa, Portugal. Septiembre 2003.

[Ferre 04] 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 07a] Manuel Ferre, Martin Buss, Rafael Aracil, Claudio Melchiorri y Carlos Balaguer (Eds.). “Advances in Telerobotics”. STAR 31, Springer-Verlag. 2007.

[Ferre 07b] Manuel Ferre, Jordi Barrio, Claudio Melchiorri, Juan M. Bogado, Pedro L. Castedo, Juan M. Ibarra. “Experimental Results on Bilateral Control Using an Industrial Telemanipulator”. En M. Ferre et al. (Eds): Advances in Telerobotics, STAR 31, pp. 177-190, 2007. Springer-Verlag.

[Fong 01] 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.

[Gibson 99] D. P. Gibson, N. W. Campbell y B. T. Thomas. “The generation of 3D models of outdoor objects from uncalibrated still cameras”. Image processing and its applications, conference publication No. 465. IEEE 1999.

[Goertz 64] Raymond Goertz. “Manipulators Systems Development at ANL”. Proceedings of the 12th Conference on Remote Systems Technology, ANS. 1964.

[Ganjefar 03] S. Ganjefar, H. Momeni, F. Janabi Sharifi y M.T. Hamidi Vestí. “Behavior of Smith Predictor in Teleoperator systems with modeling and delay time errors”. IEEE 0-7803-7729-X/03/. 2003.

[Glaserhardt 03] S. Glaserhardt, M. Cicin-Sain y Z. Capko. “Teleinmersion as a positive alternative of the future”. 25th International conference of Information Technology Interfaces. Cavtat, Croasia. Junio 2003.

[González 00] Javier González Jiménez. “Visión por Computador”. Editorial Paraninfo. España, 2000.

[Guyton 89] Arthur C. Guyton. “Tratado de fisiología médica”. W.B. Saunders Company.

[Hannaford 89] Blake Hannaford. “A Design Framework for Telerobotics with Kinesthetic Feedback”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5, No.4, Agosto 1989.

[Hannaford 02] Blake Hannaford y Jee-Hwan Ryu. “Time domain passivity control of haptic interfaces”. IEEE transactions on robotics and automation, Vol.18, No.1. Febrero 2002.

[Hernando 02] Miguel Hernando Gutierrez. “Arquitectura de Control, Planificación y Simulación para Teleprogramación de Robots”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2002.

[Hirche 03] Sandra Hirche y Martin Buss. “Passive position controlled telepresence Systems with time delay”. Proceedings of the American control conference. Denver, USA. Junio 2003.

[Hopf 00] Klaus Hopf. “An autostereoscopic display providing confortable beijing conditions and a high degree of telepresence”. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, vol. 10, no. 3. Abril 2000.

[Hoyer 04] Helmut Hoyer, Andreas Jochheim, Christof Röhrig y Andreas Bischoff. “A Multiuser Virtual-Reality Enviroment for a Teleoperated Laboratory”. IEEE Transactions on Education, Vol. 47, NO. 1, Febrero 2004.

[Hügli 02] H. Hügli y T. Jost. “A match and merge method for 3d modelling from range images”. Proceedings of the IEEE International conference on Signal Processing. Beijing, China. Agosto 2002.

[Huang 02] Zonglei Huang y Boubakeur Boufama. “A Semi-automatic Camera Calibration Method for Augmented Reality”. IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics. Hammamet, Tunisia. Octubre 2002.

[Ikei 02] 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.

[Janabi 95] F. Janabi-Sharifi. “Collision: Modeling, Simulation and Identification of Robotic Manipulators Interacting with Enviroments”. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1995.

[Johnson 95] Andrew Johnson, Patrick Leger, Regis Hoffman, Martial Herbert y James Osborne. “3D Object Modeling and recognition for telerobotics Manipulation”. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pittsburg, USA. Agosto 1995.

[Juang 02] B. H. Juang. “Ubiquitous Speech Communication Interface”. IEEE. 2002.

[Kammermeier 01] Peter Kammermeier, Martin Buss y Günther Schmidt. “A systems Theoretical model for human perception in multimodal presence systems”. IEEE/ASME Transactions on Mecatronics, vol. 6, no. 3. Septiembre 2001.

[Kazerooni 93] H. Kazerooni, T. Tsay y K. Hollerbach. “A Controller Design Framework for Telerobotics Systems”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 1, No.1, Marzo 1993.

[Kilchenman 01] 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. Seul, Korea. Mayo, 2001.

[Kim 92] W.S. Kim. “Development of New Force Reflecting Control Schemes and Application to a Teleoperation Training Simulator”, Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Niza, Francia. Mayo 1992.

[Lage 94] A. Lage, J. Postigo, R. Carelli, B. Kunchen y L. Calderon. “Teleoperation System for Robotics with Force Reflection and Impedance Control”. ECLA 1994.

[Lee 03] Dongjun Lee y Perry Y. Li. “Passive Bilateral feedfordward control of linear dynamically similar teleoperated manipulators”. IEEE transaction on robotics and automation, Vol. 19, No. 3. Junio 2003.

[Leeraphan 02] Singha Leeraphan, Thavida Maneewarn y Djitt Laowattana. “Stable adaptive bilateral control of transparent teleoperation through time-varying delay”. Proceedings of the IEEE/RSJ International conference of intelligent robot and systems.Lausanne, Suiza. Octubre 2002.

[Liu 01] Peter X. Liu, Max Q-H Meng y Jason J. Gu. “A study on the interface of the internet-based Teleoperation”. Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Alberta Canada 2001.

[Liu 02] Peter X. Liu, Max Q-H Meng, Xiufen Ye y Jason J. Gu. “End to end delay boundary prediction using maximum entropy principle (MEP) for de internet based teleoperation”. Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation. Washington, USA. Mayo 2002.

[Lloyd 97] John E. Lloyd, Jeffrey S. Beis, Dinesh K. Pai y David G. Lowe. “Model based teleoperation with vision”. Proceedings of the IEEE International conference on robotics and automation. Alburquerque, USA. Abril 1997.

[Love 04] Lonnie J. Love y Wayne J. Book. “Force reflecting teleoperation with adaptive impedance control”. IEEE transactions on system, man and cybernetics, parte b: Cybernetics, Vol. 32, No. 1. Febrero 2004.

[Maaoui 01] Choubeila Maaoui y Ryad Chellali. “Localization and tracking people for telerobotics”. IEEE International workshop on robot and human interactive communication. 2001.

[Magnusson 04] Charlotte Magnusson y Kirsten Rassmus-Gröhn. “A dynamic Haptic – audio traffic enviroment”. Proceedings of EuroHaptics. Munich, Alemania. Junio 2004.

[Marin 02] 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.

[McAfee 91] D.A. McAfee y P. Fiorini. "Hand Controller Design Requirements and performance issues in telerobotics". IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991.

[Menon 03] Anil S. Menon, Bobby Barnes, Rose Mills, Cynthia D. Bruyns, Alexander Twombly, Jeff Smith, Kevin Montgomery y Richard Boyle. "Using registration, calibration, and robotics to build a more accurate virtual reality simulation for Astronaut training and telemedicine". International conference on Computer Graphics, Visualization and computer vision. Plzen, Republica Checa. Febrero 2003.

[Mirfakhrai 01] Tissaphern Mirfakhrai y Shahram Payandeh. "A model for time-delays for teleoperation over the internet". Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Alberta, Canada 2001.

[Miura 02] Kanako Miura, Jaques A. Gangloff y Michel F. de Mathelin. "Robust and uncalibrated visual servoing without jacobian using a simplex method". Proceedings of the IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems. Lausanne, Suiza. Octubre 2002.

[Monferrer 02] Monferrer, Alexandre y Bonyuet, David. "Cooperative Robot Teleoperation through Virtual Reality Interfaces". Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Information Visualization. 2002.

[Mora 04] Alvaro Adrian Mora Casas. "Estudio y análisis de la influencia de los factores funcionales en la eficiencia de sistemas telerobóticos". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 2004.

[Moreno 03] Luis Moreno, Santiago Garrido y Carlos Balaguer. "Ingeniería de control, Modelado y Control de Sistemas Dinámicos". Editorial Ariel Ciencia.

[Munir 02] Saguir Munir y Wayne J. Book. "Internet based teleoperation using wave variables with prediction". IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 7, No. 2. Junio 2002.

[Mulligan 01] Jane Mulligan, Volkan Isler y Kostas Daniilidis. "Performance evaluation of stereo for telepresence". IEEE, 0-7695-1143-0/01. 2001.

[Nagy 04] István Nagy, Hermann Mayer y Alois Knoll. "Application of force feedback in robot assisted minimally invasive surgery". Proceedings of EuroHaptics. Munich, Alemania. Junio 2004.

[Navas 04] Manuel Navas Herreros. "Arquitectura de procesamiento de video para teleoperación: Estereoscopia y superposición de imágenes". Proyecto de fin de carrera. Universidad Politécnica de Madrid, ETSII, DISAM. Madrid 2004.

- [Ng 98] Kim C. Ng, Mohan M. Trivedi e Hiroshi Ishiguro. “3D ranging and virtual view generation using omni-view cameras”. IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, San Jose, USA. Enero 98.
- [Ni 02] Liya Ni y David W. L. Wang. “A gain switching control scheme for position error based force reflecting teleoperation”. Proceedings of the IEEE 10th Symposium on haptic interfaces for virtual environments and teleoperator systems. 2002.
- [Niculescu 02] Silviu-Iulian Niculescu, Damia Tautau y Rogelio Lozano. “On the close loop stability of a teleoperation control scheme subjecto to communication delays”. Proceedings of the 41st IEEE conference of decision and control. Las Vegas, USA. Diciembre 2002.
- [Niemeyer 04] Günter Niemeyer y Jean-Jacques E. Slotine. “Telemanipulation with time delays”. The International Journal of Robotic Research, Vol. 23, No. 9, pp. 873-890. Septiembre 2004.
- [Oboe 01] Roberto Oboe. “Web Interfaced, force reflecting teleoperation systems”. IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 48. No. 6. Diciembre 2001.
- [Oboe 03] Roberto Oboe. “Force Reflecting Teleoperation over the internet: The JBIT project”. Proceedings of the IEEE, vol. 91, No. 3. Marzo 2003.
- [Ogata 93] Katsuhiko Ogata. “Ingeniería de Control Moderna”. Prentice Hall Hispanoamericana, 1993.
- [Parrish 95] 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.
- [Pasquier 04] Jérôme Pasquier, 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.
- [Pensati 59] P. Pensati y G. Cherel. “French Master Devices”. Proceedings of the 7th HLE.1959.
- [Peñin 97] Luis Felipe Peñin, Manuel Ferre, J. Fernandez, Rafael Aracil y Antonio Barrientos. “Design Fundamentals of Master-Slave System with a Force-Position Bilateral Control Scheme”. Proceedings of the IFAC, SYROCO. 1997.
- [Peñin 98] Luis Felipe Peñin Honrubia. “Control bilateral de robots teleoperador. Contribuciones en reflexión de fuerzas”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid 1998.
- [Preusche 02] 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.

[Qihong 03] Chen Qihong, Fei Shumin, y Song Aiguo. “Robust Control with Observer of Internet Based Teleoperation”. Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado 2003.

[Richard 03] Jean-Pierre Richard. “Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems”. www.elsevier.com/locate/automatica, Automatica, 39, 2003, 1667-1694. 2003.

[Ryu 04] Jee-Hwan Ryu, Dong-Soo Kwon y Blake Hannaford. “Stable teleoperation with time domain passivity control”. IEEE transactions on robotics and automation, Vol. 20, No. 2. Abril 2004.

[Runde 00] 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.

[Sabater 03] José Maria Sabater Navarro.”Desarrollo de una interfaz kinestesica paralela y experimentación en control de sistemas hapticos y teleoperados”. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernandez. Elche 2003.

[Sayers 99] Craig Sayers. “Remote Control Robotics”. Editorial Springer. 1999.

[Sjöström 01] Calle Sjöström. “Designing haptic computer interfaces for blind people”. International symposium on Signal Processing and its applications ISSPA. Kuala Lumpur, Malasia. Agosto 2001.

[Schmidt 04] Henning Schmidt. “HapticWalker – A novel haptic device for walking simulation”. Proceedings of Eurohaptic. Munich, Alemania. Junio 2004.

[Sgouros 02] 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 92] Thomas B. Sheridan. “Telerobotics and human supervisory control”. The MIT Press, 1992.

