



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



**Experimentos de interacción humano-robot en pacientes
con deficiencias motoras**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería Mecánica

Opción Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

Presenta:

Joel Abad Puentes

Asesor:

Emilio Jorge González Galván

San Luis Potosí, S. L. P., Febrero de 2016



Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

17 de septiembre de 2015

**AL ING. JOEL ABAD PUENTES
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Emilio Jorge González Galván**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de septiembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Experimentos de interacción humano-robot en pacientes con deficiencias motoras”

Introducción.

1. Aspectos generales de la rehabilitación robótica.
2. Rehabilitación de miembros superiores.
3. Implementación del sistema de rehabilitación.
4. Resultados experimentales.

Conclusiones y trabajo futuro

Anexos.

Bibliografía.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP. 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de
Posgrado
Maestro en Ingeniería Mecánica
Opción Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

Tesis:

“Experimentos de interacción humano-robot en pacientes con deficiencias motoras”

Presenta:

Ing. Joel Abad Puentes

Sinodales:

Dr. Emilio Jorge González Galván

Asesor

Dr. Mauro Eduardo Maya Méndez

Revisor

Dr. Héctor Méndez Azúa

Revisor

Dr. Jorge Alberto Morales Saldaña

Revisor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a todo lo que me ha pasado en la vida por haber sido el camino que me condujo a este punto.

- A mi asesor Dr. Emilio J. González Galván, por confiar en mí para la realización de este proyecto.
- Al Dr. Hugo Iván Medellín Castillo por la ayuda incondicional para mi llegada y el cálido recibimiento.
- A los estudiantes de la Maestría de Ingeniería Mecánica de la generación 2013, por el apoyo que me brindaron en el desarrollo de todas las actividades realizadas.
- A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y en especial al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (CIEP-FI) por la formación y los buenos y malos momentos vividos.
- A los compañeros del Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería por la ayuda, las ideas, los consejos y aportaciones para el desarrollo de este proyecto y el buen ambiente en ese magnífico espacio de trabajo.
- A la señora Graciela González Palos por sus consejos y ayuda incondicional.
- A la terapeuta ocupacional del CREE-SLP Dulce Rocío Fernández Pérez por confiar en lo que podría resultar del estudio.
- A los Doctores del CIEP por todo el conocimiento adquirido a través de ellos.
- Al T.M.H Gerardo Jasso Silva por su apoyo en la fabricación de elementos mecánicos para el sistema robótico.
- A los pacientes del Centro de Rehabilitación y Educación Especial (CREE) de la ciudad de San Luis Potosí y a sus padres, quienes confiaron en nosotros para la realización de las jornadas de terapia. Gracias por la confianza.
- A la familia que conocí en San Luis, por el apoyo en los buenos y malos momentos. Osvaldo Drake, Elizabeth Avilés, Sandra Jasso, Renata Cisneros.
- A todos los que me han ayudado, sin los cuales hubiera sido imposible la realización de este proyecto. Ellos forman parte de este resultado.
- A todos, mis más sinceros agradecimientos.

DEDICATORIA

- Dedico este trabajo a mi mamá, por su apoyo incondicional y su enorme cariño.
- A mi padre que desde donde esté sé que está mirándome orgulloso.
- A mi familia por su cariño y preocupación.
- A las amistades que he logrado cultivar en este tiempo en México y compañeros de estudios, por siempre estar.
- A todos los que, sin importar lo que pase, siempre han confiado en mí.

RESUMEN

El desarrollo del presente proyecto se enmarca en la temática general de robótica de rehabilitación. Se enfoca en la rehabilitación del miembro superior, con orientación en las articulaciones de codo y hombro. Esto fue posible debido a la implementación de un sistema de rehabilitación asistido por un robot industrial, implementado para su uso en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. El estudio se realizó con voluntarios pacientes del Centro de Rehabilitación y Educación Especial de San Luis Potosí (CREE-SLP) siguiendo un protocolo de experimentación confeccionado para el estudio. El sistema robótico utilizado es basado en uno desarrollado anteriormente con cambios introducidos por el autor que propician el ahorro en compra de componentes y el aumento en las posibilidades de alcance en tareas de rehabilitación. Esto permitió comprobar la factibilidad del sistema de rehabilitación basada en un robot industrial como auxiliar y en la implementación de un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia, con la experimentación con pacientes que presentan deficiencias motoras, por primera vez en el grupo de trabajo de robótica de la UASLP y de México según es conocimiento del autor. Se documentó la mejora de los pacientes luego del tratamiento con el sistema de rehabilitación mediante resultados experimentales y la opinión de una terapeuta ocupacional.

Palabras claves: Rehabilitación robótica, Robot Industrial, Terapia Ocupacional.

Contenido

Índice de figuras	viii
INTRODUCCIÓN	1
1. Aspectos generales de la rehabilitación robótica.	5
1.1 Robótica.....	5
1.2 Robots Industriales.....	7
1.2.1 Clasificación del Robot Industrial.....	8
1.3 Clasificación de los Robots para rehabilitación.....	10
1.3.1 Dispositivos asistenciales.....	10
1.3.2 Robots sociales o de asistencia general.....	11
1.3.3 Robots de asistencia a la movilidad.....	11
1.3.4 Robots fijos.....	12
1.3.5 Robots móviles.....	12
1.3.6 Robots de servicios hospitalarios.....	13
1.4 Órtesis.....	15
1.5 Trabajos relacionados desarrollados en el Laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.....	16
1.6 Motivación y planteamiento del problema.....	22
2. Rehabilitación de miembros superiores	24
2.1 Rehabilitación robótica.....	24
2.2 Anatomía del miembro superior.....	25
2.2.1 Huesos del miembro superior.....	26
2.2.2 Articulaciones.....	29
2.2.3. Inervación del brazo.....	32
2.2.4 Músculos.....	34
2.2.5 Ligamentos del miembro superior.....	36
2.3 Movimientos de las articulaciones (codo y hombro).....	39
2.4 Artrogriposis Múltiple Congénita.....	39
2.4.1 Clasificación.....	41

2.4.2. Manifestaciones Clínicas.....	42
2.4.3 Causas	42
2.5 Terapia Ocupacional	43
2.6 Algunos de los robots diseñados para terapia de rehabilitación.....	45
2.6.1 BUAP.....	45
2.6.2 Mit-Manus	46
2.6.3 GENTLE/s.....	46
2.7 Algunas aplicaciones de robots industriales en rehabilitación	47
2.7.1 REHAROB.....	47
2.7.2 MIME	49
3. Implementación del sistema de rehabilitación	52
3.1 Componentes del sistema de rehabilitación.....	52
3.2 Control de impedancia	59
3.3 Sistema de captura de trayectorias	68
3.4 Lectura de trayectorias	70
3.5 Recolección de Información.....	71
3.6 Interacción paciente-robot.....	71
3.7 Herramienta de agarre.....	73
3.8 Juegos de ejercitación	74
3.9 Sistemas de seguridad.....	76
4. Resultados experimentales	78
4.1 Actividades y Procedimientos	80
4.2 Configuración inicial del sistema.....	81
4.3 Pruebas de desempeño.....	81
4.3.1 Experimento 1: Seguimiento de trayectoria circular	82
4.3.2 Experimento 2: Movimiento en forma de copa.	91
4.3.3 Experimento 3: Movimiento en forma de ola.....	98
4.3.4 Experimento 4: Movimiento en forma de círculo (movimiento activo restringido) libre.	104
4.3.5 Experimentos con pacientes sanos.....	106
4.3.6 Experimento Interacción en modo enseñanza sin constante elástica ($K=0$). ...	110
4.3.6.1 Valoración de los pacientes por parte de la terapeuta ocupacional.	112

4.4 Conclusiones preliminares.....	119
Conclusiones	121
Trabajo futuro	124
ANEXOS	125
ANEXO A	126
ANEXO B	135
ANEXO C	144
Bibliografía	228

Índice de figuras

Figura 1.1. Isaac Asimov, en 1965 [6].	5
Figura 1.2 Robot Manipulador ABB IRB6600 [5].	9
Figura 1.3 Sistema MOVAID desarrollado en 1994 y sistema Care-o-Bot MORPHA desarrollado en 2003 por Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (IPA) in Stuttgart [9].	10
Figura 1.4 La silla eléctrica de navegación autónoma SENA [11].	11
Figura 1.5 Robots asistenciales fijos [9]	12
Figura 1.6 Robots móviles asistenciales [9].	13
Figura 1.7 Sistema Robótico DA VINCI (Intuitive Surgical, 1999) [12].	14
Figura 1.8 Sistemas de Imágenes Médicas. [12]	15
Figura 1.9 Plataforma Experimental. [15]	19
Figura 1.10 Trayectoria en el plano x-y . [15].	20
Figura 2.1 Regiones y huesos del miembro superior. A. Vista anterior. B. Vista posterior.	28
Figura 2.2 Articulación derecha del hombro. Vista anterior [20].	29
Figura 2.3 Articulaciones de la cintura pectoral. Articulaciones del hombro y acromioclavicular. Vista anterior [20].	30
Figura 2.4 A. Articulación del codo derecho en extensión. Vista anterior. B Articulación del codo derecho en extensión. Vista posterior [20].	32
Figura 2.5 A. Músculos principales y nervios. Región braquial. Vista anterior. B. Músculos principales y nervios. Región braquial. Vista posterior [20].	33
Figura 2.6 Lugares de inserción de los músculos del miembro superior a nivel de la cintura pectoral y el brazo. Rojo: inserciones proximales. Azul: inserciones distales. A. Vista anterior. B. Vista posterior [20].	36
Figura 2.7 A. Antebrazo derecho. Vista anterior. Plano muscular superficial. B. Antebrazo derecho. Vista anterior. Primer plano muscular [20].	38
Figura 2.8 Movimientos del hombro. A. Vista posterior. Circunducción del brazo. B. Vista superior. Flexión o anteversión y extensión o retroversión del brazo. Movimientos del codo. A. Flexión y extensión del antebrazo, vista lateral. B. Pronación y supinación del antebrazo, vista anterior [20].	39
Figura 2.9 Robot diseñado para rehabilitación BUAP [33].	45
Figura 2.10 Robot MIT-manus rehabilitación [25].	46
Figura 2.11 Sistema GENTLE/s [34].	46
Figura 2.12 Sistema REHAROB [18].	48
Figura 2.13 Dispositivo robótico MIME [36].	50
Figura 3.1. Robot Industrial marca FANUC LR Mate 200 iC. Sensor de Fuerza marca FANUC FS-10iA.	53
Figura 3.2 Controlador FANUC R30iA Mate.	56

Figura 3.3 Terminal de enseñanza [16].	58
Figura 3.4 Computadora de escritorio marca DELL OPTIPLEX 745.	58
Figura 3.5 Sistema masa resorte amortiguador.	60
Figura 3.6 Diagrama a bloques de sistema de control de impedancia.	62
Figura 3.7. Respuesta en posición del sistema a una entrada de fuerza unitaria.	64
Figura 3.8. Respuesta en velocidad del sistema a una entrada de fuerza unitaria.	64
Figura 3.9. Respuesta en posición del sistema a una entrada de fuerza unitaria para Experimento 4 con $K=0$.	65
Figura 3.10. Respuesta en velocidad del sistema a una entrada de fuerza unitaria para Experimento 4 con $K=0$.	65
Figura 3.11 Algoritmo del controlador de impedancia programado en karel. (Tomado de [14]).	67
Figura 3.12 Terminal de enseñanza.	69
Figura 3.13. Teach pendant indicando finalización del grabado de la trayectoria.	70
Figura 3.14 Primera herramienta de agarre. definitiva.	Figura 3.15 Herramienta de agarre definitiva.
	73
Figura 3.16 Experimento 1	74
Figura 3.17 Experimento 2	75
Figura 3.18 Experimento 3	75
Figura 3.19 Botones de emergencia.	77
Figura 3.20 Botones paro de emergencia.	77
Figura 4.1. Posición inicial.	81
Figura 4.2. Trayectoria paciente T_T1_170415_Tr	83
Figura 4.3 . Trayectoria paciente T T_T1_280415_Tr	83
Figura 4.4. Trayectoria paciente T T_T1_220515	84
Figura 4.5. Trayectoria paciente T_T1_220515_I_Tr	84
Figura 4.6. Trayectoria paciente k_T1_260515_D_Tr	85
Figura 4.7. Trayectoria paciente k_T1_050615_D_Tr	86
Figura 4.8. Trayectoria paciente k_T1_210715_D_Tr	86
Figura 4.9. Trayectoria paciente k_T1_070715_D_Tr	86
Figura 4.10. Trayectoria paciente M_T1_140415_D_Tr	88
Figura 4.11. Trayectoria paciente M_T1_210415_D_Tr	88
Figura 4.12. Trayectoria paciente M_T1_220515_D_Tr	88
Figura 4.13. Trayectoria paciente M_T1_160715_D_Tr	89
Figura 4.14. Fuerzas paciente M_T1_140415_D_Tr	89
Figura 4.15. Fuerzas paciente M_T1_210415_D_Tr	90
Figura 4.16. Fuerzas paciente M_T1_220515_D_Tr	90
Figura 4.17. Fuerzas paciente M_T1_160715_D_Tr	90
Figura 4.18. Trayectoria paciente T (T_T2_170415_Tr)	92
Figura 4.19. Trayectoria paciente T T_T2_240415_Tr	92
Figura 4.20. Trayectoria paciente T (T_T2_280415_Tr)	93
Figura 4.21. Trayectoria paciente T T_T2_280415_I_Tr	93

