

Universidad de Huelva

**Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas
Informáticos y Automática**



**Contribuciones al desarrollo de laboratorios virtuales y
remotos en robótica**

**Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:**

Tomás de Jesús Mateo Sanguino

Fecha de lectura: 26 de julio de 2010

Bajo la dirección del doctor:

José Manuel Andújar Márquez

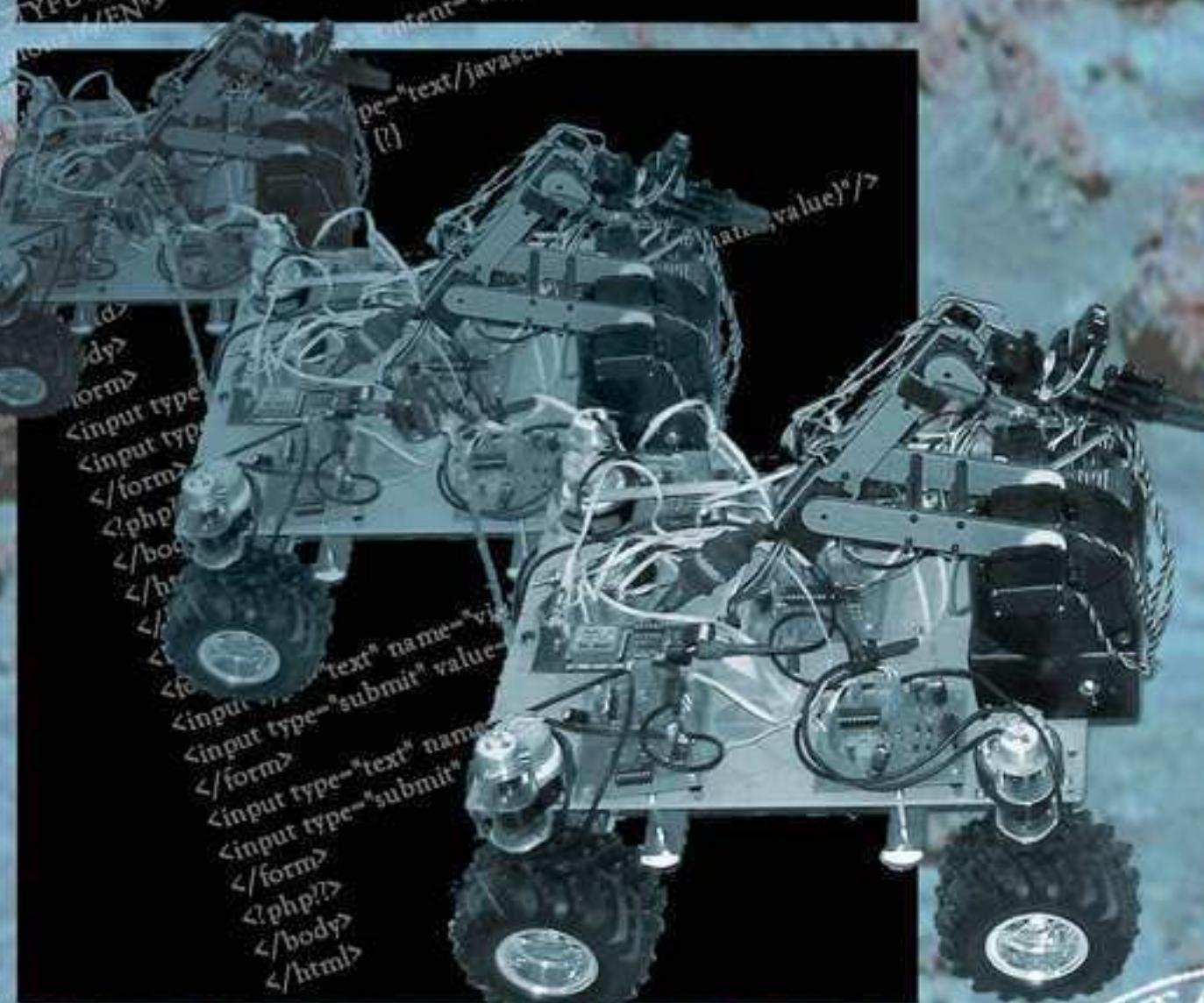
Huelva, 2010

ISBN: 978-84-92944-29-3

D.L.: H 288- 2010

Contribuciones al Desarrollo de Laboratorios Virtuales y Remotos en Robótica

Tesis Doctoral



Autor: Tomás de J. Mateo Sanguino

Director: José Manuel Andújar Márquez

julio de 2010





Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática
Escuela Politécnica Superior

**CONTRIBUCIONES AL DESARROLLO DE LABORATORIOS VIRTUALES Y
REMOTOS EN ROBÓTICA**

Tesis Doctoral de
Tomás de J. Mateo Sanguino

Dirigida por
José Manuel Andújar Márquez

UNIVERSIDAD DE HUELVA

Julio de 2010

Reservados todos los derechos. El uso de este libro está restringido y protegido por las condiciones que establece el artículo 37.1 de la Ley de Propiedad Intelectual. No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

D. José Manuel Andújar Márquez, Catedrático de Escuela Universitaria de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Huelva,

CERTIFICA:

Que D. Tomás de J. Mateo Sanguino, Ingeniero en Electrónica, ha realizado bajo mi dirección y dentro del programa de doctorado **Ingeniería de Control, Informática y Electrónica**, el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulado:

Contribuciones al Desarrollo de Laboratorios Virtuales y Remotos en Robótica

Revisado el presente trabajo, ha sido presentado al Tribunal que lo ha juzgado.

Tribunal Calificador:

Presidente: D. Sebastián Dormido Bencomo

Secretario: D. Ramón Galán López

Vocal: D. Agustín Jiménez Avello

Vocal: D. Jesús Manuel de la Cruz García

Vocal: D. Patricio Salmerón Revuelta

Calificación: Sobresaliente cum laude por unanimidad

Y para que así conste a efectos de lo establecido en el artículo octavo del Real Decreto 778/1998 y por la normativa Reguladora del título de Doctor de la Universidad de Huelva, se autorizó la presentación de este trabajo en la Universidad de Huelva.

La Rábida, a 26 de julio de 2010

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera dar las gracias a Benito A. de la Morena Carretero, cuya preocupación por mi persona y su apego, propiciaron realizar la Tesis Doctoral y llevarme a conocer a mi actual Director. Por ello, quiero agradecer a José Manuel Andújar Márquez no sólo el facilitarme un laboratorio de trabajo y medios con los que investigar, sino además por ser la persona que me dio la oportunidad de realizar esta Tesis. Su interés por la investigación hizo posible realizar una breve estancia en la UNED. A raíz de esto, quisiera dedicar unas palabras de afecto a Sebastián Dormido Bencomo, Héctor Vargas y al resto del grupo de investigación del Dpto. de Informática y Automática, por su cariñosa acogida durante mi corta, pero inolvidable, estancia en la UNED.

Agradezco el soporte y la financiación dados por el Vicerrectorado de Formación del Profesorado e Innovación de la UHU, quienes han permitido subvencionar esta Tesis, en parte, a través de los Proyectos de Innovación Docente. Por otro lado, la generosa política de la dirección de la Escuela respecto de la cesión de espacios al Grupo de Investigación Control y Robótica (TEP-192), ha permitido ubicar y adecuar el laboratorio presentado en esta Tesis. También quisiera agradecer al Servicio de Informática Central de la UHU y, en concreto, a Francisco Cuesta Cano y Marco A. Márquez Sánchez por su colaboración con el Laboratorio de Ensayo de Robots. Quisiera hacer extensible mi gratitud al Personal de Administración y Servicios, Ramón González Gómez y Manuel Roque González Pino, por su constante apoyo técnico durante la realización de la Tesis.

De igual forma, quiero destacar mi agradecimiento a Francisco José Aguilar Nieto y Juan José Chica Barrera, dos brillantes y futuros ingenieros con los que he podido compartir alegrías y largas jornadas de trabajo. En la memoria queda un fin de semana apoteósico alrededor de VANTER. En especial, no quiero olvidarme de agradecer, a nivel personal, a Francisco José y Antonio Guerrero por haberme ofrecido su hogar cuando hizo falta.

Por último, quisiera también agradecer a los profesores de DIESIA, DTI y a los alumnos de la EPS de La Rábida por haber hecho un paréntesis en sus quehaceres cotidianos y contribuir con las encuestas de evaluación. Finalmente quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que de algún modo u otro han contribuido a la realización de esta Tesis Doctoral y se han convertido en compañeros de viaje en esta especial singladura: José Carpio Cañada, Nieves Pavón Pulido, Manuel Jesús Vasallo Vázquez, Arturo Aquino Martín, Alberto Vélez Doncel-Moriano y Julián Lloris Ramos.

Al resto, gracias, muchas gracias de verdad.

*A mi familia, a María
y a aquellos seres queridos
que siempre llevaré dentro de mí.*

Prólogo

El asistir a la defensa de una Tesis Doctoral es siempre motivo de satisfacción, toda vez que un nuevo doctor emerge de una Universidad. Y lo es más aún si cabe, si el doctor inició hace una década su andadura profesional bajo la tutela del que esto suscribe en el campo de la astrofísica robótica y si la Universidad en cuestión es una joven, aunque no por ello inmadura, sino todo lo contrario, Universidad de Huelva.

Esta Tesis Doctoral, fruto de mucho trabajo y esfuerzo sin lugar a dudas, presenta toda una serie de desarrollos en el campo de Laboratorios Virtuales y Robótica. Desde que el checo Karel Čapek (a sugerencia de su hermano Josef) acuñara el término “robot” allá por 1921 en su obra de teatro “R.U.R.” (o “*Robots Universales de Rosum*”), e Isaac Asimov denominara “robótica” en su obra “*Liar!*” (1941) a la ciencia de los robots, los avances en el campo han sido prodigiosos. Desde los mecanismos rudimentarios que se hicieron en Alejandría y Bizancio allá por el siglo I a.C. hasta los robots cada vez más parecidos a los humanos desarrollados en el país del sol naciente, los desarrollos se multiplican a un ritmo casi exponencial. ¿Quién no ha contemplado boquiabierto cómo se desenvuelve el robot *Asimo* en sus múltiples facetas, compartiendo otras noticias en los informativos?

Uno de estos desarrollos es VANTER, acrónimo que responde a “Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento”, el cual es el objeto principal de esta Tesis. Lo que hoy es una realidad en la Universidad de Huelva, ha sido fruto de aunar conocimientos de mecánica, informática y electrónica por parte del nuevo doctor, con el objetivo de servir como multiplataforma para implementar hardware diverso y probar distintos sistemas. Independientemente de sus aplicaciones científicas e industriales, la posibilidad de usar VANTER, junto con su brazo robótico Lynx6, como plataforma para uso docente y la posibilidad de controlarlo como vehículo móvil a través de Internet, lo han hecho aún más atractivo al poder ser considerado como parte del proyecto educativo en la referida Universidad de Huelva. Estamos seguros de que VANTER será igualmente bien acogido por otras universidades del territorio español y porqué no, de otras más allá de nuestras fronteras.

Animo pues a los lectores que han tenido a bien leer este prólogo, que no duden en leer el resto de esta obra, que con el esmero y meticulosidad que le caracteriza, ha preparado el Dr. Mateo Sanguino. Reiterando mi enhorabuena a él y a su director, el Prof. Andújar Márquez, lo firmo en Málaga, en el día de la Victoria (Patrona de Málaga), a 8 de septiembre de 2010.

Dr. Alberto Javier CASTRO TIRADO
(Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Granada)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Contenidos	XIII
Índice de Figuras	XVII
Índice de Tablas	XXI
Capítulo 1	1
1.1.Resumen de la Tesis	3
1.2.Innovaciones que Aporta la Tesis.....	5
1.3.Rendimiento Científico de la Tesis	8
Capítulo 2	13
2.1. Breve Historia de la Automática	14
2.2. Aparición de la Robótica Moderna	24
2.3. Aplicaciones Avanzadas de la Robótica	29
2.4. Origen de los Laboratorios Remotos	35
2.5. Aparición de los Laboratorios Virtuales de Uso Docente	39
2.6. Retos Actuales de los Laboratorios Remotos y Virtuales	47
2.7. Antecedentes de la Tesis	54
2.8. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos	56
Referencias Bibliográficas	59
Capítulo 3	65
3.1. Vehículos Robóticos Educacionales.....	66
3.2. Vehículo Robótico VANTER.....	68
3.2.1. Elementos Mecánicos y Electrónicos	70
3.2.2. Diseño de la Red de Microcontroladores.....	74
3.2.3. Comunicación Inalámbrica	79
3.3. Instrumento Virtual del Sistema de Navegación	81
3.4. Instrumento Virtual de la Microcámara Inalámbrica	85

3.5. Sistema de Adquisición de Imágenes y Visión	86
3.5.1. Sistema Robot-Cámara.....	86
3.5.2. Análisis del Sistema Desarrollado y Discusión	90
3.6. Propósitos Educativos.....	93
3.7. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos	94
Referencias Bibliográficas	96
Capítulo 4	99
4.1. Definición de Brazos Manipuladores	101
4.2. Primer Manipulador Mecánico Desarrollado	104
4.3. Brazo Lynx6	106
4.3.1. Modelo Cinemático Directo	106
4.3.2. Modelo Cinemático Inverso	111
4.3.3. Hardware de Control Remoto.....	113
4.3.4. Instrumento Virtual de Control Remoto.....	116
4.3.5. Integración de LabVIEW™ y EJS.....	119
4.4. Instrumento Virtual 3D-RAS.....	122
4.4.1. Subsistema 3D <i>Robotic Arm</i>	125
4.4.2. Espacio de Trabajo Articular 2D	125
4.4.3. Espacio de Trabajo Directo 3D	126
4.4.4. Espacio de Trabajo Inverso 3D	132
4.5. Experimentación	134
4.6. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos	139
Referencias Bibliográficas	141
Capítulo 5	145
5.1. Introducción.....	146
5.2. Trayectorias de Superficie	148
5.3. Trayectorias de Volumen.....	151
5.4. Experimentación	152
5.5. Validación Eduacional de 3D-RAS	159
5.6. Conclusiones, Comentarios Bibliográficos y Trabajos Futuros.....	162
Referencias Bibliográficas	164
Capítulo 6	165
6.1. Introducción a los Laboratorios Virtuales y Remotos.....	166
6.2. Definición de Laboratorios Remotos y Virtuales	168
6.3. Implicaciones Pedagógicas de los Laboratorios Virtuales	170
6.4. Pasos para el Diseño de un Laboratorio Virtual y/o Remoto	172
6.5. LER: Un Laboratorio Virtual y Remoto con Fines Educativos y de Investigación.....	175
6.6. Plataforma Robótica con Propósitos Educativos.....	177
6.7. Gestores de Reserva, Aprendizaje y Contenido	178
6.7.1. Infraestructura de Comunicaciones del Laboratorio	181

ÍNDICE DE CONTENIDOS

6.7.2. Ejemplo de Uso del LER.....	181
6.8. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos	184
Referencias Bibliográficas	186
Capítulo 7.....	189
7.1. Conclusiones de la Tesis.....	190
7.2. Repercusión de la Tesis.....	194
7.3. Desarrollos Futuros de la Tesis	190
Referencias Bibliográficas	198
Apéndice A	203
Apéndice B	207
Glosario de Términos	211

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Evolución del desarrollo de VANTER.....	2
Figura 1. 2. Evolución del Laboratorio de Ensayo de Robots.....	3
Figura 1. 3. Rendimiento científico de la Tesis.....	8
Figura 2. 1. Fragmento principal del mecanismo de Antikythera.....	16
Figura 2. 2. Odómetro de Herón.....	17
Figura 2. 3. Legajo conservado de Villard de Honnecourt.....	18
Figura 2. 4. Vehículo autónomo de Leonardo da Vinci.....	19
Figura 2. 5. Detalle central del reloj astronómico de Praga.....	20
Figura 2. 6. Pato autómata de Jacques de Vaucanson.....	21
Figura 2. 7. Manuscrito de la mano ortopédica de Ambroise Paré.....	21
Figura 2. 8. Modelo operativo del barco controlado por radio de Nikola Tesla.....	22
Figura 2. 9. Prototipo del Telekino sobre una barca.....	23
Figura 2. 10. Sistema maestro-esclavo de Raymond Goertz.....	25
Figura 2. 11. Brazo teleoperado empleado en RUWS.....	26
Figura 2. 12. Primer robot industrial Unimate.....	27
Figura 2. 13. Modelos PUMA 500 y ASEA IRb-6.....	28
Figura 2. 14. Manipulador Canadarm en el Centro Espacial Johnson en Houston.....	30
Figura 2. 15. Robot Da Vinci en la Policlínica de Guipúzcoa.....	31
Figura 2. 16. Rover Sojourner y comparación con los vehículos FIDO y Opportunity...	32
Figura 2. 17. Interfaces de usuario del vehículo Sojourner y Mars Pathfinder.....	33
Figura 2. 18. Brazos robóticos de Beagle-2 y del rover Opportunity.....	35
Figura 2. 19. Pruebas del rover ExoMars en un escenario artificial.....	36
Figura 2. 20. Monitorización de la cafetera del proyecto Trojan.....	36
Figura 2. 21. Interfaz de usuario del Proyecto Mercury.....	37

Figura 2. 22. Laboratorio remoto Telegarden.	38
Figura 2. 23. Vehículo autónomo Xavier.	39
Figura 2. 24. Ejemplo de instrumento virtual en la versión de LabVIEW™ 1.0 para Mac OS en 1.986.	40
Figura 2. 25. Laboratorio virtual Ciberlab.	41
Figura 2. 26. Recursos didácticos disponibles en la revista IJEE.	43
Figura 2. 27. Recursos didácticos disponibles en CEA.	44
Figura 2. 28. Entorno de experimentación docente de eMersion.	45
Figura 2. 29. Plataforma pedagógica de RobUALab.	47
Figura 2. 30. Instrumento virtual de un osciloscopio experimental.	48
Figura 2. 31. Panel frontal de LabVNC.	49
Figura 2. 32. Proceso de publicación web de AppletView™.	50
Figura 2. 33. Entorno de programación de EJS.	51
Figura 2. 34. Estructura de comunicación de LabVIEW™ y EJS.	51
Figura 2. 35. Estructura de comunicación de LabVIEW™ y AJAX.	52
Figura 2. 36. Interfaz del laboratorio virtual del sistema de dos tanques.	53
Figura 2. 37. IV del Proyecto BOOTES (1.998).	55
Figura 2. 38. IV remoto del Proyecto BOOTES (2.001).	55
Figura 2. 39. IV de monitorización web del Proyecto BOOTES (2002).	56
Figura 2. 40. IV de conexión GPRS del Proyecto BOOTES (2003).	56
Figura 2. 41. De la automática antigua a los laboratorios virtuales y remotos.	58
Figura 3. 1. Vehículo robótico VANTER.	69
Figura 3. 2. Combinaciones posibles de las posiciones de las ruedas de VANTER.	70
Figura 3. 3. Control de una rueda de VANTER.	73
Figura 3. 4. Arquitectura de la red de microcontroladores y flujo de datos.	75
Figura 3. 5. Paquete de instrucción.	77
Figura 3. 6. Paquetes de confirmación.	78
Figura 3. 7. Paquete de error.	78
Figura 3. 8. Paquete de la red I2C.	79
Figura 3. 9. Diagrama de bloques del módulo transceptor.	79
Figura 3. 10. Tiempos de envío y procesamiento de paquetes.	81
Figura 3. 11. IV del sistema de navegación de VANTER.	82
Figura 3. 12. SubIV del gamepad de control de los movimientos de VANTER.	83
Figura 3. 13. Diagrama de funcionamiento del IV.	84
Figura 3. 14. Entradas del menú del modo texto de usuario.	85
Figura 3. 15. IV de la microcámara inalámbrica.	86
Figura 3. 16. Sistema robot móvil/cámara.	87
Figura 3. 17. Paneles frontales de los IVs servidor y cliente.	88
Figura 3. 18. Diagrama de flujo de la comunicación Bluetooth.	89
Figura 3. 19. Ejemplo de distintas calidades de compresión de imagen.	90
Figura 3. 20. Gráficas comparativas de la calidad de la imagen.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1. Esquema general de los IVs descritos en el capítulo 4.....	100
Figura 4. 2. Configuraciones de manipuladores robóticos.....	103
Figura 4. 3. Detalles del brazo robótico cilíndrico.....	104
Figura 4. 4. Módulos hardware utilizados en el primer IV del brazo mecánico de VANTER.....	105
Figura 4. 5. Captura del panel de control de VANTER y del brazo mecánico.....	106
Figura 4. 6. Brazo educacional Lynx6.....	107
Figura 4. 7. Cadena cinemática del brazo Lynx6.	108
Figura 4. 8. Rango IK del manipulador Lynx6.	113
Figura 4. 9. Esquema del sistema de control remoto desarrollado para el brazo Lynx6.	113
Figura 4. 10. Tarjeta controladora de servomotores SD21.....	114
Figura 4. 11. Transceptores de datos CM02/400 y RF04.	115
Figura 4. 12. Vista de la programación gráfica del IV.....	117
Figura 4. 13. Panel frontal del modelo 3D de Lynx6.....	118
Figura 4. 14. Paquete de instrucción.....	118
Figura 4. 15. Panel frontal de control remoto de Lynx6.....	119
Figura 4. 16. Diagrama de comunicación en Internet de Lynx6.....	120
Figura 4. 17. Interfaz de EJS desarrollado para Lynx6.	120
Figura 4. 18. Panel de conexión de JIL Server con Lynx6.	122
Figura 4. 19. IV de la interfaz del subsistema 3D Robotic Arm.	125
Figura 4. 20. Representación gráfica de modelos de brazos robóticos con diferentes DOF.	126
Figura 4. 21. IV de la interfaz del espacio de trabajo articular 2D.	127
Figura 4. 22. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del espacio de trabajo directo.....	128
Figura 4. 23. Implementación del algoritmo del espacio de trabajo directo.....	129
Figura 4. 24. Espacios de trabajo directo de diferentes brazos antropomórficos.	130
Figura 4. 25. Interfaz simulando un ejemplo de espacio de trabajo directo.	131
Figura 4. 26. Diagrama de flujo del algoritmo del espacio de trabajo inverso.	133
Figura 4. 27. Implementación del algoritmo del espacio de trabajo inverso.....	134
Figura 4. 28. Parte del interfaz gráfico del espacio de trabajo inverso.....	135
Figura 4. 29. Perspectiva ortogonal y lateral de una revolución de Lynx6.	135
Figura 4. 30. Coste computacional del algoritmo del espacio de trabajo directo.	137
Figura 4. 31. Espacios de trabajo articulares ejemplificados para el brazo Lynx6.	138
Figura 5. 1. Esquema general de los IVs descritos en el Capítulo 5.	146
Figura 5. 2. Diagrama UML del algoritmo de planificación de trayectorias.....	149
Figura 5. 3. Instrumento virtual representando una trayectoria de superficie.	150
Figura 5. 4. Representación de la trayectoria de un paraboloide hiperbólico.....	152
Figura 5. 5. Superficie definida y extracción de trayectorias curvilíneas.	153
Figura 5. 6. Ejemplos de superficies paramétricas.	155

Figura 5. 7. Ejemplos de trayectorias volumétricas.	157
Figura 5. 8. Trayectoria resultante de la intersección de dos tuberías.	158
Figura 5. 9. Evaluación global del instrumento virtual 3D-RAS.	161
Figura 5. 10. Comparativa de la evaluación del alumnado sobre 3D-RAS.	161
Figura 6. 1. Diagrama de diseño de un laboratorio virtual.	173
Figura 6. 2. Estudiantes de la UHU realizando en grupo el montaje de la plataforma robótica VANTER.	175
Figura 6. 3. Prototipo de vehículos VANTER-1 (izda.) y VANTER-2 (dcha.).	176
Figura 6. 4. Web de acceso al sistema de gestión del aprendizaje de la asignatura de Robótica.	178
Figura 6. 5. Web de acceso a la plataforma de gestión de contenidos del Laboratorio de LER.	179
Figura 6. 6. Estructura del sistema de reservas de LER.	179
Figura 6. 7. Web de acceso al sistema de reservas de LER.	180
Figura 6. 8. Paneles de administración y edición de reservas de LER.	180
Figura 6. 9. Paneles de informes y reservas de LER.	181
Figura 6. 10. Arquitectura de comunicaciones de LER en la UHU.	182
Figura 6. 11. Actuación y funcionamiento del Laboratorio de Ensayo de Robots de la UHU.	183
Figura 6. 12. Estructura de la ventana de reservas del LER.	184
Figura 7. 1. Datos demográficos de la audiencia del video de VANTER.	195
Figura 7. 2. Atención de la audiencia del video de VANTER.	196
Figura 7. 3. Atención de la audiencia del video del primer manipulador mecánico....	196
Figura 7. 4. Porcentaje del total de reproducciones de los videos de 3D-RAS.	197
Figura 7. 5. Reproducciones totales de los videos de 3D-RAS.	197
Figura 7. 6. Porcentaje del total de búsquedas de los videos de 3D-RAS.	198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Principales características de algunos vehículos robóticos educacionales..	68
Tabla 3. 2. Especificaciones de los motores de tracción.	71
Tabla 3. 3. Especificaciones de los integrados LMD18200 y L293B.	72
Tabla 3. 4. Especificaciones de los reguladores de 5 V y 9 V.....	74
Tabla 3. 5. Descripción del paquete de instrucción.	77
Tabla 3. 6. Especificaciones del módulo UHF.	80
Tabla 3. 7. Especificaciones de la microcámara inalámbrica.	85
Tabla 4. 1. Manipuladores instalados en el año 2003.....	103
Tabla 4. 2. Características mecánicas del brazo Lynx6.....	107
Tabla 4. 3. Parámetros físicos de Lynx6 usados en el modelo D-H.	109
Tabla 4. 4. Descripción del paquete de instrucción.	118
Tabla 4. 5. Principales propiedades de algunas herramientas de simulación.	124
Tabla 4. 6. Principales capacidades de algunas herramientas de simulación.....	124
Tabla 4. 7. Parámetros del espacio de trabajo de diferentes manipuladores.	130
Tabla 4. 8. Rango de valores y límites articulares del brazo Lynx6.....	138
Tabla 5. 1. Características principales de herramientas de planificación de trayectorias.	148
Tabla 5. 2. Ejemplos de planificación de trayectorias de superficie.	154
Tabla 5. 3. Tiempos de simulación de trayectorias de volumen.	158
Tabla 5. 4. Cuestionario de evaluación del instrumento virtual 3D-RAS.	160
Tabla 6. 1. Características de los laboratorios.....	171
Tabla 6. 2. Capacidades de los laboratorios.	171

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA TESIS

Un proyecto de tal magnitud como esta Tesis Doctoral, es fruto de arduos años de investigación y desarrollo, como no podría ser de otra forma, junto a un grupo de personas altamente cualificado. Ya en los agradecimientos previos a estas líneas se ha hecho mención expresa a todas aquellas personas e Instituciones que han contribuido a la culminación de este trabajo de investigación.

A partir de la concepción de la idea original, la cual discutió y acordó con su Director el autor de esta Tesis, se formó en el año 2.005 un equipo de trabajo multidisciplinar con formación en mecánica, informática y electrónica. La idea primigenia fue la de construir VANTER, acrónimo de Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento (ver Fig. 1.1). Este prototipo robótico sirvió de multiplataforma con la idea de desarrollar hardware y probar distintos sistemas. Entre los primeros resultados alcanzados en esta Tesis se encuentran la implementación de un protocolo sobre distintos sistemas de comunicación inalámbrica (2.006), el desarrollo de un instrumento virtual de control de un brazo manipulador mecánico (2.006) y la adquisición de imágenes para tareas de visión artificial (2.007).

De forma paralela, como eje central en torno a la investigación de esta Tesis, se llevaron a cabo varios desarrollos derivados del conocimiento adquirido con el diseño del primer prototipo de manipulador mecánico realizado, entre otros la implementación de un instrumento virtual de control teleoperado de un manipulador Lynx6 (2.007). El estudio del modelo cinemático de este brazo robótico (2.008), llevó

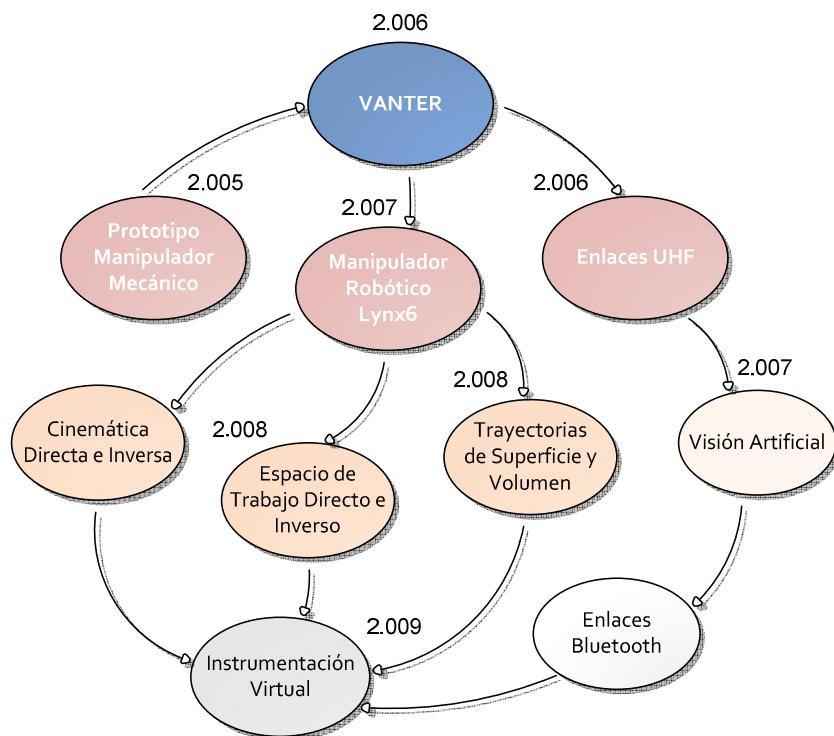


Figura 1. 1. Evolución del desarrollo de VANTER.

posteriormente al desarrollo de un instrumento virtual educacional denominado *3D Robotic Arm Simulator* (3D-RAS).

La evolución de VANTER y el desarrollo de las distintas implementaciones sobre la plataforma robótica adquirieron tal auge que, enseguida, numerosos alumnos comenzaron a formarse de forma continuada mediante TAD y PFC. Pronto, se concibió VANTER como un prototipo ideal para su uso docente y surgió la idea de expandir sus fronteras mediante el uso del vehículo móvil a través de Internet (2.009). A partir de aquí nació de forma natural el Laboratorio de Ensayo de Robots (LER), con el propósito de crear un entorno virtual en el que tanto profesores como alumnos pudieran manejar de forma remota los instrumentos virtuales. La idea cobró tal importancia que, en lugar de desarrollarse la Tesis únicamente sobre un prototipo robótico como inicialmente estaba pensado, ésta pasó a centrarse en el desarrollo de un laboratorio virtual y remoto. De esta forma, VANTER se convirtió en un elemento más del proyecto científico\educativo, cuyo valor añadido reside en la posibilidad de ensayar y probar sistemas robóticos de forma remota (ver Fig. 1. 2).

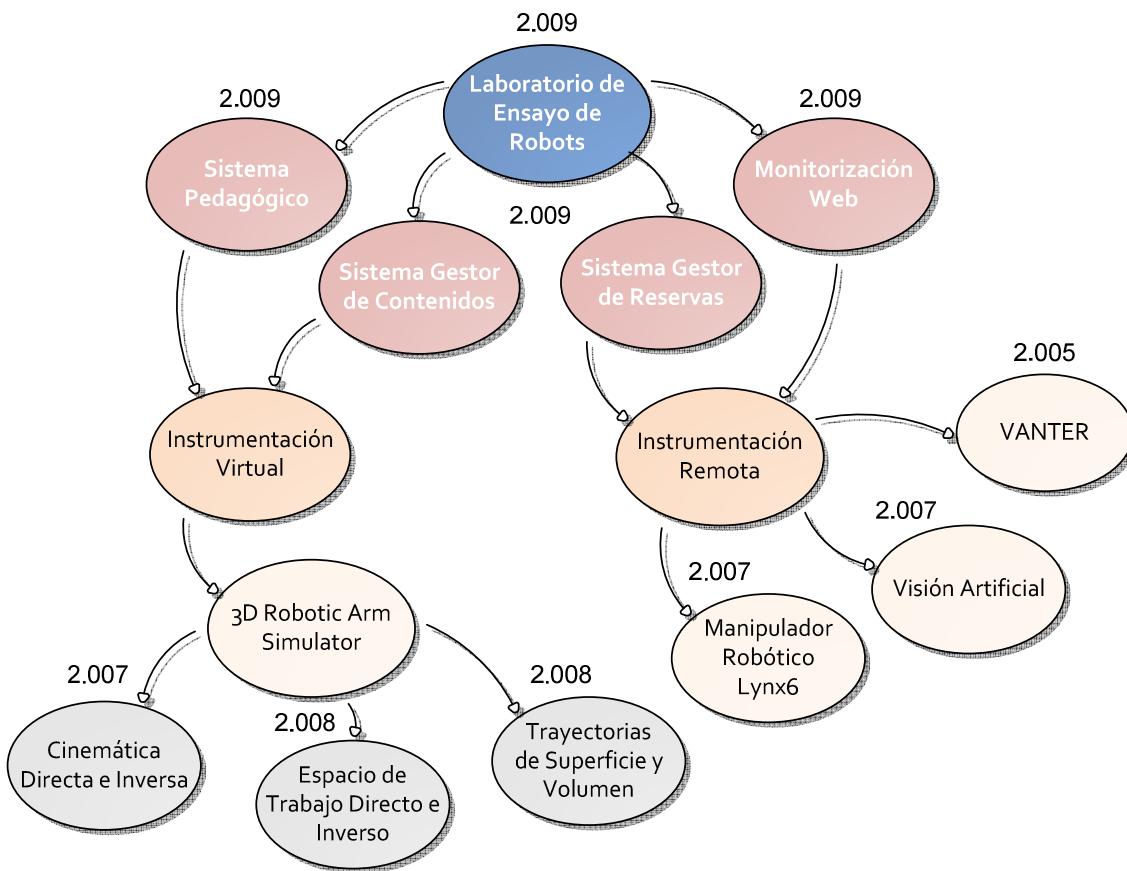


Figura 1. 2. Evolución del Laboratorio de Ensayo de Robots.

1.1. Resumen de la Tesis

Esta memoria está organizada en 7 capítulos, de acuerdo a la siguiente distribución: en el Capítulo 1, *Planteamiento General de la Tesis*, se explica la génesis y evolución de la Tesis desde la concepción en sus orígenes hasta la actualidad. Se realiza un resumen de su estructura, se describen cada uno de los capítulos que la forman incidiendo en las innovaciones que aporta la Tesis, y se realiza un análisis del rendimiento científico que hasta la fecha han producido las investigaciones realizadas.

En el Capítulo 2, *De la Automática Antigua a los Laboratorios Virtuales y Remotos*, se realiza una revisión de los orígenes de la Automática. Después de algunas breves reseñas históricas a modo de ejemplos notables, se explica la aparición de la Robótica moderna y algunos exponentes más avanzados de aplicaciones de la Robótica actual. A continuación, se analizan los motivos que llevaron a desarrollar los laboratorios remotos y se describe el uso de la instrumentación virtual y remota. En especial, este capítulo contiene una sección dedicada a los laboratorios virtuales de uso docente y los retos actuales que se plantean en este campo. Para finalizar, se

concluye con un apartado que explica la evolución de los desarrollos e investigaciones de esta Tesis.

Como uno de los pilares centrales en los que se apoya esta Tesis, el Capítulo 3, denominado *VANTER: Plataforma Robótica Móvil de Uso Educativo*, está dedicado a la descripción del vehículo robótico VANTER. Para ello, en primer lugar se incluye una sección de introducción dedicada a la clasificación de los vehículos robots y a explicar el concepto de vehículo robótico de exploración. El siguiente apartado está consagrado a la presentación de un trabajo preliminar dedicado al desarrollo de un instrumento virtual de adquisición de imágenes y visión por computador. Este trabajo llevó a la posterior construcción del vehículo robótico VANTER, cuyos instrumentos virtuales del sistema de navegación y de la microcámara inalámbrica se detallan en las secciones siguientes. Por último, este capítulo concluye con los hitos educativos alcanzados con el vehículo VANTER.

El Capítulo 4, *Instrumento Virtual para el Análisis Cinemático de Brazos Robóticos Antropomórficos*, representa una de las innovaciones y aportaciones que la Tesis realiza a la Robótica. Sus apartados están dedicados a describir parte de un instrumento virtual educacional denominado 3D-RAS. En ellos se desarrollan los modelos matemáticos de la cinemática directa e inversa utilizando un manipulador robótico de bajo coste a bordo del vehículo VANTER: el brazo robótico Lynx6, muy adecuado para propósitos educacionales. Entre las características y funciones que este IV aporta, se presentan los instrumentos virtuales y los algoritmos desarrollados para estudiar el espacio de trabajo directo 3D y el espacio de trabajo inverso 3D de brazos robóticos seriales. Por último, este capítulo finaliza con una sección dedicada a la experimentación y a reflejar sus principales capacidades.

En el Capítulo 5, *Instrumento Virtual para la Planificación de Trayectorias de Brazos Robóticos Antropomórficos*, se presentan los nuevos instrumentos virtuales incluidos en la aplicación educacional presentada en el capítulo anterior. Estos módulos se muestran en las secciones que describen los algoritmos de trayectorias de superficie y trayectorias de volumen que completan el instrumento virtual 3D-RAS. La sección de experimentación incluida ofrece abundantes ejemplos prácticos de planificación de trayectorias a través de la metodología expuesta en este capítulo. A continuación, se dedica una sección a la validación educacional de 3D-RAS, en la que se describe la innovación docente aplicada en asignaturas de *Robótica* y se analizan las experiencias educativas de profesores y alumnos a lo largo de dos cursos académicos. Finalmente, el capítulo concluye con la propuesta de trabajos futuros a realizar entorno a este instrumento educacional.

En el Capítulo 6, *Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico*, la sección de introducción incluye una puesta al día en el ámbito de los laboratorios docentes a distancia. Posteriormente se dedica una sección a explicar los pasos necesarios para el diseño de un laboratorio virtual y/o remoto. A continuación se presenta el LER: un laboratorio virtual con fines educativos y de investigación. Este capítulo termina con una sección muy ilustrativa denominada *Gestores de Reserva, Aprendizaje y Contenido*, la cual sirve para enfatizar —mediante una descripción de la infraestructura de comunicaciones y un ejemplo de uso de LER— que el desarrollo de un laboratorio virtual y remoto requiere de un gran esfuerzo y dedicación.

En el último capítulo, *Conclusiones y Desarrollos Futuros*, se presentan las conclusiones más relevantes de esta Tesis, se esbozan las líneas de investigación que han sido abiertas por la misma, y se proponen estrategias y actuaciones en este sentido. El capítulo incluye también una sección que pretende poner de manifiesto la repercusión de la Tesis, la cual ha sido objeto de seguimiento, desde sus inicios, por diferentes medios de comunicación. El uso de las nuevas tecnologías como apoyo a la docencia también ha sido incluido en este capítulo, mostrando los resultados más destacados. Finalmente, los desarrollos futuros cierran la memoria de esta Tesis.

1.2. Innovaciones que Aporta la Tesis

En el Capítulo 2, *De la Automática Antigua a los Laboratorios Virtuales y Remotos*, se realiza un estudio de un buen número de robots reales, instrumentos virtuales y recursos didácticos accesibles desde Internet. El apartado *Aparición de los Laboratorios Virtuales de Uso Docente* quizás sea una de las secciones más significativas de este capítulo. En él se pone de manifiesto que la disponibilidad de los laboratorios dista bastante de la realidad, obteniendo en algunos casos porcentajes muy bajos de accesibilidad. En dicho estudio puede llegarse además a la conclusión de que la disponibilidad es independiente del campo de investigación y docencia aplicadas, siendo tan diversos como la computación numérica, el control de sistemas, el análisis de circuitos, la visión por computador o la Robótica. El apartado *Retos Actuales de los Laboratorios Remotos y Virtuales* se define como otra de las aportaciones importantes de este capítulo. La revisión realizada de las tecnologías de programación utilizadas para publicar recursos didácticos en Internet, así como los ejemplos de uso aportados, sirven para argumentar las características y ventajas de las diferentes herramientas. Ello permite esbozar los retos actuales de las universidades que persiguen, de forma análoga, transformar los laboratorios físicos reales en recursos docentes virtuales de acceso *online*.

En el Capítulo 3, *VANTER: Plataforma Robótica Móvil de Uso Educacional*, se describe un vehículo robótico controlado de forma remota. La principal aportación de este capítulo ha sido la de servir como prototipo para la investigación en educación. El objetivo perseguido ha sido generar conocimiento y experiencia que sea de aplicación en la enseñanza práctica de conceptos complejos; entre ellos se incluyen la programación de dispositivos y sistemas, el diseño electrónico, la mecánica y las comunicaciones. Respecto al enfoque tecnológico de VANTER, se han obtenido otros hitos adicionales. Por un lado, la configuración mecánica basada en 4 ruedas independientes y el uso de un manipulador abordo le han conferido una maniobrabilidad y operación singulares; esto permite a VANTER diferenciar su diseño respecto de otros *rovers* con propósitos similares. Por otro lado, se han implementado diferentes instrumentos virtuales de navegación y adquisición de imágenes. Gracias a ello, se ha proporcionado la capacidad de manejar y transportar imágenes en tiempo real a través de una comunicación inalámbrica de banda ancha. En definitiva, en este capítulo se presenta a VANTER como una plataforma robótica aún en desarrollo, cuyo sentido docente permite que este instrumento sirva a alumnos de distintas especialidades de Ingeniería para realizar sus estudios.

En el Capítulo 4, *Instrumento Virtual para el Análisis Cinemático de Brazos Robóticos Antropomórficos*, se presenta el desarrollo de un instrumento virtual para simular la cinemática directa e inversa de brazos robóticos seriales de hasta 5 DOF. La sección de introducción contrasta el instrumento educacional propuesto con respecto a trabajos previos de otros autores. Por ello, esta sección compara críticamente los resultados obtenidos con los de otros investigadores. El IV está basado en una plataforma comercial muy probada y extendida (LabVIEWTM). Su interfaz gráfica provee los parámetros D-H y la geometría del robot como entradas del usuario, produciendo el espacio de trabajo en sistemas cartesianos y articulares. De esta forma, es posible el estudio del espacio de trabajo de manipuladores seriales de una forma gráfica. El algoritmo propuesto para el cálculo del espacio de trabajo directo reduce el coste computacional heurísticamente gracias a un factor que controla los intervalos articulares. El usuario puede visualizar si un espacio de trabajo inverso está dentro del rango deseable, considerando cada estado articular independientemente. Para los propósitos de control en tiempo real, el instrumento virtual dispone además de un módulo de control remoto para el brazo manipulador Lynx6. Sin embargo, el alcance de las soluciones y ejemplos implementados no está limitado a un único tipo de brazo manipulador. Por ello, se muestran diferentes configuraciones de brazos manipuladores (2 DOF, 3 DOF y 4 DOF). Ya que el objetivo es disponer de un instrumento virtual de enseñanza y aprendizaje para la cinemática de manipuladores serie, se dedica una sección a describir sus capacidades (flexibilidad, robustez,

portabilidad, etc.) y viabilidad en entornos de aprendizaje. En la última sección de este capítulo se ofrece el IV de forma gratuita, con objeto de que la comunidad científica y docente la pruebe y realice una revisión crítica que ayude a mejorarla.

En el Capítulo 5, *Instrumento Virtual para la Planificación de Trayectorias de Brazos Robóticos Antropomórficos*, se destacan los objetivos de forma concisa, realizando una introducción de los aspectos básicos y relacionados antes de ofrecer los detalles de su contribución. Los algoritmos IK propuestos son una contribución a la Robótica por su novedad y éstos son de aplicación para brazos robóticos seriales de hasta 5 DOF. A pesar de que la construcción de IVs no resulta ciertamente una novedad en sí mismo, la implementación de una herramienta gráfica aplicada a la cinemática de manipuladores resulta una interesante área de trabajo que contribuye positivamente a un mejor aprendizaje y enseñanza. En este capítulo se realiza además un análisis del entorno educacional y una discusión del impacto real en la educación en Ingeniería, atendiendo a las metodologías de enseñanza y aprendizaje.

En el Capítulo 6, *Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico*, la sección de introducción hace una revisión amplia del tema y realiza una puesta al día en el ámbito de los laboratorios virtuales y/o remotos, para lo cual se han incorporado abundantes referencias bibliográficas. Las definiciones que se incluyen sobre laboratorios virtuales y remotos, así como de sus elementos asociados, pueden servir para entender lo que esta Tesis quiere aportar con la investigación presentada. Ya que de alguna forma estos conceptos son más o menos conocidos, esta sección propone unas definiciones unificadas y contrasta sus significados con otros usados por diferentes investigadores. También, se ha realizado una puesta en valor del trabajo presentado en este capítulo, para lo cual se compara, mediante las Tablas 6.1 y 6.2 al final de la introducción, con otros laboratorios virtuales y/o remotos presentes en la literatura. Las secciones siguientes profundizan en la aportación fundamental de este capítulo, que es el laboratorio desarrollado en la Universidad de Huelva. El apartado 3, *Pasos para el Diseño de un Laboratorio Virtual y/o Remoto*, se erige en el núcleo del trabajo; en él se hace una descripción de su génesis y forma en la que se ha implementado. A continuación, se dedica un apartado a explicar, a modo de ejemplo, el funcionamiento y actuación del laboratorio desarrollado. Las Figuras 6.11 y 6.12 son posiblemente lo más informativo del capítulo, ya que reflejan la arquitectura necesaria para la realización del laboratorio virtual y remoto.

1.3. Rendimiento Científico de la Tesis

Esta sección está dedicada a enmarcar el rendimiento científico logrado durante el desarrollo de la Tesis, y a destacar los resultados de la investigación realizada desde la obtención en el año 2.003 del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Para ello, se detallarán las contribuciones en congresos y jornadas nacionales, internacionales y publicaciones en revistas (ver Fig. 1.3).

Dentro del rendimiento científico de la Tesis, se hará mención de los Proyectos de Innovación Docente (PID) del plan propio de la Universidad de Huelva que han permitido financiarla. Además, se destaca la labor de divulgación y captación del alumnado a través de la participación en talleres y jornadas de la *Semana de la Ciencia y la Tecnología*. Por último, en este apartado se recogen los resultados de transferencia de investigación, lo cual se refleja con la creación de una empresa de base tecnológica de tipo *spin-off*. En conclusión, el cometido principal de esta sección es mostrar que la memoria que se presenta constituye la recopilación ordenada de una producción científica realizada a lo largo de varios años.

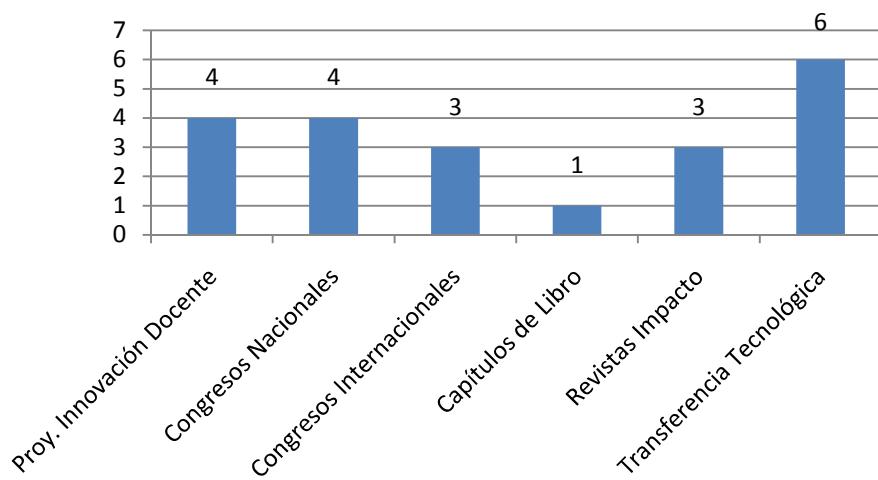


Figura 1. 3. Rendimiento científico de la Tesis.

- Proyectos de innovación docente que financian la Tesis:

Título del proyecto: *Enseñanza Virtual a Distancia Mediante un Laboratorio Remoto*

Entidad financiadora: Universidad de Huelva (ref. PIE0823)

Duración, desde: 01/03/2008 hasta 30/11/2008

Investigador Responsable: Tomás de J. Mateo Sanguino

Número de investigadores participantes: 4

Cuantía de la subvención: 1.000 €

Título del proyecto: *Sistema de Gestión del Aprendizaje Aplicado a Laboratorios Virtuales*

Entidad financiadora: Universidad de Huelva (ref. PIE095)

Duración, desde: 01/01/2009 hasta 30/11/2009

Investigador Responsable: Tomás de J. Mateo Sanguino

Número de investigadores participantes: 6

Cuantía de la subvención: 1.500 €

Título del proyecto: *Sistema Pedagógico Virtual para la Mejora de la Docencia*

Entidad financiadora: Universidad de Huelva (ref. PIE09018)

Duración, desde: 01/01/2009 hasta 30/11/2009

Investigador Responsable: Tomás de J. Mateo Sanguino

Número de investigadores participantes: 5

Cuantía de la subvención: 1.200 €

Título del proyecto: *Taller de Trabajo para una Competición de Aplicaciones de Robótica*

Entidad financiadora: Convergencia Europea (UHU)

Duración, desde: 17/04/2010 hasta 30/11/2010

Investigador Responsable: Tomás de J. Mateo Sanguino

Número de investigadores participantes: 3

Cuantía de la subvención: 2.850 €

- Producción científica del Capítulo 3, *VANTER: Plataforma Robótica Móvil de Uso Educatacional*:

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J. y Aguilar Nieto, F.J. "Virtual Interface For Controlling A Remote-Handle Rover", *Proceedings IADAT-aci2005*, Ed. IADAT, págs. 224-228, 2005

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J. y Aguilar Nieto, F.J. "Control de un Vehículo Robótico Dotado de Brazo Manipulador Mediante una Interfaz Virtual de Usuario", *Contribuciones de las XXVI Jornadas de Automática*, págs. 743-748, 2005

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J. y Chica Barrera, J.J., “Plataforma Robótica Controlada de Forma Remota Mediante una Red I2C de Microcontroladores”, *Contribuciones de las XXVII Jornadas de Automática*, págs. 511-516, 2006

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J., Chica Barrera, J.J. y otros. “An Image Acquiring, Processing and Transfer System over Bluetooth for an Educational Robotic Platform”, *Robótica 2007 - 7th Conference on Mobile Robots and Competitions*, CD Conference Proceedings, págs. 1-6, 2007

Mateo Sanguino, T.J. “Laboratorio Virtual en Estudios de Ingeniería”, *III Jornadas de Innovación de la UHU “Impacto de la Innovación Docente”*, en prensa, 2008

- Producción científica del Capítulo 4, *Instrumento Virtual para el Análisis Cinemático de Brazos Robóticos Antropomórficos*:

Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J., Chica Barrera, J.J., y Andújar Márquez, J.M. “Desarrollo de un Instrumento Virtual para el Control Remoto de un Brazo Manipulador de Uso Educativo”, *Contribuciones de las XXIX Jornadas de Automática*. Vol. 292, págs. 1-8, 2008

Mateo Sanguino, T.J., Andújar Márquez, J.M., D.A. López García y J. Carpio Cañada, “Desarrollo de un Instrumento Virtual para el Control Remoto de un Brazo Manipulador de Uso Educativo”, *Prácticas de Innovación para la Mejora de la Docencia Universitaria*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva, 2009

Mateo Sanguino, T.J. y Andújar Márquez, J.M. “Simulation Tool for Teaching and Learning 3D Kinematics Workspaces of Serial Robotic Arms with up to 5-DOF”, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI 10.1002/cae.20433, 2010

- Producción científica del Capítulo 5, *Instrumento Virtual para la Planificación de Trayectorias de Brazos Robóticos Antropomórficos*:

Mateo Sanguino, T.J. y Andújar Márquez, J.M. “Virtual Laboratory for Trajectories Planning Applied to Anthropomorphic Robotic Arms with up To 5-DOF”, *The 15th IASTED International Conference on Robotics and Applications (RA 2010)*, en prensa, 2010

Mateo Sanguino, T.J y Andújar Márquez, J.M. "3D-RAS: A New Educational Simulation Tool for Kinematics Analysis of Anthropomorphic Robotic Arms", *International Journal of Engineering Education*, en revisión, 2010

- Producción científica del Capítulo 6, *Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico:*

Andújar Márquez, J.M. y Mateo Sanguino, T.J. "Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 7:(1), págs. 64-72, 2010

- Transferencia de Tecnología:

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J. y Aguilar Nieto, F.J. "VANTER: Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento", *Semana de la Ciencia y la Tecnología*, 2005

Andújar Márquez, J.M., Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J. y Chica Barrera, J.J. "Red de Microcontroladores para el Control Remoto de Robots", *Semana de la Ciencia y la Tecnología*, 2006

Mateo Sanguino, T.J., Aguilar Nieto, F.J., Chica Barrera, J.J., Andújar Márquez, J.M., y otros. "Desarrollo de un Instrumento Virtual para el Control Remoto de un Brazo Manipulador de Uso Educativo", *Semana de la Ciencia y la Tecnología*, 2008

Creación de la empresa de base tecnológica de tipo Spin-off denominada "OnuRobotics, S.A." Universidad de Huelva, 2008

Premio CICE: otorgado por la Consejería de Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía con una dotación de 3.000 € y matrícula en el plan de formación de Creara (Empresas 50 K, importe de 2.000 €), 2008

Mateo Sanguino, T.J. y Smolcic-Rodríguez, M. "Taller de Divulgación Científica", Grupo de Control y Robótica TEP-192, Investigador responsable: Andújar Márquez, J.M., *Semana de la Ciencia y la Tecnología*, 2009

CAPÍTULO 2. DE LA AUTOMÁTICA ANTIGUA A LOS LABORATORIOS VIRTUALES Y REMOTOS

En este capítulo se realiza un breve recorrido desde la automática antigua hasta el estado actual del arte de los laboratorios virtuales y remotos, haciendo especial hincapié en el interés docente de la Robótica y los aspectos de su integración en la enseñanza. El desarrollo de nuevos protocolos y lenguajes de programación, junto con el objetivo de hacer llegar los sistemas robóticos a un mayor número de estudiantes, ha generado que las universidades hagan suya la necesidad de extender las capacidades remotas de los instrumentos. La bibliografía recogida en este capítulo constata la aparición de numerosos laboratorios docentes a distancia. Sin embargo, la mayoría de estas iniciativas surgieron inicialmente de una forma aislada. El resultado ha sido que la puesta en marcha de los laboratorios virtuales y/o remotos ha sido un proceso tan dinámico como lo ha sido el uso de las tecnologías emergentes subyacentes. Como consecuencia, existen algunos interrogantes a contestar. ¿Cuál es la disponibilidad real de los laboratorios remotos hoy en día? ¿Cuáles son los retos actuales y las técnicas utilizadas para desarrollarlos? La aparición de experiencias docentes interuniversitarias y el consorcio de grupos de investigación internacionales suponen la solución que ha venido a coordinar y garantizar una cierta normalización, o al menos pautas comunes a seguir, en los laboratorios de uso educacional.

Este capítulo está estructurado en varias secciones. En la primera de ellas se realiza una revisión histórica de la Automática surgida durante la antigüedad. En ella se recogen fechas y nombres de personajes célebres que intervinieron en la fabricación de brillantes máquinas adelantadas a su época. Una vez más la historia enseña que

dispositivos, aparentemente construídos hoy en día, pertenecen a invenciones apoyadas en ideas que surgieron hace cientos o incluso miles de años.

La segunda sección ofrece una definición del término de robótica. En ella se describe su aparición y se establecen las bases de los posteriores sistemas manipuladores y robots móviles, fijando su concepto hasta la actualidad. La siguiente sección describe los avances de la Robótica entre los siglos XX y XXI mediante muestras de su aplicación en los ámbitos militar, espacial y médico. La sección que continúa describe cronológicamente la aparición de los laboratorios remotos, destacando los motivos de su origen y su relación con la necesidad de disponer de telepresencia en escenarios distantes. Paralelamente, la llegada de los ordenadores personales propició el desarrollo de la instrumentación virtual y remota.

En el siguiente apartado, la implementación de laboratorios basados en web y su aplicación en entornos pedagógicos universitarios permite obtener una visión actual de los laboratorios virtuales y/o remotos de uso docente. En el apartado que continúa se destacan las tendencias a seguir y las últimas técnicas que comienzan a usarse ahora en el desarrollo de laboratorios basados en Internet. En ellas se proporcionan métodos para reducir el ancho de banda y perfeccionar los sistemas finales, con el objetivo de propiciar ideas que mejoren la interactividad con los usuarios. Finalmente, se explican los motivos por los que se optó por el desarrollo de instrumentos virtuales en esta Tesis y la trayectoria seguida con ellos.

2.1. Breve Historia de la Automática

La fabricación de máquinas ha fascinado al hombre desde hace más de 4.000 años y el mundo de los autómatas es tan amplio como su definición. Etimológicamente el término autómata proviene del latín *automāta* y éste del griego *automatos*, que significa espontáneo o con movimiento propio. Las primeras referencias de construcción de autómatas se encuentran en la descripción de los antiguos ritos y ceremonias religiosas, donde los sacerdotes utilizaban estatuas de divinidades dotadas de componentes móviles con la intención de atemorizar a los creyentes. Como ejemplo de las culturas babilónicas y egipcias la estatua dedicada a la diosa *Ishtar* del amor y la guerra disponía de brazos articulados, la de *Anubis* tenía la mandíbula móvil, mientras que la estatua de *Isis* expulsaba fuego por los ojos. En el año 1.500 a.C. se construyeron los *colosos de Memnón*, dos estatuas que representaban al faraón *Amenofis III*, rey de Etiopía, que tenían las características de emitir a la salida del sol lúgubres sonidos similares a los susurros humanos. Esto fue posible gracias al excelente conocimiento que los sabios de la época tenían sobre las leyes de la física;

para producir sonidos hacían pasar vapores de agua a través de pequeños orificios en las estatuas [Moñux Chéroles, 2001].

El filósofo griego *Aristóteles* (384-322 a.C.) hablaba de una consistente estatua, representativa de la diosa *Venus*, que incluso caminaba y gesticulaba a merced de la animación proporcionada por la circulación del mercurio en su interior y por las variaciones de temperatura. El terrible autómata *Talos*, descrito en la mitología de *Jasón y los Argonautas*, era narrado como un gigante de bronce encargado de la guardia de Creta, capaz de arrojar enormes rocas en todas las direcciones y triturar entre sus brazos a los asaltantes de las flotas enemigas. Por su parte *Homero*, el poeta griego del s. VIII a.C., nos habla en la *Iliada* de unas jóvenes de bronce, similares a las humanas, construidas por los dioses para servir la bebida en los banquetes.

Existen referencias a *King-su Tse* en el año 500 a.C., quien inventó en la China Clásica autómatas en forma de un caballo que podía saltar y una urraca voladora con madera de bambú. Quizás uno de los hitos más notables se da en el siglo V a.C. cuando, según la historia, se construyó entre el 400 a.C. y el 300 a.C. el primer autómata hecho por *Arquitas de Tarento*¹. Éste, con la intención de demostrar algunas propiedades físicas y geométricas, construyó un autómata de madera, con forma de paloma, que giraba por sí sola impulsada por un surtidor de agua a vapor. Arquitas de Tarento fue considerado el padre de la Ingeniería mecánica y uno de los maestros clásicos occidentales por su invención del tornillo y la polea. En el año 206 a.C., durante el reinado del primer emperador de la dinastía china *Han*, fue encontrado el tesoro de *Chin Shih Huang Ti* consistente en una orquesta mecánica de muñecos que se movían de forma independiente. Hacia el año 200 a.C., *Filón de Bizancio*, escritor griego sobre la mecánica e inventor de la catapulta repetitiva, construyó un autómata acuático.

Hay casos en la Edad Antigua que sorprenden desde entonces, como es por ejemplo la máquina de *Antikythera* (ver Fig. 2.1²), catalogada como un *OoPArt*³. Descubierta en 1.902 en la isla griega de nombre homónimo (aunque se data entre el 150 a.C. y 100 a.C.) viajaba abordo de una galera romana, procedente de Pérgamo con destino a Roma, que naufragó en el mar Egeo con un botín de guerra abordo. El

¹ Referenciado en inglés como Archytas of Tarentum y en algunas referencias españolas como Architas de Tarento.

² Fuente: *The Antikythera Research Project*, disponible en <http://www.antikythera-mechanism.gr/>

³ Acrónimo acuñado del inglés por el zoólogo americano *Ivan T. Sanderson* como artefacto fuera de lugar. Este término hace referencia a objetos que en apariencia se han encontrado en lugares donde se creía imposible su presencia, debido a sus características (complejidad tecnológica, referencias a la civilización actual, etc.) o porque no haya objetos similares de la misma procedencia. Actualmente hay más de 4.000 *OoPArt* tangibles catalogados en el mundo.

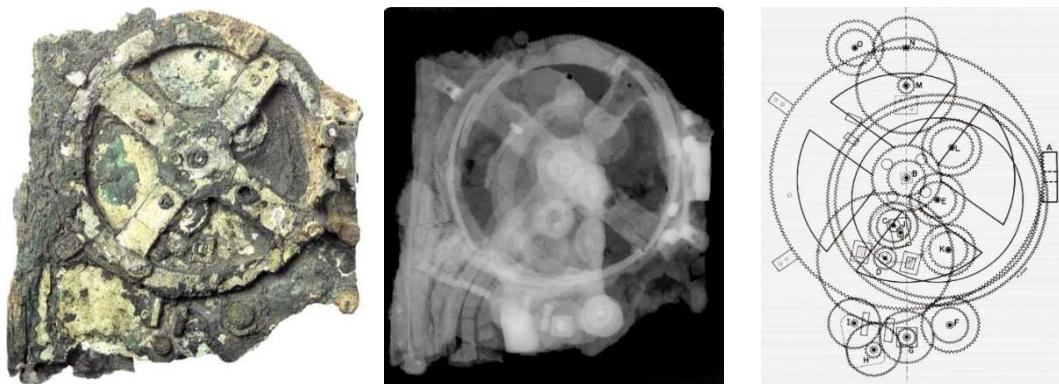


Figura 2. 1. Fragmento principal del mecanismo de Antikythera.

hallazgo arqueológico pasó increíblemente desapercibido varias décadas descansando en el museo arqueológico de Atenas, hasta que en los años sesenta el historiador inglés *Derek Price*, reveló que el fragmento compuesto por 82 piezas era un ordenador mecánico con el que se calculaba la posición de los cuerpos celestes, entre ellos el Sol y la Luna. Estudios mediante Rayos-X revelaron que la máquina disponía de unos mecanismos y engranajes diferenciales. Su función era representar los movimientos celestes según los modelos astronómicos de *Apolonio de Perge* y de *Hiparco*. Entre sus características destaca un troquel de una sola y única placa de bronce de 2 mm de espesor, una rueda central con un borde dentado de 1,3 mm de relieve en cada diente, engranajes modelados en ángulos de 180° que permitían insertar unas ruedas dentro de otras, y mecanismos de diales complejos que permitían generar unos elementos de precisión con desviaciones tan sólo de una décima de milímetro [Cebrián, y otros, 2001].

En el año 62 d.C., *Herón de Alejandría*, uno de los pioneros en construir autómatas, escribió el famoso tratado *Autómatas* que versaba sobre aplicaciones de la ciencia que podían ser demostradas por medio de mecanismos autónomos. Herón de Alejandría inventó puertas que se abrían solas a distancia, así como su teatro automático, en el cual las figuras que se encontraban montadas en una caja (pájaros cantores, trompetas que sonaban y animales que bebían, entre otros), cambiaban de posición ante los ojos de los espectadores. Suyos son también las invenciones de medidores de la fuerza del vapor, termoscopios, odómetros (ver Fig. 2.2) y máquinas que operaban con monedas [Barocio, 1572].

Con la escuela de los alejandrinos aparecen los primeros tratados técnicos sobre autómatas. Tales descubrimientos fueron recopilados y las construcciones se extendieron por todo el Imperio Romano y, posteriormente, por el mundo árabe.



Figura 2. 2. Odómetro de Herón.

Otras figuras como *Ctesibio* (300-270 a.C.), *Hsieh-Fec* (335 d.C.), *Huang Kun* (700 d.C.), *Yang Wu-Lien* (770 d.C.), el *príncipe Kaya* (840 d.C.) —hijo de *Kammu*, emperador de Japón—, *Han Chih Ho* (890 d.C.), el príncipe indio *Bhoja* (1.050 d.C.), *Roger Bacon* (1.214-1.294 d.C.) o *Juanelo Turriano* construyeron autómatas durante la Edad Media [Sánchez-Martín, y otros, 2007]. En el siglo XIII, *Al-Djazari* (1.135-1.206 d.C.) quien inventó el cigüeñal, apareció como el heredero de los antiguos diseñadores de autómatas con la publicación de su *Libro del Conocimiento de los Procedimientos Mecánicos*. Esta obra, considerada una de las más notorias sobre la historia de la tecnología describía, entre otros inventos, una fuente automática de distribución de agua.

En los siglos venideros se produjo un oscurantismo debido a que el conocimiento científico estaba reservado a ámbitos muy limitados. Fundamentalmente en los sitios religiosos, como los monasterios o conventos, descansaban las mayores bibliotecas de la época donde residían las fuentes del saber y del conocimiento. Como paradoja, aquellos frailes que se dedicaban a hacer experimentos físicos quedaban excomulgados. En el año 1.163, el Papa *Alejandro III* proclamó un decreto prohibiendo a los monjes trabajar en el campo de las Ciencias Físicas y Naturales bajo pena de excomunión. Se cuenta como leyenda que el teólogo y filósofo *Santo Tomás de Aquino* (1.225-1.274) mandó destruir un mecanismo construido por su maestro *San Alberto Magno* (1.204-1.272), el primer robot móvil citado en la historia medieval moderna. Este robot, que era capaz incluso de responder y articular palabras, podía generar un árbol de valores y decisión con una lógica muy avanzada mediante un sistema de ejes y mecanismo de signos parecidos a las tarjetas

perforadas de los años 50. Se dice que Santo Tomás de Aquino, a pesar de tener un gran aprecio a su maestro y a los instrumentos tecnológicos que construyó, destruyó el robot para que el proceso, primero de beatificación y luego de santificación de San Alberto Magno, no quedara rechazado por herejía. Asimismo, algunas obras mecánicas complejas fueron también declaradas heréticas después del Concilio de Trento (1.545-1.563).

En el año 1.235, el arquitecto y maestro itinerante *Villard de Honnecourt*, constructor de la *rueda perpetua*, escribió un manuscrito de 66 páginas llamado *Livre de Portraiture* con bocetos que incluían ilustraciones de distintos sistemas, entre ellos, dispositivos mecánicos antropomórficos aplicados en catapultas (ver Fig. 2.3).

A finales de la Edad Media y durante el comienzo del Renacimiento de Europa Occidental, se produjo una gran explosión de creatividad y fabricación de autómatas que tuvo su apogeo en los siglos XVI y XVII. Comparada con la época romana, en la Edad Media se produjeron más progresos y descubrimientos científicos que, aunque prácticamente olvidados, han quedado constatados. Por ejemplo, la rueda hidráulica, gran desconocida para los romanos, se desarrolló en el medievo casi en todas sus posibilidades mecánicas y se encontraron infinitos campos de aplicación práctica, como en el arte del hilado y los relojes de precisión. Ya en 1.429, aparecieron los primeros tratados técnicos de *Fontana* sobre la fabricación de autómatas. A estos le siguieron *De vmachinis* de *Mariani* y en 1.472 la obra de *Venturio Garini*, quien realiza el primer tratado general sobre la utilización de autómatas en conflictos militares.



Figura 2. 3. Legajo conservado de Villard de Honnecourt.

[Cebrián, y otros, 2003].

También se tiene constancia de la construcción de varios autómatas y robots por parte de *Leonardo da Vinci* a finales del s. XV. El folio 812r del *Codex Atlanticus* de Leonardo representaba en un boceto un vehículo triciclo, dotado de resortes en su parte superior para realizar la función de los amortiguadores. El Museo de Historia de la Ciencia en Florencia mandó construir, a los ingenieros *Carlo Pedretti* y *Mark Rosheim*, tres modelos a escala que muestran el complejo mecanismo de espirales ideado por Leonardo (ver Fig. 2.4⁴). Éste utilizaba el mismo sistema de los viejos juguetes antes de la llegada de las pilas, lo que le permitía andar unos metros. Según declaraciones del doctor *Paolo Galluzzi*, director del museo, *Fue el primer vehículo autónomo del mundo*.

Los relojes pueden considerarse como las máquinas antiguas más perfectas y cercanas al concepto de automatismo. Es frecuente hallar relojes que incluyen figuras móviles que se mueven con el paso de las horas. El reloj astronómico de Praga, construido en 1.410 (ver Fig. 2.5) y el reloj animado de la Catedral de Múnich son buenos ejemplos. Otro ejemplo relevante de la época fue el *gallo de Estrasburgo* que funcionó desde 1.352 hasta 1.789. Este es el autómata más antiguo que se conserva en la actualidad, formaba parte del reloj de la Catedral de Estrasburgo y al dar las horas



Figura 2. 4. Vehículo autónomo de Leonardo da Vinci.

⁴ Derechos registrados por Leonardo3, disponible en www.leonardo3.net.



Figura 2. 5. Detalle central del reloj astronómico de Praga.

movía el pico y las alas. En nuestro país, el *Papamoscas* de la Catedral de Burgos, construido en el siglo XVI y en funcionamiento hoy en día, consiste en un hombre mecánico que se mueve con los cambios horarios.

En 1.533 *Johann Müller Königsberg*, un prolífico astrónomo y matemático alemán apodado como *Regiomontanus*, construyó en Nüremberg varios pájaros voladores de metal y madera. Una década después, *John Dee*, notorio matemático, astrónomo, astrólogo y geógrafo inglés que también fue ayudante de la reina Isabel I, presentó en Inglaterra un escarabajo de madera capaz de levantar el vuelo. *Jacques de Vaucanson*, ingeniero e inventor francés, construyó en 1.738 un flautista y un tamborilero. El primero consistía en un complejo mecanismo de aire que causaba el movimiento normal de dedos y labios al hacer sonar una flauta. Su invento más conocido es el *pato autómata*, un mecanismo hecho de cobre y formado por más de 400 piezas móviles, con capacidad para graznar, beber, comer y digerir la comida como un pato real (ver Fig. 2.6). El extraordinario artilugio tuvo un trágico destino y acabó quemado en un museo de Nijnnovgorod en Rusia hacia 1.879. Una réplica del robot realizada por *Frédéric Vidoni*, se exhibe actualmente en el museo de autómatas de Grenoble.

La mayoría de los autómatas vistos hasta ahora solamente servían para entretenir a propios y extraños, sin una aplicación práctica en ningún área específica. Estas máquinas funcionaban generalmente por medio de movimientos ascendentes de aire o agua caliente donde el vertido progresivo de un líquido, o bien la caída de un

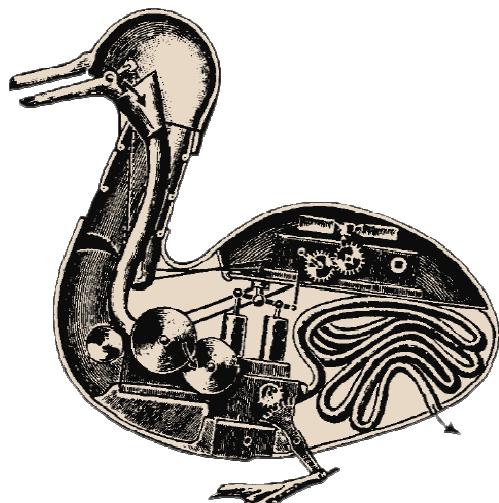


Figura 2. 6. Pato autómata de Jacques de Vaucanson.

peso, provocaba cambios de equilibrio en diversos recipientes provistos de válvulas. Sin embargo, con otros fines como la construcción de miembros artificiales, *Ambroise Paré* (1.510-1.590), un cirujano francés considerado el padre de la cirugía moderna, desarrolló modelos de complejidad sorprendente (ver Fig. 2.7). Posteriormente, el suizo *Pierre Jaquet-Droz* (1.721-1.790), se especializó en la fabricación de prótesis para sustituir miembros amputados, consiguiendo no sólo cubrir el aspecto estético sino desarrollar un alto grado de funcionalidad para los brazos y piernas construidos. En la época en la que se inventaron los telares automáticos, *Joseph M. Jacquard* (1752-



Figura 2. 7. Manuscrito de la mano ortopédica de Ambroise Paré.