[Smith 05] Russell Smith. “Open Dinamics Engine”. Librería de simulación dinámica. <http://www.ode.org/>.

[Tsumaki 96] Y. Tsumaki, Y. Hoshi, H. Naruse y M. Uchiyama. “Virtual Reality based teleoperation which tolerates geometrical modeling errors”. Proceedings of the International conference on Intelligent Robots and Systems. Osaka, Japon. 1996.

[Tsumaki 02] Y. Tsumaki, M. Tamashi, W. K. Yoon y M. Uchiyama. “Virtual Radar: An obstacle display system for teleoperation”. Proceedings of the IEEE International conference on Robotics and Automation. Washington DC, USA. 2002.

[Turro 01] 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.

- [Vertut 85] J. Vertut y P. Coiffet. "Teleoperation and Robotics. Evolution and Development". Kogan. Londres 1985.
- [Wang 91] H. Wang y F. Itakura. "An approach to dereverberation using multi-microphone sub-band envelope estimation". ICASSP, paginas 953-956, vol. 2H. 1991.
- [Wernli 82] R. L. Wernli. "Robotics Undersea". Mechanical Engineering Magazine, Agosto 1982.
- [Whalen 2003] Thomas E. Whalen, Silvie Noël y John Stweart. "Measuring the human side of virtual reality". International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfases, and Measurements Systems. Lugano, Suiza 2003.
- [Woudenberg 99] E. Woudenberg, F. K. Soong y B. H. Juang. "A block least squares approach to acoustic echo cancellation". ICASSP. Phoenix, USA. Marzo 1999.
- [Williams 02] 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.
- [Wusheng 02] Chou Wusheng, Wang Tianmiau y You Song. "Sensor based Autonomous control for telerobótica system". Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shanghai, China, Junio 10-14. 2002.
- [Ye 02] Xufen Ye, Max Q-H Meng, Peter Xiaoping Liu y Guobin Li. "Statistical analysis and prediction of round trip delay for internet based teleoperation". Proceedings of the IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems. Lausanne, Suiza. Octubre 2002.
- [Yokokohji 92] Y. Yokokohji y T. Yoshikawa. "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, Francia. 1992.
- [Zaad 02] Keyvan Zaad Hastrudi Zaad y Septimiu E. Salcudean. "Transparency in time delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation". IEEE transaction on robotic and automation, Vol. 18, No. 1. Febrero 2002.
- [Zhu 00] Wen Hong Zhu y Septimiu E. Salcudean. "Stability Guaranteed Teleoperation: An Adaptive Motion/Force Control Approach". IEEE Transactions on Automatic control, vol. 45, No. 11, Noviembre 2000.

Anexo I: Diseño tarjeta de control

La tarjeta de control es la encargada de realizar todos los cálculos correspondientes al control tanto del dispositivo a la cual se encuentre asociada, además debe gestionar todas las comunicaciones tanto de entrada como de salida, permitiendo la interacción con otra tarjeta similar, PC u otro dispositivo que quiera ser conectado. Recordemos las características de los dispositivos que se pretenden controlar:

Maestro:

- 5 Motores AC bifásicos.
- 8 Potenciómetros.
- 4 Leds.
- 4 Botones.

Esclavo:

- 7 Servoválvulas.
- 7 Potenciómetros.
- 5 Transductores de presión.
- 1 Solenoide de alimentación hidráulica.

En resumen para ambos dispositivos se requiere de máximo: 7 Convertidores Digital Analógico, 8 Convertidores Analógico Digitales, 8 señales de entrada – salida Digitales.

Con estos requerimientos se procedió al diseño de la tarjeta controladora, para lo cual se seleccionó como núcleo un DSP de Texas Instruments, el TMS320F2812 que cuenta con las siguientes características técnicas:

- Velocidad 150 MIPS a 150 Mhz.
- Controlador JTAG.
- Memoria Flash 128K.
- Memoria RAM 8K.
- Memoria Externa hasta 1M.
- Hasta 56 GPIOs multiplexados.
- 2 Puerto serie RS-232.
- 1 Controlador Bus CAN.
- 1 Controlador Bus SPI.
- 3 Timers.
- 3 Interrupciones Externas 45 internas.
- 12 Convertidores Analógicos Digitales.

Haciendo uso de las capacidades del DSP, se realizó el diseño de una tarjeta de control (figura AI.1), cuya distribución por módulos de acuerdo a su función es la siguiente:

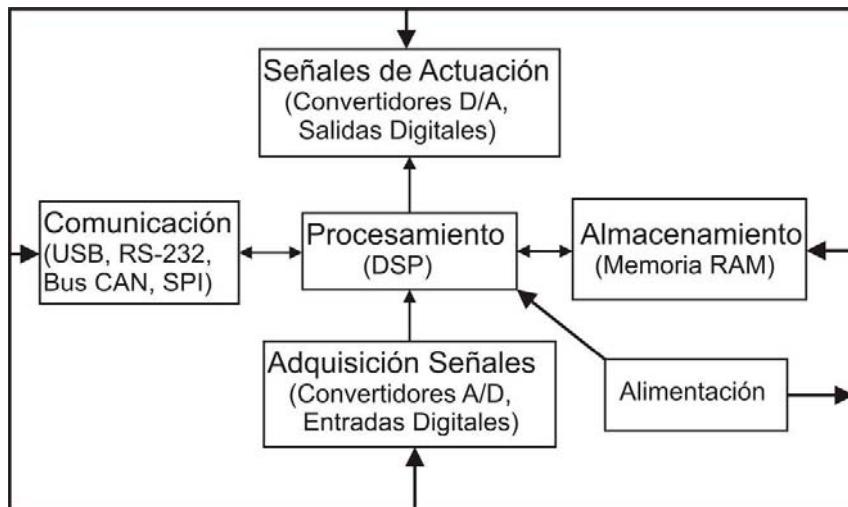


Figura AI.1 Módulos de funcionamiento de la tarjeta controladora

La misma cuenta con las siguientes características técnicas:

- Potencia de cálculo: 150 MIPS (Millones de Instrucciones por Segundo).
- 8 Salidas de Conversión Digital Analógica, 0 – 4.096Volts.
- 16 Entradas de Conversión Analógica Digital, ± 10 Volts.
- Más de 20 Entradas – Salidas Digitales.
- Memoria Externa de 256K.
- 2 Puertos de Comunicación Serie RS- 232.
- 1 Puerto de Comunicación SPI.
- 1 Puerto de Comunicación Bus CAN.
- 1 Canal de Comunicación USB.



Figura AI.2 Tarjeta Controladora diseñada

Como puede observarse de las características técnicas de la tarjeta de control, la misma es una tarjeta genérica, con lo cual por si sola no es capaz de manejar ningún dispositivo. Para ello es necesario acoplar la tarjeta de control con una tarjeta que contenga la electrónica de potencia y adaptación de señales que corresponda a las señales eléctricas propias del dispositivo destino. Es por ello que fue necesario diseñar la electrónica de adaptación de señales propia para el esclavo y el maestro.

A1.1 Tarjeta de Adaptación Maestro

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

Entradas Analógicas

Los potenciómetros son los encargados de la lectura de las posiciones, los mismos están conectados de acuerdo al diagrama que se ve en la siguiente figura AI.3, de allí se puede ver que las señales tienen un rango máximo de ± 10 Voltios, con lo cual todas las señales analógicas pueden ser leídas directamente por los Convertidores Analógicos Digitales de la tarjeta de control.

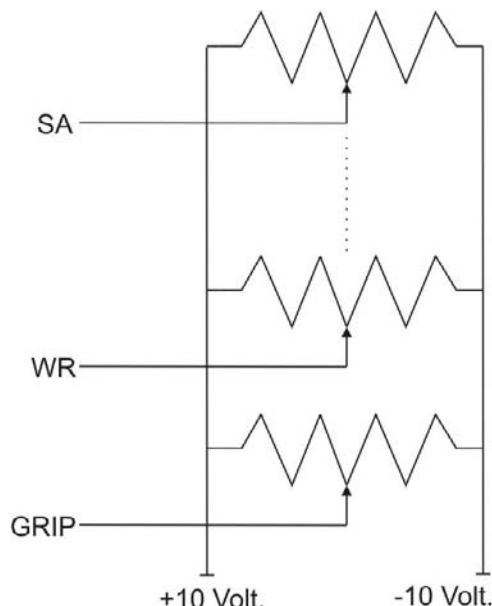


Figura AI.3 Diagrama de conexión de potenciómetros en el Maestro

De la lectura de los potenciómetros, es importante mencionar que cada articulación tiene un rango máximo de funcionamiento propio de cada articulación, el mismo depende del rango de trabajo propio de la mecánica del dispositivo, pero todos los rangos propios de las articulaciones se encuentran dentro del rango de trabajo global máximo de ± 10 Voltios.

Salidas Analógicas

El dispositivo Maestro es el encargado de reflejar las fuerzas al operador a través de motores bifásicos AC. Los mismos son motores especiales, pero su funcionamiento es sencillo, de acuerdo al diagrama de la figura AI.4.

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

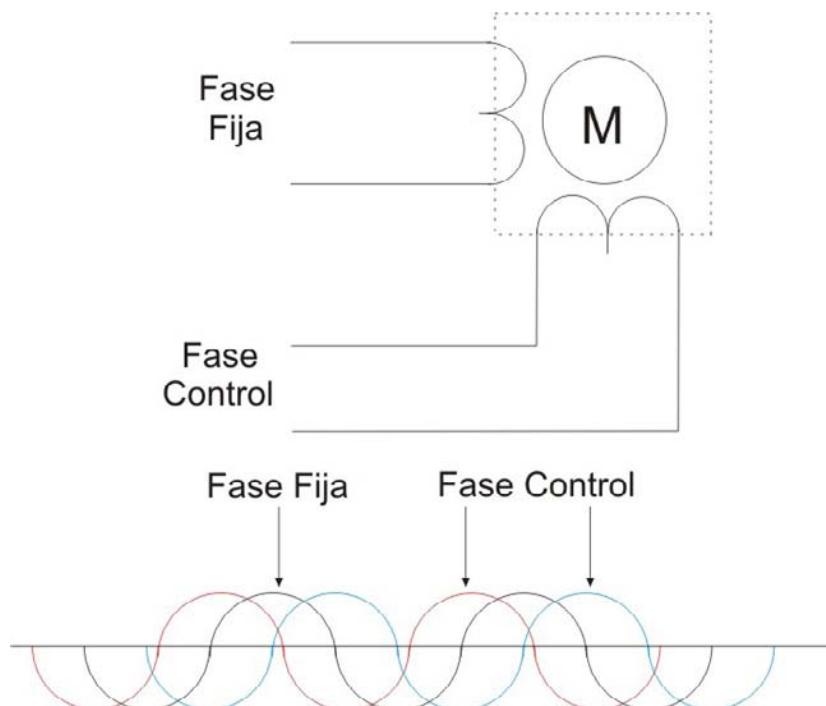


Figura AI.4 Diagrama de conexión y funcionamiento de los motores del maestro

Dado el funcionamiento del motor, cada señal proveniente de los convertidores analógicos digitales de la tarjeta de control mas una señal digital del DSP, son usadas para controlar un par de señales como las mostradas en la figura AI.4. De esta manera se logra reflejar las fuerzas al operador.

Por ultimo quedan las 8 entradas/salidas digitales que realizan la interfaz con el operador, las mismas son conectadas a 4 leds y 4 switches ubicados en el dispositivo Maestro. La conexión de las señales puede verse en el diagrama de la figura AI.5. De allí se observa que la única función a llevarse a cabo en la tarjeta de adaptación del maestro es la conversión de los 3 Volts, del DSPs, a los 5 Voltios del Maestro y viceversa. El diagrama de funcionamiento de la tarjeta de adaptación de señales del maestro puede ser observado en la figura AI.5.