Figura 4.22. Trayectoria paciente k_T2_260515_D_Tr.....	94
Figura 4.23. Trayectoria paciente k_T2_050615_D_Tr.....	94
Figura 4.24. Trayectoria paciente k_T2_070715_D_Tr.....	95
Figura 4.25. Trayectoria paciente k_T2_210715_D_Tr.....	95
Figura 4.26. Trayectoria paciente M_T2_270315_D_Tr	96
Figura 4.27. Trayectoria paciente M_T2_140415_D_Tr	97
Figura 4.28. Trayectoria paciente M_T2_160615_D_Tr	97
Figura 4.29. Trayectoria paciente M_T2_230615_D_Tr	97
Figura 4.30. Trayectoria paciente k_T3_260515_D_Tr.....	99
Figura 4.31. Trayectoria paciente k_T3_190615_D_Tr.....	99
Figura 4.32. Trayectoria paciente k_T3_070715_D_Tr.....	100
Figura 4.33. Trayectoria paciente k_T3_210715_D_Tr.....	100
Figura 4.34. Trayectoria paciente M. M_T3_140415_D_Tr.....	101
Figura 4.35. Trayectoria paciente M. M_T3_210415_D_Tr.....	102
Figura 4.36. Trayectoria paciente M_T3_160615_D_Tr	102
Figura 4.37. Trayectoria paciente M_T3_230615_D_Tr	102
Figura 4.38. Trayectoria paciente K. Tray_K_D_190615.....	105
Figura 4.39. Trayectoria paciente K. Tr_K_I_260515T3	105
Figura 4.40. Trayectoria paciente k_T3_070715_D_Tr.....	105
Figura 4.41. Trayectoria paciente k_T_210715_Tr	106
Figura 4.42. Realización de trayectoria circular PS 6.....	107
Figura 4.43. Realización de trayectoria circular PS 7.....	107
Figura 4.44. Realización de trayectoria circular PS 8.....	108
Figura 4.45. Realización de trayectoria circular PS 9.....	108
Figura 4.46. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P6.	109
Figura 4.47. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P7.	109
Figura 4.48. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P8.	109
Figura 4.49. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P9.	110
Figura B.0.1. Botón de encendido y apagado del sistema robótico Fanuc LR Mate 200iC.	137
Figura B.0.2. Botones de Teach Pendant.....	138
Figura B.0.3. Botones de guardado de trayectorias y finalización del programa en la enseñanza del robot.....	139
Figura B.0.4. Botones de la interfaz para la comunicación con el sistema de rehabilitación robótica.....	141
Figura C.0.1. Trayectoria experimento 1 T1_170415_D_Tr.....	144
Figura C.0.2. Componentes de fuerza experimento 1 T1_170415_D_F.....	144
Figura C.0.3. Trayectoria experimento 1 T1_280415_D_Tr.....	145

Figura C.0.4. Componentes de fuerza experimento 1 T1_280415_D_FB.	145
Figura C.0.5. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_280415_I_Tr.....	146
Figura C.0.6. Componentes de fuerza experimento 1 T1_280415_I_FB.	146
Figura C.0.7. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_220515_D_Tr.	147
Figura C.0.8. Componentes de fuerza experimento 1 T1_220515_D_F.....	147
Figura C.0.9. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_220515_I_Tr.	148
Figura C.0.10. Componentes de fuerza experimento 1 T1_220515_I_F.	148
Figura C.0.11. Promedios de Componentes de fuerza experimento. Promedio1 T_T1. .	149
Figura C.0.12. Máximos. Componentes de fuerza experimento. MáximosFza1 T_T1. ...	149
Figura C.0.13. Mínimos Componentes de fuerza experimento. MínimosFza1 T_T1.	150
Figura C.0.14. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media T_T1.	150
Figura C.0.15. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seg Tray. T_T1.	151
Figura C.0.16. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std T_T1.	151
Figura C.0.17 Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_200315_D_Tr.	152
Figura C.0.18. Componentes de fuerza experimento 2. T2_200315_D_F.	152
Figura C.0.19 Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_I_Tr.	153
Figura C.0.20. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_I_F.	153
Figura C.0.21. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_Tr.	154
Figura C.0.22. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_F.	154
Figura C.0.23. Seguimiento de trayectoria experimento. T2_280415_D_Tr.	155
Figura C.0.24. Componentes de fuerza experimento 2. T2_280415_D_F.	155
Figura C.0.25. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_280415_I_Tr.	156
Figura C.0.26. Componentes de fuerza experimento 2. T2_280415_I_FB.	156
Figura C.0.27. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_Tr	157
Figura C.0.28. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_F.	157
Figura C.0.29. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media T_T2.	158
Figura C.0.30. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error T_T2.....	158
Figura C.0.31. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std T_T2.	159
Figura C.0.32. Promedios de Componentes de fuerza experimento. Promediofza1 T_T2.	159
Figura C.0.33. Máximos. Componentes de fuerza experimento. Máximosfza1 T_T2.....	160
Figura C.0.34. Mínimos Componentes de fuerza experimento. Mínimosfza1 T_T2.	160
Figura C.0.35. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_260515_D_Tr.	161
Figura C.0.36. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_260515_D_F.	161
Figura C.0.37. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_050615_D_Tr.	162
Figura C.0.38. Seguimiento de trayectoria experimento 1 K_T1_050615_D_F.....	162
Figura C.0.39. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_170615_Tr.	163
Figura C.0.40. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_170615_F.....	163

Figura C.0.41. Seguimiento de trayectoria experimento 1k_T1_190615_D_Tr.	164
Figura C.0.42. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_190615_D_F.	164
Figura C.0.43. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_230615_D_Tr.	165
Figura C.0.44. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_230615_D_F.	165
Figura C.0.45. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_260615_D_Tr.	166
Figura C.0.46. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_260615_D_F.	166
Figura C.0.47. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_300615_D_Tr.	167
Figura C.0.48. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_300615_D_F.	167
Figura C.0.49. Seguimiento de trayectoria experimento 1. K_T1_070715_Tr.	168
Figura C.0.50. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_070715_F.	168
Figura C.0.51. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_21C715_D_Tr.	169
Figura C.0.52. Componentes de fuerza experimento 1.k_T1_210715_D_F.	169
Figura C.0.53. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media K_T1.	170
Figura C.0.54. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T1.	170
Figura C.0.55. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std K_T1.	171
Figura C.0.56. Promedios de Componentes de fuerza. Promedio K_T1.	171
Figura C.0.57. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza K_T1.	172
Figura C.0.58. Mínimos Componentes de fuerza . Mínimosfza K_T1.	172
Figura C.0.59. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_260515_D_Tr.	173
Figura C.0.60. Componentes de fuerza experimento 1. k_T2_260515_D_F.	173
Figura C.0.61. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_050615_D_Tr.	174
Figura C.0.62. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_050615_D_F.	174
Figura C.0.63. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_170615_Tr.	175
Figura C.0.64. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_170615_F.	175
Figura C.0.65. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T1_190615_D_Tr.	176
Figura C.0.66. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T1_190615_D_F.	176
Figura C.0.67. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_230615_D_Tr.	177
Figura C.0.68. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_230615_D_F.	177
Figura C.0.69. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_260615_D_Tr.	178
Figura C.0.70. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_260615_D_F.	178
Figura C.0.71. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_300615_Tr.	179
Figura C.0.72. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_300615_F.	179
Figura C.0.73. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_070715_Tr.	180
Figura C.0.74. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_070715_F.	180
Figura C.0.75. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_210715_D_Tr.	181
Figura C.0.76. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_210715_D_F.	181
Figura C.0.77. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media K_T2.	182
Figura C.0.78. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T2.	182

Figura C.0.79. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std K_T2.....	183
Figura C.0.80. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_260515_D_Tr.....	183
Figura C.0.81. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_260515_D_Tr.....	184
Figura C.0.82. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_190615_D_Tr.....	184
Figura C.0.83. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_190615_I_F.....	185
Figura C.0.84. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_23061515_D_Tr.....	185
Figura C.0.85. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_23061515_D_F.....	186
Figura C.0.86. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_260615_D_Tr.....	186
Figura C.0.87. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_260615_D_F.....	187
Figura C.0.88. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_300615_Tr.....	187
Figura C.0.89. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_300615_F.....	188
Figura C.0.90. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_070715_Tr.....	188
Figura C.0.91. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_070715_F.....	189
Figura C.0.92. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_210715_F.....	189
Figura C.0.93. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_210715_F.....	190
Figura C.0.94. Componentes por ejes. Trayectoria media del robot en interacción por sesiones. Media.....	190
Figura C.0.95. Componentes por cada eje. Variación de seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T3.....	191
Figura C.0.96. Componentes por cada eje. Desviación estándar por sesiones. Desv std K_T3.....	191
Figura C.0.97. Promedio de fuerzas por sesión. Promedio fza K_T3.....	192
Figura C.0.98. Máximos de fuerza por sesión. Máximos fza1 K_T3.....	192
Figura C.0.99. Mínimos de fuerza por sesión. Mínimos fza1 K_T3.....	193
Figura C 0.100. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_D_190615.....	193
Figura C 0.101. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_D_190615.....	194
Figura C.0.102. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_Total_K_190615.....	194
Figura C.0.103. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_190615.....	195
Figura C.0.104. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_230615.....	195
Figura C.0.105. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Fza_K_230615.....	196
Figura C.0.106. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_D_260615.....	196
Figura C.0.107. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_D_260615.....	197
Figura C.0.108. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_I_260615.....	197
Figura C.0.109. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_I_260615.....	198
Figura C.0.110. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_I_300615.....	198
Figura C.0.111. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_300615.....	199
Figura C.0.112. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_070715.....	199
Figura C.0.113. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_070715.....	200
Figura C.0.114. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Fza_K_210715.....	200
Figura C.0.115. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_210715.....	201
Figura C.0.116. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_140415_D_Tr.....	201

Figura C.0.117. Componentes de fuerza experimento 1. Marcelo_T1_140415_D_F.....	202
Figura C.0.118. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_140415_D_Tr.	202
Figura C.0.119. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_140415_D_F.....	203
Figura C.0.120. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_240415_D_Tr.	203
Figura C.0.121. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_240415_D_F.....	204
Figura C.0.122. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_240415_D_F.....	204
Figura C.0.123. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_240415_D_F.....	205
Figura C.0.124. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_220515_D_Tr	205
Figura C.0.125. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_220515_D_F.....	206
Figura C.0.126. Seguimiento de trayectoria experimento 1. Marcelo_T2_160615_D_Tr.	206
Figura C.0.127. Componentes de fuerza experimento 1. Marcelo_T2_160615_D_F.....	207
Figura C.0.128. Variación en seguimiento de trayectoria 1. Seguimiento Tray. error M_T1.	207
Figura C.0.129. Trayectoria media del robot en interacción 1. Media M_T1.	208
Figura C.0.130. Desviación estándar. Desv std M_T1.....	208
Figura C.0.131. Promedio de fuerza por sesión. Promedio M_T1.	209
Figura C.0.132. Máximos de componentes de fuerza por sesión. Máximosfza M_T1.....	209
Figura C.0.133. Mínimos de componentes de fuerza por sesión. Mínimosfza M_T1.	210
Figura C.0.134. Seguimiento de trayectoria experimento 2. Marcelo_T1_270315_D_Tr.	210
Figura C.0.135. Componentes de fuerza experimento 2. Marcelo_T1_270315_D_F.....	211
Figura C.0.136. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_140415_D_Tr.	211
Figura C.0.137. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_140415_D_F.....	212
Figura C.0.138. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_240415_D_Tr.	212
Figura C.0.139. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_240415_D_F.....	213
Figura C.0.140. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_190515_D_Tr.	213
Figura C.0.141. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_190515_D_F.....	214
Figura C.0.142. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_220515_D_F.....	214
Figura C.0.143. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_220515_D_F.....	215
Figura C.0.144. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_160615_D_Tr.	215
Figura C.0.145. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_160615_D_F.....	216
Figura C.0.146. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_230615_D_Tr.	216
Figura C.0.147. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_230615_D_F.....	217
Figura C.0.148. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media M_T2.	217
Figura C.0.149. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error M_T2.....	218
Figura C.0.150. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std M_T2.....	218
Figura C.0.151. Promedios de Componentes de fuerza. Media M_T2.....	219
Figura C.0.152. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza1 M_T2.....	219
Figura C.0.153. Mínimos. Componentes de fuerza. Mínimosfza M_T2.....	220

Figura C.0.154. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_140415_D_Tr	220
Figura C.0.155. Componentes de fuerza experimento 3. Marcelo_T3_140415_D_F.....	221
Figura C.0.156. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_190515_D_Tr.	221
Figura C.0.157. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_190515_D_F.....	222
Figura C.0.158. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_160615_D_Tr	222
Figura C.0.159. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_160615_D_F.....	223
Figura C.0.160. . Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_230615_D_F.	223
Figura C.0.161. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_230615_D_F.....	224
Figura C.0.162. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media M_T3.	224
Figura C.0.163. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error M_T3.....	225
Figura C.0.164. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std M_C3.....	225
Figura C.0.165. Promedios de Componentes de fuerza. Promediofza1 M_T3.....	226
Figura C.0.166. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza M_T3.....	226
Figura C.167. . Mínimos. Componentes de fuerza. Mínimosfza1 M_T3.	227

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el hombre se ha ido preguntando la mejor manera de recuperar a personas que, por un motivo u otro, han perdido movilidad motora. La respuesta está indudablemente en la simbiosis que necesariamente tendrá que hacer el terapeuta con las nuevas tecnologías. Utilizando ese conjunto de avances como asistencia será mucho más fácil la realización de las tareas de rehabilitación, así como llegar a mayor cantidad de personas.