1834), construyó uno inspirado en los carretes de las máquinas musicales. Estas cajas, que permitían intercambiar los carretes para producir diferentes melodías, suscitó en él la idea de controlar la secuencia de trabajo de los telares por medio de tarjetas perforadas intercambiables. La gran aportación de Jacquard, en 1.801, fue separar la parte mecánica (lo que correspondería al *hardware* en computación) de la realización del programa lógico de control (que correspondería al *software* actual).

Nikola Tesla (1.856-1.943), uno de los grandes genios poco reconocidos, podría ser considerado paradigma de ciencia e invención por sus descubrimientos, entre otros, del motor eléctrico de corriente alterna. El físico, matemático e ingeniero croata presentó el que algunos consideran el primer robot de la historia moderna, un barco teledirigido que fue presentado en el Madison Square Garden de Nueva York en 1.898 (ver Fig. 2.8). Tesla fue capaz de arrancar y parar el vehículo, dirigirlo y encender las luces durante una exhibición de su sistema de control remoto por radio. A partir de este sistema patentó el *Teleautomation*⁵, un modelo más avanzado de torpedo teledirigido para uso militar que podía sumergirse mediante una orden. Nikola Tesla ideó además un sistema de transmisión de electricidad inalámbrico, de tal suerte que la energía podría ser llevada de un lugar a otro gracias a la capacidad de la ionosfera para conducir la electricidad.

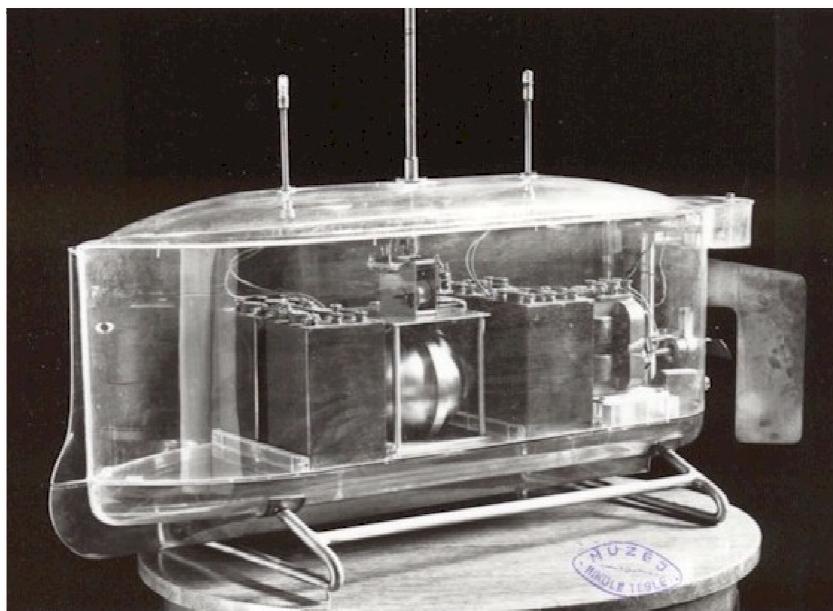


Figura 2. 8. Modelo operativo del barco controlado por radio de Nikola Tesla.

⁵ Concesión de patente Nº 613.809, fechada el 8 de Noviembre de 1898.

Leonardo Torres Quevedo (1852-1936), ingeniero de profesión y persona muy reconocida en su momento por sus méritos —fue propuesto para el cargo de ministro de Fomento que, sin embargo, rechazó— es uno de los ejemplos más próximos de lo que es un verdadero genio español exitoso en la práctica. Reconocido universalmente, ha destacado en todos los campos de las aplicaciones prácticas y ha visto coronar, además, el desarrollo de sus inventos. Pionero en cada uno de sus apartados, convirtiéndose en uno de los precursores y fundadores del concepto de la actual Automática, no fue un mero teórico sino que desarrolló sus invenciones hasta el final [Cebrián, y otros, 2003].

En 1.903 presentó el *Telekino*⁶ en la Academia de Ciencias de París. Consistía en un dispositivo para el control a distancia de barcos y dirigibles mediante telegrafía sin hilos (ver Fig 2.9). Las señales se asemejaban a las del alfabeto Morse, que interpretadas daban lugar hasta una veintena de movimientos diferentes. En 1.906, el *Telekino* (con patentes números 31918 y 33041) fue demostrado al rey Alfonso XII de España en el puerto de Bilbao dirigiendo un bote desde la orilla. Sin embargo, posteriores intentos por desarrollar torpedos teledirigidos fracasaron por falta de financiación. Uno de los prototipos del *Telekino* se conserva en el museo ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la



Figura 2. 9. Prototipo del Telekino sobre una barca.

⁶ *El Telekino del Sr. Torres Quevedo*, Boletín industrial, órgano oficial de la Asociación de Ingenieros Industriales, 5 de Abril de 1.905, Madrid.

Universidad Politécnica de Madrid. En el año 2006, el *Telekino* fue reconocido por el IEEE como *Milestone*, un reconocimiento con honores que recoge un hito de la historia de la Ingeniería a nivel mundial.

Entre otros de sus inventos destacan las máquinas analógicas de cálculo, capaces de resolver ecuaciones polinómicas mediante la utilización de elementos estrictamente mecánicos, el tren exponencial, el husillo sin fin (1.900) y los transbordadores⁷. La máquina de ajedrez fue desarrollada entre 1.912 y 1.920. De naturaleza electromecánica, disponía bajo el tablero de imanes y sensores eléctricos que permitían resolver el juego de forma algorítmica. A finales del s. XIX el ejercito español se interesó por la existencia de globos aeroestáticos, intentando sumarse así a la corriente internacional de creación de autodirigibles. En 1.902, Leonardo Torres Quevedo presentó un nuevo tipo de dirigible con un novedoso sistema de suspensión y armazón interior de cables flexibles que le permitían una mejor maniobrabilidad. El desarrollo de los dirigibles coincidió con la colaboración de una empresa francesa denominada Astra. La empresa, interesada por los diseños, compró la patente y creó entre 1.918 y 1.920 una serie de nuevos dirigibles denominados *Astra-Torres*.

2.2. Aparición de la Robótica Moderna

El término robot fue utilizado por primera vez en la obra de teatro de ciencia ficción denominada *R.U.R.*⁸ y publicada en 1.920 por Josef y Karel Capek (1.890-1.938). Este término vendría a sustituir a *automat*, que Josef empleó en 1.917 en el relato corto *Opilec* (el borracho). Según algunos autores, la palabra robot viene del vocablo checo *robota* que significa trabajo obligado, en referencia a las labores de servidumbre que vivieron en el Imperio Austrohúngaro hasta 1.848. Según otros autores, el término deriva de la palabra *rabota* del antiguo eslavo y que significa esclavo. Estos conceptos entroncan con la terminología amo-esclavo de los robots actuales, los cuales basan cada movimiento en una orden humana. En *R.U.R.* se desarrolla el concepto de la fabricación en cadena desarrollada por robots humanoides, tanto desde el punto de vista narrativo como filosófico. Su estreno y éxito en el Teatro Nacional de Praga y, posteriormente, en Londres y Nueva York, hizo que años más tarde se introdujera el vocablo en todas las lenguas. La obra fue adaptada al cine en 1.927 para la película

⁷ En 1.887 construyó, en Santa Cruz de Iguña (Santander), su primer transporte funicular capaz de salvar un desnivel de 40 m y una longitud de 200 m. En 1.907 instaló un transbordador en el Monte Ulía (San Sebastián) con capacidad para el transporte de materiales y hasta 9 personas. Posteriormente, el 15 febrero de 1.916 instaló en las cataratas del Niágara (Canadá) el *Spanish Aerocar*, que actualmente sigue en funcionamiento.

⁸ *Rossum's Universal Robots*, en español *Los robots universales del Rossum*.

alemana *Metrópolis* dirigida por *Fritz Lang* y el término robot quedó finalmente fijado para ese significado.

Hace ya décadas que se tomó conciencia del peligro que suponía trabajar y manipular con materiales radiactivos. Dado que la intensidad de radiación se reduce con el cuadrado de la distancia, las pinzas de manipulación resultaron ser una de las mejores opciones. Las tareas se llevaban a cabo de forma especialmente difícil, pues los movimientos de los brazos y las pinzas, más o menos sofisticados, se encontraban limitados por una barrera de protección cuya zona de trabajo tenía que ser observada a través de espejos. Los primeros manipuladores desembocaron finalmente en lo que se conoce como sistemas de teleoperación maestro-esclavo. Éstos consistían en un manipulador maestro situado en una zona segura, unido mecánicamente a un manipulador esclavo en contacto con los elementos radiactivos, el cual reproducía fielmente los movimientos marcados por un operador humano. [González de Diego, 2000].

Fue el francés *Raymond Goertz*, uno de los pioneros en el campo de la Robótica, el que construyó en 1.951 el primer manipulador articulado teleoperado con el objetivo de manejar materiales radiactivos [Goldberg, y otros, 2001]. Cuando trabajaba para la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos (USAEC) en el laboratorio ANL (Illinois), construyó junto con *Jean Vertut*, ingeniero del Laboratorio Nuclear Contador de Partículas de París, un sistema manipulador maestro-esclavo con 6 DOF más una pinza (ver Fig. 2.10). Su primer diseño denominado M-1, púramente



Figura 2. 10. Sistema maestro-esclavo de Raymond Goertz.

mecánico, permitió por primera vez a los operadores alejarse de las celdas radioactivas calientes y manipularlas a través de barreras de protección antiradiación. Los sistemas manipuladores maestro-esclavo eran prácticamente iguales y permitían reproducir los movimientos entre ambos eje a eje, de tal manera que el extremo de ambos describiese la misma trayectoria. Sin embargo, el problema principal de estos manipuladores era la lentitud con la que se desarrollaban las tareas y el no tener ningún tipo de control sobre la fuerza que se ejercía con los mismos. Por ello, ambos laboratorios añadieron mejoras al diseño original, incluyendo un control independiente en cada eje mediante servomecanismos electromecánicos y electrohidráulicos, desarrollando así el primer sistema de telemanipulación con servocontrol bilateral llamado E-1.

A partir de la década de los años sesenta, se puso de manifiesto un sin fin de situaciones en las que era evidente la presencia necesaria de manipuladores. Las investigaciones sobre brazos articulados se extendieron de forma notable a las aplicaciones submarinas, ya fuera por la peligrosidad del entorno o por la necesidad de incrementar la presencia en escenarios remotos. En marzo de 1.966, el submarino *Alvin* participó en las labores de recuperación de la bomba de hidrógeno de 1,45 Megatones perdida por las fuerzas aéreas de los EEUU durante la labor de repostaje de un B-52 sobre la costa de Almería (Palomares). Su brazo articulado sirvió para realizar un primer intento de recogida de la bomba a 869 metros de profundidad. Sin embargo, la peligrosidad de la tarea hizo que se vivieran grandes momentos de tensión al perder



Figura 2. 11. Brazo teleoperado empleado en RUWS.

nuevamente la bomba y caer hasta una profundidad mayor. Gracias al manipulador, remotamente controlado, de un vehículo denominado CURV I fue posible localizar nuevamente la bomba, la cual se encontró descansando a 910 metros de profundidad, y rescatarla intacta el 7 de abril.

Poco a poco los ingenieros llevaron a cabo una carrera incesante por desarrollar nuevos brazos manipuladores, que se tornaban cada vez más complejos y en mayor número. Con el transcurso del tiempo se mejoraron los manipuladores empleados en los sistemas sumergibles denominados RUWS. Estos sistemas remotos con manipuladores de hasta 7 DOF, precursores de los actuales sistemas sumergibles ATV, permitían al operador, como mejora principal, sentir fuerzas y pesos mediante realimentación de la fuerza en la pinza del brazo remoto (ver Fig. 2.11).

En 1.956, el ingeniero y autor de varias patentes *George. C. Devol*, junto con el industrial *Joseph F. Engelberger*⁹, establecieron las bases de la utilización industrial de la Robótica moderna y fundaron la empresa *Consolidated Controls Corporation*. Posteriormente, la empresa se transformó en la *Universal Automation Inc. (Unimation)* y su primer robot tipo *Unimate* de accionamiento hidráulico fue realizado en 1.960 (ver Fig. 2.12). El año siguiente instalaron su primera máquina de 1.800 Kg en la fábrica de *General Motors* (Trenton, New Jersey) para desarrollar tareas de fundición por inyección. En 1.968 Engelberger visitó Japón y posteriormente se firmaron acuerdos

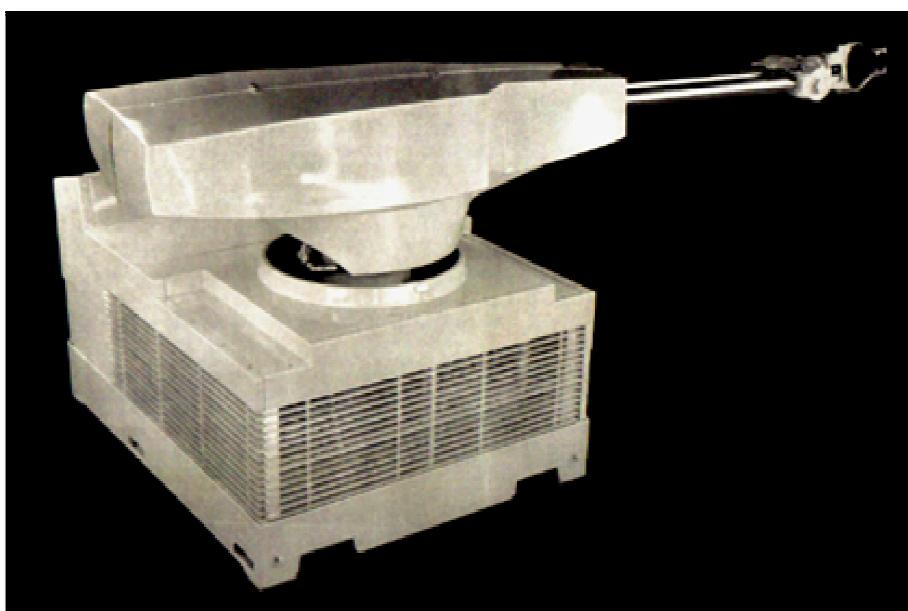


Figura 2. 12. Primer robot industrial Unimate.

⁹ *I can't define a robot, but I know one when I see one* - Joseph Engelberger.

con *Kawasaki* para la construcción en serie de robots Unimate. Gracias principalmente a *Nissan*, el crecimiento de la Robótica en Japón, que creó en 1.972 la primera asociación de Robótica del mundo denominada *JRA*, superó rápidamente al de EEUU.

A finales de los años sesenta y principio de los setenta se establecieron las bases para el estudio de la Robótica en las universidades. Fruto de estas investigaciones, en 1.963 se desarrolló el primer brazo robótico artificial conectado a una computadora. El brazo *Rancho*, que debe el origen de su nombre al Hospital *Rancho Los Amigos* (Downey, California), disponía de 6 DOF, lo que le confería la flexibilidad de un brazo humano. Algunos años después, en 1.968, la Universidad de Standford construyó el primer robot móvil. Éste poseía una cámara para determinar distancias, sensores de obstáculos y un enlace vía radio con una computadora. Hubo que esperar algunos años más para que *Nolan Bushnell* —fundador de la conocida empresa *Atari*— realizara un robot doméstico con la idea de tener un sistema educacional programable con computadoras Apple II mediante enlace IR. Éstos fueron los primeros robots con finalidad púramente educativa [Cabrera Jiménez, 1996]. De forma paralela, en 1.969 *V. Scheinman* desarrolló el manipulador de la Universidad de Stanford, el cual supuso el inicio de los diseños actuales de brazos robóticos. Su accionamiento eléctrico y su conexión a un computador llevaría más tarde a la fabricación y comercialización del robot PUMA en 1.975 (ver Fig. 2.13). La sustitución del operador por una computadora que controlase los movimientos del manipulador afianzó el concepto de robot industriales, incentivado además por las necesidades de automatización de las cadenas de ensamble y manipulación. Los primeros desarrollos en Europa se iniciaron en 1.973 con la construcción del primer robot de accionamiento totalmente eléctrico empleado en la industria. Se trataba del robot IRB-6 de la empresa sueca *ASEA*, actualmente denominada *ABB*. Más tarde, en 1.981 el profesor



Figura 2. 13. Modelos PUMA 500 y ASEA IRB-6.

Makino de la Universidad Yamanashi de Japón junto con las empresas *Sankyo Seiki*, *Pentel* y *NEC*, presentó un concepto nuevo de robot manipulador con configuración SCARA. El objetivo era reducir el número de grados de libertad y coste para alcanzar una configuración óptima destinada al ensamblado de piezas.

2.3. Aplicaciones Avanzadas de la Robótica

Durante estos últimos cincuenta años se han hecho enormes esfuerzos de desarrollo en distintos campos de la Ingeniería, donde los dispositivos electromecánicos, sensores, actuadores y computadoras han visto reducido su tamaño y mejoradas sus prestaciones. A finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación, en cuanto a su control se refiere, recibió un impulso enorme con el desarrollo de las aplicaciones espaciales. Una pequeña empresa canadiense llamada *DSMA Atcon* diseñó un pequeño robot que cargaba combustible en un reactor nuclear. Esto llamó la atención de la NASA y la empresa trabajó con *SPAR Aerospace*, *CAE Electronic* y *RCA* para elaborar una propuesta de brazo robótico espacial que pudiera recoger material de la bahía de carga de una nave. El brazo robot fue utilizado por primera vez en la misión STS-2¹⁰ el 13 de noviembre de 1.981. Su gran tamaño, con 15,2 m de longitud, 38 cm de diámetro, 450 kg de peso y 6 DOF, le permitía manipular cargas de hasta 29 toneladas en el espacio.

Este éxito marcó el inicio de estrechas colaboraciones entre Canadá y la NASA, creando en el año 2.001 el SSRMS con la tarea de ensamblar la Estación Espacial Internacional (*ISS*). Un brazo robótico manejable y seguro se convierte en una herramienta esencial para los astronautas en un transbordador espacial (ver Fig. 2.14). Les ayuda a reparar y recuperar satélites como el telescopio espacial *Hubble*¹¹. La principal ventaja de utilizar un robot en el espacio, es evitar que un ser humano tenga que salir y realizar actividades extra vehiculares (EAV). Una estimación realizada hace 15 años indicaba que habría una fatalidad aproximadamente cada 1.000 horas de EAV. Es mucho más seguro enviar a un robot para realizar ciertas tareas en el espacio que a un ser humano.

¹⁰ La misión STS-2 lanzó el transbordador espacial *Columbia* de la NASA el 12 de noviembre de 1981. Esta fue la primera vez que una nave espacial tripulada y reutilizable dejó la tierra en su segunda misión y regresó del espacio.

¹¹ Denominado de esa forma en honor de *Edwin Hubble*, fue puesto en órbita el 24 de abril de 1.990 por la misión ST-31 como un proyecto conjunto de la NASA y la ESA. El Hubble orbita alrededor de la Tierra a 593 km de altura con un periodo entre 96 y 97 min. Ya desde su diseño, el Hubble se concibió como un telescopio espacial que podía ser visitado por un transbordador espacial. Esto ha facilitado la realización hasta la fecha de 5 misiones de servicio —la última la llevó a cabo el transbordador *Atlantis* en mayo de 2.009—, las cuales han permitido realizar tareas de mantenimiento, reparación y refresco tecnológico.

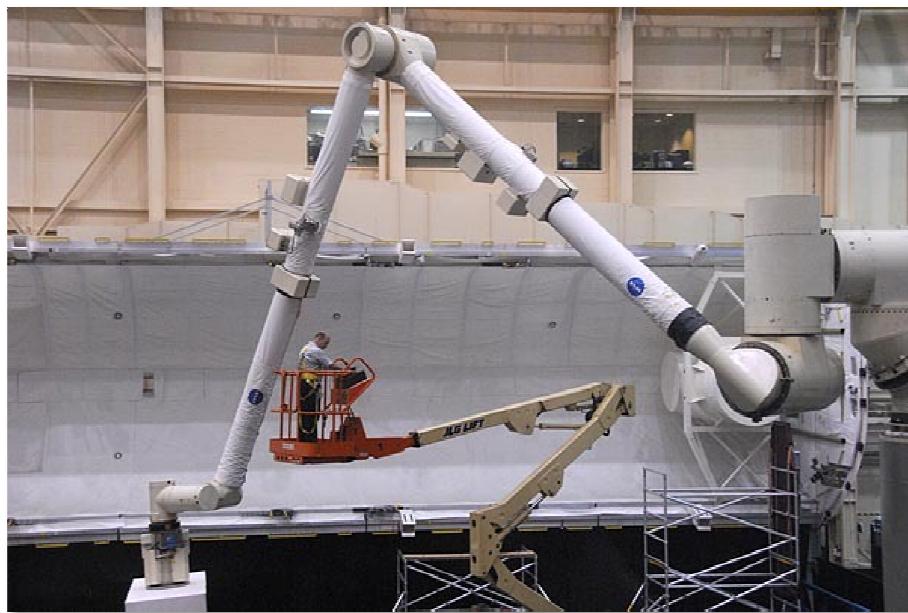


Figura 2. 14. Manipulador Canadarm en el Centro Espacial Johnson en Houston.

Los científicos de la NASA están desarrollando brazos robotizados cada vez más sofisticados para operar en la ISS, pero la fuerza de un brazo robótico de acero puede llegar a convertirse en un peligro potencial para la seguridad de las operaciones llevadas a cabo por los astronautas. Para evitarlo, los brazos han sido programados con una inteligencia artificial que les enseña a evitar acercarse demasiado a la ISS o a los astronautas.

Desde los años ochenta, los avances realizados en los sistemas de teleoperación han venido marcados por el progresivo avance de las tecnologías propias de la Robótica. Más recientemente, debido a la inclusión de cámaras y otros dispositivos que aumentaron el control del operador, surgieron nuevas aplicaciones como la telecirugía endoscópica (ver Fig. 2.15¹²). Para alcanzar un rendimiento efectivo de estos dispositivos, resultaba importante para el operador tener una realimentación fiel de los estímulos, de tal forma que tuviera suficiente información para realizar el trabajo de una manera natural e intuitiva. Un ejemplo del avance en la cirugía, mediante medios robóticos y/o teleoperados, es el primer robot cirujano denominado *Da Vinci*, desarrollado originalmente por ingenieros de la NASA. La noticia, dada por el diario *La Razón* el 13 de julio de 2.000, anunció que el organismo que se encarga de dar el visto bueno a los fármacos que se comercializan en EEUU (FDA) aprobó la puesta en marcha de un robot programado para asistir a los cirujanos en las operaciones. La precisión y habilidad de sus tres brazos manipuladores, ha permitido a los médicos

¹² Fuente: Iker Azurmendi.



Figura 2. 15. Robot Da Vinci en la Policlínica de Guipúzcoa.

realizar más de 500.000 operaciones de cirugía desde una consola situada a 4 ó 5 metros de distancia. La técnica de operación, con una invasión mínima y ninguna muerte registrada hasta el momento, justifica que la empresa constructora del robot¹³ en 1.999, haya realizado hasta la fecha 860 réplicas del mismo, una de ellas, presente por primera vez en España desde 2.004 en el Hospital Clínico de Madrid.

Una de las primeras definiciones de robot teleoperado fue dada por la NASA en el año 1.978. Este adjetivo sirvió para definir un dispositivo robótico con brazos manipuladores, sensores y cierto grado de movilidad, controlado remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador. Una definición más amplia, que deja la posibilidad de manipular remotamente cualquier tipo de robot, es la dada por la ISO. Esta norma define un robot teleoperado como un robot que puede ser controlado remotamente por un operador humano, extendiendo las capacidades sensoriales y motoras de éste a localizaciones remotas [Barrientos, y otros, 2007]. *Surveyor*¹⁴ fue un programa que, desde 1.966 hasta 1.968, envió 7 naves espaciales a la Luna. Sus vehículos espaciales no eran móviles y sólo podían investigar allá a donde llegaran sus brazos. Disponía de un recogedor de muestras o mini excavadora que podía alargarse hasta un máximo de 162,6 cm y girar en un arco de 112°. La cuchara

¹³ Intuitive Surgical Inc., disponible en <http://www.intuitivesurgical.com>

¹⁴ El Programa *Surveyor* fue el último programa norteamericano de sondas lunares automáticas con capacidad fotográfica, de análisis químico y excavación del suelo. Su principal objetivo era demostrar la viabilidad de un aterrizaje lunar suave.

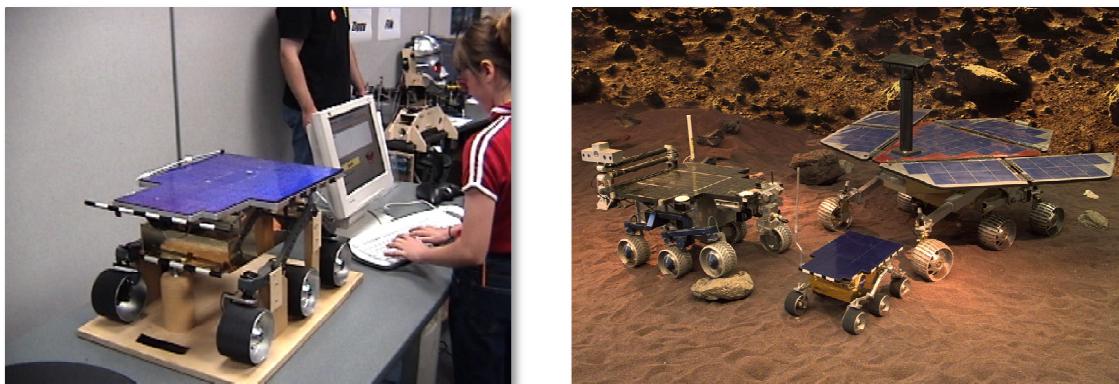


Figura 2. 16. Rover Sojourner y comparación con los vehículos FIDO y Opportunity.

podía elevarse hasta una altura de 1 m y profundizar hasta 46 cm en el suelo, depositando el material extraído en uno de los pies donde era fotografiado. La superficie cubierta por el brazo era de 7 m².

Una derivación del significado de vehículo robótico, acuñado por la NASA en las primeras misiones espaciales, fue el término de *rover*. Esta locución, utilizada por primera vez en la misión *Apolo*¹⁵ XV, sirvió para designar a un vehículo todoterreno empleado por los astronautas en sus desplazamientos por la superficie lunar. Posteriormente, el término se extendió al concepto de vehículo robótico de exploración no tripulado, cuando se utilizó el vehículo *Sojourner* en la misión *Mars Pathfinder* de la NASA en 1.997. En la actualidad, este término se ha transformado en el acrónimo MER para nombrar a los vehículos robóticos *Spirit* y *Opportunity* usados desde el año 2.004 (ver Fig. 2.16).

El *Sojourner* era un vehículo de seis ruedas capacitado para desplazarse unos 500 metros alrededor de la plataforma *Mars Pathfinder* con una velocidad máxima de 1 cm/s. Sus medidas eran 65 cm de largo, 48 cm de ancho y 30 cm de altura. Su peso en la Tierra era de 11 Kg mientras que en Marte sólo pesaba el equivalente a 4,1 kg. Durante sus 83 días de operación sobre la superficie, el *Sojourner* envió a la Tierra cerca de 550 fotografías y completó el análisis químico en 16 ubicaciones diferentes. Para el control del vehículo robótico se utilizó un programa desarrollado en Java™ sobre un sistema de visualización SGI Onyx2. Con este soporte, el equipo de control generaba las secuencias de comandos para guiar el *rover* mediante el manejo gráfico de un elaborado interfaz (ver Fig. 2.17). Éste contenía los complicados comandos del vehículo y consistía en ventanas de trabajo accesibles a través del ratón. En él, el

¹⁵ El decimoquinto vuelo del programa Apolo fue lanzado hacia la luna mediante un cohete del tipo Saturno-5 el 26 de julio de 1.971.

conductor del vehículo —*Brian K. Cooper*— primero seleccionaba el comando del panel de control y posteriormente introducía los parámetros. Una segunda pantalla recogía las imágenes tomadas por la plataforma *Pathfinder* a través de una cámara especial que tomaba imágenes estereoscópicas. Una vez los datos eran recibidos, el uso de un software para el tratamiento de imágenes 3D permitía generar un espacio virtual del lugar donde se encontraban tanto la plataforma como el vehículo robótico.

La forma de gobierno del vehículo representaba un método híbrido entre el telecomando en tiempo real y la autonomía total. El conductor desplazaba el ratón por la pantalla indicando, mediante los dardos gigantes que aparecen en la imagen, los puntos que formaban la ruta que debía seguir el *rover*. Después de marcar un cierto número de objetivos, junto con los experimentos y las operaciones a ejecutar, se enviaba esta información a la plataforma desde el control en la Tierra a través de un enlace en banda X. Posteriormente, la plataforma *Pathfinder* retransmitía esta información al vehículo *Sojourner*. De esta manera, se programaban las pautas y las labores de cada uno de los días de la misión, evitando dar información cada cierto número de minutos [Ferrer i Perez, y otros].

El sucesor del *Sojourner* fue *Rocky 7* y al igual que éste utiliza ruedas. Las ruedas son una tecnología ya probada y *Rocky 7* es extremadamente estable, tiene un sofisticado cerebro informático y está diseñado para explorar un planeta que jamás ha visto antes. El *Sojourner* estaba básicamente controlado por la nave nodriza, así que no podía moverse fuera de los límites de su campo de visión, lo que quiere decir que no podía alejarse más de 30 metros de la nave. *Rocky 7* posee la capacidad de auto-situación incluso fuera del campo de visión de la nave nodriza. Utiliza referencias como sensores de Sol y varios enfoques para referenciar su situación [Weisbin, 2005]. Todos los exploradores a Marte deben ser autónomos, porque el tiempo necesario para

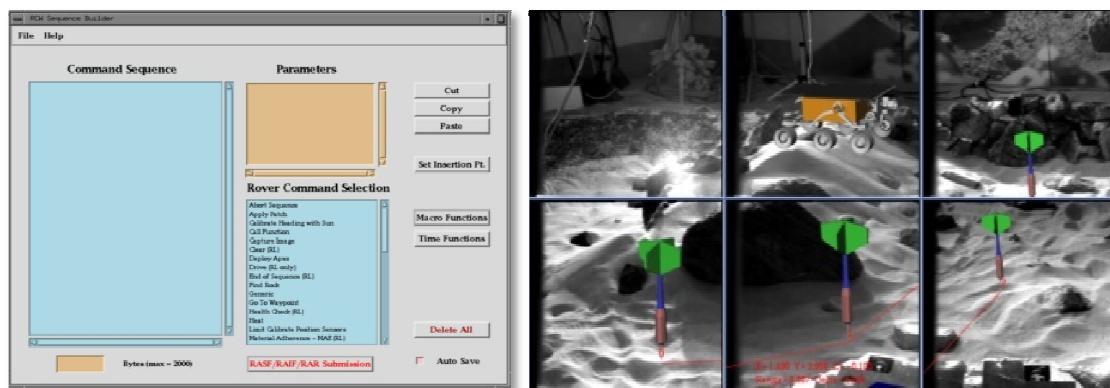


Figura 2. 17. Interfaces de usuario del vehículo *Sojourner* y *Mars Pathfinder*.

hacer llegar una señal desde la Tierra a Marte es demasiado largo. Las órdenes son enviadas por la mañana y el robot pasa todo el día autónomo. *Rocky 7* puede operar por sí solo durante largos períodos de tiempo, por lo que debe ser lo suficientemente inteligente como para llevar a cabo toda una expedición sin control directo de la Tierra y llegar a conseguir algo que tenga sentido.

En enero de 2.004 la pareja de *rovers* *Spirit* y *Opportunity*, designados oficialmente como MER-A y MER-B, arribaron a la superficie de Marte en una nueva misión de investigación del cráter Victoria y la llanura Meridiani. Cada *rover*, operativos aún hoy en día, tiene 6 ruedas que lo dotan de una velocidad promedio de 10 mm/s. Están facultados con un brazo robótico de 5 DOF que le confieren tanto movimientos laterales, verticales y horizontales en el hombro, como maniobrabilidad en el codo y la muñeca. El brazo robótico dispone en su extremo de una torreta que porta un microscopio digital, una herramienta de abrasión de rocas (RAT), un espectrómetro de Rayos-X y un espectrómetro de sólidos Mössbauer. Otros prototipos de *rovers* realizados por el JPL¹⁶ con el objetivo de probar y ensayar vehículos robóticos para las misiones de exploración han sido Nomad, LSR, Rocky 1 a Rocky 6, FIDO, Hiperion, Zoe y Muses-CN entre otros [Stroupe, y otros, 2002].

Una de las aplicaciones militares de última generación es el vehículo robot *TALON*, perteneciente a una familia de vehículos robóticos orugas. Desde el año 2.000 ha intervenido en operaciones militares como las de Bosnia o Afganistán. Sus componentes modulares lo dotan de un brazo manipulador, cámaras multivisión, control teleoperado y sistema doble de comunicaciones RF. Estos vehículos difieren del *rover Sojourner* en tamaño y capacidad. El *Sojourner* tenía 65 cm de longitud y 10 Kg de peso, mientras los vehículos robóticos *Spirit* y *Opportunity* miden 1,6 m de longitud y pesan 174 Kg. El *Sojourner* viajó una distancia total de 100 m durante sus 12 semanas de actividad en Marte, mientras el *rover Spirit* ha recorrido más de 7 Km y el *Opportunity* aproximadamente 10 Km. Los *Mars Exploration Rovers* son más autónomos, llevando cada uno sus propios equipos de telecomunicaciones, cámaras y computadoras a bordo. Sin embargo, el *rover Sojourner* era controlado por los operadores en la Tierra y disponía de la mayoría de su equipamiento en la plataforma base de aterrizaje.

Por su parte la ESA también tomó parte de la carrera espacial por explorar el planeta Marte. A bordo de la misión *Mars Express*, enviada a Marte en junio de 2.003,

¹⁶ El JPL es un centro de desarrollo e investigación gestionado por el Caltech (*California Institute of Technology*) de la NASA desde 1.936. La función principal del laboratorio es la construcción de naves y vehículos robóticos planetarios.

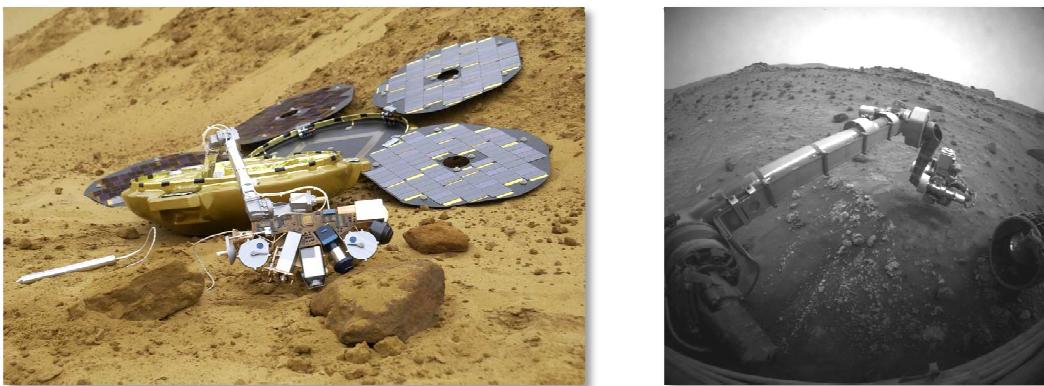


Figura 2. 18. Brazos robóticos de Beagle-2 y del rover Opportunity.

se encontraba un brazo robótico anclado al vehículo de aterrizaje *Beagle-2*¹⁷ (ver Fig. 2.18). Éste fue concebido y construido por universitarios británicos dirigidos por el profesor *Colin Pillinger* de la *Open University*. El brazo robótico, denominado PAW, fue ideado como un medio para transportar instrumentos científicos y llevarlos hasta posiciones donde pudieran obtener y estudiar muestras de arena y roca. Sin embargo, esta misión no culminó en éxito debido a la imposibilidad de establecer comunicación con el vehículo de aterrizaje, por lo que tras muchos intentos fue declarada oficialmente perdida el 6 de febrero de 2.004.

La ESA tiene previsto en el año 2.018 el lanzamiento de la misión *ExoMars* en el que viajará también un *rover* dedicado a la exploración del planeta rojo (ver Fig. 2.19). El software de este vehículo, desarrollado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES) y el Grupo de Investigación Espacial (SRG) de la Universidad de Alcalá, le confieren una alta capacidad autónoma para controlar sus 6 ruedas y 205 Kg de peso, equiparable a los vehículos robóticos *Spirit* y *Opportunity* de la NASA. El *rover*, equipado con cámaras panorámicas y un taladro de 2 metros, usará la luz solar para generar la potencia eléctrica necesaria y será capaz de recorrer hasta 100 metros al día.

2.4. Origen de los Laboratorios Remotos

En la última década del siglo XX, la llegada de las tecnologías de la información, tales como la familia de protocolos de Internet, permitió el desarrollo de aplicaciones de monitorización que trataban de hacer la vida un poco más fácil. Tal es el caso en

¹⁷ Su nombre hace referencia al barco HMS Beagle sobre el cual hizo su viaje *Charles Darwin* (1.809-1.882), naturalista inglés que revolucionó el conocimiento humano de la vida en la Tierra con su obra fundamental *El origen de las especies* publicada en 1.859.

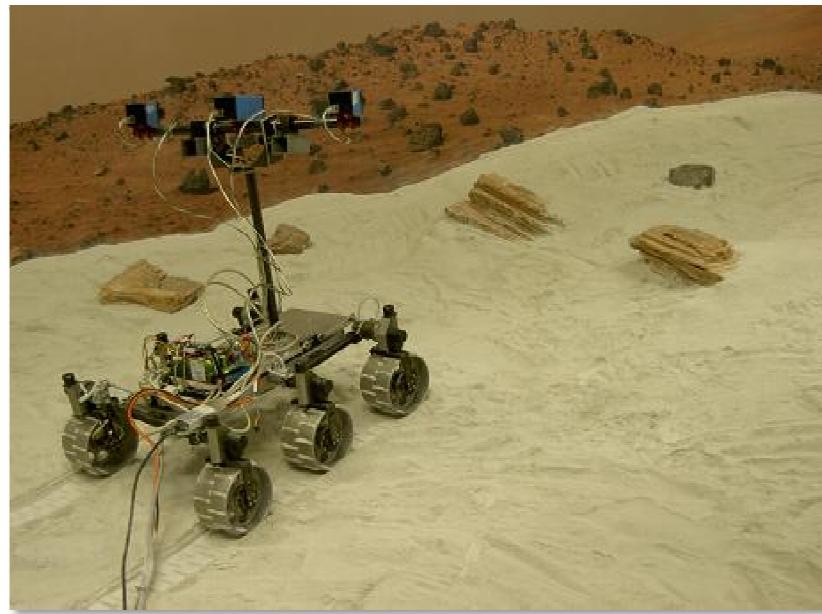


Figura 2. 19. Pruebas del rover ExoMars en un escenario artificial.

1.991 de la primera cámara web surgida con el proyecto *Trojan* [Stafford-Fraser, 2001]. La primitiva interfaz de la cámara (*Xcoffee*) permitía monitorizar, mediante imágenes en B/N con 128 x 128 píxeles de resolución, el estado de una cafetera situada en una estancia de la Universidad de Cambridge, alejada del lugar de residencia de los jóvenes investigadores, quienes pasaban largas noches trabajando gracias a las propiedades excitantes del café (ver Fig. 2.20).

Con la llegada del protocolo HTTP en 1.993, fue posible ofrecer una mayor difusión de las aplicaciones en Internet, entre ellas las pertenecientes al campo de la Ingeniería de Sistemas y la Automática. Ello ha posibilitado, en primer lugar a instituciones y posteriormente a estudiantes, el desarrollo de tareas físicas interactivas



Figura 2. 20. Monitorización de la cafetera del proyecto Trojan.

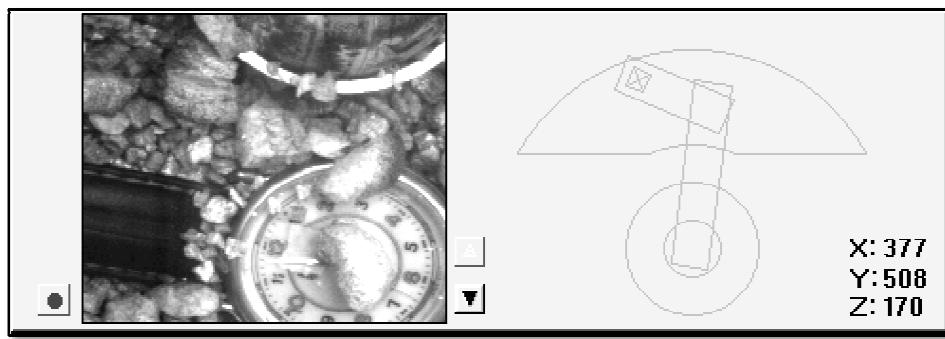


Figura 2. 21. Interfaz de usuario del Proyecto Mercury.

sobre Internet conocidas como laboratorios remotos. Tal es el caso del proyecto *Mercury*¹⁸, considerado el primer laboratorio *online* en usar el protocolo HTTP y una interfaz de navegación [Goldberg, y otros, 1999]. Dicho proyecto, dedicado a la búsqueda de objetos depositados en un terrario mediante un robot Sankyo modelo IBM SR5427 de 4 DOF con una cámara acoplada, fue diseñado para ser operado durante las 24 horas del día por usuarios no especializados, lo que fue posible mediante la determinación de las singularidades y las posibles zonas de colisión del robot con su entorno (ver Fig. 2.21).

Por supuesto, estas nuevas posibilidades tecnológicas conllevaban nuevas metas y problemas no planteados anteriormente, como lo son por ejemplo, la influencia de los retardos en las operaciones de control remotas. Fue en el año 1.960 cuando se estudiaron, por primera vez, sus efectos de la mano de los investigadores *Thomas Sheridan* y *William R. Ferrel*. Ellos encontraron que estos retardos podrían desestabilizar potencialmente los sistemas y propusieron una estrategia de “parada y espera” para hacerle frente. Sin embargo, esta era una manera poco eficiente de tratar la teleoperación remota [Sheridan, y otros, 1963]. Uno de los ejemplos que resolvió el problema derivado de los retardos en las comunicaciones de larga distancia, fue en 1.993 el proyecto ROTEX de la agencia alemana DLR. En el proyecto se desarrolló un simulador de movimientos del robot y de las fuerzas de interacción con su entorno que permitía al operador compensar los retardos temporales de más de 5 segundos mediante simulación predictiva [Barrientos, 2002]. Otros estudios importantes que destacaron sobre este tema fueron las investigaciones sobre latencia en manipuladores teleoperados por Internet [Brady, y otros, 2001], las técnicas empleadas por un sistema manipulador maestro-esclavo en transmisiones a través de la web [Niemeyer, y otros, 2001] o el estudio de técnicas de dispersión bajo retardos variables aplicados a sistemas bilaterales de brazos robóticos [Kosuge, y otros, 2001].

¹⁸ *Mercury*, disponible en <http://www.usc.edu/dept/raiders/>



Figura 2. 22. Laboratorio remoto Telegarden.

Entre otros de los problemas surgidos en la teleoperación de laboratorios se encuentran la interactividad de múltiples usuarios trabajando simultáneamente y el acceso limitado a los dispositivos robóticos en operación. Respecto al problema del acceso concurrente de los usuarios, esto fue tratado por el Proyecto *Telegarden*¹⁹ [Mascha, y otros, 1995]. Este laboratorio remoto, disponible en Internet desde 1.995 en la Universidad de Berkeley, usaba un robot Adept-1 y una estructura de control multitarea. Con ella, varios operadores podían ser atendidos simultáneamente para colaborar en el crecimiento de un jardín con plantas vivas (ver Fig. 2.22).

Uno de los proyectos que más interés han despertado, al contrario de lo que en principio pensaron sus creadores de la Universidad Carnegie Mellon, fue el desarrollo en 1.995 de *Xavier* (ver Fig. 2.23), un vehículo robot autónomo accesible desde Internet [Simmons, y otros, 2000]. Creado inicialmente con la idea de probar durante 3 meses un nuevo algoritmo de navegación autónomo en interiores, ha recibido hasta la fecha más de 30.000 solicitudes de conexión desde Internet. El principal logro de este proyecto, con respecto a otros, ha sido la implementación de las interacciones remotas sobre un vehículo móvil y autónomo. Es importante destacar que hasta fechas recientes, el ancho de banda de las señales inalámbricas era bastante limitado, lo que afectaba de forma importante al control y realimentación visual en tiempo real.

Existen numerosos ejemplos sobre el control remoto de brazos manipuladores a través de Internet. Como ejemplos, pueden nombrarse el primer sistema de

¹⁹ *Telegarden*, disponible en <http://www.ieor.berkeley.edu/~goldberg/garden/Ars/>



Figura 2. 23. Vehículo autónomo Xavier.

teleoperación en Francia mediante realidad aumentada denominado ARITI²⁰. El proyecto, originado en el año 1.996 en el LSC, podía controlar un robot virtual de 4 DOF realizado en JavaTM y estuvo disponible en Internet dos años después [Otmane, y otros, 2000]. A este proyecto le siguieron otros como *Ouija 2000*²¹ de la Universidad de Berkeley, *Telelabs* de la Universidad Western de Australia [Taylor, y otros, 1995] o el manipulador MHI-PA 10 de *H. Hirukawa*.

2.5. Aparición de los Laboratorios Virtuales de Uso Docente

El concepto de instrumento virtual aparece con los sistemas de instrumentación construidos alrededor de un PC, más potentes, flexibles y de menor coste que los sistemas hardware tradicionales. Según el concepto recogido en [Vicedo Caraballoso, y otros], la compañía *National Instruments* definió en 2.001 un instrumento virtual de la manera siguiente:

“Un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora y tienes sus funciones definidas por software.”

Hoy en día, quizás la herramienta líder en la industria para la creación de instrumentos virtuales desde su mínima expresión hasta el concepto de SCADA es LabVIEWTM. Desarrollado en 1.986 por *J. Truchard* y *J. Kodosky*, es un entorno de programación gráfica que al principio sólo funcionaba en plataformas MAC²² y

²⁰ ARITI, disponible en <http://gsc3.cemif.univ-evry.fr/site/en/index.php>

²¹ Ouija 2000, disponible en <http://ouija.berkeley.edu/>

²² Abreviatura de Macintosh. Con esta palabra se hace referencia a cualquier computadora personal diseñada, desarrollada y construida por Apple Inc. El Macintosh 128K, lanzado el 28 de enero de 1.984, fue el primer ordenador personal comercializado que usaba una interfaz gráfica de usuario (GUI) y un ratón, en vez del estándar de esa época: la interfaz por línea de comandos.

actualmente está disponible también para Windows, UNIX y Linux. Los programas desarrollados en LabVIEW™ se denominan instrumentos virtuales, y en su origen provenía del control de instrumentos electrónicos, aunque hoy en día se ha expandido a su programación embebida. Pueden encontrarse innumerables ejemplos del uso de LabVIEW™ para desarrollar la instrumentación virtual de un laboratorio, tantos como años se llevan desarrollando aplicaciones desde 1.986 (ver Fig. 2.24).

Las limitaciones y problemas de los laboratorios tradicionales, junto con la evolución progresiva de las tecnologías de enseñanza y aprendizaje, favoreció el desarrollo de una nueva generación de laboratorios remotos venidos a complementar los recintos físicos reales, llamados laboratorios virtuales. Sus orígenes se deben al desarrollo de Internet y al uso de la instrumentación virtual con propósitos educativos. De esta forma, el concepto de instrumentación virtual remota se transforma en el de laboratorio virtual. En ellos, un experimento puede ser observado desde una localización distante a través de la red (monitorización remota), mandar mensajes, datos o entradas de regreso a un proceso servidor (control remoto), realizar tareas y actividades con otros usuarios (colaboración) o permitir a un proceso software que se ejecute en una o más máquinas (computación distribuida).

Proveer acceso *online* al equipamiento de los laboratorios en la web data de mediados de los años 90. El primer experimento de telepresencia de un robot industrial que podía ser operado a través de navegadores de Internet, fue realizado en

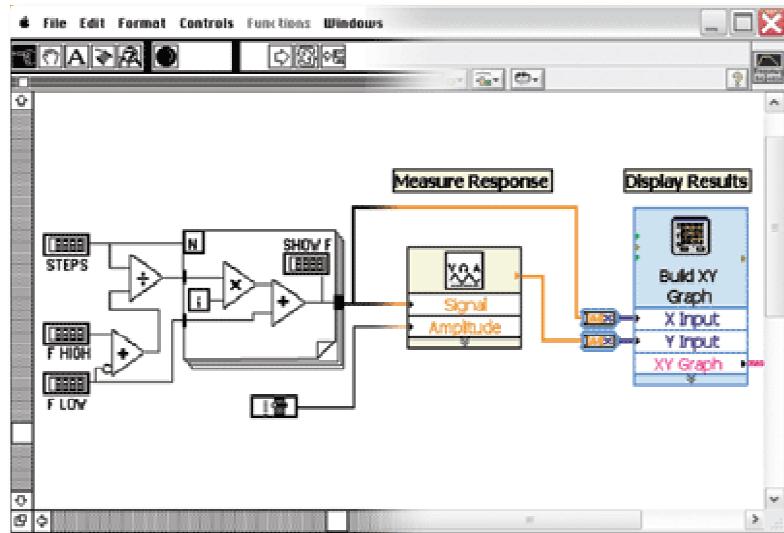


Figura 2. 24. Ejemplo de instrumento virtual en la versión de LabVIEW™ 1.0 para Mac OS en 1.986.

el año 1.994 por el proyecto *Telelabs*²³ de la UWA. Financiado inicialmente con la idea de que el aprendizaje de los usuarios fuera asistido por computadores, su principal logro fue combinar el equipamiento de los laboratorios con los exámenes automatizados y la monitorización del progreso de los estudiantes. Este proyecto enseñó cómo complejos robots podían ser operados a través de Internet por varios usuarios simultáneos, utilizando las conexiones de bajo ancho de banda provistas por Internet y las líneas telefónicas tradicionales. Otra muestra de laboratorio virtual y remoto originado gracias a la investigación en las universidades es, actualmente, el laboratorio a distancia de la Universidad de Cienfuegos en Cuba. Éste permite la práctica de algoritmos de control en robot manipuladores como el IRB-6 de ASEA [Sartorius Castellanos, y otros, 2006]. Otro ejemplo es la Universidad de Siena, la cual dispone de varios laboratorios remotos accesibles vía Internet denominados ACT²⁴, con el objetivo de que los estudiantes logren las mejores configuraciones y comparan sus diseños en una competición con fines educativos [Casini, y otros].

Desde 1.995 la Universidad de Tennessee²⁵ (Chattanooga) demostró el uso de LabVIEW™ para el control de procesos y sistemas dinámicos en el laboratorio *Web-Lab* [Henry, 1996]. Especialmente dedicado a este objetivo, se escribió un libro que sentó las bases de las diferentes formas en que puede usarse LabVIEW™ y las tecnologías de



Figura 2. 25. Laboratorio virtual Ciberlab.

²³ *Telelabs*, disponible en <http://telerobot.mech.uwa.edu.au>

²⁴ *ACT*, disponible en <http://act.dii.unisi.it/experiments.php>

²⁵ Centro de Control del Laboratorio de Ingeniería en la Web, disponible en <http://chem.engr.utc.edu>

Internet para crear sistemas de adquisición de datos controlables o accesibles remotamente [Travis, 2000]. Como ejemplo de este objetivo, puede verse en la figura 2.25 el Laboratorio Óptico Remoto de la Universidad de Stanford, el cual servía para medir las propiedades físicas de un diodo láser. *Ciberlab*, así denominado, no sólo proveía características de control y monitorización, sino también herramientas de análisis, planificación de tareas del laboratorio y contenido bibliográfico, lo que lo convertía en un completo laboratorio virtual de uso educacional [Hesselink, y otros, 2000].

Actualmente es difícil encontrar operativos los primeros laboratorios virtuales desarrollados, ya sea mediante LabVIEW™ u otras herramientas. De facto, la mayoría de los laboratorios han dejado de ser mantenidos, bien por razones técnicas, por falta de financiación o, simplemente, por haber cumplido sus objetivos. No obstante, en la bibliografía científica se pueden encontrar numerosos trabajos publicados al respecto.

El programa de Telerobótica Espacial de la NASA²⁶, creado en el año 1.985 para desarrollar nuevas tecnologías remotas de manipulación y movilidad robótica, fue cancelado tras varios años en 1.997. Aunque las tareas de investigación y desarrollo de tecnología fueron transferidas a otros esfuerzos, la página web fue mantenida con propósitos históricos para servir de referencia a la comunidad científica. Un estudio realizado en esta Tesis ha comprobado que, de la amplia lista de 26 robots reales accesibles desde Internet, sólo el 34,6 % permanecen activos hoy en día en la web. Sin embargo, las estadísticas de usuarios muestran que continúa siendo una de las páginas más visitadas actualmente.

En este mismo estudio se ha constatado que en el portal de acceso a la revista IJEE existe una página²⁷ de enlaces, en su mayoría disponibles, con software de libre distribución que podría ser de beneficio en la enseñanza y aprendizaje en Ingeniería. Es de especial interés destacar que, principalmente, se trata de logicial de simulación e instrumentación virtual, no existiendo entre ellos laboratorios virtuales y/o remotos (ver Fig. 2.26).

Para completar el estudio en este capítulo de la Tesis sobre los instrumentos virtuales y remotos disponibles en Internet, se han consultado las principales herramientas disponibles en España. La lista²⁸ proporcionada por el Grupo de Educación en Automática del CEA, ofrece un total de 67 enlaces a laboratorios virtuales y/o remotos con fines pedagógicos en diferentes áreas de la Ingeniería de

²⁶ Enlaces disponibles en http://ranier.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtml

²⁷ IJEE, disponible en http://www.ijee.dit.ie/interactive/EE_Software_Jan'07.html

²⁸ Enlaces disponibles en <http://www.cea-ifac.es/wwwgrupos/educontrol/index.html>

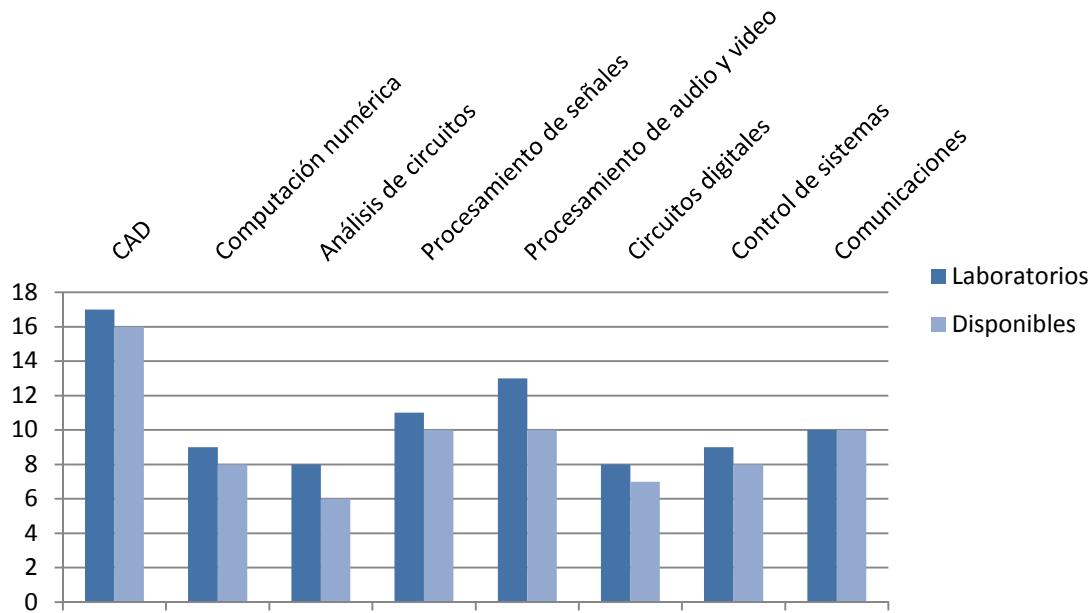


Figura 2. 26. Recursos didácticos disponibles en la revista IJEE.

Sistemas y la Automática (ver Fig. 2.27). Aunque no está muy actualizada, se ofrece una excelente recopilación de los recursos didácticos más destacados que pueden encontrarse en la web, con la idea de proporcionar ideas y gestar nuevas líneas de investigación [Candelas Herías, y otros, 2005]. La revisión de los enlaces muestra como conclusión que sólo se encuentran disponibles el 65,7 % del total de los proyectos. Como argumento a favor, se ha comprobado que una buena parte de ellos corresponde a simulaciones interactivas sobre la Física, y otro buen número corresponde a laboratorios nacionales, lo que demuestra el excelente estado de salud por el que pasan las universidades españolas.

Uno de los ejemplos a seguir por su repercusión, a la hora de hablar de entornos web docentes aplicados a los laboratorios remotos y virtuales en el ámbito de las Ingenierías, ha sido *eMersion*²⁹ (ver Fig. 2.28). Creado entre el año 2.000 y el 2.004 por la EPFL en el marco de su programa de nuevas tecnologías de la enseñanza, ha sido definido por sus propios creadores como:

"A multidisciplinary initiative to deploy innovative pedagogical scenarios and flexible learning resources for supporting web-based experimentation in engineering education".

²⁹ *eMersion*, disponible en <http://lawww.epfl.ch>

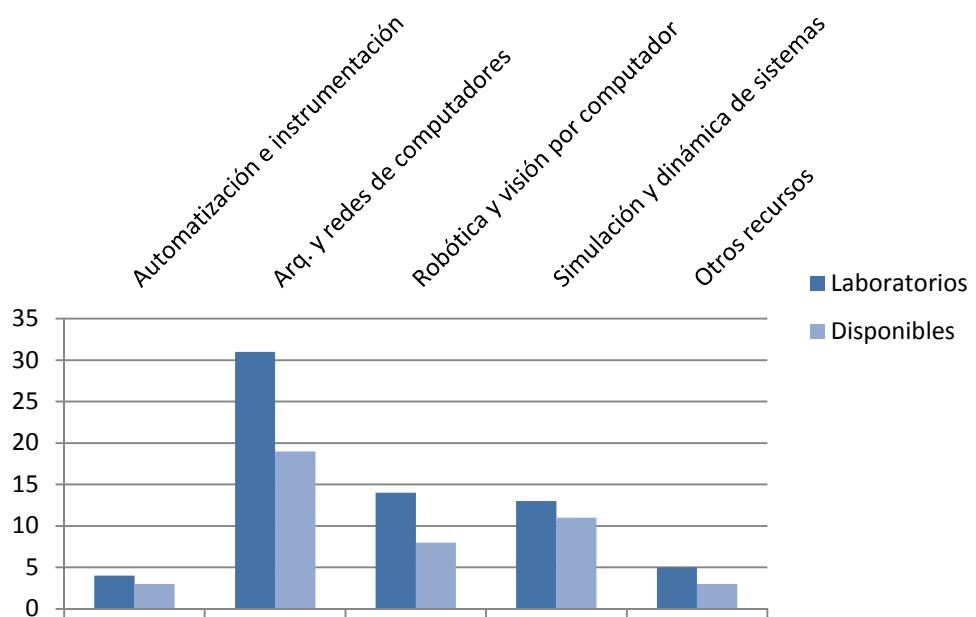


Figura 2. 27. Recursos didácticos disponibles en CEA.

Si bien el Laboratorio de Control en Automática de *eMersion* dispone de varios sistemas, como el control de un péndulo invertido, el control de servos eléctricos o el entrenador de procesos térmicos, al igual que otros laboratorios nombrados con anterioridad, su principal mérito fue haber sabido integrar idóneamente los instrumentos virtuales y/o remotos junto con elaborados servicios docentes. Éstos incluyen consolas de experimentación remota, guiones de trabajo, tareas programadas, sistema de reservas y una herramienta de análisis (*SysQuake Remote*). Quizá uno de los servicios más notables de los que dispone es el espacio virtual denominado *eJournal*, en el que los estudiantes pueden depositar y compartir los *fragmentos de datos* que van obteniendo durante sus sesiones de trabajo [Guzmán, y otros, 2007]. Actualmente, el entorno *eMersion* está siendo mejorado y expandido en el marco de trabajo de *ProLEARN*³⁰.

ProLEARN es un consorcio de universidades y centros de investigación pertenecientes a varios países europeos, entre ellos España, cuya participación está representada por la UPM. La finalidad de *ProLEARN* es proveer un catálogo web para experimentos *online* basado en un esquema especial de metadatos. Su función es proporcionar un listado que facilite el acceso a los experimentos existentes e integrarlos con la ayuda de un entorno técnico y una base de conocimientos accesibles desde la web. Esto permite a los desarrolladores de experimentos, docentes e investigadores, localizar experiencias *online* de interés, adquirir formación técnica para

³⁰ *ProLEARN*, disponible en <http://www.prolearn-project.org>

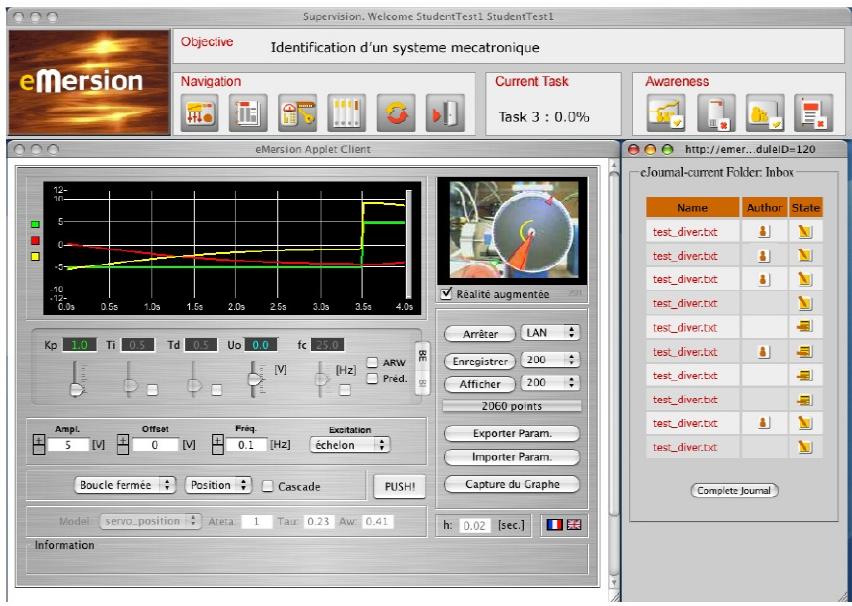


Figura 2. 28. Entorno de experimentación docente de eMersion.

construir sus propios laboratorios y obtener sus propias conclusiones pedagógicas. El esquema de metadatos para laboratorios *online* es la forma de describir experimentos basados en web. El concepto de metadatos es análogo al uso de índices para localizar libros en una biblioteca por medio de autores, títulos, fechas, etc. Su aplicación a los experimentos, como objetos de aprendizaje de los laboratorios, ha sido basada en el esquema de *EducaNEXT*³¹, una plataforma europea para el intercambio de contenido educacional y la creación de conocimiento.

Otra de las experiencias que sirve como ejemplo es *VIEncOD*, un entorno didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la Universidad de Paraná en Brasil. En él se describen varias propuestas para reducir la brecha entre las clases prácticas y teóricas usando herramientas matemáticas asistidas por computador y plantas reales bajo el concepto de instrumentación virtual [Rocha Loures, y otros, 2003]. Asimismo en la Universidad de Maribor (Eslovenia), se dispone también de un innovador laboratorio denominado *MerLab*³². El objetivo de este laboratorio, basado en manipuladores remotos de 6 DOF e instrumentación virtual implementada en LabVIEW™, es la integración del control real y el aprendizaje electrónico a través de la experimentación remota. Como resultado, *MerLab* ha mejorado la formación en cursos de Mecatrónica y Automática [Šafaric, y otros, 2005].

³¹ *EducaNEXT*, disponible en <http://www.educanext.org/>

³² *MerLab*, disponible en <http://www.merlab.eu/index.php/en/domov>

Un referente nacional en el campo del Control y la Automática es *AutomatL@bs*³³, una experiencia docente interuniversitaria cuyo objetivo fundamental ha sido la creación de una red de laboratorios virtuales y remotos para la realización de prácticas a través de Internet. La iniciativa de este proyecto ha sido promovida con la participación de varios grupos de investigación de universidades españolas. Los orígenes se remontan al año 2.000, cuando en la Universidad Politécnica de Valencia se organizaron las I Jornadas de Trabajo sobre *Enseñanza vía Internet-Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*. Como continuación natural de los proyectos *DocenWeb* en el 2.004 y *Educ@* en el 2.005-2006, se creó el proyecto *e-Automatica* coordinado por el grupo *Aurova* de la Universidad de Alicante. Desde entonces, el Grupo Temático de Educación en Automática del CEA ha sido el catalizador de varias acciones financiadas que ha dado, como uno de sus resultados tangibles, la creación de *AutomatL@bs*. Uno de los aspectos notables a destacar, no es sólo la integración de diferentes laboratorios en un mismo espacio que proporcione un sistema de reservas de tiempos y planificación de contenido con fines pedagógicos; quizás la mayor aportación de *AutomatL@bs* ha sido la coordinación de los esquemas de trabajo y contenido, lo que es percibido por los usuarios como un laboratorio de estructura uniforme independiente de la localización física de los sistemas. Una de las mejoras realizadas ha sido la integración de aplicaciones realizadas con *EJS* y *eMersion*, como un nuevo servicio para completar las sesiones de experimentación de los alumnos a través de una consola de experimentación en línea [Vargas, y otros, 2008].

Otro ejemplo español es *RobUALab*³⁴, que es la versión actual de un laboratorio virtual, surgido en el año 1.999 en la Universidad de Alicante, integrado en la iniciativa *AutomatL@bs*. El sistema permite trabajar con una simulación 3D del robot industrial Scrbot ER-IX, y asiste de forma práctica a los estudiantes de asignaturas de Robótica en la experimentación con comandos de posicionamiento del robot (ver Fig. 2.29). La simulación representa de forma muy realista los movimientos y trayectorias del brazo robótico permitiendo, tanto ejecutar en el robot real las trayectorias previamente diseñadas, como comprobar los resultados mediante representaciones gráficas y video [Jara, y otros, 2008].

Otros proyectos que componen el grupo de laboratorios remotos y virtuales de *AutomatL@bs* son, por ejemplo, el control de servomotores (Universidad Miguel Hernández), las prácticas sobre procesos multivariados mediante el sistema de tres tanques, el control de velocidad y posición de motores de continua, la estimación de

³³ Una completa descripción de los laboratorios disponibles en *AutomatL@bs* y de los grupos de investigación que participan en el proyecto puede ser obtenida en <http://lab.dia.uned.es/automatlab>.

³⁴ *RobUALab*, disponible en <http://www.disclab.ua.es/robolab/index.html>

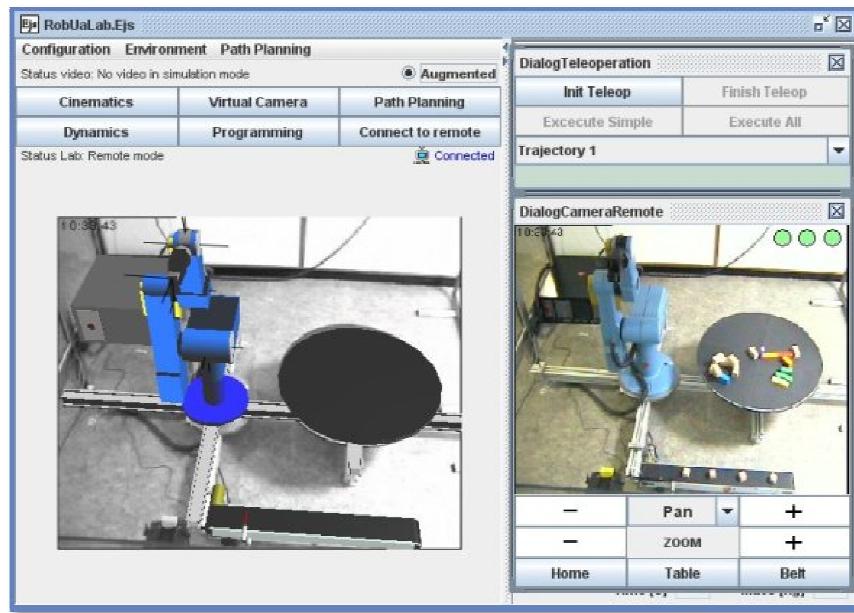


Figura 2. 29. Plataforma pedagógica de RobUaLab.

parámetros del sistema de control del flujo de temperatura (UNED), el control de nivel del sistema de un tanque (Universidad de Almería), el control de nivel y temperatura en un sistema de cuatro variables (Universidad de León), el control de posición de una bola sobre una viga horizontal (Universidad de Valencia) y el control de velocidad sobre un sistema manejado por campos magnéticos (Universidad Politécnica de Cataluña).

2.6. Retos Actuales de los Laboratorios Remotos y Virtuales

Desde mediados de los años 90 estuvieron disponibles muchas herramientas y entornos de programación para desarrollar páginas en Internet, tales como Perl, CGI, ASP, JavaScript, ActiveX, etc. Estas herramientas y entornos de programación, junto con el uso de servidores de páginas HTML y bases de datos, permitieron mejorar las características de los IVs y dotarlos de capacidades de conexión a Internet. Así, el acceso remoto a los instrumentos de un laboratorio mediante una arquitectura web basada en Perl y peticiones CGI, permitió a la Universidad de Singapur en 1.999 compartir costosos equipos de laboratorio entre un grupo elevado de estudiantes (ver Fig. 2.30), a los que de otra forma no hubieran podido acceder [Chen, y otros, 1999]. Sin embargo, una de las desventajas del uso de CGI es que no permiten tener acceso a los resultados durante la ejecución de las mediciones y no se tiene conocimiento del tiempo que puede tardar una respuesta a una solicitud.

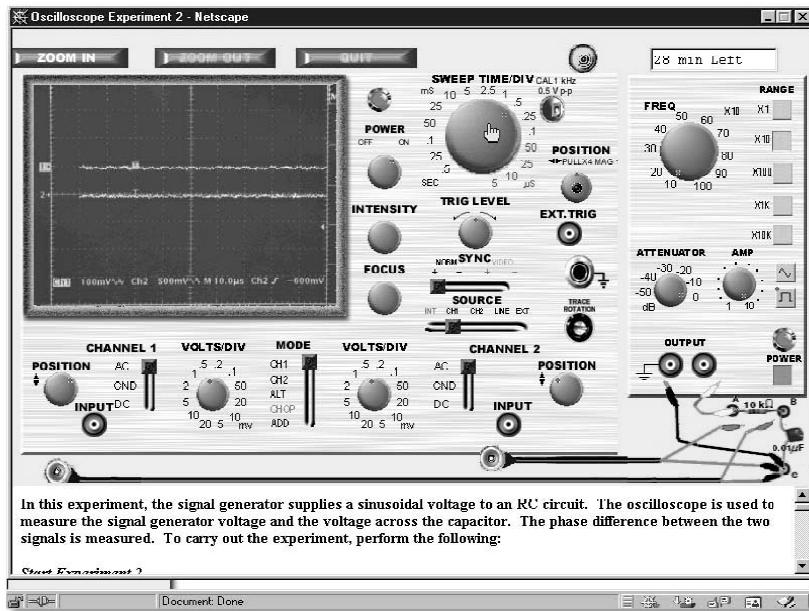


Figura 2. 30. Instrumento virtual de un osciloscopio experimental.