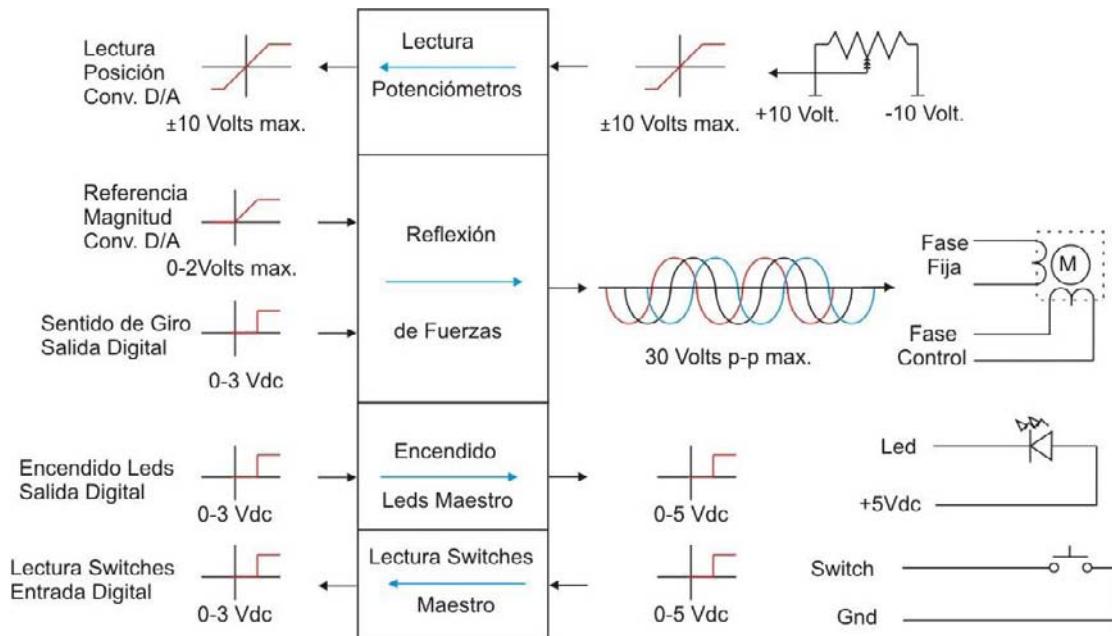


Figura AI.5 Diagrama de adaptación de señales maestro

AI.2 Tarjeta de Adaptación Esclavo

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

Entradas Analógicas

Al igual que el dispositivo maestro, el esclavo cuenta con potenciómetros como sensores para la lectura de la posición articular de cada uno de los grados de libertad y los mismos se encuentran conectados al sistema de acuerdo a como se muestra en el diagrama de la figura AI.6. De igual manera el rango máximo de funcionamiento es de ±10 Voltios, y cada grado de libertad tiene un rango de trabajo propio dentro de ese rango general y depende de la mecánica propia del esclavo.

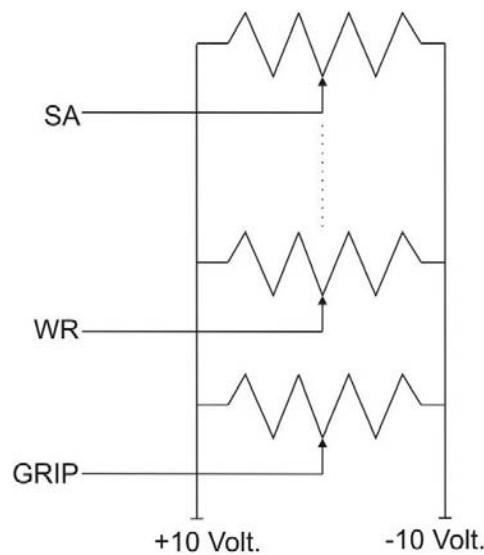


Figura AI.6 Diagrama de conexión de los potenciómetros en el Esclavo

En el manipulador esclavo, aparte de los potenciómetros, también es necesario leer los transductores de presión para saber la fuerza que ejerce el manipulador sobre su entorno o viceversa. El diagrama de conexión de los transductores de presión se puede observar en la figura AI.7.

Es importante resaltar, que a pesar de que los transductores se encuentran conectados a una alimentación de ± 12 Voltios, resultados experimentales realizados dieron como resultado que en la práctica no se obtienen lecturas superiores a los 6 Voltios, ya que de lo contrario se correría el riesgo de dañar el manipulador o el entorno sobre el cual se está trabajando. Por lo tanto la señal del transductor también puede ser conectado directo a los Convertidores Analógicos Digitales usados.

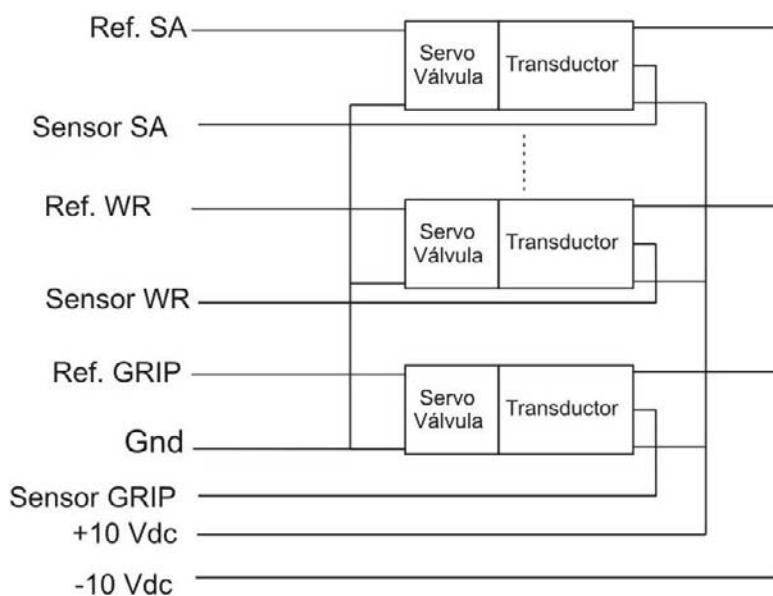


Figura AI.7 Diagrama de conexiones servoválvulas y transductores de presión

Salidas Analógicas

Las salidas analógicas de la tarjeta controladora son usadas en el caso del manipulador esclavo para controlar la apertura de las servoválvulas. El funcionamiento de esas servoválvulas es sencillo, a mayor magnitud de voltaje mayor es la apertura de la misma, y el signo del mismo determina el sentido de la apertura, es decir a un lado u otro, según sea el caso, tal como se puede observar en la figura AI.8.

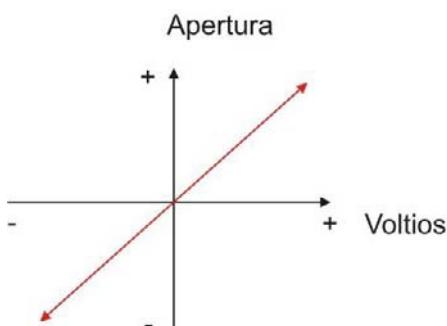


Figura AI.8 Diagrama de funcionamiento de la servoválvula

De acuerdo al funcionamiento de las servoválvulas, es necesario realizar una conversión de la salida de los Convertidores Digital Analógicos de la tarjeta controladora. Por lo tanto es necesario llevar el rango de trabajo de los DACs de 0 – 4.096 Voltios a ±12 Voltios si se quiere trabajar con todo el rango de trabajo de las servoválvulas. Sin embargo resultado de pruebas experimentales se determinó que usando un rango de trabajo de ±6 Voltios era más que suficiente para lograr un buen funcionamiento del manipulador.

Finalmente existe una última señal usada en el caso del manipulador esclavo, es una señal de salida digital necesaria para activar la hidráulica del sistema, con lo cual solo es necesario adaptar la señal para entregar más corriente para accionar el solenoide. El diagrama de funcionamiento de la tarjeta de adaptación de señales esclavo se puede observar en la figura AI.9.

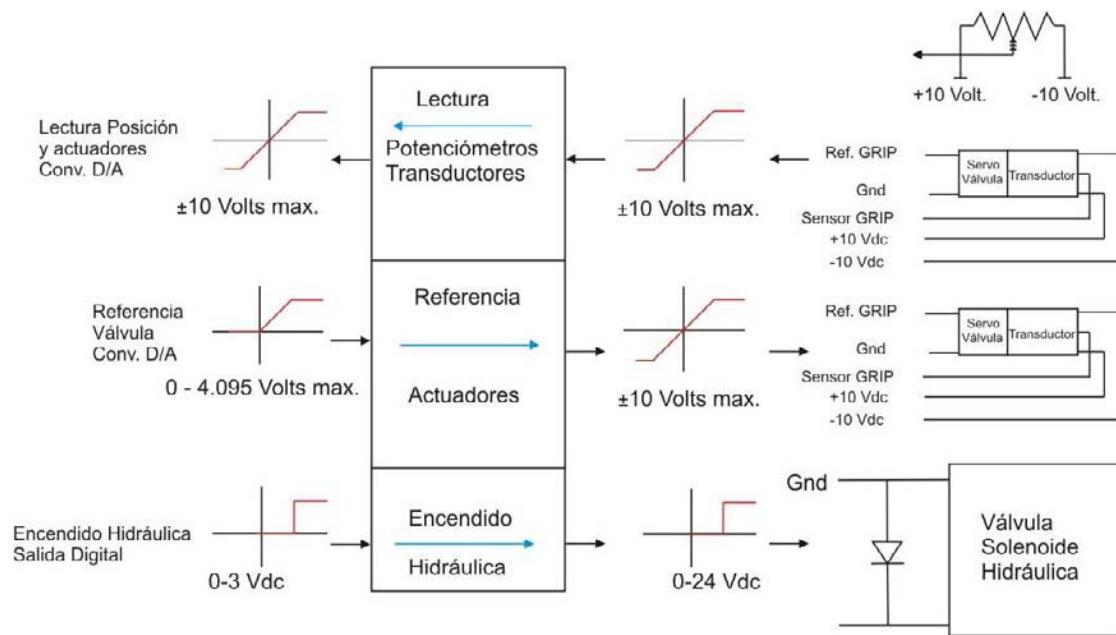


Figura AI.9 Diagrama de adaptación de señales esclavo

Anexo II: Identificación de la plataforma de teleoperación

AII.1 Identificación de sistemas

Cuando se quiere diseñar un controlador, lo primero que se requiere es el modelo matemático que describa el comportamiento del sistema real que se quiere controlar. Existen dos maneras de realizarlo, una es realizar un modelado del sistema, lo cual es una aproximación teórica al problema. Esto requiere de un amplio conocimiento del funcionamiento del sistema a ser controlado, además de las características físicas de todos sus componentes; puede decirse que se obtiene un modelo analítico basado en las leyes de la física que describe el comportamiento dinámico del proceso o sistema. Sin embargo, existen sistemas que por su complejidad, difícil acceso, u otras razones no se es posible realizar un modelado del mismo, en estos casos se aplica una aproximación experimental lo cual es conocido como Identificación. Para ello es necesario contar con datos reales obtenidos del sistema de interés que describen el comportamiento del mismo; a través de ellos es posible obtener un modelo matemático cuyo comportamiento describa al sistema de interés. Por lo tanto y de manera general, para realizar la identificación de un sistema se necesitan conocer:

- Datos experimentales: Es decir, una colección de datos que describan el funcionamiento del sistema real. Normalmente estos datos se obtienen adquiriendo las señales de entrada y salida del sistema de interés.
- Modelos: Existen distintos tipos de modelos entre los cuales escoger para describir el funcionamiento del sistema de interés, o lo que es lo mismo, que describan la relación entre la entrada y la salida del sistema de interés.
- Criterios de selección: Son criterios o condiciones que deben de cumplir los modelos obtenidos para sean seleccionados como validos. Es decir, los modelos que cumplan con los criterios de selección, son validos y pueden ser usados para diseñar los controladores del sistema de interés.

Tal como se mencionó anteriormente, existen varios tipos de modelos entre los cuales se puede escoger para realizar el proceso de identificación [Moreno 03], estos son:

- Paramétricos: Son aquellos en los que el modelo matemático que se utiliza para describir el funcionamiento del sistema esta completamente caracterizado por un conjunto finito de coeficientes (Parámetros). Ejemplos de este tipo de modelos son: Funciones de transferencia y los modelos de estado.
- No Paramétricos: Son aquellos métodos de caracterización de un sistema en los que para describir el funcionamiento del mismo se utiliza una o varias curvas de respuesta. Dado que las curvas no tienen un número finito de coeficientes se

denominan no paramétricos. Como ejemplo de este tipo de métodos, podemos nombrar: Bode, Nyquist y Nichols.

Modelos Paramétricos

Dado que la realización práctica de esta tesis se hizo mediante el uso de los modelos paramétricos, pasaremos a explicar con un poco más de detalle los mismos. Como se mencionó anteriormente los modelos paramétricos, se caracterizan porque el funcionamiento del sistema se describe mediante un conjunto finito de coeficientes. Los modelos paramétricos usados con mayor frecuencia son los de funciones de transferencia y los modelos de estados.