Los trastornos osteoarticulares están dentro de las enfermedades más frecuentes en la actualidad. Estas agrupan todas las patologías que involucran el deterioro y disfunción del sistema óseo y articular del cuerpo humano, con la afección de sus estructuras internas y adyacentes como: cartílago, músculos o tejidos blandos periarticulares. Algunas de estas enfermedades son: Artrogriposis, Artritis Reumatoide, Osteoartrosis.

La Artrogriposis Múltiple Congénita (AMC) es un grupo de desórdenes musculoesqueléticos de muy rara aparición. La incidencia de este trastorno reportada al nacimiento es desde 1/ 3000 a 1/12 000 nacidos vivos [1], caracterizados por contracturas múltiples articulares, en los que se afectan los músculos de los miembros superiores, inferiores y del dorso. Los músculos pueden estar ausentes, reducidos en tamaño y/o número, o ser reemplazados por tejido fibroso o grasa. El grado de afectación varía de paciente y la deformidad clásica es bilateral y simétrica [2].

Los especialistas han visto que un programa integrado de manejo de las enfermedades osteoarticulares involucra a todos los tipos conocidos de tratamiento para acrecentar la calidad de vida del paciente. En general, las deformidades de las articulaciones se corrigen por medio de cirugía y elementos que ayudan a mejorar la postura de los pacientes. La recurrencia de la enfermedad se evita por medio de yesos o aparatos ortopédicos nocturnos, mientras que la funcionalidad y la independencia en los dos casos anteriores se

estimulan por medio de la terapia física y ocupacional. En el caso de esta tesis el reto está en implementar un sistema robótico capaz de ser un ayudante eficaz al terapeuta ocupacional en la realización de tareas de rehabilitación.

En el caso de la Terapia Ocupacional, la estimulación es posible mediante la realización de rutinas enfocadas al uso terapéutico de tareas de autocuidado y actividades de juego. Así posibilita la recuperación de las capacidades del individuo para desarrollar las actividades significativas dentro de sus roles personales de la manera más independiente posible. La Terapia Ocupacional valora las habilidades motoras, cognitivas, perceptivas y sociales concernientes a las actividades significativas afectadas del cliente y es aplicable a todo tipo de enfermedad o desorden osteoarticular.

El niño es un ser en desarrollo en todas las áreas cognitiva, motora, del lenguaje, social y el médico seguramente se enfocará en favorecer su desarrollo integral para ocupar su puesto en la sociedad. La capacidad cognitiva adecuada, así como la comunicación y lenguaje adecuados a la edad facilitarán que el cliente exprese con libertad y honestidad los beneficios así como las deficiencias que siente tiene el tratamiento que está realizando.

El objetivo del tratamiento de la enfermedad es conseguir el mayor grado posible de función motora de las articulaciones afectadas. Esta función se enfocaría en conseguir una independencia para la marcha autónoma, las actividades de la vida diaria, el aprendizaje en la escuela y el control del entorno. Pensar solo en mejorar la estética no es el camino para conseguir estos objetivos.

Durante la etapa preescolar es importante que se ayude al niño a mantener la marcha independiente, pero la terapia ocupacional se enfocará también a desarrollar la función de las dos manos para comer, ayudar en el vestido, manipular juguetes etc; retos que se pretenden lograr con la ayuda de la robótica, complementada con elementos adicionales y juguetes adaptados

Cuando el niño entra en la escuela, ha de tener una motricidad activa y suficiente de hombro y codo como para poder escribir, coger un libro o cuaderno, pasar páginas etc.

Las terapias física y ocupacional son un componente vital de un buen plan de tratamiento. El papel del fisioterapeuta es muy amplio e incluye educación, apoyo emocional, monitoreo cercano para detectar problemas y aplicación de métodos tradicionales de fisioterapia.

Al niño se le van enseñando las habilidades de auto cuidado junto con la habilidad para movilizarse. El uso óptimo de los brazos requiere de un equipo especial que se adapte a las necesidades particulares de cada niño y de modificaciones en su ropa. La contractura del codo dificulta y limita los movimientos para que funcione la mano. En algunos casos es útil la cirugía, pero esta debe ser planeada entre el cirujano ortopédico, el pediatra y el terapeuta.

La escritura y las habilidades ante una computadora pueden mejorarse por medio de aparatos especialmente adaptados de entrenamiento y programas que le enseñen a sentarse correctamente [3].

En este sentido, el uso de un robot como asistente para terapias se presta muy bien para lo que se quiere debido a las amplias posibilidades que ofrecen las herramientas tecnológicas que siguen mejorándose con el paso del tiempo. El robot ofrece capacidad de repetitividad, seguimiento exacto de trayectorias y movimientos con margen de error pequeño, adquisición de datos de desempeño exactos y capacidad de monitoreo de progreso entre otras cosas.

En esta investigación se propone utilizar un robot industrial Fanuc 200iC como asistente para la realización de terapia ocupacional con pacientes voluntarios del Centro de Rehabilitación y Educación Especial de San Luis Potosí (CREE-SLP) que sufren de Artrogriposis Múltiple Congénita, con variaciones introducidas por el autor en el sistema que propician el ahorro en compra de componentes y el aumento en las posibilidades de alcance del mismo en tareas de rehabilitación.

Las rutinas de rehabilitación son enfocadas al miembro superior, con orientación a las articulaciones de codo y hombro. Esto permitió comprobar la factibilidad del uso del sistema de rehabilitación basado en un robot industrial como auxiliar y la implementación de un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia.

La experimentación por primera vez con pacientes que presentan deficiencias motoras usando el sistema de rehabilitación es punto fundamental en el acercamiento a la factibilidad de implementar este tipo de sistemas en instituciones que prestan servicios de rehabilitación. Esperando con esto contribuir a mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Objetivo:

El presente proyecto de tesis contempla la implementación de un sistema de rehabilitación que hace uso de un robot industrial y un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia y la validación con pacientes que presentan deficiencias motoras en extremidades superiores (codo y hombro).

Objetivos específicos:

- Adecuación e implementación del sistema robótico para la realización de la tarea de rehabilitación con personas afectadas.
- Confección de rutinas de rehabilitación según los pacientes a tratar.
- Confección de manual de uso del sistema de rehabilitación.
- Validación del sistema con análisis de datos experimentales.
- Propuesta de mejora del sistema de rehabilitación.

1. Aspectos generales de la rehabilitación robótica.

1.1 Robótica

La palabra robot fue utilizada por primera vez por el escritor checo Karel Capek (1890 -1938) en el nombre de su obra de teatro R.U.R (Robots Universales Rossum) en 1921, que tras el éxito que tuvo en Praga, Londres y Nueva York logró introducir el término en todas las lenguas [4] [5]. Esta palabra surge de la combinación de las palabras “*robota*” y “*robotnik*”, que significan “trabajo obligatorio” y “siervo” respectivamente. Este término fue ideado por el hermano del autor Josef Capek (1887-1945) y vendría a sustituir a automat que había sido empleado por el mismo en el relato corto “Opilec”.

Tiempo después el término robótica fue usado por primera vez por el científico y escritor estadounidense de ciencia ficción Isaac Asimov (1920-1992) quien en 1942 propuso la definición del término robótica como:

“La ciencia o arte relacionada con la inteligencia artificial (para razonar) y con la ingeniería mecánica (para realizar acciones físicas sugeridas por el razonamiento).



Figura 1.1. Isaac Asimov, en 1965 [6].]

Luego en su obra “Yo Robot” formuló las llamadas leyes de la robótica:

Ley 1: Un robot no puede hacer daño a un ser humano, o, por medio de la inacción, permitir que un ser humano sea lesionado.

Ley 2: Un robot debe obedecer las órdenes recibidas por los seres humanos, excepto si estas órdenes entrasen en conflicto con la primera Ley.

Ley 3: Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no sea incompatible con la Primera y Segunda Ley.

Debido a eso este científico y escritor está considerado mundialmente como el padre de la robótica.

En los años 50 los científicos definen un robot como: “Un dispositivo multifuncional reprogramable diseñado para manipular y/o transportar material a través de movimientos programados para la realización de tareas variadas. Esta definición la adoptó la asociación americana RIA (Robot Industries Association) en 1980 [5] [7] [8].

El elemento clave en esta definición es la habilidad de reprogramar que tienen los robots. Esta habilidad proporcionada por la computadora es lo que da al robot su utilidad, adaptabilidad y versatilidad [5] [8].

El robot surgió de la unión de dos tecnologías anteriores: la de los teleoperadores y la de las máquinas herramienta controladas por computadora. Los teleoperadores o dispositivos maestro-esclavo, fueron desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial para el manejo de materiales radioactivos. Las máquinas de control numérico fueron desarrolladas debido a la alta precisión requerida en el maquinado de ciertas partes mecánicas, como lo son algunos componentes para aviones. Los primeros robots

esencialmente combinaron los eslabones mecánicos de los teleoperadores con la autonomía y habilidad de programarse de las máquinas de control numérico [5].

Cabe señalar que las diversas aplicaciones de robots no se limitan a aquellos puestos de trabajo industriales en los que el robot está ejecutando tareas sumamente repetitivas. Hay muchas otras aplicaciones de la robótica en las áreas o ambientes donde la presencia de los seres humanos no es práctica o deseable. Ejemplo de esto son: Bajo la superficie del mar, la exploración planetaria, recuperación y reparación de satélites, la desactivación de dispositivos explosivos y el trabajo en ambientes radiactivos [5] [9].

1.2 Robots Industriales

La historia de la automatización industrial está caracterizada por períodos de cambios bruscos en los métodos populares. Ya sea como causa o, tal vez, como un efecto, dichos períodos de cambio en las técnicas de automatización parecen estar estrechamente ligados con la economía mundial. El uso del robot industrial, que se identificó como dispositivo único en la década de 1960, junto con los sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) y manufactura asistida por computadora (CAM), caracteriza las tendencias más recientes en la automatización del proceso de manufactura. Estas tecnologías están llevando a la automatización industrial hacia otra transición, cuyo alcance se desconoce aún [8] [9].

Una de las principales razones del crecimiento en el uso de robots industriales es la reducción en el costo. Durante la década de los 90 los precios de los robots disminuyeron al mismo tiempo que aumentaron los costos de mano de obra humana. Además, los robots no solo se están volviendo más baratos, sino también más efectivos, más rápidos, precisos y flexibles. Si se toman en cuenta estos factores, el costo por utilizar robots disminuye mucho más rápido que su etiqueta de precio. A medida que los robots se vuelvan más efectivos en cuanto al costo de sus tareas, y a

medida que aumente el costo de la mano de obra humana, habrá más trabajos que se conviertan en candidatos para la automatización robótica. Esta es la tendencia principal que impulsa el crecimiento del mercado de los robots. Una tendencia secundaria, y no menos importante es que, haciendo a un lado la economía, a medida que los robots se vuelvan más capaces, podrán hacer más y más tareas que serían peligrosas o imposibles de realizar por los trabajadores humanos [8] [9].

Casi todas las asociaciones o federaciones nacionales e internacionales, tienen su propia definición de robot aunque con evidentes analogías.

La definición de robot industrial de la I.S.O., proviene de la "Robotic Industries Association (RIA)" y es: *"Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas"* [10].

1.2.1 Clasificación del Robot Industrial

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en lazo cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots:

Tabla 1.1. Clasificación de los robots según la AFRI. (AFRI) Asociación Francesa de Robótica Industrial [7]

Clasificación de los robots según la AFRI.	
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.



Figura 1.2 Robot Manipulador ABB IRB6600 [5]

Los robots industriales tienen infinitas aplicaciones y es por esto que este proyecto se enfoca en uno de los múltiples usos que puede tener un robot industrial en la realización de tareas no convencionales, en este caso la rehabilitación de codo y hombro.