Una de las características de LabVIEWTM que lo dotan como una de las herramientas ideales para la difusión de laboratorios remotos y/o virtuales, es su extensa librería de comunicaciones; entre ellas comprende funciones para DataSocket, TCP, UDP, ActiveX y XML. El uso de estos lenguajes y protocolos permite desarrollar aplicaciones distribuidas en Internet mediante las herramientas *Front Panel Web Publishing* y *VI Server*. El servidor de LabVIEWTM permite embeber los IVs en páginas HTML o JavaScript. Sin embargo, su uso cuenta con algunas desventajas, entre ellas, la imposibilidad de utilizar código PHP en las páginas web. Como solución, es posible utilizar servidores web de terceras partes para albergar los IVs o el uso de llamadas *iframe* hacia las páginas del *VI Server*. Por otro lado, el tamaño y la complejidad del panel frontal del IV afectan al retardo del control de los instrumentos, ya que el IV que se desea ejecutar debe ser cargado en la memoria del servidor [Shenkeshi, y otros, 2006]. Por otro lado, como paso previo requerido por los usuarios, los IVs necesitan distribuirse y ser instalados con el módulo *LabVIEW Run-Time Engine*³⁵ antes de conectarse por primera vez al servidor web de LabVIEWTM. Además, es necesario adquirir una licencia corporativa para cada uso (básico, completo o profesional) y otra secundaria para disponer de herramientas adicionales de Internet³⁶, donde el número de usuarios simultáneos que pueden conectarse al *VI Server* varía en función del tipo de licencia disponible.

³⁵ Versiones disponibles en ftp.ni.com/support/LabVIEW/runtime/

³⁶ LabVIEW Internet Toolkit. Disponible en <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/2501>

La necesidad de disponer de herramientas de distribución gratuitas ha contribuido al desarrollo de nuevas aplicaciones alternativas como LabVNC³⁷ [Travis, y otros, 2009]. Como ejemplo, gracias al uso del protocolo VNC implementado por esta herramienta (ver Fig. 2.31), es posible monitorizar completamente el sistema de medida de un IV desde el navegador del cliente remoto mediante *applets* de Java™ [Donciu, y otros, 2003]. La ventaja de LabVNC, con respecto al *VI Server* de LabVIEW™, es que puede aceptar un número ilimitado de usuarios y crear una representación exacta del IV elegido. Ello posibilita a los usuarios interactuar simultáneamente con el IV mediante un simple navegador web. Existen algunas soluciones propietarias, mediante *applets* de Java™, creadas para ayudar a LabVIEW™ en la publicación de instrumentación virtual en la web. Una de las soluciones presentes desde 1.997 es AppletView™, ⁽³⁸⁾. Una de sus principales aportaciones, además de permitir a los navegadores conectarse a aplicaciones que corren en la máquina local independientemente del sistema operativo, es que permite al programador configurar y dar forma a la interfaz de usuario de acuerdo con las necesidades del IV (ver Fig. 2.32). Un ejemplo se puede encontrar en el Laboratorio de Emisión de Iones de la MIBL, donde se implementó el control de instrumentos y a la adquisición remota de datos para monitorizar los parámetros del experimento mediante una simple petición web [Toader, 2005].

Java™ ha sido utilizado por un gran número de proyectos robóticos, incluyendo el *PUMA Paint* de la Universidad de Wilkes (Pennsylvania) disponible en Internet desde 1.998 [Stein, 2001] y el interfaz del vehículo *Sojourner* de la NASA. Desde hace años, Java™ se está convirtiendo también en el entorno de simulación preferido para modelar sistemas físicos. Tal es el caso de EJS que, creado en la Universidad de Murcia, permite la creación de simulaciones interactivas aplicadas a la enseñanza en Física [Esquembre, 2005]. Las simulaciones son programas de ordenador que contienen el modelo de un proceso físico y permiten su visualización gráfica. EJS permite explorar e

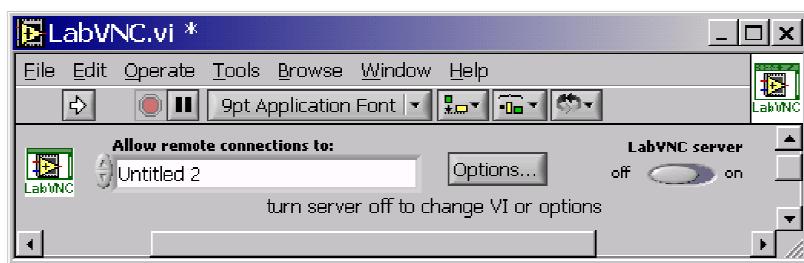


Figura 2. 31. Panel frontal de LabVNC.

³⁷ LabVNC 0.4 disponible en <http://jeffreytravis.com/lost/download/>

³⁸ Nascimiento, Inc. Disponible en <http://appletview.com/>

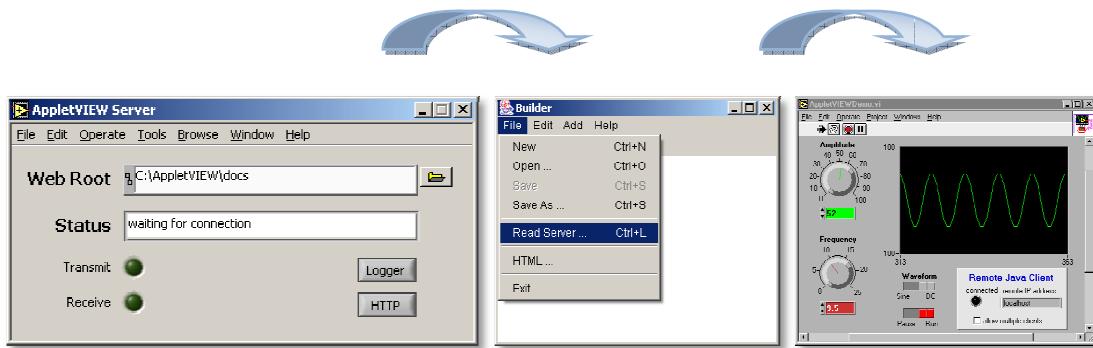


Figura 2. 32. Proceso de publicación web de AppletView™.

interactuar con el sistema simulado cambiando parámetros, modificando su estado y observar el resultado de esa manipulación (ver Fig. 2.33). Una de las ventajas principales de los *applets* de Java™ es la distribución gratuita en forma de pequeñas aplicaciones, bajo licencia pública general de GNU. Estas aplicaciones, embebidas en páginas HTML trasladan el trabajo del servidor al cliente, haciendo una solución web más escalable respecto al número de usuarios [García-Bermejo, 1999]. Sin embargo, como contrapartida, una de las desventajas principales es la falta de control directo sobre sistemas hardware.

La combinación de las simulaciones interactivas por un lado, y la adquisición y el procesamiento de señales por otro, forma una adecuada simbiosis denominada sistema *front-end*. Este término hace referencia a la parte del sistema software encargada de recoger las entradas de los usuarios (lo que se correspondería con EJS). Una vez recibidas las peticiones, éstas son procesadas por el *back-end* (lo que se correspondería con LabVIEW™) para su interpretación de acuerdo con las reglas programadas. Hasta ahora, la comunicación TCP/IP entre *applets* y los IVs se realizaba trabajando directamente con la API de Java™ y la librería de comunicaciones de LabVIEW™. Esta forma de programar mediante *sockets* ha demostrado ser efectiva pero, sin embargo, cada aplicación desarrollada es particular y requiere conocimientos avanzados del programador, lo que degrada la eficiencia de implementación y la escalabilidad de los sistemas. Como una de las soluciones se ideó un nuevo mecanismo para comunicar ambos entornos de forma completamente transparente al programador. Este nuevo mecanismo consiste en la ubicación de una capa *middleware* compuesta por un servidor, denominado *JIL Server*, entre los *applets* y los IVs que realizan el control local de los experimentos ubicados en el laboratorio (ver Fig. 2.34). Mediante este servidor, un *applet* puede modificar y leer en tiempo real los controles e indicadores de cualquier aplicación de LabVIEW™ a través de conexiones TCP/IP, cerrando así el lazo de control del laboratorio remoto [Vargas, y otros, 2008].

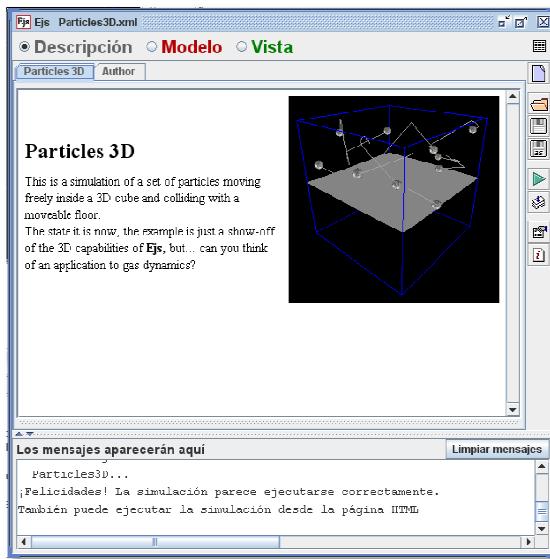


Figura 2. 33. Entorno de programación de EJS.

El ancho de banda requerido representa uno de los factores más importantes a la hora de disponer de instrumentos virtuales a controlar desde Internet. El bajo rendimiento de los servidores tradicionales como el *VI Server*, donde la disponibilidad síncrona de los datos solicitados afecta al refresco de la interfaz HTML, ha propiciado el desarrollo de nuevos entornos de programación asíncronos. Como ejemplo de esta filosofía, puede mostrarse el doble objetivo del sistema de dos tanques acoplados de la UNED (ver Fig. 2.35). Además de contener un laboratorio virtual, permite disponer de un laboratorio remoto basado en un entorno web colaborativo más allá de las meras simulaciones interactivas [Guzmán, y otros, 2007].

En los últimos años están surgiendo nuevas técnicas de publicación de IVs a través de Internet que demandan menos ancho de banda que las propuestas

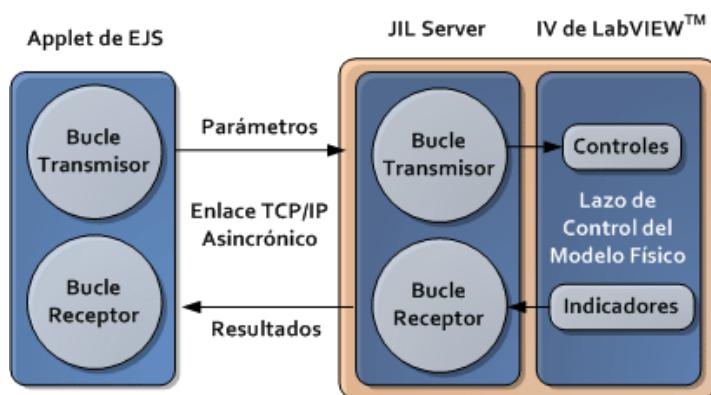


Figura 2. 34. Estructura de comunicación de LabVIEW™ y EJS.

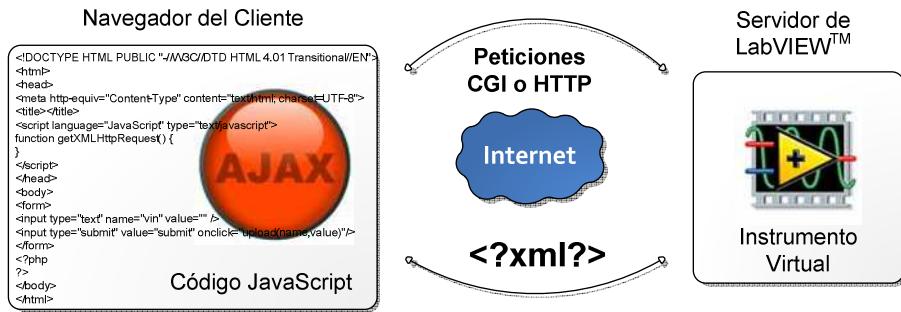


Figura 2. 35. Estructura de comunicación de LabVIEW™ y AJAX.

tradicionales. Combinando el *VI Server*, pero sin necesidad de transferir imágenes del panel frontal del IV o sin requerir la instalación del módulo *LabVIEW Run-Time Engine*, es posible controlar o monitorizar aplicaciones transfiriendo una menor cantidad de datos. Además, aunque la combinación de LabVIEW™ y EJS ofrece un excelente entorno de trabajo que, sin duda, potencia la simulación en laboratorios virtuales y el control de laboratorios remotos, existen grandes desventajas en su implementación. El principal inconveniente es la necesidad de duplicar las interfaces de usuario en el sistema *front-end* y, en ocasiones, incluso la programación duplicada de las ecuaciones que describen el modelo físico del sistema a controlar.

CGI fue una de las primeras tecnologías desarrolladas para el diseño de páginas web dinámicas, constituyendo una interfaz para la comunicación con un servidor HTTP y bases de datos. La función del servidor es eliminar la limitación de que más de un usuario pueda solicitar el control del IV remoto. De esta forma, se interactúa llenando campos de un formulario que son enviados a la aplicación CGI desarrollada en LabVIEW™, que posteriormente responde cargando los resultados correspondientes en otra página web [Pascual Carrazana, y otros]. También, con el objetivo de desarrollar nuevas formas de usar Internet que logren un mejor uso de los recursos se creó AJAX. Acrónimo de *Asynchronous JavaScript And XML*, es una técnica de programación utilizada para crear aplicaciones interactivas a través de Internet. Este mecanismo pasa los datos del servidor web de LabVIEW™ mediante llamadas CGI o peticiones XML hacia la capa de presentación del cliente (ver Fig. 2.36). JavaScript es el lenguaje interpretado en el que normalmente se efectúan las funciones de AJAX, mientras que el acceso a los datos se realiza mediante peticiones XML, objeto disponible en la mayoría de los navegadores de hoy en día. De esta forma, las aplicaciones se ejecutan en el navegador de los usuarios mientras se mantiene la comunicación asíncrona con el servidor en segundo plano. AJAX es una tecnología asíncrona, en el sentido de que los datos adicionales se requieren al servidor y se cargan en segundo plano sin interferir con la visualización ni el comportamiento de la

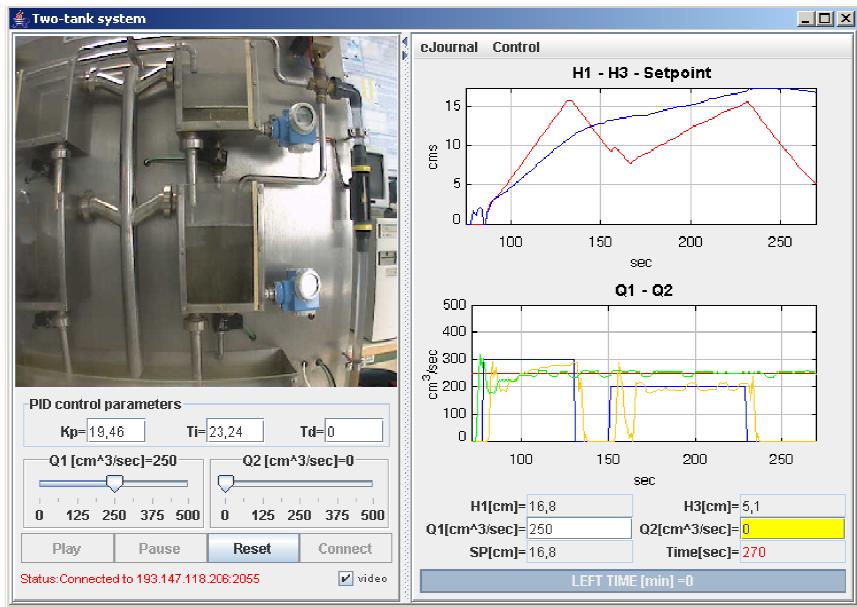


Figura 2. 36. Interfaz del laboratorio virtual del sistema de dos tanques.

página. Los cambios son realizados sobre las páginas sin necesidad de recargarlas, lo que permite aumentar la interactividad, velocidad y facilidad de uso de las aplicaciones.

Un ejemplo de implementación de esta tecnología es AJAXcam³⁹, creado en 2.005 por *Douglas Turecek* para la monitorización de webcams. Al igual que AJAX utiliza una combinación de JavaScript y una modificación de HTML. Esta técnica implementa un código muy ligero para refrescar imágenes sin necesidad de actualizar la página entera. Como consecuencia, esto ahorra ancho de banda y crea la sensación de una presentación mejor. Las ventajas de esta tecnología fueron aprovechadas para el proyecto *Robotoy*⁴⁰, realizado por la Universidad de Wollongong (Australia) para controlar un brazo manipulador Mitsubishi RM-101 de 5 DOF mediante una interfaz web. Más recientemente y en el marco de los laboratorios virtuales integrados en espacios docentes, la aplicación de AJAX en la experiencia *WebLab*⁴¹ de la Universidad de Deusto, ha demostrado ser una tecnología muy eficiente para una gran variedad de plataformas hardware accesibles desde Internet [García Zubia, y otros, 2008].

Con la idea de mejorar los sistemas *front-end*, están surgiendo algunas iniciativas individuales que tratan de desarrollar nuevas formas de conexión basadas en APIs. Una opción mucho más vistosa y sofisticada que los resultados obtenidos con

³⁹ AJAXcam, disponible en <http://www.ajaxcam.com>

⁴⁰ Robotoy, disponible en <http://robotoy.elec.uow.edu.au>

⁴¹ WebLab, disponible en <http://www.weblab.deusto.es>

LabVIEWTM, es el desarrollo de interfaces conectados mediante la tecnología FlashTM. Con la implementación de funciones incluidas en las librerías *XMLSocket* y *Action Script*, es posible desarrollar aplicaciones *.swf que envíen datos a través de un puerto TCP. Como último ejemplo, una propuesta notable de colaboración de *National Instruments* que permite expandir las capacidades de los IVs y publicar simulaciones interactivas basadas en web, se denomina *Connexions*⁴². Mediante *LabVIEW Player* se permite compartir en línea los IVs mediante ejecuciones interactivas con la misma apariencia que FlashTM o JavaTM, sin necesidad de estar familiarizado con la sintaxis necesaria para crear simulaciones.

2.7. Antecedentes de la Tesis

El primer IV desarrollado por el autor, motivo que justifica la línea seguida con LabVIEWTM para la construcción de los instrumentos virtuales y el laboratorio remoto explicados en los siguientes capítulos, es la aplicación desarrollada en 1.998 para el primer observatorio robótico inteligente de España [Castro-Tirado, y otros, 1999]. La misión de este observatorio robótico, que continúa operativo hoy en día, es la de buscar contrapartidas ópticas de explosiones de rayos gamma ocurridas en el Universo [Berná Galiano, y otros, 2002]. El instrumento virtual (ver Fig. 2.37), desarrollado dentro del Proyecto BOOTES⁴³, fue programado en LabVIEWTM 4.0 —hoy se dispone ya de la versión 9.0 con múltiples posibilidades más avanzadas— y utilizaba una tarjeta de adquisición de datos para tomar medidas de variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, iluminación, velocidad y dirección del viento). En función de las condiciones del entorno, el IV tenía el objetivo de controlar el sistema de apertura automatizado de un observatorio astronómico (BOOTES-1) situado en las instalaciones del INTA en El Arenosillo, Mazagón, Huelva [Mateo Sanguino, 1998]. Dicho instrumento virtual estuvo también en funcionamiento en un segundo observatorio astronómico (BOOTES-2), situado en la Estación Experimental de La Mayora (Algarrobo-Costa, Málaga) del CSIC. Hasta 2.005, el IV sufrió diferentes evoluciones para extender sus capacidades de instrumento virtual hacia el control remoto y la disponibilidad en Internet. Una nueva implementación, que incorporó capacidades de control remoto mediante el envío de comandos en mensajes SMS (ver Fig. 2.38), permitió a los usuarios autenticados controlar el sistema en cualquier momento únicamente mediante sus propios teléfonos móviles GSM [Mateo Sanguino, 2001].

⁴² Connexions, disponible en <http://cnx.org/>

⁴³ Disponible en <http://laeff.inta.es/BOOTES/>

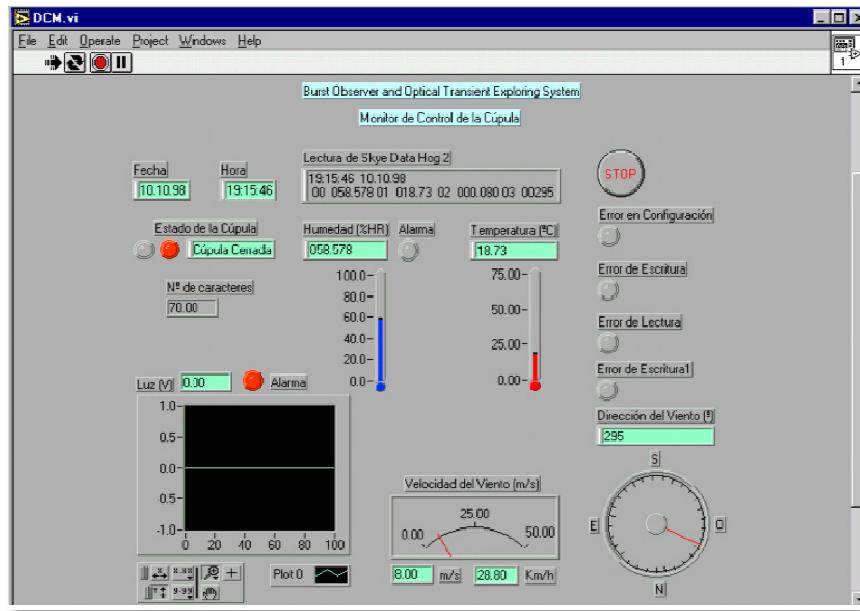


Figura 2. 37. IV del Proyecto BOOTES (1.998).

En 2.002, una nueva versión del instrumento virtual incorporó al mismo un cliente FTP para enviar imágenes de una webcam (ver Fig. 2.39). Ello permitía, por vez primera, monitorizar visualmente el estado de las cúpulas del observatorio astronómico [Mateo Sanguino, 2005]. Una versión posterior, desarrollada con la distribución LabVIEW™ 6.1 para Linux (ver Fig. 2.40), permitió como novedad implementar un método automático de enlace GPRS para proporcionar conectividad IP

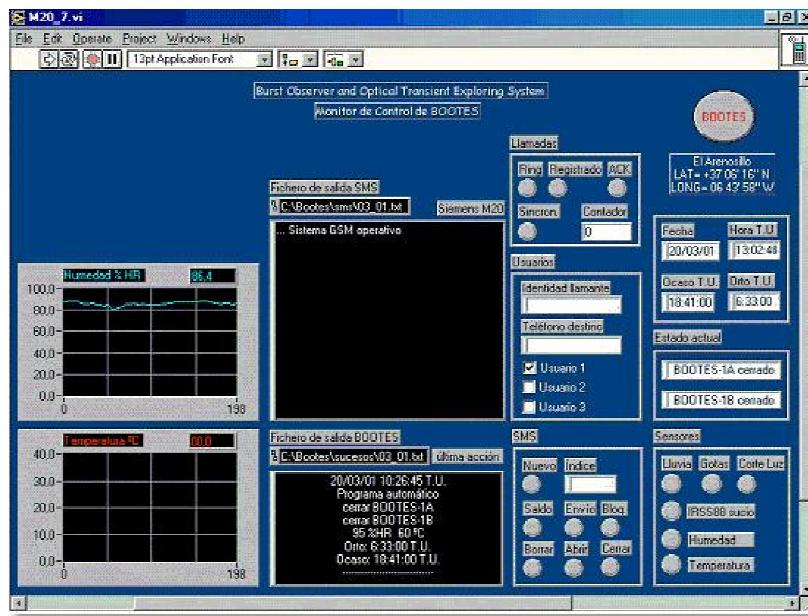


Figura 2. 38. IV remoto del Proyecto BOOTES (2.001).



Figura 2. 39. IV de monitorización web del Proyecto BOOTES (2002).

a la red privada del Proyecto BOOTES [Mateo Sanguino, 2003]. Aplicable también en entornos alejados donde es inviable la conexión a Internet, como son habitualmente los observatorios astronómicos, una de las aportaciones de este instrumento virtual fue el envío de archivos de registro (archivos *log*) y pequeñas cantidades de datos a través de un enlace de comunicaciones móvil como vía de respaldo en caso de fallo de las conexiones de Internet.

2.8. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos

En este capítulo se ha llevado a cabo un recorrido de la evolución de la Automática, realizando una breve descripción desde su génesis hasta la aparición de la Robótica tal como se conoce actualmente. En este camino es importante destacar la figura de algunos personajes célebres —y no tan reconocidos por sus coetáneos— como *Nikola Tesla* o *Leornardo Torres Quevedo*, el padre de la disciplina de la

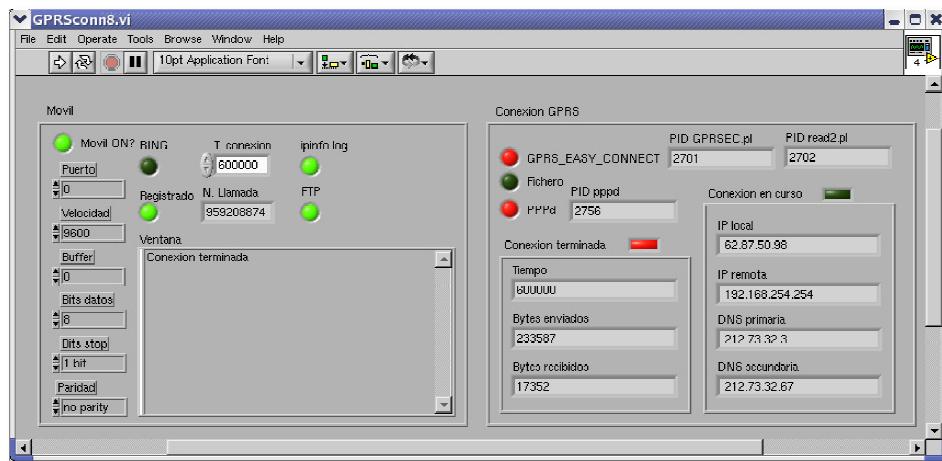


Figura 2. 40. IV de conexión GPRS del Proyecto BOOTES (2003).

Automática en España. A partir de ahí se recogen los principales hitos históricos relacionados con los capítulos 3, 4, 5 y 6 de esta Tesis: vehículos robóticos, manipuladores, laboratorios virtuales y/o remotos. Por este motivo, se ha incluido un epígrafe dedicado a describir los *Antecedentes de la Tesis*.

Una de las principales fuentes consultadas sobre nuevas aplicaciones de la Robótica es la de [Barrientos, y otros, 2007]; sin duda, un libro sobre fundamentos de Robótica al que todo alumno o investigador debería acudir cada cierto tiempo. En el campo de los laboratorios remotos, otra de las obras referentes es la de [Goldberg, y otros, 2001]. En ella, el MIT recoge aspectos tan relacionados como la Robótica *online*, la manipulación remota o el retardo en el control de sistemas reales a través de Internet. Por otro lado, para entender las diferentes formas en que puede usarse LabVIEWTM y las tecnologías de Internet para distribuir instrumentos virtuales en la web, es más que recomendable la lectura de la obra de [Travis, 2000]. A este respecto, tanto si quieren mejorarse las capacidades de los IVs de LabVIEWTM como si quieren distribuirse únicamente simulaciones interactivas, es de lectura obligada el libro de [Esquembre, 2005]. Esta obra representa un manual paso a paso que permite al usuario crear, de forma sencilla, *applets* de JavaTM con fines de enseñanza o aprendizaje.

La aparición de los laboratorios virtuales ha sido liderada internacionalmente por universidades, hecho que justifica su naturaleza docente. En España, los miembros del Grupo de Educación en Automática del CEA representan la mayor apuesta. Sus resultados se traducen principalmente en las jornadas de *Enseñanza a Través de Internet-Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática* (EIWISA). Una de las aportaciones realizadas en este capítulo son los resultados obtenidos tras consultar los robots reales —asociados a la NASA— accesibles desde Internet. Para completar el estudio, los resultados han sido contrastados exhaustivamente con otras fuentes como la revista IJEE y los laboratorios descritos en [Candelas Herías, y otros, 2005] disponibles en la página web del CEA (ver Figs. 2.26 y 2.27). En resumen, los recursos didácticos disponibles abarcan prácticamente todas las disciplinas de la Automática. El denominador común es que los sistemas reales ubicados en Internet tienen una vida corta, teniendo una mayor disponibilidad el software de simulación y la instrumentación virtual que los laboratorios remotos.

Otro de los resultados aportados por este capítulo es la revisión de las distintas tecnologías de programación basadas en web, destacando sus ventajas y desventajas, así como el aporte de diferentes ejemplos de su aplicación. Desde el desarrollo inicial de los laboratorios remotos y virtuales, los retos marcados han sido proporcionar una mayor interactividad y servicios a los usuarios, junto con la facilidad de programación

(ver Fig. 2.41). Actualmente, la tendencia está situada en enmarcar estas herramientas en un entorno docente integrado con el aprendizaje virtual, llenos de contenidos que hagan las prácticas de laboratorio más atractivas para los usuarios. A priori no existe una técnica claramente destacada sobre las demás, sin embargo el éxito dependerá de diferentes factores como lo son: la libre distribución, las herramientas asincrónicas que minimicen el ancho de banda y la mejora de los sistemas *front-end*. En este sentido, tras varios años de investigación (desde 1.996), ha surgido en los últimos meses un auge por la realidad aumentada que se ha visto relanzada, a través de los juegos de entretenimiento, por las grandes multinacionales.

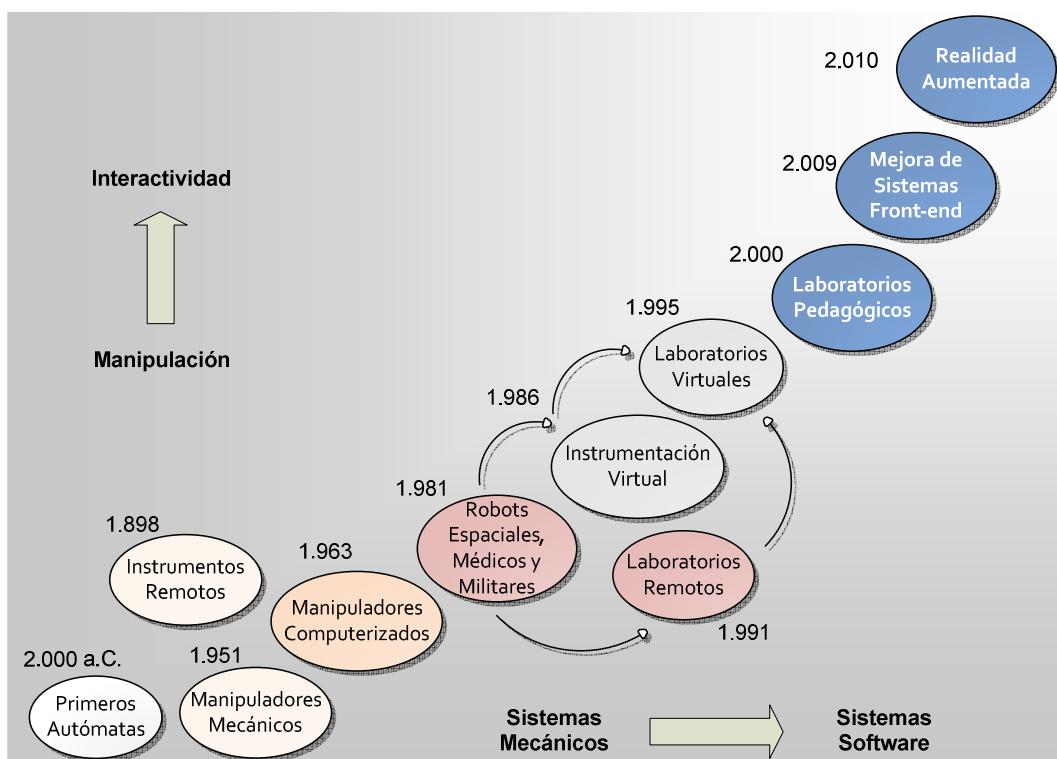


Figura 2. 41. De la automática antigua a los laboratorios virtuales y remotos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barocio, F. (1572). *Heronis Mechanici : liber de machinis bellicis, necnon liber de geodaesia.*
- Barrientos, A. (2002). Nuevas Aplicaciones de la Robótica. Robots de Servicio. En *Avances en Robótica y Visión por Computador* (págs. 231-256). Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica (2ª Edición)*. Madrid: McGraw-Hill.
- Berná Galiano, J., Castro-Tirado, A., Mateo Sanguino, T., Castro Cerón, J., de Ugarte Postigo, A., & Gorosábel Urquía, J. (2002). Bootes: un Robot para la Búsqueda de Explosiones de Rayos Gamma en el Universo. *XXIII Jornadas de Automática*, (págs. 1-4). La Laguna, Tenerife.
- Brady, K., & Tarn, T. (2001). Handling Latency in Internet-Based Teleoperation. En *Beyond Webcams, An Introduction to Online Robots* (págs. 171-192). The MIT Press.
- Cabrera Jiménez, O. (1996). La Robótica Pedagógica. *Soluciones Avanzadas* , Núm. 40, págs. 1-7.
- Candelas Herías, F., & Sánchez Moreno, J. (2005). Recursos Didácticos Basados en Internet para el Apoyo a la Enseñanza de Materias del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* , Vol. 2, Núm. 2, págs. 93-101.
- Casini, M., Prattichizzo, D., & Vicin, A. (s.f.). *E-Learning by Remote Laboratories: A New Tool for Control Education*. Recuperado el 24 de agosto de 2009, de http://act.dii.unisi.it/reports/act_c3.pdf
- Castro-Tirado, A., Soldán, J., Rezek, T., Hudec, R., Bernas, M., Páta, P., y otros. (1999). The Burst Observer and Optical Transient Exploring System (BOOTES). *Astronomy & Astrophysics* , Vol. 138, págs. 583-585.
- Cebrián, J., Canales, C., & Callejo, J. (19 de Enero de 2003). Autómatas Medievales. *La Rosa de los Vientos*. Onda Cero.
- Cebrián, J., Canales, C., & Callejo, J. (24 de Marzo de 2003). Leonardo Torres Quevedo. *La Rosa de los Vientos*. Onda Cero.

- Cebrián, J., Canales, C., & Callejo, J. (junio de 2001). Ranking de OoPArts. *La Rosa de los Vientos*. Onda Cero.
- Chen, S., Chen, R., Ramakrishnan, V., Hu, S., Zhuang, Y., Ko, C., y otros. (1999). Development of Remote Laboratory Experimentation through Internet. *IEEE Hong Kong Symposium on Robotics and Control*, (págs. 756-760). Hong Kong, R.P. China.
- Donciu, C., Cretu, M., & Fosalau, C. (2003). A Measurement System for Remote Teaching and Education. *XVII IMEKO World Congress*, (págs. 792-795). Dubrovnik (Croacia).
- Esquembre, F. (2005). *Creación de Simulaciones Interactivas en Java*. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Ferrer i Perez, V., & Bataller López, G. (s.f.). *Introducción a la Misión Pathfinder*. Recuperado el 26 de agosto de 2009, de Universidad Politécnica de Valencia: <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo15/Marte/PF/PFIInd.html>
- García Zubia, J., López de Ipiña, D., & Orduña, P. (2008). Mobile Devices and Remote Labs in Engineering Education. *ICALT2008*, (págs. 1-3). Santander.
- García-Bermejo, J. (1999). *Guía en 10 Minutos Java 2*. Madrid: Prentice Hall Iberia, SRL.
- Goldberg, K., & Siegwart, R. (2001). *Beyond Webcams, An Introduction to Online Robots*. The MIT Press.
- Goldberg, K., Gentner, S., Sutter, C., & Wiegley, J. (1999). The Mercury Project: A Feasibility Study for Internet Robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine* , Vol. 7, Núm. 1, págs. 35-40.
- González de Diego, J. (2000). *Bases y Desarrollos Iniciales para el Uso de la Teleoperación en Cirugía Cardíaca*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Guzmán, J.L., Vargas, H., Sánchez, J., Berenguel, M., Dormido, S., y otros. (2007). Education Research in Engineering Studies: Interactivity, Virtual and Remote Labs. *Distance Education Research Trends, Nova Science Publisher* , págs. 1-43.
- Henry, J. (1996). Controls Laboratory Teaching via The World Wide Web. *ASEE*. Washington DC, EEUU.
- Hesselink, L., Bjornson, E., & Rizal, D. (2000). CyberLab, A New Paradigm in Distance Learning. *NSF Meeting*.

- Jara, C., Candelas, F., & Torres, F. (2008). Robolab.ejs: a new tool for robotics e-learning. *Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2008)*. Düsseldorf, Alemania.
- Kosuge, K., Kikuchi, J., & Takeo, K. (2001). VISIT: A Teleoperation System via the Computer Network. En *Beyond Webcams, An Introduction to Online Robots* (págs. 216-226). The MIT Press.
- Mascha, M., Gentner, S., Rossman, J., & Rothenberg, N. (1995). Beyond the Web: Manipulating the Real World. *Computer Networks and ISDN Systems Journal*, Vol. 28, Núm. 1.
- Mateo Sanguino, T. (2003). *Control Remoto Automático Mediante un Enlace GPRS*. Diploma de Estudios Avanzados, Universidad de Granada.
- Mateo Sanguino, T. (2005). Desarrollos Técnicos en BOOTES-1 y BOOTES-2 (1998-2004). En *Astrofísica Robótica en España* (págs. 19-34). Equipo Sirius.
- Mateo Sanguino, T. (1998). *Sistema de Apertura Automatizado de un Observatorio Astronómico en la Estación de Sondeos Atmosféricos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Huelva.
- Mateo Sanguino, T. (2001). *Sistema de Apretura GSM de un Observatorio Astronómico*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Granada.
- Moñux Chércoles, D. (2001). *Historia de la Automática*. Universidad de Valladolid.
- Niemeyer, G., & Slotine, J. (2001). Toward Bilateral Internet Teleoperation. En *Beyond Webcams, An Introduction to Online Robots* (págs. 193-213). The MIT Press.
- Otmane, S., Mallem, M., Kheddar, A., & Chavand, F. (2000). Ariti: an augmented reality interface for teleoperation on the Internet. *Advanced Simulation Technologies Conf. (ASTC2000)*, (págs. 254-261). Washington DC, EEUU.
- Pascual Carrazana, C., & Valdés Zaldivar, E. (s.f.). *Aplicación de la Instrumentación Virtual Remota en la Educación a Distancia*. Recuperado el 1 de Abril de 2010, de Instituto Superior Politécnico Antonio Echeverría: <http://www.bibliociencias.cu/gsdl/collect/eventos/index/assoc/HASH377c.dir/doc.pdf>
- Rocha Loures, E., da Silveira, M., Antonio Busetti, M., & Arda, Y. (2003). Enhancing Control Engineering Education using a CACSD Didactic Environment. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (págs. 2205-2212, Vol. 3).

Šafaric, R., Trantic, M., Hercog, D., & Pacnik, G. (2005). Control and Robotics Remote Laboratory for Engineering Education. *International Journal on Online Engineering* , Vol. 1, Núm. 1, págs. 1-8.

Sánchez-Martín, F., Millán Rodríguez, F., Salvador Bayarri, J., Palou Redorta, J., Rodríguez Escobar, F., Esquena Fernández, S., y otros. (2007). Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci. *Actas urológicas españolas: Organo oficial de difusión de la Asociación Española de Urología* (págs. 69-76). Vol. 31, Núm. 2.

Sartorius Castellanos, A., Hernández Santana, L., Rubio, E., Santana Ching, I., & Aracil Santonja, R. (2006). Virtual and Remote Laboratory for Robot Manipulator Control Study. *Int. J. Engng Ed.* , Vol. 22, Núm. 4, págs. 702-710.

Shenkeshi, N., Fortenberry, M., & Kawachi, Y. (2006). *Remote Panels in LabVIEW: Distributed Application Development*. Recuperado el 9 de Abril de 2010, de <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4791>

Sheridan, T., & Ferrel, W. (1963). Remote Manipulative Control with Transmission Delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* , págs. 25-29.

Simmons, R., Fernandez, J., Goodwin, R., Koenig, S., Oapos, & Sullivan, J. (2000). Lessons learned from Xavier. *IEEE Robotics & Automation Magazine* , Vol. 7, Núm. 2, págs. 33-39.

Stafford-Fraser, Q. (2001). The Life and Times of the First Web Cam: When convenience was the mother of invention. *Communications of the Association for Computing Machinery* , Vol. 44, Núm. 7, págs. 25-26.

Stein, M. (2001). One Year of Puma Painting. En *Beyond Webcams, An Introduction to Online Robots* (págs. 277-293). The MIT Press.

Stroupe, A., Singh, s., Simmons, R., Smith, T., Tompkins, P., Verma, V., y otros. (2002). *Technology For Autonomous Space Systems*. Pittsburg, Pennsylvania: The Robotics Institute Carnegie Mellon University.

Taylor, K., & Trevelyan, J. (1995). Australia's Telerobot on the web. *26th International Symposium on Industrial Robotics*, (págs. 39-34).

Toader, O. (2005). Remote Data acquisition and Instrument Control Using Labview and Appletview. *International Journal of Online Engineering* , Vol. 1, Núm. 2, págs. 1-5.

Travis, J. (2000). *Internet Applications in LabVIEW*. Upper Saddle River, EEUU: Prentice Hall PTR.

- Travis, J., Cloughley, G., & Gerlach, S. (2009). *LabVIEW Open Source Tools*. Recuperado el 28 de Julio de 2009, de <http://jeffreytravis.com/lost/labvnc.html>
- Vargas, H., Dormido, S., & Sánchez, J. (2008). *LabVIEW en la Enseñanza del Control: Laboratorios Virtuales y Remotos de Automática*. Recuperado el 28 de julio de 2009, de NI Days 08: <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-11089>
- Vargas, H., Sánchez, J., & Dormido, S. (2008). Acceso Extendido a Recursos de Experimentación a Través de Internet: La Experiencia Automatl@bs. *XXIX Jornadas de Automática*, (págs. 1-8). Tarragona.
- Vicedo Carabaloso, L., Valdés Zaldivar, E., & Castañeda Hevia, A. *La Instrumentación Virtual Remota en la Intranet Académica con Fines Docentes*. Cuba: Universidad de Ciego de Ávila.
- Weisbin, C. (2005). Documental Supermáquinas. (D. Channel, Entrevistador)

CAPÍTULO 3. VANTER: PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL DE USO EDUCACIONAL

El enfoque, metodología y objetivos de un proyecto de investigación con fines educacionales en Ingeniería, suelen distar bastante de los de un proyecto con fines teóricos, aplicados o industriales. No se busca tanto la novedad científica del dispositivo y/o aplicación desarrollados como su aplicabilidad a la docencia y a la mejora del rendimiento del alumnado. Más aún, los proyectos de investigación educacional en Ingeniería, y en general en otras disciplinas, tienen mucho más razón de ser si los propios alumnos a los que van dirigidos participan en todas o algunas tareas del proyecto. Esta es la razón de ser de VANTER (Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento), plataforma robótica móvil dotada de brazo manipulador, desarrollada con el objetivo de ensayar y poner a punto, con fines educativos, diferentes estrategias de control remoto, visión artificial, y adquisición y procesamiento de señales. VANTER se considera un instrumento de invaluable interés desde el punto de vista didáctico y su finalidad es la de incorporar a la docencia aquellos resultados derivados de la investigación realizada. Realmente, tal como se verá a lo largo de esta Tesis doctoral, VANTER constituye uno de los pilares en los que se apoya el laboratorio virtual y remoto desarrollado, objetivo general de la Tesis.

El capítulo se organiza del modo siguiente. El apartado *Vehículos Robóticos Educacionales* ayuda a explicar el origen docente de los sistemas robóticos de exploración y el por qué de su concepto de diseño basado en los *rovers*. En este apartado se exponen algunos ejemplos notorios de desarrollo de vehículos con propósito merañente didáctico y se comparan sus características principales con la

idea de introducir la plataforma robótica VANTER que se explica a continuación. Es por esto que, en la sección siguiente, se presenta el vehículo robótico VANTER. Aquí se describen sus desarrollos desde una perspectiva global del sistema hasta sus partes individuales, concretando en las implementaciones de hardware y software realizadas. Se describen sus características y funciones, incluyendo figuras y esquemas de los sistemas. Las secciones 3 y 4 se centran en la descripción de los IVs del sistema de navegación y del sistema de la microcámara inalámbrica. La sección siguiente está dedicada a mostrar un sistema de adquisición de imágenes y visión, cuyas pruebas han sido realizadas sobre la plataforma VANTER. Finalmente, se analizan los propósitos educativos de VANTER y se presentan las conclusiones.

3.1. Vehículos Robóticos Educacionales

El significado de robot móvil, según las definiciones normalizadas por ciertos organismos internacionales como la IFR¹ o la ISO, es el de un robot que contiene todo lo necesario para su pilotaje y movimiento, incluyendo potencia, control y sistema de navegación. Las piernas pueden ser el mejor sistema de transporte en la Tierra pero, para la exploración del espacio, con ellas los robots serían demasiado pesados y torpes. Con piernas se utiliza más energía que con ruedas y para las aplicaciones espaciales se necesita el menor consumo de energía posible. Por ello, no sólo se utiliza electrónica de bajo consumo a bordo, sino también formas de movilidad de bajo consumo. La NASA utilizó las investigaciones de diferentes áreas de la Robótica para desarrollar sondas espaciales móviles. Las sondas proporcionan movilidad y puede pensarse en ellas como una plataforma de instrumentos móvil. De esta forma, las sondas permiten la movilidad gracias a la cual las herramientas científicas pueden desplazarse, sentir y ver los diferentes entornos a los que están expuestas [Weisbin, 2005].

Los diseños de la NASA [Bajracharya, y otros, 2008], sirvieron de inspiración a diferentes vehículos robóticos creados en el entorno de las universidades. El EPFL representa un buen ejemplo donde se han realizado y probado con éxito varios vehículos robóticos. Tales son los casos de *Koala* —fabricado por la empresa K-Team y probado en el desierto de Arizona en 1.996— o *SOLERO*², un *rover* desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Autónomos del EPFL junto con el *von Hoerner & Sulger GmbH* (vH&S) auspiciado bajo un contrato de la ESA. El hito principal de SOLERO ha sido el

¹ IFR, disponible en <http://www.ifr.org/>

² *Solar Powered Exploration Rover*, disponible en <http://asl.epfl.ch/index.html?content=research/systems/Solero/solero.php>

diseño de un innovador sistema mecánico (llamado estructura *shrimp*) que le confiere una adaptación pasiva en terrenos abruptos. Ello le permite reducir las necesidades de consumo y mostrar excelentes habilidades para escalar obstáculos sin ningún control específico [Michaud, y otros, 2002]. Por su parte, el Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon ha trabajado con el *rover Bullwinkle*³ que estuvo integrado en el Programa de Robótica Inteligente de la NASA [Singh, y otros, 2000]. Su enfoque estuvo dirigido al área de la navegación autónoma mediante el empleo de algoritmos de detección de obstáculos y planificación de trayectorias. Por otro lado, el Departamento de Ingeniería Mecánica del MIT también se ha centrado en el desarrollo de métodos y algoritmos para el diseño, planificación y control de exploradores robóticos basados en la cinemática de estos sistemas [Iagnemma, y otros, 1999]. La Universidad de Tohoku (Japón) ha dedicado sus esfuerzos al estudio del comportamiento cinemático de las ruedas del *rover Nexus 6* sobre un terreno arenoso [Yoshida, y otros, 2003]. En la Universidad de Chulalongkorn (Bangkok, Tailandia) se abordó el diseño de las suspensiones de vehículos robóticos con el objetivo de comparar los movimientos de las configuraciones 4WD⁴ y *Rocker-Bogie*⁵ montada en el prototipo *LoNoTech* [Thianwiboon, y otros, 2001]. Finalmente, el uso de LabVIEW™ para la programación de un IV fue utilizado en un prototipo de robot móvil concebido para la navegación en terrenos irregulares. El diseño y construcción de este vehículo —denominado *RTT*— ha abarcado la implementación de otros subsistemas, como por ejemplo la comunicación inalámbrica, sensores que faciliten cierto grado de autonomía y control, sistemas GPS, etc. [Arroyave, y otros, 2006].

Con el objetivo de presentar a la plataforma robótica VANTER, como pieza importante del concepto de laboratorios virtuales y remotos objeto de la Tesis (ver Capítulo 6), se comparan las características y propiedades de los vehículos robóticos con propósitos académico y educativo anteriormente citados (ver Tabla 3.1). El objetivo común perseguido en la concepción de estos proyectos ha sido el de servir como plataformas de investigación y desarrollo de aplicaciones educativas. En el caso de VANTER, dicho objetivo se cumplió, pues permitió proponer proyectos de investigación y formación en un amplio campo de aplicaciones como la mecánica, electrónica, robótica e informática.

³ Modelo ATRV-II de la empresa RWI, Inc (actualmente iRobot).

⁴ La tracción en las cuatro ruedas o tracción total es un sistema de tracción en un vehículo en el que todas las ruedas pueden recibir simultáneamente la potencia del motor.

⁵ Sistema de suspensión usado en las misiones *Mars Pathfinder* y *Mars Exploration Rover*. El término *rocker* se refiere al aspecto robusto de los segmentos de cada cara del sistema de suspensión. El término *bogie* se refiere a los segmentos que tienen ruedas motrices en cada extremo. Los *rockers* están conectados al chasis mediante un engranaje diferencial. De esta forma, el chasis mantiene al ángulo medio de los dos segmentos al sobrepasar un obstáculo.

Nombre	Universidad	Características Principales	Dimensiones	Ruedas	IV	Año
Koala	EPFL (Suiza)	Reducido tamaño	32 x 32 x 20 cm	6	Sí	1.996
Bullwinkle	Carnegie Mellon (EEUU)	Planificación de trayectorias y detección de obstáculos	37 x 55 x 63 cm, 116 Kg	4	No	1.999
FSRL	MIT (EEUU)	Manipulador de 3 DOF y suspensión <i>Rocker-bogie</i>	6,1 Kg	6	Sí	1.999
SOLERO	EPFL (Suiza)	Paneles solares y estructura <i>shrimp</i>	88 x 60 x 45 cm, 12 Kg	6	No	2.002
Nexus 6	Tohoku (Japón)	Suspensión <i>Rocker-bogie</i>	40 x 40 cm, 5,8 Kg	6	No	2.002
LoNoTech	Chulalongkorn (Tailandia)	Suspensión <i>Rocker-bogie</i>	31 x 35 x 38,5 cm, 7,5 Kg	6	No	2.003
VANTER	Huelva	Manipulador de 5 DOF, cámara y ruedas independientes	35 x 75 x 30cm, 12 Kg	4	Sí	2.005
RTT	Pol. Jaime Isaza Cadavid (Colombia)	Suspensión <i>Rocker-bogie</i>	—	6	Sí	2.006

Tabla 3. 1. Principales características de algunos vehículos robóticos educacionales.

3.2. Vehículo Robótico VANTER

VANTER, acrónimo de *Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento* es un prototipo aún en desarrollo que está orientado a trabajar en modo guiado y automático (ver Fig. 3.1). Su reducido peso (no más de 12 Kg), pequeño tamaño (35 x 75 x 30 cm) y versatilidad lo hacen muy apropiado como equipo de pruebas. Estas características permitirían que futuras versiones de VANTER puedan trabajar en ambientes y condiciones de trabajo donde las personas no pueden hacerlo.

El desarrollo del prototipo ha sido dividido en varias fases de diseño, ensamblaje y programación del hardware. Estas fases implican la implementación de una plataforma móvil con posicionamiento y tracción independiente, un brazo robótico manipulador, sistemas de control y adquisición de datos basados en motores y sensores, una red de microcontroladores maestros-esclavos con comunicación a alta velocidad, un interfaz virtual de control remoto en tiempo real mediante radioenlace y un sistema de visión artificial mediante realimentación de imágenes de una micro cámara actualmente en desarrollo.

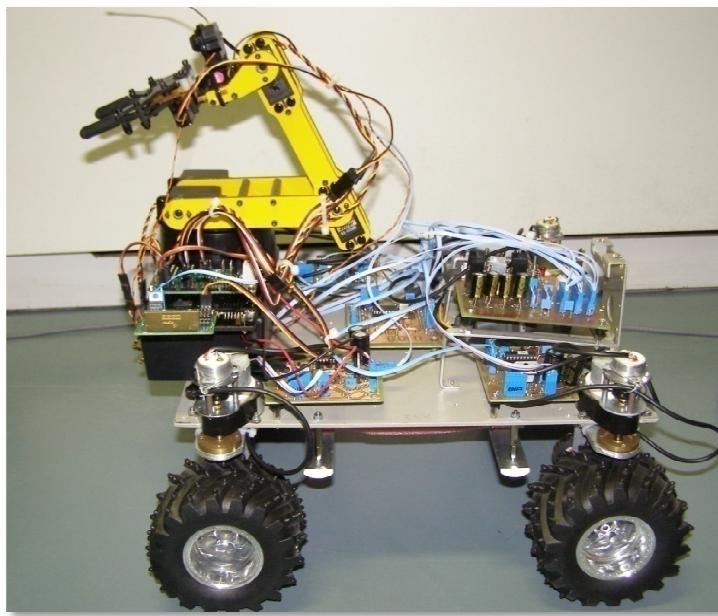


Figura 3. 1. Vehículo robótico VANTER.

Desde el principio del proyecto, el desarrollo del prototipo robótico VANTER ha sido dividido en diferentes fases de planificación, ensamblaje y programación del hardware. Estas fases han alcanzado con éxito los siguientes puntos:

- Diseño mecánico de una plataforma formada con motores DC para proporcionar movimientos lineales y circulares, compuesta de potenciómetros de posicionamiento [Andújar Márquez, y otros, 2005]. En ese sentido, el diseño de las ruedas ha sido adaptado para obtener un sistema más robusto y el hardware electrónico ha sido realizado en PCB.
- Diseño mecánico de un brazo robótico manipulador con 5 DOF equipado con pinzas capaces de recoger pequeñas muestras sólidas del suelo [Andújar Márquez, y otros, 2005].
- Red de microcontroladores maestro-esclavo basada en el bus I2C para controlar la plataforma robótica y brazo manipulador [Andújar Márquez, y otros, 2006].
- IV dedicado a controlar remotamente la aplicación hardware por medio de un sistema de comunicación UHF punto-a-punto. En este caso, se han llevado a cabo nuevas funciones mejoradas en el protocolo original entre el IV remoto y la red de microcontroladores. Las mejoras incluyen un nuevo juego de telecomandos y paquetes de telemetría.

3.2.1. Elementos Mecánicos y Electrónicos

VANTER dispone de un juego de cuatro ruedas acopladas a un chasis plano que pueden girar de forma independiente. Gracias al control individual de cada rueda es posible ofrecer diferentes configuraciones que permitan distintas formas de locomoción. Estos modos de desplazamiento son programados en alto nivel, pudiendo el usuario seleccionar la combinación que mejor se adapte a las necesidades del movimiento a través de comandos del IV. En la Figura 3.2 se puede observar una representación de los distintos tipos de configuraciones y maniobras: (a) configuración Ackerman, (b) configuración 4WD, (c) configuración síncrona, (d) maniobra del cangrejo (*crabbing*), (e) movimiento de rotación y (f) giro con centro de rotación inercial.

La tracción y fricción sobre el suelo dependen del tipo de suspensión, forma de la rueda y del control de su fuerza. Las cuatro ruedas de VANTER están sustentadas mediante una suspensión pasiva independiente de doble horquilla de aluminio que absorbe las vibraciones del terreno. Con este diseño de suspensión, VANTER gana mayor maniobrabilidad aunque no puede moverse a lo largo de grandes obstáculos, al contrario que otros tipos de suspensión como la *Rocker-Bogie* [Bickler, 1998]. Por el contrario, debido a sus 6 ruedas, ésta última funciona bien cuando el movimiento es sólo hacia adelante y atrás. Por ello, en la fase de diseño inicial es de gran importancia la elección de los motores, que dependen de diferentes factores tales como sus características de funcionamiento, tamaño y peso. La opción de utilizar motores PaP

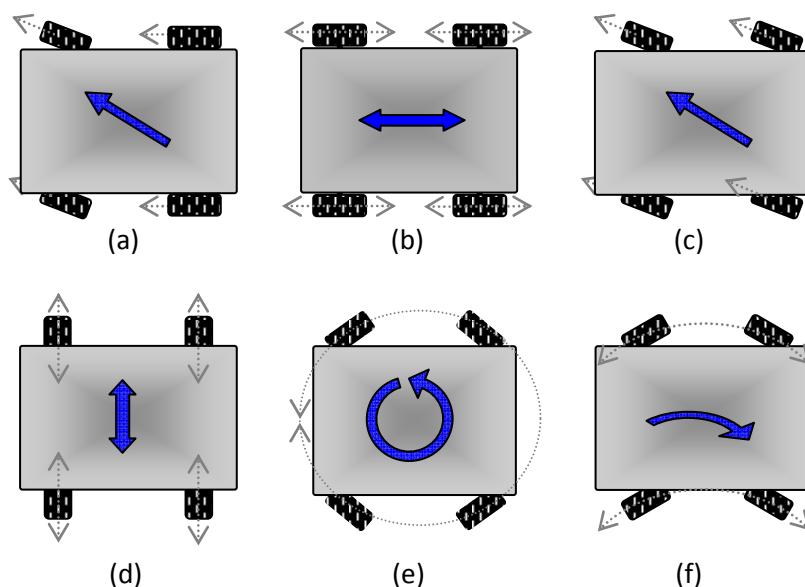


Figura 3. 2. Combinaciones posibles de las posiciones de las ruedas de VANTER.

no suele ser aconsejable en este tipo de aplicaciones a pesar de disponer de un control fácil. Entre sus desventajas se encuentran los requerimientos en el consumo de energía, el giro en ciertos ángulos determinados, peso, y una mayor complejidad en su conexionado, disponiendo en ocasiones de 4 a 6 terminales según el modelo. Los motores DC de pequeño tamaño tienen como ventaja principal su elevada velocidad pero un reducido par en el rotor. Sin embargo, los requerimientos de par pueden solventarse fácilmente mediante el uso de cajas de engranajes reductoras. Además estos motores tienen menos masa y usan pequeñas corrientes de excitación. Por otro lado, con el uso de controladores de motores y codificadores puede obtenerse mayor resolución en el posicionado de las ruedas que con un motor PaP.

En base a estos factores, la elección tomada fue el uso de pequeños motores DC alimentados a 12 V y 60 mA de consumo que proporcionan 120 revoluciones por minuto con un par de 8,87 kg/cm (ver Tabla 3.2). Para reducir aún más los requisitos de consumo se han utilizado convertidores DC-DC y técnicas de control PWM. El exceso de par y las oscilaciones no absorbidas debido al comportamiento dinámico del vehículo limitan su comportamiento. Por ello se necesita un control PID para evitar las oscilaciones de los motores durante el arranque y el final de los movimientos. Sin embargo, este comportamiento puede verse mejorado mediante técnicas por software de control de dirección y velocidad con PWM.

Para excitar los motores DC se han utilizado controladores no lineales basados en dispositivos con configuración de puente en H. Un controlador de este tipo es un circuito electrónico que permite a un motor girar en ambos sentidos. Los puentes en H están disponibles como circuitos integrados, pero también pueden construirse a partir de componentes discretos como transistores bipolares o IGBTs. El gobierno del controlador se realiza mediante señales digitales, por ello los dispositivos que van a alimentar el motor deben trabajar en conmutación a una frecuencia fija. En esta

Parámetro	Valor
Tensión Nominal	12V
Velocidad Nominal a 12V	120 rpm
Consumo sin carga 12V	60 mA
Consumo eje frenado 12V	1500 mA
Relación engranajes	50:1
Fuerza de parada	8,87 kg/cm
Peso	152 g
Diámetro Máximo	37 mm
Diámetro Eje	6 mm
Rosca fijación	4 x M3

Tabla 3. 2. Especificaciones de los motores de tracción.

técnica de excitación de motores, denominada PWM, sólo son posibles dos estados de excitación en los interruptores de potencia (corte y saturación). Gracias a esta técnica, se controla el valor medio de la señal de excitación y se consigue reducir el consumo de la tensión o la intensidad en los motores. Otra técnica también utilizada en Robótica consiste en mantener fijo el tiempo de activación de la señal y variar la frecuencia de trabajo, pero debido a los problemas de interferencias que provoca el cambio de conmutación este método no suele emplearse.

No obstante la elección realizada, en el mercado hay disponibles una gran variedad de controladores de motores integrados tales como el ULN200 de *Texas Instruments*, el TC141 de *Microchip*, el UDN2916 de *Allegro MicroSystems* o el TA8429H de *Toshiba*. Para el control de velocidad del motor de avance de la rueda se eligió el integrado LMD18200 de *National Semiconductor* y para el control del motor de giro de la rueda se ha optado por el dispositivo L293B de *SGS-Thomson Microelectronics* por su sencillez de control (ver Tabla 3.3). Debido a que este motor de giro tiene una baja velocidad y un alto par, su alta reducción no requiere un control de velocidad mediante PWM.

Puesto que se usan motores DC para controlar el giro de la rueda, el valor de su ángulo de posición puede obtenerse mediante codificadores de tipo incremental o potenciómetros de película continua. El potenciómetro es un elemento muy fácil de manejar, sencillo y económico, requiriendo para su control una simple conexión al puerto A/D de un microcontrolador. Sin embargo, entre sus defectos están la precisión limitada por los bits de resolución del conversor A/D del microcontrolador y las variaciones en la tensión de referencia del potenciómetro que afectan a su medición. Este defecto puede solventarse con un condensador entre sus terminales conectados a la tensión de referencia. La variación de su resistencia es además fuertemente dependiente de la temperatura, por lo que para aplicaciones con mayores requisitos

Parámetro	LMD18200	L293B
Número de canales	2	2
Corriente continua máxima de salida	Hasta 3 A	Hasta 1 A
Corriente de pico de salida máxima	Hasta 6 A	Hasta 2 A
Tensiones máximas	55V	36V
Potencia máxima	25W	5W
Tipo de control	PWM	Discreto
Compatibilidad	TTL	TTL
Frecuencia de conmutación	Hasta 500KHz	750 a 200 ns
Mínima anchura de pulso de entrada	1 μ s	-

Tabla 3. 3. Especificaciones de los integrados LMD18200 y L293B.

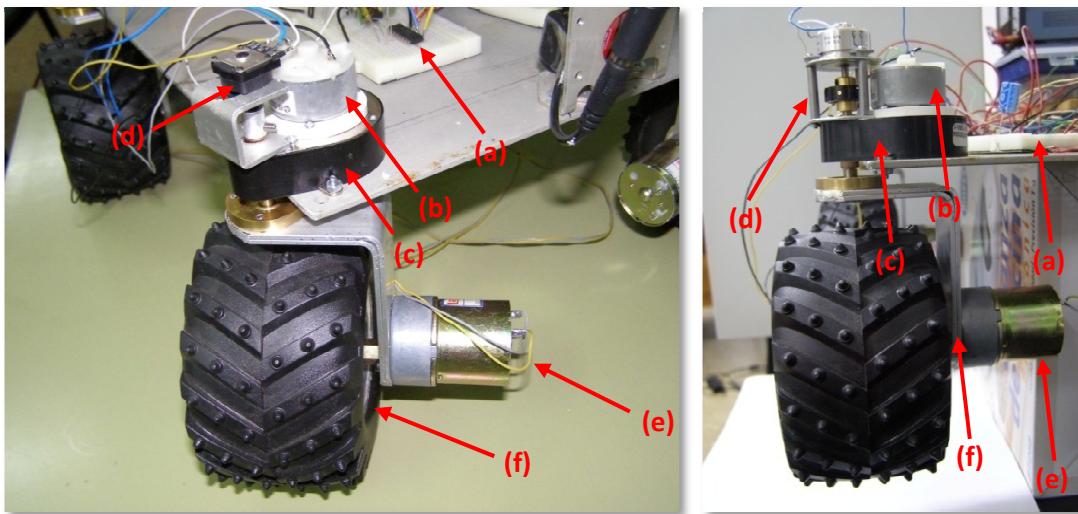


Figura 3.3. Control de una rueda de VANTER.

puede implementarse un circuito compensado.

Cada rueda de VANTER, anclada en un chasis plano de aluminio, está compuesta de dos motores, uno de giro y otro de avance (ver Fig. 3.3). En las figuras anteriores se muestra una evolución del control de las ruedas (a la izda. implementación en el año 2.006 y a la dcha. desde 2.007). El detalle muestra una de las ruedas controladas por un microcontrolador esclavo (a). Este dispositivo genera señales PWM que controlan sendos motores DC por cada microcontrolador, a través de los circuitos en puente. El motor del ángulo de posición (b) está acoplado a una caja reductora en el eje del motor (c), cuya posición es leída por un encoder basado en un potenciómetro de película continua (d). El motor de avance de la rueda (e) proporciona una velocidad de 152 r.p.m. y la ubicación del codificador (f) posibilita la obtención de la posición del giro.

El hardware de VANTER está compuesto por 3 tipos de PCB. Las del microcontrolador maestro, las de los microcontroladores esclavos y la fuente de alimentación de propósito general que alimenta al vehículo. La fuente de alimentación del vehículo está basada en dos baterías de plomo de 12 V que suministran una autonomía de hasta 8 horas de funcionamiento. Cada placa tiene su alimentación independiente conectada a la fuente de alimentación mediante una tierra común (ver Tabla 3.4). Esto evita posibles ruidos que se pudieran inducir en los circuitos lógicos. Las baterías en paralelo alimentan los motores de forma directa y mediante un regulador DC-DC de 5 V de la casa ASTEC Power se alimentan los componentes lógicos del sistema electrónico. La fuente dispone además de un regulador DC-DC de 9 V de la

Parámetro	DC-DC de 5V	DC-DC de 9 V
Rango de entrada	9 a 36 VDC	9 a 18 VDC
Corriente	1 A	333 mA
Potencia máxima	5 W	3 W
Eficiencia	81%	80%
Tolerancia de tensión de salida	±2.0%	±2.0%
Regulación de tensión de línea	±0.5%	±0.5%
Regulación de tensión de carga	± 0.5%	±0.5%
Rizado del ruido	100 mV	50 mV
Protección contra corto circuito	Sí	Continua
Frecuencia de conmutación	250 KHz	200 KHz

Tabla 3. 4. Especificaciones de los reguladores de 5 V y 9 V.

casa *RECOM* usado para alimentar una cámara inalámbrica. Las tensiones de alimentación de las placas se conectan entre si a través de cables planos de 3 hilos con conectores crimpados. La disposición de los hilos de alimentación resulta de especial importancia, estando situada la línea de tierra entre las tensiones de 12 V y 5 V para reducir el ruido que podría inducir una tensión sobre otra. De esta forma, al estar éstas tensiones separadas por tierra, el posible ruido inducido es derivado a ella, lo que reduce la inestabilidad eléctrica en los circuitos.

3.2.2. Diseño de la Red de Microcontroladores

El objetivo fundamental de la red de comunicaciones consiste en aportar un sistema de control remoto basado en un enlace UHF y una red I2C. Estos enlaces de comunicación conectan directamente el interfaz virtual de un PC a una red de microcontroladores esclavos a través de un microcontrolador maestro. El objetivo es transportar los mensajes de información y control que son transmitidos desde un instrumento virtual que monitoriza y ejecuta las tareas del usuario. Gracias al pequeño tamaño de los microcontroladores, es posible incluirlos abordo de los elementos a controlar, reduciendo el número de cables de señal y alimentación que habría que llevar hacia las partes móviles del vehículo robótico como articulaciones o ruedas. Por ello, se tiene un sistema donde cada grupo de circuitos, como motores y codificadores, tiene su propio microcontrolador dedicado al control del hardware, creando así una red de dispositivos que es necesario comunicar y sincronizar.

El esquema de la Figura 3.4 muestra la red de microcontroladores de la familia PIC de la casa *Microchip*. Esta serie de microcontroladores de 8 bits ha sido elegida ya que su uso está muy extendido y existen muchas herramientas de desarrollo disponibles para ellos. La programación de los PICs se ha realizado con software de

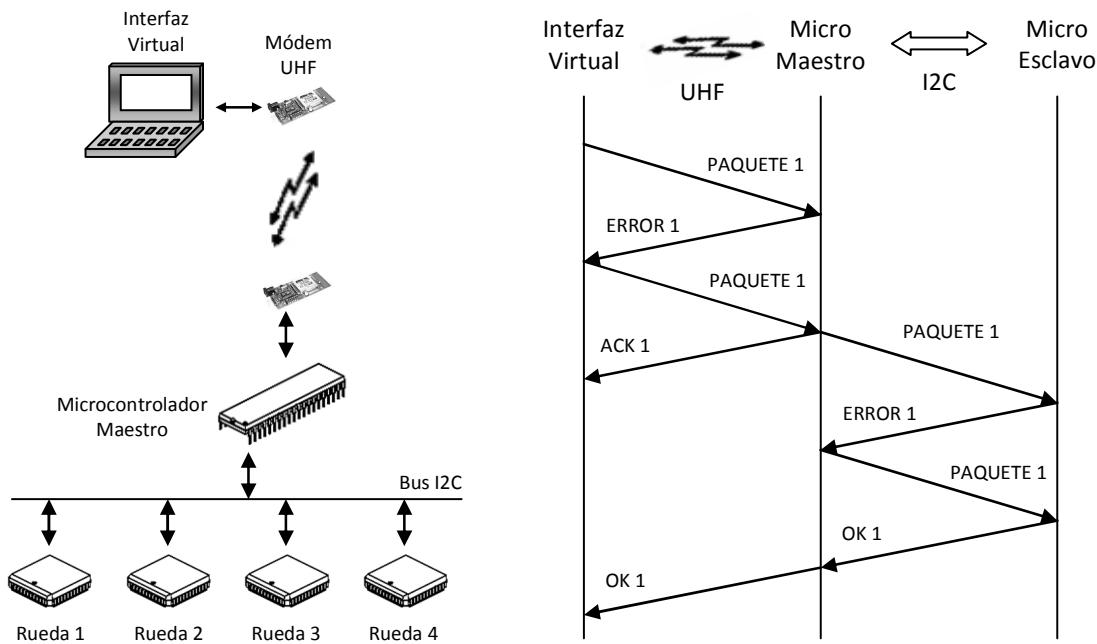


Figura 3. 4. Arquitectura de la red de microcontroladores y flujo de datos.

libre distribución, usando funciones desarrolladas en lenguaje C pertenecientes al compilador PCW de la casa CCS®. Cada fichero hexadecimal obtenido se ha grabado con el módulo WinPIC800 v3.58 y los controladores GTP-USB+ de la placa cargadora. De esta forma, los programas de control se han cargado en los microcontroladores insertados en un zócalo ZIF de 40 pines. El microcontrolador maestro utilizado es el modelo PIC16F876A. Este integrado dispone de 28 patillas, aunque sólo se han usado 10 de ellas para el propósito descrito. El resto de pines se reservan para futuras mejoras del vehículo robótico. La elección del microcontrolador esclavo requiere un modelo más genérico que el maestro, ya que está sujeto a futuras modificaciones. El microcontrolador esclavo debe tener un puerto I2C, al menos una entrada A/D y cuatro pines digitales de salida dedicados al control de los motores DC. Por ello, según las características descritas, el microcontrolador que cubre las necesidades citadas es el modelo PIC16F88.

La red está diseñada en torno a un bus de comunicaciones I2C y a un conjunto de microcontroladores maestro-esclavos. De forma comercial, el bus I2C se utiliza típicamente para el control de pequeños dispositivos como pantallas LCD, teclados o sensores mediante un único microcontrolador [Bowling, y otros, 2002]. En el campo de la Robótica, la mayoría de los trabajos de investigación implementan una red aislada formada por elementos esclavos que son interrogados desde un PC [González Martínez, 2006]. La red I2C ha sido configurada en modo rápido a una velocidad de 400 KHz. El modo de direccionamiento elegido permite la comunicación con un

número máximo de 128 dispositivos distintos, aunque con pequeñas modificaciones puede albergar hasta 512 elementos. De entre las posibles direcciones, se han necesitado hasta el momento 1 dirección para el maestro y 4 direcciones para los esclavos, quedando el resto de direcciones libres para usos futuros en el prototipo final. Obviamente, la cantidad de direcciones libres permite una gran posibilidad de expansión de la plataforma. Cada microcontrolador esclavo maneja una única rueda con 2 motores, uno dedicado al avance y otro dedicado al giro.

Para la comunicación entre los distintos elementos, se ha diseñado un protocolo orientado a conexión basado en paquetes de error y confirmación. Este protocolo implementa un mecanismo de redirección de mensajes entre el interfaz virtual de usuario y la red de microcontroladores, usando como enlaces el canal UHF y el bus I2C. La conexión del PC y del microcontrolador maestro se realiza por medio de módulos UHF; uno conectado al PC y otro conectado al microcontrolador maestro. Los módulos hacen la función de un cable virtual pero con las ventajas de movilidad de un sistema inalámbrico.