Modelos de función de transferencia:

Lo usual es utilizar modelos en tiempo discreto, dado que la captura de datos se realiza con un ordenador.

Un sistema discreto tiene por ecuación:

$$y(t) = -\sum_{k=1}^p a_k y(t-k) + \sum_{k=0}^q b_k u(t-k) \quad (\text{AII.1})$$

donde $y(k)$ es la secuencia de salida y $u(k)$ es la secuencia de entrada al sistema. Este sistema podemos escribirlo también como:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) \quad (\text{AII.2})$$

$$G(z) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)z^{-k} \quad (\text{AII.3})$$

$$y(t) = G(z)u(t) \quad (\text{AII.4})$$

Suponiendo que el sistema está sometido a ruido, podemos obtener una expresión equivalente:

$$v(t) = H(z)e(t) \quad (\text{AII.5})$$

$$H(z) = \sum_{k=1}^{\infty} h(k)z^{-k} \quad (\text{AII.6})$$

Con lo que un modelo lineal con una perturbación aditiva podría expresarse de la siguiente forma, utilizando la notación de Matlab, en la cual $z = q$.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (\text{AII.7})$$

Así dependiendo de la forma que adoptan las funciones $G(q)$ y $H(q)$ podemos hablar de cuatro tipos de modelos básicos: ARX, ARMAX, OE y Box-Jenkins.

Modelo ARX

Es la relación entrada-salida más simple, se representa como una ecuación lineal en diferencias

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) \quad (\text{AII.8})$$

en donde $e(k)$ es un ruido blanco, que entra como error directo en la ecuación en diferencias. Denominaremos θ al vector de parámetros ajustables al modelo.

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \quad (\text{AII.9})$$

si denominamos:

$$A(q) \cdot y(t) = B(q) \cdot u(t) + e(t) \quad (\text{AII.10})$$

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (\text{AII.11})$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (\text{AII.12})$$

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad (\text{AII.13})$$

$$H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (\text{AII.14})$$

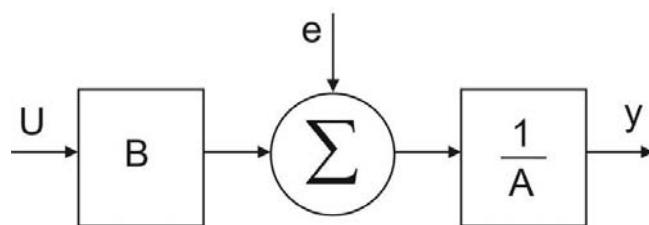


Figura AII.1. Modelo ARX

La mayor desventaja de este modelo es la ausencia de libertad para describir las propiedades del término de perturbaciones.

Modelo ARMAX

La diferencia que tiene este modelo respecto al modelo ARX, es que la perturbación es considerada un ruido blanco de media móvil.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_a) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c)$$

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (\text{AII.15})$$

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad (\text{AII.16})$$

$$H(q) = \frac{C(q)}{A(q)} \quad (\text{AII.17})$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (\text{AII.18})$$

Los parámetros ajustables son:

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}]^T \quad (\text{AII.19})$$

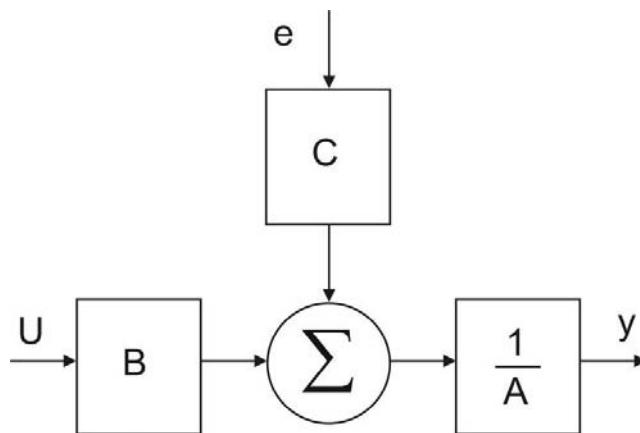


Figura AII.2 Modelo ARMAX

Modelo Error de Salida (OE)

Los modelos vistos hasta el momento tienen como denominador común en sus funciones de transferencia al polinomio $A(q)$. Desde un punto de vista físico, sería más natural parametrizar estas funciones independientemente. Considerando la perturbación como ruido blanco y un modelo de estructura como el de la figura tenemos

$$w(t) + f_1 w(t-1) + \dots + f_{n_f} w(t-n_f) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_a) \quad (\text{AII.20})$$

$$y(t) = w(t) + e(t) \quad (\text{AII.21})$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + e(t) \quad (\text{AII.22})$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f} \quad (\text{AII.23})$$

Los parámetros a determinar son:

$$\theta = [b_1, \dots, b_{n_b}, f_1, \dots, f_{n_f}]^T \quad (\text{AII.24})$$

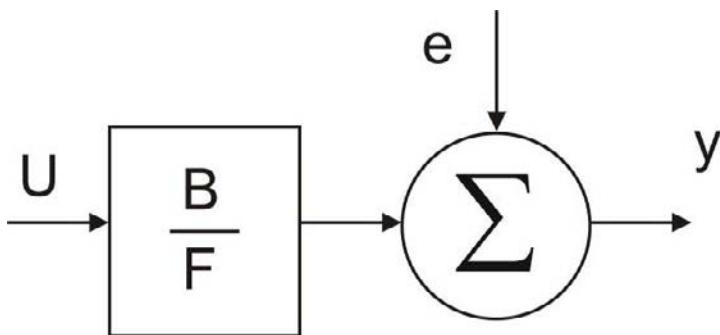


Figura AII.3 Modelo Error de salida

Este modelo presenta mayores dificultades a la hora de realizar su estimación que los modelos ARX o ARMAX. Permite obtener una descripción correcta de la función de transferencia determinista sin importar la forma que tomen las perturbaciones.

Modelo Box-Jenkins

Resulta de una generalización del modelo de error en la salida, añadiendo propiedades al error que se suma en la salida.

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (\text{AII.25})$$

El vector de parámetros a estimar es el siguiente:

$$\theta = [b_1, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}, d_1, \dots, d_{n_d}, f_1, \dots, f_{n_f}]^T \quad (\text{AII.26})$$

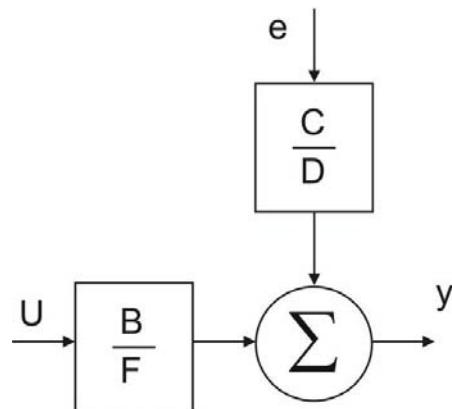


Figura AII.4 Modelo Box Jenkins

Familia general de modelos:

Los modelos desarrollados anteriormente pueden dar lugar a 32 tipos de modelos diferentes, dependiendo de cual de los cinco polinomios A, B, C, D o F son usados, aunque sólo se han mostrado los cuatro modelos que se utilizan en Matlab para la identificación.

La estructura generalizada es la siguiente:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (3.27)$$

Es frecuente que la dinámica desde $u(t)$ a $y(t)$ contenga un retardo, que para el caso discreto, puede ser contabilizado como un retardo de n_k muestras. Como resultado de esto, los primeros n_k coeficientes del polinomio $B(q)$ se hacen nulos.

$$B(q) = b_{n_k}q^{-n_k} + b_{n_k+1}q^{-n_k-1} + \dots + b_{n_k+n_b-1}q^{-n_k-n_b+1} \quad (3.28)$$

En consecuencia la estructura del modelo queda expresada de la siguiente forma:

$$A(q)y(t) = q^{-n_k} \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (\text{AII.29})$$

siendo n_k el número de muestras de retardo entre la entrada y la salida.

Modelo de Espacio de estados

Son representaciones comunes de los sistemas dinámicos. Describen el mismo tipo de relación lineal entre las entradas y las salidas como en los modelos anteriores, pero adecuadas de tal forma que sólo usan un retraso, es decir ecuaciones en diferencias

de primer orden. En estos modelos se utilizan variables de estados que son obtenidos a partir de los datos de entrada-salida resultantes del experimento.

La representación de los modelos en espacio de estados resulta:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (\text{AII.30})$$

Donde $x(t)$ es el vector de variables de estado. El orden del modelo se corresponde con la dimensión de este vector.

Al modelo anterior le corresponde un modelo de función de transferencia en tiempo discreto

$$Y(z) = G(z)U(z) + V(z) \quad (\text{AII.31})$$

donde:

$$G(z) = C[zI - A]^{-1}B + D \quad (\text{AII.32})$$

El proceso de identificación visto con mayor detalle, puede ser dividido en los siguientes pasos:

- 1) Diseño del experimento. Es el paso donde se realiza la adquisición de los datos del proceso o sistema de interés.
- 2) Tratamiento previo de los datos recogidos: Dado que los datos suelen estar acompañados de ruido, se hace necesario un procesamiento de las señales para adecuarlas al proceso de identificación.
- 3) Elección de la estructura del modelo: dependerá del conocimiento que se tenga de la posible estructura del modelo, en este caso se estimarán directamente los parámetros. De lo contrario, si no se disponen de las relaciones físicas que expresen un cierto conocimiento del sistema se utilizará un modelo estándar intentando determinar el orden y parámetros más adecuados.
- 4) Obtención de los parámetros del modelo: se estiman los parámetros que mejor ajustan la respuesta del sistema a los datos de entrada obtenidos experimentalmente.
- 5) Validación del modelo: Finalmente este paso comprueba la similitud del sistema identificado con el real. En caso de que no concuerde o que la diferencia que exista se considere inapropiada, se debe realizar nuevamente el proceso tomando en consideración las siguientes causas:
 - a) El conjunto de datos entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
 - c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

All.2 Adquisición de los datos

Como ya se mencionó en el epígrafe 3.1, la plataforma de experimentación consta de un sistema maestro y un sistema esclavo. Para el proceso de identificación, es necesario tratarlos por separado ya que cada uno por separado constituye un sistema independiente de gran complejidad. De todas maneras existen coincidencias de forma más que de fondo en los procesos de adquisición de datos para cada uno de los sistemas de interés, que es lo que a continuación se procederá a exponer.

Como es bien sabido, un robot de cadena cinemática abierta, posee acoplamientos entre sus distintas articulaciones, esto quiere decir que el movimiento de una articulación cercana al extremo, afecta el comportamiento de una articulación que se encuentre más alejada del mismo y viceversa. En estos casos, es necesario realizar un estudio e identificar un modelo acoplado del sistema, si se quiere realizar un control preciso del mismo. En el caso que nos compete, el sistema esclavo se trata de un robot hidráulico, que por su naturaleza es un sistema de gran potencia. Por otro lado, el sistema maestro se trata de un sistema eléctrico, pero que posee articulaciones con engranajes de gran reducción. Por estas razones, la identificación de los sistemas se realizó de manera independiente, obteniendo como resultado modelos desacoplados de los sistemas. Esta aproximación tiene como punto favorable, que el control desacoplado es más sencillo que el control de un sistema acoplado, la parte negativa es que el hecho de ignorar o simplificar los acoplamientos existentes entre las distintas articulaciones en el sistema introduce errores en los modelos que trae como consecuencia inevitablemente errores en el control de los mismos. La naturaleza hidráulica del sistema esclavo y las altas reducciones en los engranajes del maestro, son características que se espera influyan de manera favorable en la reducción de la magnitud del error que puede presentar los controladores diseñados en la presente tesis.

Dado que se tratarán con modelos desacoplados, es necesario diseñar una experimentación acorde que permita la correcta adquisición de los datos de ambos sistemas. Para ello es necesario tener en cuenta que es lo que se quiere, en este caso se busca obtener un modelo paramétrico, es decir; una función de transferencia que describa el funcionamiento individual de cada articulación para cada uno de los sistemas de interés. En todos los casos, se quiere una función de transferencia que relacione la entrada y la salida de las articulaciones, por lo que para el sistema maestro como para el sistema esclavo se requiere de 2 señales para realizar su identificación, y las mismas son la señal de actuación del actuador como entrada y como salida la señal de posición resultante de la articulación.