1.3 Clasificación de los Robots para rehabilitación

En la actualidad existen varios y diversos sistemas de rehabilitación robótica. Esto se debe a la constante búsqueda por parte de médicos e ingenieros de técnicas novedosas que permitan mejorar la calidad de vida de pacientes que necesitan rehabilitación por presentar alguna discapacidad. Los sistemas de rehabilitación se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.3.1 Dispositivos asistenciales

Están destinados a proporcionar asistencia en entornos específicos como hospitales, residencias e incluso hogares particulares. (Figura 1.3)



Figura 1.3 Sistema MOVAID desarrollado en 1994 y sistema Care-o-Bot MORPHA desarrollado en 2003 por Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (IPA) in Stuttgart [9].

1.3.2 Robots sociales o de asistencia general

Efectúan la interacción social con el usuario, proporcionándole compañía, conversación, tareas de monitorización, vigilancia, etc.

1.3.3 Robots de asistencia a la movilidad

Sistemas que permiten el traslado de personas de un lugar a otro. Ejemplo: (Figura 1.4) La silla eléctrica de navegación autónoma SENA [11].



Figura 1.4 La silla eléctrica de navegación autónoma SENA [11].

1.3.4 Robots fijos

Se pueden distinguir dos tipos, sistemas de tipo escritorio que conforman un puesto de trabajo u ocio para el paciente, y sistemas que, por carecer de movilidad propia, han de ser ubicados frente al usuario por una tercera persona.

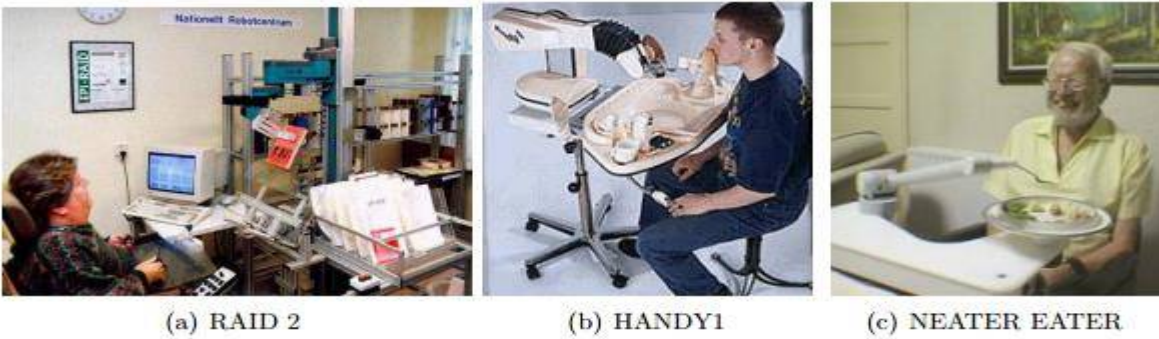
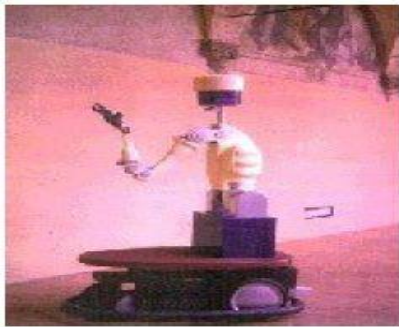


Figura 1.5 Robots asistenciales fijos [9]

1.3.5 Robots móviles

Los sistemas que disponen de una base móvil, presentan un espacio de trabajo ampliado, y la capacidad de operar alejados del usuario cuando así lo necesite. Son proyectados para realizar tareas asistenciales del hogar, como calentar la comida en el microondas y servirla en la cama, limpiar la cocina, quitar sábanas, etc. Un proyecto relevante en esta dirección es MOVAID, proyecto Europeo TIDE dirigido por el “ARTS Lab della Scuola Superiore Santa Anna” (1994-1997). Consta de estaciones fijas en puntos de la casa y un robot móvil, que se muestra en la figura 1.6 a), capaz de navegar evitando obstáculos y manipular objetos mediante un brazo robótico. Otros proyectos relevantes han sido el URMAD, el Sprint-INMEDIATE, y el WALKY, mostrado en la figura .1.6 c) [9].



(a) MOVAID



(b) KARES II



(c) WALKY

Figura 1.6 Robots móviles asistenciales [9].

1.3.6 Robots de servicios hospitalarios

Estos enfermeros robóticos están equipados para realizar diversas tareas básicas como: tareas de limpieza, de información, repartir medicinas entre los pacientes, controlar la temperatura remota con termómetros láser, orientar a las visitas a través del hospital, entre otros.

- **Aplicaciones en la cirugía robótica.**

La robótica permite a los cirujanos lograr una mayor precisión en las intervenciones y les permite explorar el campo quirúrgico con la ayuda de una magnificación similar a la que existe en la microcirugía. Los robots asistenciales están concebidos para aliviar la presión en los hospitales, permitiendo con ello al personal médico dedicar más tiempo a la atención de los pacientes.

Ejemplo: (figura 1.7) Robot Da Vinci desarrollado en la empresa Intuitive Surgical Inc., de Mountain View, California (EE.UU.) [12].



Figura 1.7 Sistema Robótico DA VINCI (Intuitive Surgical, 1999) [12].

- **Aplicaciones en diagnóstico.**

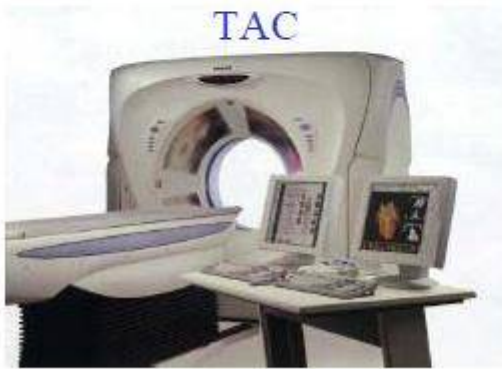
Dentro de los robots hospitalarios también se ubican los dedicados al diagnóstico mediante imágenes médicas y tele-ecografía. Ejemplo de esto son: Los sistemas de Rayos X, TAC (Tomografía axial computarizada) y RM (Resonancia Magnética) entre otros [12].



RX



RM



TAC



Figura 1.8 Sistemas de Imágenes Médicas. [12]

1.4 Órtesis

Se denomina a aparatos o dispositivos, férulas, ayudas técnicas y soportes usados en ortopedia, fisioterapia y terapia ocupacional que corrigen o facilitan la ejecución de una acción, actividad o desplazamiento, procurando ahorro de energía y mayor seguridad. Sirven para sostener, alinear o corregir deformidades y para mejorar la función del aparato locomotor. No sustituyen, parcial o totalmente, un órgano o miembro con incapacidad física, invalidez o disimetría, sino reemplazan o refuerzan sus funciones [13] [9].

1.5 Trabajos relacionados desarrollados en el Laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

“Sistema de apoyo para rehabilitación usando un robot industrial” [14]

En el proyecto “Sistema de apoyo para rehabilitación usando un robot industrial”, presentado por la Ing. Lizvette Irene Ávila Martínez, se presenta la adaptación de un robot industrial para realizar tareas de rehabilitación de extremidades superiores, abarcando codo y hombro, para pacientes que sufren de hemiparesia. La interacción física humano-robot se realizó utilizando el enfoque de control de impedancia. El sistema de captura de trayectorias a seguir por los pacientes se realiza con un sistema comercial denominado *3D Guidance trackStar* fabricado por la compañía Ascension Technology Corporation. Se logró:

1- Implementar y validar la implementación del controlador de impedancia cinemático basado en posición mediante la realización de experimentos con personas sanas.

- El primero consiste en aplicación de una carga utilizando una masa, esto como forma de comprobación que el control de impedancia funciona adecuadamente.
- El segundo consiste en la aplicación de una perturbación al sistema, es decir, una fuerza finita y acotada en cada uno de los ejes del sistema cartesiano de referencia provocando una reacción de movimiento del robot. Esto con el objetivo de probar que el sistema es dócil y genera movimientos suaves cuando existe interacción. El resultado de este experimento cumple con lo esperado, cuando la perturbación termina, el sistema regresa a la posición de referencia sin presentar oscilaciones.

Los resultados experimentales comprueban que el sistema se comporta como se esperaba en concordancia con los resultados de la simulación del sistema continuo.

2- Validar la correcta ejecución del seguimiento activo de trayectorias con el robot y evaluar el desempeño del sistema mediante la participación de personas sanas.

Reproduciendo una trayectoria de referencia, donde el robot intenta guiar a la persona sujeta al efector final del manipulador al realizar el movimiento prescrito; la persona es capaz de modificar la trayectoria del manipulador por medio de las fuerzas de interacción. La trayectoria se reproduce con respecto al tiempo por lo que es definida punto a punto con un tiempo de muestreo constante.

Tipos de trayectorias propuestas para seguimiento con asistencia activa del robot

- 1- Trayectoria modelo capturada con la extremidad que tiene movilidad se reproduce en forma de espejo por la extremidad afectada, a esta trayectoria se le denomina trayectoria en espejo.
- 2- Trayectoria compleja basada en el desarrollo de juego didáctico desarrollado en un plano.
- 3- Trayectoria compleja basada en el desarrollo de juego didáctico desarrollado de forma tridimensional.

Los experimentos fueron obtenidos con la ejecución de los tres tipos de trayectorias con 6 sujetos de prueba. Las personas participantes no presentaron antecedentes de evento vascular cerebral, y cuentan con la movilidad total de sus miembros. El objetivo de esta evaluación con personas sanas fue poner a prueba la efectividad de los métodos propuestos, considerando como trabajo futuro la evaluación con personas accidentadas [14].

“Control de interacción de robots manipuladores en tareas industriales y de rehabilitación” [15]

El proyecto “Control de interacción de robots manipuladores en tareas industriales y de rehabilitación”, tesis de doctorado de la Ing. Isela Bonilla plantea mejorar la interacción entre un robot manipulador y su entorno, desarrollando esquemas de control que permitan obtener un mejor desempeño de los robots en tareas industriales y de rehabilitación. Esto es posible mediante el diseño de algoritmos de control de interacción para robots manipuladores en tareas industriales y de rehabilitación.

Se presenta un nuevo enfoque de control de impedancia proporcional-derivativo, el cual es una extensión del control de movimiento en espacio de tarea para robots manipuladores incluyendo la interacción con el entorno. El enfoque de control propuesto permite un adecuado seguimiento de la trayectoria en ambas fases de la tarea de interacción. Realiza un correcto seguimiento de la trayectoria antes y después de que el robot entre en contacto con su entorno, lo cual representa una ventaja sobre los esquemas clásicos de control de impedancia, debido a que estos esquemas le dan prioridad a una adecuada interacción sin importar los errores en el seguimiento de las trayectorias.

El trabajo aborda el desarrollo de un esquema de control de impedancia para robots manipuladores, cuya aplicación final sean las terapias de rehabilitación asistidas por robots; teniendo como tareas principales:

- Diseño de un nuevo esquema de control de impedancia para robots manipuladores.
- Evaluación experimental del esquema de control de impedancia en un robot manipulador para su uso en tareas de interacción.

Esta evaluación se realiza mediante la realización de un experimento donde se utilizó un robot experimental de transmisión directa de dos grados de libertad y un entorno deformable, una pared de unicel (poliestireno expandido) considerando que, por sus

características físicas, puede ser fácilmente desplazada y dañada por el efector final robot cuando entra en contacto con ella (figura 1.14.).