El protocolo se basa en un modelo de pregunta-respuesta en el que un elemento principal, es decir el instrumento virtual, manda una instrucción y permanece a la espera de una respuesta afirmativa o negativa por parte del dispositivo en escucha. En primer lugar, el PC manda un mensaje al microcontrolador maestro mediante el enlace inalámbrico. Una vez que el paquete ha llegado, el maestro lo adapta al bus I2C para enviar la instrucción al microcontrolador esclavo a una velocidad de 400 Kbits/segundos. El maestro responde al PC enviando un paquete que puede ser de confirmación (ACK) o de error. En este paquete se realiza una confirmación positiva o negativa para certificar si la instrucción anterior llegó correctamente y se pudo adaptar al bus I2C. El microcontrolador esclavo recoge la información sobre los sensores y/o actuadores formulando un paquete de confirmación (OK) o de error con el valor como respuesta. Por último, el maestro codifica el paquete recibido del esclavo para enviarlo a través del protocolo RS-232 y manda los datos de vuelta al PC. Dependiendo del camino en el flujo de datos, se tendrán distintos formatos de paquetes, existiendo 4 paquetes distintos definidos en este protocolo.

En el caso del envío de paquetes de datos desde el instrumento virtual, se ha definido un formato de comando que puede verse en la Figura 3.5. La descripción de sus campos y los posibles valores que pueden tomar sus parámetros se encuentra recogida en la Tabla 3.5.



Figura 3. 5. Paquete de instrucción.

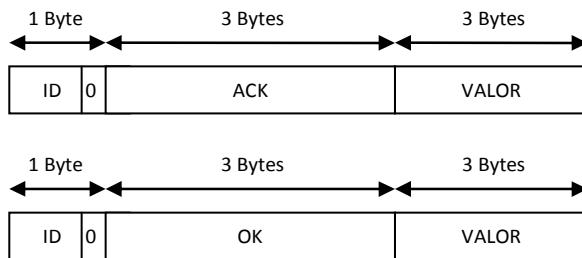
Campo	Parámetro	Longitud	Descripción
ID	[B, D, F, H]	1 byte	Dirección del microcontrolador esclavo
Instrucción	M,E [1,2] [A,G,R,S,V]	1 byte 1 byte 1 byte	M: ordena la realización de una acción a un motor, E: solicitud del estado de un motor 1,2: Indica el número de motor A: avance en r.p.m., G: giro en grados, R: retroceso en r.p.m., S: stop, V: velocidad en r.p.m.
Valor	[0...255]	3 bytes	Cantidad numérica

Tabla 3. 5. Descripción del paquete de instrucción.

Los 7 bits de mayor peso (MSB) del campo ID definen la dirección del microcontrolador de destino, debiendo ser el bit de menor peso (LSB) que forma el primer octeto de valor 0. El campo INSTRUCCIÓN define la instrucción de 3 caracteres en formato ASCII y el campo VALOR representa una cantidad numérica referida al campo INSTRUCCIÓN. Dependiendo de la instrucción, este valor puede ser omitido. Algunos ejemplos de distintos tipos de comandos de instrucción son:

- FM1A150: solicita al microcontrolador F que avance el motor 1 a una determinada velocidad expresada en revoluciones por minuto.
- BM2R100: solicita al microcontrolador B que retroceda el motor 2 a una determinada velocidad expresada en revoluciones por minuto.
- HM1S000: solicita al microcontrolador H la parada del motor 3. El campo VALOR debe tener los 3 bytes con valor 0.
- DM2G120: solicita al microcontrolador D que el motor 2 gire hasta la posición indicada por el valor del ángulo.
- FE1V000: pregunta al microcontrolador F la velocidad actual del motor 1. En el paquete ACK se devuelve la velocidad en el campo VALOR.
- HE2G000: pregunta al microcontrolador H el ángulo actual del motor 2. En el paquete ACK se devuelve la velocidad en el campo VALOR.

El paquete de respuesta afirmativa representa un caso particular de este protocolo. Existen dos mensajes de confirmación distintos respecto a una solicitud anterior enviados desde la red de microcontroladores al instrumento virtual (ver Fig. 3.6).

**Figura 3. 6. Paquetes de confirmación.**

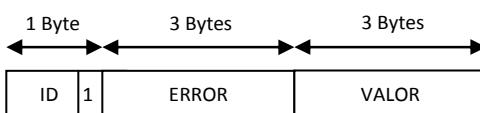
Los 7 bits MSB del campo ID deben contener la dirección del microcontrolador esclavo de origen, debiendo ser el bit LSB de valor 0. El campo INSTRUCCIÓN debe contener los caracteres ACK/OK y el campo VALOR representa el estado de la variable solicitada por el comando previo:

- ACK comando enviado desde el microcontrolador maestro cuando una operación solicitada ha finalizado con éxito. Su longitud es de 3 bytes.
- OK: comando enviado desde el microcontrolador esclavo cuando una operación solicitada ha finalizado con éxito. Su longitud de 2 bytes se rellena con 1 byte del carácter ASCII que representa el espacio en blanco.

En el caso del envío de paquetes de error (ver Fig. 3.7), se ha definido un formato de instrucción identificado por el LSB = 1 del primer octeto. El campo ID define la dirección de 7 bits del microcontrolador de origen y el campo ERROR define el tipo de error mediante un valor numérico. Si se implementan nuevos tipos de mensajes o dispositivos esta lista puede crecer. Actualmente los códigos de error definidos son:

- 0: Dispositivo no conectado.
- 1: Instrucción no válida.
- 2: Búfer de entrada lleno.
- 3: Microcontrolador maestro en proceso.

Cuando los paquetes de instrucciones o telemetría entran en el ámbito de la red de microcontroladores remotos, se realiza una conversión de los comandos que implica la adaptación del campo ID y del LSB del primer octeto (utilizado como bit de lectura\escritura en el bus I2C). Además, el campo de INSTRUCCIÓN se codifica en un único byte. De esta forma el formato del paquete es el de la Figura 3.8 siguiente.

**Figura 3. 7. Paquete de error.**

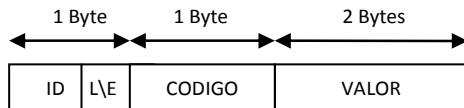


Figura 3. 8. Paquete de la red I2C.

3.2.3. Comunicación Inalámbrica

La interacción entre el cliente remoto y la red de microcontroladores se realiza en tiempo real mediante una comunicación inalámbrica punto a punto. El interfaz virtual de usuario y el microcontrolador maestro se comunican por medio de un transmisor UHF⁶ a 433,92 MHz (ver Fig. 3.9). Esta comunicación sirve para el envío de mensajes que transportan datos de telecomandos y de telemetría en modo half-dúplex como si de un cable virtual se tratara. El enlace de comunicaciones UHF ha sido elegido por varias razones, entre ellas el uso de antenas omnidireccionales de baja ganancia que no requieren un apuntado y las bajas pérdidas en espacio libre comparado a otras frecuencias más elevadas, como por ejemplo la banda S. Las especificaciones del transceptor de UHF se muestran en la Tabla 3.6.

El software desarrollado tanto en el interfaz virtual como en el microcontrolador maestro de VANTER, empaqueta los mensajes en tramas no mayores de 96 bytes antes de mandarlo por el canal UHF. El módulo transmisor⁷ tiene un microprocesador dedicado a la sintonización RF, control de la portadora y modulación FSK, lo que le permite una velocidad de transmisión real de 100 Kbps. La configuración

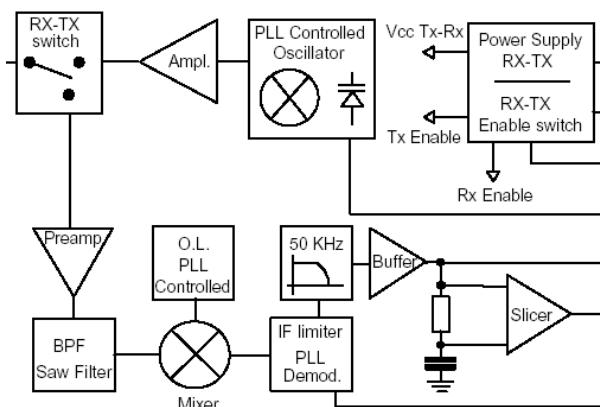


Figura 3. 9. Diagrama de bloques del módulo transceptor.

⁶ WIZ-SML-IA Instruction Manual, Rev. A, 01-04-2002. AUREL S.P.A. Disponible en <http://www.aurel.it/>

⁷ XTR-434xxx Instruction Manual, Rev. A, 30-10-2001. AUREL S.P.A. Disponible en <http://www.aurel.it/>

Parámetro	Valor
Alimentación	12 V
Corriente Tx ON	28 mA
Corriente Rx ON	11 mA
Corriente Tx/Rx OFF	100 nA
Frecuencia	433,92 MHz
Banda Rx	150 KHz
Sensibilidad Rx	-100 dBm
Rechazo de interferencias (5% banda límite)	-80 dBm
Potencia Tx	10 dBm
Dimensiones	4 x 9 cm

Tabla 3. 6. Especificaciones del módulo UHF.

de la conexión serie se ha establecido con 1 bit de inicio, 8 bits de datos y 1 bit de parada. Sin embargo, debido a la velocidad del puerto UART de los microcontroladores, sólo se permite configurar una velocidad máxima de 57600 baudios. El protocolo orientado a conexión desarrollado evita la pérdida de paquetes por falta de cobertura o colisiones en el medio, debiendo respetar un tiempo mínimo de 0,5 ms antes de volver a realizar otra transmisión. La detección de la señal portadora disponible en el conector de datos del módulo UHF, hace posible un control básico de acceso al medio mediante CSMA/CD.

El tiempo de transmisión de paquetes en la banda UHF expresado en milisegundos está dado por la ecuación (3.1) siguiente:

$$T \text{ (ms)} = 3,6 + (\text{NBytes} + 2) \times 0,156 \quad (3.1)$$

lo cual significa que una instrucción de 7 bytes se transmite en un tiempo de 5,004 ms. De esta forma la transmisión de un comando y sus dos paquetes de confirmación correspondientes, se completa en un tiempo entorno a los 15,012 ms. En la Figura 3.10 pueden verse los tiempos de transmisión en una sesión de 200 paquetes. El valor medio de 23,33 ms de la función y, se corresponde con los resultados teóricos de la ecuación (3.1) si se contempla además el tiempo de procesamiento y escritura de los datos. Tales velocidades de transmisión son equiparables a los sistemas de comunicación utilizados en otros *rovers*. Por ejemplo, en la misión *Mars Pathfinder* se utilizó un módulo Motorola a 9600 baudios⁸.

⁸ Motorola MRNet 9600 SLM. Disponible en <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/rovercom/rovcom.html>

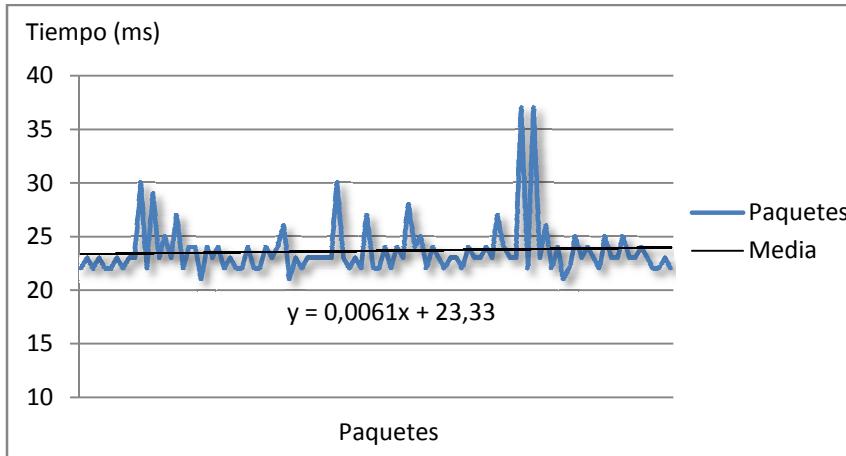


Figura 3. 10. Tiempos de envío y procesamiento de paquetes.

3.3. Instrumento Virtual del Sistema de Navegación

El IV de usuario está dividido en varias zonas funcionales que facilitan la composición de los paquetes de comunicación mediante displays y menús desplegables (ver Fig. 3.11). En la zona superior izquierda (a) se dispone de un indicador vertical de velocidad (0-255), un medidor de dirección (83-173) y cuatro indicadores booleanos que seleccionan el identificador del microcontrolador esclavo (PIC1-PIC4) que interviene en la comunicación. En la parte superior derecha (b) existe un selector del modo de control del vehículo. Mediante la primera opción (modo mando) se puede guiar el vehículo a través de un *gamepad* (ver Fig. 3.16). Con la segunda opción (modo texto), se activa un menú desplegable con órdenes preconfiguradas que pueden ser seleccionadas con el ratón (ver Fig. 3.17). En la parte inferior izquierda (c) se dispone de la ventana de composición de paquetes. Una vez empaquetado cada mensaje, formado por una o varias órdenes en modo mando o modo texto, puede visualizarse su contenido antes de enviarse en un indicador de caracteres (arriba). En la ventana de paquetes recibidos (abajo), se obtiene la correspondiente respuesta del vehículo remoto. En la zona inferior derecha del panel se dispone de un área de visualización seleccionable mediante pestañas. Con ellas puede seleccionarse la configuración del puerto RS-232, la señal PWM y el histórico de velocidad de la rueda de avance (motor 1), el histórico de dirección de la rueda de giro (motor 2) y el display de la microcámara inalámbrica.

El IV de navegación contiene un módulo de control basado en un mando USB de tipo *gamepad*. El objetivo es disponer de una nueva forma de controlar los movimientos del *rover* en tiempo real. El dispositivo utilizado (modelo *Saitek P880*) es un mando ergonómico que dispone de una palanca digital de 6 posiciones, dos



Figura 3. 11. IV del sistema de navegación de VANTER.

palancas analógicas, 6 botones digitales en el frontal y 2 horizontales. El subIV abre una referencia e inicializa el dispositivo para adquirir datos de los botones y de las palancas analógicas del mando. Cuando los datos están disponibles, la aplicación llama a un módulo que representa, en un gráfico polar, los grados, ejes de coordenadas y variables como se muestra en la Figura 3. 12. Después de ensamblar los datos en paquetes, están listos para ser transferidos hacia el vehículo VANTER.

El funcionamiento del IV se describe en el diagrama de flujo de la Figura 3.13. Una vez que el programa comienza, se inician los recursos hardware y software tales como la configuración del puerto COM del módulo UHF, el driver de la capturadora de video y otros valores correspondientes a las variables del programa. La primera elección que el usuario puede realizar define el modo de funcionamiento del programa, ya sea en modo comando mediante el ratón y el cursor, o en modo guiado mediante el mando. Si la elección es el modo texto (ver Fig. 3.14), es posible seleccionar individualmente el identificador del dispositivo esclavo que recibirá la orden (1 byte). Ésta será una instrucción (3 bytes) de un conjunto de órdenes definidas por defecto en el sistema, las cuales pueden seleccionarse a través de un menú

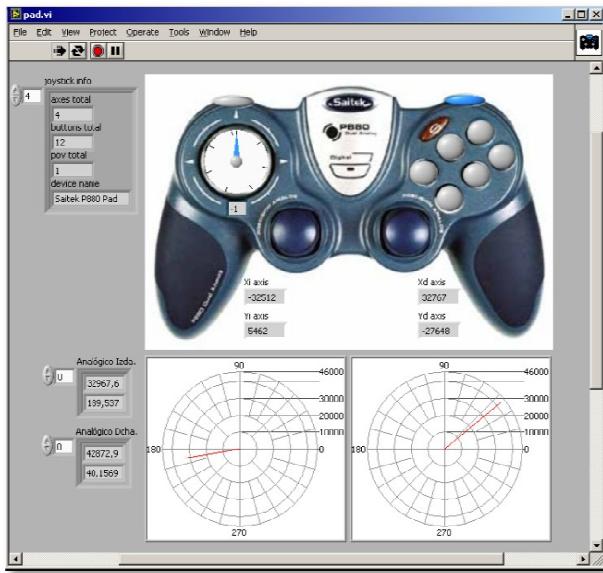


Figura 3. 12. SubIV del gamepad de control de los movimientos de VANTER.

desplegable. Para completar el mensaje, es necesario introducir un valor numérico (3 bytes) asociado a la instrucción. Para facilitar el manejo del IV, existe un botón de emergencia (STOP) situado en la parte superior derecha del panel frontal que envía un mensaje de alta prioridad para detener cualquier orden anterior.

Si la selección fue utilizar el *gamepad*, por defecto se seleccionan todos los dispositivos esclavos como destinatarios del mensaje. Esto facilita el control a través del mando, aunque pueden desactivarse o reactivarse los dispositivos a través del IV del usuario. Otra característica que facilita la navegación a través del mando, es la posibilidad de invertir el sentido de giro de las ruedas para permitir a VANTER los movimientos circular o diagonal mostrados en las Figuras 3.2 (c) y 3.7 (f). La cadena de parámetros que formarán el mensaje hacia el vehículo remoto, se completa con los valores de velocidad y dirección leídos de los mandos analógicos del *gamepad*.

El mensaje puede enviarse mediante la pulsación de un botón situado en la parte izquierda del *gamepad*, o bien mediante un botón virtual ubicado en la parte central de la interfaz gráfica de usuario. Antes del proceso de envío, es necesario segmentar los mensajes en paquetes de 7 bytes de longitud según el formato definido en este protocolo. Para evitar posibles errores durante el manejo en modo texto, el mensaje total es verificado por el programa antes de su envío, no pudiendo enviar el usuario ningún paquete que no sea múltiplo de 7 bytes. Una vez particionado el mensaje, los segmentos se envían consecutivamente tras cada paquete de confirmación del vehículo remoto (ACK, OK o ERROR). Si el proceso de envío y confirmación de paquetes supera un periodo de tiempo configurable (*timeout*), se

pasa a enviar el siguiente mensaje para recuperar el control del vehículo durante su manejo. Este procedimiento de parada y espera resulta necesario para no superar el espacio del búfer de entrada asignado en el dispositivo remoto.

Como otra de las opciones del IV, es posible guardar la sesión de comando enviados y confirmación de paquetes, así como el tiempo transcurrido entre cada mensaje en un archivo de registro. Por último, la detención del programa puede realizarse en cualquier instante de la ejecución del programa mediante la pulsación de

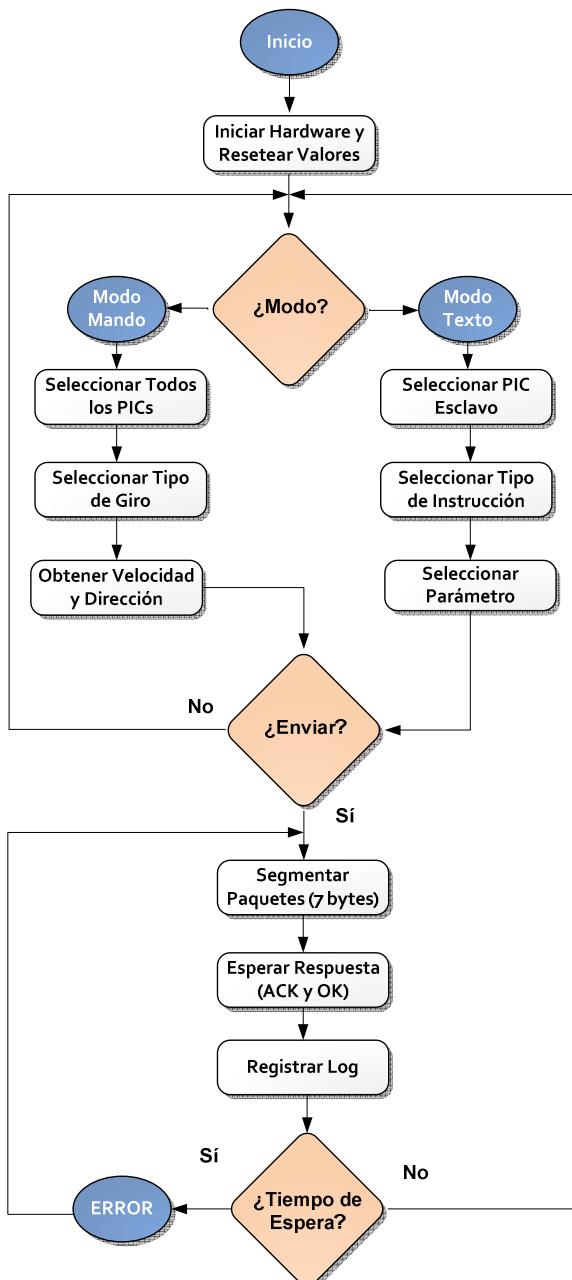


Figura 3. 13. Diagrama de funcionamiento del IV.

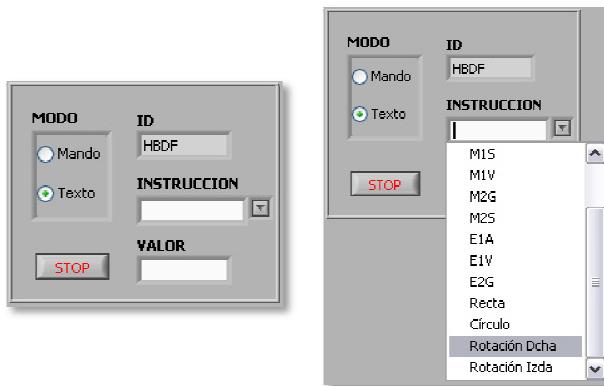


Figura 3. 14. Entradas del menú del modo texto de usuario.

un botón situado en el menú contextual de la ventana del IV.

3.4. Instrumento Virtual de la Microcámara Inalámbrica

A bordo de VANTER se ha acoplado una microcámara inalámbrica de alta resolución con más de 380 líneas de televisión que contiene un microtransmisor de vídeo y audio analógico de 50 mW (ver Tabla 3.7). Para recibir la señal inalámbrica de la microcámara, el receptor RF está conectado a una digitalizadora USB *Pinnacle Dazzle Video DVC100* que convierte la señal de vídeo y audio compuesto de tipo RCA para ser tratada digitalmente desde un PC. A pesar de su pequeño tamaño, el transmisor tiene una potencia de transmisión entre 50 y 200 metros en el exterior. El IV permite activar una captura continua de la cámara y mostrarla en un panel de visualización junto a sus características principales, como son el controlador del fabricante, la resolución digital y el tiempo de captura.

Parámetro	Valor
Elemento de imagen	Sensor CMOS Color de 1/3
Sistema de TV	PAL
Resolución	380 líneas de TV
Frecuencia de escaneado	50 Hz
Iluminación mínima	3 lux
Micrófono	Incorporado en cámara
Potencia de salida	50 mW
Frecuencia de salida	900MHz-1200MHz
Alimentador cámara	9 V /80 mA
Alimentador receptor	12 V DC

Tabla 3. 7. Especificaciones de la microcámara inalámbrica.



Figura 3. 15. IV de la microcámara inalámbrica.

3.5. Sistema de Adquisición de Imágenes y Visión

Tan lejos como nosotros sabemos, no hemos encontrado ninguna cita sobre el uso de software de visión artificial basado en IVs de LabVIEW™ y aplicaciones Bluetooth. Sin embargo, existen algunas ligeras referencias sobre algunas de estas palabras claves. Por ejemplo, una librería básica para cámaras CCD se desarrolló primeramente para IVs [Parente, 2002]. Otro trabajo con objetos ActiveX realizaba sólo adquisiciones de imágenes pero limitadas en funcionalidad y control de sus propiedades [Trevelyan, 2004]. Una aplicación cliente-servidor se llevó a cabo para un sistema distribuido aplicado en un entorno industrial, donde las imágenes capturadas por una cámara eran transferidas sobre una red TCP/IP [Cerdá Castells, y otros, 2002]. En el área de la medicina pueden encontrarse también desarrollos interesantes aplicados a los sistemas SPECT, donde una cámara IP se usa para enviar de forma rápida imágenes a través de una conexión TCP/IP [Bruyant, y otros, 2005]. Una aplicación de datos remotos que usa Bluetooth fue desarrollada para adquirir datos de una onda sinusoidal [Loker, y otros, 2005]. En el campo de la Robótica, una comunicación Bluetooth fue desarrollada como un laboratorio web virtual dedicado a la educación en Ingeniería [Sagiroglu, y otros, 2006]. Finalmente, la adquisición de imágenes remotas a través de Bluetooth se aplicó al robot *micro-flying* más pequeño y ligero del mundo [Seiko-Epson, Corp.].

3.5.1. Sistema Robot-Cámara

Una solución de bajo coste para la adquisición de imágenes usando IVs y cámaras USB ha sido utilizada en esta investigación. La aplicación desarrollada

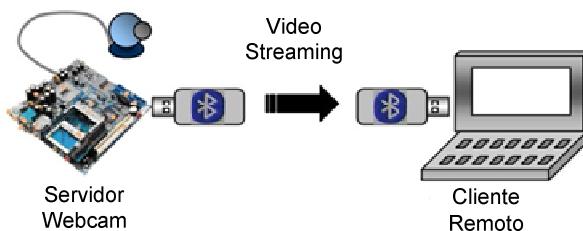


Figura 3. 16. Sistema robot móvil/cámara.

proporciona la habilidad de crear un flujo de imágenes adquiridas mediante las librerías NI-IMAQ para cámaras USB y el módulo IMAQ Vision para LabVIEW™. El sistema completo de robot móvil/cámara consiste en una webcam, una placa base mini-ITX y dos adaptadores Bluetooth para los dispositivos cliente y servidor (ver Fig. 3.16).

En general, dependiendo de las capacidades de una cámara, ésta puede trabajar a varias resoluciones y tasas de imágenes por segundo. Sus propiedades (ganancia automática, contraste, saturación, luminosidad, control del parpadeo, compensación de luz y color, etc.) pueden ser configuradas usando el controlador del fabricante de la cámara y las funciones *DirectShow* del sistema operativo. La cámara USB montada a bordo de VANTER toma imágenes de baja resolución en cuadros de 320 x 240 píxeles. Esta resolución es suficiente para nuestro propósito, aunque pueden seleccionarse otras configuraciones distintas. No obstante, un menor tamaño de archivo redundante en una mayor tasa de transferencia y envío efectivo (*throughput*).

Los módulos inalámbricos (modelo BTA-6030 de *Conceptronic*) usados para este proyecto son adaptadores USB Bluetooth v2.0 clase I con una tasa de transferencia mejorada a 2,1 Mbps. El rango máximo de transmisión es de aproximadamente 200 metros en exteriores con un reducido consumo de 100 mW. La característica principal de estos dispositivos es el uso de la licencia libre ISM con una frecuencia de trabajo en la banda de 2,4 Ghz. La especificación Bluetooth permite métodos de autenticación y encriptación por defecto, además de implementar técnicas FEC y ARQ. Cuando los módulos Bluetooth conviven en una misma red, forman una PAN automáticamente, donde cada computadora que contiene un módulo Bluetooth se configura como maestro o esclavo. Puesto que cada módulo Bluetooth tiene una única dirección física de dispositivo, el maestro puede comenzar el establecimiento de un enlace con el esclavo y éste responder al maestro.

Las funciones Bluetooth de LabVIEW™ usan RFCOMM. Éste es un protocolo de transferencia simple que emula la comunicación serie por medio de la interfaz *Winsock*.

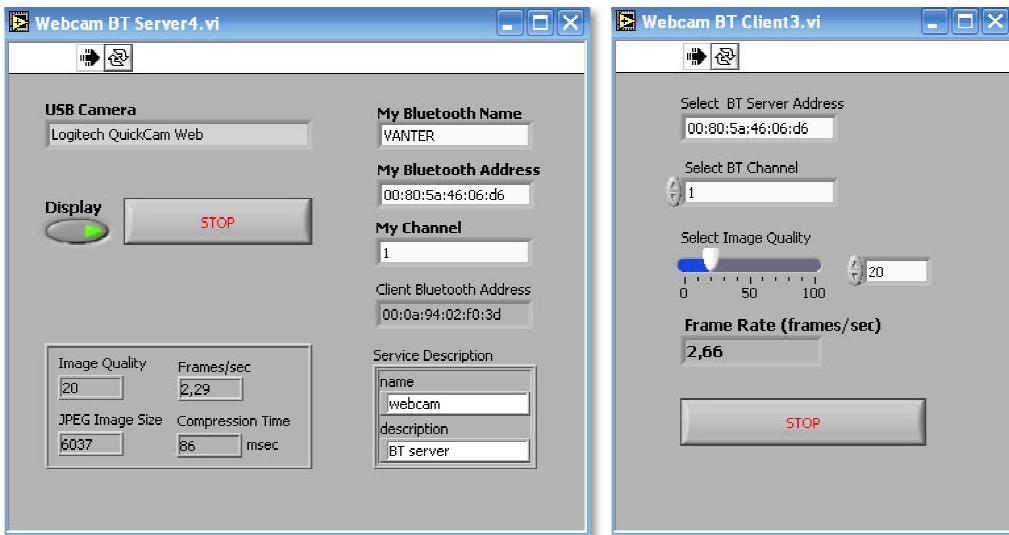


Figura 3. 17. Paneles frontales de los IVs servidor y cliente.

para los sistemas operativos basados en Windows. Las librerías de Bluetooth pueden configurar los estados del dispositivo Bluetooth local en los modos descubrible y conectable. Esta utilidad proporciona una función de seguridad doble; primeramente determina si otros nodos Bluetooth pueden descubrir al dispositivo inicial y en segundo lugar, determina si permite a otros elementos Bluetooth emparejarlo. El servidor Bluetooth usa SDP para transmitir la disponibilidad de los servicios que el servidor contiene y escuchar las conexiones entrantes. El cliente crea una conexión RFCOMM saliente al servidor y una vez que el cliente y el servidor se conectan entre sí, intercambian datos hasta que uno de los dos dispositivos termina la conexión. Por medio de un botón virtual de parada ubicado en el panel frontal, también es posible cerrar la conexión Bluetooth y liberar los recursos correctamente. En la Figura 3.17 se muestra el panel frontal del IV en ejecución mientras se envía un flujo de imágenes.

La aplicación gráfica desarrollada hace uso de dos IVs implementados con una configuración cliente-servidor mediante dos módulos Bluetooth y una cámara USB. Los IVs cliente y servidor inician los procesos separadamente (ver Fig. 3.18), utilizan un algoritmo de compresión JPEG para convertir el flujo de la imagen capturado de la cámara en un vector de datos y transferir la cadena de valores por el medio de comunicación.

La aplicación en el lado del servidor crea una lista de cámaras USB disponibles en el sistema que puedan inicializarse. Una vez se muestra la lista, se acomete la sesión de inicialización y cualquier cámara USB listada puede ser seleccionada por medio de su índice correspondiente. La cámara seleccionada comienza un modo de adquisición

continuo dentro de una estructura de bucle y las imágenes pueden ser grabadas y procesadas continuamente para mostrar la salida de la cámara. El IV servidor busca localmente todos los dispositivos Bluetooth instalados y devuelve la dirección Bluetooth de los dispositivos correspondientes. El proceso crea un servicio para el servidor Bluetooth y devuelve un canal Bluetooth que usa para escuchar las conexiones entrantes del cliente. El servidor espera al cliente para aceptar la conexión y una vez es aceptada, está listo para transferir las imágenes. Antes de enviar las imágenes por la red, el IV servidor codifica el flujo de imágenes mediante la tasa de compresión definida por el usuario, convierte cada imagen en un vector y transfiere cada dato formateado como una cadena de valores ASCII.

Cuando la aplicación cliente comienza, solicita de forma automática una conexión al servidor Bluetooth. Para ello, la dirección física y canal únicos del servidor deben ser previamente configurados. Una vez que la conexión con el lado del servidor

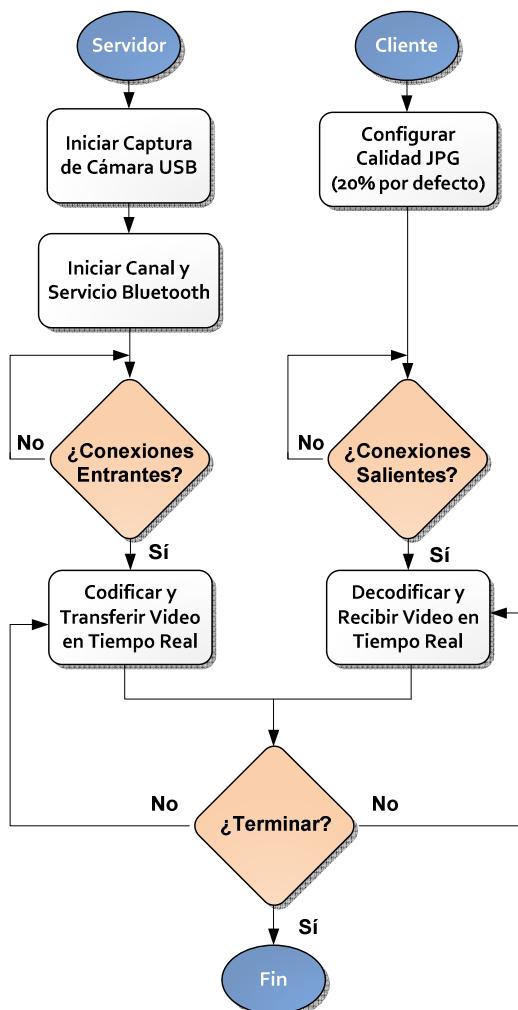


Figura 3. 18. Diagrama de flujo de la comunicación Bluetooth.

se ha establecido, el cliente selecciona la tasa de calidad de las imágenes que quiere recibir y solicita la tasa de compresión al servidor. De esta forma es posible leer los datos en el canal especificado, descomprimirlos y convertir la cadena de valores ASCII en una imagen final para su posterior representación en la ventana de visualización. La aplicación cliente envía una confirmación al servidor para asegurarse que ambos están sincronizados, de esta forma el chequeo iterativo de errores detendrá el programa si una excepción de error grave ocurre. Tanto el cliente como el servidor pueden terminar la conexión enviando la señal correspondiente al otro lado del proceso.

3.5.2. Análisis del Sistema Desarrollado y Discusión

La velocidad de transferencia sobre el enlace Bluetooth depende de la velocidad de los interfaces, la calidad de compresión y el tráfico del radioenlace. La compresión de imágenes requiere potencia de procesamiento y cuanto más rápido sean comprimidas, más rápido pueden comenzar a enviarse a través de la red inalámbrica. El método desarrollado usa un algoritmo JPEG para comprimir la imagen a una cadena binaria. La calidad de compresión puede escogerse entre 0 % (compresión máxima con calidad pobre) y 100 % (sin compresión y calidad igual a la imagen original). Los resultados después de aplicar la tasa de compresión se muestran en las dos imágenes de la Figura 3.19. La imagen de la izquierda muestra una tasa del 0 %, donde se observa una elevada pixelización. La imagen de la derecha muestra una tasa del 20 %, donde se observa un resultado visual óptimo.

Un análisis de la relación entre la tasa de compresión y varias características tales como el tiempo de compresión, el peso de la imagen y la tasa de video han sido

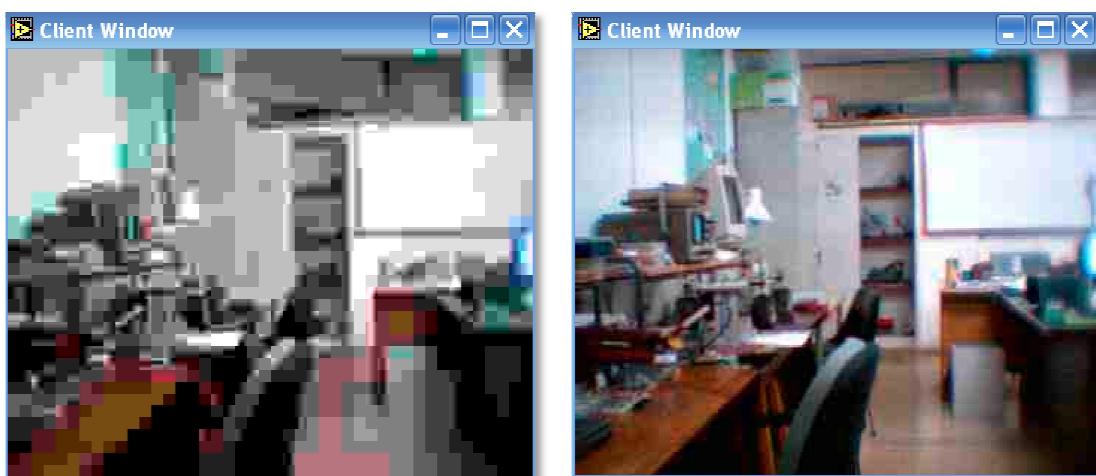


Figura 3. 19. Ejemplo de distintas calidades de compresión de imagen.

estudiados para evaluar el método desarrollado. Las condiciones del flujo de imágenes tomado para el análisis poseen un bajo movimiento y un fondo quasi-estático. Una estadística con 100 muestras en un recorrido entre 0 % a 100 % para la calidad de compresión, ha sido elaborada y los resultados pueden observarse en las Figuras 3.20 (a)-(c). Hay tres líneas diferentes representadas en los gráficos: valor máximo (azul), valor medio (rojo) y regresión lineal o exponencial (negro).

Uno de los aspectos principales relacionado con la capacidad del proceso y el tiempo necesario para enviar imágenes sobre el enlace Bluetooth es el tamaño del archivo a transmitir. Como se muestra en la Figura 3.20 (a), el peso varía entre 2 Kb y 55 Kb. En la Figura 3.20 (b) se observa que el tiempo de compresión requerido por cada imagen oscila entre 70 ms y 200 ms. Las gráficas muestran cómo este tiempo crece de forma elevada cuando la calidad de compresión se acerca más a la imagen original (típicamente 90 %). La tasa del flujo de imágenes disminuye inversamente proporcional a la calidad de compresión y, por tanto, al tamaño del archivo como se muestra en la Figura 3.20 (c). Es importante destacar que la tasa de video varía entre 11-1,5 imágenes por segundo. Como ejemplo de los resultados obtenidos, una imagen de calidad óptima (90 %) requiere un tamaño de archivo medio (16,5 Kb) con un tiempo de compresión de 130 ms y una baja tasa de video de 2,3 imágenes/s.

Después de repasar la experiencia obtenida y analizar el sistema de transferencia de imágenes sobre Bluetooth, hay varios aspectos que pueden ser mejorados. La forma de adquirir imágenes mediante una cámara USB de bajo coste tiene ventajas e inconvenientes [Longoria, 2005]. Entre las desventajas, puede destacarse que existe una resolución típicamente más baja en cámaras de CMOS que en cámaras de CCD, aunque adecuada para los propósitos presentes.

La adquisición de imágenes vía USB puede ser demasiado lenta para algunas aplicaciones. De facto, para la solución descrita en este trabajo supone una baja tasa de video como muestran los resultados en la sección de análisis. La adquisición vía USB es el principal inconveniente para un *throughput* óptimo. La velocidad de adquisición de la imagen depende de las capacidades de la cámara y la capacidad del flujo de video está directamente relacionada con el controlador del fabricante de la cámara. En ese sentido, cualquier aplicación exigente en visión artificial debe considerar mayores capacidades del hardware, especialmente para aquellas aplicaciones que requieren alta resolución, alto *throughput* y grandes transferencias de datos proporcionada por tarjetas dedicadas de adquisición de imágenes.

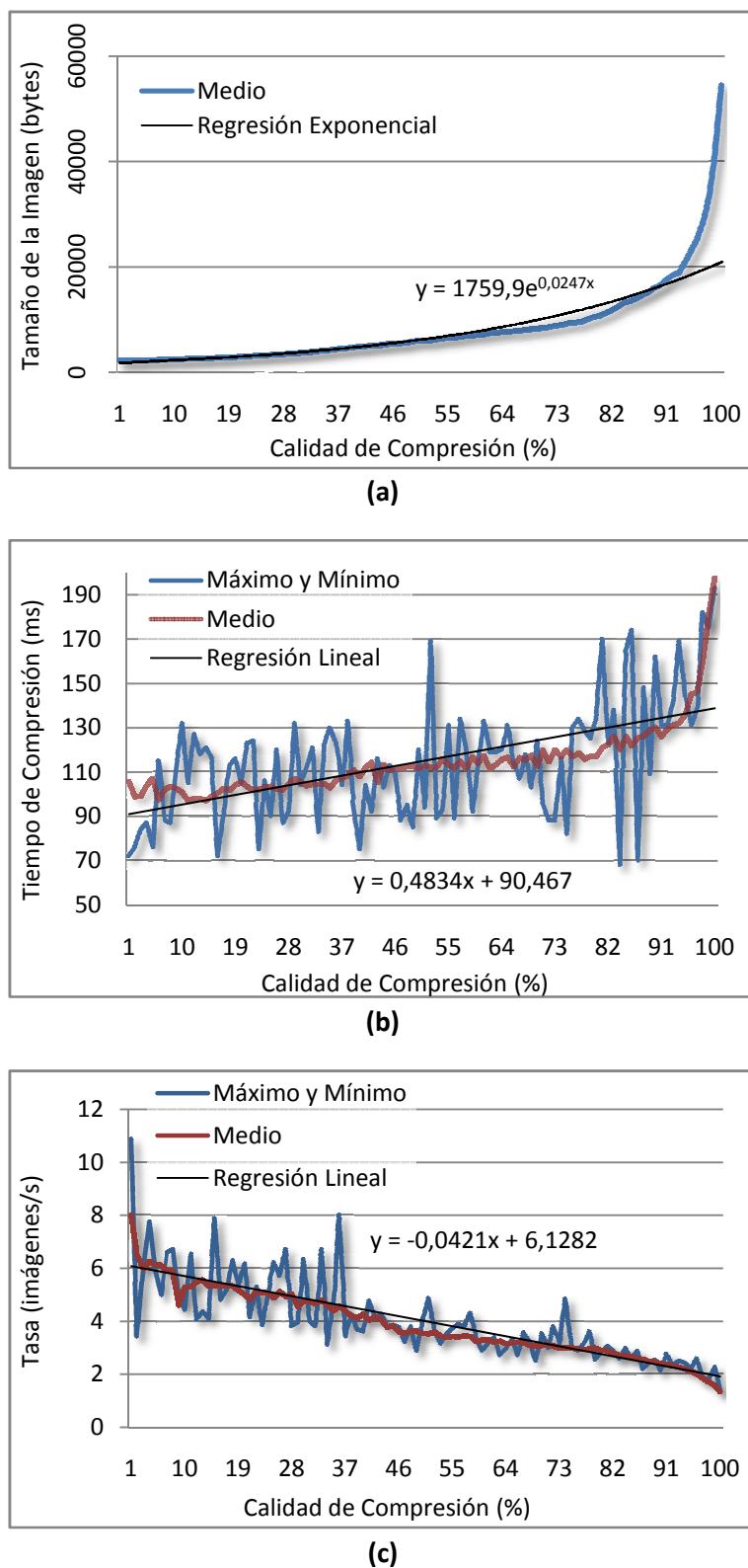


Figura 3. 20. Gráficas comparativas de la calidad de la imagen.

3.6. Propósitos Educativos

Hay profesores que emplean una parte de su tiempo en estudiar cómo aplicar su investigación con el objetivo de motivar a los estudiantes. Este tiempo lo dedican a desarrollar proyectos implantando ideas o creando otras nuevas. Del análisis de los resultados y la interpretación adecuada de sus conclusiones, se podrá obtener una información de incalculable valor que permita mejorar las prácticas [López, 2009]. Constatar que dichos proyectos cumplan con los fines pedagógicos conforme a las disciplinas del conocimiento, la educación y el aprendizaje es *investigar en educación*. Pero ¿es posible crear nuevas disciplinas como la Robótica pedagógica? Una labor que aún no pueden desempeñar los robots es la de enseñar. Sin embargo, podemos ayudarnos de dichos sistemas para transmitir y generar conocimientos sobre áreas muy particulares de la Ingeniería. Pero, ¿cuál es el alcance de la Robótica pedagógica? La meta no debe ser sólo que profesores y alumnos puedan aprender juntos de la construcción de sistemas robóticos, sino poner en práctica dichos sistemas con el objetivo de apoyar la enseñanza de conceptos en disciplinas tan diferentes y complementarias como la programación, la electrónica o la mecánica [Cabrera Jiménez, 1996].

Durante el desarrollo del proyecto VANTER, el vehículo robótico está resultando ser una excelente plataforma para entrenar y probar diferentes estrategias de telecontrol, adquisición de señales y técnicas de procesado. Esta posibilidad supone un entorno donde los estudiantes de Ingeniería y alumnos de doctorado de la Universidad de Huelva están trabajando y mejorando su conocimiento. La razón es que todos los desarrollos han sido realizados por el grupo de investigación del proyecto. Esto incluye el hardware (estructuras mecánicas, articulaciones, control de motores DC, diseño de dispositivos electrónicos, etc.) y el software (programación de IVs y microcontroladores en lenguaje C). Con este mismo enfoque educacional, se ha trabajado estrechamente en varias líneas de desarrollo con el objetivo de mejorar las capacidades y características de VANTER. Entre ellas se puede nombrar el TAD titulado *Implementación del Protocolo I2C en Redes de Microcontroladores* [Chica Barrera, 2009], y los PFC del grado de Ingeniería Informática titulado *Protocolo de Control y Encaminamiento de Dispositivos Bluetooth* [Sánchez Alcántara, 2009] y del grado de Ingeniería Técnica Industrial (esp. Electrónica Industrial) titulado *Optimización de la Carga de Baterías Mediante Células Solares Direccionables* [González Ramos, 2010].

3.7. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos

El objeto de este capítulo ha sido mostrar las diferentes posibilidades de enseñanza que ofrece una plataforma robótica de ensayo de propósito general, útil para experimentar con sistemas robóticos reales. El desarrollo de vehículos robóticos con propósitos púramente docentes es una experiencia compartida también por otras universidades, sobresaliendo los proyectos desarrollados por [Michaud, y otros, 2002], [Singh, y otros, 2000] e [Iagnemma, y otros, 1999] entre varios. En este capítulo son comparados algunos ejemplos de *rovers* desarrollados en los entornos docentes. Se ha comprobado que la mayoría de los sistemas estudiados comparten características comunes de diseño —como 2 ejes de 3 ruedas y la suspensión *Rocker-Bogie*— inspiradas en los primeros vehículos de exploración de la NASA, los cuales siguen generando publicaciones de interés hoy en día como puede comprobarse en [Bajracharya, y otros, 2008]. Quizás, lo más destacado de esta comparación (ver Tabla 3.1), sea que llame la atención el hecho de que una gran parte de los vehículos robóticos carezcan de un manipulador remoto incorporado o un IV de navegación.

Como ejemplo del vehículo robótico en el que se centra este capítulo, se muestran las características y utilidades de VANTER, acrónimo de *Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento*. En este capítulo se atienden a los aspectos técnicos del sistema robótico, concebido para configurar un vehículo autónomo de bajo peso equipado con un brazo robótico manipulador. Por ello, se describen pormenorizadamente los elementos electrónicos y mecánicos, la arquitectura de microcontroladores y el sistema de comunicaciones inalámbrico. El hecho más importante que se presenta del vehículo robótico es su configuración mecánica, la cual le permite realizar diferentes maniobras de desplazamiento gracias a su sistema de 4 ruedas independientes (ver Fig. 3.2).

Actualmente, VANTER está en un estado primigenio de desarrollo y representa un paso en el camino de construcción de un vehículo robótico equipado con un brazo manipulador. Este prototipo está siendo desarrollado con un doble objetivo: (1) servir como multi-plataforma para el entrenamiento real de estrategias de control (remoto o no) dedicadas a la visión artificial y el procesamiento de señales, y una vez concluido, (2) ser un vehículo robótico dotado de sistemas estándares abiertos, con posibles aplicaciones en áreas donde tanto las dimensiones como el entorno (radioactividad, toxicidad, etc.) prohíban la presencia humana. Por este motivo, los próximos desarrollos previstos están orientados a mejorar el sistema robótico VANTER en varios campos, algunos de ellos actualmente en marcha. Por un lado, el estudio de su modelo cinemático permitirá aplicar técnicas de control de par diferencial en las ruedas. Por otro lado, la mejora del sistema de almacenamiento de energía permitirá a VANTER

ganar mayor carácter de autonomía. Por último, la implementación de un enlace de banda ancha inalámbrico le permitirá una transferencia mayor de datos para su uso en aplicaciones de visión artificial.

Como otro de los desarrollos realizados en este capítulo, se describen los IVs desarrollados para el sistema de navegación y monitorización del vehículo robótico. El conjunto de plataforma robótica e IVs desarrollados para VANTER representan una pieza importante del concepto de laboratorios virtuales y remotos objeto de la Tesis, por lo que su relación será discutida en mayor profundidad en el Capítulo 6. El fin último que se pretende, es el de suscitar el desarrollo de experiencias docentes bajo un entorno de aprendizaje constructivo. La meta es la integración de materiales didácticos y sistemas robóticos en la educación en Ingeniería, facilitando la enseñanza del proceso científico a través de la manipulación directa de los sistemas robóticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., & Aguilar Nieto, F. (2005). Control de un Vehículo Robótico Dotado de Brazo Manipulador Mediante un Interfaz Virtual de Usuario. *XXVI Jornadas de Automática*, (págs. 743-748). Alicante.
- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., & Aguilar Nieto, F. (2005). Virtual Interface for Controlling a Remote Handle Rover. *Proceedings of the IADAT-aci2005 Conference*, (págs. 224-228). Bilbao.
- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., Aguilar Nieto, F., & Chica Barrera, J. (2006). Plataforma Robótica Controlada de Forma Remota Mediante una Red I2C de Microcontroladores. *XXVII Jornadas de Automática*, (págs. 511-516). Almería.
- Arroyave, M., Mazo, D., Cano, J., Arias, M., Vergara, J., Londoño Ospina, N., y otros. (2006). RTT: Robot para Navegación en Terrenos Irregulares. *Scientia Et Technica* , Vol. 12, Núm. 32, págs. 79-84.
- Bajracharya, M., Maimone, M., & Helmi, D. (2008). Autonomy for Mars Rovers: Past, Present and Future. *Computer, Journal of the IEEE Computer Society* , Vol. 41, Núm. 12, págs. 44-50.
- Bickler, D. (1998). Roving over Mars. *The American Society of Mechanical Engineers* , págs. 74-77.
- Bowling, S., & Fischer, R. (2002). An I2C Network Protocol for Environmental Monitoring. *Microchip Technology Incorporated* , págs. 1-97.
- Bruyan, P., Gennert, M., Speckert, G., Beach, R., Morgenstern, J., Kumar, N., y otros. (2005). A Robust Visual Tracking System for Patient Motion Detection in SPECT: Hardware Solutions. *IEEE Transactions on Nuclear Science* , Vol. 52, Núm. 5.
- Cabrera Jiménez, O. (1996). La Robótica Pedagógica. *Soluciones Avanzadas* , Núm. 40, págs. 1-7.
- Cerdá Castells, M., & Sánchez Salmerón, A. (2002). Sistema Distribuido de Visión Artificial. *XXIII Jornadas de Automática*. La Laguna.
- Chica Barrera, J. (2009). *Implementación del Protocolo I2C en Redes de Microcontroladores*. Escuela Politécnica Superior: Universidad de Huelva.
- González Martínez, O. (2006). Proyecto: Electrococo. *Seminario de Microrrobots*. Universidad de Alcalá de Henares.

- González Ramos, J. (2010). *Optimización de la Carga de Baterías Mediante Células Solares Direccionables*. Escuela Politécnica Superior: Universidad de Huelva.
- Iagnemma, K., Burn, R., Wilhelm, E., & Dubowsky, S. (1999). Experimental Validation of Physics-Based planning and Control Algorithms for Planetary Robotic Rovers. *The Sixth International Symposium on Experimental Robotics*, (págs. 319-328, Vol. 250).
- Loker, R., Collin, P., Frampton, G., McElhaney, T., Mook, J., Sansone, A., y otros. (2005). Remote Data Acquisition Using Bluetooth. *Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*.
- Longoria, R. (2005). *Basic Vision for Measurement and Control*. Austin: Department of Mechanical Engineering, University of Texas.
- López, D. (2009). Investigar en Educación: Guía Práctica. XV JENUI, (págs. 21-28). Barcelona.
- Michaud, S., Schneider, A., Bertrand, R., Lamon, P., Siegwart, R., van Winnendael, M., y otros. (2002). SOLERO: Solar Powered Exploration Rover. *Proceedings of the 7 ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*. The Netherlands.
- Parente, P. (2002). *Labview Webcam Library*. Recuperado el 2007 de Abril de 1, de <http://www.cs.unc.edu/~parente/>
- Sagiroglu, S., Yilmaz, N., & Wani, M. (2006). Web Robot Learning Powered By Bluetooth Communication System. *5th Int. Conf. on Machine Learning and Applications*. págs. 149-156.
- Sánchez Alcántara, M. (2009). *Protocolo de Control y Encaminamiento de Dispositivos Bluetooth*. Escuela Politécnica Superior: Universidad de Huelva.
- Seiko-Epson, Corp. (s.f.). *Micro-Flying Robot “μFR-II”*. Recuperado el 19 de Octubre de 2009, de http://www.epson.co.jp/e/newsroom/news_2003_11_18_2.htm
- Singh, S., Simmons, R., Smith, T., Stentz, A., Verma, V., Yahja, A., y otros. (2000). Recent Progress in Local and Global Traversability for Planetary Rovers. *IEEE Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, EEUU.
- Thianwiboon, M., Sangveraphunsiri, V., & Chancharoe, R. (2001). Rocker-Bogie Suspension Performance. *11th Int. Pacific Conf. in Automotive Engineering*, (págs. 1-6).
- Trevelyan, J. (2004). *Logitech Labview Image Acquisition Demonstration*. Recuperado el 19 de Octubre de 2009, de

<http://telerobot.mech.uwa.edu.au/Information/Logitech%20LabVIEW%20Image%20Acquisition%20Demonstration.pdf>

Weisbin, C. (2005). Documental Supermáquinas. (D. Channel, Entrevistador)

Yoshida, K., Hamano, H., & Watanabe, T. (2003). Slip-based Traction Control of a Planetary Rover. En *Experimental Robotics VIII* (págs. 644-653, Vol. 5). Springer Berlin / Heidelberg

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

En este capítulo se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un instrumento virtual que obtiene el modelo cinemático directo e inverso de un brazo manipulador robótico de 5 DOF más la pinza, orientado a prácticas con propósitos educacionales. El brazo forma parte del proyecto de investigación educativa que conforma VANTER, y de hecho es un elemento más de dicha plataforma robótica móvil (ver Fig. 3.1). El interés del instrumento virtual realizado en este capítulo radica en que posibilita, mediante una aplicación de control desarrollada para tales fines, determinar los límites físicos y el rango de operación que los usuarios pueden usar para controlar de forma remota un brazo robótico serial.

En laboratorios de Ingeniería en los que las prácticas con brazos robóticos son necesarias para comprender los conceptos fundamentales de teoría, los estudiantes necesitan realizar un completo estudio que asista los diferentes aspectos relacionados con la cinemática. La herramienta educativa de simulación desarrollada tiene como objetivo hacer práctica y atractiva la enseñanza sobre la cinemática de manipuladores robóticos serie. Su interfaz gráfica de usuario es una forma directa, fácil e interactiva de estudiar el método basado en Denavit-Hartenberg (D-H), que ayuda en prácticas de Ingeniería sin requerir un conocimiento sobre la programación de manipuladores. Este capítulo desarrolla, de una manera teórica, tanto la cinemática directa (FK, del inglés *Forward Kinematics*) como la cinemática inversa (IK, del inglés *Inverse Kinematics*), necesarias para demostrar el estudio de un brazo robótico educativo como ejemplo de caso práctico. Los módulos de simulación permiten definir los parámetros D-H y la geometría de brazos seriales con hasta 5 DOF. Otra de las grandes aportaciones de este capítulo reside en un entorno gráfico innovador que los profesionales de la

enseñanza pueden usar para estudiar la convención D-H, observar el movimiento de manipuladores robóticos serie y trazar los espacios de trabajo directo e inverso de una manera visual. Este proceso es mucho más simple, intuitivo y clarificador que interpretar los resultados de una manera analítica. Además, las capacidades genéricas de la herramienta de simulación desarrollada permiten comparar configuraciones de diferentes manipuladores robóticos (conocidos sus parámetros físicos y características mecánicas), tanto si los brazos robóticos están físicamente disponibles o no en el laboratorio.

El capítulo está organizado de la forma siguiente. La sección *Definición de Brazos Manipuladores* realiza una categorización de los brazos articulados y describe su uso genérico. En la sección siguiente se presenta el diseño del primer manipulador mecánico con el que se realizaron las implementaciones iniciales. Posteriormente, la sección *Brazo Lynx6* muestra el manipulador de bajo coste concreto utilizado. Éste se controla de forma remota a través de un IV, como parte de la plataforma VANTER. Por ello, en el apartado siguiente se desarrollan las ecuaciones de control por medio del método D-H y se obtiene el modelo FK para un manipulador genérico de 5 DOF. El apartado *Cinemática Inversa* discute brevemente los diferentes métodos IK existentes y desarrolla el método geométrico en particular. Los últimos apartados de esta sección están dedicados a la implementación hardware del brazo Lynx6, su control remoto a través de un IV y su integración con la herramienta EJS. La sección *Herramienta de Simulación 3D-RAS* está dedicada a la descripción de parte de un instrumento virtual que ha sido desarrollado para el análisis cinemático de brazos robóticos antropomórficos. Por ello, sus apartados *Espacio de Trabajo Directo 3D* y *Espacio de*

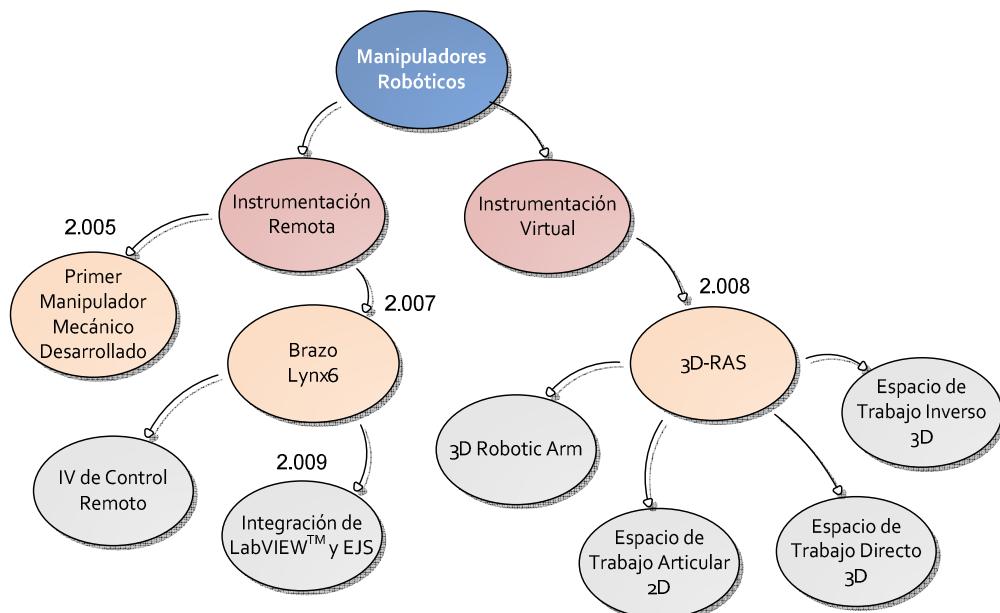


Figura 4. 1. Esquema general de los IVs descritos en el Capítulo 4.

Trabajo Inverso 3D describen los algoritmos y los módulos de simulación desarrollados, los cuales permiten calcular ambos espacios de trabajo directo e inverso para diferentes configuraciones de brazos robóticos. La sección de *Experimentación* pone en práctica, mediante el brazo robótico Lynx6, la metodología desarrollada hasta ahora. Finalmente, este capítulo aporta algunas conclusiones de la herramienta desarrollada, proporciona nuevas mejoras bajo la implementación actual y ofrece la herramienta desarrollada a la comunidad científica para su libre uso. Un esquema genérico que ayuda al lector a situarse entre los IVs desarrollados para este capítulo — con el nombre que adopta en las secciones y su conexión entre ellos— puede verse en la Figura 4.1.

4.1. Definición de Brazos Manipuladores

Un manipulador robótico puede ser clasificado atendiendo a diferentes criterios o características, siendo su elección dependiente de la aplicación o tarea a la que esté destinado. Atendiendo al momento tecnológico en que éste aparece, se puede hacer una primera clasificación generacional, lo que da una idea de los hitos significativos en las capacidades y avances de los manipuladores [Barrientos, 2002]. Cronológicamente, la primera generación se extiende desde el comienzo de la Robótica hasta los años 80. La segunda generación se desarrolla durante los años 80 y es la que mayormente se puede encontrar hoy en día en las industrias. La tercera generación es la que se está desarrollando hoy en día:

- **1^a Generación.** Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones del entorno.
- **2^a Generación.** Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar mediante visión artificial, detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
- **3^a Generación.** Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

Una clasificación desde el punto de vista del área de aplicación permite hacer una elección adecuada en función de la tarea que desarrollan. En cuanto a las actividades económicas, se puede encontrar una división realizada por la Federación Internacional de Robótica [IFR, 2004]:

- 110. Manipuladores en fundición.
- 130. Manipuladores en moldeado de plásticos.
- 140. Manipuladores en tratamientos térmicos.
- 150. Manipuladores en forja y estampación.
- 160. Soldadura.
- 170. Aplicación de materiales.

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

- 180. Mecanizado.
- 200. Montaje.
- 210. Paletización y empaquetado.
- 220. Medición, inspección, control y calidad.
- 230. Manipulación de materiales.
- 240. Formación, enseñanza e investigación.

Otra clasificación en cuanto al tipo de aplicación establece la agrupación siguiente:

- Robots personales y domésticos: tareas domésticas, entretenimiento, asistencia y ayuda a discapacitados, etc.
- Robots de servicios profesionales: de uso exterior, limpieza profesional, inspección, construcción y demolición, medicina, defensa, rescate y seguridad, submarinos, plataformas móviles de uso general, laboratorio, propósito especial, robots a medida, etc.
- I+D en Robótica: Percepción, actuación, micro/nano robots, navegación y control, interfaces con usuarios, etc.

En función del sistema actuador del manipulador robótico, éste puede ser clasificado como:

- Robot neumático.
- Robot hidráulico.
- Robot eléctrico.

Los actuadores eléctricos son muy utilizados en los aparatos mecatrónicos como, por ejemplo, en los sistemas robóticos. Gracias al uso de cables como medio para transmitir tanto la electricidad como las señales, prácticamente no hay restricciones respecto a la variedad o las formas, por lo que resultan sistemas altamente versátiles. Los accionamientos neumáticos se aplican cuando se precisa disponer de un movimiento rápido y no sobrepasan una cierta capacidad de carga-peso. Los actuadores hidráulicos, en particular, pueden estar aconsejados cuando se exige un elevado esfuerzo del robot o cuando se precise disponer de un aislamiento eléctrico entre el manipulador y el resto del sistema robótico.

Otra característica aplicable a los robots manipuladores permite realizar una clasificación atendiendo al número de ejes de la cadena cinemática. Se entiende por eje cada uno de los puntos articulares del brazo robótico que transmite o genera movimientos independientes, llamados grados de libertad. Para que un robot manipulador industrial esté considerado dentro de la clasificación ISO, éste debe tener al menos 3 DOF. En la práctica es posible encontrar cualquier número de grados de libertad superior, siendo la configuración más habitual la de 6 DOF. Los manipuladores con mayor número de ejes son poco habituales, estando justificada su complejidad

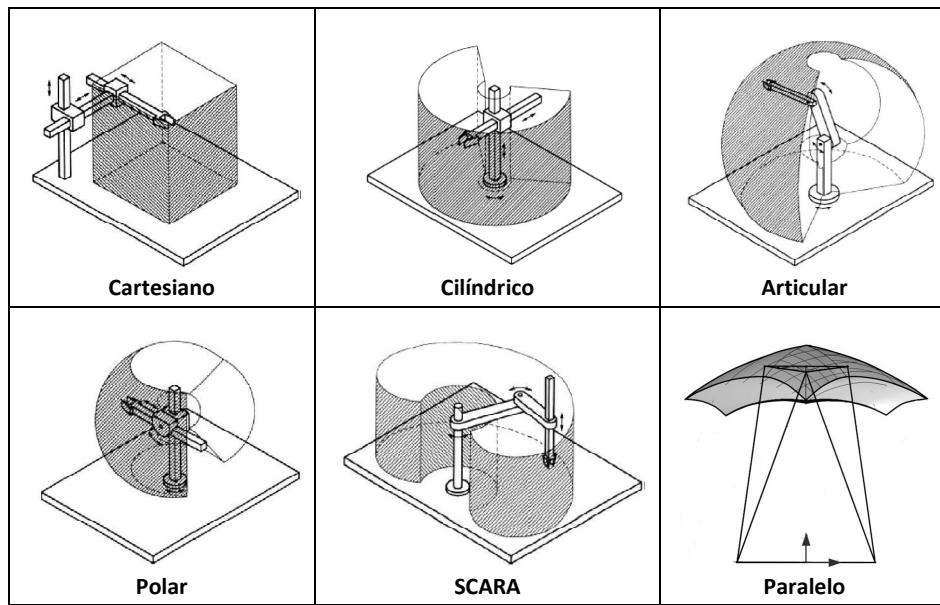


Figura 4. 2. Configuraciones de manipuladores robóticos.

para elevar la capacidad de maniobra del manipulador. La configuración de un robot queda definida por el tipo de movimientos permitidos entre dos eslabones consecutivos de la cadena. De acuerdo con esto, se tienen los tipos de configuraciones mostrados en la Figura 4.2.

Un informe realizado por el Instituto de Estadística del IFR en el año 2.006, mostró que las compañías japonesas lideran tanto la instalación como las ventas de robots industriales multipropósito. Aproximadamente el 60 % de los robots instalados eran articulares, siendo el 22 % cartesianos, el 13 % SCARA y el 4 % cilíndricos. En el año 2.007 el mercado mundial creció en 114.000 nuevos robots industriales instalados, situándose a finales de ese año en un millón de robots industriales en uso. La Tabla 4.1 muestra los manipuladores instalados en 2.003 en España y en el mundo según el número de ejes.

DOF	España	Resto de Países
3	100	4.148
4	46	3.678
5 o más	1.708	34.906
Configuración	España	Resto de Países
Cartesiano	179	11.301
Cilíndrico y Esférico	0	4.781
Articular	1.843	37.297
Scara	9	5.167
Paralelo	0	86

Tabla 4. 1. Manipuladores instalados en el año 2003.

Atendiendo al tipo de control, la norma ISO 8373, y en consonancia la IFR y la UNE EN ISO 8373:1998 en España, distingue entre las siguientes tipificaciones [AENOR, 1998]:

- *Secuencial*. El conjunto de movimientos se efectúa eje a eje en un orden dado, de tal forma que al final de un movimiento se inicia el siguiente. En este tipo de manipuladores sólo es posible controlar una serie de puntos de parada, resultando un movimiento punto a punto. Un ejemplo de ellos son los manipuladores neumáticos.
- *Controlados por trayectoria*. Se ejecuta un procedimiento controlado por el cual los movimientos, de 3 o más ejes, se desarrollan según instrucciones que especifican, en el tiempo, la trayectoria requerida para alcanzar la posición siguiente (obtenida normalmente por interpolación).
- *Adaptativo*. Tiene funciones de control por sensores (por ejemplo mediante visión artificial), control adaptativo o funciones de control de aprendizaje (por ejemplo mediante redes neuronales). De este modo, el manipulador robótico puede modificar su tarea de acuerdo a la información captada por el entorno.
- *Teleoperado*. Un robot puede ser controlado remotamente por un operador humano, extendiendo las capacidades sensoriales y motoras de éste a localizaciones remotas.

4.2. Primer Manipulador Mecánico Desarrollado

El primer prototipo de manipulador robótico¹ para VANTER fue construido en el año 2.005. El vehículo estaba equipado con un brazo robótico (ver Fig. 4.3) que disponía de 5 DOF más unas pinzas capaces de recoger pequeños objetos sólidos del suelo. Además, el brazo llevaba incorporada una bomba de vacío y un fino tubo

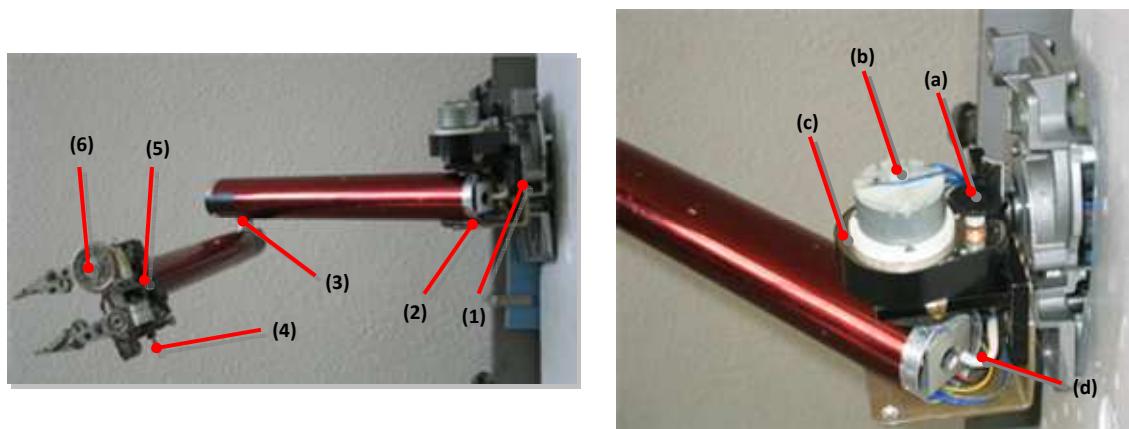


Figura 4. 3. Detalles del brazo robótico cilíndrico.

¹ Video de su funcionamiento disponible en <http://www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm>

interior que hacía posible tomar muestras líquidas. Su estructura cilíndrica hecha de aluminio, un verdadero ingenio realizado con materiales reciclados, tenía un peso aproximado de 1,650 Kg. Todos los encoders (a), motores DC (b), cajas reductoras (c) y bomba de succión (d), eran guiados por el interior de las articulaciones del brazo a lo largo de sus 70 cm, de modo que no interferían ni en la movilidad ni en el entorno de trabajo del brazo.

Según se muestra en la Figura 4.3, los puntos de rotación indicados en el brazo mecánico le conferían varios grados de libertad: el (1), situado en el hombro, estaba fijado a la estructura trasera del vehículo y disponía de movimientos de 360° ; el (2) ofrecía movimientos de 180° al brazo (limitado por acciones mecánicas) y junto con el (3), localizado en el codo, permitía mover el antebrazo a cualquier lugar deseado al alcance; el (4) permitía un movimiento lateral de 180° en la muñeca y junto con el movimiento circular del (5), posibilitaba mover las pinzas (6) con gran precisión hacia los objetos. Estos grados de libertad permitían apuntar la mano robótica en diferentes planos para obtener la mejor posición respecto de los objetos a coger. Por último, con las pinzas y el mecanismo de succión, un nuevo movimiento permitía abrir o cerrar las tenazas para tomar muestras sólidas o líquidas del suelo.