Para lograr lo descrito se realizó un proceso de identificación para cada articulación, dependiendo del sistema que se estuviera identificando. En primer lugar, se procedió a realizar la identificación del sistema esclavo. Para ello se seleccionaba una articulación y se mantenía fija el resto, luego se procedía adquirir los datos para identificarla; así sucesivamente se realizaba con el resto de las articulaciones. Con la finalidad de tomar en consideración el efecto de la posición del resto de las articulaciones sobre la articulación de interés, se adquirían datos experimentales en distintas posiciones. Por ejemplo, para la articulación EL (Elbow Elevation), en primer lugar se mantenían centradas las articulaciones WY, WP y se adquirían una serie de datos en esa posición. Luego se inclinaba la articulación WY +50 grados, se volvía a

tomar otra serie de medidas, y así sucesivamente se iban tomando las medidas. Este procedimiento puede ser visto en la serie de imágenes de la figura AII.5.

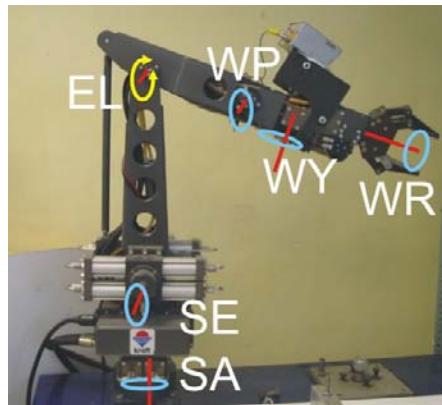


Figura AII.5 Identificación Articulación SE para el sistema esclavo

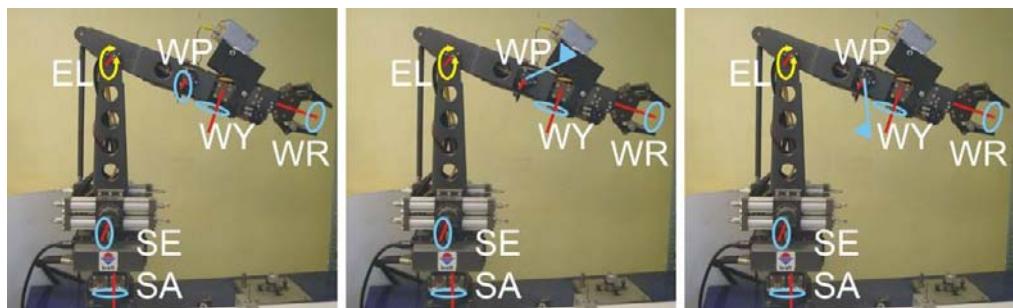


Figura AII.6 Ejemplos Identificación EL sistema Esclavo

Al igual que para el sistema esclavo, para el sistema maestro se realiza el mismo procedimiento. Solo que en este caso era necesario fijar las articulaciones mecánicamente. Esta es la única diferencia con el procedimiento seguido para el sistema esclavo, del resto el procedimiento es exactamente igual, se mantiene libre la articulación de interés, se fijan el resto en las posiciones deseadas y se procede a capturar los datos experimentales. La imagen AII.6 muestra un ejemplo de la manera como se realizaba el procedimiento para el caso del sistema maestro.



Figura AII.7 Identificación SA para el sistema



Figura AII.8 Ejemplo Identificación sistema Maestro

Una vez que se tiene preparado el sistema para la captura de los datos, se hace uso de la tarjeta da adquisición National Instruments PCI 6025-E y la toolbox de identificación de sistemas de Matlab. El procedimiento de adquisición de señales es bastante sencillo, se alimenta el actuador con una señal pseudo aleatoria en amplitud, simultáneamente se va capturando la posición resultante de la articulación y la señal de actuación. Se desarrolló un programa en Simulink que realiza esta tarea de manera automática, el mismo puede ser observado en la figura AII.9.

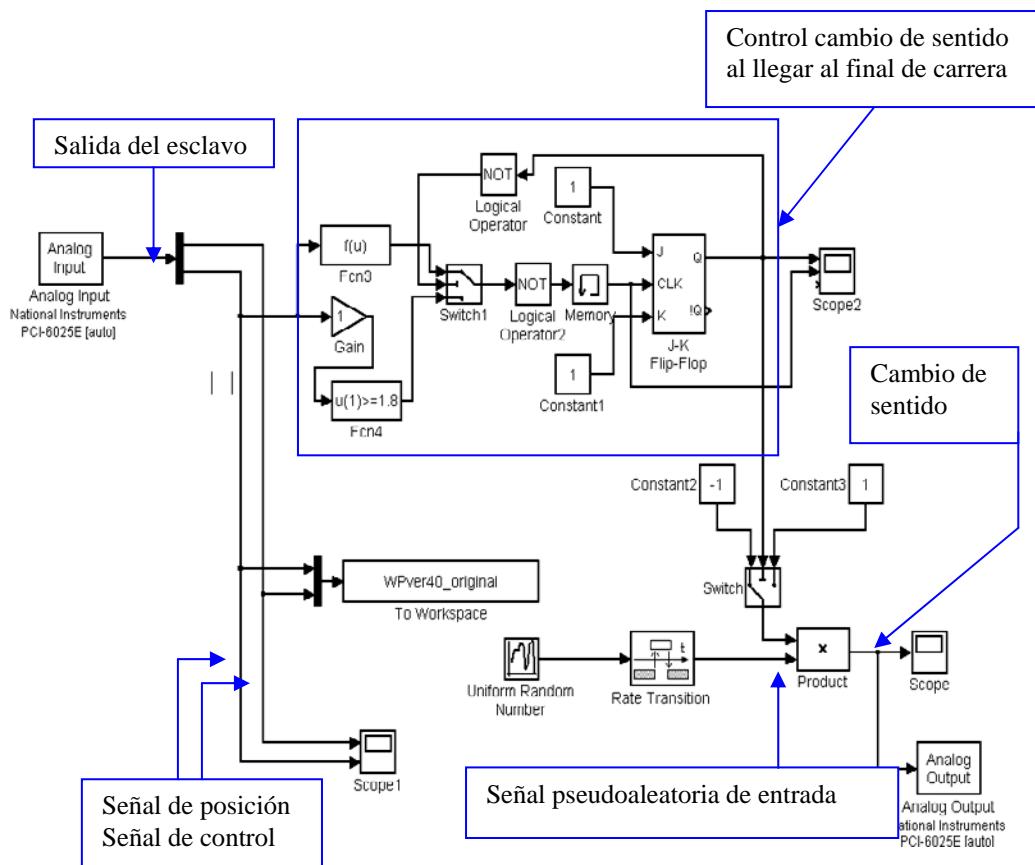


Figura AII.9 Programa Simulink para captura de datos de identificación

La frecuencia de muestreo utilizada es 2Khz, en el programa se establecen los límites articulares para evitar que las articulaciones lleguen a sus límites mecánicos y se dañen, también se fija el tiempo que se quiere dure sistema capturando las señales. Una vez que se tienen establecidos los límites, y la articulación de interés esta preparada, se procede a correr el programa; el mismo genera la señal pseudoaleatoria y captura las señales de interés, durante el tiempo que se haya establecido. El mismo programa funciona tanto para el dispositivo maestro como para el dispositivo esclavo. Las figuras AII.10 y AII.11 muestran las señales pseudoaleatoria y de posición para los sistemas Esclavo y Maestro respectivamente.

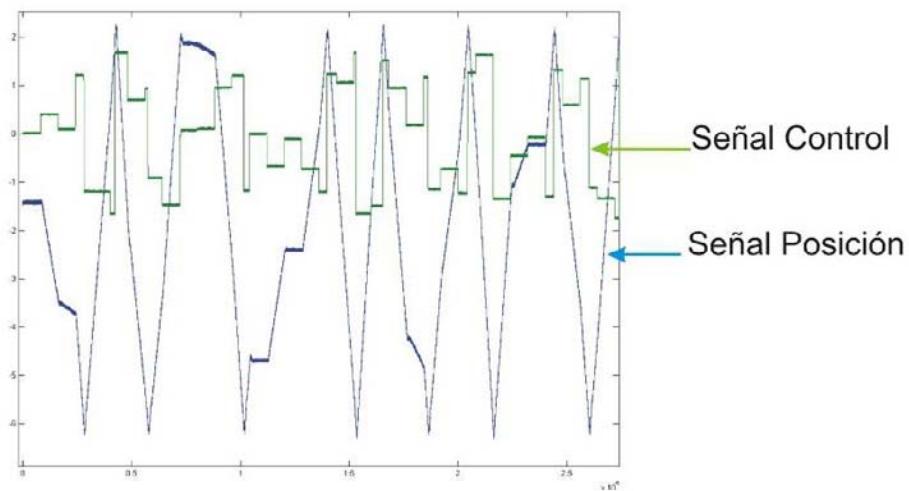


Figura AII.10. Ejemplo Señales de Posición y control para el sistema Esclavo WR

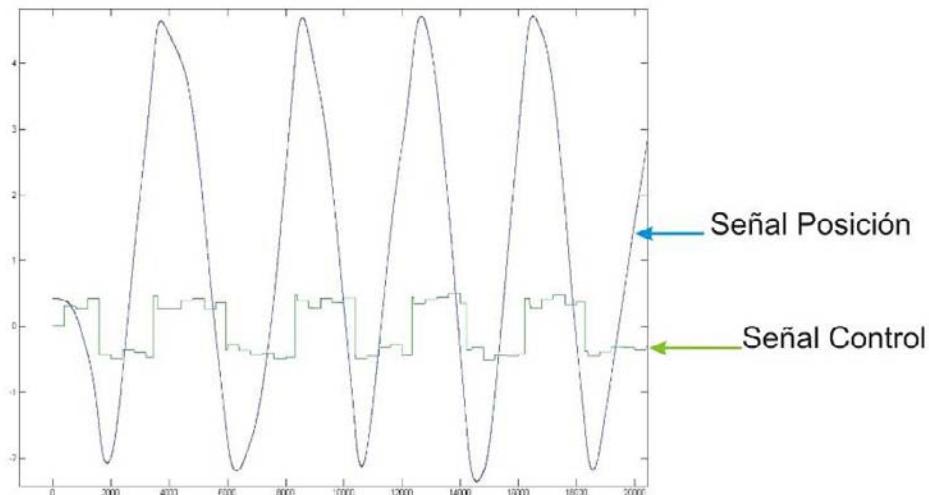


Figura AII.11. Ejemplo señales de Posición y control para el sistema Maestro SE

Una vez que se tienen los datos de las articulaciones, el siguiente paso es el procesado de los mismos. En primer lugar se tiene que realizar un tratamiento de las señales, la toolbox de identificación de señales de Matlab, requiere que se elimine la

media y la tendencia de la señales antes de proceder a realizar el proceso de identificación como tal. Una vez realizado este proceso, se realiza el procedimiento de identificación como tal. Es importante resaltar que la toolbox de identificación de sistemas no tiene un procedimiento automático, sino que ofrece todas las funciones necesarias, aparte de ello ofrece una interfaz llamada Ident (Figura AII.12), la cual no es más que eso una interfaz que permite la utilización de las distintas funciones, pero el proceso de igual manera se tiene que realizar manualmente.

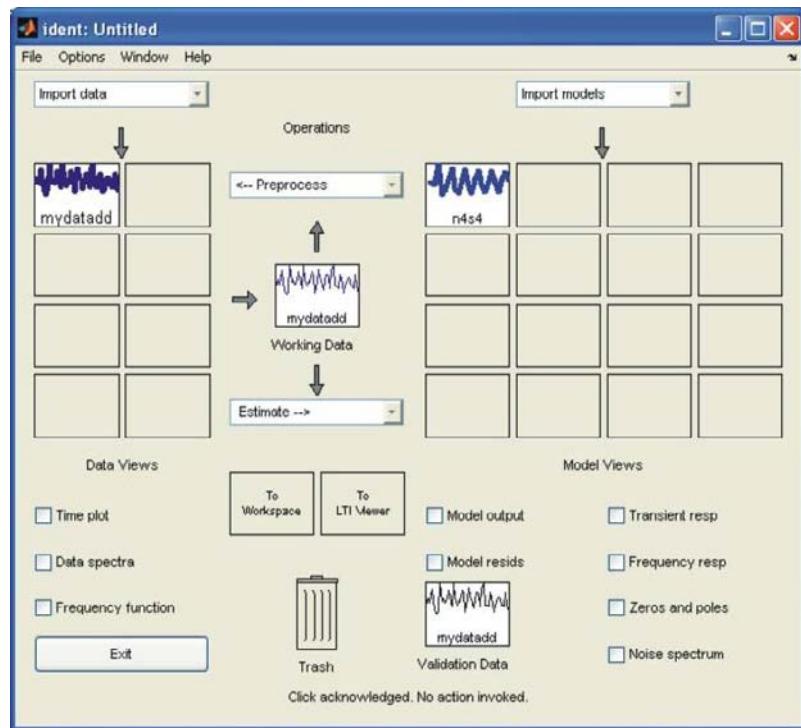


Figura AII.12. Interfaz programa Ident

Dado que el procedimiento es bastante tedioso, aún haciendo uso del programa ident, además que son muchas las señales que se tienen que procesar, se utilizó un programa que automatiza todo el proceso. El mismo está compuesto por una serie de archivos .m que en conjunto automatizan el proceso de identificación con un mínimo de intervención por parte del usuario, su funcionamiento puede ser resumido en el gráfico de la figura AII.13.