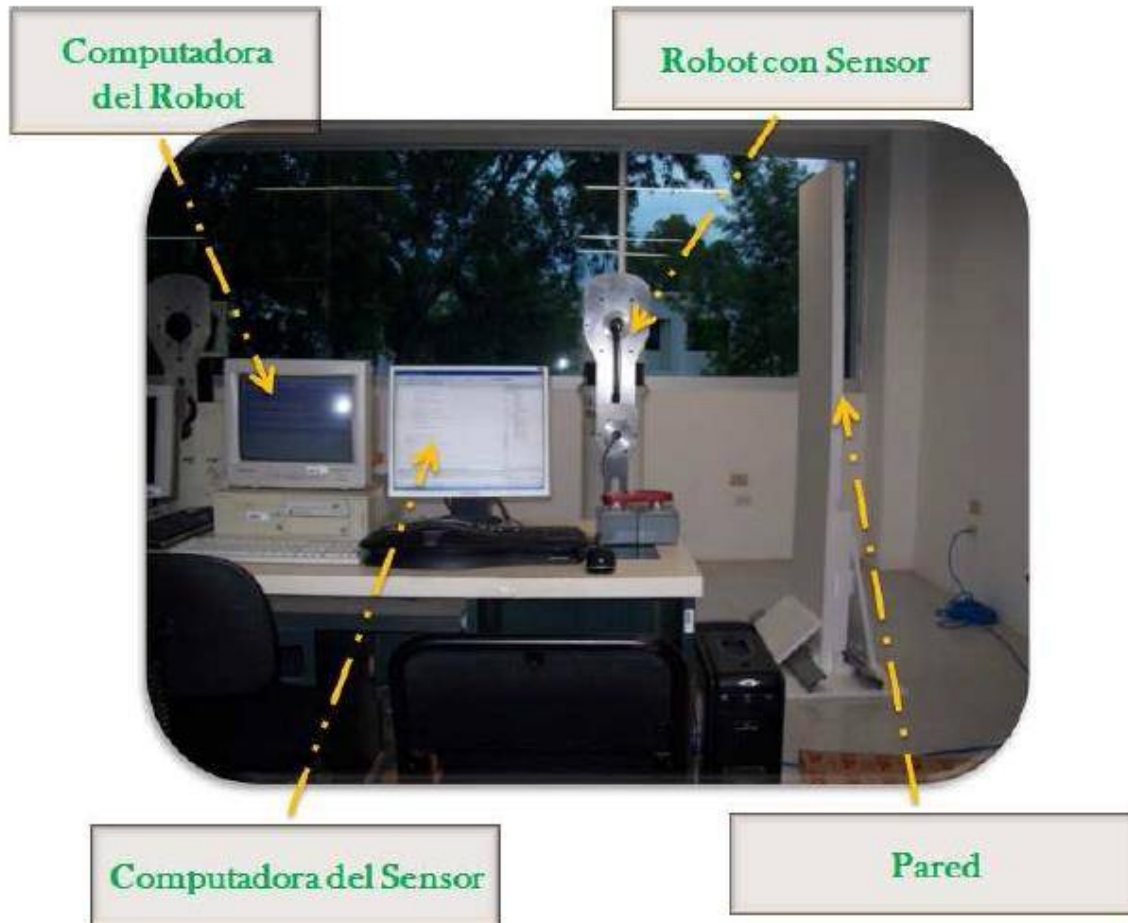


Figura 1.9 Plataforma Experimental. [15]

La pared fue colocada frente al robot dentro de su espacio de tal forma que al moverse pueda interactuar con ella. En la figura 1.14 se presenta la plataforma experimental completa.

Considerando lo anterior, la tarea encomendada al manipulador consistió en realizar el seguimiento de una trayectoria preestablecida durante la ausencia de contacto con su entorno. Mientras que, ante la presencia de fuerzas externas, el manipulador debe seguir la trayectoria impuesta por el entorno, regulando las fuerzas de contacto para lograr un seguimiento adecuado.

El entorno constituido por la pared obstruye la trayectoria del efector final a lo largo del plano x-y. El robot es capaz de seguir la trayectoria deseada cuando la interacción no existe; una vez que el robot encuentra la pared e interactúa, el efector final es forzado a seguir una nueva trayectoria regulando las fuerzas de contacto con la finalidad de obtener un seguimiento adecuado.

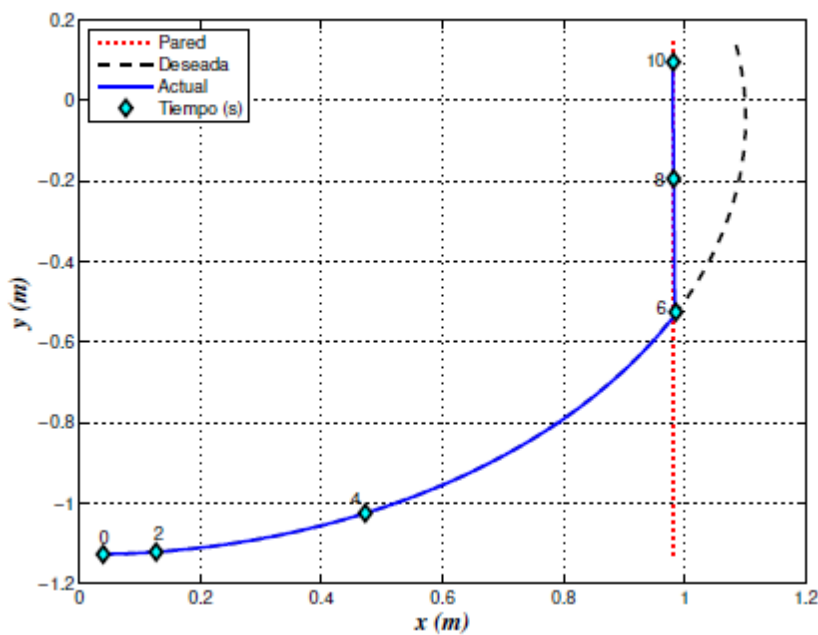


Figura 1.10 Trayectoria en el plano x-y . [15]

Luego de analizados los resultados experimentales y de simulación, generados tanto de la trayectoria deseada obtenida mediante la simulación (segmentada), como de la trayectoria obtenida en la experimentación (sólida) del efector final del robot, se pudo comprobar la capacidad del planteamiento del control de impedancia propuesto para realizar tareas de interacción.

Se realizó una comparación experimental entre el desempeño del controlador desarrollado (Atan-D) y el controlador propuesto por Hogan; esta evaluación se hizo bajo dos criterios de índices de desempeño. Los resultados obtenidos favorecieron al

controlador Atan-D sobre el controlador propuesto por Hogan al obtener el valor más pequeño de ambos índices [15].

“Desarrollo de un sistema para rehabilitación de muñeca” [16]

En el proyecto “Desarrollo de un sistema para rehabilitación de muñeca”, realizado por el Ing. Ubaldo Martínez Delgado, se presenta la adaptación de un robot industrial para realizar tareas de rehabilitación de extremidades superiores, específicamente de la muñeca de la mano, para pacientes que sufren de hemiparesia espástica causada por un ECV.

La interacción física humano-robot se realizó utilizando el enfoque de control de impedancia. Se logró:

- 1- Establecer un medio de enseñanza-aprendizaje en el robot industrial por medio del control de impedancia cinemático basado en posición y orientación a través del lenguaje karel que es propio del manipulador.
- 2- Validar la correcta implementación del control de impedancia para cada uno de los movimientos de la muñeca.
- 3- Verificar que el control de impedancia tenga un comportamiento deseable en la interacción humano-robot.
- 4- Validar la ejecución durante el seguimiento activo de las trayectorias durante la enseñanza-aprendizaje del robot y evaluar el desempeño del sistema mediante la participación de personas sanas y con hemiparesia.
- 5- Extracción de datos para el seguimiento de los pacientes que signifiquen un avance para el médico terapeuta ya que no se cuenta con una referencia numérica por parte del área médica [16].

1.6 Motivación y planteamiento del problema

La aplicación de la robótica en la rehabilitación durante el transcurso de su historia ha venido experimentando un crecimiento sostenido debido a un cambio de pensamiento surgido a partir los avances tecnológicos que se han ido sucediendo con el transcurso del tiempo y lo que se han ido abaratando los elementos tecnológicos, (en este caso los robots). La robótica industrial presenta un futuro promisorio en cuanto a su utilización en tareas no convencionales se refiere. La aplicación de todos estos avances tecnológicos en los programas de rehabilitación va a constituir, en un futuro cercano, un pilar fundamental a partir del cual se fundarán las bases para una nueva forma de practicar tratamientos médicos.

Esta involucra el uso de robots como ayuda en la terapia en lugar de únicamente como dispositivos de auxilio. La robótica de rehabilitación inteligente ayuda en el entrenamiento de la movilidad para personas que sufren de alteración del movimiento, como pueden ser después de un infarto cerebral, pacientes que tienen párkinson, personas que han sufrido golpes en la cabeza que afectan el cerebro, pacientes con lesiones de médula, etc. Estos padecimientos pueden ser auxiliados con aparatos robóticos en terapias que aportan importantes avances a su rehabilitación y la recuperación de movilidad. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del INEGI 2010, en el país existen alrededor de 6 millones de personas que presentan alguna discapacidad, siendo la más frecuente los problemas para caminar o moverse con un 58%, originados en su mayoría por problemas en el nacimiento, presencia de enfermedades y accidentes [16].

La Fisioterapia ofrece servicios a individuos y poblaciones para desarrollar, mantener y restaurar el máximo movimiento y la capacidad funcional durante todo el ciclo de vida. Esto incluye la prestación de servicios en circunstancias donde el movimiento y la función están amenazados por el envejecimiento, lesión, dolor, enfermedades,

trastornos, condiciones o factores ambientales. El movimiento funcional es fundamental para lo que significa ser saludable. La Fisioterapia se ocupa de potencializar y maximizar la calidad de vida, identificando y tratando las alteraciones del movimiento dentro de los ámbitos de promoción, prevención, tratamiento y/o intervención, habilitación y rehabilitación. La vía que se utiliza para lograr el bienestar físico, psicológico, emocional y social por medio del trabajo interdisciplinario y la interacción entre el terapeuta, los pacientes (clientes), otros profesionales del equipo de salud, las familias y comunidades, es parte de un proceso en donde se evalúa, se fijan objetivos y se acuerdan los procedimientos de atención utilizando el conocimiento y habilidades únicas y propias de los terapeutas.

En México se ha trabajado en rehabilitación convencional desde los años 40, siendo pioneros en Latinoamérica, sin embargo a nivel público y privado son apenas alrededor de 10 años que se trabaja con dispositivos robóticos, principalmente con dispositivos isocinéticos y de marcha [17].

Con este proyecto se pretende aportar una experiencia más de avance en el tema, mediante la validación de un sistema robótico de rehabilitación compuesto por un robot industrial de 6 grados de libertad bajo un enfoque de control de impedancia. Logrando por primera vez realizar rutinas de rehabilitación con pacientes afectados, documentando su mejoría. También implementar cambios en la configuración del sistema para garantizar una mejor interacción en el proceso de grabado de trayectorias.

2. Rehabilitación de miembros superiores

2.1 Rehabilitación robótica

La rehabilitación ayuda a los pacientes con afectaciones motoras a recuperar o adquirir (según sea el caso) aptitudes que se han perdido. Existe un fuerte consenso entre los expertos que el elemento más importante en cualquier programa de rehabilitación es la práctica repetitiva, bien enfocada y cuidadosamente dirigida; el mismo tipo de práctica usada por todas las personas cuando aprenden una nueva aptitud, como tocar el piano o lanzar una pelota de beisbol.

Para conseguir una rehabilitación eficaz se deben hacer los ejercicios con un nivel alto de repetitividad con el trabajo activo del fisioterapeuta. A menudo no son posibles esos niveles de atención, pero incluso si los pacientes tienen fácil acceso a fisioterapeutas bien formados, los tratamientos se podrían mejorar con la ayuda de robots. En este caso, la característica de repetitividad requerida para los ejercicios de rehabilitación es compatible con la que los robots son capaces de exhibir en su operación normal.

La historia de la robótica de rehabilitación se remonta a los años ochenta del pasado siglo. Al principio no se consideraba que los robots industriales fueran adecuados para la robótica de rehabilitación debido a la inercia de sus eslabones y la posibilidad de accidentes en el caso de realizar interacción con los humanos. Pero en 1999, investigadores de la Universidad de Tecnología y Economía de Budapest (Hungría) retomaron la idea de usar robots industriales estándar para la terapia en humanos. El proyecto REHAROB fue el primero en el mundo que buscaba utilizar robots industriales estándar, fabricados en serie, para la fisioterapia de pacientes con hemiparesia espástica [18].

El uso de robots para terapia es una tendencia relativamente nueva para la mejora de los programas de rehabilitación. Algunos de los robots utilizados en rehabilitación para recuperación motora son: US MIME, el MIT-Manus robot, Arm Guide y el robot GENTLE/S. Es importante destacar, que los robots no han sido desarrollados para reemplazar los fisioterapeutas, sino para hacerles el trabajo más fácil y mejorar su efectividad.

En los últimos tiempos y con el avance del conocimiento tecnológico, se ha aplicado la robótica a la rehabilitación en variantes como sistemas exoesqueléticos robóticos, denominados órtesis activas, prótesis inteligentes; además, neuroprótesis que ayudan en la estimulación motora y estabilidad muscular de personas con discapacidad. Hoy día quedan en fases de estudio o son poco investigadas las posibilidades del uso de robots industriales para el cumplimiento de estas tareas [18].

En materia de control motor humano en rehabilitación, en la literatura se hace referencia a dispositivos y configuraciones de interfaces desarrolladas para lograr este objetivo como son: manipuladores, exoesqueletos robóticos, PFM (Parallel Link Drive Air-Magnet Floating Manipulandum), estructura robótica en forma de mesa que permite movimiento plano en los ejes X e Y, dispositivos de perturbación (airjet); pero hasta ahora se tiene poca información de investigaciones del uso de robots de uso industrial en tareas alternativas [19].

2.2 Anatomía del miembro superior.

El miembro superior comprende a cada una de las extremidades superiores que están unidas a la porción superior del tronco a través de la cintura pectoral. El esqueleto del miembro superior está constituido por dos segmentos: la cintura pectoral (escapular) formada por la clavícula y la escápula, y la porción libre del miembro superior formada por el húmero, el radio, el cúbito y los huesos de la mano.