El prototipo mecánico tenía un manejo sencillo, estaba realizado únicamente con motores DC y no disponía de ninguna electrónica de control abordo. Por ello, inicialmente su manejo se realizaba con un mando analógico. Posteriormente, las primeras implementaciones [Andújar Márquez, y otros, 2005] fueron realizadas con los módulos de la Figura 4.4. La lectura de los encoders y la activación de los motores se realizaron mediante una tarjeta de adquisición de datos *NI-DAQCard 6025E* de *National Instruments* y una placa base *Mini-ITX* de *Via* con procesador de 600 Mhz y 15 W de consumo. Como parte de estos desarrollos, se implementó un IV que permitía

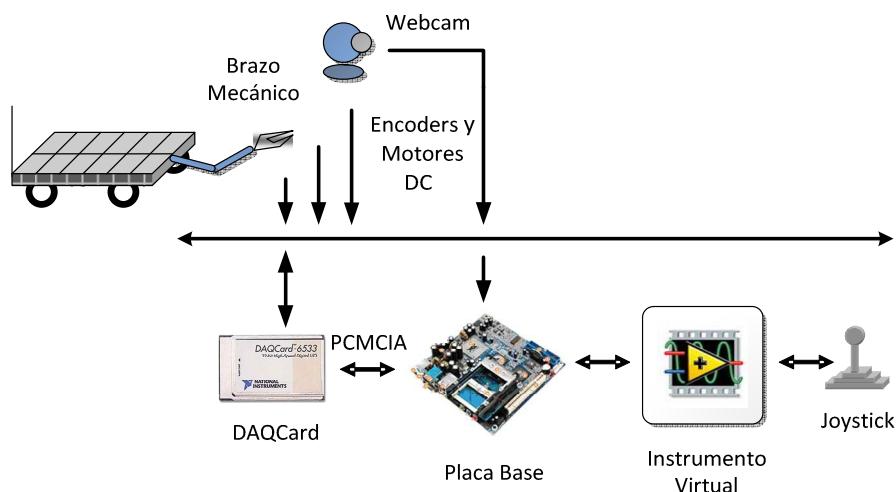


Figura 4. 4. Módulos hardware utilizados en el primer IV del brazo mecánico de VANTER.

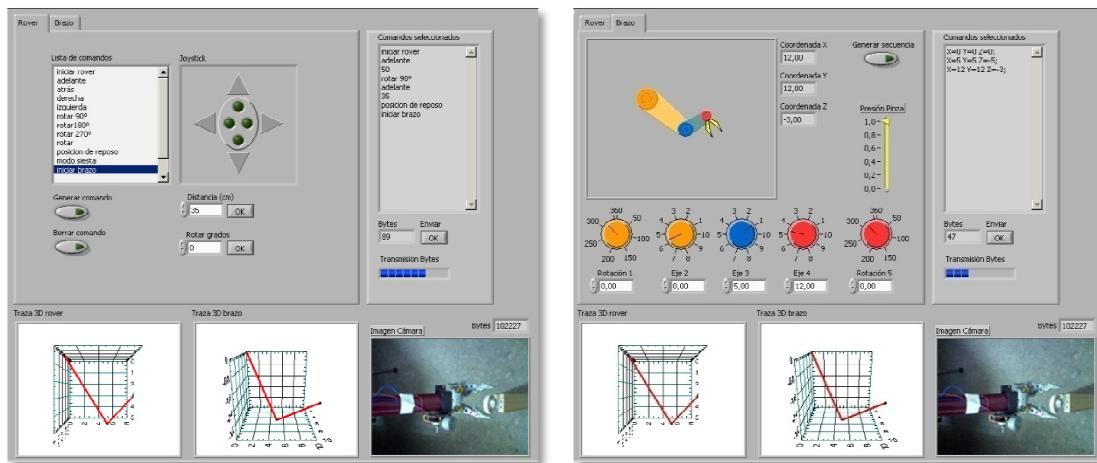


Figura 4.5. Captura del panel de control de VANTER y del brazo mecánico.

capturar imágenes eventualmente mediante una pequeña cámara CMOS acoplada a las pinzas (ver Fig. 4.5). Esto permitía al brazo mecánico enfocar objetos frontalmente y cuando éste estaba en posición vertical, permitía al vehículo tomar imágenes aéreas a 1 metro de distancia sobre el suelo.

En contraste con los manipuladores robóticos convencionales que disponen de un sistema de referencia fijo, típicamente la base, este brazo robótico estaba montado en un vehículo móvil. Esto añadía nuevos grados de libertad al espacio XYZ, por lo que se convertía en un nuevo sistema de referencia inercial donde los desplazamientos del vehículo cambiaban continuamente el espacio de trabajo del manipulador.

4.3. Brazo Lynx6

El brazo manipulador Lynx6² (ver Fig. 4.6) vino a sustituir en VANTER el prototipo estudiado en la sección 4.2. El brazo robótico Lynx6 ha sido elegido por su gran versatilidad y bajo coste. Lynx6 se considera un manipulador de 5 ejes de rotación (base, hombro, codo, movimiento y rotación de la muñeca), ya que aunque posee un grado más de libertad al tener una pinza funcional, ésta no afecta al posicionamiento ni a la orientación del extremo final. El brazo mecánico entrega movimientos rápidos, exactos y repetitivos gracias a los servomotores³ que lleva incorporados (ver Tabla 4.2), por lo que resulta un sistema económico de bajo coste y reducido tamaño, recomendable para las prácticas educativas.

² Disponible en <http://www.lynxmotion.com/>

³ Hitec Product Line, 2006. Disponible en <http://www.hitecrcd.com>



Figura 4. 6. Brazo educacional Lynx6.

4.3.1. *Modelo Cinemático Directo*

En la bibliografía hay disponibles un buen número de trabajos sobre modelos del brazo robótico Lynx6. Los más sencillos usan una hoja de cálculo en Excel que permiten crear una representación gráfica 2D del brazo, donde mediante ecuaciones algebraicas se obtienen los modelos FK e IK [Gay, 2004] y [Keesling, 2003]. Una implementación más avanzada y realizada mediante software en C, se desarrolló para analizar la cinemática de este manipulador como solución aproximada mediante gráficos 2D [Koyuncu, y otros, 2007]. Sin embargo, para estudiar otros brazos de robot de uso industrial (SCARA, PUMA 560-6R) hay una herramienta desarrollada en Matlab® que permite definir modelos de trabajo con ecuaciones matemáticas [Corke, 1996]. Proyectos que trabajan en otras áreas, resuelven el modelo cinemático del brazo Lynx6 con esta herramienta, pero están interesados en controlar el brazo de robot mediante análisis de imágenes basado en colores [Kock, y otros, 2007] u obtener la situación de objetos en el espacio 3D [Fennander, 2006].

La solución al problema de encontrar el modelo FK del brazo Lynx6 —y de otros— consiste en encontrar una matriz de transformación homogénea \mathbf{T} que relacione la posición cartesiana (p_x, p_y, p_z) y los ángulos de Euler (Φ, θ, Ψ) del efecto del extremo del brazo respecto al origen del sistema de coordenadas situado en su base, cuando los valores de cada articulación establecen la posición y orientación de sus segmentos (ver Fig. 4.7).

Denavit y Hartenberg propusieron un método de matrices basado en cambios en los sistemas de referencia [Denavit, y otros, 1955], que permite resolver de una manera sistemática el modelo FK para un brazo articulado de propósito general. Así, escogiendo adecuadamente el sistema de coordenadas ligado a cada segmento, es

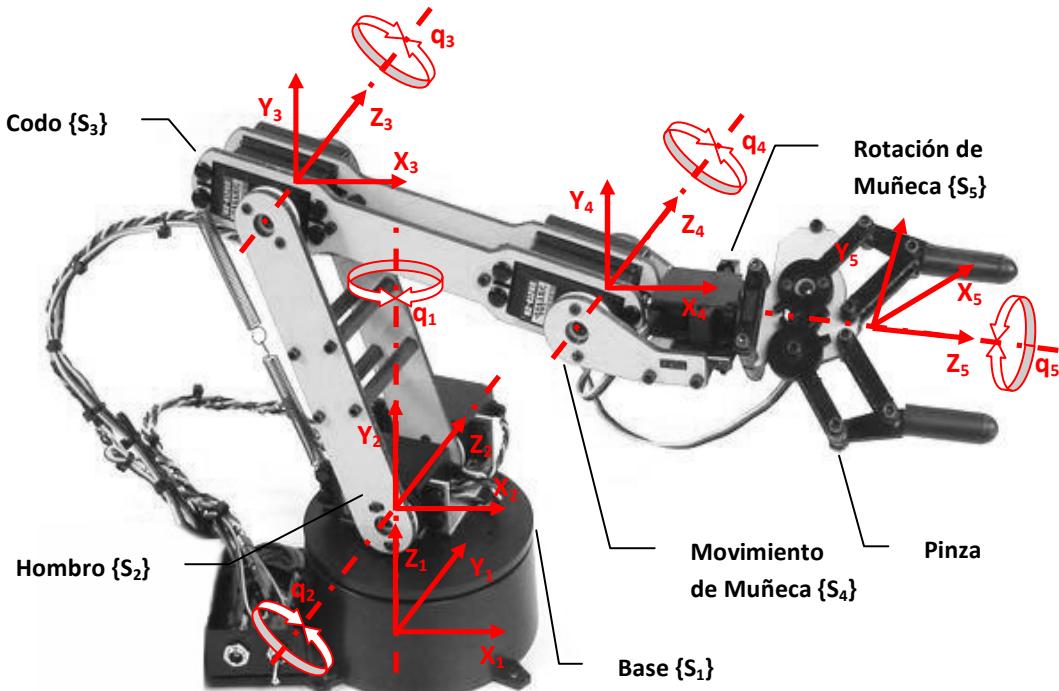


Figura 4. 7. Cadena cinemática del brazo Lynx6.

es posible ir de un sistema de referencia al siguiente por medio de cuatro transformaciones básicas:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \text{Rot}_z(\theta_i) \cdot \mathbf{T}(0,0,d_i) \cdot \mathbf{T}(a_i,0,0) \cdot \text{Rot}_x(\alpha_i) \quad (4.1)$$

donde ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ ($i=1, \dots, 6$) es la matriz de transformación resultante que relaciona el sistema de referencia del segmento $i-1$ con el sistema de referencia del segmento i -ésimo (como p.ej. los sistemas de referencia $\{S_1\}$ a $\{S_5\}$ de la Fig. 4.7), $\text{Rot}_z(\theta_i)$ es la rotación alrededor del eje Z_{i-1} con un valor de θ_i , $\mathbf{T}(0,0,d_i)$ es una traslación de una distancia d_i a lo largo del eje Z_{i-1} , $\mathbf{T}(a_i,0,0)$ es una traslación de una distancia a_i a lo largo del eje X_i , y finalmente $\text{Rot}_x(\alpha_i)$ es la rotación alrededor del eje de X_i con un valor de α_i .

Los resultados obtenidos van a depender exclusivamente de las características

Articulación	Servomotor	Par (6 V)	Velocidad
Base	DY S0210	6 Kg/cm	0,16s/60°
Hombro	2 x HS 475HB	5,5 Kg/cm	0,18s/60°
Codo	HS 475HB	5,5 Kg/cm	0,18s/60°
Movimiento de la muñeca	HS 475HB	5,5 Kg/cm	0,18s/60°
Rotación de la muñeca	HS 85HB	3 Kg/cm	0,16s/60°
Pinza	HS 81	3 Kg/cm	0,11s/60°

Tabla 4. 2. Características mecánicas del brazo Lynx6.

θ_i	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i	Límites
θ_1	65	25	90°	0 a 180°
θ_2 +90°	0	120	0°	0 a 90°
θ_3 -90°	0	120	0°	0 a 90°
θ_4	0	155	-90°	-90° a 90°
θ_5	0	0	0°	0 a 180°

Tabla 4. 3. Parámetros físicos de Lynx6 usados en el modelo D-H.

geométricas del brazo manipulador. Por lo que en nuestro caso, los parámetros físicos θ_i , d_i , a_i y α_i que dependen de los valores de las articulaciones y longitud conocidos en cada sistema de coordenadas, deben asignarse y expresarse en términos de la convención D-H según se muestra en la Tabla 4. 3.

Multiplicando las matrices individuales de la ecuación (4.1) en el orden correcto, la matriz de transformación $i^{-1}\mathbf{A}_i$ que resuelve los valores de posición y orientación en cada sistema de coordenadas es la de la ecuación (4.2).

$$i^{-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} n_{xi} & o_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ n_{yi} & o_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ n_{zi} & o_{zi} & o_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Los términos individuales de las tres primeras columnas de la matriz (**n**, **o**, **a**) representan la orientación del eje principal en el sistema de coordenadas. La última columna **p** indica la posición (x, y, z) del origen. Cada uno de los términos de la matriz pueden calcularse a partir de las ecuaciones (4.3) a (4.14) siguientes:

$$n_{xi} = \cos(\theta_i) \quad (4.3)$$

$$n_{yi} = \sin(\theta_i) \quad (4.4)$$

$$n_{zi} = 0 \quad (4.5)$$

$$o_{xi} = -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \quad (4.6)$$

$$o_{yi} = \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \quad (4.7)$$

$$o_{zi} = \sin(\alpha_i) \quad (4.8)$$

$$a_{xi} = \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) \quad (4.9)$$

$$a_{yi} = -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) \quad (4.10)$$

$$a_{zi} = \cos(\alpha_i) \quad (4.11)$$

$$p_{xi} = a_i \cdot \cos(\theta_i) \quad (4.12)$$

$$p_{yi} = a_i \cdot \sin(\theta_i) \quad (4.13)$$

$$p_{zi} = d_i \quad (4.14)$$

A partir de las ecuaciones (4.3) a (4.4) los términos de la matriz (4.2) pueden ser escritos en la forma (4.15).

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

donde $C\theta_i$ representa $\cos(\theta_i)$ y $S\alpha_i$ representa $\sin(\alpha_i)$, etc. La relación entre las matrices de transformación ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ forma la cadena cinemática de las articulaciones y segmentos consecutivos del brazo robótico. Esto es, permite conformar la matriz de transformación homogénea \mathbf{T} definida en (4.16).

$$\mathbf{T} = {}^1\mathbf{A}_6 = {}^1\mathbf{A}_2 \cdot {}^2\mathbf{A}_3 \cdot {}^3\mathbf{A}_4 \cdot {}^4\mathbf{A}_5 \cdot {}^5\mathbf{A}_6 \quad (4.16)$$

Sustituyendo los parámetros de la Tabla 4.3 en las matrices de transformación ${}^1\mathbf{A}_2$ a ${}^5\mathbf{A}_6$, se obtienen las ecuaciones (4.17) a (4.21).

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 2,5C\theta_1 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 2,5S\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 6,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} C\theta_2 + 90 & -S\theta_2 + 90 & 0 & 12C\theta_2 + 90 \\ S\theta_2 + 90 & C\theta_2 + 90 & 0 & 12S\theta_2 + 90 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$${}^3\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} C\theta_3 - 90 & -S\theta_3 - 90 & 0 & 12C\theta_3 - 90 \\ S\theta_3 - 90 & C\theta_3 - 90 & 0 & 12S\theta_3 - 90 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\mathbf{4A}_5 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & 15,5C\theta_4 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & 15,5S\theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\mathbf{5A}_6 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & 0 \\ S\theta_5 & C\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Calculando la multiplicación no conmutativa de la ecuación (4.16), se obtiene la matriz de transformación homogénea, la cual puede escribirse de forma compacta como en (4.22).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

donde (**n**, **o**, **a**) es una terna ortogonal que representa la orientación ((n_x, n_y, n_z), (o_x, o_y, o_z) y (a_x, a_y, a_z)) y **p** es un vector (p_x, p_y, p_z) que representa la posición del extremo efector del brazo.

4.3.2. Modelo Cinemático Inverso

El algoritmo IK hace fácil el posicionamiento del brazo cuando se proporcionan las coordenadas (p_x, p_y, p_z) para el extremo efector. Los grados de libertad de un brazo de robot, son una buena medida de su capacidad de movimiento y de lo complicado que puede ser su control. No existen algoritmos generales de solución al problema IK; para un brazo como el Lynx6 con 5 DOF, hay varias soluciones para poder alcanzar un punto dado en el espacio. Por estas razones, resolver el modelo IK es más complejo que resolver el modelo FK.

Hay varios métodos de solución propuestos para resolver el problema del posicionamiento [Horsch, 2000]. Por un lado, las soluciones numéricas iterativas son descartadas; ya que no son aplicables al control de un manipulador en tiempo real. Por otro, las ecuaciones algebraicas son difíciles de obtener pero permiten una solución cerrada aunque no lineal del problema. Por último, encontrar una forma cerrada y relativamente fácil al problema inverso, es posible utilizando un método geométrico que relacione las coordenadas del extremo, los ángulos de las articulaciones y los parámetros físicos del brazo [Hong, 2004]. Éste es un método conveniente, ya que divide la solución en un conjunto de subproblemas geométricos en el plano. Además, resulta adecuado cuando sólo se consideran los primeros DOF que definen la posición

de la pinza, con objeto de minimizar las múltiples soluciones (ver sistemas {S1} a {S4} en la Figura 4.7).

Generalmente no es suficiente el posicionamiento del extremo efector del brazo en el espacio cartesiano, por lo que es necesario orientar la muñeca con un ángulo θ_i respecto del suelo, denominado *wartg* (*wrist with an angle related to the ground*), para encarar los objetos. Por simplicidad, el usuario puede proporcionar un valor constante para disminuir el número de soluciones. Con este criterio, hay una única solución posible a las ecuaciones geométricas [Koyuncu, y otros, 2007]. Además, para facilitar el control del brazo, el grado de apertura o cierre de la pinza también puede ser introducido a mano por el usuario. La solución a las ecuaciones se resuelve en las expresiones (4.23) a (4.29).

$$\theta_1 = \text{atan2}\left(p_y, p_x\right) \quad (4.23)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\left(x_b - (q \times z_b)\right), \left(z_b + (q \times x_b)\right)\right) \quad (4.24)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \text{atan2}\left(\left(x_b + (q \times z_b)\right), \left(z_b - (q \times x_b)\right)\right) \quad (4.25)$$

$$\theta_4 = \theta_6 - \text{atan2}\left(\left(x_b + (q \times z_b)\right), \left(z_b - (q \times x_b)\right)\right) \quad (4.26)$$

donde θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 son los ángulos de las articulaciones que forman la cadena cinemática del brazo, mientras θ_5 representa el ángulo introducido para la apertura o cierre de la pinza y θ_6 representa la orientación de la muñeca con respecto al suelo. Por último,

$$x_b = \frac{\left(p_x - a_1 - (a_4 \times \cos \theta_6)\right)}{2 \times a_2} \quad (4.27)$$

$$z_b = \frac{\left(p_z - d_1 - (a_4 \times \sin \theta_6)\right)}{2 \times a_2} \quad (4.28)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{\left(\left(x_b^2\right) + \left(z_b^2\right) - 1\right)}} \quad (4.29)$$

donde x_b y z_b representan respectivamente las coordenadas en los ejes x y z al final del cúbito, d_1 , a_1 , a_2 y a_4 son las longitudes de los segmentos del manipulador robótico y q es una relación para facilitar la compacidad y el manejo de las ecuaciones.

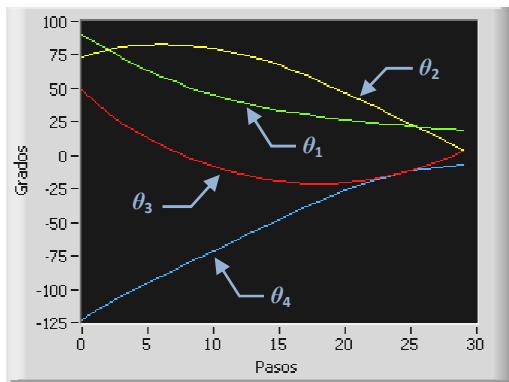


Figura 4. 8. Rango IK del manipulador Lynx6.

Existen muchas soluciones posibles para la IK utilizando el método geométrico. Las más sencillas tienen en cuenta únicamente las longitudes de los segmentos para calcular el ángulo de las articulaciones. Sin embargo, la solución adoptada aquí tiene en cuenta θ_6 , que define la orientación de la muñeca con respecto al suelo (*wartg*). Este ángulo representa el final de la cadena cinemática de un brazo robótico, por lo que implícitamente tiene en cuenta las longitudes de sus segmentos (d_2, d_3, d_4 y d_5) en las ecuaciones 4.23 a 4.29. Por otro lado, las ecuaciones anteriores no tienen una única solución, por lo que para evitar la incertidumbre fue introducida la función *atan2* en las ecuaciones. A diferencia de la función simple *atan*, la versión 2 de esta función toma en cuenta los signos de ambos vectores y calcula el ángulo en el cuadrante correcto. Por ejemplo: $\text{atan2}(1,1) = \pi/4$ y $\text{atan2}(-1,-1) = -3\pi/4$.

Como ejemplo, en la Figura 4.8 se muestra el rango articular para el manipulador Lynx6, donde los ángulos se corresponden con las articulaciones descritas en la Figura 4.7 y la Tabla 4.3.

4.3.3. Hardware de Control Remoto

Una vez que los parámetros de estado del manipulador Lynx6 a controlar son definidos por los usuarios, los datos de las acciones se escriben y se leen a través de los bloques de comunicación conectados al hardware (ver Fig. 4.9). La sucesión de bytes, que especifican la posición angular y la velocidad de las articulaciones, se proporcionan al IV remoto según los modelos FK e IK estudiados.

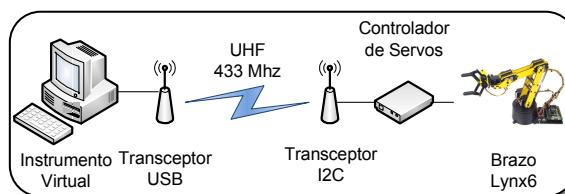


Figura 4. 9. Esquema del sistema de control remoto desarrollado para el brazo Lynx6.

Hay diferentes métodos que usan tarjetas controladoras de servos directamente conectadas a un puerto RS-232 o USB. Entre las características útiles de estas tarjetas controladoras, se pueden mencionar el control de la fuerza que ejerce cada servo o la comunicación directa mediante el bus I2C. En el caso del manipulador Lynx6, las articulaciones del brazo son operadas por servos analógicos con 180° de rango y de $0,45^{\circ}$ a $0,78^{\circ}$ de ancho de banda muerto. Cada posición del servo es controlada por un pulso positivo entre 0,5 ms y 2,5 ms, generados cada 20 ms por una tarjeta controladora⁴ (ver Fig. 4.10). La relación entre los parámetros de posición de los servos y los ángulos reales de las articulaciones, han tenido que ser determinados a mano para evitar romper los engranajes, midiendo el rango de operación del servo con el rango del pulso correcto.

La tarjeta puede controlar hasta 21 servomotores mediante señales en un bus I2C, manteniendo una tasa de refresco de 20 ms. Siguiendo el esquema de la Figura 4.10, las señales I2C se procesan a través del microcontrolador *PI/C18F2220* que está en placa y los comandos proceden de un transceptor UHF de baja potencia a 19.200 baudios⁵. Todos los pines del controlador que no se utilizan para el bus I2C, están disponibles en un conector para utilizarlos en otras tareas de entrada y salida. El circuito incorpora pines de alimentación independiente para alimentar los servos (6-7, 2 V) y el circuito (5 V), aunque también es posible utilizar alimentación única a través de un regulador interno de 5 V con baja caída de tensión. Esta última opción sólo es válida cuando se trabaja con menos de 5 ó 6 servos y éstos no realizan trabajos de gran potencia.

La tarjeta *SD21* ejecuta un programa *firmware* que maneja los servos mediante

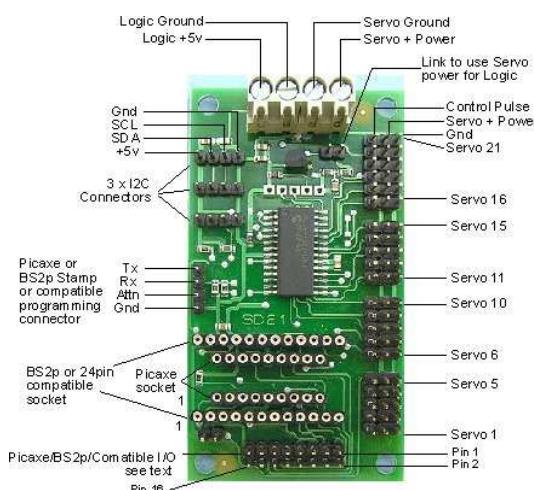


Figura 4. 10. Tarjeta controladora de servomotores SD21.

⁴ Controlador SD21 por I2C para 21 servos. Disponible en <http://www.superrobotica.com/S310180.htm>

⁵ LPRS Easy Radio. Disponible en <http://www.lprs.co.uk/>

dos parámetros: velocidad y posición angular. Estos parámetros son definidos a través de tres bytes sin signo asociados a tres registros internos por cada servo. Estos registros son la velocidad, LSB y MSB de la posición. Un vez que son configurados los parámetros, deben ser enviados consecutivamente a la dirección 0xC2 del microcontrolador a través de la emisora UHF. El circuito *SD21* es capaz de controlar también la tensión de la batería de los servos, con lo cual su lectura está disponible a través de un registro interno.

La velocidad es controlada por un registro cuyo valor mueve al servo en un determinado espacio de tiempo. Tras el encendido, la velocidad del registro es cero (0x00), por lo que el servo se establecerá en la posición solicitada inmediatamente. Si el registro de velocidad está definido con un valor diferente a cero, entonces la fórmula para definir el tiempo que tardará el movimiento es la siguiente:

$$(P_f - P_i)/V) \times 20 \quad (4.30)$$

donde la ecuación está expresada en milisegundos. P_f indica la posición final, P_i establece la posición de inicio y V representa el valor del registro de velocidad.

La posición (LSB y MSB) es un número de 16 bits que establece directamente el ancho del pulso de salida expresado en microsegundos. Generalmente, establecer la posición como 1.500 μ s permite mover a la mayoría de los servos a su posición central. Sin embargo, el rango de los anchos de pulsos varía mucho en función del modelo y fabricante de los servomotores. Los registros pueden también leerse de manera inversa, de forma que puede realizarse un seguimiento de su movimiento hacia la posición requerida.

El sistema de control por UHF se compone de una pareja de transceptores de datos (ver Fig. 4.11). El *CM02/400* es un dispositivo de radio para la transmisión de datos a 19.200 baudios, con la particularidad de que incluye un bus I2C con una tasa de bits de 100 KHz. Esto quiere decir que puede controlar uno o varios dispositivos I2C vía radio sin necesidad de ningún circuito adicional. El circuito incluye un interruptor y un

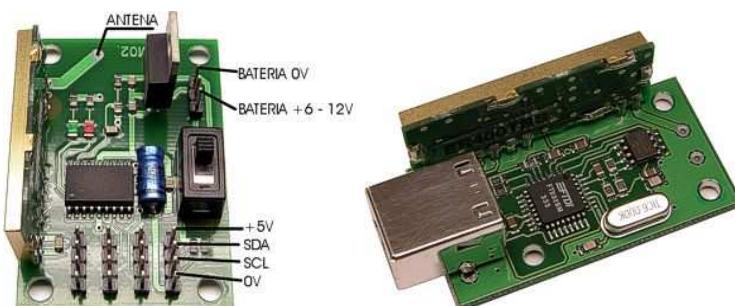


Figura 4. 11. Transceptores de datos CM02/400 y RF04.

regulador de tensión (5 V, 1 A) capaz de alimentar los circuitos que esté controlando. Adicionalmente incluye un medidor de la tensión de la batería, que también puede monitorizarse vía radio. El transceptor está alimentado a 12 V por la batería de VANTER, pudiendo medir el voltaje de las baterías e informar al ordenador de esta información.

El modelo *CM02/400* tiene una potencia de salida de 10 mW, un alcance de 150 metros en exteriores y utiliza el módulo *LPRS EasyRadio ER400TRS* que opera a 433-4 MHz. Para su uso, requirió una antena realizada mediante una pieza de alambre macizo de 16,4 cm de largo. El número máximo de datos no puede superar los 76 bytes para evitar el desbordamiento del búfer interno del dispositivo de radio. El transceptor remoto *RF04* incluye un convertidor de USB a puerto serie que una vez instalado en el PC, crea un puerto serie virtual sobre el puerto USB. Por otra parte, el circuito incluye un módulo *LPRS EasyRadio ER400TRS* conectado a la salida serie del convertidor USB a través del chip *FTDI FT232BM*.

4.3.4. Instrumento Virtual de Control Remoto

El fabricante del manipulador Lynx6 ha desarrollado un software bajo licencia, denominado *RIOS*⁶, para el control del brazo robótico. Esta aplicación es exclusiva para varios modelos de brazos robóticos de este fabricante y requiere el controlador hardware de servomotores *SSC-32* conectado al brazo. Entre otras, este software permite la realización de algunas tareas específicas como la selección del modelo de brazo robótico, la secuenciación de movimientos, la compensación por gravedad de pesos y la comunicación por sockets si se utiliza un escáner 3D mediante el sensor *IR Sharp GP2D12*. Por este motivo, para realizar el control del brazo robótico Lynx6 utilizando la tarjeta controladora usada en la sección anterior, ha sido necesaria la implementación propia de un IV de control remoto. Esto ha posibilitado el desarrollo posterior de los subsistemas que conforman el instrumento virtual 3D-RAS que se explica en este capítulo y el siguiente.

Para manipular el brazo robótico Lynx6 instalado en VANTER, se ha diseñado, desarrollado e implementado un IV que obtiene el modelo cinemático directo e inverso de un manipulador robótico de 5 DOF [Mateo Sanguino, y otros, 2008]. El panel de diagrama del IV (ver Fig. 4.12), contiene múltiples hilos programados con diferentes tiempos de muestreo y prioridades. La tarea de control calcula las variables del sistema y se ejecuta en una estructura de bucle temporizada, respetando la arquitectura común de una tarea en tiempo real (RTT) como se describe en [Salzmann, y otros, 1999]. Por ello, las secciones en las que se divide el control del flujo son: (a)

⁶ *Robotic Arm Interactive Operative System*, disponible en <http://www.lynxmotion.com/images/data/rios106h.pdf>

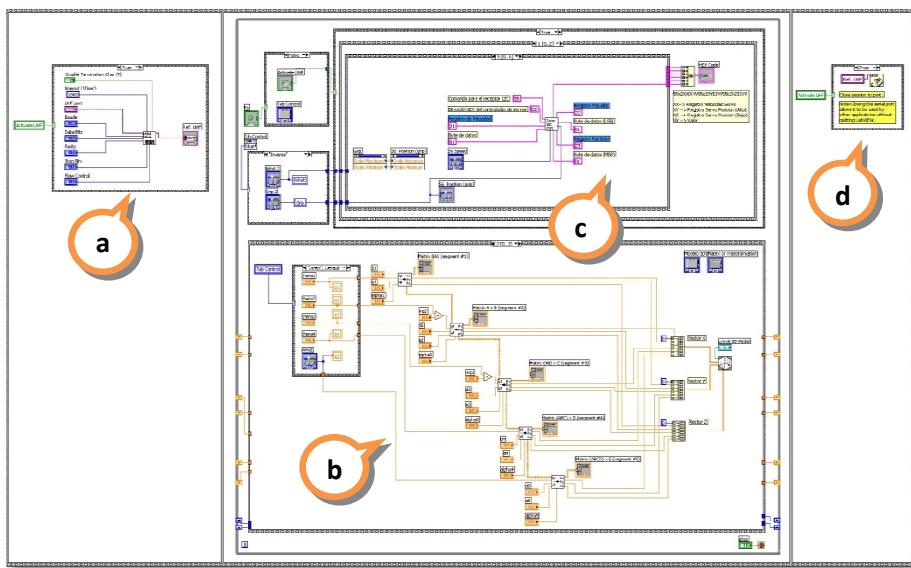


Figura 4. 12. Vista de la programación gráfica del IV.

inicialización del hardware, (b) control del experimento físico, (c) modelo cinemático directo e inverso y (d) liberación del hardware antes de finalizar.

El panel de control remoto del IV permite al usuario relacionar conceptos teóricos con prácticas sobre las estructuras mecánicas, parámetros D-H y cinemáticas directa e inversa (ver Fig. 4.13). La interfaz gráfica de usuario, cuya versión de demostración del IV se encuentra disponible⁷ para descargar, está dividida en dos áreas verticales. Desde ellas, el estudiante puede actuar de forma interactiva con el brazo, controlar sus movimientos y observar su comportamiento. En el panel de control, la pestaña superior derecha del IV (*3D Model*) muestra en todo momento una representación 3D del brazo robótico en tiempo de ejecución. En la parte superior central de esta misma pestaña, el área de parámetros D-H permite al usuario configurar tanto la longitud de los segmentos como los grados de libertad de cualquier manipulador robótico de hasta 5 DOF. Por defecto, los valores articulares y los parámetros geométricos están configurados para el brazo Lynx6 según los valores de la Tabla 4.3. En la parte inferior derecha, el panel muestra —en diferentes páginas—, las matrices de transformación homogénea de cada sistema de referencia, desde {S1} a {S5}. Además, los ángulos de las articulaciones y las coordenadas xyz de la base, hombro, codo, muñeca y del extremo final, pueden ser siempre visualizadas en un área separada.

En el área de la izquierda (a) de la Figura 4.13 se muestra el panel (*Direct* e *Inverse*), que permite al usuario elegir el modelo de funcionamiento, directo o inverso, para controlar el brazo manipulador. En este área, la pestaña activa muestra los botones degradados y barras deslizadoras, cuyas posiciones definen valores de

⁷ Demo Brazo Lynx6. Disponible en <http://www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm>

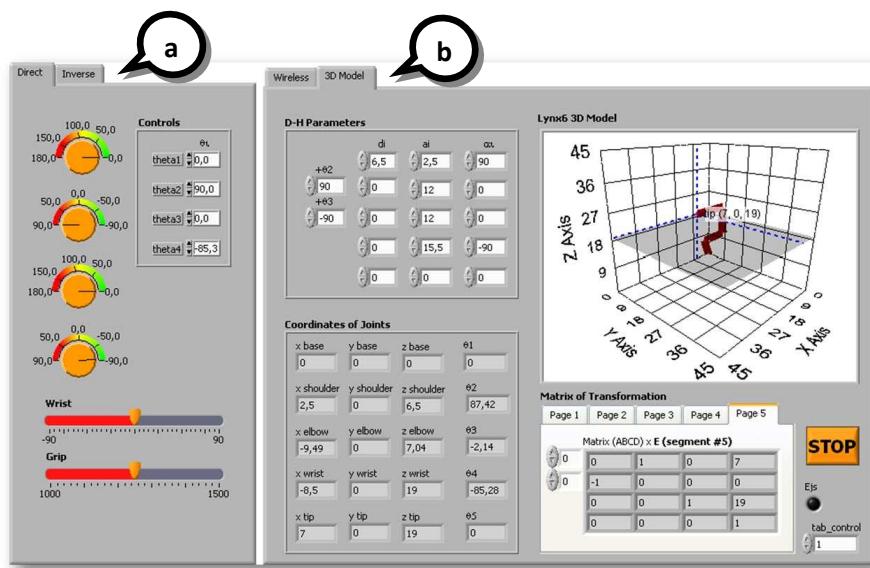


Figura 4. 13. Panel frontal del modelo 3D de Lynx6.

entrada al modelo FK. Por el contrario, la página inactiva inferior permite al usuario usar el modelo cinemático inverso y modificar los valores (p_x, p_y, p_z) e inclinación $wartg$ del extremo efector para alcanzar cualquier posición del espacio de trabajo. En el área de la derecha (b), la pestaña inferior del IV (Wireless) tiene como función configurar los parámetros de comunicación inalámbrica y manejar el brazo robótico por medio del enlace UHF. Mediante los controles deslizadores del panel se puede seleccionar la posición y velocidad de movimientos de los servomotores del brazo Lynx6. Las palabras de control, siguen el esquema descrito en la Tabla 4.4 y la Figura 4.14.

Campo	Parámetro
Comando para el receptor I2C	55
Dirección I2C del controlador de servos	c2
Registro de velocidad del servo	XX
Longitud	01
Valor	VV
Registro de posición del servo (MSB)	XY
Longitud	01
Valor	VV
Registro de posición del servo (LSB)	XZ
Longitud	01
Valor	VV

Tabla 4. 4. Descripción del paquete de instrucción.

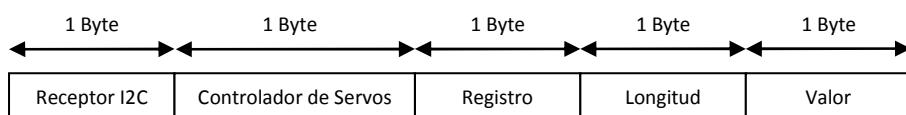


Figura 4. 14. Paquete de instrucción.



Figura 4. 15. Panel frontal de control remoto de Lynx6.

Como ejemplo, una cadena de valores hexadecimales necesaria para controlar la tarjeta de la Figura 4.10 a través de los módulos de la Figura 4.11 podría ser la siguiente: 55c2XX01VV55c2XY01VV55c2XZ01VV.

4.3.5. Integración de LabVIEWTM y EJS

Esta sección describe parte de una nueva herramienta de simulación educativa creada para su uso en asignaturas de Robótica en el grado de Ingeniería, la cual está siendo experimentada en la asignatura de Robótica [Andújar Márquez, y otros, 2010], que se imparte en el tercer curso del grado de Ingeniería Técnica Informática de la Universidad de Huelva (España).

Con la idea de disponer de un instrumento virtual que fuera capaz de controlar de forma remota el brazo robótico Lynx6 a través de Internet, se realizó el diseño e implementación de un sistema *front-end* basado en *applets* de JavaTM. El primer paso fue diseñar la capa de experimentación mediante la programación gráfica de LabVIEWTM. Esta capa incluye la creación de la aplicación local que ejecuta un lazo de control en tiempo real. Este lazo controla el estado de los parámetros del sistema actuando sobre el modelo cinemático del brazo Lynx6 (ver Fig. 4.16).

El segundo paso fue el diseño de una capa necesaria para desplegar, sobre Internet, los recursos basados en web. EJS⁸ es la herramienta de software libre escogida para implementar la interfaz del cliente (ver Fig. 4.17). Esta herramienta, diseñada inicialmente para desarrollar y distribuir simulaciones científicas por medio de *applets* de JavaTM, está siendo usada con éxito para el control de laboratorios

⁸ Easy Java Simulations, disponible en. <http://www.um.es/fem/Ejs/>

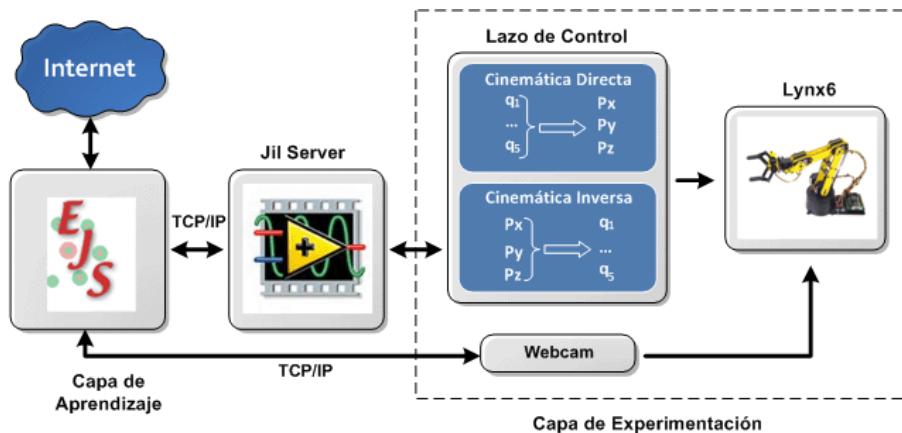


Figura 4. 16. Diagrama de comunicación en Internet de Lynx6.

virtuales y remotos [Esquembre, 2004]. Esta capa, denominada en EJS como capa de aprendizaje, comprende el panel que hace de interfaz interactiva con el usuario remoto. De esta forma, la capa de aprendizaje envía a la capa de la experimentación los datos cada vez que un usuario cambia algún valor.

Las simulaciones en EJS están estructuradas en dos partes diferentes; por un lado, el panel de la vista proporciona los gráficos y el aspecto visual de la simulación. Por otro lado, subyacente a esta capa, existe un modelo que describe la conducta del brazo Lynx6 usando variables y ecuaciones expresadas en código Java™. Ambas partes están relacionadas, ya que las interacciones de los usuarios cambian los parámetros del modelo físico y la evolución del modelo matemático afecta al panel visual. La Figura 4.17 muestra un ejemplo de la interfaz del cliente desarrollado con EJS. El panel

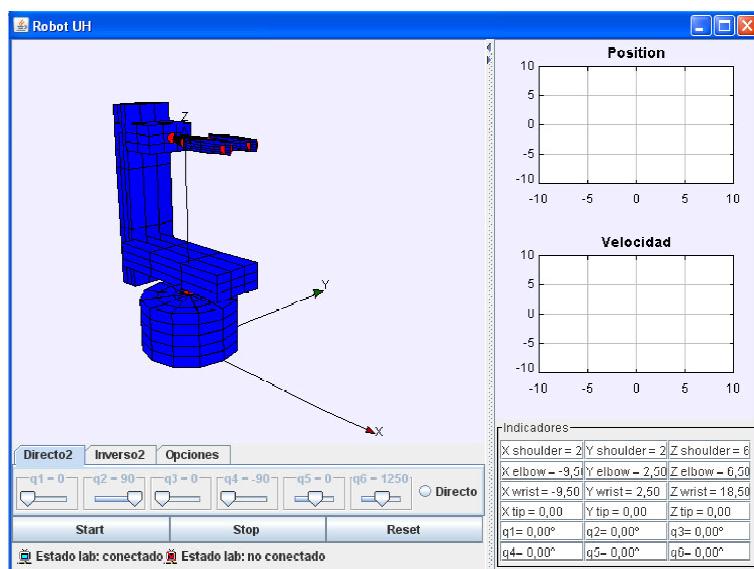


Figura 4. 17. Interfaz de EJS desarrollado para Lynx6.

visual está dividido en varias secciones que permiten mostrar y controlar los datos intercambiados con el lado del servidor.

La arquitectura que conecta la capa de experimentación y la de aprendizaje puede ser considerada como una aplicación del tipo cliente-servidor basada en una comunicación TCP/IP, cuyo lazo de información, de carácter asíncrono, contiene las variables globales comunes que cambian el estado del sistema. El diagrama de la Figura 4.16 muestra el esquema de comunicación que los datos de los usuarios deben seguir para controlar el brazo Lynx6 a través de Internet. La elección de esta arquitectura se debe a su elevado grado de robustez y flexibilidad en situaciones en las que el protocolo de control de transmisión juega un papel fundamental en la continuidad de la comunicación.

El lazo de información entre la capa de experimentación y la de aprendizaje ha sido llevado a cabo por un *middleware* llamado *JIL Server* [Vargas, y otros, 2008]. Esta aplicación (ver Fig. 4.16), ubicada entre los *applets* de EJS y los IVs de LabVIEWTM, usa el concepto de arquitectura *parser* para formatear y leer los controles e indicadores en el lado del servidor. Debido a que el lazo de información es implementado mediante una conexión TCP/IP y la comunicación en Internet está bajo las condiciones de la red, la comunicación TCP/IP representa una perturbación no determinística que afecta a la respuesta en tiempo real del lazo de control.

En ese sentido, hay dos maneras de controlar el experimento: como un laboratorio virtual en el lado local o un laboratorio remoto en el lado de Internet. El laboratorio virtual permite a los usuarios interactuar con los parámetros de la simulación estudiada. Una vez que el modelo matemático y los conceptos teóricos han sido estudiados, es posible permitir a los usuarios transformar el laboratorio virtual en uno remoto por medio de un botón de conexión localizado en el panel de vista de EJS.

Desde este momento, un método de conexión TCP se invoca y la información comienza a ser intercambiada con el lado del servidor. Los paquetes de datos permiten al lazo de control interactuar con el experimento hardware. De esta forma, para el problema del no determinismo descrito anteriormente, ha sido esencial el uso de un bloque gráfico implementado en el lado del servidor para supervisar el estado del sistema mediante realimentación de una webcam. La Figura 4.18 muestra la interfaz de usuario de *JIL Server* ejecutando una conexión de control del brazo Lynx6. El panel de conexión proporciona información sobre la aplicación que es servida por este *middleware*.

Una vez que los parámetros del brazo Lynx6 son definidos por las acciones de los usuarios en el lado del cliente, los datos del sistema son escritos y leídos a través de los bloques de comunicación conectados al experimento remoto. En la estructura del lado servidor, la capa de la experimentación, realizada en LabVIEWTM, incluye el

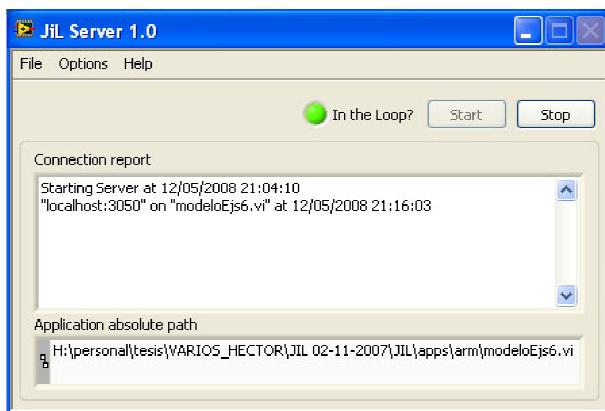


Figura 4. 18. Panel de conexión de JIL Server con Lynx6.

modelo cinemático que define el proceso físico a controlar. Esta secuencia de operaciones, conocida como lazo de control, debe llevarse a cabo en un periodo de tiempo fijo de acuerdo con los requisitos dinámicos del sistema. La implementación de este tipo de aplicaciones en Ingeniería Robótica y sobre todo en laboratorios virtuales y remotos enfocados a la educación se hace normalmente usando IVs de LabVIEW™ [Vargas, y otros, 2008].

4.4. Instrumento Virtual 3D-RAS

La bibliografía disponible incluye numerosos trabajos sobre herramientas con propósitos educativos muy apropiadas para estudiar y simular modelos cinemáticos de brazos robóticos. *ROBOTSIM* se desarrolló como una herramienta de simulación para estudiantes basada en animaciones y gráficos 3D, enfocada en la programación de manipuladores robóticos [Sheehan, y otros, 1990]. Como ejemplo de otra herramienta, un asistente de diseño para manipuladores con múltiples DOF permite, mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas, estudiar la convención D-H a través de un interfaz gráfico [Nethery, y otros, 1994]. Más enfocado a la simulación de brazos robóticos de uso industrial, [Cakir, y otros, 2007] desarrollaron una herramienta educativa para resolver la cinemática de manipuladores con 6 DOF. Una de las primeras aplicaciones realizadas en España fue dada a conocer en el año 1.997 por un proyecto realizado en la Universidad Politécnica de Madrid⁹. Este simulador permite obtener una perspectiva 3D de algunos modelos de brazos robóticos como el PUMA 560R, ASEA o MENTOR.

La simulación de modelos cinemáticos físicos y el comportamiento aplicados a brazos robóticos ha inspirado la creación de numerosos entornos de simulación. Por

⁹ M.A. Domínguez Castellano, Proyecto de Simulación Espacial de ROBOTS (EUITI), 1997

citar algunos, *Robotic Toolbox*¹⁰ de Matlab® fue desarrollado para definir modelos de trabajo mediante ecuaciones matriciales, como por ejemplo para el manipulador PUMA 560 [Corke, 1996]. Basado en los desarrollos previos de *P.I. Corke*, se concibió un paquete de librerías y funciones de alto nivel denominado *HEMERO*¹¹. El objetivo de este paquete, implementado en Matlab® y Simulink, es ir más allá del estudio de manipuladores robóticos, permitiendo abarcar diversos aspectos de brazos y vehículos robóticos como el estudio de modelos cinemáticos, dinámicos, control y generación de trayectorias [Maza Alcañiz, y otros, 2001]. Basado en este mismo entorno de Matlab®, la herramienta de simulación *ROBOLAB* ha sido desarrollada para mejorar el aprendizaje y comprensión de los estudiantes en el campo de la Robótica [Kucuk, y otros, 2009]. *ROBOMOSP* representa una herramienta completa de modelado y simulación para manipuladores robóticos a través de un sistema multiplataforma CAD en 3D. Como novedad principal, este paquete desarrollado con un enfoque más investigador que docente, tiene la posibilidad de ser conectado a brazos robóticos de forma remota [Jaramillo-Botero, y otros, 2006]. Con este mismo propósito, *RobUaLab* presenta el desarrollo y aplicación de un entorno de aprendizaje web [Jara Bravo, y otros, 2007]; [Jara Bravo, y otros, 2008] y [Candelas, y otros, 2003]. La herramienta, que ha sido desarrollada usando EJS, permite a los estudiantes simular y teleoperar un brazo robótico de una manera fácil y agradable, convirtiéndose así en un completo laboratorio remoto.

La propia construcción de un manipulador involucra limitaciones geométricas en el movimiento de las articulaciones que dependen del tamaño del robot, forma y tipo de sus miembros [Mikkelsen, 1998]. Existen numerosos ejemplos dentro de la cinemática que demuestran el interés por el estudio del espacio de trabajo articular. Por ejemplo, su utilidad se hace indiscutible para asegurar un rango continuo de valores cuando el extremo efector intenta seguir una posición [Lee, y otros, 1990]. Por otro lado, un algoritmo que lleva ~40s en resolver el espacio de trabajo mediante densidades, ha sido estudiado para el estudio de un manipulador hiper-redundante [Wang, y otros, 2004]. Con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo, la investigación de [Sciavicco, y otros, 1996] obtiene el mapeado IK de un brazo con 4 DOF a través de lógica fuzzy. Según los puntos de una trayectoria dada, [Xu, y otros, 1993] presentan un simulador desarrollado para calcular el modelo IK de manipuladores robóticos con 5 DOF. Enfocado en esto, [Qin, y otros, 2008] presentan un trabajo que estudia los espacios de trabajo inversos aplicados al brazo PUMA 560.

Como parte de esta Tesis Doctoral, se ha desarrollado un instrumento virtual denominado 3D-RAS, el cual ha sido programado en LabVIEW™. En este capítulo se describen los módulos siguientes: subsistema 3D *Robotic Arm*, subsistema del espacio

¹⁰ *Robotic Toolbox*, disponible en http://www.petercorke.com/Robotics_Toolbox.html

¹¹ *HEMERO*, disponible en <http://grvc.us.es/hemero/descargar.html>

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

de trabajo articular 2D, subsistema del espacio de trabajo directo 3D y subsistema del espacio de trabajo inverso 3D. Puesto que el instrumento está basado en módulos, esta metodología permite a los usuarios seguir sus estudios y comparar la geometría de un manipulador serie dado a través de los diferentes subsistemas. Gracias a la cinemática directa e inversa, junto con el espacio de trabajo FK e IK, el IV ayuda a comprender los aspectos de la cinemática mientras se realizan observaciones de los manipuladores para resolver dudas. Con el objeto de destacar con mayor claridad las aportaciones de esta herramienta de simulación, en las Tablas 4.5 y 4.6 se comparan diferentes capacidades y propiedades respecto de algunas de las herramientas anteriormente citadas.

Programa	Lenguaje	Visualización	Interactividad	Entrada	Robots
L6KAP	C	Segmento 2D	Sí	Parámetros	Lynx6
ROBOTSIM	C	CAD-3D	No	Comandos	Rhino XR-3
Robotics Toolbox	Matlab®	Segmento 3D	No	Comandos	PUMA 560
HEMERO	Matlab®	Segmento 3D	Sí	Comandos	Industrial
ROBOLAB	Matlab®	Sólido 3D	Sí	Parámetros	16 robots
Cakir et al.	Matlab®	Segmento 3D	Sí	Parámetros	Industrial
ROBOMOSP	OpenSource	Sólido 3D	Sí	Comandos	Mitsubishi PA-10
ROBOSIM	—	CAD-3D	Sí	Comandos	Microbot TeachMover
RobUaLab	EJS	Sólido 3D	Sí	Parámetros	Scorbot ER-IX, Mitsubishi PA-10
3D-RAS	LabView™	Segmento 3D	Sí	Parámetros	Hasta 5 DOF

Tabla 4. 5. Principales propiedades de algunas herramientas de simulación.

Programa	Educacional	Conceptos	DOF	Teleoperación
L6KAP	Sí	D-H, FK e IK	5	No
ROBOTSIM	Sí	Representación	5	No
Robotics Toolbox	Sí	Cinemática y Dinámica	6	No
HEMERO	Sí	Cinemática, Dinámica, Control y Trayectorias	6	No
ROBOLAB	Sí	Matrices, FK, IK, y Trayectorias	6	No
Cakir y otros.	Sí	Quaternios, FK, IK y Trayectorias	6	No
ROBOMOSP	Sí	Cinemática, Trayectorias, Espacios de Trabajo y Dinámica	7	Sí
ROBOSIM	Sí	Trayectorias	5	No
RobUaLab	Sí	FK, IK y Trayectorias	5, 7	Sí
3D-RAS	Sí	D-H, FK, IK, Espacios de Trabajo Directo e Inverso	5	Sí

Tabla 4. 6. Principales capacidades de algunas herramientas de simulación.

4.4.1. Subsistema 3D Robotic Arm

El simulador de manipuladores robóticos se basa en el IV de la Figura 4.13, con la salvedad de que su panel frontal no tiene incluidas las capacidades de conexión remota a los brazos robóticos. Además, la última versión realizada permite al usuario una mayor facilidad de control de las simulaciones. Entre las opciones disponibles a través de las pestañas del IV (ver Fig. 4.19), se encuentra la posibilidad de cargar desde el directorio de trabajo varios modelos de manipuladores robóticos (a), guardar aquellos creados durante la simulación, establecer los límites para los rangos θ_i de las articulaciones (b), configurar el rango de los ejes (x, y, z) de la ventana gráfica 3D o escalarlos automáticamente en función del manipulador elegido (c). Como ejemplo de uso de este módulo perteneciente a la herramienta 3D-RAS, en las Figuras 4.20a-f se muestran las simulaciones de brazos antropomórficos con diferentes DOF, cuyas tablas de parámetros D-H pueden consultarse en el *Apéndice A*: (a) brazo biónico de 3 ejes, (b) robot Denso VP-Series de 4 ejes, (c) manipulador Lynx6 de 5 ejes, (d) brazo industrial IRB2400 de 5 ejes, (e) brazo industrial IRB-6 de 5 ejes y (f) primeros 5 ejes para el robot PUMA 560.

4.4.2. Espacio de Trabajo Articular 2D

El objetivo de esta sección es explicar uno de los subIV del IV 3D-RAS, cuyo panel frontal puede verse en la Figura 4.21. Este IV permite estudiar el espacio de trabajo articular 2D de un manipulador robótico en función del modelo IK definido en

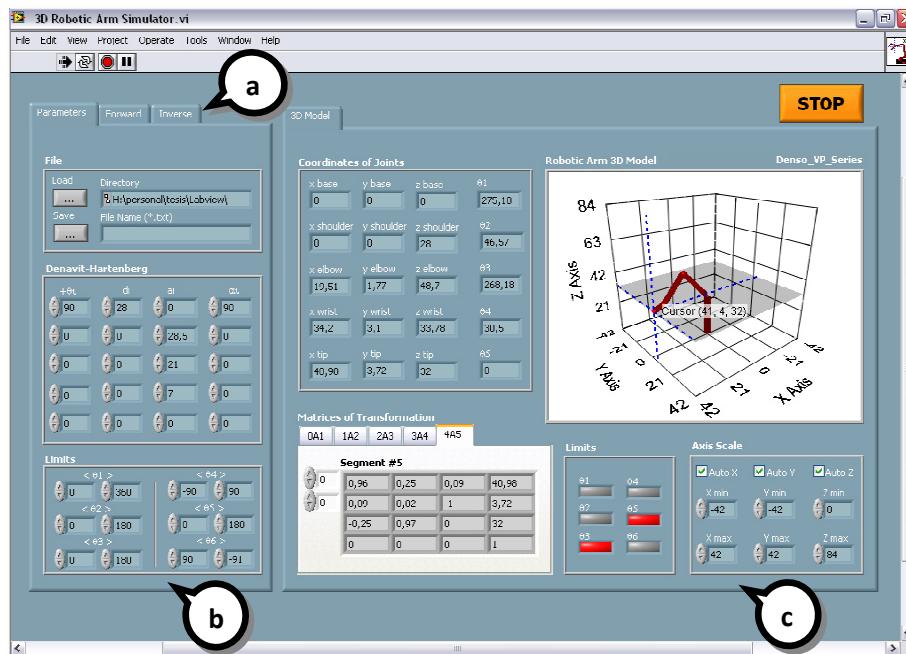


Figura 4. 19. IV de la interfaz del subsistema 3D Robotic Arm.

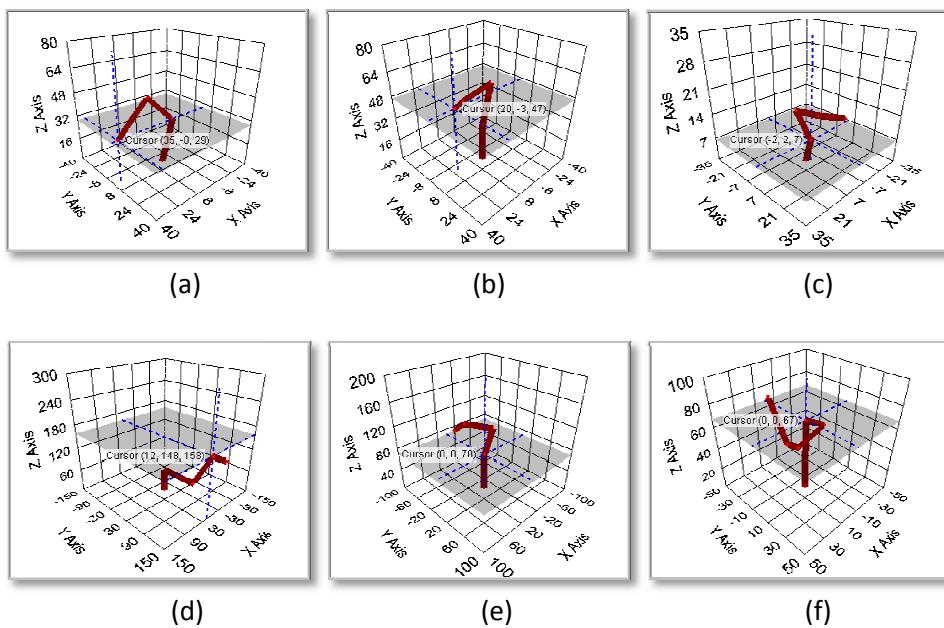


Figura 4. 20. Representación gráfica de modelos de brazos robóticos con diferentes DOF.

las ecuaciones (4.23) a (4.29).

Mediante los controles situados en las pestañas del panel frontal (a), se recogen como entrada las longitudes de los segmentos (d_i y a_i) que definen el modelo físico del brazo. Como opción, es posible importar desde el directorio de trabajo los parámetros D-H de los manipuladores robóticos creados con el subsistema *3D Robotic Arm*, o guardar aquellos generados por el usuario durante la simulación. En esa misma zona del panel frontal se debe especificar el rango del valores (p_x , p_y , p_z) que el extremo efector puede recorrer, el ángulo de orientación con respecto al suelo (*wartg*) y, a partir de estos datos calcular el espacio de trabajo articular (θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4). Un selector situado bajo la pestaña *Parameters* del panel frontal permite obtener el espacio de trabajo inverso en función de p_x , p_y , p_z o *wartg*. Mediante las gráficas se puede estudiar, de forma separada (b) o combinada (c), el recorrido de los valores articulares. En esta última gráfica es posible utilizar un cursor para recorrer los puntos obtenidos durante la simulación.

4.4.3. Espacio de Trabajo Directo 3D

Obtener una ecuación matemática para calcular el espacio de trabajo en brazos antropomórficos no es una tarea fácil. Por esta razón, en esta sección se describe un subsistema del IV 3D-RAS que facilita el cálculo y representa computacionalmente, por medio de una nube de puntos, el espacio de trabajo directo tridimensional para manipuladores robóticos serie. El interés en el estudio del espacio de trabajo directo es determinar, a través del modelo FK, la nube de puntos alcanzable que rodea el

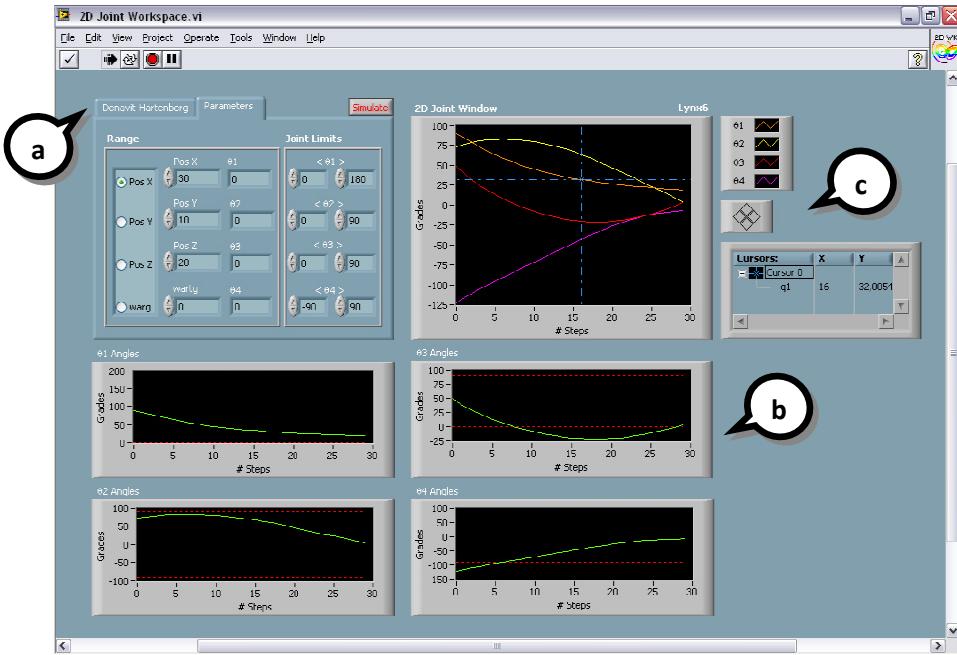


Figura 4. 21. IV de la interfaz del espacio de trabajo articular 2D.

brazo robótico.

Comenzando desde un estado inicial (ver Fig. 4.22), el algoritmo del IV desarrollado crea un contenedor ActiveX de superficies paramétricas y configura las propiedades de la ventana gráfica donde se muestran resultados. El modelo FK realiza una multiplicación de matrices de transformación a través de la cadena cinemática definida en la ecuación (4.16). De esta manera, el algoritmo desarrollado calcula el conjunto de coordenadas (p_{xi} , p_{yi} , p_{zi}), a través de las ecuaciones (4.31) a (4.33), para cada segmento del brazo robótico.

$$p_{xi} = \mathbf{T}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \quad (4.31)$$

$$p_{yi} = \mathbf{T}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \quad (4.32)$$

$$p_{zi} = \mathbf{T}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \quad (4.33)$$

Como valores de entrada al algoritmo, el usuario debe definir un rango de valores articulares θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 para simular la orientación del brazo robótico en diferentes posiciones. Esto es:

$$\theta_1 = \text{theta}_1; \quad 0 \leq \text{theta}_1 \leq 180^\circ \quad (4.34)$$

$$\theta_2 = \text{theta}_2; \quad 0 \leq \text{theta}_2 \leq 90^\circ \quad (4.35)$$

$$\theta_3 = \text{theta}_3; \quad 0 \leq \text{theta}_3 \leq 90^\circ \quad (4.36)$$

$$\theta_4 = \text{theta}_4; \quad -90 \leq \text{theta}_4 \leq 90^\circ \quad (4.37)$$

En la programación gráfica de LabVIEW™, el flujo de programa se desarrolla de

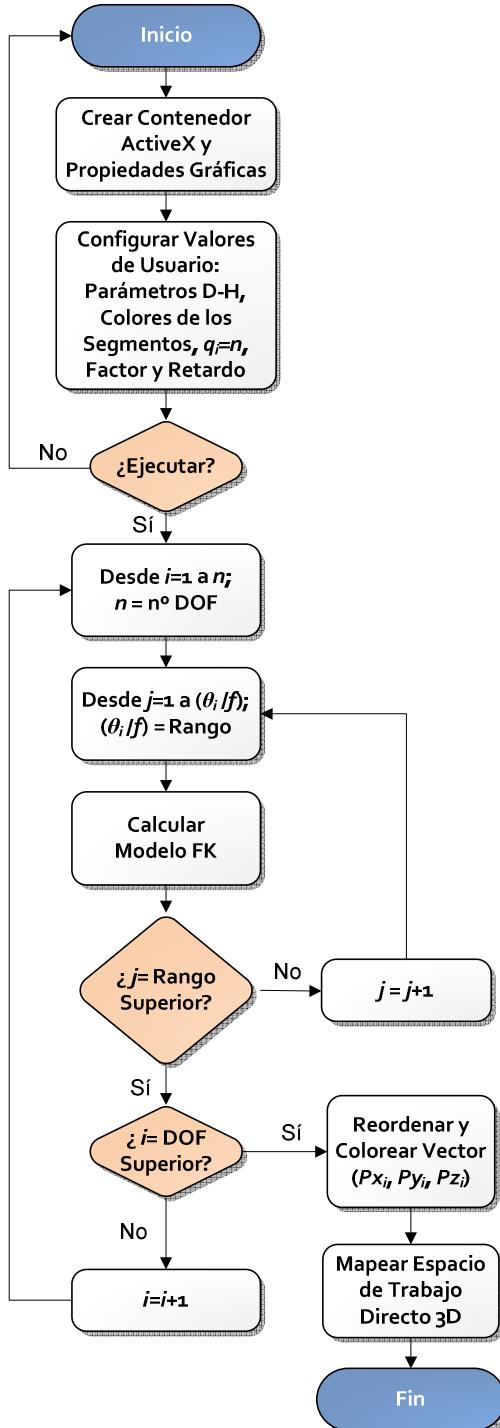


Figura 4. 22. Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del espacio de trabajo directo.

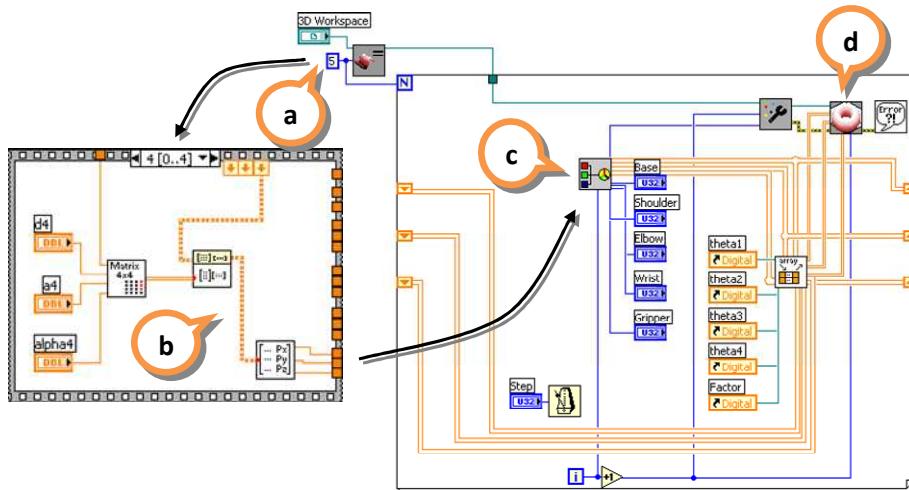


Figura 4. 23. Implementación del algoritmo del espacio de trabajo directo.

izquierda a derecha (ver Fig. 4.23): (a) configuración de la ventana gráfica, (b) representación de n -iteraciones del modelo FK, (c) reestructuración de los puntos calculados por colores y (d) mapeado de los finales de segmentos en el contenedor gráfico 3D. Con cada valor de ángulo articular, unido a su cadena cinemática, se obtiene un nuevo estado del espacio de trabajo del manipulador. Estas series de coordenadas dependientes del modelo FK, θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 , se calculan iterativamente dentro de una estructura *for loop* por medio de los registros de desplazamiento (ver Fig. 4.23a y 4.23b). Los puntos de cada articulación del manipulador se pasan de cada iteración a la siguiente, y una vez que se han obtenido todos los puntos, se reestructuran fuera del bucle y se ordenan para cada mismo segmento del brazo: base, hombro, codo, muñeca y pinza (ver Fig. 4.23c). Este proceso ayuda a la visualización de la nube de puntos, por lo que éstos son agrupados por colores en un gráfico de objetos 3D para mostrar el espacio de trabajo directo (ver Fig. 4.23d).

La relación existente entre los ángulos de las articulaciones y las coordenadas de los segmentos no significa que el extremo efector del brazo sea capaz de alcanzar cualquier punto en cualquier orientación del espacio. Esto es, existe un conjunto de puntos singulares que sólo pueden alcanzarse con ciertas orientaciones del brazo. Estos puntos singulares, trazados en este espacio de trabajo tridimensional, dependen de los límites angulares de las articulaciones y sus segmentos, específicos para cada modelo de brazo robótico. En algunas aplicaciones gráficas, los alumnos estudian el espacio de trabajo de los manipuladores variando a mano los valores de los ángulos articulares θ_i .

Como ejemplo práctico de aplicación del algoritmo desarrollado sobre los manipuladores seriales de la Figura 4.20, en la Figura 4.24a-f se muestran, respectivamente, sus distintos espacios de trabajo directo. El espacio de trabajo ha sido representado en naranja (base), amarillo (hombro), rojo (codo), magenta

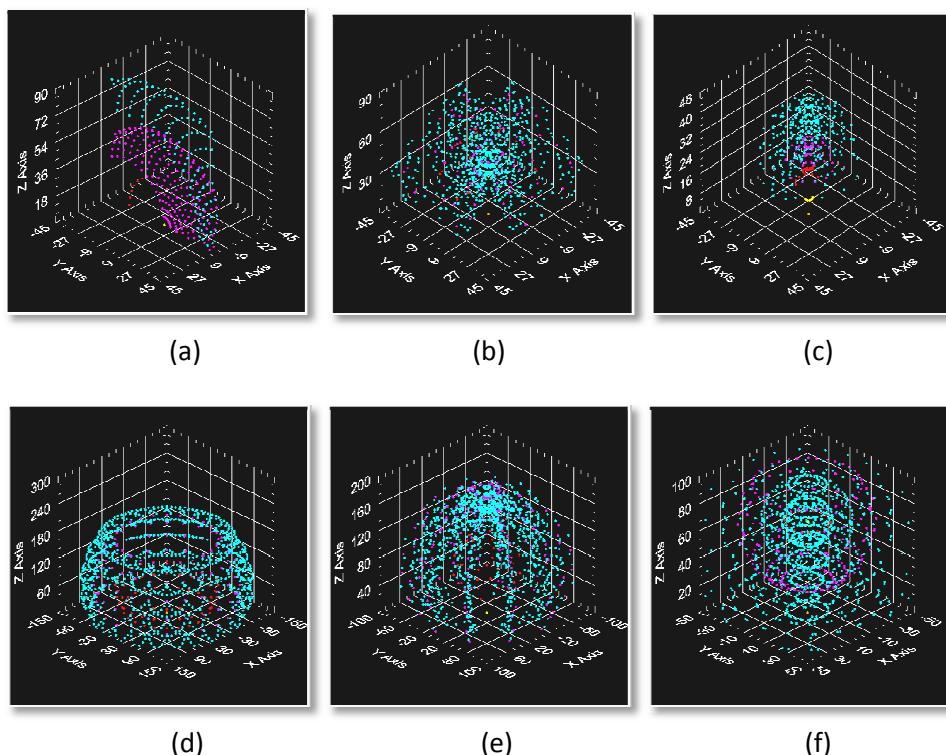


Figura 4. 24. Espacios de trabajo directo de diferentes brazos antropomórficos.

(muñeca) y azul (extremo efecto), siendo sus parámetros de simulación los dados en la Tabla 4.7.

La interfaz gráfica de usuario (ver Fig. 4.25) está dividida en tres secciones: (a) parámetros de configuración D-H, (b) panel de control de los parámetros de la simulación y (c) representación del espacio de trabajo 3D. En la pestaña *Parameters* del panel frontal (a), los controles D-H especifican los parámetros y longitudes de los segmentos del manipulador robótico. Estos valores pueden ser modificados por el usuario o importados desde el subsistema *3D Robotic Arm* para obtener distintas configuraciones de brazos robóticos. En la parte superior de la izquierda (b), los controles Θ_i de la pestaña *Simulation* toman el rango de valores articulares continuos definidos por el usuario mediante las ecuaciones (4.34) a (4.37). En la parte

	Biónico 3DOF (a)	Denso VP-Series (b)	Lynx6 (c)	IRB2400 (d)	IRB-6 (e)	PUMA 560 (f)
Rango θ_1	0°	320°	180°	360°	360°	360°
Rango θ_2	180°	240°	90°	90°	180°	180°
Rango θ_3	180°	260°	90°	180°	180°	180°
Rango θ_4	10°	360°	180°	180°	180°	180°
Factor	10	55	30	15	35	20

Tabla 4. 7. Parámetros del espacio de trabajo de diferentes manipuladores.