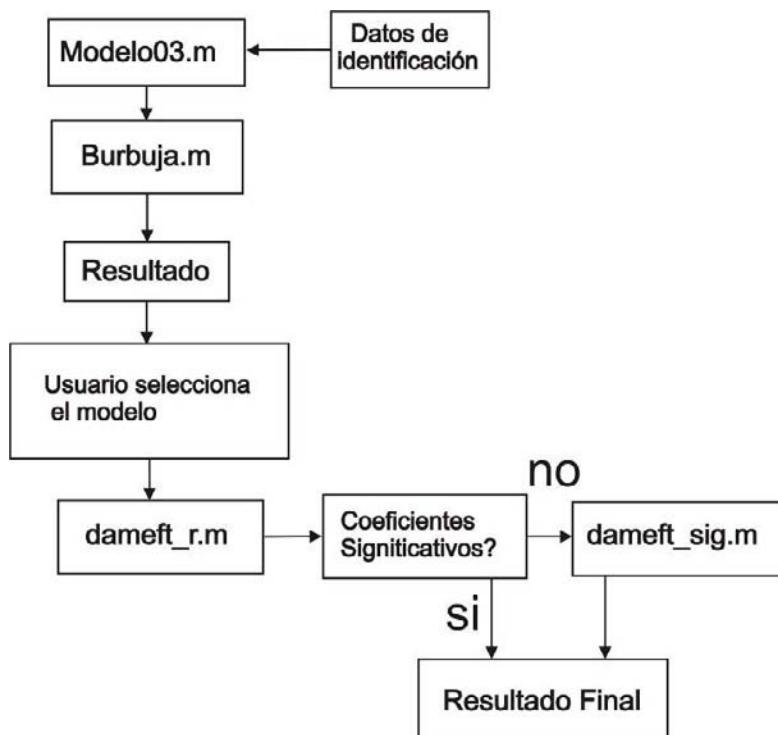


Figura AII.13. Proceso de identificación

El funcionamiento es bastante sencillo, los parámetros que se le pasan al programa son los datos correspondientes a la señal de entrada, los datos correspondientes a la señal de salida, el grado máximo que se quiere para el numerador y denominador de la función de transferencia y los modelos que se quiere. Una vez que se le indica al programa las opciones el inicia el proceso de identificación y da como resultado los 10 modelos con los Fits más elevados, es decir los 10 modelos que tienen el porcentaje de aproximación más cercano a las señales obtenidas del sistema original. El resultado se presenta en forma de vectores donde se tienen, los valores de los coeficientes, el grado del polinomio, el Fit de identificación y el Fit de validación, se realiza una verificación y si los coeficientes del modelo que se obtiene no son significativos, es decir; si son válidos o no. En caso de que no lo sean, se pasa el resultado por otra función que devuelve un modelo cuyos coeficientes si lo sean. Un ejemplo del resultado obtenido puede ser apreciado en la tabla AII.1:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fit Identificación	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000	1,0000
	1,0000	1,0000	2,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000
	2,0000	1,0000	3,0000	3,0000	2,0000	1,0000	3,0000	2,0000	1,0000	2,0000
	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Fit Validación	80,4531	80,3467	80,1534	80,0666	79,8252	78,1614	77,1623	77,0062	76,8969	76,6640
	80,3288	80,0281	80,6479	80,8084	81,2207	77,3268	76,5250	76,4046	76,2410	76,0781

Tabla AII.1. Ejemplo resultado presentado por el proceso de identificación

Una vez que se tienen los resultados, se procede a seleccionar el modelo deseado y dado que se quiere diseñar un controlador con el modelo, se requiere que seleccionar un modelo cuyo comportamiento sea lo más parecido al real. La elección se realiza mediante haciendo uso de los valores que se encuentran resultados en la tabla AII.1, que son el fit de identificación y el fit de validación. Como ya se explicó anteriormente, el fit de identificación es el porcentaje de aproximación que tiene el modelo obtenido con las señales de identificación. En cambio, el fit de validación ofrece un indicativo de que tan aproximado es la respuesta del modelo con la respuesta del sistema real ante la misma entrada. Esto quiere decir que si un modelo tiene el fit de identificación elevado pero el fit de validación bajo, debería ser descartado porque en realidad el sistema se comporta muy diferente al sistema real ante la misma entrada. En base a los valores del fit de identificación y de validación, se selecciona un modelo y se usa otra función cuyo objetivo es transformar los resultados en la función de transferencia y efectuar un test de correlación cruzada. Un ejemplo de este test puede observarse en las figura AII.14.

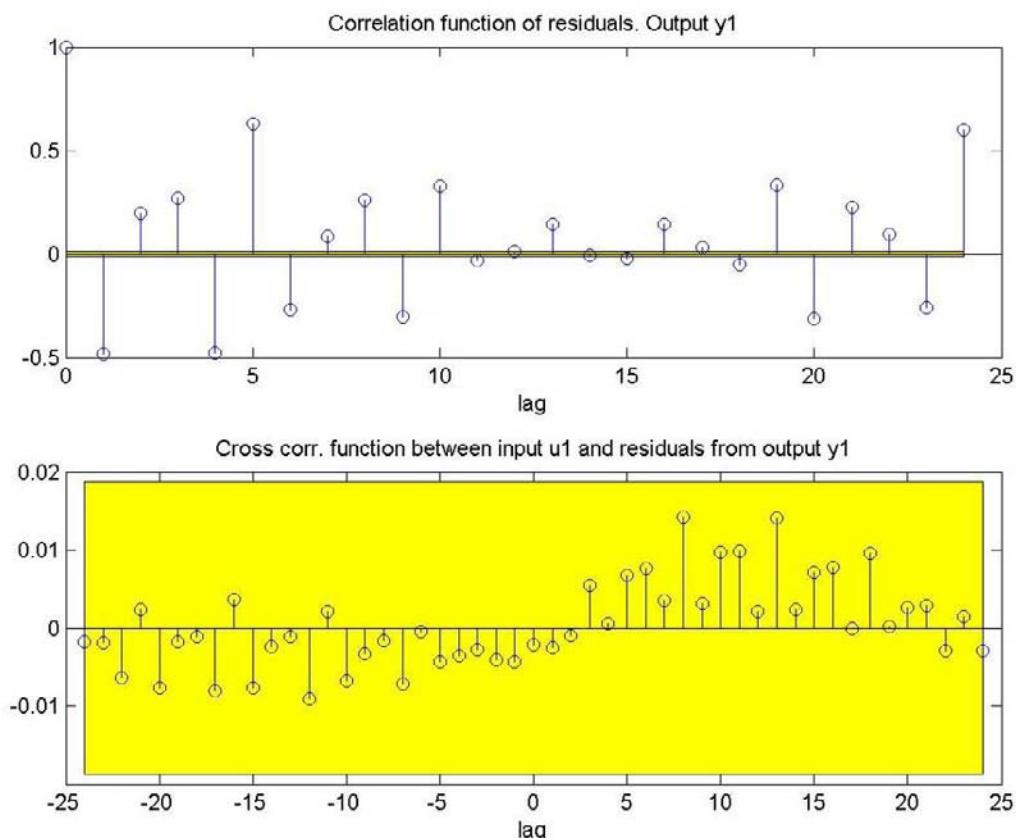


Figura AII.14 Resultado del test de correlación

Si el test da como resultado que todos los valores se mantienen dentro de la franja amarilla, tal como se puede observar en la figura AII.14, el modelo es valido para ser usado. En caso de que existan puntos fuera de la franja, se procede a seleccionar otro modelo. Finalmente resultados del proceso de identificación puede resumirse en las siguientes tablas.

Articulación	Fit Ident. (%)	Fit Verificación (%)	Modelo
SA	89,62	87,53	$G(z) = \frac{-1.0844e - 5 \cdot z}{(z - 1) \cdot (z - 0.9939)}$
SE	90,88	81,89	$G(z) = \frac{-1.4823e - 5 \cdot z}{(z - 1) \cdot (z - 0.9922)}$
EL	78,27	88,56	$G(z) = \frac{-1.3567e - 5 \cdot z}{(z - 1) \cdot (z - 0.9928)}$
WY	77,99	75,14	$G(z) = \frac{-0.00016648 \cdot z}{(z - 1) \cdot (z - 0.9805)}$
WP	79,47	79,15	$G(z) = \frac{-2.677e - 5 \cdot z}{(z - 1) \cdot (z - 0.9924)}$
WR	82,72	71,88	$G(z) = \frac{-0.0046205 \cdot z}{(z - 1)}$

Tabla AII.2. Resultado Identificación Sistema Esclavo

Articulación	Fit Ident. (%)	Fit Verificación (%)	Modelo
SA	80,36	85,55	$G(z) = \frac{-0.00040718 \cdot (z - 0.9968)}{(z^2 - 1.9994 \cdot z + 0.9994)}$
SE	66,60	55,97	$G(z) = \frac{0.00039949 \cdot z \cdot (z - 1.029)}{(z - 1) \cdot (z + 0.8056) \cdot (z - 0.998)}$
EL	69,65	62,30	$G(z) = \frac{-3.7895e - 7 \cdot z^2}{(z - 1) \cdot (z^2 - 1.9738 \cdot z + 0.9740)}$
WY	59,50	52,71	$G(z) = \frac{0.00063158 \cdot (z - 1.061)}{(z - 1) \cdot (z - 0.9967)}$
WP	57,54	52,58	$G(z) = \frac{0.04083 \cdot (z - 1)}{(z + 0.3228) \cdot (z^2 - 2 \cdot z + 1.0001)}$

Tabla AII.3. Resultados Identificación Sistema Maestro

Anexo III: Controles del sistema maestro-esclavo

AIII.1 Diseño de los controladores

Con los sistemas a ser controlados identificados se procede a realizar el diseño de los controladores. En este punto es necesario recordar lo mencionado en el anexo II, dado que el proceso de identificación utilizado introduce errores que serán reflejados en los controladores, el proceso de diseño de los mismos requiere de un ajuste experimental. Es decir, que inicialmente se diseña un controlador con las características deseadas, se implementa y finalmente se realizan los ajustes necesarios hasta que se obtiene el comportamiento deseado. El diseño se realizó utilizando la *sisotool* de Matlab, y los datos experimentales se obtuvieron mediante el puerto USB de las tarjetas controladoras del dispositivo de interés. A continuación se presentarán los reguladores diseñados para los sistemas maestro y esclavo, también es importante recordar que la identificación se realizó de manera desacoplada, por lo tanto el diseño de los controladores es de manera individual para cada grado de libertad. Dado que el diseño de todos los controladores es similar, se presentará el diseño de la primera articulación (SA) únicamente, y el resultado de todas las articulaciones se presentarán en tablas resumen.