Los miembros superiores permiten ejecutar grandes movimientos, participando sobre todo en la prensión y accesoriamente en la locomoción. En el hombre, que es el único de los mamíferos que adquirió la estación bípeda, los miembros superiores y los inferiores presentan diferencias notables entre sí.

El miembro superior se divide topográficamente en las siguientes regiones: la cintura pectoral, el brazo, y la mano.

La cintura pectoral une el miembro superior a la porción superior del tórax. Está constituida por dos huesos: la clavícula por delante, y la escápula por detrás.

El brazo es el segmento del miembro superior que está ubicado entre la cintura pectoral y el antebrazo. Entre el brazo y el antebrazo se encuentra la articulación del codo. El esqueleto del brazo está formado por un solo hueso: el húmero.

El antebrazo está ubicado entre el brazo y la mano, a los cuales se une mediante las articulaciones del codo y radiocarpiana, respectivamente. Su esqueleto está formado por el radio y el cúbito.

La mano es la porción más distal del miembro superior, ubicada a continuación del antebrazo. Está formado por veintisiete huesos que integran tres grupos óseos distintos: el carpo, el metacarpo y los dedos.

2.2.1 Huesos del miembro superior

Clavícula

La clavícula es un hueso de forma alargada, que une el miembro superior al tronco. Su estructura es la de un hueso plano, con una sustancia cortical muy gruesa, abundante tejido esponjoso en sus extremidades y sin cavidad medular. Tiene forma de S, y describe dos curvaturas: la curvatura lateral es cóncava hacia adelante y la curvatura medial es convexa en la misma dirección. Su cuerpo presenta dos caras: una cara superior y la inferior. Posee dos extremidades; la más voluminosa es la extremidad esternal que presenta una cara articular esternal, de aspecto triangular, y la extremidad acromial, aplanada, presenta la cara articular acromial, para la superficie, para la superficie articular del acromion.

Escápula

La escápula es un hueso plano, triangular; localizado en la parte posterior, superior y lateral del tórax, apoyado sobre las primeras siete costillas. Lo constituyen dos caras, tres bordes y tres ángulos. La cara anterior o costal, excavada y cóncava hacia adelante, posee una gran fosa: la fosa subescapular. La cara posterior convexa hacia atrás, presenta una saliente transversal: la espina de la escápula que nace en el borde medial, por una pequeña superficie triangular, y se dirige en forma oblicua hacia el ángulo lateral de la escápula para terminar en una superficie aplanada: el acromion.

Los bordes de la escápula son:

Borde medial: Casi vertical y orientado hacia la columna vertebral.

Borde lateral: Orientado hacia el húmero.

Borde superior: Corto y delgado, termina en la escotadura de la escápula.

Húmero

Es un hueso largo, que se articula con la escápula hacia proximal y con el cúbito hacia distal. Como todo hueso largo presenta un cuerpo o diáfisis y dos extremidades o epífisis: proximal y distal.

El cuerpo, casi rectilíneo, parece hallarse torcido sobre su eje, es irregularmente cilíndrico en su parte superior y en su parte inferior adopta la forma de un prisma triangular, lo que permite ubicar en él tres caras y tres bordes. El borde lateral queda interrumpido por el surco para el nervio radial. El borde medial, más saliente en su parte inferior, da inserción al tabique intermuscular medial del brazo.

Radio

Es un hueso largo, ubicado en la parte lateral del antebrazo, entre el capítulo del húmero y los huesos del carpo (muñeca). Se describen un cuerpo y dos epífisis.

El cuerpo presenta una curvatura anterior cóncava ventralmente y una curvatura medial más acentuada, aumenta su dimensión distalmente; su sección transversal muestra, en

toda su longitud, una forma triangular que permite ubicar tres caras y tres bordes. La cara anterior plana. La cara lateral, redondeada y la cara posterior que en su parte superior es redondeada. El borde posterior es romo y poco marcado en sus extremos. El borde anterior se extiende con un inicio muy marcado y el borde interóseo, cortante, que se extiende distalmente hasta bifurcarse; en él se inserta la membrana interósea que une el radio al cúbito. La cabeza del radio es la parte más voluminosa y redondeada de la extremidad superior.

Cúbito

Es un hueso largo, ubicado en la parte medial del antebrazo, entre la tróclea del húmero y los huesos del carpo. Se describen un cuerpo y dos epífisis. Su cuerpo, más voluminoso en su parte proximal, es prismático triangular y se presentan tres caras y tres bordes. Las caras son: la posterior, la cara medial y la cara anterior. Los bordes son: anterior, posterior e interóseo.

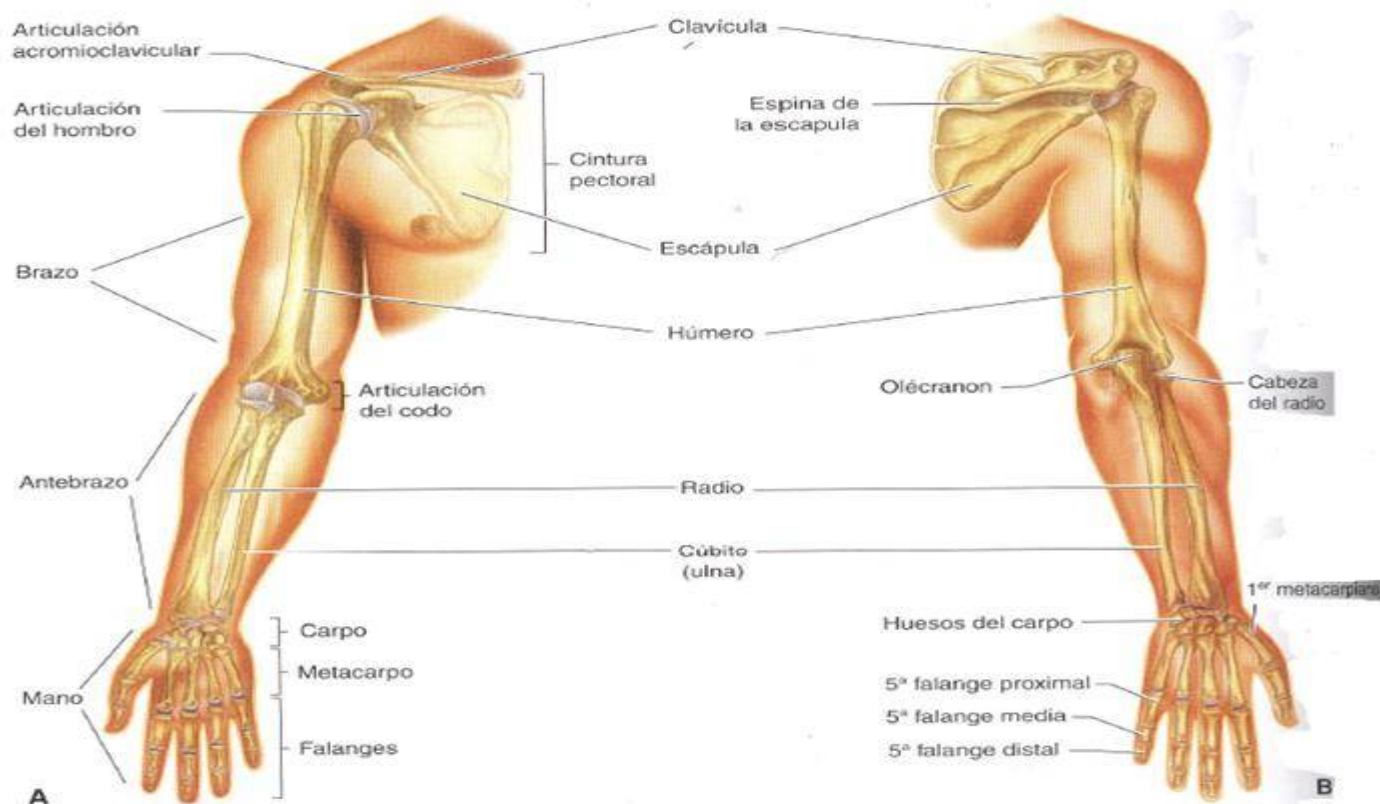


Figura 2.1 Regiones y huesos del miembro superior. A. Vista anterior. B. Vista posterior.

2.2.2 Articulaciones

Una articulación es una unión funcional entre dos o más huesos. Las articulaciones se dividen en dos tipos dependiendo de si las superficies óseas están separadas por una cavidad real (cavidad articular) y tienen una franca movilidad (articulaciones sinoviales o diartrosis), o si los huesos están firmemente unidos por un tejido fibroso o cartilaginoso y carecen en su mayoría de movimiento (articulaciones fibrosas, cartilaginosas, etc) [20]. A continuación se habla de las que existen en el miembro superior humano.

2.2.2.1 Articulación del hombro (glenohumeral)

La articulación del hombro une la escápula al húmero, y así la porción libre del miembro superior a la cintura pectoral. Está rodeada por una cápsula fibrosa, que se halla reforzada por engrosamientos en diferentes zonas. Estos refuerzos de la cápsula son el ligamento coracohumeral y los tres ligamentos glenohumerales.

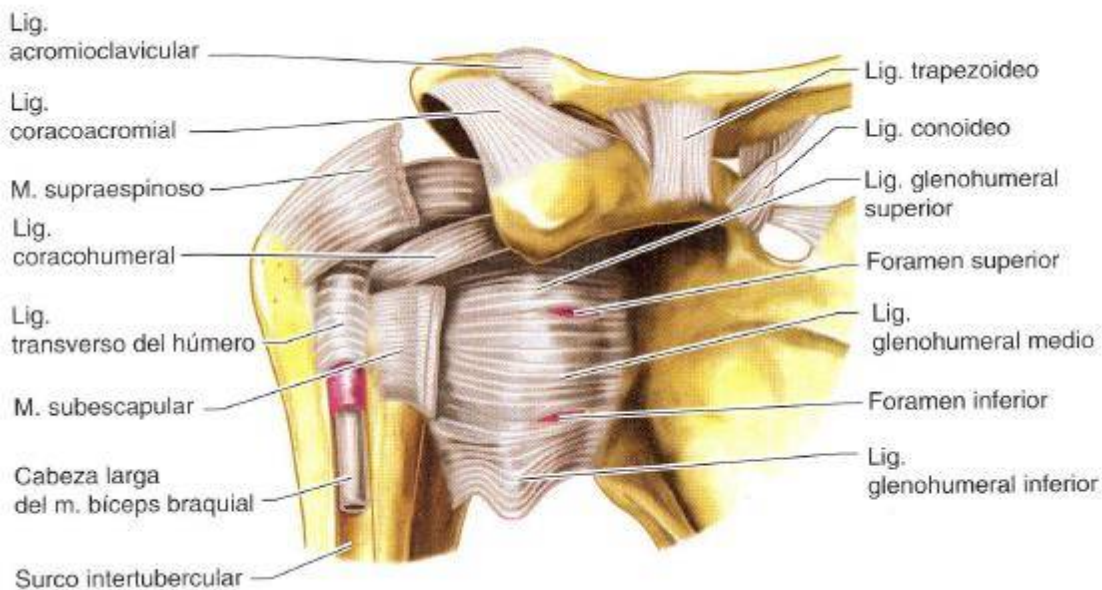


Figura 2.2 Articulación derecha del hombro. Vista anterior [20].

2.2.2.1.1 Articulación acromioclavicular

La articulación acromioclavicular es la que une la escápula y la clavícula, siendo estos los huesos que conforman a su vez la cintura pectoral. Está rodeada por una cápsula que está reforzada por varios ligamentos.