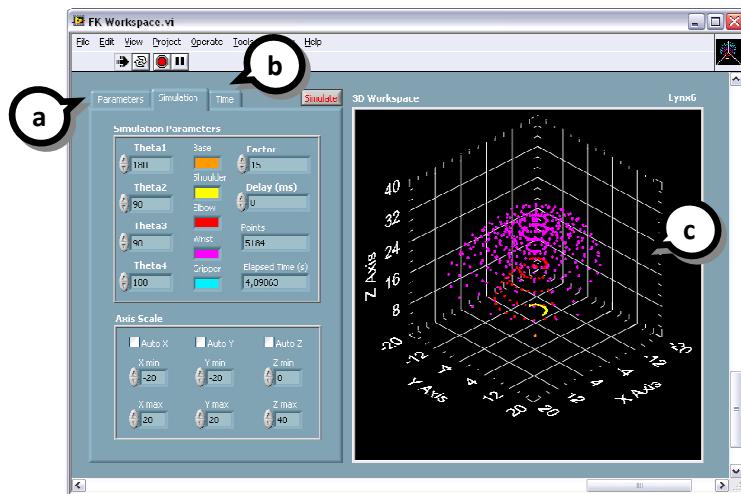


Figura 4. 25. Interfaz simulando un ejemplo de espacio de trabajo directo.

central de esta misma área, el extremo de cada segmento está representado mediante un color: base (naranja), hombro (amarillo), codo (rojo), muñeca (magenta) y extremo efector (púrpura); con objeto de identificar la nube de puntos (p_{xi} , p_{yi} , p_{zi}) que se dibujará en el espacio de trabajo. En la parte derecha, dependiendo de la simulación en curso, la herramienta permite variar la escala para reducir el número de valores θ_i y representar el número de puntos que componen el mapa 3D según las ecuaciones (4.38) y (4.39).

$$\text{Escala} = \frac{\theta_i}{f}; \quad 1 \leq f \leq 90 \quad (4.38)$$

$$\text{Número de puntos} = \frac{\theta_1 \times \theta_2 \times \theta_3 \times \theta_4}{f^i}; \quad 1 \leq i \leq 4 \quad (4.39)$$

donde f es el factor definido por el usuario e i representa el número de articulaciones tenidas en cuenta. Siguiendo con la interfaz (ver Fig. 4.25), el control *Step* muestra el retardo de la simulación y se expresa en milisegundos. El indicador *Points* muestra el número de puntos calculado para cada articulación y el indicador *Time Elapsed* muestra el tiempo (en segundos) transcurrido durante la representación de la nube de puntos perteneciente a cada segmento. Los valores de tiempo son mostrados en la pestaña *Time* de la interfaz de usuario. Los aspectos relacionados con el cómputo de la nube de puntos en cada segmento serán tratados en mayor profundidad en el apartado 4.5 denominado *Experimentación*.

Como ejemplo, el panel frontal ((c) en la Figura 4.25) muestra la nube de puntos del manipulador Lynx6 formada por la revolución de los ángulos articulares con valores: $\theta_1 = 180^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, $\theta_4 = 180^\circ$ y *Factor* = 15. Un análisis del tiempo que el software tarda en calcular el mapeado del espacio de trabajo directo, es una buena

medida del costo computacional en términos de esfuerzo. Es importante advertir que el cálculo de todas las posibles coordenadas (p_{xi} , p_{yi} , p_{zi}) para cada segmento del brazo robótico requiere un esfuerzo computacional elevado debido a la gran cantidad de datos a manejar, por lo que la complejidad del cálculo aumenta con el número de DOF del brazo. El tiempo de procesamiento y representación necesario para calcular las coordenadas (p_{xi} , p_{yi} , p_{zi}) dentro de cada bucle del algoritmo depende del *Factor* de escala escogido. Este aspecto se abordará en profundidad en la sección de *Experimentación*.

4.4.4. Espacio de Trabajo Inverso 3D

Esta sección muestra el desarrollo de un subIV del IV 3D-RAS que permite obtener el rango de valores articulares de manipuladores robóticos en serie y determinar si se exceden sus límites físicos. Inicialmente, el algoritmo llevado a cabo (ver Fig. 4.26) recoge los parámetros D-H que definen el modelo físico del manipulador robótico y los parámetros que definen el funcionamiento de la simulación. El algoritmo combina el rango de valores (p_x , p_y , p_z) y calcula todos los valores articulares posibles (θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 y θ_5) que pueden ser adoptados por el manipulador. Una vez han sido ordenados, el vector de valores articulares obtenidos por medio del modelo IK permite visualizar y estudiar el espacio de trabajo inverso en manipuladores robóticos antropomórficos por medio de las diferentes gráficas.

Para determinar si se obtienen valores erróneos de los ángulos articulares que pudieran dañar los servomotores durante un posible funcionamiento real del brazo robótico, la herramienta determina en cada iteración que las variables articulares no excedan los valores límites programados. Igualmente, se determina a través del modelo IK que los movimientos de las articulaciones no lleven al brazo robótico a una posición que excede el máximo de su longitud física. Computacionalmente, el límite físico del brazo robótico puede calcularse por medio de las ecuaciones (4.40) y (4.41):

$$\overline{[(S5),(S1)]_{x,z}} = \begin{bmatrix} x_5 - x_1 \\ z_5 - z_1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

donde $\overline{[(S5),(S1)]_{x,z}}$ es el vector que une el sistema de referencia de la base con el extremo efector el brazo dentro del plano XZ.

$$\overline{[(S5),(S1)]_{x,z}} \leq \sqrt{(d_1 + a_2 + a_3 + a_4)^2 + a_1^2} \quad (4.41)$$

donde (a_1 , d_1 , a_2 , a_3 , a_4) representan las longitudes y desplazamientos de los segmentos desde la base al extremo efector.

Durante el cálculo de los ángulos de las articulaciones (Θ_i), el algoritmo calcula el modelo FK del manipulador y obtiene las coordenadas (p_{xi} , p_{yi} , p_{zi}) para cada segmento del brazo (ver Fig. 4.27). El flujo de ejecución de la programación gráfica de LabVIEW™ se desarrolla de izquierda a derecha: (a) definición del rango de valores para las coordenadas (p_x , p_y , p_z) del extremo efector, (b) cálculo de los ángulos de las articulaciones a través del modelo IK, (c) cálculo de las posiciones de cada segmento a

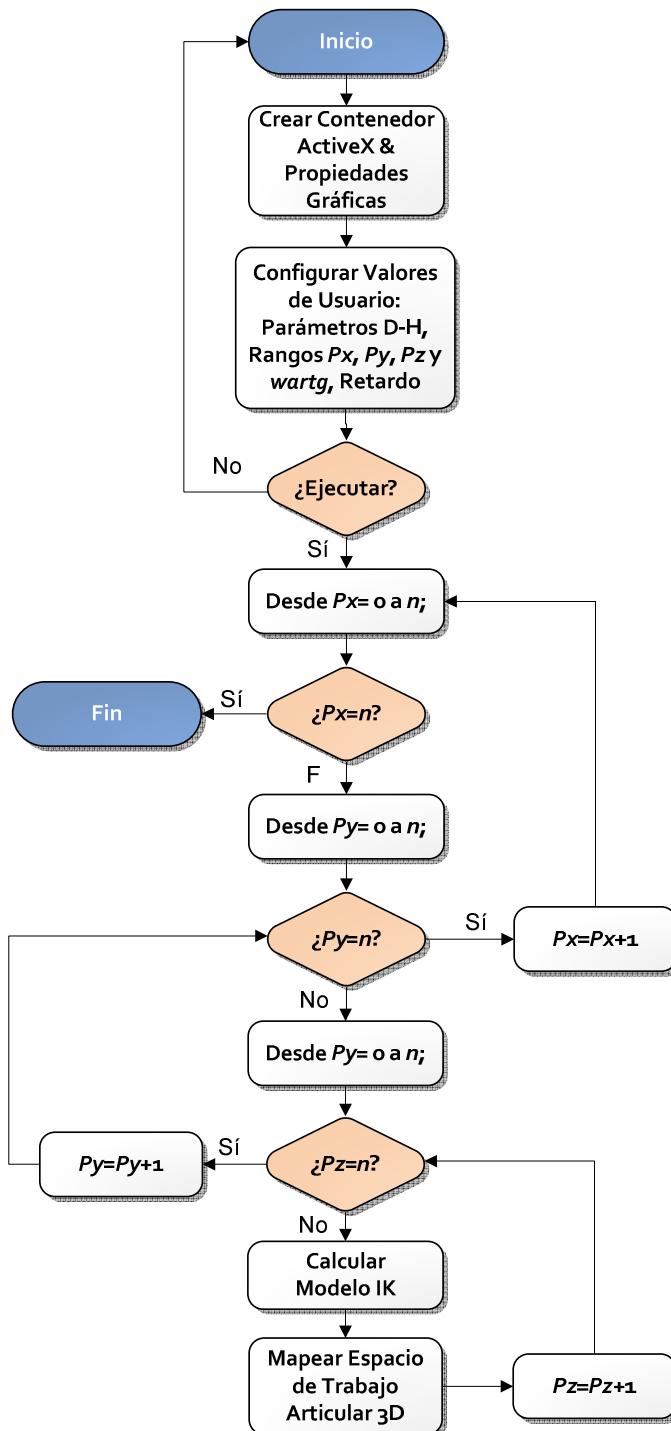


Figura 4. 26. Diagrama de flujo del algoritmo del espacio de trabajo inverso.

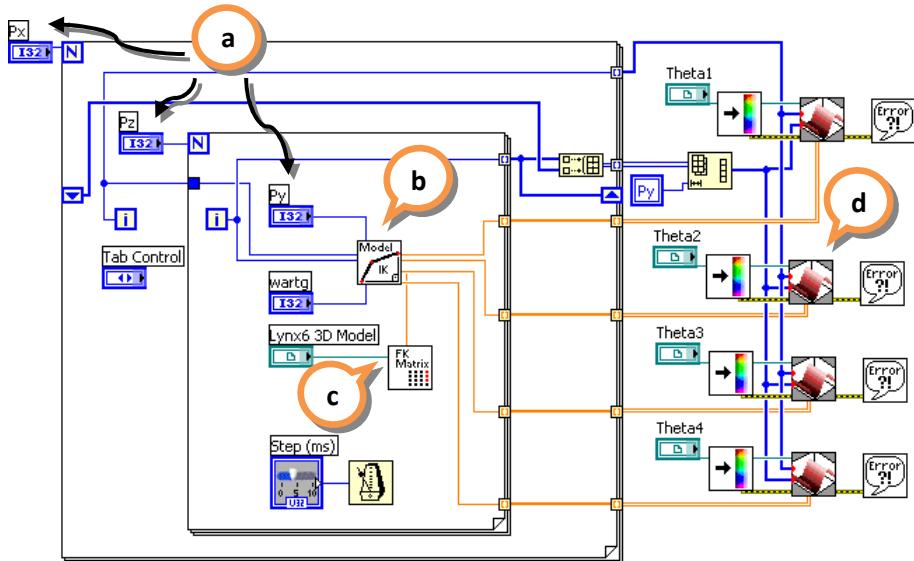


Figura 4. 27. Implementación del algoritmo del espacio de trabajo inverso.

través del modelo FK y (d) representación gráfica del vector de los ángulos articulares obtenidos.

La interfaz gráfica de usuario está dividida en dos secciones principales: control de la aplicación (ver Fig. 4.28) y gráficos del espacio de trabajo inverso (ver Fig. 31a-d). En el panel de control puede verse que el rango de valores seguido por el extremo efector (p_x, p_y, p_z) puede definirse por medio de la pestaña superior (a). En esta área, los indicadores q_1, q_2, q_3 y q_4 se activan cuando los ángulos de las articulaciones alcanzan el límite del rango de valores. Para facilitar la solución de los modelos FK e IK, se ha usado una pendiente constante en el segmento final del brazo respecto al plano de tierra que, sin embargo, puede configurarse en cada nueva simulación ($\theta_6 = \text{wartg}$). Por medio de la pestaña inferior (b), pueden configurarse las longitudes de cualquier manipulador robótico con hasta 5 DOF a través de sus parámetros D-H. Por defecto, se incluyen los parámetros definidos para el brazo Lynx6 estudiado en el presente trabajo de investigación. En la sección (c), la ventana gráfica 3D permite rotar la perspectiva y observar el modelo simple sólido del manipulador robótico. Gracias al retardo de ejecución, es posible variar la velocidad de la simulación. La representación del modelo simple en un gráfico 3D ayuda a estudiar los movimientos del brazo robótico y las posiciones adoptadas por sus segmentos.

4.5. Experimentación

Con el objetivo de demostrar los resultados obtenidos con la metodología desarrollada, se aplica ésta como ejemplo al manipulador robótico Lynx6. Este brazo robótico de pequeño tamaño permite realizar movimientos rápidos y exactos, por lo que es una buena plataforma de experimentación, muy útil para prácticas educativas.

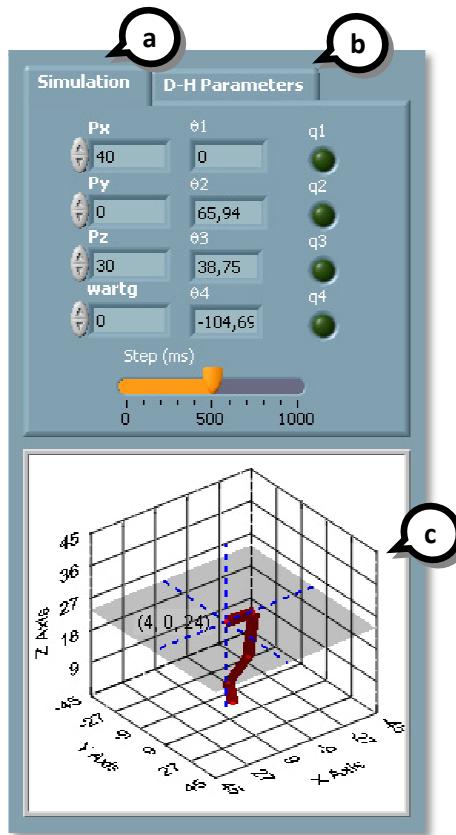


Figura 4. 28. Parte del interfaz gráfico del espacio de trabajo inverso.

Este brazo (ver Fig. 4.6) es considerado un manipulador de 5 DOF en el que los primeros tres grados se localizan en su base, hombro y codo, mientras los dos restantes representan, respectivamente, el movimiento de la muñeca y la rotación (ver Tabla 4.2). A pesar de tener un DOF adicional gracias a su pinza funcional, este último no afecta a la posición u orientación del extremo efector.

Como ejemplo de solución del modelo FK descrito en la sección 4.3.1 por medio de la ecuación (4.16), para una posición en reposo del brazo con $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$, $\theta_4 = -90^\circ$ y $\theta_5 = 0^\circ$, la posición y orientación que alcanza el extremo efector del manipulador Lynx6 queda fijada en **(6, 0, 18.5)** por la matriz de transformación (4.42).

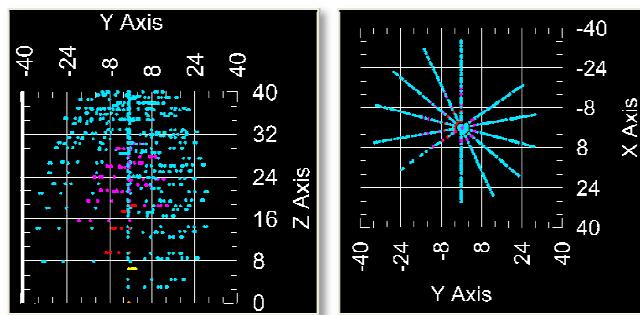


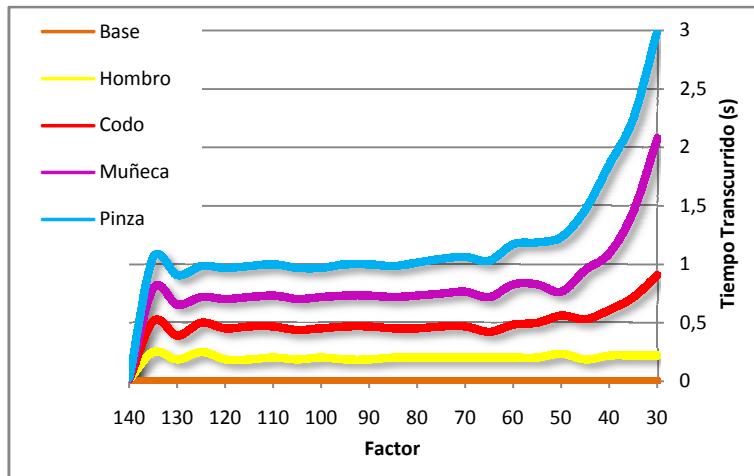
Figura 4. 29. Perspectiva ortogonal y lateral de una revolución de Lynx6.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 18,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

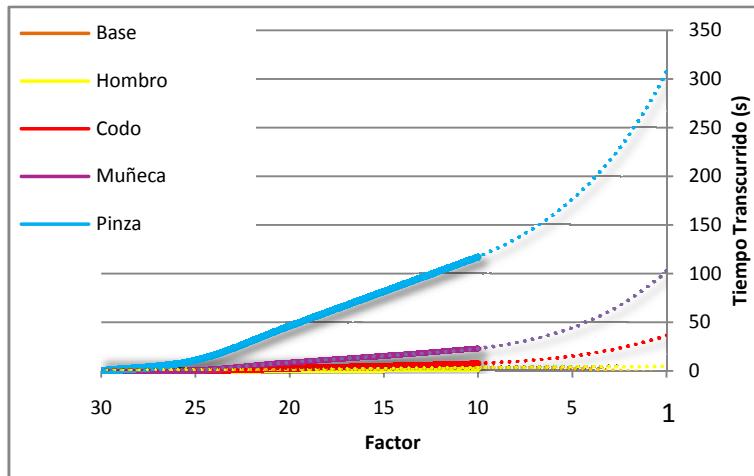
Como ejemplo práctico del algoritmo desarrollado en la sección 4.4.3, se muestra el mapeado de la Figura 4.29. La perspectiva ortogonal muestra la nube de puntos obtenida según el rango físico de las articulaciones (ver Tabla 4.3). En la parte derecha, se puede observar la misma revolución, mediante una perspectiva superior, para una rotación de 180° de la base cuya distribución depende del *Factor* de escala. Con los valores $\theta_1 = 180^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 90^\circ$, $\theta_4 = 180^\circ$ y *Factor* = 25, el tiempo de cómputo empleado es de $t_{\text{base}} (\approx 0 \text{ ms}) + t_{\text{hombro}} (141 \text{ ms}) + t_{\text{codo}} (1.328 \text{ ms}) + t_{\text{muñeca}} (1.625 \text{ ms}) + t_{\text{efector}} (3.266 \text{ ms}) = 6.360 \text{ ms}$. Estos resultados han sido procesados en un Pentium IV 3,06 GHz con 1,49 Gb de RAM.

La Figura 4.30 se ha dividido para observar los efectos del *Factor* de escala sobre el tiempo de simulación. El gráfico de la Figura 4.30a muestra un extracto de los primeros 3 segundos del tiempo transcurrido. El gráfico de la Figura 4.30b muestra, sobre medidas reales dibujadas en línea continua, el tiempo que emplea el algoritmo en resolver el espacio de trabajo directo para cada articulación del brazo robótico. En la gráfica se muestra cómo el tiempo de procesamiento crece exponencialmente para factores de escala por debajo de 30. La Figura 4.30c muestra cómo el número de puntos representados se incrementa exponencialmente para factores de escala por debajo de 30. En la figura se representan dos líneas de tendencia diferentes que permiten comparar los resultados: la ecuación exponencial (línea roja discontinua) muestra que el número total de puntos necesarios (el mismo para cada articulación) es muy elevado para un *Factor* ≤ 10 , mientras el polinomio cuadrático (línea negra discontinua) logra el mismo número de puntos con factores mayores. Un estudio analítico sobre cómo afecta el número de DOF de un manipulador robótico puede obtenerse por medio de la ecuación (4.39). En ella se muestra que para la misma complejidad de DOF, el rango para los ángulos (θ_i) puede ser diferente y puede proporcionar diferentes números de puntos. Por consiguiente, el número de puntos calculado es inversamente exponencial al *Factor*.

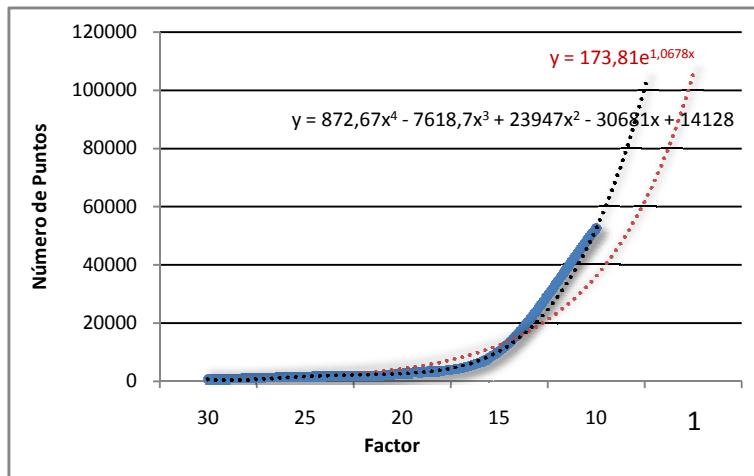
Como solución demostrativa del espacio de trabajo inverso descrito en la sección 4.4.4, *Espacio de Trabajo Inverso 3D*, las Figuras 4.31a-d muestran gráficos de superficie 3D obtenidas para el manipulador Lynx6. Los gráficos son útiles para estudiar los valores adoptados por los ángulos de las articulaciones (θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4) y probar que el espacio de trabajo obtenido para las articulaciones permanece dentro del rango de valores definidos en la Tabla 4.8. Los resultados de las Figuras 4.31a-d son útiles para evaluar los ángulos de rotación θ_1 a θ_4 del manipulador robótico sobre el plano ZX, según los sistemas {S1} a {S4} de la Figura 4.7. Puede verse que, cuando se



(a)



(b)



(c)

Figura 4. 30. Coste computacional del algoritmo del espacio de trabajo directo.

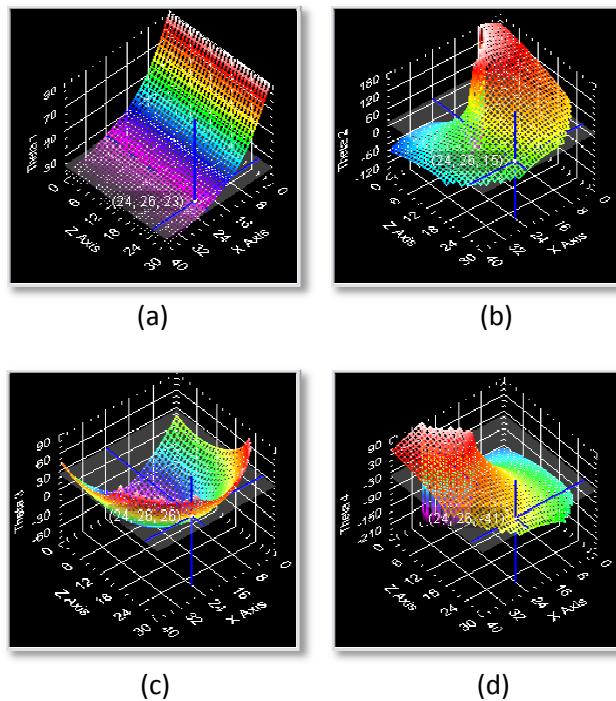


Figura 4. 31. Espacios de trabajo articulares ejemplificados para el brazo Lynx6.

calcula la función atan2 en las ecuaciones (4.23) a (4.29), tienen lugar saltos en la superficie del espacio de trabajo en θ_2 y θ_4 . Atan2 es una función continua en el rango $[-\pi, \pi]$; motivo por el que tales cambios en la superficie deben tenerse en cuenta para evitar movimientos no deseados cuando se opera con un brazo robótico.

Límite articular	Condiciones
$0^\circ \leq \theta_1 \leq 180^\circ$	—
$0^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$ si $-90^\circ \leq \theta_2 \leq 0^\circ$ si	$\begin{cases} 0^\circ \leq \theta_3 < 180^\circ \\ -90^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ \end{cases}$
$0^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ$ si $0^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ$ si	$\begin{cases} \theta_3 = 180^\circ \\ -90^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ \\ 0^\circ \leq \theta_3 < 180^\circ \\ 0^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ \end{cases}$
$-90^\circ \leq \theta_4 \leq 90^\circ$ si	$\begin{cases} 0^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ \\ \theta_3 = 0^\circ \\ 0^\circ < \theta_2 \leq 90^\circ \\ \theta_2 = 0^\circ \\ 0^\circ < \theta_3 \leq 180^\circ \end{cases}$
$-90^\circ \leq \theta_5 \leq 90^\circ$	—

Tabla 4. 8. Rango de valores y límites articulares del brazo Lynx6.

4.6. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos

El desarrollo propio de herramientas para el control de brazos robóticos, puede llegar a ser algo necesario cuando se trabaja con manipuladores comerciales o industriales. En este capítulo se presenta el uso de un brazo robótico comercial denominado Lynx6. El carácter educacional que se ha dado a su uso ha inspirado desarrollar una serie de instrumentos virtuales, compuestos principalmente por un IV de control remoto del manipulador Lynx6 —utilizado en VANTER— y un IV denominado 3D-RAS. Con el objeto de presentar el instrumento virtual desarrollado en la Tesis, se ha realizado una amplia revisión de varias herramientas disponibles, ya sea con el objetivo de un control real o simulado. Por este motivo, para resaltar las principales capacidades y propiedades de 3D-RAS respecto de estas herramientas, se ha realizado una comparativa cuyas diferencias y aportaciones puede verse en las Tablas 4.5 y 4.6. Entre las herramientas consultadas, las más destacadas por sus capacidades de simulación, teleoperación y estudio de los diferentes campos de la cinemática y dinámica de manipuladores son *HEMERO* [Maza Alcañiz, y otros, 2001], *ROBOMOSP* [Jaramillo-Botero, y otros, 2006] y *RobUaLab* [Jara Bravo, y otros, 2007], [Jara Bravo, y otros, 2008] y [Candelas, y otros, 2003].

La aportación principal de este capítulo consiste en el estudio y evaluación de diferentes aspectos relacionados con la cinemática de brazos robóticos antropomórficos a través del instrumento virtual 3D-RAS. El uso de la interfaz gráfica desarrollada de forma similar para sus distintos subIVs —dada su gran versatilidad y naturaleza visual— resulta intuitiva y permite estudiar los espacios de trabajo directo y articular de cualquier manipulador robótico en serie con hasta 5 DOF. La metodología que se presenta demuestra sus características genéricas y capacidades de cómputo para simular diferentes configuraciones de manipuladores robóticos. Por ello, los modelos FK e IK han sido teórica y visualmente desarrollados, con el objetivo de mostrar el algoritmo implementado mediante su posterior puesta en práctica con el brazo robótico Lynx6 como ejemplo.

Un ejemplo explicativo del funcionamiento de los módulos del instrumento virtual 3D-RAS, que puede ayudar a su manejo, puede ser visto mediante una serie de videos de demostración alojados en la web disponible en www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm (archivo *3D Robotic Arm Simulator*). Allí se encuentra también la última versión completa del instrumento virtual que puede descargarse bajo licencia *freeware*, por lo que su código fuente puede solicitarse a los autores sólo con propósitos educativos. Para facilitar su uso, esta versión descargable permite ejecutar las simulaciones sin necesidad de conectar la herramienta a los brazos robóticos remotos.

Como trabajos presentes, actualmente se están mejorando las características

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

básicas del instrumento virtual 3D-RAS y se está ampliando la representación de los brazos simulados mediante una vista 3D CAD. Con respecto a futuros desarrollos basados en esta Tesis, la investigación actual está enfocada en el estudio de nuevos métodos de análisis cinemático y en la validación de éstos por medio de uno de los manipuladores reales disponible en nuestro laboratorio. Esto permitirá estudiar manipuladores robóticos de acuerdo con diferentes métodos cinemáticos (Cuaternios, Jacobianos, etc.). En este sentido, el uso de herramientas de análisis numérico y la implementación de otras soluciones analíticas pueden producir resultados que sirvan para mejorar y comparar los algoritmos propuestos en este capítulo de la Tesis. Por ejemplo, el espacio de trabajo de un manipulador puede ser obtenido también considerando los límites de su volumen como describe el trabajo de [Abdel-Malek, y otros, 2000].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Malek, K., Yeh, H., & Othman, S. (2000). Interior and Exterior Boundaries to the Workspace of Mechanical Manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 16, págs. 365-376.
- AENOR. (1998). *Robots manipuladores industriales. Vocabulario. (ISO 8373:1994 + Corrigendum Técnico 1:1996)*.
- Andújar Márquez, J., & Mateo Sanguino, T. (2010). Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 7, No. 1, págs. 64-72.
- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., & Aguilar Nieto, F. (2005). Virtual Interface for Controlling a Remote Handle Rover. *IADAT-aci2005 Conference*, (págs. 224-228).
- Barrientos, A. (2002). Morfología del Robot. En *Fundamentos de Robótica, 2º Ed.* (págs. 21-36). Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Cakir, M., & Butun, E. (2007). An Educational Tool for 6-DOF Industrial Robots with Quaternion Algebra. *Comput. App. Eng. Educ.* , Vol. 15, Núm. 2, págs. 143-154.
- Candelas, F., Puente, S., Torres Medina, F., Ortiz, F., Gil, P., & Pomares, J. (2003). A Virtual Laboratory for Teaching Robotics. *Int. Journal of Eng. Educ.* , Vol. 19, págs. 363-370.
- Corke, P. (1996). A Robotics Toolbox for Matlab. *IEEE Robotics and Automation Magn.* , Vol.3, págs. 24-32.
- Denavit, J., & Hartenberg, R. (1955). A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics* .
- Esquembre, F. (2004). *Creación de Simulaciones Interactivas en Java*. Pearson Education – Prentice Hall.
- Fennander, H. (2006). Project for Active and Robot Vision Course. En P. F. Carrera. Lappeeranta University of Technology, Department of Information Technology, Lappeeranta (Finlandia).
- Gay, L. (2004). *Using Inverse Kinematics to Position the Lynxmotion L5 and L6 Arms*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2009, de <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj073.htm>
- Hong, H. (2004). *Another Method for Inverse Kinematics of Lynxmotion Robotic Arms*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2009, de <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj058.htm>

CAPÍTULO 4. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

Horsch, T. (2000). Introduction to Robotics: Module Trajectory Generation and Robot Programming. En *Proyecto Fin de Carrera*. Fachhochschule Darmstadt (Alemania).

IFR. (2004). *World Robotics 2004. Statistics, Market Analysis, Forecast, Case Studies and Profitability of Robot Investment*. United Nations Publications.

Jara Bravo, C., Candelas Herías, F., & Torres Medina, F. (2007). Practical Training of Robotic Concepts Using Interactive Tools. *Int. Workshops Intelligent Assembly and Disassembly (IAD'07)*, (págs. 1-6, Vol. 5, Núm. 1).

Jara Bravo, C., Candelas Herías, F., & Torres Medina, F. (2008). RobUaLab.ejs: a New Tool for Robotics e-Learning. *Int. Remote Engineering Virtual Instrumentation* , Vol. 352, Núm. 6, págs. 41-46.

Jaramillo-Botero, A., Matta-Gómez, A., Correa-Caicedo, J., & Perea Castro, W. (2006). ROBOMOSP: ROBOtis MOdelling and Simulation Platform. *IEEE Robotics and Automation Magn.* , Vol. 33, Núm. 4, págs. 62-73.

Keesling, M. (2003). *Lynxmotion Arms and Inverse Kinematics*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2009, de <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj057.htm>

Kock, H., & Svenson, P. (2007). *Crane Control, Intelligent Robotics VT-07*. Recuperado el 30 de Junio de 2008, de <http://www.cs.umu.se/~c03hkk/IR-lab4.pdf>

Koyuncu, B., & Güzel, M. (2007). Software Development for the Kinematic Analysis of a Lynx 6 Robot Arm. *International Journal of Applied Science, Engineering and Technology* , Vol. 4, Núm. 4, págs. 1-6.

Kucuk, S., & Bingul, Z. (2009). An Off-Line Robot Simulation Toolbox. *Comput. App. Eng. Educ.* , en prensa.

Lee, D., & ElMaraghy, W. (1990). ROBOSIM: a CAD-based Off-line Programming and Analysis System for Robotic Manipulator. *Computer-Aided Engineering Journal* , págs. 141-148.

Mateo Sanguino, T., Aguilar Nieto, F., Chica Barrera, J., Mola Mateos, M., & Andújar Márquez, J. (2008). Desarrollo de un Instrumento Virtual para el Control Remoto de un Brazo Manipulador de Uso Educativo. *XXIX Jornadas de Automática*, (págs. 1-8, Vol. 292). Tarragona.

Maza Alcañiz, J., & Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo-Boixareu.

Mikkelsen, J. (1998). A Machine Vision System Controlling a Lynxarm Robot Along a Path. *Tech. Rep . Univ. Cape Town, South Africa*.

- Nethery, J., & Spong, M. (1994). Robotica: a Mathematica Package for Robot Analysis. *IEEE Robotics and Automation Magn.* , Vol. 1, Núm. 1, págs. 13-20.
- Qin, C., & Carrera-Perpiñán, M. (2008). Trajectory Inverse Kinematics by Non Linear, Non Gaussian Tracking. *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, (págs. 2057-2060).
- Salzmann, C., Guillet, D., & Huguenin, P. (1999). Introduction to Real-Time Control Using LabView with an Application to Distance Learning. *International Journal of Engineering Education* , Vol. 16, Núm. 3, págs 255-2.
- Sciavicco, L., & Siciliano, B. (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators*. New York: McGraw-Hill.
- Sheehan, J., & Eydgahi, A. (1990). Computer Animated Simulation of Robotic Manipulators and Workcelldesign. *Proc. 33rd Midwest Symposium on Circuits and Systems*, (págs. 1175-1178, Vol. 2).
- Vargas, H., Dormido, S., & Sánchez, J. (2008). LabView en la Enseñanza del Control: Laboratorios Virtuales y Remotos de Automática. *NIDays - XII Foro Tecnológico sobre Instrumentación Virtual*.
- Vargas, H., Sánchez, J., Duró, N., Dormido, R., Dormido-Cantó, S., Farias, G., y otros. (2008). A systematic two-layer approach to develop Web-based experimentation environments for control engineering education. *Intelligent Automation and Soft Computing* , Vol. 14, Núm. 4, págs. 505-524.
- Wang, Y., & Chirikjian, G. (2004). Workspace Generation of Hyper-Redundant Manipulators as a Diffusion Process on SE(N). *IEEE Trans. Robotics and Automation* , Vol. 20, Núm. 3, págs. 399-408.
- Xu, Y., & Nechyba, M. (1993). Fuzzy Inverse Kinematic Mapping: Rule Generation, Efficiency and Implementation. *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (págs. 911-918, Vol. 2).

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

El presente capítulo desarrolla un método de planificación de caminos útil para estudiar y evaluar trayectorias de superficie y de volumen aplicadas a brazos robóticos antropomórficos. La técnica de trayectorias usada representa para los usuarios un método directo y fácil de seguir que permite simular el movimiento de manipuladores en serie con hasta 5 DOF. El interés de este método reside en que sus algoritmos permiten realizar la planificación de trayectorias por medio de un entorno gráfico de usuario. Esto ayuda, de una manera visual, a desarrollar los aspectos de enseñanza y aprendizaje en prácticas de Robótica. Además, su naturaleza visual y gran versatilidad permiten simular diferentes brazos robóticos antropomórficos basados en la convención D-H. Esta herramienta forma parte de 3D-RAS, consagrada a la evaluación de la cinemática y el telecontrol de brazos robóticos antropomórficos. Como un caso práctico del instrumento virtual desarrollado en este capítulo, se generan trayectorias abiertas y cerradas para un robot comercial con 5 DOF. El objetivo es visualizar y estudiar su movimiento previo a un control real del brazo.

El presente capítulo está organizado de la forma siguiente. Las secciones primera y segunda presentan los algoritmos y los interfaces gráficos desarrollados que permiten planificar trayectorias de superficie y de volumen. Después de esto, la sección siguiente pone en práctica la metodología desarrollada, para la cual el brazo Lynx6 se usa como ejemplo. La sección *Validación Educacional de 3D-RAS* presenta los aspectos de la enseñanza y el aprendizaje del instrumento virtual y se describen sus componentes principales. Finalmente, el capítulo aporta las conclusiones del trabajo

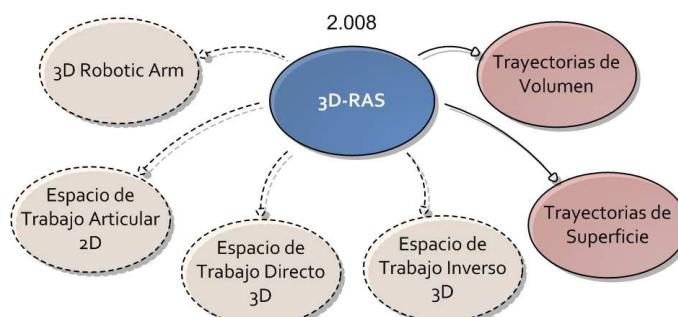


Figura 5. 1. Esquema general de los IVs descritos en el Capítulo 5.

desarrollado y ofrece la herramienta de simulación para su evaluación. Un diagrama general que ayuda a diferenciar los IVs presentados en este capítulo (con el nombre que adoptan en las secciones y la relación entre ellos) con respecto al capítulo anterior (línea discontinua), puede verse en la Figura 5.1.

5.1. Introducción

En aplicaciones donde la planificación de trayectorias en brazos robóticos reales es necesaria, resulta esencial un estudio completo que involucre diferentes aspectos sobre la cinemática de estos manipuladores. Usualmente, en la Robótica industrial, el camino es programado usando primitivas geométricas. Cuando se planifican movimientos en brazos robóticos, resulta útil disponer de una herramienta de estudio para simular el comportamiento FK e IK por medio de la aplicación de trayectorias en el espacio cartesiano. En la bibliografía, el uso de entornos gráficos de software es común para el estudio de modelos de trabajo cinemáticos por medio de ecuaciones matemáticas. Quizás, una de las herramientas más empleadas ha sido y es *Robotic Toolbox* [Corke, 1996], la cual es usada para el estudio de la cinemática directa, cinemática inversa y la dinámica de brazos robóticos industriales como el PUMA 560. *Robotic Toolbox* básicamente provee un conjunto de funciones de Matlab® y bloques de Simulink. Aunque probablemente sea una de las herramientas más populares de brazos robóticos, posee algunas limitaciones. Entre ellas, sólo implementa un tipo de trayectoria, lo que define una forma única de movimiento de los manipuladores. Además, la función IK no tiene en cuenta la singularidad de los puntos. Por último, no dispone de una interfaz gráfica, por lo que carece de interactividad con el usuario. Sin embargo, la herramienta *RobotiCad*, basada en la de Corke, viene a solucionar estas carencias y mejorar su capacidad de simulación [Falconi, y otros, 2008]. Como principales características a destacar, *RobotiCad* implementa 12 tipos de trayectorias diferentes, permite simular objetos en el espacio de trabajo de un manipulador robótico e interaccionar con ellos.

La mayoría de los estudios realizados comparten el uso de herramientas basadas en generar trayectorias lineales entre dos puntos a través de matrices de transformación homogénea [Maza Alcañiz, y otros, 2001]. En este sentido, el análisis para el seguimiento de trayectorias basadas en el mapeado IK se estudia en [Xu, y otros, 1993]. Enfocado en el campo de las aplicaciones industriales, un planificador de trayectorias a través de ecuaciones polinómicas se usa también en [Macfarlane, y otros, 2003]. Asimismo, para otras aplicaciones de manipuladores robóticos, como aquéllas enfocadas en la Ingeniería espacial, se presenta en [Agrawal, y otros, 1994] una técnica para la planificación de trayectorias a través de ecuaciones algebraicas y diferenciales. Finalmente, con el objetivo de reducir el coste computational, en [Tan, y otros, 1989] se propone un planificador de trayectorias discreto en el tiempo para ser aplicado en manipuladores de 6 DOF. Específicamente para la planificación de caminos en brazos manipuladores por medio de trayectorias aplicadas al extremo efector, hay numerosos desarrollos en la literatura. Como ejemplo, para trayectorias circulares hay un estudio realizado para un brazo robótico de 7 DOF en una configuración planar [Braganza, y otros, 2008]. Un modelo de trayectorias 3D basado en el modelo IK de brazos robóticos de 3 DOF también se especifica en [Abdel-Malek, y otros, 2006]. Enfocado en aplicaciones humanas, en [Faraz, y otros, 2000] se aborda un acercamiento directo del problema IK para la planificación de trayectorias.

Este capítulo presenta un método alternativo a los citados, donde la trayectoria se proyecta mediante la descripción matemática de una curva a seguir. Así, el movimiento en brazos robóticos se planifica a través del estudio de trayectorias de superficie y de volumen generadas por el usuario. El aspecto principal a destacar aquí es que todos los desarrollos se realizan visualmente con la ayuda de una herramienta de simulación, sin requerir conocimientos de programación. De este modo, su metodología visual facilita el aprendizaje a los usuarios de una manera innovadora, transformando una tarea tediosa en un procedimiento intuitivo y atractivo [Andújar Márquez, y otros, 2010]. Con tal propósito, se ha desarrollado un instrumento virtual basado en LabVIEW™ para generar trayectorias abiertas y cerradas aplicadas a brazos robóticos antropomórficos. Éste complementa el instrumento virtual 3D-RAS descrito en el Capítulo 4, dedicado al estudio de espacios de trabajo FK e IK aplicados a brazos robóticos en serie con hasta 5 DOF [Mateo Sanguino, y otros, 2010]. Este instrumento virtual permite realizar prácticas con brazos robóticos en serie —sin más requerimientos previos que conocer sus parámetros físicos y características geométricas—, tanto si están disponibles o no en el laboratorio. Como aplicación práctica, el brazo robótico Lynx6 se usa para probar esta metodología. Por supuesto, estos algoritmos también son de aplicación en la planificación cinemática de brazos robóticos industriales. Con el objetivo de presentar claramente las novedades que creemos se aporta a la Robótica con el instrumento virtual 3D-RAS, las capacidades y propiedades del método propuesto en este capítulo se comparan con algunos de los

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

Herramienta	Trayectoria	Método	Robot	Lenguaje	GUI
Robotic Toolbox	Polinomio de orden quinto	Ecuaciones matriciales	Brazos Seriales	Matlab®	No
RobotiCad	Punto a punto de 12 tipos	Cartesiano y espacio articular	Cartesianos y Articulares	Matlab®	Sí
Maza, y otros	Curvilínea punto a punto	Ecuaciones matriciales	Brazos Seriales	Matlab®	Sí
Macfarlane, y otros	Línea directa 1D entre dos puntos	Ecuaciones polinómicas	Brazos Industriales	Matlab®	No
Agrawal, y otros	Camino 2D	Ecuaciones algebraicas y diferenciales	Manipulador espacial redundante planar	Matlab®	No
Tan, y otros	Discreta en el tiempo	Jacobiano	6 DOF	Fortran	No
Braganza, y otros	Planar	Cuaternios	Brazo de Barrett	C++	No
Abdel-Malek, y otros	Interpolación de curvas 2D	Mínima vibración	Humano	3D Studio Max®	No
3D-RAS	Superficie y volumen 3D	Denavit y Hartenberg	Brazos seriales hasta 5 DOF	LabView™	Sí

Tabla 5. 1. Características principales de herramientas de planificación de trayectorias.

trabajos previamente mencionados (ver Tabla 5.1).

5.2. Trayectorias de Superficie

El objetivo de la presente sección es describir un subIV de 3D-RAS desarrollado para estudiar diferentes ecuaciones de superficie a través de la geometría analítica. Este subIV permite aplicar trayectorias abiertas, lineales o curvas, a brazos robóticos antropomórficos con hasta 5 DOF.

A partir de un estado inicial dado (ver Fig. 5.2), el algoritmo desarrollado recopila del usuario los parámetros D-H del brazo robótico y los parámetros de funcionamiento para la ejecución de la simulación. Por medio de su menú de fórmulas, situado en el panel frontal (ver Fig. 5.3), el usuario puede experimentar con ecuaciones diferentes, así como comparar y estudiar los aspectos relacionados con la geometría analítica.

Matemáticamente, el modelo para una superficie dada puede ser definido genéricamente por la ecuación explícita siguiente:

$$y_i = \mathbf{f}_i(x_1, x_2) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{f}_i: \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R} \quad (5.2)$$

Donde $(x_1, x_2) \in [a, b]$ y $[a, b] \in \mathfrak{R}$. Programáticamente, la función (5.1) obtiene una serie de valores (x_1, x_2) , definidos entre los puntos inicial y final, pertenecientes al espacio de trabajo real del brazo $[a, b]$. El número de puntos intermedios (i) calculados por esta función depende de un control digital (*points*) localizado en el panel frontal

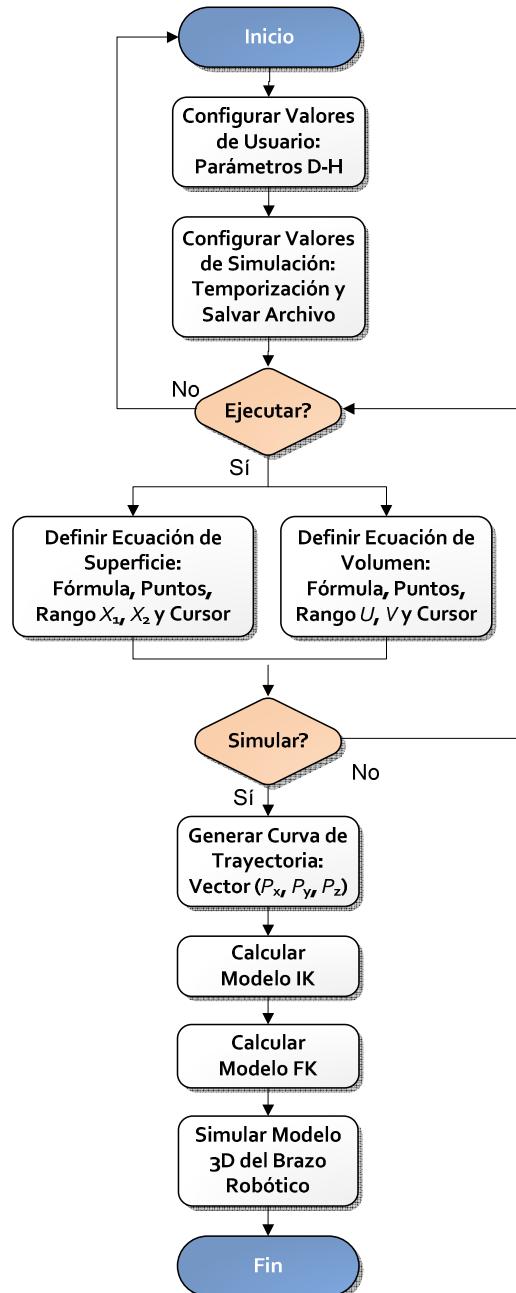


Figura 5. 2. Diagrama UML del algoritmo de planificación de trayectorias.

del IV. Esta variable establece el número de curvas que componen la superficie 3D. Cada una de estas curvas puede ser seleccionada individualmente por el usuario mediante un cursor situado en el gráfico 3D que representa el índice de la fila. Cuando se extrae una de las curvas posibles, realmente está definiéndose el juego de valores (p_x , p_y , p_z) qué formarán la trayectoria seguida por el brazo robótico a través de su modelo IK. Cuando se planifican y aplican trayectorias 3D, el algoritmo considera constante el movimiento del manipulador a lo largo de la curva definida.

El panel frontal del instrumento (ver Fig. 5.3) está dividido en dos secciones principales, que a su vez están divididas en otras dos: (a) parámetros D-H y configuración de la simulación, y (b) planificación de trayectorias y modelo 3D. En (a), la pestaña superior permite al usuario observar los puntos (p_x , p_y , p_z) de la trayectoria del brazo robótico y controlar la temporización de la simulación. La velocidad de ejecución puede alterarse según las necesidades del estudio, lo cual facilita la comprensión de los movimientos del manipulador a través de la trayectoria definida. Una vez se ha obtenido la simulación, es posible extraer y exportar los datos en un archivo para su estudio posterior sobre brazos robóticos. Por medio de la pestaña inferior, el usuario puede cargar desde un fichero *.txt los parámetros D-H o configurar las características geométricas del manipulador robótico (una imagen que incluye la pestaña inferior puede verse en la Figura 5.4).

En el área (b) del panel frontal, la pestaña superior muestra los controles necesarios para modelar superficies por medio de fórmulas explícitas (ver Ecuación

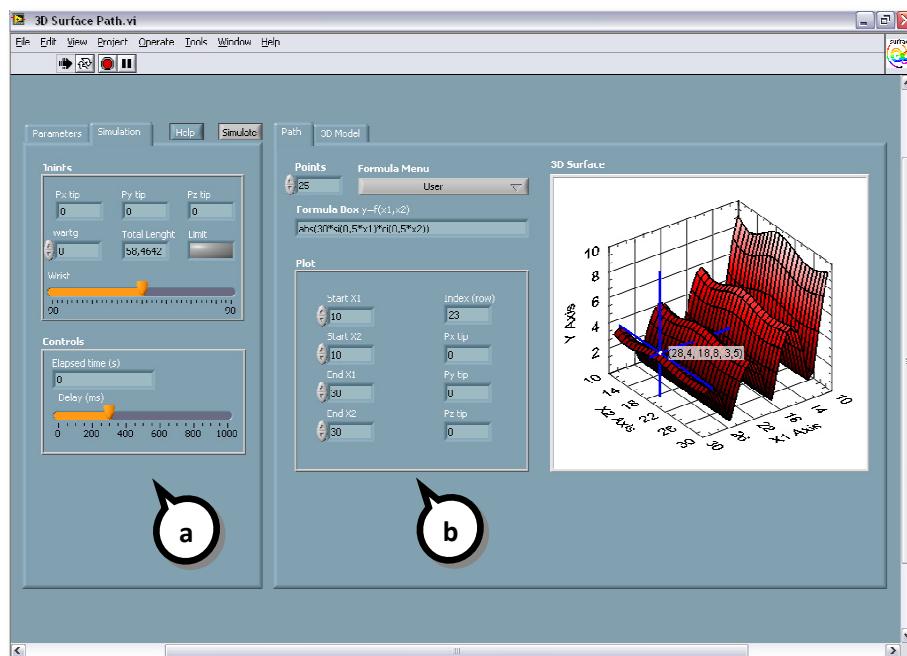


Figura 5. 3. Instrumento virtual representando una trayectoria de superficie.

5.1). Por medio de estos mandos, el usuario puede seleccionar diferentes superficies predefinidas o escribir nuevas fórmulas. La pestaña inferior muestra, en perspectiva 3D, la evolución del modelo simple del brazo robótico a través de las secuencias de movimiento definidas por el usuario. En esta pestaña también es posible estudiar las matrices de transformación homogénea para cada segmento del brazo robótico siguiendo la convención D-H.

5.3. Trayectorias de Volumen

El objetivo del presente apartado es explicar el desarrollo de un módulo integrado en el instrumento virtual 3D-RAS, que permite mediante un método geométrico de ecuaciones paramétricas de volumen, generar trayectorias cerradas para estudiar el movimiento de brazos robóticos antropomórficos con hasta 5 DOF.

El algoritmo llevado a cabo es una adaptación del diagrama de flujo mostrado en la Figura 5.2 para ecuaciones paramétricas de volumen. Las ecuaciones explícitas definidas genéricamente como en la función 5.1 tienen la limitación de necesitar que la curva sea una función de (x_1, x_2) en y . Es decir, que todos los valores (x_1, x_2) tengan un único valor correspondiente en y . No todas las curvas cumplen tal condición, por lo que para poder trabajar con ella como si fuera una función, debe definirse un dominio —el espacio de trabajo del manipulador— y tanto x_i , y_i como z_i deben considerarse variables dependientes. Así, la representación paramétrica de cualquier objeto dado en el espacio tridimensional requiere tres funciones definidas por las Ecuaciones (5.3) a (5.5):

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{g}_i(u, v) \quad (5.3)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i(u, v) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{j}_i(u, v) \quad (5.5)$$

donde $(u, v) \in [a, b]$, $[a, b] \in \mathbb{R}$ y $\mathbf{g}_i, \mathbf{h}_i, \mathbf{j}_i: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Las funciones (5.3) a (5.5) obtienen un vector de valores (x_i, y_i, z_i) que representan la i -ésima coordenada del punto generado cuando los valores asignados a las variables independientes (u, v) están comprendidas en el intervalo $[a, b]$.

La Figura 5.4 muestra el panel frontal del instrumento desarrollado. Siguiendo la misma estructura del módulo descrito en la sección anterior, el panel de control está dividido en dos secciones principales. El área de la izquierda (a) contiene los mandos e indicadores que interactúan con el modelo IK del brazo robótico. En la pestaña inferior, el usuario puede configurar los parámetros D-H, definiendo tanto la longitud de los segmentos como los grados de libertad para cualquier manipulador en serie.

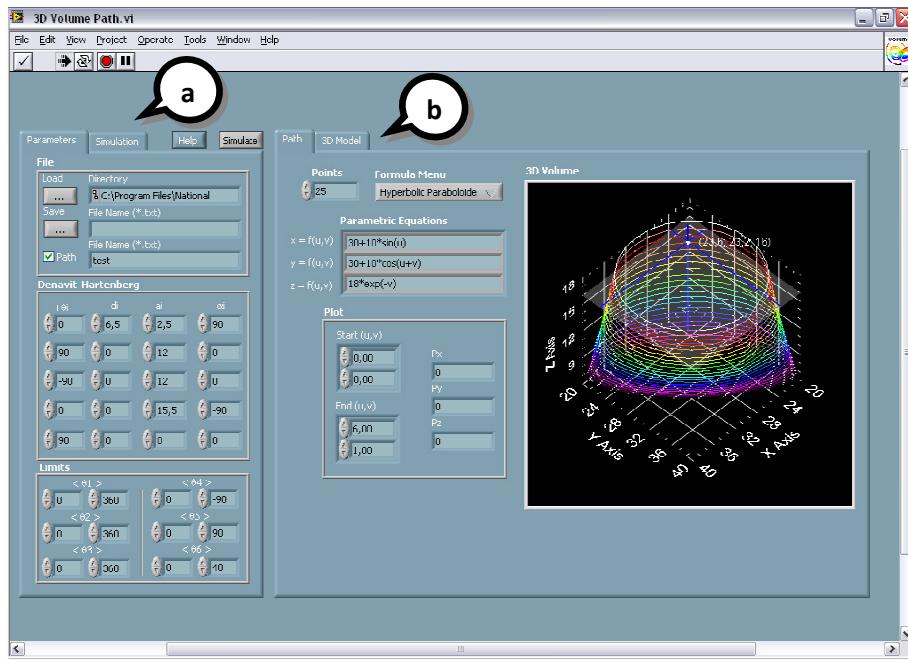


Figura 5. 4. Representación de la trayectoria de un paraboloide hiperbólico.

El área del lado derecho (b) contiene la zona de modelado de trayectorias 3D (pestaña inferior) y el modelado 3D del brazo robótico (pestaña superior). La pestaña inferior muestra los parámetros que definen las funciones de volumen y trayectorias aplicadas al manipulador. El número de puntos (i) que compone la curva generada por las ecuaciones paramétricas es especificado por el usuario mediante un control digital (*points*) localizado en el panel frontal. Esta variable define la resolución de las líneas que componen el objeto 3D. Una vez la función de volumen ha sido programada, el siguiente paso permite, mediante los controles de usuario, seleccionar una curva cerrada, obtener los valores que el extremo efector debe seguir y aplicar tal trayectoria a través de la colección puntos (x_i, y_i, z_i) que la componen.

La pestaña superior derecha muestra una perspectiva 3D del brazo robótico simulado. Mediante el área central inferior, los usuarios pueden estudiar las matrices de transformación homogénea y las coordenadas (p_x, p_y, p_z) de cada segmento del manipulador.

5.4. Experimentación

Con el objetivo de obtener resultados experimentales a través de la metodología desarrollada, ésta se ha aplicado al brazo robótico Lynx6. Como ejemplo de planificación de trayectoria de superficie se introduce en el IV la superficie siguiente:

$$y_i = \text{abs}(30 \cdot \text{sen}(0,5x_1) \cos(0,5x_2)) \quad (5.6)$$

donde $x_1 \in [10,30]$ y $x_2 \in [10,30]$. Los pasos pueden verse en la Figura 5.5, donde la ecuación (5.6) representa una superficie compuesta por $i=25$ curvas y definida entre los puntos (x_1, x_2) . Es importante observar que —con la apropiada selección del cursor— pueden extraerse diferentes curvas y compararse el comportamiento del brazo robótico con diferentes rangos de trayectorias (ver eje Z en las Figuras 5.5b y 5.5c). Es necesario resaltar que, dada la ecuación (5.2) expresada mediante sus variables explícitas, resulta necesaria la transformación de los ejes (X_1, X_2, Y) para su uso en el espacio de trabajo tridimensional del brazo robótico (X, Y, Z) . Esto es, la transformación de los ejes implica el cambio siguiente: $X=X_1$, $Y=X_2$ y $Z=Y$ (ver Figs. 5.5a y 5.5d).

Como ejemplo de las superficies que por defecto pueden ser estudiadas con este instrumento virtual, se presentan las curvas mostradas en las Figuras 5.6a-i que están definidas en la Tabla 5.2. Para utilizar la nomenclatura de las funciones descritas en la tabla, es necesario seguir el formato definido en LabVIEWTM. Un glosario de las expresiones utilizadas en el nodo de funciones de este lenguaje de programación puede consultarse en el Apéndice B.

Como ejemplo demostrativo de diferentes ecuaciones volumétricas que pueden ser estudiadas con el instrumento virtual, pueden observarse los resultados obtenidos en las Figuras 5.7a-g. Las diferentes trayectorias han sido obtenidas del modo siguiente. Las ecuaciones (5.7-5.9) definen una trayectoria cerrada obtenida para una espiral creciente oblicua compuesta por $i=70$ curvas (ver Fig. 5.7a).

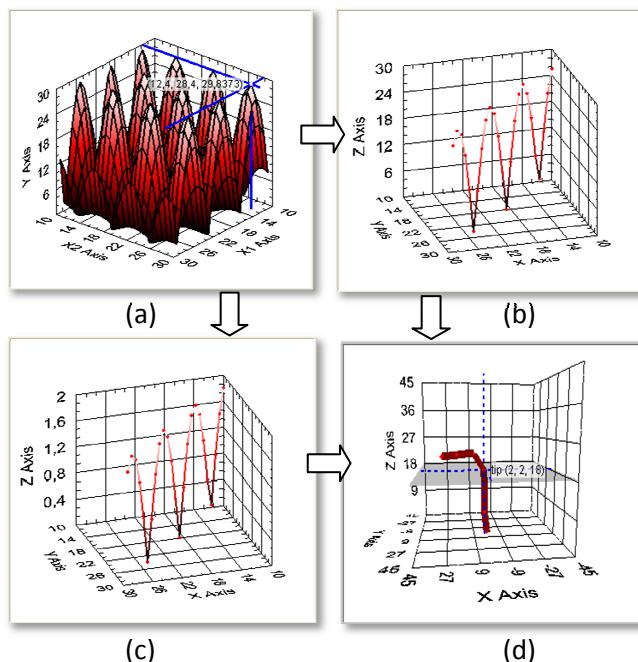


Figura 5. 5. Superficie definida y extracción de trayectorias curvilíneas.

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

Función	Ecuación	Rango de x_1	Rango de x_2	Nº de Curvas	Índice de Fila	Figura
Logaritmo	$y_i = 10 + (10 \cdot \log(x_1))$	[10,30]	[10,30]	25	24	5.6a
Tangente hiperbólica	$y_i = 25 \cdot \tanh\left(\frac{x_1}{10}\right)$	[10,30]	[10,30]	25	24	5.6b
Cotangente	$y_i = 20 + \left(3 \cdot \cot\left(\frac{x_1}{10}\right)\right)$	[10,30]	[10,30]	30	20	5.6c
Coseno integral logarítmico	$y_i = 10 + \left(8 \cdot \text{ci}\left(\frac{x_1}{9}\right) \cdot \log(x_2)\right)$	[10,35]	[10,35]	20	24	5.6d
Seno integral	$y_i = \text{abs}\left(15 \cdot \text{si}(0,5x_2) \cdot \text{sen}(0,5x_1)\right)$	[10,35]	[10,35]	25	10	5.6e
Seno y coseno	$y_i = \text{abs}\left(30 \cdot \text{sen}(0,5x_1) \cdot \cos(0,5x_2)\right)$	[10,20]	[10,20]	25	23	5.6f
Coseno logarítmico	$y_i = \text{abs}\left(10 + 10 \cdot \log(0,5x_2) \cdot \cos(0,5x_1)\right)$	[0,32]	[15,35]	20	0	5.6g
Cotangente logarítmica	$y_i = \text{abs}\left(0,6 \cdot \cot\left(\frac{x_2}{10}\right) \cdot \log_2(x_1)\right)$	[0,32]	[15,35]	20	19	5.6h
Seno y coseno integrales	$y_i = \text{abs}\left(30 \cdot \text{si}(0,5x_1) \cdot \text{ci}(0,5x_2)\right)$	[10,30]	[10,30]	25	24	5.6i

Tabla 5. 2. Ejemplos de planificación de trayectorias de superficie.

$$x_i = 15 + 0,5 u \quad (5.7)$$

$$y_i = 20 + (0,3 u \cdot \cos u) \quad (5.8)$$

$$z_i = 20 + (0,3 u \cdot \text{sen} u) \quad (5.9)$$

donde $u \in [0,30]$ y $v \in [0,0]$. Para obtener una trayectoria cerrada perteneciente a una curva de *Lissajous* (ver Fig. 5.7b), deben enunciarse las ecuaciones (5.10) a (5.12):

$$x_i = 20 + (5 + 0,1 \cdot \text{sen} 2u) \cdot \text{sen} u \quad (5.10)$$

$$y_i = 20 + 0,1 \cdot \cos 2v + 5 \cdot \cos 2u \quad (5.11)$$

$$z_i = 20 + (5 + 0,1 \cdot \text{sen} 2v) \cdot \cos u \quad (5.12)$$

donde $u \in [0,13]$, $v \in [0,1]$ e $i=60$. Ahora, para obtener una trayectoria cerrada a través de una epicicloide compuesta por $i=70$ curvas (ver Fig. 5.7c), deben definirse las ecuaciones paramétricas (5.13) a (5.15):

$$x_i = 20 + (20 \cdot \text{sen} 3u \cdot \cos u) \quad (5.13)$$

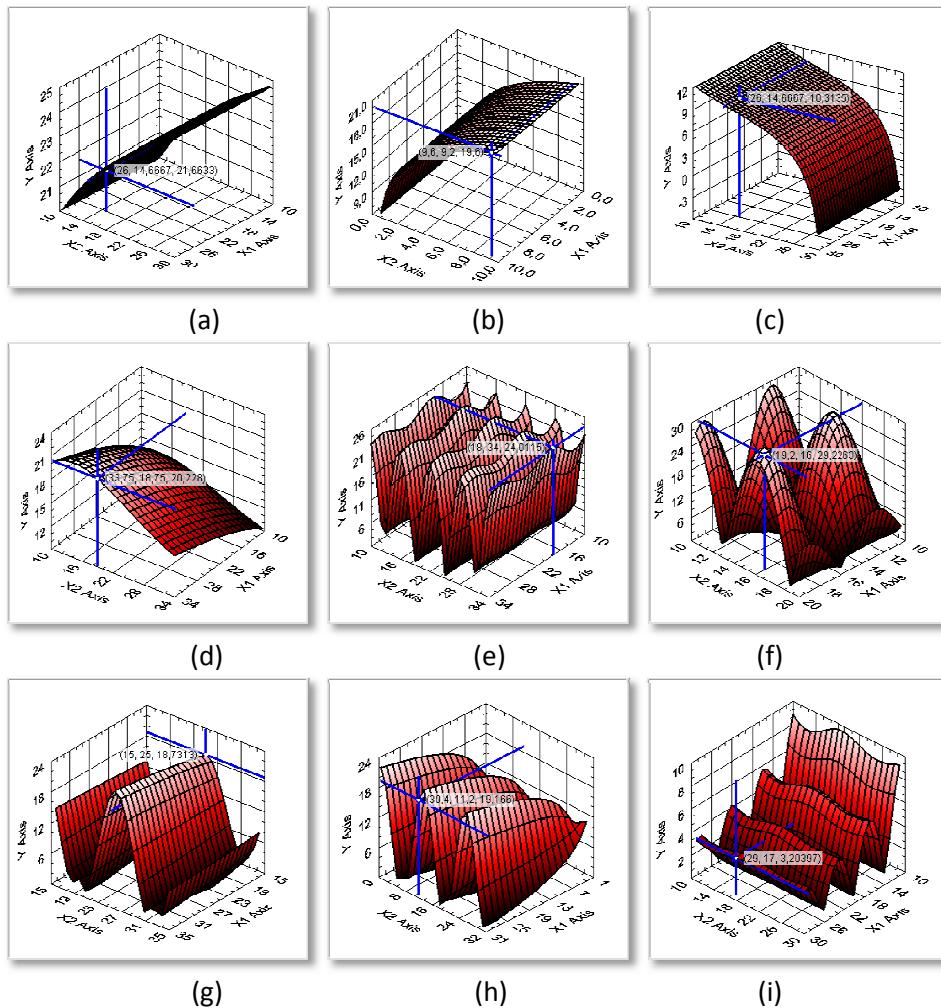


Figura 5.6. Ejemplos de superficies paramétricas.

$$y_i = 20 + (20 \cdot \operatorname{sen} 3u \cdot \operatorname{senu}) \quad (5.14)$$

$$z_i = 20 + v \quad (5.15)$$

donde $u \in [0,3.2]$ y $v \in [0,1]$. Si se desea obtener una trayectoria cerrada a través de un círculo ondulado compuesto por $i=20$ curvas (ver Fig. 5.7d), deben definirse las ecuaciones paramétricas (5.16) a (5.18):

$$x_i = 10 + 10 \cdot \cos u \quad (5.16)$$

$$y_i = 10 + 10 \cdot \operatorname{senu} \quad (5.17)$$

$$z_i = 20 + \operatorname{sen}(u + v) \quad (5.18)$$

donde $u \in [0,6]$ y $v \in [0,3]$. Las ecuaciones (5.19) a (5.21) representan una trayectoria cerrada de una curva helicoidal compuesta por $i=55$ curvas (ver Fig. 5.7e):

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

$$\mathbf{x}_i = 25 + 5 \cdot \operatorname{sen} u \quad (5.19)$$

$$\mathbf{y}_i = 25 + 5 \cdot \cos u \quad (5.20)$$

$$\mathbf{z}_i = u + v \quad (5.21)$$

donde $u \in [0,30]$ y $v \in [0,0]$. Si se desea representar una trayectoria cerrada perteneciente a un semitoroide compuesto por $i=50$ curvas (ver Fig. 5.7f), las ecuaciones deben ser expresadas de la forma siguiente:

$$\mathbf{x}_i = 10 + 2(\cos(u) + \cos(u) \cdot \cos(v)) \quad (5.22)$$

$$\mathbf{y}_i = 10 + 2(\sin(u) + \sin(u) \cdot \cos(v)) \quad (5.23)$$

$$\mathbf{z}_i = 20 + 5 \cdot \sin(v) \quad (5.24)$$

donde $u \in [0,327]$ y $v \in [0,311]$. Ahora, para obtener una trayectoria cerrada a través de una cinta de Möbius compuesta por $i=50$ curvas con $u \in [0,25]$ y $v \in [-1,1]$ (ver Fig. 5.7g), deben definirse las ecuaciones paramétricas (5.25) a (5.26):

$$\mathbf{x}_i = 20 + (5 + 0,5v \cdot \cos(0,5u)) \cdot \cos u \quad (5.25)$$

$$\mathbf{y}_i = 20 + (5 + 0,5v \cdot \cos(0,5u)) \cdot \sin u \quad (5.26)$$

$$\mathbf{z}_i = 20 + 0,5v \cdot \sin(0,5u) \quad (5.27)$$

Para trazar circunferencias inscritas en una esfera latitudinal (ver Fig. 5.7h), deben ser formuladas las ecuaciones (5.28-5.30):

$$\mathbf{x}_i = 20 + 10 \cdot \cos u \cdot \cos v \quad (5.28)$$

$$\mathbf{y}_i = 20 + 10 \cdot \sin u \cdot \cos v \quad (5.29)$$

$$\mathbf{z}_i = 15 + 15 \cdot \sin v \quad (5.30)$$

donde $u \in [0,360]$, $v \in [0,360]$ e $i=28$. Por último, si se requiere una esfera longitudinal en lugar de la anterior (ver Fig. 5.7i), las ecuaciones (5.31) a (5.33) permiten generar la trayectoria:

$$\mathbf{x}_i = 25 + 5 \cdot \cos u \quad (5.31)$$

$$\mathbf{y}_i = 25 + 5 \cdot \sin u \cdot \cos v \quad (5.32)$$

$$\mathbf{z}_i = 15 + 10 \cdot \sin u \cdot \sin v \quad (5.33)$$

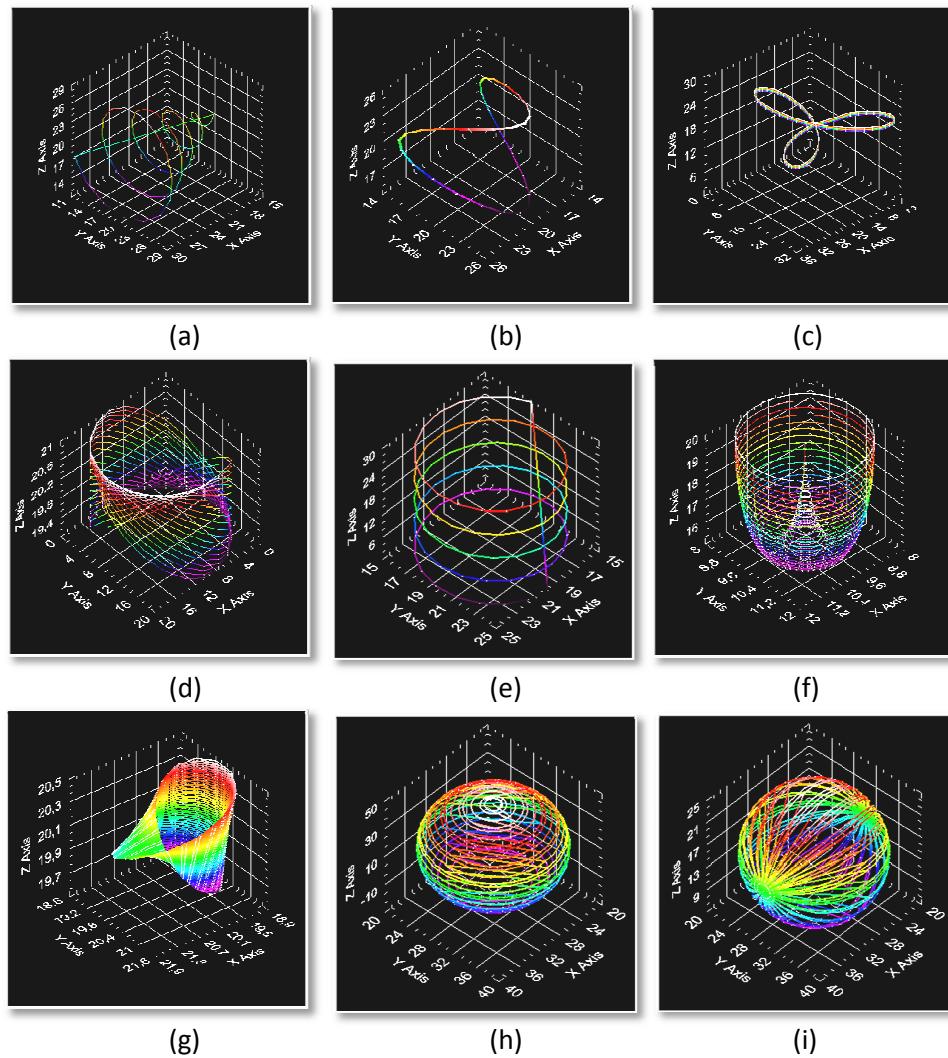


Figura 5.7. Ejemplos de trayectorias volumétricas.

donde $u \in [0,360]$, $v \in [0,360]$ e $i=28$. Para aplicar correctamente el camino definido por las ecuaciones paramétricas al modelo cinemático del brazo robótico, es necesario que el rango de variables independientes (u, v) pertenezcan al espacio de trabajo real del manipulador. Con ese propósito, debe tenerse presente que cada punto diferente de la curva dentro del intervalo $[a, b]$ deba cumplir las condiciones expresadas en (5.3) a (5.5), esto es $(u, v) \in [a, b]$ y $[a, b] \in \mathfrak{R}$. De esta forma, para obtener una trayectoria cerrada las coordenadas de los puntos obtenidos cuando $(u, v) = a$ deben coincidir por lo menos en uno de sus límites al definir $(u, v) = b$.