Controladores Articulaciones Esclavo

Articulación SA:

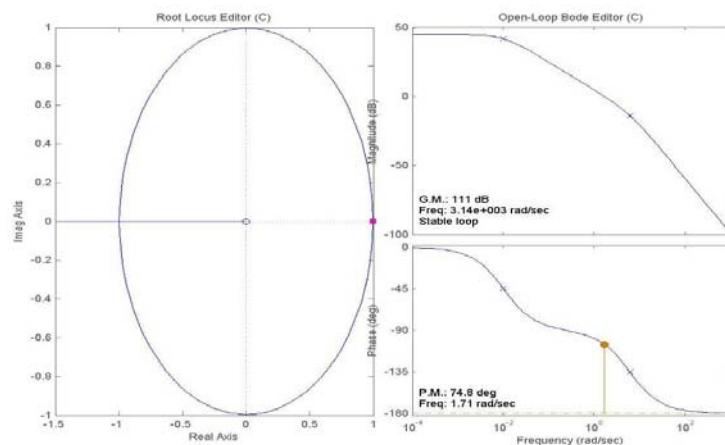


Figura AIII.1. LDR Función de Transferencia Modelo de la articulación SA

Controlador Diseñado:

Articulación	R(Z)	ts(s)	ep(%)	Mp(%)
SA	$\frac{-29.9827 \cdot (z - 0.9939) \cdot (z - 0.5)}{z \cdot (z - 0.9773)}$	0,34	0,1	1

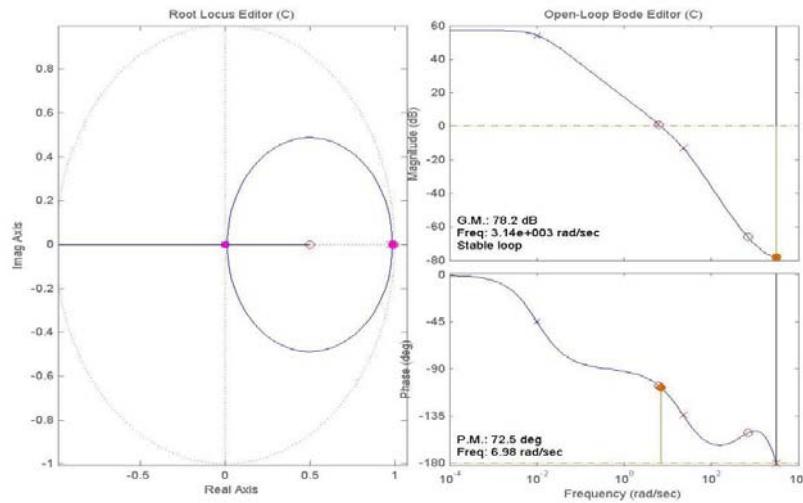


Figura AIII.2. LDR Regulador de la articulación SA

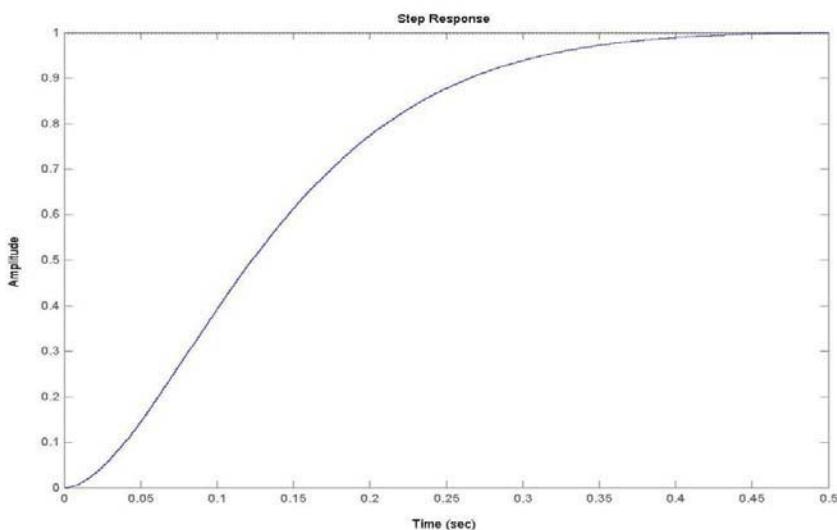


Figura AIII.3. Respuesta teórica ante escalón de la articulación SA con regulador

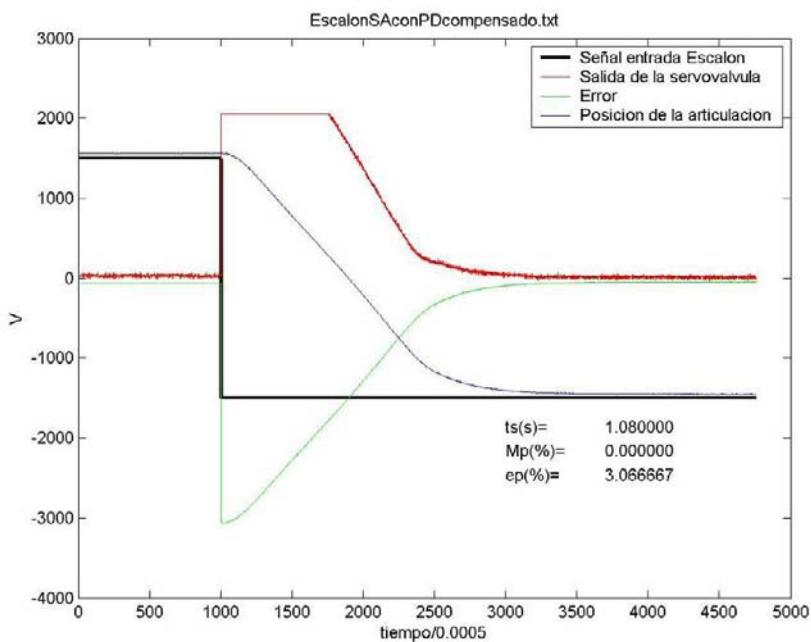


Figura AIII.4. Respuesta Real ante escalón de la articulación SA con regulador

Controladores Articulaciones Maestro

Articulación SA:

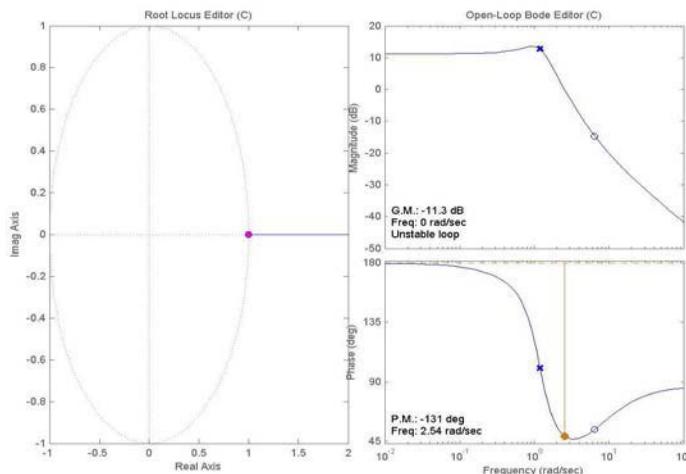


Figura AIII.5. LDR Función de Transferencia Modelo de la articulación SA

Controlador Diseñado:

Articulación	R(Z)	ts(s)	ep(%)	Mp(%)
SA	$\frac{-20 \cdot (z - 0.996)}{z \cdot (z - 0.985)}$	1,01	4,9	13,7

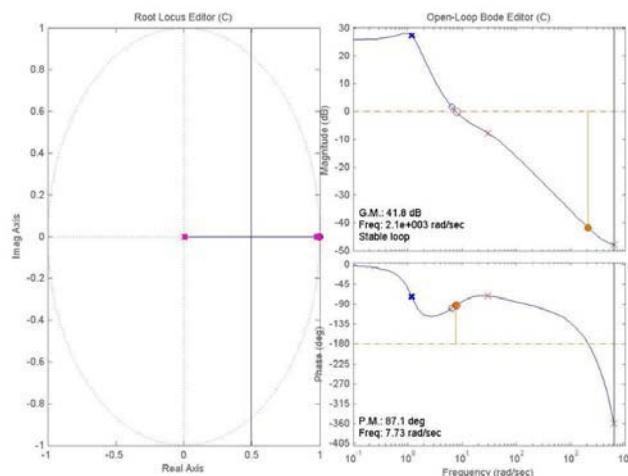


Figura AIII.6. LDR Regulador de la articulación SA

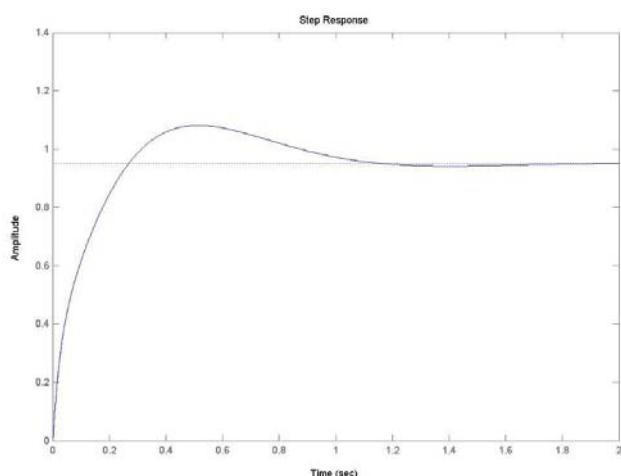


Figura AIII.7. Respuesta teórica ante escalón de la articulación SA con regulador

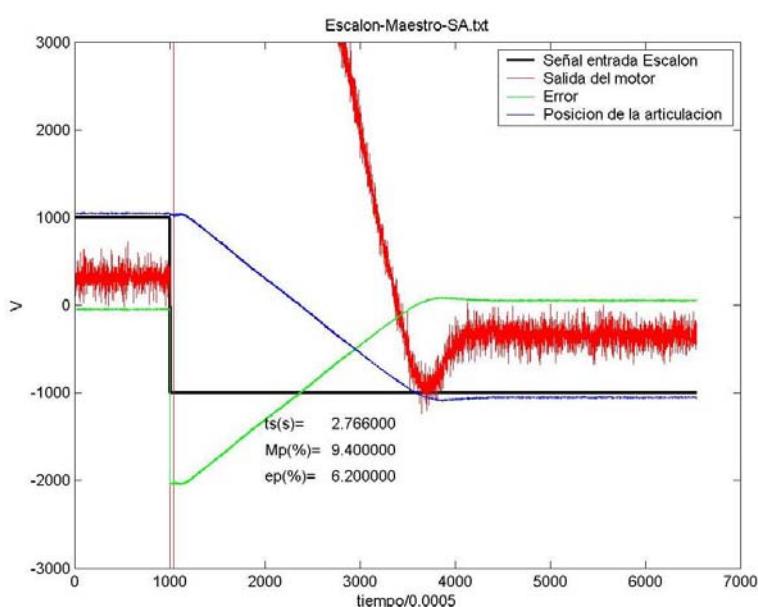


Figura AIII.8. Respuesta Real ante escalón de la articulación SA con regulador

Articulación	R(Z) Esclavo	R(Z) Maestro
SA	$\frac{-29.9827 \cdot (z - 0.9939) \cdot (z - 0.5)}{z \cdot (z - 0.9773)}$	$\frac{-20 \cdot (z - 0.996)}{z \cdot (z - 0.985)}$
SE	$\frac{-2.5 \cdot (z - 0.9922) \cdot (z - 0.5)}{z \cdot (z - 0.9848)}$	$\frac{-1.2 \cdot (z - 0.9981) \cdot (z - 0.2)}{z \cdot (z - 0.9867) \cdot (z - 0.9413)}$
EL	$\frac{-15 \cdot (z - 0.993) \cdot (z - 0.5)}{z \cdot (z - 0.9858)}$	$\frac{-2 \cdot (z - 0.995)}{(z - 0.947) \cdot (z - 0.947)}$
WP	$\frac{-6.5 \cdot (z - 0.9922) \cdot (z - 0.6911)}{z \cdot (z - 0.983)}$	$\frac{2.75 \cdot (z^2 + 1.996 \cdot z + 0.9961)}{(z - 0.9224) \cdot (z - 0.9747) \cdot (z - 0.96)}$
WY	$\frac{-10 \cdot (z - 0.9089)}{z}$	$\frac{-0.5 \cdot (z - 0.9966) \cdot (z - 0.15)}{z \cdot (z - 0.9546) \cdot (z - 0.9616)}$
WR	$\frac{-0.4 \cdot (z - 0.725)}{(z - 0.9472)}$	

Tabla AIII.1. Resumen de reguladores diseñados para los sistema Maestro y Esclavo

Con los modelos de las articulaciones y los controladores diseñados, el próximo paso es realizar la simulación para cada par de articulaciones maestro-esclavo, y así tener una primera aproximación teórica de cual podría ser el comportamiento experimental del esquema implementado. A continuación se presentarán los distintos esquemas que han sido estudiados.