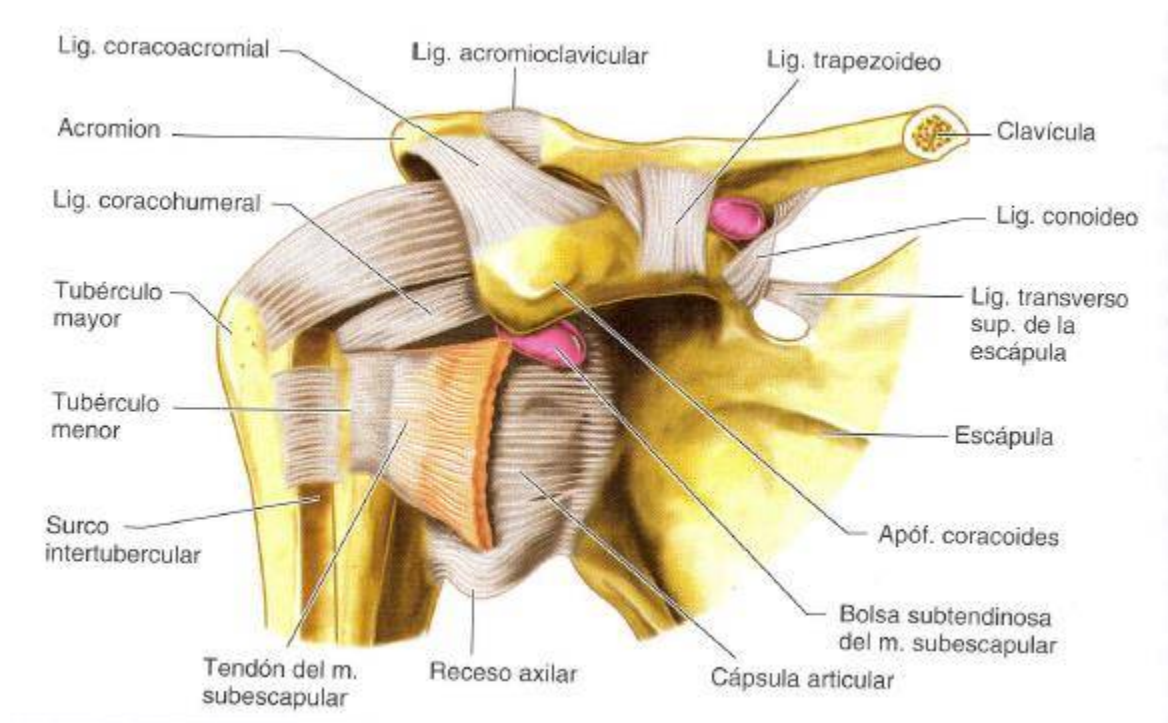


Figura 2.3 Articulaciones de la cintura pectoral. Articulaciones del hombro y acromioclavicular. Vista anterior [20].

2.2.2.2 Complejo articular del codo

La articulación del codo es la unión entre el esqueleto del brazo y el del antebrazo. Es una articulación sinovial que a su vez está constituida por la articulación humerocubital, la articulación humerorradial y la articulación radiocubital proximal. Estas

tres articulaciones están rodeadas por una cápsula y los ligamentos que la refuerzan, y presentan una cavidad articular única para las tres.

2.2.2.2.1 Articulación humerocubital

Está formada por la tróclea humeral que se articula con la escotadura troclear del cúbito, de modo que la cresta longitudinal de la escotadura se relaciona con la porción mediana de la tróclea del húmero. El cúbito solo puede realizar movimientos de flexión y extensión en relación al húmero.

2.2.2.2.2 Articulación humerorradial

La articulación humerorradial está formada por la unión entre el capítulo humeral y la fosita articular de la cabeza del radio. Esta articulación interviene en los movimientos de pronosupinación del antebrazo.

2.2.2.2.3 Articulación radiocubital proximal

Está formada por la unión entre la escotadura radial del cúbito y la circunferencia articular de la cabeza del radio e interviene en los movimientos de pronosupinación (rotación a través del cúbito). La articulación del codo está rodeada por una cápsula articular, que a su vez está reforzada por diferentes ligamentos. Los movimientos que permite realizar la articulación del codo son: flexión, extensión, pronación y supinación.

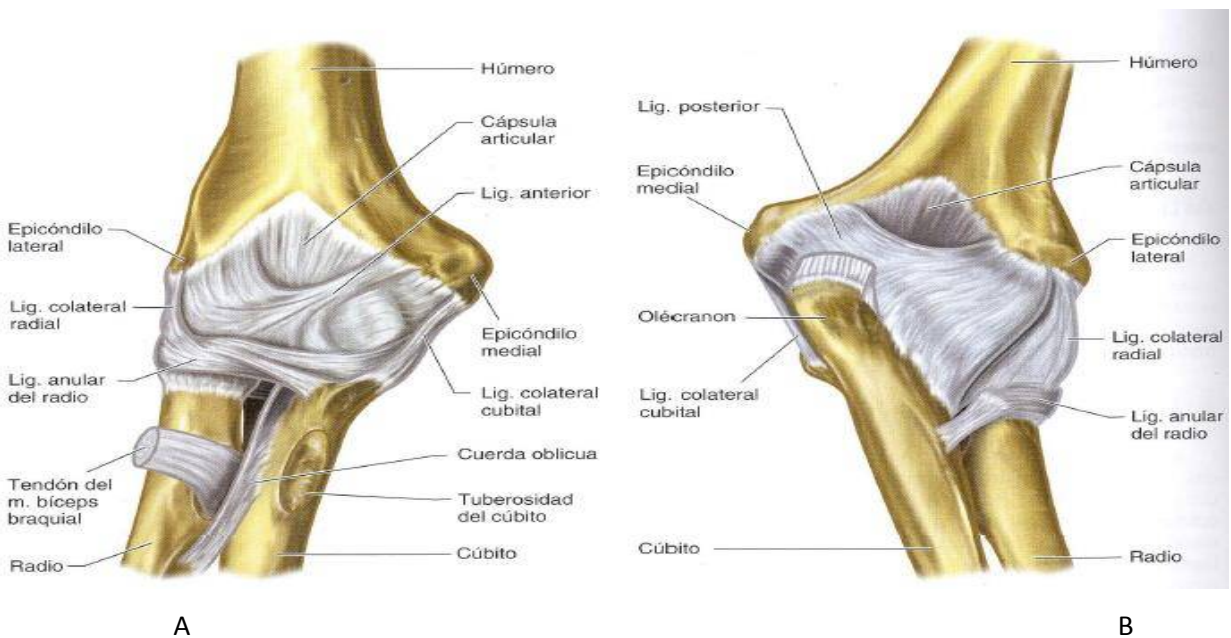


Figura 2.4 A. Articulación del codo derecho en extensión. Vista anterior. **B** Articulación del codo derecho en extensión. Vista posterior [20].

2.2.3. Inervación del brazo

El hombro y el codo están inervados para su función motora y sensitiva por cuatro nervios que descienden del plexo braqueal. Esos son: Nervio musculocutáneo, nervio mediano, nervio radial y nervio cubital. (Figura 2.5.)

El nervio musculocutáneo es un nervio mixto, motor y sensitivo. Adopta un trayecto en dirección inferior y lateral, perfora y atraviesa al músculo coracobraquial, y luego se ubica en la región anterior del brazo entre los músculos bíceps y braquial. Por encima de la fosa del codo se hace superficial y provee la inervación sensitiva a la cara lateral del antebrazo.

El nervio mediano se origina en la unión de las dos raíces anteriores. En el brazo el nervio mediano está ubicado a nivel del conducto braquial. En dirección lateral se relaciona con el músculo bíceps. En dirección posterior se relaciona con el nervio cubital. En la fosa del codo el nervio mediano se relaciona con las estructuras que lo delimitan. En el antebrazo el nervio mediano pasa entre los músculos flexores

superficial y profundo de los dedos, descendiendo así hasta el tercio inferior del antebrazo.

El nervio radial es un nervio mixto, motor y sensitivo. En su origen, a nivel de la fosa axilar, en dirección posterior con el músculo subescapular y luego con los tendones del redondo mayor y dorsal ancho. Cruza la región posterior del brazo de arriba hacia abajo y de medial a lateral entre la cabeza lateral y medial del tríceps. A nivel del codo se ubica relacionándose en dirección lateral con los músculos braquiorradial y extensor radial del carpo y en dirección medial con los músculos braquial y bíceps. El nervio cubital (ulnar) es motor sensitivo. Después de nacer en la fosa axilar transcurre por la cara medial del brazo por delante de la cabeza medial del músculo tríceps braquial. A nivel del codo se ubica por debajo de los músculos epicondíleos mediales. A nivel del antebrazo se ubica entre el músculo flexor cubital del carpo y el flexor superficial de los dedos. En dirección posterior se relaciona con el flexor profundo de los dedos. Continúa en dirección inferior siguiendo al tendón del flexor cubital del carpo (músculo satélite).

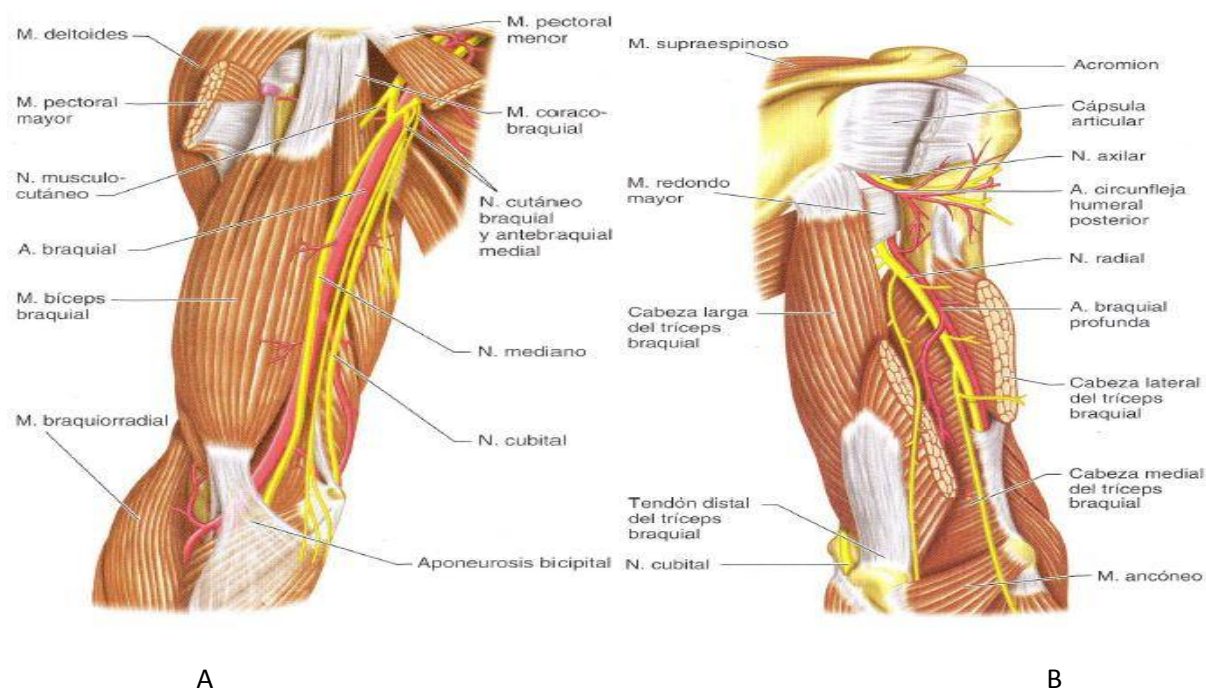


Figura 2.5 A. Músculos principales y nervios. Región braquial. Vista anterior. **B.** Músculos principales y nervios. Región braquial. Vista posterior [20].

2.2.4 Músculos

Un músculo es un tejido blando que se encuentra en la mayoría de los animales. Generan movimiento al contraerse o extendiéndose al relajarse. En el cuerpo humano (y en todos los vertebrados) los músculos están unidos al esqueleto por medio de los tendones, siendo así los responsables de la ejecución del movimiento corporal [20].

Tabla 2.1. Músculos de la cintura pectoral.

Músculos de la cintura pectoral	
Músculo	Función
Pectoral Mayor	Aducción y rotación medial del brazo. Anteversión del hombro. Inspirador auxiliar.
Pectoral Menor	Punto fijo en las costillas: descenso y tracción en dirección anterior de la cintura escapular. Punto fijo en la apófisis coracoides: inspirador, al elevar las costillas.
Subclavio	Descenso de la clavícula y del hombro. Ascende la primera costilla con punto fijo en la clavícula.
Serrato anterior	Contribuye en la oscilación de la escápula.
Supraespinoso	Abductor del brazo y ligamento activo de la articulación del hombro.
Infraespinoso	Abductor y rotador lateral del brazo y ligamento activo de la articulación del hombro.
Redondo Mayor	Aductor y rotador medial del brazo.
Redondo Menor	Rotación lateral y leve aducción del brazo.
Subescapular	Aductor y rotador medial del húmero.
Deltoides	Porción clavicular: Anteversión, rotación medial y aducción del brazo. Porción acromial: Abducción hasta el plano horizontal. Porción espinal: Retroversión, rotación lateral y

	aducción del brazo.
Músculos del brazo	
Coracobraquial	Anteversor, aductor y rotador medial del brazo
Braquial	Flexión del antebrazo
Bíceps braquial	Punto fijo en la escápula: Flexor del antebrazo sobre el brazo. Antebrazo en pronación: Primero actúa como supinador y luego como flexor
Tríceps braquial	Punto fijo en la escápula: extensión del antebrazo sobre el brazo. Cabeza larga: Colabora con la retroversión y la aducción del brazo sobre el tronco.
Músculos del Antebrazo	
Pronador Redondo	Pronador y ligera flexión del antebrazo sobre el brazo.
Flexor radial del carpo	Flexor de la mano sobre el antebrazo y abducción de la mano.
Palmar largo (inconstante)	Flexor de la mano sobre el antebrazo y tensor de la aponeurosis palmar.
Flexor cubital del carpo	Flexión de la mano sobre el antebrazo y coopera en la aducción de la mano.
Flexor superficial de los dedos	Flexión de la falange media sobre la proximal. Flexión de la falange proximal sobre la mano.
Flexor profundo de los dedos	Flexión de la falange distal sobre la falange media. Flexión de la mano sobre el antebrazo.
Flexor largo del pulgar	Flexión de la falange distal del dedo pulgar sobre la proximal, y ésta sobre el primer metacarpiano.
Pronador cuadrado	Pronación de la mano y del antebrazo.