Los tiempos de simulación de las trayectorias de superficie están situados en torno a los 0,85 segundos, mientras los tiempos de simulación de las trayectorias de volumen son los que se muestran en la Tabla 5.3. En ella se puede observar que, debido a las naturaleza tanto de la curva de *Lissajous* como de la epicicloide, estas curvas cerradas pueden simularse de forma continua durante un tiempo infinito.

Trayectoria	Tiempo (s)
Espiral	5,1
Esfera longitudinal	103,64
Esfera latitudinal	101,61
Parabolóide hiperbólico	11,03
Lissajous	∞
Epicicloide	∞
Möbius	115,36
Semitoroide	135,37

Tabla 5. 3. Tiempos de simulación de trayectorias de volumen.

Al igual que una línea recta representa la intersección de dos planos, la descripción analítica de una curva define la intersección de objetos reales. Como ejemplo, un cordón de soldadura en la unión de dos tuberías (ver Fig. 5.8) es una de las posibles aplicaciones prácticas reales del instrumento virtual de planificación de trayectorias. Los cilindros ortogonales, con radios $r_1=80$ mm y $r_2=90$ mm respectivamente, producen una intersección cuya función puede expresarse con las ecuaciones (5.34) a (5.36). Para producir el conjunto de puntos utilizados para guiar al brazo robótico ($t=2,796$ s), los cilindros deben pertenecer al espacio de trabajo del manipulador. Para este ejemplo, su ubicación ha sido definida con un desplazamiento relativo de (25, 25, 15) como puede verse en las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{x}_i = d_x + r_i \cdot \cos u \quad (5.34)$$

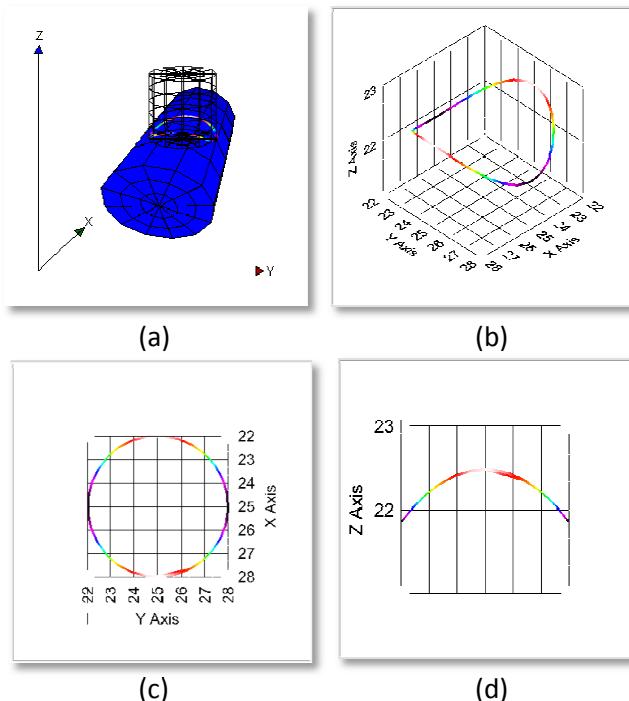


Figura 5. 8. Trayectoria resultante de la intersección de dos tuberías.

$$y_i = d_y + r_1 \cdot \operatorname{sen} u \quad (5.35)$$

$$z_i = d_z + \sqrt{r_2^2 - r_1^2 \cdot \operatorname{sen}^2 u} \quad (5.36)$$

donde d_x , d_y y d_z son los desplazamientos sobre los ejes (X, Y, Z) respectivamente, $u \in [0, \pi]$ e $i=32$.

5.5. Validación Educacional de 3D-RAS

La asignatura *Robótica* es optativa para los estudiantes de los grados de Ingeniería Técnica Informática e Ingeniería Técnica Industrial (especialidad Electrónica Industrial) de la Universidad de Huelva. Esta asignatura está siendo enseñada desde hace 12 años. Al principio, el simple nombre de la palabra robótica era atractivo para los estudiantes; sin embargo, casi ningún estudiante era capaz de prever que esta materia escondía duros desarrollos físicos y matemáticos junto con fuertes implicaciones de mecánica y electrónica. El aprendizaje formal en Robótica puede ser duro e incluso tedioso para esos estudiantes que pretenden alcanzar el final del camino (la programación de robots) sin cubrir las fases anteriores: cinemática (directa y/o inversa), dinámica, control, así como todos los problemas asociados a la morfología del robot (transmisiones, engranajes, actuadores, sensores, etc.). El resultado práctico de intentar mantener una formalidad en la asignatura, quizás excesiva, ha sido la reducción gradual del número de estudiantes matriculados que, debido probablemente a esta forma de enseñanza tan formal, no ven la materia tan atractiva.

El análisis de la situación descrita en el área responsable de enseñar esta asignatura (Ingeniería de Sistemas y Automática), llevó al equipo de profesores a la conclusión de que debería ser compatible una asignatura atractiva con el compromiso de que fuera formal y de nivel universitario. Con este propósito, fue creado un equipo de trabajo que obtuvo un Proyecto de Innovación Docente financiado por la Universidad de Huelva (ver Capítulo 1) cuyo primer resultado (se espera ofrecer más en fases sucesivas, cuando los desarrollos actuales vayan concluyendo) es el instrumento virtual educativo presentada en los Capítulos 4 y 5: *3D Robotic Arm Simulator* (3D-RAS). El IV fue puesto en práctica como un módulo de la plataforma del Campus Virtual de la Universidad de Huelva en el curso 2008/2009.

Con el objetivo de demostrar las aportaciones y capacidades educacionales de 3D-RAS, se completó un estudio estadístico realizado en los cursos 2008/09 y 2009/10 (ver Tabla 5.4). Dicho estudio incluye aspectos referidos tanto a las características del IV como a su aceptación y uso. Para ello se han considerado dos grupos de usuarios (32 estudiantes y 14 profesionales), evaluando la puntuación entre 1 (valoración muy baja) y 5 (valoración muy alta). En general, la Figura 5.9 muestra que la opinión de los estudiantes y de los profesores es muy similar, siendo el 57,9% de las valoraciones de

CAPÍTULO 5. INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BRAZOS ROBÓTICOS ANTROPOMÓRFICOS

los alumnos más positiva que la de los profesionales de la enseñanza. Como factor a destacar, el conocimiento previo de los encuestados sobre la materia de Robótica era bajo (cuestión 1). Respecto a la enseñanza y aprendizaje de Robótica, los cuestionados confirman con altas puntuaciones que estos conceptos son afianzados y favorecidos por el uso de la herramienta de simulación (cuestiones 2-7). En este sentido, los estudiantes discrepan con la idea de que los conceptos teóricos tienen que ser aprendidos de forma teórica, sin necesidad de usar simulaciones por computador. Considerado los aspectos relacionados con la interfaz gráfica de usuario, se destacan notablemente su facilidad de uso e interactividad, aunque quizás sea mejorable la obtención de resultados y simulaciones gráficas. También es importante resaltar que los estudiantes enfatizan la manera en que los conceptos teóricos y prácticos están relacionados, permitiendo rápidamente el aprendizaje (cuestiones 8-12). La preferencia sobre los módulos que componen 3D-RAS se muestra en las preguntas 13-

Ítem	Descripción	Profesores	Estudiantes	Desviación
1	Nivel previo en robótica	2,5	1,88	3,83
2	El uso de una herramienta gráfica favorece la motivación e interés de los estudiantes	4	4,28	2,28
3	El instrumento virtual tiene una estructura clara e intuitiva	4	3,95	3,35
4	La puesta en marcha de la aplicación es apropiada en un contexto universitario	4,5	4,65	3,19
5	El simulador permite aprender nuevos conceptos teóricos	3,5	3,43	3,03
6	El simulador permite consolidar nuevos conceptos teóricos	3	4,65	3,19
7	Los conceptos teóricos son adquiridos a través del estudio, sin necesidad de simulaciones	4,5	2,1	1,79
8	Apariencia del interfaz	4	3,38	2,28
9	Facilidad de uso	4	3,83	1,92
10	Resultados y simulaciones gráficas	3,5	3,9	3,35
11	Comprensión teórica/práctica	4	3,93	2,05
12	Interactividad de la aplicación	4	4,58	3,03
13	Módulo “Espacio de Trabajo Articular 2D”	4	3,88	3,35
14	Módulo “Espacio de Trabajo Directo 3D”	4	4,3	3,49
15	Módulo “Espacio de Trabajo Inverso 3D”	4	4,3	3,49
16	Módulo “Trayectorias de Superficie”	4	4,1	3,35
17	Módulo “Trayectorias de Volumen”	4	4,1	3,35
18	Módulo “3D Robotic Arm”	4	4,45	3,19
19	Valoración general	4	4,1	4,38

Tabla 5. 4. Cuestionario de evaluación del instrumento virtual 3D-RAS.

18, siendo el grado de satisfacción de los usuarios bastante alto.

En la Figura 5.10 se muestra una comparativa de la valoración que los alumnos hacen a lo largo de los dos cursos académicos. En general, la opinión de los dos grupos de alumnos sigue la misma tendencia, presentando ligeras variaciones. Aunque todavía es demasiado pronto para obtener resultados concluyentes, el análisis desarrollado lleva a los profesores a la conclusión de que la capacidad genérica de 3D-RAS permite la simulación gráfica del movimiento de brazos robóticos en serie y ayuda a estudiar los modelos cinemáticos. En este sentido, la valoración general es bastante alta (pregunta 19), ya que las prácticas han resultado ser más agradables y atractivas.

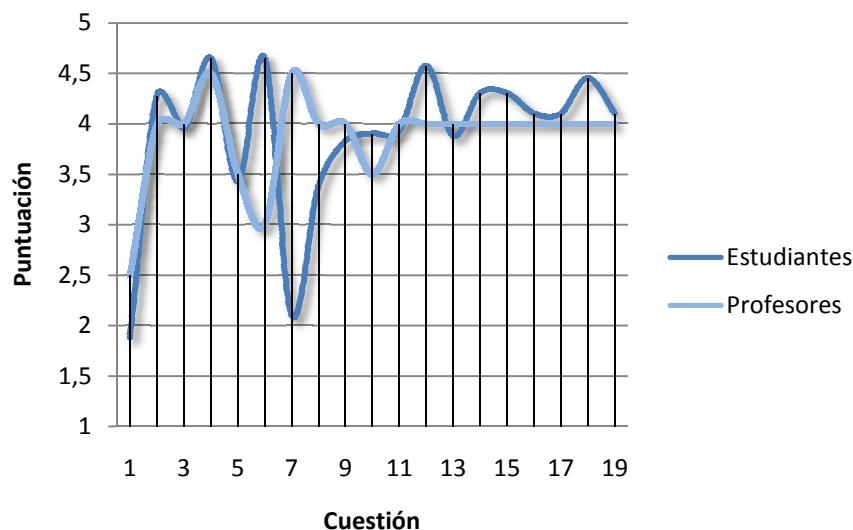


Figura 5. 9. Evaluación global del instrumento virtual 3D-RAS.

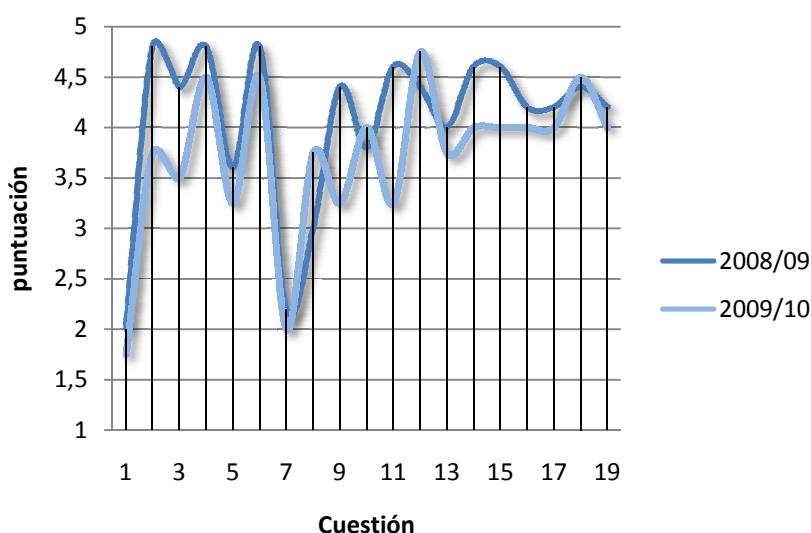


Figura 5. 10. Comparativa de la evaluación del alumnado sobre 3D-RAS.

Respecto al lugar donde el instrumento virtual fue usado, el 56,52% de los usuarios optaron por completar las prácticas en el laboratorio contando con el apoyo de los profesores y la ayuda de sus compañeros de clase. Sin embargo, una gran cantidad de estudiantes (43,47%) usó la herramienta en casa. La razón detrás de esta decisión es que los usuarios no están condicionados por la necesidad de disponer del equipo específico de laboratorio para completar las prácticas *in situ*.

5.6. Conclusiones, Comentarios Bibliográficos y Trabajos Futuros

El presente capítulo propone, como principal contribución a la Robótica, el uso del instrumento virtual 3D-RAS desarrollado en este trabajo con el objetivo de estudiar y evaluar diferentes aspectos relacionados con la cinemática de brazos robóticos antropomórficos. El uso de herramientas con este propósito no es algo desconocido. Si bien la mayoría de instrumentos existentes están basados en Matlab® y heredan el uso de sistemas matriciales para los que este lenguaje está pensado, difieren en las capacidades del entorno gráfico de usuario y la implementación de los métodos cinemáticos. Probablemente, la herramienta que ha marcado un antes y después en la forma de estudio de manipuladores robóticos ha sido *Robotics Toolbox* de [Corke, 1996], de la cual han surgido con posterioridad las implementaciones de varios autores como [Maza Alcañiz, y otros, 2001], [Macfarlane, y otros, 2003] y [Falconi, y otros, 2008]. Este capítulo presenta un método alternativo sin requerir el uso de puntos 3D a alcanzar, o sin necesidad de importar superficies generadas por un programa de modelado de cuerpos sólidos. El uso de los módulos desarrollados en este capítulo, debido a su gran versatilidad y su carácter visual, es muy intuitivo y permite planificar trayectorias de superficie y volumen para brazos robóticos en serie con hasta 5 DOF. Así, la metodología genérica presentada permite simular diferentes configuraciones de brazos robóticos. Con este propósito y como ejemplo se han aplicado los algoritmos desarrollados al brazo Lynx6.

La enseñanza en la asignatura *Robótica*, cuya innovación es uno de los objetivos de esta Tesis, es una materia optativa en los grados universitarios de Ingeniería Técnica Industrial (especialidad Electrónica Industrial) e Ingeniería Técnica Informática de la Universidad de Huelva. Con el objetivo de mostrar las contribuciones y capacidades de este instrumento virtual educativo, se ha completado un estudio estadístico a lo largo de los cursos académicos 2008/09 y 2009/10. Actualmente, la herramienta está siendo utilizada de forma regular en estas asignaturas. Por supuesto, si bien se ha utilizado la asignatura *Robótica* como prototipo experimental, la única razón para ello ha sido que es una docencia que imparte el autor de este trabajo de investigación. Esto es, 3D-RAS es de aplicación, en general, en cualquier asignatura de Robótica.

Como trabajos futuros, se están mejorando las características básicas del instrumento virtual y se está agregando una vista 3D CAD de los manipuladores

robóticos. La finalidad es la de introducir objetos, luces y escenas que permitan a los manipuladores interactuar con los elementos de su entorno. La mejora de la planificación de trayectorias a través de otros métodos cinemáticos, así como la implementación de las características dinámicas de los manipuladores robóticos también serán consideradas con el objeto de mejorar la planificación de trayectorias (interpolación, aceleración, peso, etc.).

Los videos explicativos y una versión de demostración descargable que permite ejecutar las simulaciones sin necesidad de disponer de IVs conectados a los brazos robóticos reales, está disponible en www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm (archivo “*3D Robotic Arm Simulator*”).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Malek, K., Mi, Z., Yang, J., & Nebel, K. (2006). Optimization-based Trajectory Planning of the Human Upper Body. *Robotica*, Vol. 24, págs. 683–696.
- Agrawal, O., & Xu, Y. (1994). On the Global Optimum Path Planning for Redundant Space Manipulators. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, Núm. 9, págs. 1306-1316.
- Andújar Márquez, J., & Mateo Sanguino, T. (2010). Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, Vol. 7, No. 1, págs. 64-72.
- Braganza, D., Dixon, W., Dawson, D., & Xian, B. (2008). Tracking Control for Robot Manipulators with Kinematic and Dynamic Uncertainty. *Int. Journal of Robotics and Automation*, Vol. 23, Núm. 8, págs. 117-126.
- Corke, P. (1996). A Robotics Toolbox for Matlab. *IEEE Robotics and Automation Magn.*, Vol.3, págs. 24-32.
- Falconi, R., & Melchiorri, C. (2008). RobotiCad: an Educational Tool for Robotics. *Proc. 17th World Congress of the IFAC*, (págs. 9111-9116). Seul, Korea.
- Faraz, A., & Payandeh, S. (2000). Kinematic Modelling and Trajectory Planning for a Tele-laparoscopic Manipulating System. *Robotica*, Vol.18, págs. 347–360.
- Macfarlane, S., & Croft, E. (2003). Jerk-bounded manipulator trajectory planning: design for real-time applications. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 19, Núm. 1, págs. 42-52.
- Mateo Sanguino, T., & Andújar Márquez, J. (2010). Simulation Tool for Teaching and Learning 3D Kinematics Workspaces of Serial Robotic Arms with up to 5-DOF. *Computer Applications in Engineering Education*, DOI 10.1002/cae.20433.
- Maza Alcañiz, J., & Ollero Baturone, A. (2001). A Matlab-Simulink Toolbox for Robotics. *1st Workshop on Robotics, Education and Training*, (págs. 43-50). Weingarten (Alemania).
- Tan, H., & Pots, R. (1989). A Discrete Trajectory Planner for Robotic Arms with Six Degrees of Freedom. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 5, Núm. 5, págs. 681-690.
- Xu, Y., & Nechyba, M. (1993). Fuzzy Inverse Kinematic Mapping: Rule Generation, Efficiency and Implementation. *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (págs. 911-918, Vol. 2).

CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LABORATORIOS VIRTUALES Y/O REMOTOS. UN CASO PRÁCTICO

En este capítulo se realiza un análisis sobre las formas de acceso a los recursos experimentales de un laboratorio universitario (presencial o remoto a través de Internet), así como de los propios elementos y/o sistemas para realizar los experimentos, los cuales pueden ser virtuales (simulados en un ordenador) o físicos tangibles (tradicionalmente usados en las prácticas presenciales). A partir de aquí, se proponen unas pautas de diseño de laboratorios de acceso remoto con control de sistemas físicos a través de instrumentos virtuales. Como caso práctico de aplicación se presenta un proyecto educativo y de investigación: el Laboratorio de Ensayo de Robots (LER), que dirigido a la enseñanza en Automática, está siendo llevado a cabo por profesores y alumnos de grado y posgrado de la Universidad de Huelva.

El objeto de este capítulo es analizar las diferentes posibilidades de enseñanza que ofrece un laboratorio virtual y/o remoto, la mayoría de ellas complementarias y sinérgicas, así como proponer una pauta de diseño de laboratorios con acceso remoto y manejo de sistemas físicos mediante instrumentos virtuales. Como ejemplo de aplicación, se muestra un proyecto educativo de laboratorio de Automática dedicado al ensayo de robots (LER).

El capítulo está organizado de la forma siguiente. La sección 2 propone una metodología en forma de pautas mínimas a seguir para el diseño e implementación de un laboratorio virtual y/o remoto. La sección 3 presenta un caso práctico de laboratorio virtual y/o remoto dedicado a la enseñanza en Automática, el cual es el objetivo fundamental de este trabajo. Finalmente, el capítulo aporta los resultados

sobre el trabajo desarrollado y pone a disposición de la comunidad científica, para su evaluación, los instrumentos virtuales desarrollados.

6.1. Introducción a los Laboratorios Virtuales y Remotos

La aplicación de las TIC en la enseñanza universitaria ha generado la aparición de diferentes definiciones sobre los términos de simulación, instrumento virtual, laboratorios virtuales y remotos, en las que los autores no suelen llegar a un acuerdo común [Candelas, y otros, 2005]. En ocasiones, estos términos pueden ser aplicados de forma errónea debido a una perspectiva poco clara de sus conceptos. Uno de los objetivos de este capítulo es analizar las diferentes posibilidades de enseñanza que ofrecen cada uno de los conceptos citados, la mayoría de ellas complementarias y sinérgicas, así como proponer una pauta de diseño de laboratorios con acceso remoto y manejo de sistemas físicos mediante instrumentos virtuales. Como ejemplo de aplicación se muestra una experiencia educativa de laboratorio de Automática dedicado al ensayo de robots.

Tradicionalmente la docencia universitaria ha sido una actividad de carácter presencial. Como alternativa, la educación a distancia ha supuesto una vía más flexible ajustada a un gran sector de estudiantes con restricciones propias de la sociedad actual (trabajadores, desempleados, mayores, etc.). Sin embargo, el nivel de éxito en la enseñanza a distancia depende en gran medida de la voluntad y autodisciplina necesarias a la hora de estudiar. En este sentido, los métodos de enseñanza tradicionales no pueden cubrir los requerimientos de la enseñanza no presencial, y menos aún en el campo de las Ingenierías.

El uso de las TIC en la enseñanza universitaria permite nuevas formas de enseñar, aprender y compartir los conocimientos. La mejora de la calidad docente que pueden proporcionar, no debe suponer sólo la incorporación de un nuevo medio de hacer llegar el conocimiento. Innovar en la Educación no sólo es usar las últimas y más modernas tecnologías en un momento particular del proceso de aprendizaje, sino que debe ser una nueva forma de enseñanza-aprendizaje de la que tanto profesores como alumnos tomen ventaja.

Los laboratorios virtuales permiten a los estudiantes aprender y/o reforzar los conceptos prácticos, tanto de forma presencial como a distancia. La integración de recursos *e-learning* con instrumentos virtuales interactivos, permite a los profesores desarrollar nuevas prácticas y programar actividades. Por ello, actualmente se está llevando a cabo el desarrollo de un buen número de laboratorios virtuales con una idea común: mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje tradicional aprovechando las ventajas de las nuevas tecnologías.

La aparición de los laboratorios remotos se originó con la idea de monitorizar el control de procesos a través de Internet. Aplicado inicialmente en los campos de la telemedicina, la Robótica o la Ingeniería de control entre otros, pronto se extendió su uso a la docencia con el objetivo de reducir costes, compartir recursos y facilitar el acceso a los laboratorios físicos. Esto favorece un ambiente de aprendizaje adaptado al ritmo de cada estudiante, el cual decide dónde y en qué momento participa de su formación. Los laboratorios virtuales y/o remotos vienen a reducir las insuficiencias propias de factores espacio-temporales o económicos, proporcionando un entorno a distancia lejos de las limitaciones que pueden sufrir los estudiantes. Por estos motivos, entre otros, resulta del máximo interés académico el desarrollo de laboratorios a distancia con propósitos educacionales.

Una de las ventajas principales de usar laboratorios virtuales es la de incentivar la atención y participación de los estudiantes, ya que si está bien enfocado al contenido, el uso de instrumentos virtuales aumenta la comprensión de los conceptos teóricos. Es más, el hecho de crear experimentos con objetos reales o simulados, permite a los estudiantes protagonizar su propio proceso de aprendizaje. Por otro lado, las actividades de aprendizaje basadas en sistemas cooperativos en red, favorecen la implicación de estudiantes en actividades grupales que requieren la solución de una tarea común. Sin duda, ésta es una buena manera de descubrir conceptos erróneos, compartir conocimientos y desarrollar competencias con otros compañeros.

A pesar de las aportaciones de las TIC en los laboratorios, las prácticas virtuales y/o remotas no deben suponer una modalidad de enseñanza en la que disminuyan las funciones y obligaciones del profesor. El uso de los recursos basados en web, está siendo utilizado en algunos casos para reducir la presencialidad en las aulas. En estas situaciones, los alumnos asisten sólo a algunas sesiones presenciales, no para recibir formación, sino para resolver dudas. Los laboratorios virtuales y/o remotos no deben tener el objetivo de sustituir ni rivalizar con los laboratorios físicos presenciales, sino complementar la formación desarrollada en los mismos.

La concepción de un nuevo modelo de formación basado en los recursos *e-learning* exige una nueva concepción en el papel del profesor, tanto en la manera de presentar los contenidos, como en sus funciones de formador. El profesor no sólo debe establecer el canal de comunicación con los alumnos a través del entorno virtual desarrollado, sino que debe promover una participación activa.

Para evitar la impersonalidad a la que tienden los sistemas *e-learning*, la aplicación del concepto de *B-learning* [Heinze, y otros, 2004], traducido al español como aprendizaje semi presencial, ayuda a confeccionar un laboratorio virtual y/o remoto mediante las siguientes premisas:

- Determinar qué parte de una actividad práctica debe ser virtual (remota o no) y qué parte debe ser presencial.
- Determinar qué contenido debe ser auto-aprendizaje y qué contenido debe ser tutorizado.
- Definir las actividades individuales y las actividades colaborativas.
- Ofrecer herramientas de comunicación asincrónicas que generen conocimiento y fomenten la interacción.
- Cómo estructurar y presentar el conocimiento de forma modular.
- Ofrecer instrumentos virtuales que permitan la interactividad web y faciliten la enseñanza a distancia de una manera intuitiva.
- Relacionar directamente los conceptos físicos reales con los virtuales.

6.2. Definición de Laboratorios Remotos y Virtuales

La elevada disponibilidad actual de herramientas de desarrollo virtual, han motivado a universidades y grupos de investigación a diseñar nuevos entornos de enseñanza-aprendizaje interactivos [Guzmán, y otros, 2007]. Con esta idea, los laboratorios *MeRLab* [Pipan, y otros, 2009] y *Telelabs* [Rae, 2004] presentan varios IVs desarrollados con LabVIEW™, que permiten el estudio de brazos robóticos y sistemas mecatrónicos. Mediante esta misma herramienta de programación, en [Peek, y otros, 2005] se describen los requerimientos necesarios para ofrecer un laboratorio virtual docente que resulte efectivo y flexible vía web, incluso a pesar del hecho de abordar problemas complejos de Ingeniería de Control. Con la idea de crear conocimiento y construir comunidades, la plataforma *Connexions*® dispone también de IVs para el procesamiento de señales mediante simulaciones interactivas [Luther, 2006]. Mediante el uso de LabVIEW™ integrado con la herramienta Matlab®/Simulink, la Universidad de Chattanooga dispone de simulaciones para el estudio del control y la dinámica de sistemas [Henry, y otros, 2003]. La integración de MatLab® y Simulink es habitual para el desarrollo de aplicaciones interactivas con capacidad remota, como por ejemplo en el laboratorio de control *ACT* de la Universidad de Siena [Casini, y otros, 2004]. En otras ocasiones, Java™ es la herramienta utilizada para la teleoperación web de instrumentos, como el manipulador robótico del laboratorio *Robotoy* [Atkinson, y otros, 1998]. En [Sánchez, y otros, 2005a] se detallan los pasos básicos y las características necesarias para transformar una simulación clásica en una completa aplicación interactiva. En [Sánchez, y otros, 2005b] y [Jiménez, y otros, 2005] se describen cómo el uso de la herramienta EJS facilita el desarrollo de laboratorios virtuales. Mediante el uso de la misma, el laboratorio de la UNED ha desarrollado un laboratorio de control basado en recursos web [Dormido R., y otros, 2008].

La integración de recursos *e-learning* con instrumentos virtuales interactivos, permite a los profesores desarrollar nuevas prácticas y programar actividades. En

[Domínguez, y otros, 2005] se destaca la importancia de los laboratorios remotos y su implicación en la docencia en Automática. Un referente en el campo del Control y la Automática es *AutomatL@bs*, cuya principal aportación ha sido la coordinación de los esquemas de trabajo y contenido de una experiencia docente interuniversitaria, lo que es percibido por los usuarios como un laboratorio de estructura uniforme independiente de la localización física de los sistemas [Dormido S. , y otros, 2007b]. Otro de los ejemplos es el laboratorio virtual del grupo *Aurova*, dedicado al control de brazos manipuladores, visión artificial y redes de comunicaciones [Jara, y otros, 2009]. En este mismo campo, en [Torres, y otros, 2006] se presentan las experiencias prácticas de un laboratorio remoto usado en los entornos de enseñanza y aprendizaje a distancia. El impacto que un laboratorio remoto tiene en la docencia en Robótica ha sido evaluado en [Candelas, y otros, 2005].

En los entornos educativos a distancia, resulta esencial disponer de un mecanismo que permita analizar, gestionar y compartir los recursos entre los usuarios. Cuando se trabaja en un entorno colaborativo con experimentos reales ubicados en un laboratorio teleoperado, resulta obligatorio la implementación de un gestor de acceso mediante reservas [Hoyer, y otros, 2004]. Con estos propósitos de colaboración y aprendizaje, en [Petropoulakis, y otros, 2003] se ofrece una visión de la funcionalidad y el uso de aplicaciones en la educación en Ingeniería. En [Fujii, y otros, 2007] se presenta un nuevo sistema de aprendizaje a distancia que usa XML para diseñar módulos compartidos vía web en un entorno multiusuario. Otros entornos educativos como *eMersion* [Gillet, y otros, 2005], representan plataformas pedagógicas innovadoras que integran tanto recursos *e-learning* como herramientas de experimentación enfocadas a la educación en Automática u otras áreas de la Ingeniería. La disponibilidad de numerosos gestores de contenido, algunos de libre distribución como *Mambo* [Paterson, 2006], *Joomla* [Graf, 2008] o *Drupal* [Mercer, 2006], y otros orientados a la docencia como *MoodleTM* [Rice, 2008], *WebCT* [Georgia Univ., 2004] o *ATutor* [Vucic, 2002], facilitan la creación de entornos constructivistas de enseñanza-aprendizaje como por ejemplo el laboratorio *WebLab* [Sanchristóbal, y otros, 2009]. La finalidad es la integración de materiales didácticos, herramientas de comunicación entre usuarios, colaboración en grupo y gestión educativa en un mismo entorno.

Si bien el concepto de laboratorio físico es un concepto tradicional y claro para toda la comunidad docente e investigadora, los conceptos de simulación, instrumento virtual, instrumento remoto, laboratorio remoto y laboratorio virtual no terminan de tener definiciones claras que los distingan. Como ejemplo, estos términos son explicados de forma distinta en [Candelas, y otros, 2005]; [Calvo, y otros, 2008]; [Dormido, y otros, 2007a]. Ya que el fin último de este trabajo de investigación es presentar un entorno de experimentación virtual y/o remoto, es necesario profundizar en sus definiciones y realizar una clasificación de las diferentes formas existentes. No

obstante, el diseño de un entorno de experimentación completo, virtual y/o remoto, no debería estar limitado a la implementación de una única forma. Fruto de este análisis y a juicio de la propia experiencia del autor y su director, se proponen las definiciones siguientes:

- a. *Instrumento virtual (IV)*. Sistema modelado con todas sus capacidades de procesado, sensores y controles contenidos en uno o más ordenadores, que permite acceso local a los recursos reales y/o simulados.
- b. *Instrumento remoto (IR)*. Instrumento virtual o físico con capacidad de comunicación a través de la red, cuya función es permitir la comunicación a distancia de los recursos físicos y/o simulados.
- c. *Laboratorio remoto (LR)*. Lugar o entorno cuya función es realizar un control sobre un sistema físico a distancia, con el objetivo de teleoperar un sistema real, realizar experimentos y acceder a los datos a través de la red para obtener medidas.
- d. *Laboratorio virtual (LV)*. Instrumento/s simulado/s contenido/s en uno o más ordenadores, conectados o no entre sí, con capacidades de gestión y/o aprendizaje de contenidos.
- e. *Laboratorio virtual y remoto (LVR)*. Sistema físico real y/o simulado accesible desde Internet con capacidades de gestión, aprendizaje de contenido y/o reservas de recursos compartidos.

No hay una metodología unificada para desarrollar y difundir laboratorios virtuales y/o remotos. Sin embargo, es posible elaborar un conjunto de rasgos básicos que deben cumplir. Este trabajo de investigación propone un diseño común y aúna los tres tipos de laboratorio (físico, virtual y remoto), reuniendo las mejores características y posibilitando la mejor enseñanza. Con objeto de poder valorar las aportaciones que realiza este trabajo al ámbito de los laboratorios virtuales y/o remotos, se muestra en las Tablas 6.1 y 6.2 una comparativa de las características y capacidades del laboratorio desarrollado (LER) respecto de un buen número de laboratorios mencionados en esta introducción.

6.3. Implicaciones Pedagógicas de los Laboratorios Virtuales

La aplicación de las nuevas tecnologías a la enseñanza para disponer de recursos existentes en la Web, ha generado nuevas formas de elevar la interactividad mediante simulaciones y accesos remotos a través de Internet. La progresiva integración de los laboratorios virtuales y remotos en las instituciones de educación, y en especial de la enseñanza en Automática, ha originado en los últimos años la aparición y el estudio de nuevas disciplinas conocidas como la Robótica pedagógica¹ o

¹ Interactuación con un robot con el fin de favorecer los procesos cognitivos.

6.3. IMPLICACIONES PEDAGÓGICAS DE LOS LABORATORIOS VIRTUALES

el *e-learning*. La unión de varios campos interdisciplinares como la Automática, Robótica o la Pedagogía, ha generado un abanico de nuevos conceptos que difuminan su significado, originando términos como laboratorios remotos, laboratorios virtuales, interactividad en el control o simulaciones basadas en web. Estos términos son amplios y ambiguos en su significado pudiendo, en ocasiones, crear incluso confusión entre los límites de su definición por los propios investigadores de estos campos.

Laboratorio	Tipo	Lenguaje	Interfaz Web	Ámbito	IVs
eMersion	LVR	LabVIEW™	Java™	Control	2
Connexions®	IV	LabVIEW™	HTML	Filtros Digitales, Señales	2
MeRLab	LVR	LabVIEW™	HTML	Mecatrónica	1
UNED	LVR	EJS, LabVIEW™	HTML	Control	4
WebLab	LVR	Java™	AJAX	Electrónica	4
Aurova	LVR	EJS, Java™ 3D	HTML	Brazos, V.Artificial, Redes	3
Robotoy	IR	Java™	AJAX	Brazos	1
Telelabs	LR	LabVIEW™	No	Brazos, Mecatrónica	5
ACT	LR	Matlab®, Simulink	HTML, Java™	Control	8
Chattanooga	LV	Matlab®, LabVIEW™	HTML	Control, Dinámica	11
LER	LVR	LabVIEW™	HTML, PHP	Robótica	3

Tabla 6. 1. Características de los laboratorios.

Laboratorio	Gestor Reservas	Gestor Educación	Gestor Contenido	Webcam
eMersion	Sí	<i>eJournal</i>	No	Sí
Connexions®	No	No	Sí	No
MeRLab	No	<i>eCampus</i> ®	No	Sí
UNED	Sí	<i>eJournal</i>	<i>AutomatL@bs</i>	Sí
WebLab	Sí	<i>Moodle</i>	<i>Joomla</i>	Sí
Aurova	Sí	<i>eJournal</i>	<i>AutomatL@bs</i>	Sí
Robotoy	No	No	No	Sí
Telelabs	Sí	No	No	Sí
ACT	No	No	No	Sí
Chattanooga	No	No	No	Sí
LER	MRBS ¹	<i>Moodle</i>	<i>Joomla</i>	Sí

Tabla 6. 2. Capacidades de los laboratorios.

El denominador común de estas disciplinas es facilitar el desarrollo de los procesos de enseñanza-aprendizaje favorecidos por diferentes factores. Entre ellos se encuentran la integración de lo teórico con lo práctico, la observación directa de fenómenos explicados habitualmente a través de teorías complejas y abstractas, la enseñanza ordenada y guiada de los procesos físicos, la participación directa y el manejo de diversos sistemas, y la interpretación y conclusión de la información recibida [Cabrera Jiménez, 1996].

La importancia de las simulaciones supone un apoyo didáctico de gran valor para comprender el comportamiento de muchos sistemas reales. De esta forma, los fenómenos físicos pueden ser representados por medio de las simulaciones reforzando los procesos cognitivos de los estudiantes. Si estas simulaciones vienen acompañadas además de mecanismos que permitan la interactividad con el usuario, la curva de aprendizaje y depuración de conceptos erróneos del estudiante se ve elevada.

LER es una iniciativa que cumple una doble función pedagógica. Por un lado, el laboratorio permite diseñar y construir sistemas robóticos en el marco de pequeños proyectos, donde los estudiantes participan en la manipulación directa de los instrumentos y herramientas. Por otro lado, la disponibilidad de un laboratorio virtual y remoto permite crear un micromundo de herramientas e instrumentos virtuales de diferentes campos pertenecientes a la Robótica, Visión artificial y Computación. Ello permite llevar hasta el estudiante representaciones de algunos fenómenos físicos del mundo que le rodea favoreciendo su aprendizaje.

6.4. Pasos para el Diseño de un Laboratorio Virtual y/o Remoto

Típicamente, la disponibilidad de un elemento físico conectado a un ordenador mediante su correspondiente software de control, representa el sistema real en el que se basan las prácticas de laboratorio. Para obtener un mayor grado de interacción con este recurso local, esté o no físicamente disponible en el laboratorio, debe diseñarse y desarrollarse un instrumento virtual que permita ejecutar un sistema simulado. Es muy importante destacar que el objetivo didáctico no sólo es el control de sistemas, sino también mejorar los conocimientos del estudiante. Por esta razón, se deben entender los conceptos teóricos y comprender el funcionamiento antes de interactuar con el sistema real. En este sentido, el concepto de instrumento virtual no debe entenderse sólo como un mero simulador, sino que el objetivo es abordar el estudio de los parámetros físicos desde diferentes puntos de vista. Para ello, el instrumento virtual debe implementar un modelo matemático completo que describa la conducta del sistema. Los controles de la interfaz virtual, ligados a las variables y ecuaciones expresadas mediante un lenguaje de programación, deben tener el aspecto necesario para interaccionar con el usuario de una forma didáctica e intuitiva. La programación de este tipo de aplicaciones se hace normalmente usando un software gráfico de alto

nivel como LabVIEWTM, Matlab[®]/Simulink o *applets* de JavaTM (ver Fig. 6.1).

La capacidad de control a distancia añadida a los instrumentos virtuales, da como resultado la implementación de un instrumento remoto. Aquí, el diseño didáctico de la interfaz de usuario no es esencial, sino que el objetivo principal es permitir al estudiante el control del sistema físico de forma remota. La comunicación a través de Internet sobre el experimento en tiempo real cobra relevancia especial, ya que permite enviar los parámetros de control y recibir el estado del sistema. La conexión de Internet entre los usuarios y el recurso remoto puede ser considerada como una nube cliente-servidor basada en redes de comunicación tipo TCP/IP. A pesar de los problemas de congestión y de los retardos no determinísticos que puedan afectar al control en tiempo real de los instrumentos, resulta ideal para ofrecer el acceso a cualquier ordenador conectado a la red [Khamis Rashwan, 2003]. La elección de esta arquitectura se debe a su uso extendido y sencillez, donde un protocolo orientado a conexión juega un papel fundamental en el éxito de la comunicación.

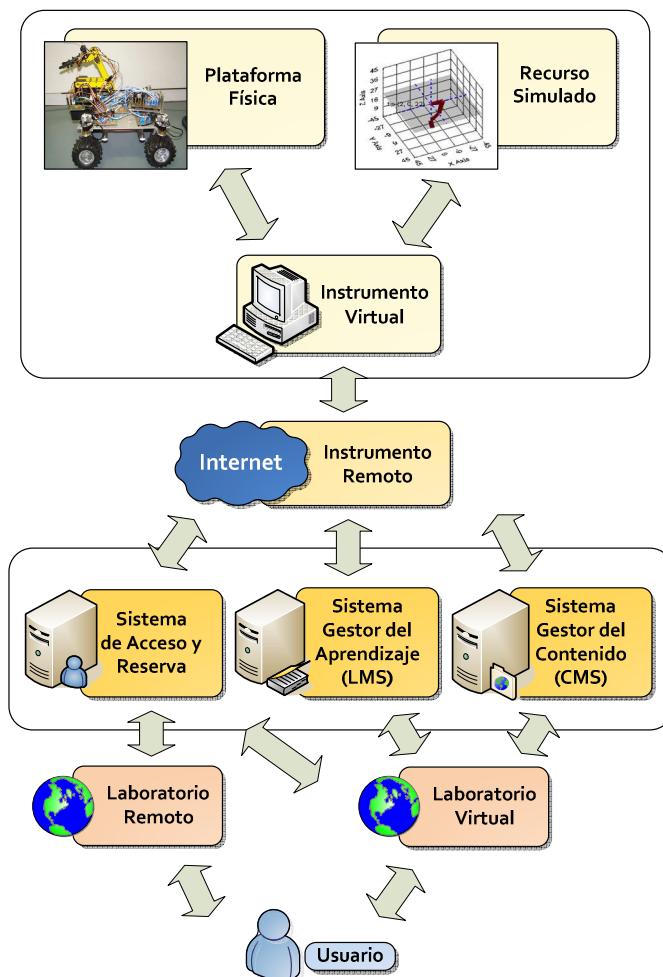


Figura 6. 1. Diagrama de diseño de un laboratorio virtual.

Ante la posibilidad de un acceso simultáneo sobre el sistema remoto por parte de un grupo múltiple de usuarios, resulta necesario crear un espacio privado que garantice la seguridad e integridad frente al mismo experimento físico. La implementación en los laboratorios remotos de los sistemas de acceso, proporciona un mecanismo de control verificado y seguro de los usuarios durante el tiempo que dure la actividad. Por otro lado, mediante los sistemas de reserva, se puede solicitar y planificar el uso de los instrumentos virtuales por un periodo de tiempo determinado, en función de la disponibilidad del usuario y del laboratorio remoto. De esta forma, se evitan restricciones en el uso de los recursos por parte de otros posibles usuarios.

El paso siguiente consiste en diseñar el entorno de aprendizaje virtual. A diferencia del concepto de laboratorio remoto, esta capa integra tanto el instrumento virtual como los materiales didácticos en un entorno basado en web. Un diseño correcto del entorno virtual orientado al contenido, integrado o apoyado mediante los recursos de aprendizaje electrónico asistido apropiados (como por ejemplo contenidos didácticos, actividades programadas o tareas en línea), permite a los usuarios disponer de laboratorios virtuales además de los tradicionales. En cuanto a la estructura y la manera en la que los contenidos se deben presentar al estudiante, éstos pueden organizarse de formas diferentes:

- Estructura lineal. Es la forma más sencilla de organizar la información. El estudiante es guiado en un único sentido, reduciendo las opciones y permitiéndole navegar únicamente hacia delante o hacia atrás.
- Estructura en árbol. Cuando los conceptos son variados y extensos en número, la información puede organizarse por temas que el alumno va explorando según sus necesidades.
- Estructura cruzada. Los enlaces a los contenidos están entrelazados y el usuario puede decidir el sentido de la navegación en función de sus inquietudes.

La infraestructura necesaria para crear un laboratorio virtual sería insuficiente sin la presencia de un sistema de gestión del contenido (CMS). Esto no es más que una aplicación de servidor desarrollada en un lenguaje de programación (PHP, XML, JavaTM, etc.), que se utiliza para la gestión y distribución de actividades formativas a través de Internet. Como una de las metas principales a seguir, la mejora de los conocimientos del alumno durante su formación requiere la existencia de un módulo de seguimiento y autoevaluación integrado con las actividades de aprendizaje (LMS). Por otro lado, para los docentes es imprescindible obtener una realimentación del rendimiento de los alumnos (test de satisfacción, resultados, opiniones, etc.). Esta completa información permite seguir, detectar y reconducir las actividades prácticas en favor de un mejor aprovechamiento. De cara a los alumnos, los ejercicios de autocomprobación (opción múltiple, verdadero-falso, etc.) permiten contrastar adecuadamente la evolución y los conocimientos adquiridos.

6.5. LER: Un Laboratorio Virtual y Remoto con Fines Educativos y de Investigación

La investigación emprendida con este trabajo surge de la iniciativa del *Grupo de Investigación Control y Robótica* (TEP-192) de la Universidad de Huelva, como parte de un proyecto educativo en marcha más amplio financiado con recursos del Grupo, Departamento y Proyectos de Innovación Docente de la propia Universidad. El objetivo final es disponer de un Laboratorio de Ensayo de Robots (LER) sobre el que experimentar con sistemas reales a distancia. El proyecto de investigación persigue varios fines, fundamentalmente educativos:

- a. Desarrollar las competencias grupales e individuales de los estudiantes a través de actividades de formación que, desarrolladas en un entorno de aprendizaje constructivista, estén incorporadas a la docencia universitaria (ver Fig. 6.2).
- b. Permitir a los alumnos practicar y mejorar los conceptos teóricos relacionados con los campos de la cinemática directa e inversa de manipuladores robóticos, cinemática de vehículos móviles, comunicaciones inalámbricas y visión artificial.
- c. Realizar la motivación del alumno mediante el uso de instrumentos virtuales y recursos de aprendizaje electrónico asistido orientados al contenido.

Para el logro de los objetivos anteriores, el desarrollo del trabajo de investigación ha requerido el paso de varias etapas. Con el objetivo final de abrir a los estudiantes e investigadores el uso de diferentes instrumentos virtuales en un laboratorio a distancia, los pilares centrales en los que se basa este trabajo son:

- Desarrollo y construcción de una plataforma multipropósito de ensayo



Figura 6. 2. Estudiantes de la UHU realizando en grupo el montaje de la plataforma robótica VANTER.

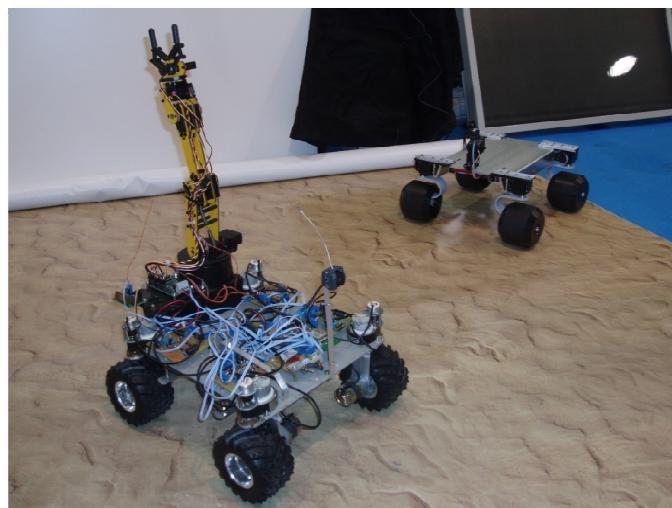


Figura 6. 3. Prototipo de vehículos VANTER-1 (izda.) y VANTER-2 (dcha.).

denominada VANTER, donde estudiantes de grado y posgrado en Ingeniería puedan probar técnicas y tecnologías en el ámbito de la Automática (ver Fig. 6.3).

- Desarrollo e implementación de instrumentos virtuales. Las aplicaciones interactivas, conectadas a los sistemas reales de laboratorio han sido programadas con LabVIEWTM para permitir un control fácil, amigable e intuitivo sobre los experimentos remotos. Como resultado, los instrumentos virtuales permiten a los usuarios comprender mejor los parámetros físicos y familiarizarse con el comportamiento de los sistemas antes de conectarse al experimento físico real.
- Diseño de actividades de formación incorporadas a la docencia universitaria. El entorno virtual contiene el material y los recursos didácticos necesarios para que los alumnos puedan participar de sus propios experimentos y estudiarlos en un entorno de aprendizaje guiado (actualmente en MoodleTM).
- Diseño de una plataforma web mediante un gestor de contenidos (actualmente en Joomla). Su diseño modular y su característica asincrónica y dinámica (foros, noticias, artículos y vídeos) permiten no sólo recabar información, sino generar contenido.
- Adecuación de un Laboratorio de Ensayo de Robots (LER) donde albergar los experimentos físicos reales y realizar actividades prácticas de laboratorio. LER está ubicado en la Escuela Politécnica Superior de la UHU.
- Integración del entorno virtual con un sistema de reservas del laboratorio remoto (basado en MRBS). El acceso verificado y seguro posibilita el uso de las herramientas de forma que no se limite a otros usuarios.
- Diseño de la infraestructura de red. Las características de los medios de comunicación y su conexión a Internet, permiten a los estudiantes reproducir las prácticas en sus hogares y compartir los recursos sin limitaciones.

6.6. Plataforma Robótica con Propósitos Educativos

La plataforma robótica multipropósito VANTER ha sido concebida como una plataforma móvil de carácter multidisciplinar, en la que han participado alumnos pertenecientes a distintas especialidades de Ingeniería. La plataforma, diseñada y construida en su totalidad (el grupo de investigación dispone de un taller mecánico dotado de las máquinas y herramientas necesarias) bajo la dirección del doctorando y su director, está compuesta por un brazo manipulador montado en un vehículo robot móvil [Andújar Márquez, y otros, 2005]; [Andújar Márquez, y otros, 2007]. Esta plataforma, por sus características de complejidad y desarrollo, lo dotan como un banco de ensayo singular, ideal para plantear prácticas multipropósito en los campos de la adquisición y procesamiento de señales, programación hardware y software, visión artificial, planificación de tareas, seguimientos de caminos, etc. Su carácter educativo ha primado incluso en el hecho de que el prototipo ha sido diseñado sobre la base de sistemas estándares abiertos.

Durante el desarrollo de la plataforma física, se ha participado en distintos Proyectos de Innovación Docente de la UHU con el fin de aplicar la investigación a la docencia. Por un lado, se dirigió un proyecto orientado a desarrollar las competencias y habilidades de los estudiantes de cara al futuro profesional, mediante el trabajo en grupo. Por otro, se dirigió un proyecto para promover la enseñanza virtual a distancia mediante laboratorios remotos. En este sentido, la implicación y financiación que aportan tanto la Universidad de Huelva como el Departamento y el Grupo de Investigación que participan en este proyecto, no sólo es importante, sino que resulta un apoyo necesario a la hora de conseguir los objetivos propuestos.

Como consecuencia, se ha creado un grupo de trabajo multidisciplinar en el que, tanto profesores como alumnos de Ingeniería de distintas especialidades y grados, han trabajado conjuntamente en la realización de una tarea común. Este proyecto de investigación se ha desarrollado en varias fases, por lo que partiendo de un objetivo global, ha sido posible su división en actividades cortas y menos complejas. Ello ha permitido ofertar PFC y TAD con una duración no superior a más de 240 horas (equivalente a 12 créditos). Hasta la fecha, se han realizado con éxito 3 TAD en la titulación de Ingeniería Técnica Informática (especialidad de Sistemas), denominados *Implementación del Protocolo I2C en Redes de Microcontroladores, Integración de un Brazo Robótico Manipulador en un Vehículo Rover y Aplicación de un Acelerómetro en un Vehículo Robótico Móvil*. En la actualidad, hay trabajando 5 alumnos becarios; hay 5 PFC en desarrollo en las titulaciones de Ingeniería Industrial, Ingeniería Informática y Posgrado (Máster Oficial de Posgrado en Ingeniería de Control, Sistemas Electrónicos e Informática Industrial); así como este trabajo de investigación.

6.7. Gestores de Reserva, Aprendizaje y Contenido

El uso de materiales didácticos, herramientas de comunicación, colaboración y gestión educativa relacionados con los instrumentos virtuales, están integrados en la plataforma de enseñanza virtual de la UHU. Esta información, ofrecida a través de *MoodleTM*, está siendo impartida en asignaturas de Robótica de diferentes Ingenierías pertenecientes al *Campus Virtual* de la UHU (ver Fig. 6.4). Tan necesario resulta disponer de una plataforma física sobre la que ensayar y experimentar, como disponer de un entorno donde situar y hacer accesibles los instrumentos virtuales conectados a Internet. La idea es recrear escenarios artificiales como terrenos, laberintos, circuitos, etc., donde se puedan diseñar y probar prácticas reales mediante instrumentos virtuales conectados al laboratorio remoto. Por ello ha sido necesario adecuar un espacio real (LER) donde albergar el experimento físico. Actualmente, la plataforma de acceso al laboratorio remoto (ver Fig. 6.5), está implementada mediante un gestor de contenidos desarrollado con *Joomla*. El sistema de reservas, basado en el código de fuente abierto GPL de MRBS, tiene como objetivo garantizar el acceso controlado a los instrumentos remotos desde Internet (ver Fig. 6.6).

En la Figura 6.7 se muestra la estructura de archivos del sistema de reservas de LER, en la que figuran los cambios más importantes realizados para adaptar el sistema MRBS a las necesidades del laboratorio virtual y/o remoto. En el archivo principal del

Figura 6. 4. Web de acceso al sistema de gestión del aprendizaje de la asignatura de Robótica.

6.7. GESTORES DE RESERVA, APRENDIZAJE Y CONTENIDO

The screenshot shows the LER website's main page. At the top, there is a banner with the LER logo and a brief description of the project. Below the banner, there is a navigation menu with links to Noticias, Artículos, Foros, and Equipo. The main content area features several news items and a sidebar with user information and links.

Figura 6. 5. Web de acceso a la plataforma de gestión de contenidos del Laboratorio de LER.

The screenshot shows the LER reservation system's interface. At the top, there is a header with the LER logo and a date selector. Below the header, there is a calendar for February, March, and April 2009. The main content area displays a detailed schedule for Wednesday, March 25, 2009, showing various reservations and activities throughout the day.

Figura 6. 6. Web de acceso al sistema de reservas de LER.

sistema de reservas se encuentran casi todas las opciones de personalización. Desde este archivo se pueden cambiar los parámetros de la base de datos, la visualización de la página principal y los datos del administrador. Mediante el archivo de funciones se muestra la cabecera de la página con diferente información, según esté registrado el usuario y disponga de más o menos permisos. Mediante el archivo de administración se tiene la posibilidad de editar y/o añadir nuevos instrumentos virtuales al sistema, así como eliminar y definir la manera en que se muestran los IVs (ver Fig. 6.8). Mediante el archivo de reservas, es posible listar todas las reservas de un usuario,

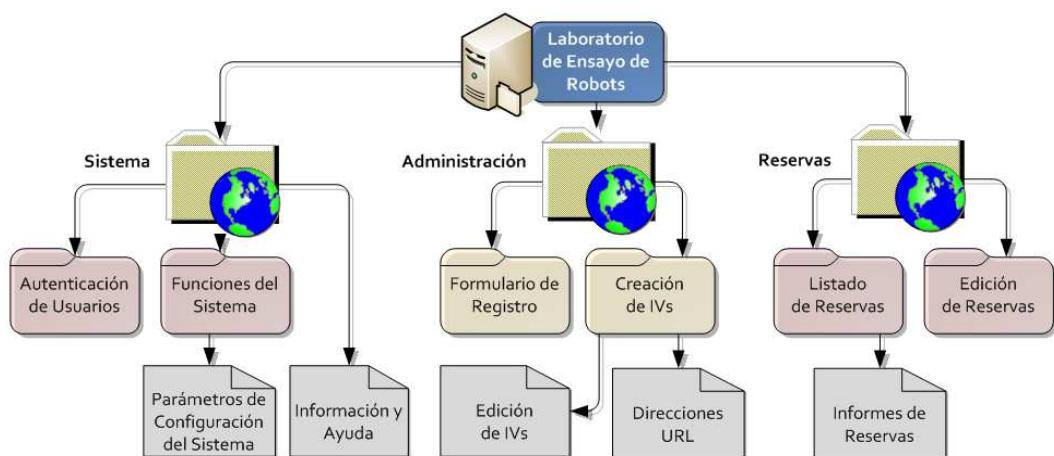


Figura 6. 7. Estructura del sistema de reservas de LER.

tanto las presentes como las realizadas con anterioridad y posterioridad (ver Fig. 6.9). En el caso de que el usuario pueda acceder en dicho momento a su reserva, se muestra un enlace que le lleva al instrumento en cuestión.

Cada página se compone principalmente de dos *frames*. El primero de ellos muestra en pantalla una cuenta atrás con el tiempo que resta de una reserva. El segundo *frame* contiene la página de cada instrumento virtual. Una vez que se inicia una sesión, el sistema envía a la computadora del usuario una *cookie*² temporal mediante una función escrita en código JavaScript para controlar el tiempo que queda de reserva. Una vez terminado ésta, la *cookie* caduca y el código obliga a la página a actualizarse, mostrando en pantalla un mensaje que indica el fin de la sesión.



Figura 6. 8. Paneles de administración y edición de reservas de LER.

² Una *cookie*, traducida literalmente como galleta o en ocasiones como huella, es un fragmento de información que se almacena en la computadora del visitante de una página web a petición del servidor de la página. Ideada por Lou Montulli, uno de los ingenieros fundadores de *Netscape Communications* en 1.994, tiene la finalidad de llevar el control de los usuarios.

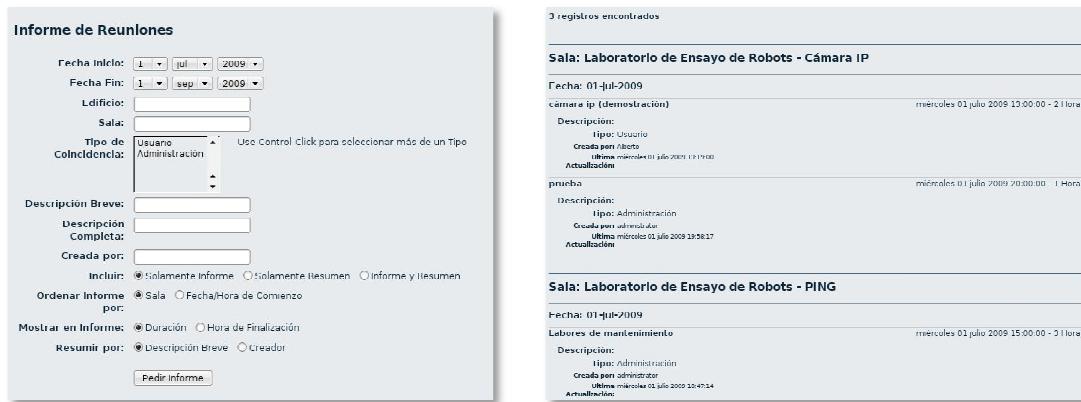


Figura 6.9. Paneles de informes y reservas de LER.

6.7.1. Infraestructura de Comunicaciones del Laboratorio

La arquitectura de comunicaciones que soporta el LER puede verse en la Figura 6.10. Ésta proporciona los elementos necesarios para el acceso a distancia de los usuarios. Resulta de especial relevancia la línea de acceso WAN a través de la red *MetroLAN*, que proporciona un ancho de banda balanceado de 2 Gbps tipo *Gigabit Ethernet*. Gracias a esta conexión de gran capacidad, es posible evitar la congestión de las comunicaciones y mejorar los retardos de control de los sistemas remotos. Siguiendo las definiciones de los laboratorios virtuales y/o remotos planteados en este trabajo de investigación, la implementación de los sistemas de LER combina estos términos en su concepción más amplia, mediante gestores de reserva, aprendizaje y contenido. Dependiendo de la ubicación de los servicios web, se encuentran configuradas diferentes políticas de seguridad restrictivas mediante varios niveles de cortafuegos. Entre los equipos de red de LER, se dispone de un router inalámbrico, un servidor *INTEL XEON E5405* de cuádruple núcleo con *Windows 2003 Server*, acceso a una base de datos *MySQL*, una cámara *pan-tilt* con zoom y 1 webcam con óptica *Carl Zeiss™*. El objetivo es disponer de un escenario real, accesible por los usuarios mediante un conjunto de direcciones IP públicas y monitorizado mediante cámaras que permitan un seguimiento visual de los experimentos.

6.7.2. Ejemplo de Uso del LER

Un ejemplo de funcionamiento y actuación en el laboratorio es el que se muestra en la Figura 6.11. En ella se representan los pasos que un usuario debe recorrer para utilizar el sistema LER. Independientemente del perfil del usuario, ya sea un estudiante de la UHU o un usuario externo, puede acceder al gestor de contenidos de forma pública (1 en la figura). El objetivo es generar y compartir el conocimiento a través de foros, noticias, memorias de PFC y TAD que los usuarios pueden aportar libremente. Para uso restringido de los alumnos del *Campus Virtual* de la UHU, se ha

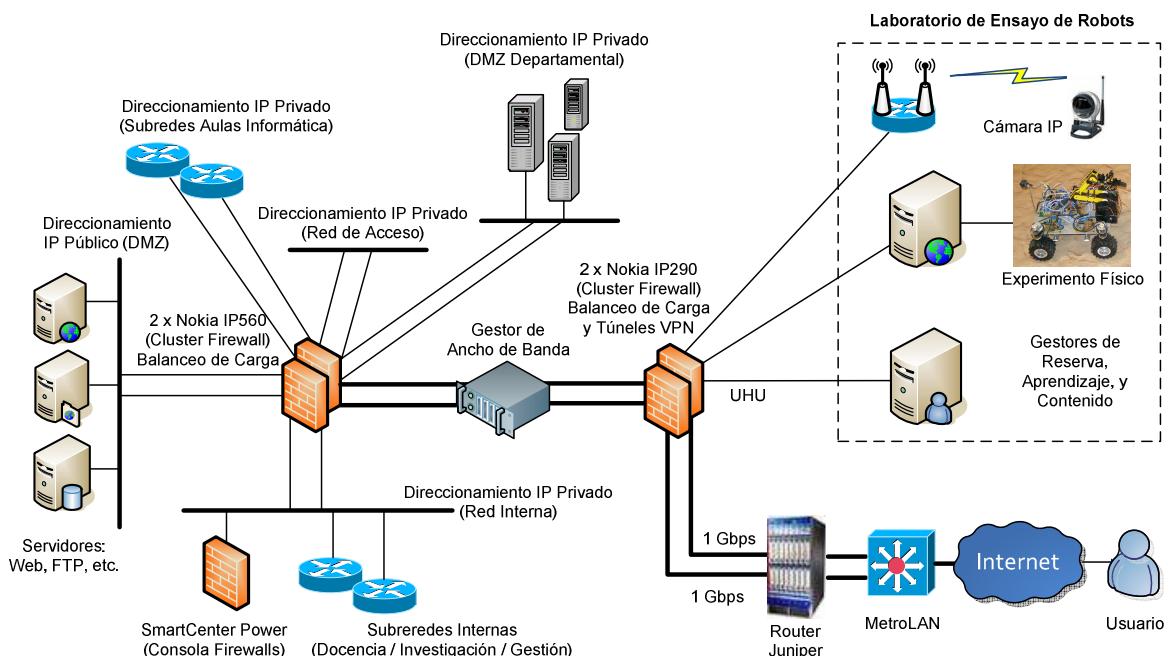


Figura 6. 10. Arquitectura de comunicaciones de LER en la UHU.

virtualizado el contenido de la asignatura de *Robótica* a través de un gestor del aprendizaje (2 en la figura). Mediante este sistema de enseñanza virtual, los estudiantes matriculados pueden acceder al contenido teórico y a las guías prácticas utilizadas durante el curso académico. Gracias a la programación de actividades, también es posible configurar pruebas de autoevaluación y utilizar herramientas de comunicación en línea con el profesor.

Otro de los módulos existentes es el sistema de gestión de reservas (3 en la figura). Si el usuario pertenece a la comunidad de la UHU, está registrado en la base de datos central (4 en la figura). En ese caso, sólo debe escribir sus datos personales y acceder al sistema MRBS con su cuenta de usuario habitual. Los alumnos de nuevo ingreso en la UHU pueden solicitar, ellos mismos, el alta de su cuenta de usuario a la Universidad. En el caso que la persona no tenga una dirección de correo de la UHU, como por ejemplo un profesor invitado, se le habilita un enlace con un formulario que debe llenar y remitirlo al departamento DIESIA. Con el visto bueno del Director del Departamento, se envía la solicitud al *Servicio de Informática Central* (SIC) de la UHU para tramitar el alta de la cuenta. Una vez que el usuario haya completado el formulario recibirá un correo a la dirección electrónica que haya introducido. En él se incluye un enlace para la activación del usuario en el sistema de reservas.

La integración de las aplicaciones de LabVIEW™ en la plataforma LER se ha realizado mediante el desarrollo de un marco común a todos los IVs, independientemente del tipo de práctica a realizar (5 en la figura). De esta forma,

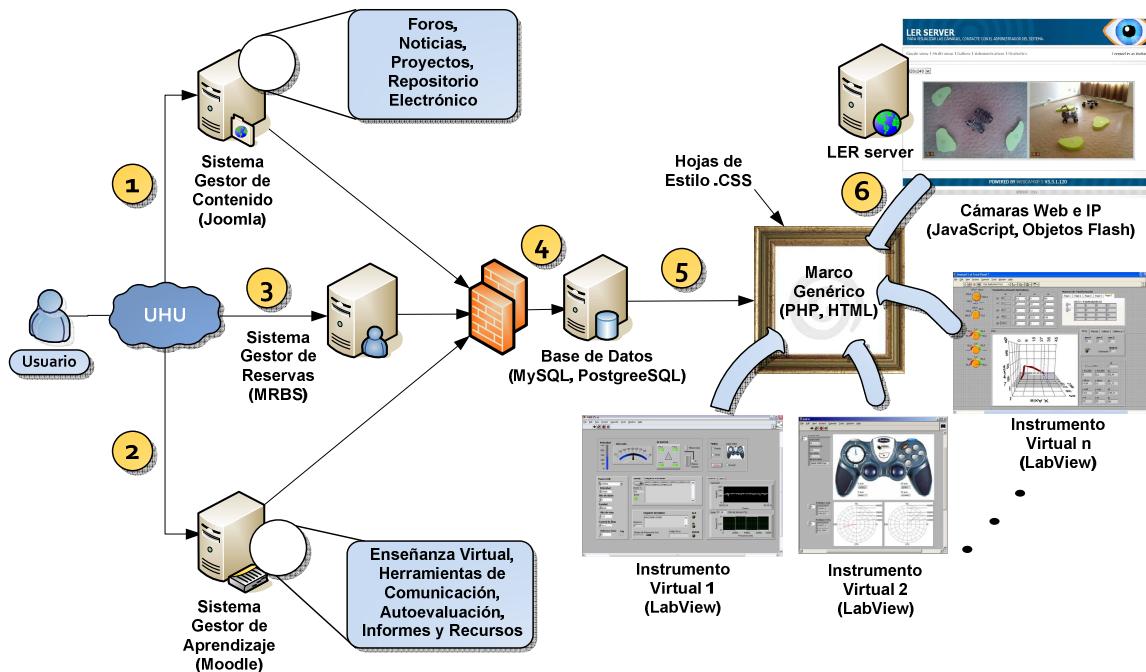


Figura 6. 11. Actuación y funcionamiento del Laboratorio de Ensayo de Robots de la UHU.

mediante una hoja de estilo embebida en una página PHP y HTML, es posible automatizar el proceso de publicación de IVs y contener distintas actividades de aprendizaje en una misma plantilla común. Este marco también se utiliza para albergar los objetos Flash y los archivos JavaScript necesarios para transmitir el flujo de imágenes del servidor de monitorización (6 en la figura). Tanto la cámara IP como la cámara web, se encuentran conectadas al servidor LER.

La persona que acceda a la página de reservas tendrá ante sí lo siguiente (ver Fig. 6.12): una cabecera donde se encuentra un enlace a la página de la Universidad de Huelva (1), un enlace a la página principal del sistema de reservas (2), la posibilidad de navegar a cualquier día del calendario mediante la selección del año, mes y día (3), o pinchar directamente sobre cualquier día (6) del almanaque (12). Asimismo, en la cabecera se encuentra un enlace hacia la ayuda básica (4) y el botón hacia la página de registro o inicio de sesión (5). Los instrumentos virtuales a los que puede acceder un usuario aparecen a la izquierda (7); pinchando sobre uno de ellos, se muestra la semana actual (11) de dicho instrumento virtual (8). A modo de planificación, por defecto la temporización se muestra dentro de las veinticuatro horas disponibles para cada día de la semana, pudiendo desplazarse entre las semanas mediante los enlaces situados a tal efecto (10). En la figura de ejemplo, se pueden ver dos reservas realizadas: una de ellas en color azul creada por un usuario (14) y otra en color verde realizada por el administrador (13), tal y como puede apreciarse en la correspondencia de colores en el punto (9).

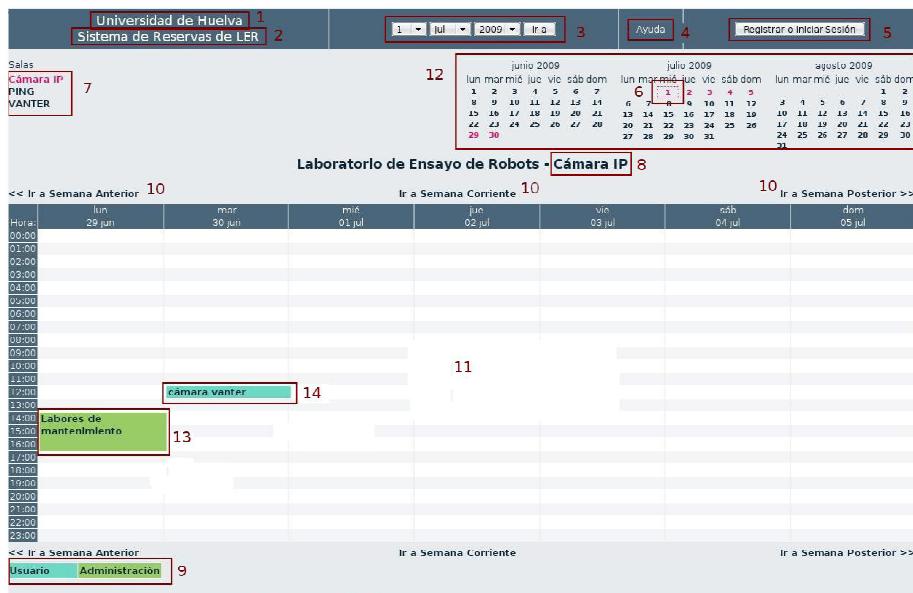


Figura 6. 12. Estructura de la ventana de reservas del LER.

Los alumnos tienen la posibilidad de navegar por el calendario, editar su perfil y acceder a los IVs durante las 24 horas, los 7 días de la semana. El sistema dispone de un formulario para poder realizar cada reserva. Existe la posibilidad de elegir el número de horas de la reserva en función de las horas de prácticas (una y media, dos y tres horas como máximo). La reserva puede elegirse de forma simultánea para otros instrumentos, se puede planificar el tipo de repetición, la fecha tope y si se desea que la reserva se repita un día determinado de la semana. El sistema podría gestionar más de 10 tipos de reservas si fuera necesario, pero por defecto, se definen 2 tipos. El tipo interno significa que la reserva sólo será asistida por empleados de mantenimiento de LER. La reserva externa es menos restrictiva y puede ser utilizada por alumnos, profesores, investigadores, etc.

6.8. Conclusiones y Comentarios Bibliográficos

En este capítulo se hace una amplia revisión de varios laboratorios virtuales y/o remotos desarrollados por universidades y grupos de investigación, haciendo especial hincapié en las herramientas de desarrollo virtual. A pesar de la variedad existente, las que más destacan son LabVIEW™ [Rae, 2004]; [Peek, y otros, 2005]; [Luther, 2006] y [Pipan, y otros, 2009], Matlab® [Henry, y otros, 2003]; [Casini, y otros, 2004] y Java™ [Sánchez, y otros, 2005a]; [Sánchez, y otros, 2005b] y [Jiménez, y otros, 2005].