AIII.2 Esquema de control Posición-Posición

Nuevamente el esquema de control Posición-Posición puede ser observado en la figura AIII.9, del mismo se puede notar que en cada lado del sistema se tiene un control en posición, solo que las referencias de cada controlador son cruzadas, es decir que la referencia del control del maestro viene de la posición del esclavo y viceversa. Por lo tanto, los controladores diseñados en el epígrafe 3.3.1, son implementados dentro del esquema en la posición de los controladores resaltados con los recuadros azules en la figura AIII.9. Dado que la identificación y por lo tanto el diseño de los controladores se ha realizado asumiendo un modelo desacoplado de las articulaciones, su implementación resulta muy sencilla.

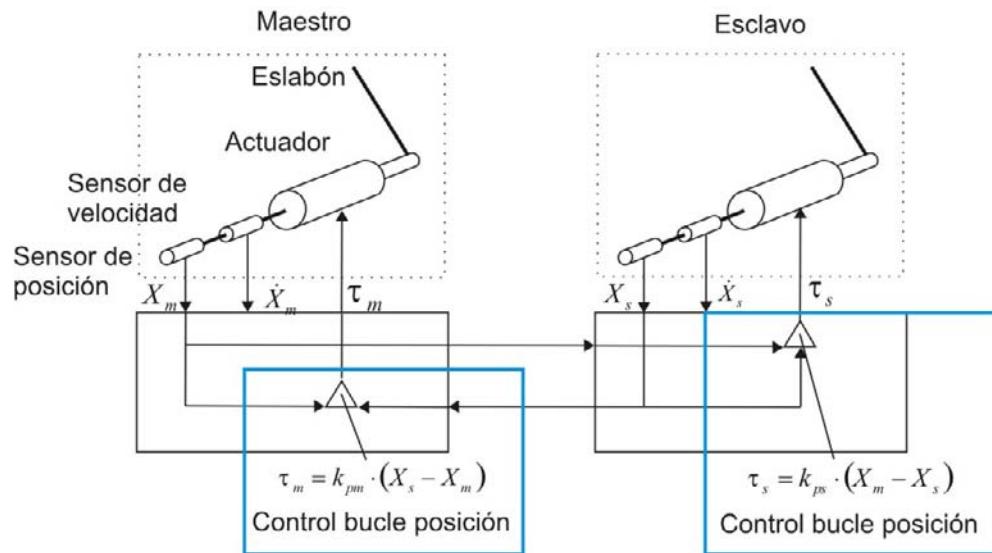


Figura AIII.9. Esquema de control bilateral Posición-Posición

Para obtener el comportamiento del esquema se realizó un modelo en Simulink para una articulación del sistema Maestro y su par en el sistema esclavo, lo cual nos permite simular el comportamiento de la misma ante una entrada del operador. Dicho modelo es aplicable a todas las articulaciones cambiando los respectivos valores de los controladores y modelo de la articulación. El modelo Simulink implementado puede observarse en la figura AIII.10.

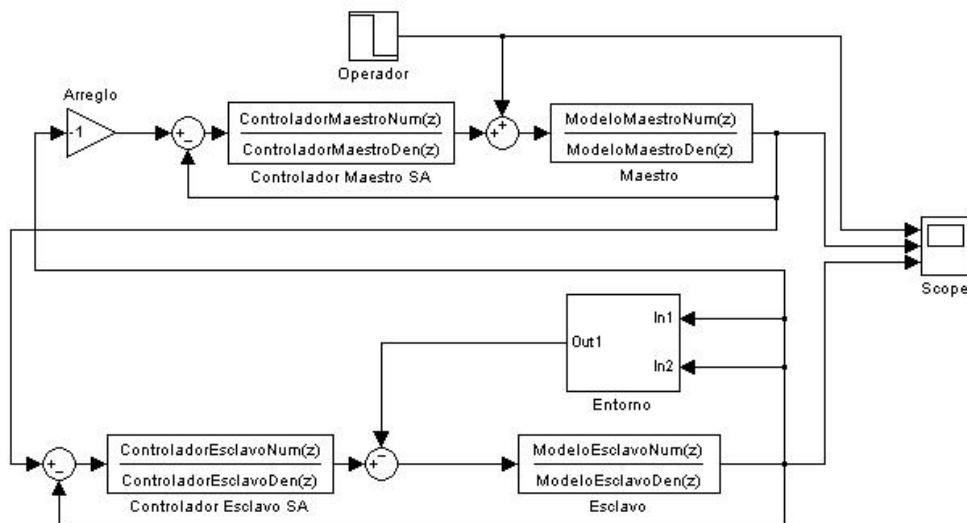


Figura AIII.10. Modelo Simulink para el esquema Posición-Posición

A continuación se presenta el resultado de la simulación para la articulación SA, ante una entrada tipo escalón. El resto de las articulaciones se obvia por razones de espacio.

Simulación de la articulación SA:

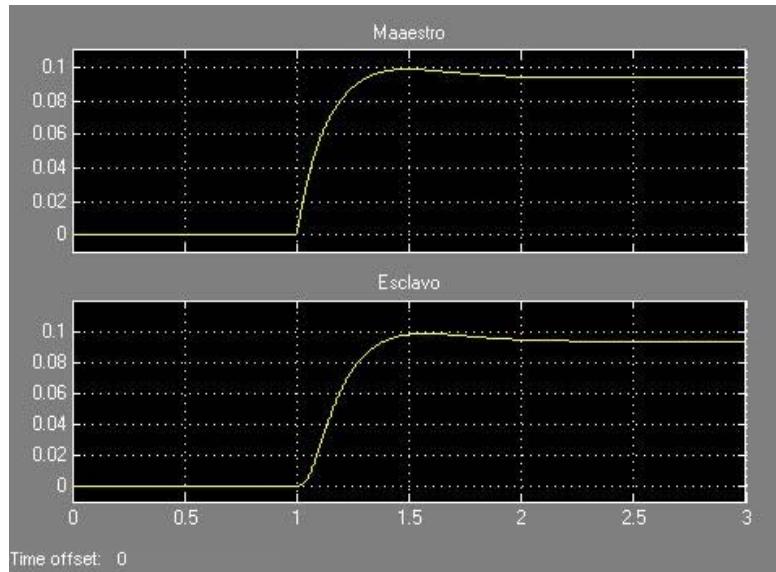


Figura AIII.11. Respuesta teórica del sistema Kraft articulación SA

AIII.3 Esquema de control Fuerza-Posición

El esquema de control Fuerza-Posición puede ser observado en la figura AIII.12, en este caso el sistema solo tiene un control de posición del lado del esclavo. En el maestro existe una realimentación directa del valor de fuerza leído por el sensor que se encuentra en el esclavo. Por lo que los controladores diseñados en el epígrafe 3.3.1, son implementados dentro del esquema en la posición de los controladores resaltados con los recuadros azules en la figura AIII.12, mientras que la realimentación de fuerza pasa directo por un bloque de adaptación de la señal, que básicamente es una constante proporcional para graduar el nivel de fuerza que va a ser reflejado al operador y puede verse en el recuadro rojo de la figura AIII.12.

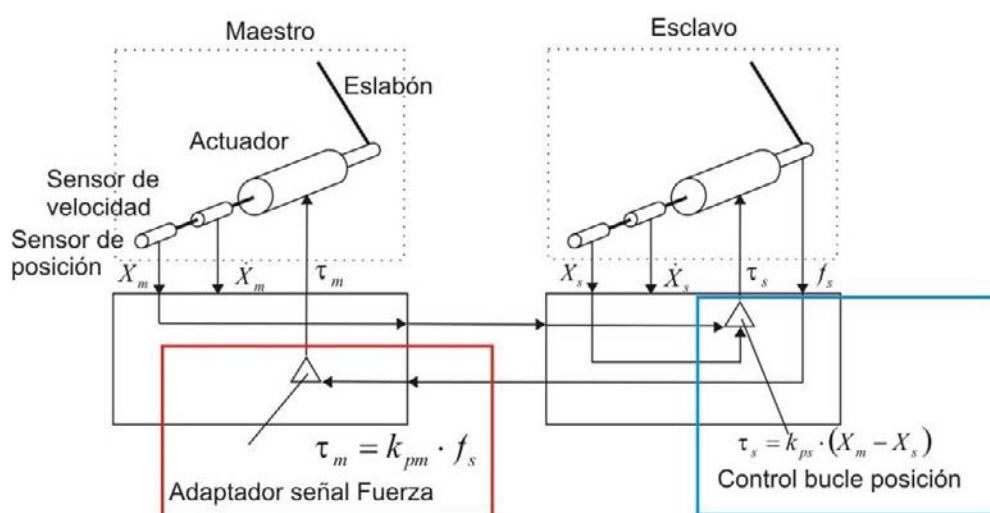


Figura AIII.12. Esquema de control bilateral Fuerza-Posición

Al igual que en el caso del esquema Posición-Posición, se realizó un modelo en Simulink para obtener el comportamiento teórico del esquema, en este caso el mismo puede observarse en la figura AIII.13.

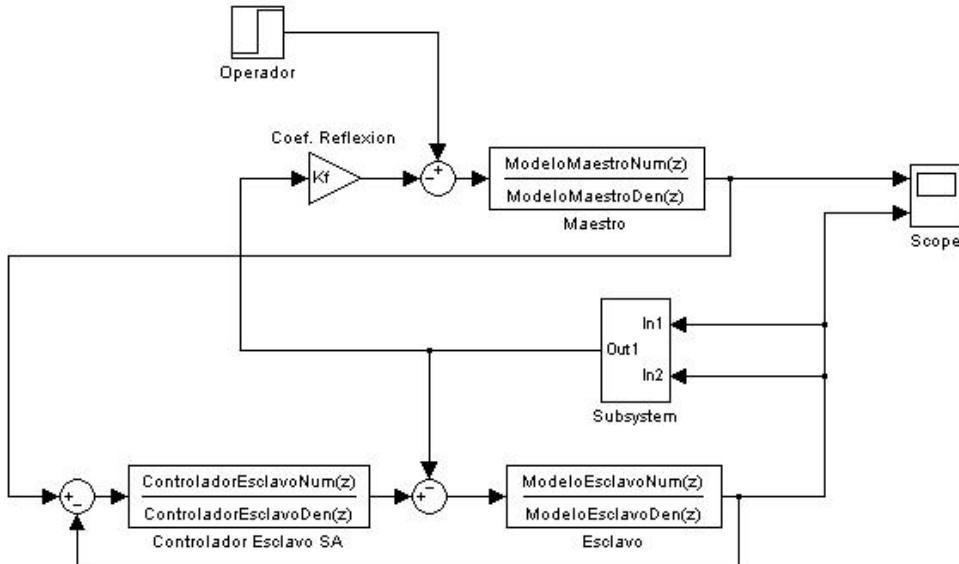


Figura AIII.13. Modelo Simulink para el esquema Fuerza-Posición

A continuación se presenta el resultado de la simulación para la articulación SA, ante una entrada tipo escalón. Al igual que el esquema posición-posición, se obvia el resto de las articulaciones.

Articulación SA:

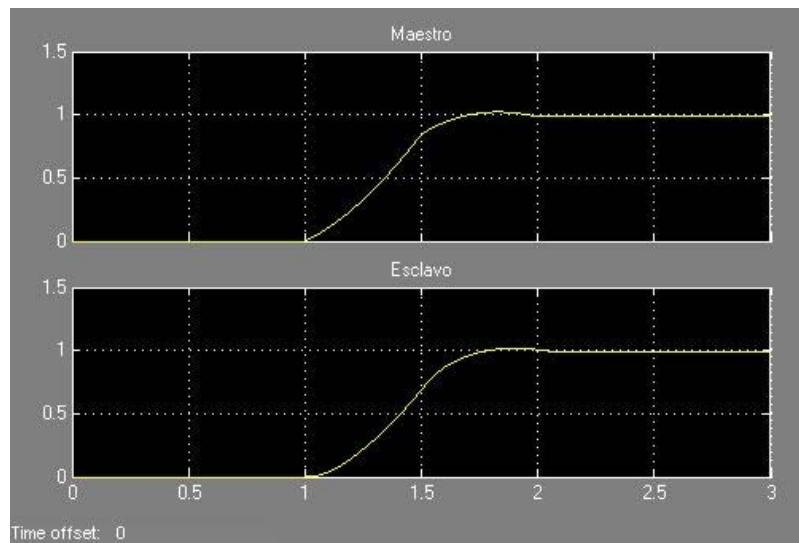


Figura AIII.14. Respuesta teórica del sistema Maestro-Esclavo del esquema Fuerza-Posición para la articulación SA