Pero, ¿cómo se deben proponer las estrategias docentes bajo un entorno de aprendizaje constructivo? Quizás, los mayores referentes en la disciplina de integración de recursos *e-learning* con instrumentos virtuales interactivos sean *eMersion* [Gillet, y otros, 2005] y *AutomatL@bs* [Dormido R. , y otros, 2008]. Por ello,

en este capítulo se realiza un recorrido desde el laboratorio tradicional al laboratorio virtual, pasando por el laboratorio remoto. Se analizan los problemas asociados a la enseñanza tradicional y los riesgos asociados al uso e integración de las herramientas TIC. En el capítulo se proponen unas definiciones que pretenden ser claras y diferenciadoras de los conceptos de instrumento virtual, instrumento remoto, laboratorio virtual y laboratorio remoto. Además, aporta unas pautas mínimas a seguir para el diseño, construcción y difusión de laboratorios virtuales y/o remotos en Automática, aunque bien es cierto que también serían de aplicación en otros campos de la ciencia y la tecnología.

Como uno de los objetivos educativos a perseguir, se ha desarrollado y construido una plataforma robótica multipropósito, la cual permite ensayar y realizar prácticas reales de Automática con alumnos de Ingeniería de diferentes grados. Como caso práctico, se ha presentado un Laboratorio de Ensayo de Robots (LER). El resultado ha sido el diseño e implementación de un laboratorio virtual y remoto, con el objetivo de difundir en Internet un laboratorio con propósitos educacionales y de investigación. La web de los sistemas gestores de reserva, aprendizaje y contenido de LER se encuentra accesible en la dirección: <http://www.uhu.es/tomas.mateo/ler/>.

Entre los desarrollos futuros de LER, se están mejorando las capacidades del sistema de reserva, permitiendo una mayor granularidad respecto de los privilegios de acceso de los usuarios. Por otro lado, se está desarrollando un módulo de integración que permita realizar reservas de IVs desde *MoodleTM* hacia el sistema MRBS, gracias al desarrollo de aplicaciones auto-contenidas con el estándar SCORM.

Ya que a priori no se sabe el tipo de actividades docentes que en un futuro se pueden diseñar y, además, éstas pueden variar con el tiempo o crearse otras nuevas sobre el mismo IV, es necesario desarrollar un método sistemático —apoyado en una herramienta asistida— que facilite al profesor el diseño y elaboración de unidades didácticas. Tales tareas requieren definir qué preguntas se presentan al alumno, en qué orden se presentan, qué información está disponible en cada momento, etc. y empaquetar la aplicación en base a las reglas de SCORM para contenerlo en *MoodleTM*.

Por otro lado, se está desarrollando un sistema *front-end* que conecte al cliente con el instrumento virtual del servidor de LabVIEWTM. Esta tecnología permite a los IVs una ejecución más rápida, ya que la ejecución se realiza en el lado del cliente en lugar del servidor. Los sistemas *front-end* se pueden hacer con *applets* de JavaTM, Flash o AJAX. Sin embargo, requieren hacer algunas modificaciones en LabVIEWTM para aceptar datos en formato XML.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., & Aguilar Nieto, F. (2005). Virtual Interface for Controlling a Remote Handle Rover. *IADAT-aci2005 Conference*, (págs. 224-228).
- Andújar Márquez, J., Mateo Sanguino, T., Aguilar Nieto, F., & Chica Barrera, J. (2007). An Image Acquiring, Processing and Transfer System over Bluetooth for an Educational Robotic Platform. *Robótica 2007 - 7th Conference on Mobile Robots and Competitions*, (págs. 1-6). Albufeira (Portugal).
- Atkinson, D., & Ciuffo, D. (1998). *Robotoy - The Future of Robotics*. Recuperado el 6 de Mayo de 2010, de University of Wollongong: <http://robotoy.elec.uow.edu.au/>
- Cabrera Jiménez, O. (1996). La Robótica Pedagógica. *Soluciones Avanzadas* , Núm. 40, págs. 1-7.
- Calvo, I., Zulueta, E., Gangoiti, U., & López, J. (2008). Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas. *Ikastorratza, e-Revista de didáctica* , Núm 3, págs. 1-21.
- Candelas, F., & Moreno, J. (2005). Recursos Didácticos Basados en Internet para el Apoyo a la Enseñanza de Materias del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* , Vol. 2, Núm 2, págs. 93-101.
- Casini, M., Prattichizzo, D., & Vicino, A. (2004). The Automatic Control Telelab. A Web-based technology for Distance Learning. *IEEE Control Systems Magazine* , Vol. 24, Núm 3, págs. 36-44.
- Domínguez, M., Reguera, P., & Fuertes, J. (2005). Laboratorio Remoto para la Enseñanza de la Automática en la Universidad de León (España). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* , Vol. 2, Núm 2, págs. 36-45.
- Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sánchez, J., Dormido-Cantó, S., Farias, G., y otros. (2008). Development of a Web-based Control Laboratory for Automation Technicians: The Three Tank System. *IEEE Transactions on Education* , Vol. 51, Núm. 1, págs. 35-44.
- Dormido, S., Sánchez, J., Vargas, H., Dormido-Canto, S., Dormido, R., Duro, N., y otros. (2007a). Análisis, desarrollo y publicación de laboratorios virtuales y remotos para la enseñanza de la automática. *II Congreso Español de Informática: Simposio EIWISA*, (págs. 1-6).
- Dormido, S., Vargas, H., Sánchez, J., & Duro, N. (2007b). Using Web-based Laboratories for Control Engineering Education. *International Conference on Engineering Education*, (págs. 1-6).

- Fujii, N., & Koike, N. (2007). A New eLearning System Integrating a Top-Down eLearning and New Virtual Remote Laboratory Environments for Logic Circuit Design. *37th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conf.*, (págs. S3G-1 - S3G-6).
- Georgia Univ., S. (2004). *The Ultimate WebCT Handbook, A Practical and Pedagogical Guide to WebCT*. Pullen Library, Division of Distance & Distributed Learning.
- Gillet, D., Nguyen Ngoc, A., & Rekik, Y. (2005). Collaborative Web-based Experimentation in Flexible Engineering Education. *IEEE Transactions on Education* , Vol. 48, Núm. 4, pág. 696-704.
- Graf, H. (2008). *Building Websites with Joomla! 1.5*. Packt Publishing.
- Guzmán, J., Vargas, H., Sánchez, J., Berenguel, M., Dormido, S., Rodríguez, F., y otros. (2007). Education Research in Engineering Studies: Interactivity, Virtual and Remote Labs. En *Distance Education Research Trends*. Nova Science Publisher.
- Heinze, A., & Procter, C. (2004). Reflections on the Use of Blended Learning. *Education in a Changing Environment* (págs. 1-11). University of Salford (Salford, Reino Unido).
- Henry, J., & Zollars, R. (2003). Assessment of Remote Experiments and Local Simulations: Student Experiences, Satisfaction and Suggestions. *ASEE Annual Meeting*.
- Hoyer, H., Jochheim, A., Röhrlig, C., & Bischoff, A. (2004). A Multiuser Virtual-Reality Environment for a Tele-Operated Laboratory. *IEEE Transactions on Education* , Vol. 47, Núm 1, págs. 121-126.
- Jara, C., Candelas, F., Torres, F., Dormido, S., Esquembre, F., & Reinoso, O. (2009). Real-time Collaboration of Virtual Laboratories Through the Internet. *Computers & Education* , Núm. 52, págs. 126-140.
- Jiménez, L., Puerto, R., Reinoso, O., Fernández, C., & Ñeco, R. (2005). RECOLAB: Laboratorio Remoto de Control Utilizando Matlab y Simulink. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* , Vol. 2, Núm. 2, págs. 64-72.
- Khamis Rashwan, A. (2003). *Interacción Remota con Robots Móviles Basada en Internet*. Madrid: Universidad Carlos III.
- Luther, E. (1 de Diciembre de 2006). *Developing Interactive Simulations with the LabVIEW Player*. Recuperado el 7 de Mayo de 2010, de Rice University: <http://cnx.org/content/m14131/latest/>
- Mercer, D. (2006). *Drupal: Creating Blogs, Forums, Portals, and Community Websites*. Packt Publishing.

- Paterson, D. (2006). *Learning Mambo: A Step-by-Step Tutorial to Building Your Website*. Packt Publishing.
- Peek, C., Crisalle, O., Dépraz, S., & Gillet, D. (2005). The Virtual Control Laboratory Paradigm: Architectural Design Requirements and Realization Through a DC-Motor Example. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 21, Núm. 6, págs. 1134-1147.
- Petropoulakis, L., & Stephen, B. (2003). Resource Sharing Software for Distance Learning in Engineering Education. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 19, Núm 3, págs. 371-378.
- Pipan, M., Arh, T., & Blažič, B. (2009). Advanced eVocational Education of Mechatronic Professions. *International Journal of Education and Information Technologies*, Vol. 3, Núm. 1, págs. 12-19.
- Rae, S. (2004). Using Telerobotics for Remote Kinematics Laboratories. En *Final Year Project* (págs. 1-116). The University of Western Australia.
- Rice, W. (2008). *Moodle 1.9 E-Learning Course Development*. Packt Publishing.
- Sanchristóbal, E., Martin, S., Gil, R., Pastor, R., García-Zubia, J., Orduña, P., y otros. (2009). Learning Management System's Services and Labs: Looking for Integration through Reusability. *Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*.
- Sánchez, J., Dormido, S., & Esquembre, F. (2005a). The Learning of Control Concepts Using Interactive Tools. *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 13, Núm. 1, págs. 84-98.
- Sánchez, J., Esquembre, F., Martín, C., Dormido, S., Dormido-Cantó, R., Cantó, D., y otros. (2005b). Easy Java Simulations: An Open-Source Tool to Develop Interactive Virtual Laboratories Using MatLab/Simulink. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 21, Núm. 5, págs. 798-813.
- Torres, F., Candelas, F., Puente, S., Pomares, J., Gil, P., & Ortíz, F. (2006). Experiences with Virtual Environment and Remote Laboratory for Teaching and Learning Robotics at the University of Alicante. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 22, Núm. 4, págs. 766-776.
- Vucic, V. (2002). *ATutor Getting Started. Science, Education and Learning Freedom*. Recuperado el 28 de Febrero de 2009, de <http://eprints.rclis.org/archive/00009634/01/atutor-getting-started-final-3-1.pdf>

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Como se puede ver en el índice de contenidos, esta Tesis cubre un amplio rango de temas, que van desde la historia de la Automática antigua hasta los laboratorios virtuales y remotos, pasando por los vehículos y manipuladores robóticos. El objetivo de este último capítulo que cierra la memoria de la Tesis, es recoger las conclusiones derivadas de cada una de las investigaciones desarrolladas a lo largo de la memoria. Todos los capítulos comienzan con una breve sinopsis y finalizan con sugerencias respecto de los temas tratados. La mayoría de los capítulos contienen una revisión del estado del arte en el que se enmarcan, permitiendo comparar las capacidades y bondades de los sistemas desarrollados con otros de su campo. Por ello, cada uno de los capítulos se acompaña de una tabla que ilustra las características implementadas; de esta forma es posible conocer las novedades y aportaciones que cada sistema hace en relación con otros existentes. Para facilitar la comprensión de los temas abordados, la totalidad de los capítulos contiene numerosos ejemplos ilustrativos.

La Tesis está estructurada para que pueda utilizarse como ejemplo de un conjunto de prácticas docentes desarrolladas alrededor de la Robótica pedagógica. Los diferentes temas han sido expuestos con una profundidad suficiente como para que susciten el interés por las prácticas docentes innovadoras y constituyan un reto desde el punto de vista académico. El objetivo no ha sido tanto profundizar en los conocimientos de determinadas áreas a través de la novedad científica, sino dar a conocer líneas de investigación aplicadas a la docencia en busca, entre otras cosas, de una mejora del rendimiento del alumnado. Adicionalmente, para obtener un mayor conocimiento de las temáticas abordadas, se puede consultar la amplia bibliografía

aportada en cada capítulo. Como resultado, esta Tesis puede ser considerada en su conjunto como una serie de estrategias, que pretenden ser innovadoras, aplicadas con un enfoque educacional en cursos de Ingeniería y, en general, en otras disciplinas.

7.1. Conclusiones de la Tesis

Parece que la comunidad científica da por sentado que la Robótica es una de las disciplinas de la Automática, lo cual explica evocar los albores históricos del trabajo realizado desde esta ciencia. Ciertamente no se ha llevado a cabo un estudio histórico exhaustivo de la Automática, ni tampoco de la Robótica, sino más bien lo que se ha pretendido es resaltar lo importante que ha sido esta ciencia para el desarrollo de la humanidad. A partir de aquí se ha enmarcado el nacimiento de la Robótica, para pasar enseguida al hilo conductor de este trabajo de investigación, los laboratorios virtuales y/o remotos. De estos últimos se realiza una detallada evolución histórica hasta su revisión y puesta al día. En líneas generales, los contenidos citados ocupan el Capítulo 2 de la Tesis, el cual es obviamente bastante descriptivo.

Un aspecto a destacar del capítulo es que tras el análisis de tres fuentes concretas sobre sistemas virtuales o remotos en Internet: NASA, IJEE y CEA, se advierte su corta vida y aún escaso desarrollo, lo cual permite atisbar un gran margen de investigación y mejora. Una de las contribuciones principales de este capítulo ha sido la revisión de distintos entornos web docentes aplicados a los laboratorios remotos y virtuales. La conclusión obtenida ha sido que este paradigma ha dado lugar a la aparición de diferentes iniciativas universitarias individuales. Sin embargo, el análisis denota que la tendencia actual, tanto a nivel nacional como internacional, es la creación de redes de laboratorios virtuales y remotos (*eMersion*, *ProLEARN*, *EducaNEXT* o *AutmatL@bs*), con el objetivo de coordinar los esquemas de trabajo y contenido de la enseñanza virtual.

La revisión bibliográfica del Capítulo 2 revela, entre otras cosas, numerosos ejemplos y formas diferentes en las que puede usarse la programación y las tecnologías web para difundir instrumentos virtuales en Internet. Por último, el capítulo analiza también, indicando ventajas y desventajas, varios métodos y tecnologías de programación, dedicando especial interés a lenguajes, sistemas *middleware* y *front-end* como CGI, LabVIEW™, *applets* de Java™, EJS o AJAX.

El Capítulo 3, *VANTER: Plataforma Robótica Móvil de Uso Educativo*, está dedicado al desarrollo de una plataforma robótica de investigación. Una de las aportaciones realizadas en este capítulo ha sido la comparativa de varios robots

móviles diseñados bajo el concepto de *rover*. Del análisis realizado se deduce que en ocasiones no se tiene conciencia del enorme potencial que supone el desarrollo de proyectos realizados en un entorno educativo, donde el objetivo es innovar enseñando. No obstante, desde el punto de vista de la Robótica, quizás una de las principales aportaciones que creemos supone VANTER es la incorporación a bordo de un manipulador de 5 DOF, circunstancia que sólo comparte el 14,28% de los vehículos robóticos comparados. Por otro lado, su sistema independiente de 4 ruedas le confiere una característica de movilidad singular en su campo.

Si bien son conocidos proyectos de *rovers* de mucha mayor envergadura científica que éste, llevados a cabo en el EPFL, UCM o MIT, no es menos cierto que la práctica totalidad de ellos carecen del objetivo educacional del trabajo que se presenta. De hecho VANTER al día de hoy, ha demostrado ya ser una pieza de enorme interés en el mecanismo de enseñanza/aprendizaje de la asignatura de *Robótica* que imparte el doctorando. Su objetivo como proyecto es el de integrar en la docencia aquellos resultados derivados de la investigación realizada. Por ello, este capítulo trata de resolver algunas interrogantes: ¿Es posible ir más allá e investigar en la educación en un área como la ingeniería? ¿Existe la Robótica pedagógica como disciplina? Los propósitos educativos alcanzados con VANTER ponen de manifiesto que no sólo se trata de realizar nuestro trabajo en colaboración con alumnos, sino que es necesario establecer metodologías de trabajo que definan la manera en que deben hacerse las investigaciones que apoyen el proceso de enseñanza y aprendizaje.

En el Capítulo 4, *Instrumento Virtual para el Análisis Cinemático de Brazos Robóticos Antropomórficos*, se hace una clasificación de los manipuladores robóticos existentes, de cuyo estudio se desprende que tanto en España como en el resto de países predominan los manipuladores articulares de 5 o más grados de libertad. Por ese motivo, los IVs descritos en este capítulo se centran en el manejo de esta categoría de manipuladores robóticos. Una de las características singulares es que tanto el primer manipulador mecánico desarrollado como el brazo Lynx6 han sido montados a bordo de VANTER, con lo cual los desplazamientos del *rover* confieren a los manipuladores un nuevo grado de libertad. Esto permite cambiar continuamente el espacio de trabajo. El control de los brazos robóticos ha permitido probar distintas tecnologías y dispositivos con el objetivo de incorporar a la docencia la experiencia obtenida. Entre los ensayos realizados —que han dado lugar a la actual configuración de los IVs de VANTER y 3D-RAS que conforman el laboratorio LER objeto de esta Tesis— están las tarjetas de adquisición de datos, controladores I2C de servomotores, transceptores UHF, comunicaciones Bluetooth e implementaciones con EJS (la

integración de IVs y *applets* de JavaTM se discutirá con mayor amplitud en el Apartado 7.3 denominado *Desarrollos Futuros de esta Tesis*).

La principal aportación de este capítulo es el desarrollo del instrumento virtual 3D-RAS. De la comparativa con otros entornos de simulación educacionales se han obtenido dos tablas de especial interés. En ellas se ha podido comprobar que las herramientas disponibles actualmente difieren en cuanto a los conceptos cinemáticos sobre los que versan. Del análisis se desprende que las capacidades que diferencian a 3D-RAS sobre el resto de herramientas son principalmente dos: por un lado, el 77,7% no disponen de la capacidad de teleoperar un brazo real como el Lynx6 y, por otro, el 55,5% de las herramientas utilizan los comandos como órdenes de entrada a la aplicación; esto implica que los usuarios requieran ciertas nociones de programación para configurar y ejecutar las simulaciones. Otra de las principales aportaciones que sobresalen respecto de otras herramientas ha sido el desarrollo de dos subIVs dedicados a la simulación 3D del espacio de trabajo directo e inverso de manipuladores. Por supuesto, existen investigaciones al respecto aplicadas tanto a manipuladores serie como a otras configuraciones paralelas y redundantes, pero hasta donde se conoce los espacios de trabajo 3D no forman parte de herramientas de simulación adecuadas a un uso educacional. Por último, este capítulo aporta ejemplos de un buen número de manipuladores robóticos industriales entre 3 DOF y 5 DOF que han servido para validar las capacidades genéricas de simulación.

El Capítulo 5, *Instrumento Virtual para la Planificación de Trayectorias de Brazos Robóticos Antropomórficos*, se caracteriza por tener dos partes claramente diferenciadas: la primera de ellas completa la descripción de 3D-RAS con dos IVs dedicados a la planificación de trayectorias de superficie y volumen, y la segunda está dedicada a validar los aspectos de enseñanza y aprendizaje de todos los IVs que componen 3D-RAS. Una de las aportaciones realizadas en este capítulo es la comparativa respecto de otras herramientas de planificación de trayectorias existentes. Como conclusiones, se observa que la mitad de los simuladores mencionados en la introducción del capítulo comparten el uso de Matlab[®] como lenguaje de programación. La consecuencia del uso que de este lenguaje hace que la mayoría de los simuladores analizados implementen métodos cinemáticos basados en ecuaciones matriciales. Respecto de la planificación de trayectorias, una gran parte de los simuladores implementan técnicas de interpolación de puntos de tipo rectilíneo o curvilíneo mediante matrices, definidas en algunos casos en un espacio planar 2D. Una de las principales contribuciones que creemos que este capítulo hace a la Robótica de manipuladores es que se presenta un método alternativo para generar trayectorias abiertas y cerradas mediante la descripción analítica de superficies y volúmenes.

Mediante los resultados experimentales se ha demostrado una de las posibles aplicaciones prácticas de 3D-RAS, en la que a modo de ejemplo se ilustra la trayectoria a seguir sobre un cordón de soldadura en la unión de dos tubos perpendiculares.

La principal conclusión a la que puede llegarse es que, gracias a la naturaleza visual de 3D-RAS, se facilita el aprendizaje de manipuladores en usuarios con bajos conocimientos de partida en Robótica. Mediante la encuesta aportada al final de este capítulo, queda demostrado que estos conceptos son afianzados y favorecidos por el uso de un instrumento virtual, valorando los encuestados en mayor medida su facilidad de uso e interactividad. Este hecho está en contraposición con los simuladores mencionados al principio de este capítulo, en los cuales se ha podido comprobar que el 75% de las herramientas de simulación carecen de una interfaz gráfica de usuario. Otra de las conclusiones alcanzadas con la encuesta —que valida uno de los objetivos perseguidos por esta Tesis— es que una buena parte de los estudiantes utilizaron 3D-RAS en su hogar como herramienta de apoyo al estudio, hecho que no es posible en aquellas prácticas de laboratorio en las que se requiere el uso de manipuladores reales.

En el Capítulo 6, *Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico*, se realiza una amplia revisión sobre las formas de acceso a los sistemas físicos de un laboratorio universitario, tanto remoto o virtual como de forma combinada. Debido a que uno de los pilares centrales sobre los que se construye esta Tesis es el de aumentar el rendimiento del alumnado, tras el análisis de las ventajas y desventajas de las TIC a disposición de la enseñanza práctica, se matiza la necesidad de ordenación y adecuación de los sistemas *e-learning* y *B-learning*. Como consecuencia de las reseñas bibliográficas consultadas aquí, se llega a la conclusión de que no hay una metodología unificada para desarrollar y divulgar laboratorios en la web. Esta circunstancia se evidencia por la variedad de definiciones encontradas entorno a los conceptos de simulación, instrumento virtual, instrumento remoto, laboratorio remoto y laboratorio virtual. Por ello, una de las contribuciones que se hacen en este capítulo es la propuesta de unas definiciones distinguidas y clarificadoras de estos términos. A modo de ejemplo ilustrativo aportado a este campo de investigación, se describen aquí los pasos necesarios para el diseño normalizado de laboratorios con acceso a Internet. Del estudio de las pautas a seguir para disponer de un entorno de experimentación completo en la web, se expone la necesidad de tener un conjunto de rasgos básicos y comunes. Los elementos requeridos deberían comprender, de forma individual o conjunta, un sistema de acceso y reservas (MRBS), un sistema gestor del aprendizaje (LMS) y un sistema gestor del contenido (CMS). Por ello, este capítulo finaliza con su

principal objetivo cumplido; la descripción de la infraestructura y el ejemplo de uso de un proyecto educativo y de investigación: el Laboratorio de Ensayo de Robots (LER).

La Tesis se cierra con dos apéndices. El *Apéndice A* describe la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg para 8 modelos distintos de manipuladores robóticos probados. Las representaciones son un ejemplo de las capacidades genéricas de 3D-RAS, las cuales permiten la simulación de brazos robóticos con 3, 4 y 5 DOF. El *Apéndice B* describe la forma de expresión de las funciones utilizadas por los diferentes instrumentos virtuales de 3D-RAS, ofreciendo al usuario la posibilidad de descargar gratuitamente la herramienta y experimentar de forma personal con los ejemplos disponibles en los Capítulos 4 y 5.

7.2. Repercusión de la Tesis

La ambivalencia científica y educacional del prototipo robótico VANTER ha propiciado el interés en el proyecto de muy diversos medios de comunicación. Ya desde sus inicios reflejaron los primeros avances y pretensiones algunos medios de prensa como *El País*, *Huelva Información* o el *Ministerio de Relaciones Exteriores* francés, los cuales se hicieron eco de los desarrollos iniciales del vehículo robótico [Perruchas, 2005], [Vallellano, 2005], [Nogales, 2005] y [UHU, 2005]. Conforme se realizaron nuevos avances en el prototipo, surgieron nuevas noticias de la mano del *Diario Sur* de Málaga o *Andalucía Investiga* [García Orta, 2008] y [Gálvez, 2008]. A principios del año 2.009, *Canal Sur Andalucía* hizo un reportaje para los informativos de esta cadena de radiotelevisión. Por otro lado, además de la participación de VANTER en sucesivas *Semana de la Ciencia y Tecnología* desde el año 2.005 (ver Capítulo 1), el vehículo robótico estuvo expuesto en la *IV Feria Empresarial y Tecnológica de Huelva*, celebrada en el recinto Puerto Sur entre el 5 y el 8 de Marzo de 2.009. Esta feria contó con la participación de la Universidad de Huelva, el grupo de investigación TEP-192, *Control y Robótica*, y la spin-off *OnuRobotics* entre otras. Un video de este evento puede verse en Internet¹.

Ya que el objeto de esta Tesis está enmarcado en el campo de la educación en Ingeniería, los diferentes desarrollos presentados en los Capítulos 3 a 5 disponen de videos de apoyo a la docencia. Los videos facilitan la divulgación de aplicaciones de Robótica y el manejo de los instrumentos virtuales, pero es necesario disponer de datos que demuestren su utilidad. Un medio de monitorizar los lugares desde los que están siendo reproducidas las grabaciones y comprobar su rendimiento es a través de *YouTube*. La herramienta denominada *Insight*, es una funcionalidad pensada para que

¹ Disponible en http://www.youtube.com/watch?v=LDKD2fEOj_E

las personas que dispongan de una cuenta puedan realizar análisis internos y generar informes que contengan estadísticas detalladas sobre los vídeos. Su capacidad posibilita la representación —en un mapa con distintas regiones geográficas— de la actividad de reproducción de los vídeos y la interacción mediante una línea de tiempo. También permite comparar la popularidad relativa de los vídeos en una determinada región con la de todos los demás vídeos de esa región y obtener un desglose de la forma en la que se llega hasta los vídeos. Por ejemplo, mediante búsquedas, mensajes de correo electrónico, inserciones URL, etc.

Como resultados significativos reflejados en el Capítulo 3, el video de VANTER² ha recibido un total de 1.474 visitas desde el 15/02/08 al 05/05/10, llegando en ocasiones a recibir hasta 40 reproducciones diarias. La popularidad por regiones muestra que los países de origen que principalmente han visitado la web han sido España, México y la costa Oeste de Sudamérica. Pero, ¿cómo encuentran los usuarios los vídeos de VANTER? El 7,3 % de las reproducciones se realizaron a través de los vídeos embebidos en la web de la UHU. El 38,5 % pertenece a visitas realizadas a través del buscador de YouTube, el 1,6 % a través del buscador de Google, el 1,3 % a través de otros buscadores y el 32,1 % a través de la búsqueda de vídeos relacionados con Robótica. El resto (14,1 %) corresponden a enlaces sin referencia; esto ocurre cuando los vídeos se comparten como, por ejemplo, cuando un usuario hace clic en un enlace al vídeo desde una aplicación de mensajería instantánea, de correo electrónico o copia y pega la URL del vídeo en la barra de direcciones del navegador.

Las gráficas de la Figura 7.1 muestran el Intervalo de edad (izda.) y sexo (dcha.) de todos los grupos de usuarios. En cuanto a la atención de la audiencia, la Figura 7.2 muestra los aumentos y disminuciones en comparación con otros vídeos de duración similar. La atención de la audiencia es una medida general de la capacidad del vídeo de retener a la audiencia y cuanto mayor es la línea del gráfico, más éxito tiene el vídeo.

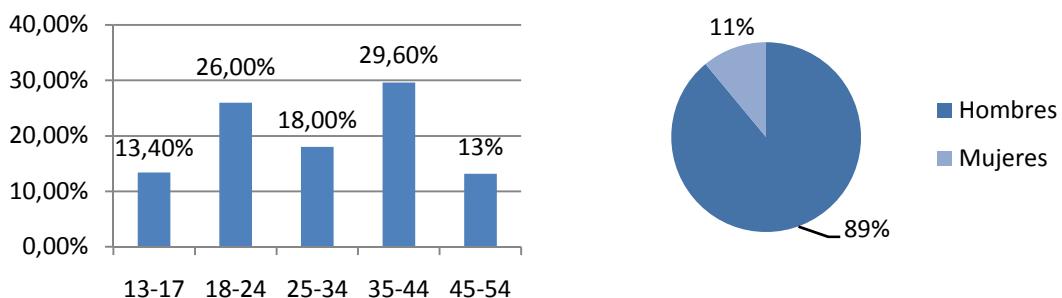


Figura 7. 1. Datos demográficos de la audiencia del video de VANTER.

² VANTER, disponible en <http://www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/vanter.htm>



Figura 7.2. Atención de la audiencia del video de VANTER.

Esto es, muy pocos usuarios lo cierran y es posible que también rebobinen la reproducción para volver a ver ese instante del vídeo. Este momento, reflejado en la Figura 7.2, coincide con la puesta en marcha de VANTER en el suelo durante las primeras pruebas en el laboratorio de investigación.

Como resultados trascendentales en relación a los desarrollos presentados en el Capítulo 4, el vídeo del primer brazo robótico mecánico (ver Fig. 7.3) ha recibido un total de 5.476 visitas desde el 19/09/07 al 05/05/10, llegando en ocasiones a tener hasta 23 reproducciones diarias. El dato de la popularidad por regiones arroja que el mayor interés lo han mostrado los países de habla hispana. El 32,1 % de las reproducciones se realizaron a través de la búsqueda de vídeos relacionados con Robótica, el 18,9 % pertenece a búsquedas de palabras clave —como brazo, robot, manipulador o pinza robótica— realizadas a través del buscador de YouTube. El 2,8 % a través del buscador de Google, el 1,3 % a través de otros buscadores y el 2,3 % de las reproducciones se realizaron a través de enlaces externos como la UHU. En cuanto a los datos demográficos, los resultados son similares a los reflejados en la Figura 7.1. Un dato a destacar en este vídeo es que el 13,3% y el 6,7% del total de los visitantes



Figura 7.3. Atención de la audiencia del video del primer manipulador mecánico.

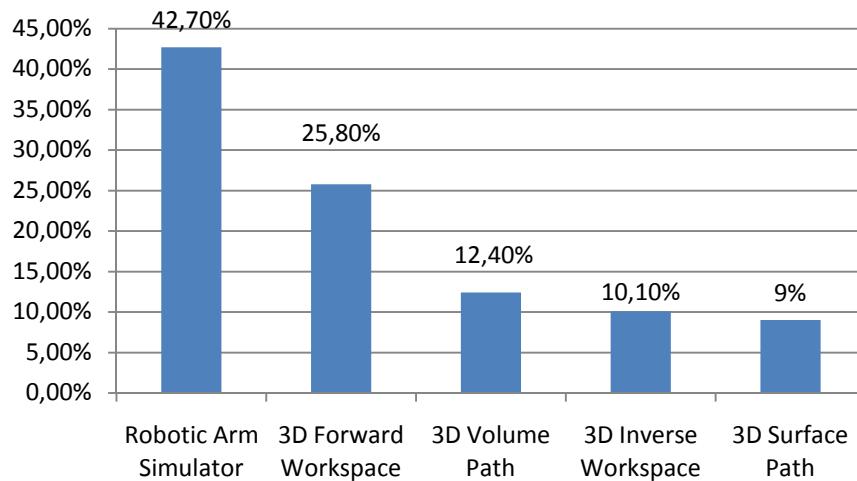


Figura 7. 4. Porcentaje del total de reproducciones de los videos de 3D-RAS.

—correspondiente a EEUU y Noruega— han marcado este video como favorito o lo han comentado en alguna ocasión. En cuanto a la atención de la audiencia, la Fig. 7.3 muestra que el momento más interesante coincide cuando el brazo mecánico recoge una muestra sólida del suelo y la deposita en un contenedor.

La Figura 7.4 muestra los resultados afines al conjunto de vídeos de apoyo docente sobre el funcionamiento de 3D-RAS desarrollados en los Capítulos 4 y 5. El número de reproducciones totales en un periodo de un año —comprendido entre el 09/05/09 y el 28/04/10— es de 289. De todos, el más preferido por los usuarios es el vídeo explicativo del instrumento virtual *Robotic Arm Simulator* (ver Fig. 7.4). El análisis de los países indica que la popularidad de los vídeos de 3D-RAS es variado, siendo mayor en España, Kenia, Colombia, Méjico, Malasia, Argentina, Nueva Zelanda, Turquía, Perú y Jordania (ver Fig. 7.5). Como dato comparativo, en España se han contabilizado un total de 89 reproducciones. Pero, ¿cómo llegan los usuarios hasta los vídeos de 3D-RAS? El 55,6 % de las reproducciones se realizaron a través de los vídeos



Figura 7. 5. Reproducciones totales de los videos de 3D-RAS.

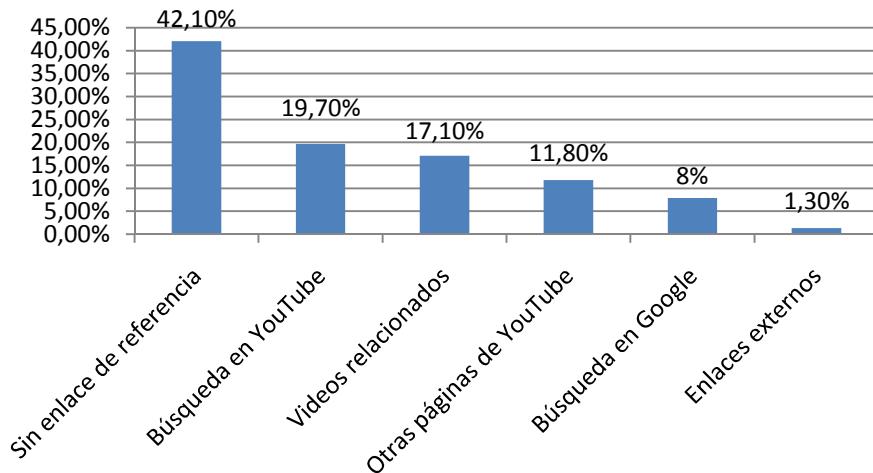


Figura 7. 6. Porcentaje del total de búsquedas de los videos de 3D-RAS.

embebidos en la web de la UHU y el 44,4 % se realizaron directamente a través de la web de YouTube. De entre estas últimas reproducciones, el 42,1 % corresponden a enlaces sin referencia. El 19,7 % pertenece a visitas realizadas a través del buscador de YouTube, el 7,9 % a través del buscador de Google, el 1,3 % a través de otros buscadores y el 17,1 % a través de la búsqueda de vídeos relacionados con Robótica (ver Fig. 7.6).

7.3. Desarrollos Futuros de la Tesis

Lejos de considerar la presente Tesis como una investigación acotada sobre ciertos temas particulares aquí tratados, existen diferentes líneas de desarrollo abiertas hacia futuras investigaciones. Debido a que los capítulos expuestos tratan temas diversos como la Robótica móvil, manipuladores robóticos o laboratorios virtuales y/o remotos, actualmente hay abiertas líneas de trabajo de gran interés en cada uno de los capítulos discutidos.

Así por ejemplo, en el Capítulo 3 denominado *VANTER: Plataforma Robótica Móvil de Uso Educativo*, una de las líneas de trabajo actuales está orientada al estudio del modelo cinemático y dinámico de VANTER. Ello abre un nuevo abanico de posibilidades futuras ya que, como es sabido, la obtención del modelo cinemático directo e inverso permite implementar técnicas de planificación de trayectorias y tareas autónomas. De igual forma, la obtención de un sistema de transferencia en bucle cerrado permitirá estudiar los efectos que las perturbaciones externas, tales como cargas u obstáculos, ejerzan sobre el rover.

Por otro lado, la experiencia conseguida con el uso de señales UHF para el control remoto del vehículo VANTER, ha demostrado ser uno de los puntos críticos a resolver. En este sentido, el uso de tecnologías con esquemas de transmisión de espectro ensanchado —como DSSS en IEEE 802.11b, OFDM en IEEE 802.11n o MIMO en IEEE 802.11n— u otras también robustas como el esquema de saltos en frecuencia —FHSS en Bluetooth v2.1+EDR— permitirá controlar el vehículo con una mayor fiabilidad e inmunidad a las interferencias EMC. Como beneficio adicional, el ancho de banda mayor permitirá investigar sobre técnicas de visión artificial aplicadas a sistemas remotos.

Tras la experimentación con VANTER se proponen otros trabajos pendientes. Éstos tienen como objetivo mejorar la autonomía mediante un nuevo sistema de gestión de energía, mejorar la sincronización de movimientos del vehículo o estudiar el uso de otros dispositivos de interacción remota tales como mandos inalámbricos y dispositivos de interfaz haptica. Por otro lado, VANTER es un sistema aún en desarrollo, hecho que ha favorecido la construcción de distintos prototipos y versiones de la plataforma robótica reflejados en esta Tesis. Como consecuencia, una de las posibles investigaciones futuras que se dejan abiertas es la coordinación de vehículos remotos con el objetivo de realizar tareas de cooperación.

Los desarrollos conjuntos a realizar en los Capítulos 4, *Instrumento Virtual para el Análisis Cinemático de Brazos Robóticos Antropomórficos* y 5, *Instrumento Virtual para la Planificación de Trayectorias de Brazos Robóticos Antropomórficos*, están dirigidos a mejorar las capacidades y funciones de 3D-RAS. Las posibilidades planteadas son el aumento del número de grados de libertad que se puedan simular, la vista CAD de los manipuladores, la interacción con objetos 3D de su entorno o la grabación de las escenas simuladas.

Respecto del algoritmo del espacio de trabajo directo presentado aquí, se propone la reducción del coste computacional mediante la implementación de métodos no heurísticos o pseudo-exhaustivos. Por otro lado, un aspecto relacionado que no ha sido abordado es la estimación del volumen de un manipulador, útil para obtener de una forma óptima y/o complementaria el espacio de trabajo alcanzable de un robot.

Dependiendo de las posibilidades de éxito y demanda que 3D-RAS tenga en el futuro, se propone como posibles desarrollos la posibilidad de simular otras configuraciones de robot basadas en manipuladores cartesianos, cilíndricos, polares, SCARA y/o paralelos. Debido a que las operaciones con matrices de transformación homogénea basadas en el método D-H no ofrecen un método inverso sistemático, el

problema de la cinemática inversa ha sido resuelto mediante un modelo geométrico. Como consecuencia de la dependencia de la configuración física del manipulador robótico, este aspecto puede ser mejorado y abordado de forma genérica mediante la implementación de otros métodos cinemáticos como los Cuaternios.

Otra de las líneas propuestas es la implementación de métodos dinámicos como los Jacobianos, Lagrange o la formulación recursiva de Newton-Euler. Estas líneas de investigación, objeto quizás de otra Tesis, permitirían abordar el comportamiento de brazos robóticos a través del estudio de configuraciones singulares, control de actuadores y perfiles de velocidad o aceleración. Además, la implementación de funciones de control cinemático serviría para fijar la trayectoria de puntos que las articulaciones de un manipulador deben seguir en función del tiempo. En este sentido, para obtener una experimentación refrendada, las pruebas podrían ser validadas contra medidas reales obtenidas de los propios manipuladores físicos.

En cuanto a los objetivos educacionales de 3D-RAS todavía es pronto para obtener unos resultados determinantes, por lo que cabe mencionar las siguientes actuaciones. Primeramente, el aumento del número de encuestados —tanto profesores como alumnos— permitirá una valoración mejor de 3D-RAS que la obtenida en los dos cursos académicos en los que este IV ha sido utilizado. En segundo lugar, la validación respecto de usuarios que dispongan de mayores conocimientos iniciales en Robótica, permitirá validar la utilidad del instrumento virtual desde un punto de vista científico.

En el Capítulo 6, *Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un Caso Práctico*, LER ha resultado ser un laboratorio con prometedoras perspectivas de convertirse en una herramienta de utilidad para la docencia. Sin embargo, LER está aún en un grado inicial de desarrollo y quedan muchas actuaciones que realizar con el objeto de convertirlo en un laboratorio a distancia flexible, escalable y suficientemente probado. Para mejorarlo, actualmente se están llevando a cabo varias labores. Por un lado, se está aumentando el número de IVs de LER con el objetivo de abarcar otros campos de la Ingeniería, tales como la visión artificial, las redes de datos o la arquitectura de computadores. Por otro lado, se está perfeccionando el sistema de reservas con una nueva modificación de MRBS que permita un mayor control de los grupos de usuarios.

En otro sentido, ya que el fin último de esta Tesis es el de integrar las prácticas virtuales y/o remotas en la docencia, actualmente existen dos líneas de trabajo en desarrollo cuyos resultados esperan ver su luz próximamente. El primero de ellos, ha sido iniciado tras la puesta en marcha de los primeros instrumentos virtuales de LER.

La experiencia surgida hasta el momento ha demostrado que, aunque LabVIEW™ es una excelente herramienta de programación para el control de instrumentos reales, sin embargo alcanza una baja interacción con los sistemas remotos. El hecho es que LabVIEW™ no resulta ser una herramienta recomendable cuando se quieren distribuir pesados y complejos IVs accesibles desde Internet. La conclusión que se deriva es que la correcta elección de las tecnologías de comunicación tiene un papel fundamental en la continuidad de la comunicación con los sistemas remotos. Tras la experimentación llevada a cabo con otras aplicaciones mencionadas en esta Tesis —como EJS y *JIL Server*— que mejoran la interactividad en el lado del cliente, la solución que se está desarrollando actualmente es la implementación de un sistema *front-end* asíncrono. El segundo de los objetivos perseguidos a corto plazo, es la implementación de un método sistemático para desarrollar aplicaciones auto-contenidas. De esta forma, la aplicación de estándares permitirá la integración de IVs en el Campus Virtual de la UHU. La meta es diseñar un asistente que permita empaquetar IVs de forma genérica con la idea de ayudar al profesor en la elaboración de unidades didácticas, contenido electrónico o tests de autocomprobación entre otros servicios.

Por último, esta Tesis no ha pretendido estar dirigida hacia los sistemas *e-learning* o hacer una revisión definitiva de los mismos, sino más bien una aportación humilde a los laboratorios virtuales y/o remotos de uso docente. Por eso, una interesante línea de investigación que puede ser continuada podría estar centrada en explorar los sistemas de aprendizaje basados en las TIC, los estándares existentes como QTI, IMS, *DocBook*, XSLT, y el uso de algunas herramientas como LORS o *eXeLearning*. De igual forma, en esta Tesis no se han abordado los problemas asociados con el uso de una infraestructura pública para utilizar recursos privados. En este sentido, otra línea de investigación muy apta que se deja abierta, estaría dirigida a abordar los problemas de congestión y los retardos no determinísticos que pueden afectar al control en tiempo real de instrumentos a través de Internet.

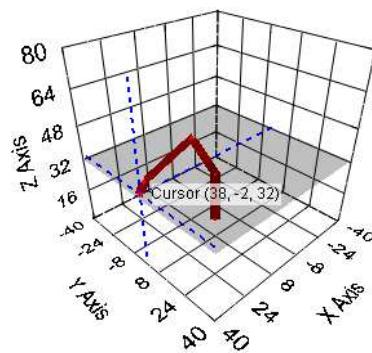
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gálvez, J. (20 de Abril de 2008). *El ordenador es el Mando*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de Diario Sur de Málaga: http://www.uhu.es/tomas.mateo/vanter/Diario_Sur_Malaga.pdf
- García Orta, J. (11 de Abril de 2008). *Tecnología Onubense con Base en la NASA*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de Andalucía Investiga: <http://www.andaluciainvestiga.com/espanol/noticias/7/6140.asp>
- Nogales, P. (9 de Mayo de 2005). La Politécnica, testigo del nacimiento de un Robot. *Huelva Información*, pág. 19.
- Perruchas, F. (5 de Mayo de 2005). *Une équipe universitaire de Huelva construit un robot basé sur un prototype de la NASA*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de Ministère des Affaires Étrangères et Européennes: <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/28804.htm>
- UHU. (13 de Mayo de 2005). *UHU al Día (Univ. de Huelva)*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de <http://www.uhualdia.net/uwu/entrevistas.php?en=42>
- Vallellano, L. (24 de Mayo de 2005). *Un equipo universitario de Huelva construye un robot basado en un prototipo de la Nasa*. Recuperado el 5 de Mayo de 2010, de El País: http://www.elpais.com/articulo/andalucia/equipo/universitario/Huelva/construye/robot/basado/prototipo/Nasa/elpeputec/20050524elpand_38/Tes

APÉNDICE A.
TABLAS DE PARÁMETROS DENAVIT-HARTENBERG

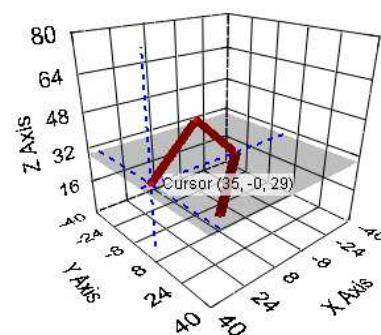
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	25,4	0	90°
$\theta_2 +90^\circ$	0	25,4	0°
$\theta_3 -90^\circ$	0	25,4	0°
$\theta_4 -90^\circ$	0	0	-90°
θ_5	0	5,1	0°

Brazo robótico A255.



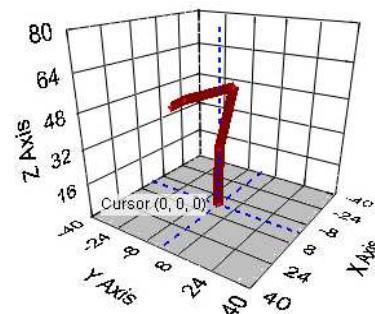
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
$\theta_1 +90^\circ$	0	0	-90°
$\theta_2 -180^\circ$	0	30	0°
θ_3	0	30	0°
θ_4	0	30	0°
θ_5	0	0	0°

Brazo biónico de 3 DOF.



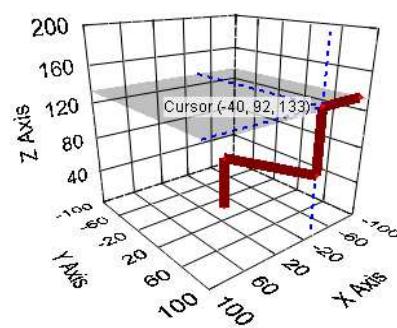
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	28	0	90°
$\theta_2 +90^\circ$	0	28,5	0°
θ_3	0	21	0°
θ_4	0	7	0°
θ_5	0	0	0°

Brazo robótico Denso VP Series.



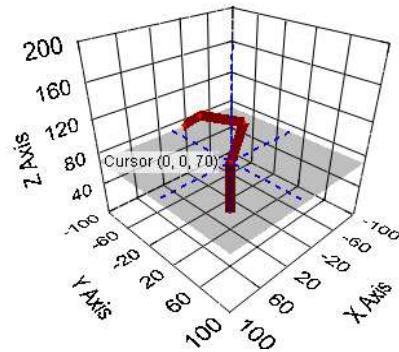
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	61,5	0	-90°
θ_2	0	100,5	90°
θ_3	70,5	0	90°
θ_4	0	0	-90°
θ_5	35	0	90°

Brazo robótico IRB2400.



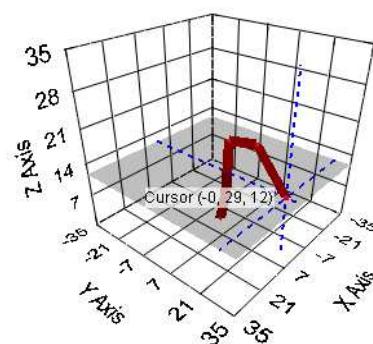
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	70	0	90°
$\theta_2 +90^\circ$	0	45	0°
$\theta_3 -90^\circ$	0	67	0°
θ_4	0	20	0°
θ_5	0	0	0°

Brazo robótico IRB-6.



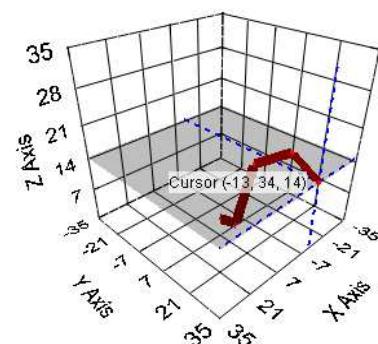
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	6,5	2,5	90°
$\theta_2 +90^\circ$	0	12	0°
$\theta_3 -90^\circ$	0	12	0°
θ_4	0	15,5	-90°
θ_5	0	0	0°

Brazo robótico Lynx6.



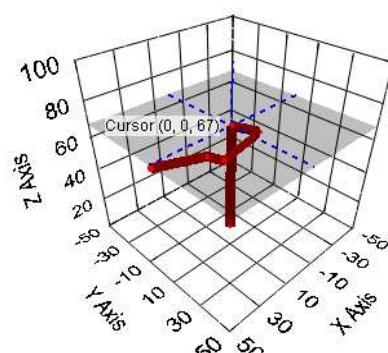
θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	0	6,8	90°
$\theta_2 +90^\circ$	0	16	0°
$\theta_3 -90^\circ$	0	13,8	0°
$\theta_4 -90^\circ$	0	11,3	-90°
θ_5	0	0	90°

Brazo robótico Pioneer 2.



θ_i	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i
θ_1	67	0	90°
θ_2	-15	0	0°
θ_3	0	43,18	0°
θ_4	7,5	0	180°
θ_5	0	43,18	-90°

Brazo robótico PUMA 560.



APÉNDICE B.
EXPRESIONES DEL NODO DE FUNCIONES

APÉNDICE B

La lista siguiente contiene los nombres de las funciones y sus descripciones. Todos los nombres de la función deben expresarse en minúscula. También pueden usarse operadores y la constante *pi* en el campo de la ecuación.

Las expresiones del nodo de funciones podrían devolver un valor distinto a funciones con el mismo nombre utilizadas en Microsoft Excel, Xmath, Matlab® u otros entornos matemáticos basados en texto.

Función	Función Correspondiente en LabVIEW™	Descripción
<code>abs(x)</code>	Valor absoluto	Retorna el valor absoluto de <i>x</i> .
<code>acos(x)</code>	Coseno inverso	Calcula el coseno inverso de <i>x</i> en radianes.
<code>acosh(x)</code>	Coseno hiperbólico inverso	Calcula el coseno hiperbólico inverso de <i>x</i> .
<code>asin(x)</code>	Seno inverso	Calcula el seno inverso de <i>x</i> en radianes.
<code>asinh(x)</code>	Seno hiperbólico inverso	Calcula el seno hiperbólico inverso de <i>x</i> .
<code>atan(x)</code>	Tangente inversa	Calcula la tangente inversa de <i>x</i> en radianes.
<code>atan2(y,x)</code>	Tangente inversa 2	Calcula el arco tangente de <i>y/x</i> en radianes.
<code>atanh(x)</code>	Tangente hiperbólica inversa	Calcula la tangente hiperbólica inversa de <i>x</i> .
<code>ceil(x)</code>	Redondeo a $+\infty$	Redondea <i>x</i> al siguiente número de tipo <i>integer</i> mayor.
<code>ci(x)</code>	Coseno integral	Evaluá el coseno integral para cualquier número real <i>x</i> no negativo.
<code>cos(x)</code>	Coseno	Calcula el coseno de <i>x</i> , donde <i>x</i> está en radianes.
<code>cosh(x)</code>	Coseno hiperbólico	Calcula el coseno hiperbólico de <i>x</i> .
<code>cot(x)</code>	Cotangente	Calcula la cotangente de <i>x</i> ($1/\tan(x)$), donde <i>x</i> está en radianes.
<code>csc(x)</code>	Cosecante	Calcula la cosecante de <i>x</i> ($1/\sin(x)$), donde <i>x</i> está en radianes.
<code>exp(x)</code>	Exponencial	Calcula el valor de <i>e</i> elevado a la potencia de <i>x</i> .
<code>expm1(x)</code>	Exponencial (Arg) – 1	Calcula uno menos que el valor de <i>e</i> elevado a la potencia de <i>x</i> ($(e^x) - 1$).
<code>floor(x)</code>	Redondeo a $-\infty$	Trunca <i>x</i> al siguiente número de tipo <i>integer</i> menor.
<code>getexp(x)</code>	Mantisa y exponencial	Retorna el exponente de <i>x</i> .
<code>gamma(x)</code>	Gamma	Evaluá la función gamma o función gamma incompleta para <i>x</i> .
<code>getman(x)</code>	Mantisa y exponencial	Retorna la mantisa de <i>x</i> .

<code>int(x)</code>	Redondeo al más cercano	Redondea x al número de tipo <i>integer</i> más cercano.
<code>intrz(x)</code>	—	Redondea x al número de tipo <i>integer</i> más cercano entre x y cero.
<code>ln(x)</code>	Logaritmo natural	Calcula el logaritmo natural de x (en base e).
<code>lnp1(x)</code>	Logaritmo natural (Arg +1)	Calcula el logaritmo natural de $(x + 1)$.
<code>log(x)</code>	Logaritmo en base 10	Calcula el logaritmo de x (en base 10).
<code>log2(x)</code>	Logaritmo en base 2	Calcula el logaritmo de x (en base 2).
<code>max(x,y)</code>	Máximo y mínimo	Compara x con y retornando el valor mayor.
<code>min(x,y)</code>	Máximo y mínimo	Compara x con y retornando el valor menor.
<code>mod(x,y)</code>	Cociente y resto	Calcula el resto de x/y , cuando el cociente se redondea hacia $-\infty$.
<code>pow(x,y)</code>	Potencia de X	Calcula x elevado a la potencia de y .
<code>rand()</code>	Número aleatorio (0 – 1)	Produce un número de coma flotante entre 0 y 1 exclusivamente.
<code>rem(x,y)</code>	Cociente y resto	Calcula el resto de x/y , cuando el cociente se redondea al número de tipo <i>integer</i> más cercano.
<code>si(x)</code>	Seno integral	Evaluá el seno integral para cualquier número real x .
<code>sec(x)</code>	Secante	Calcula la secante de x , donde x está en radianes ($1/\cos(x)$).
<code>sign(x)</code>	Signo	Retorna 1 si x es mayor que 0, retorna 0 si x es igual a 0, y retorna -1 si x es menor que 0.
<code>sin(x)</code>	Seno	Calcula el seno de x , donde x está en radianes.
<code>sinc(x)</code>	Seno	Calcula el seno de x dividido por x ($\sin(x)/x$), donde x está en radianes.
<code>sinh(x)</code>	Seno hiperbólico	Calcula el seno hiperbólico de x .
<code>sizeDeDim(ary,di)</code>	—	Retorna el tamaño de la dimensión di especificada para el vector <i>ary</i> .
<code>spike(x)</code>	Spike	Genera la función <i>spike</i> para cualquier número real x .
<code>sqrt(x)</code>	Raíz cuadrada	Calcula la raíz cuadrada de x .
<code>step(x)</code>	Step	Genera la función <i>step</i> para cualquier número real x .
<code>tan(x)</code>	Tangente	Calcula la tangente de x , donde x está en radianes.
<code>tanh(x)</code>	Tangente hiperbólica	Calcula la tangente hiperbólica de x .

GLOSARIO DE TÉRMINOS

2D (*2 Dimensiones*), 107, 124, 125, 127, 148, 160, 192
3D (*3 Dimensiones*), 2, 4, 10, 33, 46, 100, 101, 107, 116-118, 122-126, 129-132, 134, 138, 139, 147, 148, 150-152, 159, 160, 162, 163, 171, 192, 197-199
3D-RAS (*3D Robotic Arm Simulator*), 2, 4, 11, 100, 116, 122-126, 132, 139, 145, 147, 148, 151, 159-162, 191-193, 197, 199, 200
4WD (*Four-Wheel Drive*), 67, 70

A

A/D (*Analogic Digital*), 72, 75
ABB (*ASEA Brown Boveri*), 28
ACK (*Acknowledgment*), 75-78, 83
Ackerman, 70
ACT (*Automatic Control Telelab*), 41, 171
ActiveX, 47, 48, 86, 127
AENOR (*Asociación Española de Normalización y Certificación*), 104
AJAX (*Asynchronous JavaScript And XML*), 52, 53, 171, 185, 190
Algoritmo, 4, 6, 7, 38, 41, 67, 88, 90, 101, 111, 123, 127-129, 132-134, 136, 137, 139, 140, 145, 147-151, 162, 199
Ancho de banda, 14, 38, 41, 51, 53, 58, 114, 180, 199
ANL (*Laboratorio Nacional de Argonne*), 25
Antropomórfico, 4, 6, 7, 10, 18, 99, 100, 125, 126, 130, 132, 139, 145, 147, 148, 151, 162, 191, 192, 199
API (*Application Programming Interface*), 50, 53

- Applet, 49, 50, 57, 119, 121, 173, 185, 190, 192
ARITI (*Augmented Reality Interface for Teleoperation via Internet*), 39
ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), 87
Articular, 6, 17, 102, 103, 113, 117, 123-127, 129-132, 134, 137-139, 148, 160, 191
Articulado, 14, 25, 26, 100, 107
Articulación, 74, 93, 105, 107-114, 117, 123, 125, 129, 131-134, 136-138, 200
ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), 77, 78, 89, 90
ASEA (*Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget*), 28, 41, 122
ASP (*Active Server Pages*), 47
ATV (*Advanced Tethered Vehicle*), 27
Autómata, 14-21
Automática, 3, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 17, 23, 31, 36, 42-46, 56-58, 87, 89, 101, 159, 165, 166, 169-171, 176, 185, 189, 190
AutomatL@bs, 46, 169, 171, 184
Autónomo, 1, 11, 16, 19, 33, 34, 38, 39, 65, 66, 68, 94

B

- Bluetooth, 10, 86, 87-91, 93, 191, 199
BOOTES (*Burst Observer and Optical Transient Exploring System*), 54-56
Brazo manipulador, 1, 6, 9-11, 34, 53, 65, 69, 94, 99, 106, 109, 117, 177

C

- CAD (*Computer Aided Design*), 123, 124, 139, 162, 199
Cartesiano, 6, 103, 107, 112, 146, 199
CCD (*Charge Coupled Device*), 86, 91
CCS (*Custom Computer Services, Inc.*), 75
CEA (*Comité Español de Automática*), 42, 44, 46, 57, 190
CGI (*Common Gateway Interface*), 47, 52, 190
Cinemática, 1, 4, 6, 7, 10, 67, 94, 99, 100, 102, 107, 108, 110-113, 116-119, 122-124, 126, 127, 129, 139, 140, 145-147, 157, 159, 161, 162, 163, 175, 191, 192, 198-200
Cliente, 49, 50, 52, 55, 79, 86, 87, 88, 89, 90, 119, 120, 121, 173, 185, 201
CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), 85, 91, 106
CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*), 54
CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*), 80
Comunicación inalámbrica, 1, 6, 67, 79, 94, 118, 175
CURV I (*Cable-Controlled Underwater Recovery Vehicle*), 27

D

D-H (*Denavit-Hartenberg*), 6, 99, 100, 109, 117, 122, 124-126, 130, 132, 134, 145, 148, 150, 151, 199
DC (*Direct Current*), 69, 71-75, 85, 93, 105
DIESIA (*Departamento de Ingeniería Electrónica, Sistemas Informáticos y Automática*), 182
DLR (*Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt*), 37
DOF (*Degree of Freedom*), 6, 7, 10, 25, 27-29, 34, 37, 39, 45, 53, 68, 69, 99, 100, 102-104, 111, 116, 117, 122-126, 130, 132, 134, 135, 136, 139, 145, 147, 148, 151, 162, 191, 192, 194, 204
DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), 199

E

EDR (*Enhanced Data Rate*), 199
Educacional, 2, 4, 6, 7, 9-11, 13, 28, 42, 45, 65, 66, 68, 93, 99, 107, 124, 139, 145, 159, 167, 185, 190-192, 194, 198, 200
EJS (*Easy Java Simulations*), 46, 49, 50-52, 100, 119-121, 123, 124, 168, 171, 190, 201
EMC (*Electromagnetic Compatibility*), 199
eMersion, 43-46, 169, 171, 184, 190
EPFL (*Escuela Politécnica Federal de Lausanne*), 43, 66, 68, 191
ESA (*Agencia Espacial Europea*), 29, 34, 35, 66
Espacio de trabajo, 4, 6, 100, 101, 106, 118, 123-126, 128-140, 146, 147, 149, 151, 153, 158, 160, 191, 192, 199

F

FDA (*Food and Drug Administration*), 30
FEC (*Forward Error Correction*), 87
FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), 199
FIDO (*Field Integration Design and Operations*), 32, 34
FK (*Forward Kinematics*), 99, 100, 107, 111, 113, 118, 124, 126, 127, 129, 133, 134, 135, 139, 146, 147, 99
FSRL (*Field and Space Robotics Laboratory*), 68
FTP (*File Transfer Protocol*), 55

G

GNU (*GNU is Not Unix*), 50
GPL (*General Public License*), 178
GPRS (*General Packet Radio Service*), 55, 56

GPS (*Global Positioning System*), 67
GSM (*Global System for Mobile communications*), 54

H

HTML (*HyperText Markup Language*), 47, 48, 50, 51, 53, 171, 183
HTTP (*HyperText Transfer Protocol*), 36, 37, 52

I

I2C (*Inter-Integrated Circuit*), 10, 69, 74-76, 78, 79, 93, 114, 115, 118, 177, 191
IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), 10, 24, 199
IFR (*Federación Internacional de Robótica*), 66, 101, 103, 104
IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), 71
IJEE (*International Journal of Engineering Education*), 42, 43, 57, 190
IK (*Inverse Kinematics*), 7, 99, 100, 107, 111, 113, 123-125, 132-134, 139, 146, 147, 150, 151
IMS (*Instruction Management Systems*), 201
Inalámbrico, 1, 4, 6, 22, 38, 66, 74, 76, 79, 81, 85-87, 90, 94, 95, 118, 175, 181, 199
Ingeniería, 6, 7, 10, 15, 24, 29, 36, 42, 43, 46, 57, 65, 67, 86, 93, 95, 99, 119, 122, 147, 159, 162, 166-169, 176-178, 185, 190, 191, 194
Instrumento virtual, 1, 2, 4, 6, 7, 10, 11, 39, 40, 48, 52, 54-56, 74, 76, 77, 81, 85, 99, 100, 122, 139, 145, 147, 150, 151, 153, 158, 159, 161, 162, 166, 169, 170, 172, 174, 179, 180, 183-185, 191-193, 197, 199, 200
INTA (*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*), 54
Interactividad, 14, 38, 53, 57, 124, 146, 160, 168, 170-172, 193, 201
Interactivo, 36, 42, 43, 49-52, 54, 57, 99, 117, 120, 166, 168, 176, 184
Internet, 2, 5, 14, 35-42, 46-49, 51-57, 119-121, 165, 167, 170, 173, 174, 176, 178, 185, 190, 193, 194, 201
IP (*Internet Protocol*), 50, 55, 86, 121, 173, 181, 183
IR (*Infrarrojo*), 28
IRB-6, 28, 41, 125, 205
ISM (*Industrial, Científico y Médico*), 87
ISO (*Organización Internacional para la Estandarización*), 31, 66, 102, 104
ISS (*Estación Espacial Internacional*), 29, 30
IV (*Instrumento Virtual*), 4, 6, 7, 47-52, 54-57, 66-70, 81-86, 88, 89, 94, 95, 100, 101, 105, 113, 116-118, 121, 122, 124-127, 132, 137, 139, 146, 150, 152, 159, 163, 168, 170, 171, 179, 183-185, 191, 192, 200, 201

J

JavaTM, 32, 39, 49, 50, 54, 57, 119, 120, 168, 171, 173, 174, 184, 185, 190

JavaScript, 47, 48, 52, 53, 180, 183
JIL Server (*Java Internet LabVIEW Server*), 50, 121, 122, 201
JIRA (*Asociación de Robótica Industrial de Japón*), 28
JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), 88, 90
JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), 34, 80

L

Laboratorio virtual, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 39, 40-42, 46, 51-53, 57, 58, 65, 67, 95, 121, 122, 165-175, 178, 181, 185, 189, 190, 193, 198, 200, 201
LabVIEW™ (*Laboratory for Virtual Instrumentation and Electronics Workbench*), 6, 39-42, 45, 48-52, 54, 55, 57, 67, 86, 87, 119, 121-124, 128, 133, 147, 148, 153, 168, 171, 173, 176, 182, 184, 185, 190, 200, 201, 208
LCD (*Liquid Crystal Display*), 75
Learning, 10, 43, 166-169, 171, 184, 193, 201
LER (*Laboratorio de Ensayo de Robots*), 2, 5, 165, 170-172, 175, 176, 178-185, 191, 194, 200
LSB (*Least Significant Bit*), 77, 78, 115, 118
LSC (*Laboratoire Systèmes Complexes*), 39
LSR (*Lightweight Survivable Rover*), 34
Lynx6, 1, 4, 6, 100, 101, 106-109, 111, 113, 114, 116-122, 124, 125, 130, 131, 134-136, 138, 139, 145, 147, 152, 162, 191, 192, 205

M

Matlab® (*MATrix LABoratory*), 107, 123, 124, 146, 148, 162, 168, 171, 173, 184, 192, 208
Mecatrónica, 45, 102, 168, 171
MER (*Mars Exploration Rover*), 32, 34
MIBL (*Universidad de Michigan*), 49
Microcontrolador, 10, 11, 68, 69, 72-81, 93, 94, 114, 115, 177
MIMO (*Multiple-input Multiple-output*), 199
MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), 57, 67, 68, 191
MRBS (*Meeting Room Booking System*), 171, 176, 178, 182, 185, 193, 200
MSB (*Most Significant Bit*), 77, 78, 115, 118

N

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), 29, 30, 31, 32, 34, 35, 42, 49, 57, 66, 67, 80, 94, 190
NEC (*Nippon Electric Company*), 29

O

- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), 199
- Online (*En línea*), 5, 37, 40, 44, 45, 57
- OoPArt (*Out of Place Artifact*), 15
- Opportunity, 32, 34, 35

P

- PAN (*Personal Area Network*), 87
- PaP (*Paso a paso*), 70, 71
- Pathfinder, 32, 33, 67, 80
- PAW (*Position Adjustable Workbench*), 35
- PC (*Personal Computer*), 39, 74, 75, 76, 85, 116
- PCB (*Printed Circuit Board*), 69, 73
- Perl (*Practical Extracting and Reporting Language*), 47
- PFC (*Proyecto Fin de Carrera*), 2, 93, 177, 181
- PHP (*Hypertext Preprocessor*), 48, 171, 174, 183
- PID (*Proporcional Integral Derivativo*), 71
- ProLEARN (*Red Europea de Excelencia en Aprendizaje Profesional*), 44, 190
- Prototipo robótico, 1, 2, 69, 194,
- PUMA (*Programmable Universal Machine for Assembly*), 28, 49, 107, 122, 123, 124, 125, 130, 146, 205
- PWM (*Pulse Width Modulation*), 71, 72, 73, 81

Q

- QTI (*Question & Test Interoperability*), 201

R

- RCA (*Radio Corporation of America*), 29
- Remoto, 2, 3, 5-11, 13, 14, 22, 26, 27, 35, 37, 38, 40-52, 54, 55, 57, 58, 65, 67-69, 74, 78, 79, 81, 83, 84, 86, 94, 95, 99, 100, 104, 113, 116, 117, 119-123, 125, 139, 165-178, 180, 181, 184, 185, 189, 190, 193, 198-201
- RF (*Radio Frecuencia*), 34, 79, 85
- RFCOMM (*Radio Frequency Communication*), 87
- Robot, 6, 17, 18, 20, 22, 24, 25, 27-31, 34, 37-41, 46, 66, 67, 86, 87, 102-104, 107, 111, 123, 125, 145, 148, 159, 170, 177, 196, 199
- Robótica, 2-7, 9, 10, 13, 14, 24, 25, 27-30, 42, 46, 56, 57, 65-67, 69, 72, 75, 86, 93-95, 99, 101, 102, 105, 119, 122, 123, 145-147, 159, 160, 162, 167, 169-172, 175, 177, 178, 182, 185, 189-196, 198-200

Rocker-Bogie, 67, 68, 70, 94
Rocky, 33, 34
ROTEX (*Robot Technology Experiment*), 37
Rover, 6, 9, 32-35, 65-67, 80, 81, 94, 177, 191, 198
RTT (*Robot Todo Terreno*), 67, 68
RUWS (*Remote Unmanned Work System*), 26, 27

S

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), 39
SCARA (*Selective Compliant Articulated Robot Arm*), 29, 103, 107, 199
SCORM (*Sharable Content Object Reference Model*), 185
SDP (*Protocolo de Descubrimiento de Servicio*), 88
Servidor, 40, 47, 48, 50-52, 86-90, 121, 173, 174, 180-181, 183, 185
Servo, 26, 44, 46, 106, 108, 113, 114, 115, 116, 118, 132, 191
Simulación, 37, 42, 43, 46, 49-52, 54, 57, 99-101, 119-126, 130-132, 134, 136, 139, 146-150, 157, 158, 160, 161, 163, 166, 168-172, 192-194
SMS (*Short Message System*), 54
Sojourner, 32-34, 49
SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*), 86
Spirit, 32, 34, 35
SSRMS (*Space Station Remote Manipulator System*), 29
SubIV (*Sub Instrumento Virtual*), 82, 83, 125, 132, 139, 148, 192
Surveyor, 31

T

TAD (*Trabajo Académicamente Dirigido*), 2, 93, 177, 181
TCP (*Transport Control Protocol*), 48, 50, 54, 86, 121, 173
Telecomando, 33, 69, 79
Teledirigido, 22, 23
Teleoperado, 1, 25, 26, 30, 31, 34, 37, 104, 169
TIC (*Tecnologías de la Información y Comunicación*), 166, 167, 185, 193, 201
Trayectoria, 4, 7, 10, 14, 26, 46, 67, 68, 104, 123, 145-158, 162, 163, 192, 193, 198-200

U

UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), 80
UCM (*University of Carnegie Mellon*), 191
UDP (*User Datagram Protocol*), 48
UHF (*Ultra High Frequency*), 69, 74-76, 79, 80, 82, 113-115, 118, 191, 198

UHU (*Universidad de Huelva*), 9, 10, 104, 117, 139, 163, 175, 176, 177, 178, 181, 182, 183, 185, 194, 195, 196, 198, 201
UNE (*Unificación de Normativas Españolas*), 104
UNED (*Universidad Nacional de Educación a Distancia*), 47, 51, 168, 171
UPM (*Universidad Politécnica de Madrid*), 44
USB (*Universal Serial Bus*), 75, 81, 86, 87, 88, 91, 113, 114, 116
UWA (*University of Western Australia*), 41

V

VANTER (*Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento*), 1, 2, 4, 6, 9, 11, 65, 67-70, 73, 79, 82, 83, 85, 87, 93-95, 99, 100, 104-106, 116, 139, 175-177, 190, 191, 194-196, 198, 199
Vehículo robótico, 4, 6, 9, 32-35, 57, 65, 66-69, 74, 75, 93-95, 123, 177, 191, 194
VI Server, 48, 49, 51, 52
VNC (*Virtual Network Computing*), 49

W

Wartg (*Wrist with an Angle Related To the Ground*), 112, 113, 118, 126, 134
Web, 14, 36, 37, 40-54, 56, 57, 86, 119, 123, 139, 167-171, 174, 176, 178-181, 183, 185, 190, 193, 195, 197
Webcam (*Cámara web*), 55, 87, 121, 171, 174, 181

X

XML (*Extensible Markup Language*), 48, 52, 169, 174, 185
XSLT (*eXtensible Stylesheet Language*), 201

Z

ZIF (*Zero Insertion Force*), 75

Contribuciones al Desarrollo de Laboratorios Virtuales y Remotos en Robótica

Esta Tesis cubre un amplio rango de conceptos desde la automática antigua hasta los laboratorios virtuales y remotos, pasando por los vehículos y manipuladores robóticos.

La Tesis está estructurada para que pueda utilizarse como ejemplo de un conjunto de prácticas docentes desarrolladas alrededor de la robótica pedagógica.

La idea inicial fue la de construir VANTER (Vehículo Autónomo No Tripulado Especializado en Reconocimiento). Este prototipo robótico ha servido de multiplataforma con el objetivo de desarrollar hardware y probar distintos sistemas. Como consecuencia, se han llevado a cabo varios desarrollos entre los que se incluye un instrumento virtual educacional denominado 3D Robotic Arm Simulator (3D-RAS).

De esta forma surgió el Laboratorio de Ensayo de Robots (LER), con el propósito de crear un entorno virtual en el que tanto profesores como alumnos pudieran manejar instrumentos reales accesibles desde Internet.



Universidad
de Huelva