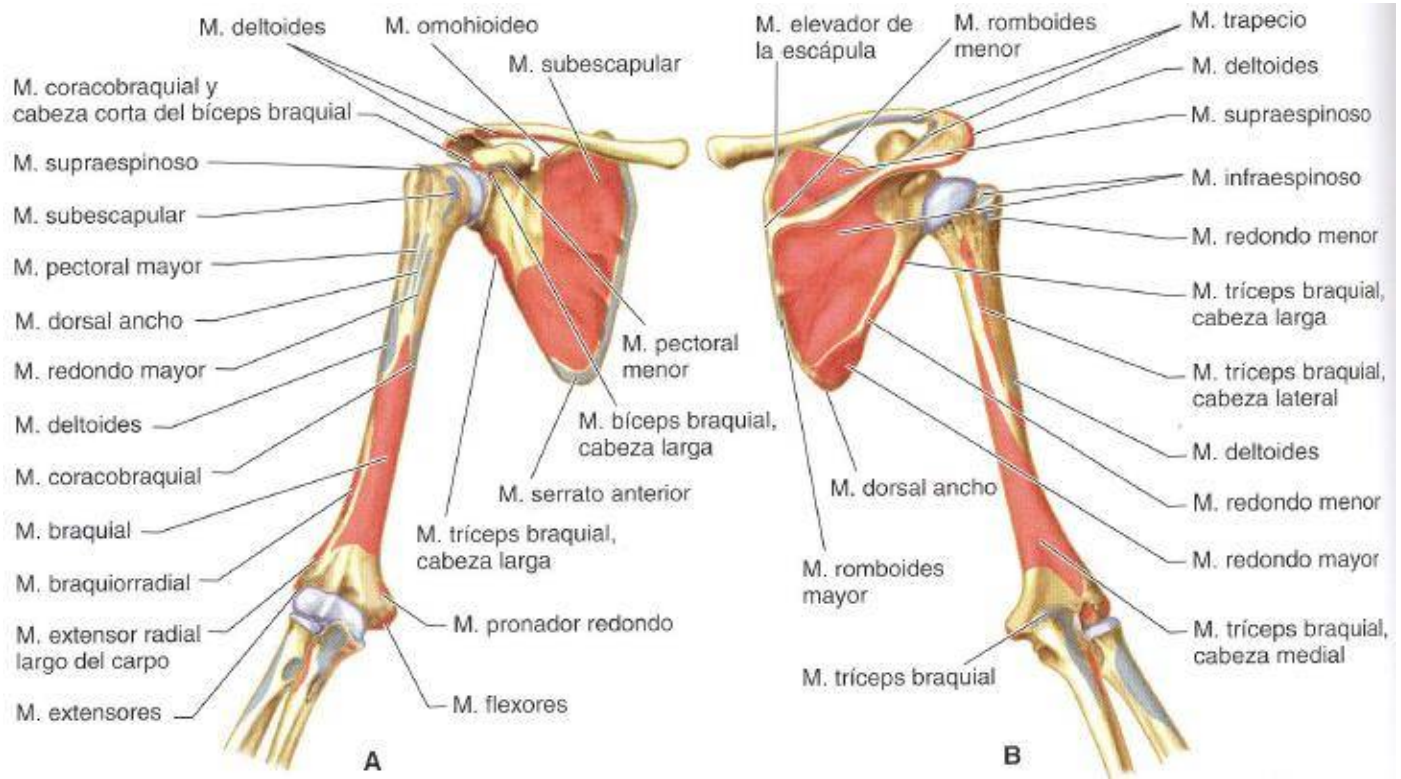


Figura 2.6 Lugares de inserción de los músculos del miembro superior a nivel de la cintura pectoral y el brazo. Rojo: inserciones proximales. Azul: inserciones distales. **A.** Vista anterior. **B.** Vista posterior [20].

2.2.5 Ligamentos del miembro superior

Los ligamentos son el tejido conectivo fibroso que une los huesos entre sí en una articulación. Generalmente su función es la de unir estructuras y mantenerlas estables, por lo que evitan mover los huesos de manera excesiva [20].

Tabla 2.2. Ligamentos del miembro superior

Ligamentos del miembro superior	
Ligamento	Función
Articulación acromioclavicular	
Ligamentos acromioclaviculares	Refuerzan la articulación acromioclavicular por arriba y por abajo,

(superior e inferior)	respectivamente.
Ligamentos coracoclaviculares (conoideo y trapezoideo)	Están a distancia de la articulación pero refuerzan la unión de la clavícula a la escápula.
Articulación esternoclavicular	
Ligamento esternoclavicular anterior	Refuerzan la articulación.
Ligamento interclavicular	
Ligamento esternoclavicular posterior	Refuerza la cara posterosuperior de la clavícula y llega hasta el manubrio esternal.
Ligamento costoclavicular	Es el principal ligamento de la articulación. Se dispone en un plano anterior y otro posterior, y une la clavícula con el primer cartílago costal y la cara inferior de la clavícula.
Articulación del hombro (glenohumeral)	
Ligamento coracohumeral	Refuerzan la articulación
Ligamentos glenohumerales (superior, medio e inferior)	
Complejo articular del codo	
Ligamento anterior	Refuerza la cápsula de la articulación del codo por la cara anterior.
Ligamento posterior	Refuerza la cara posterior de la articulación del codo.
Ligamento colateral radial	Está formado por fibras que se extienden de manera radiada. Refuerza la cápsula de la articulación.
Ligamento colateral cubital	Está formado por un conjunto de fibras que adquieren un aspecto triangular o en abanico. Las inserciones cubitales del

ligamento colateral cubital están reforzadas por fibras arciformes.

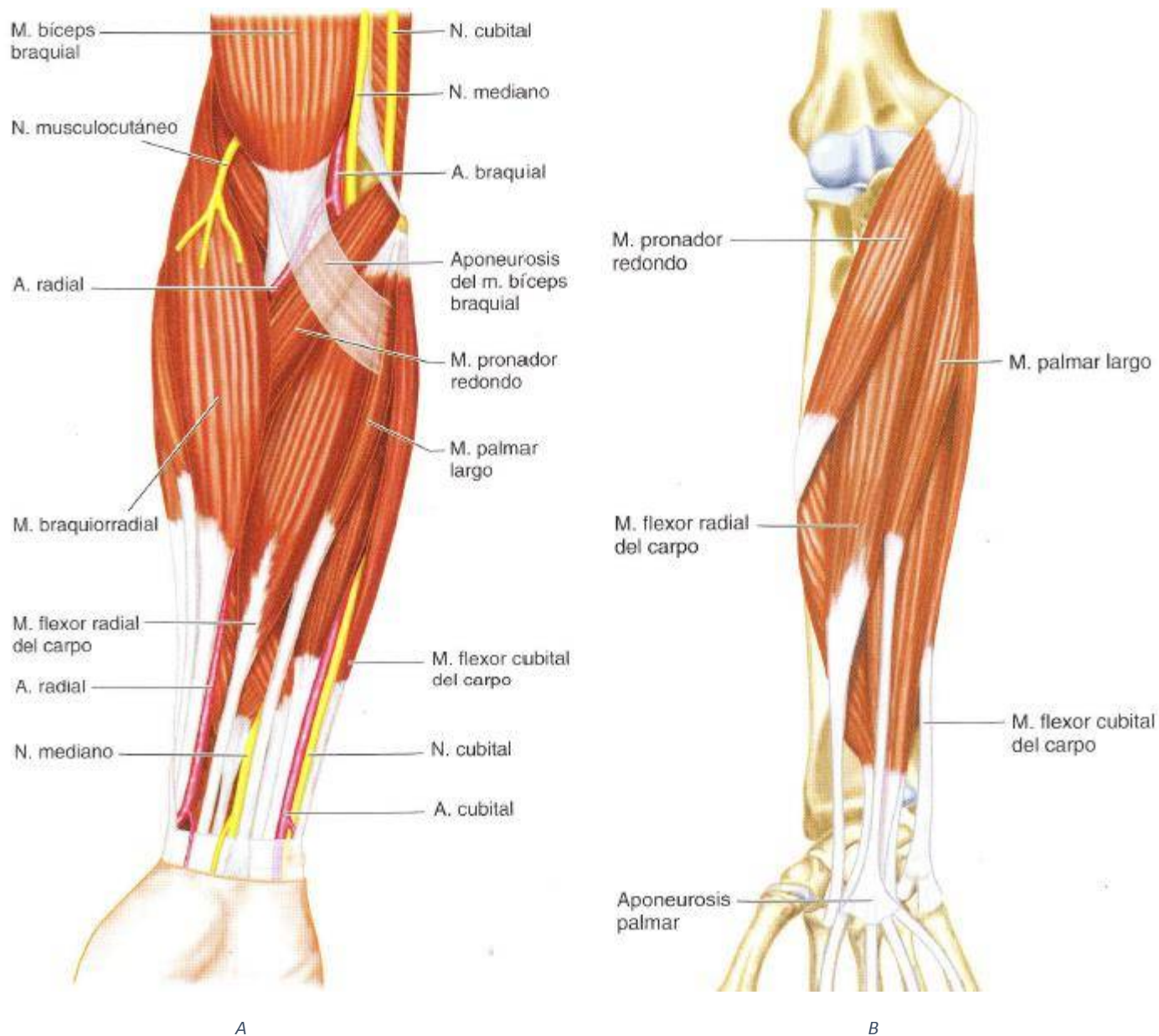


Figura 2.7 **A.** Antebrazo derecho. Vista anterior. Plano muscular superficial. **B.** Antebrazo derecho. Vista anterior. Primer plano muscularl [20].

2.3 Movimientos de las articulaciones (codo y hombro).

Los movimientos que pueden realizar los seres humanos con su miembro superior son flexión, extensión, rotación lateral, rotación medial y circunducción. Estos movimientos se muestran en la (Figura 2.8)

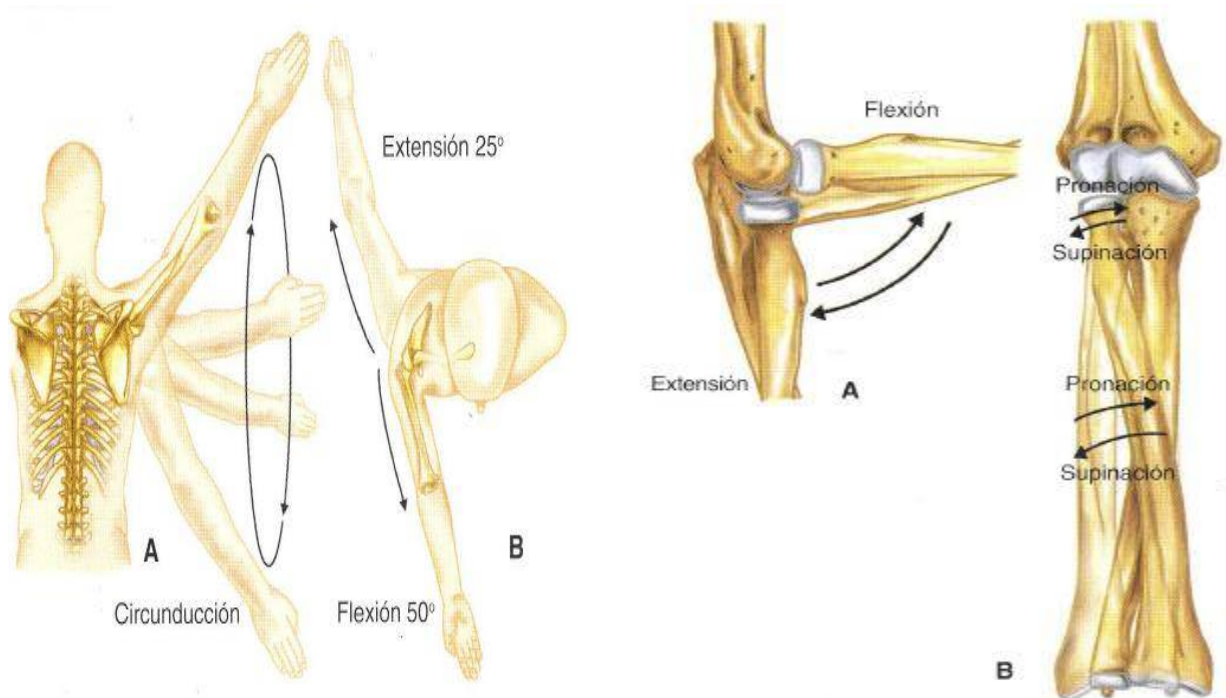


Figura 2.8 Movimientos del hombro. **A.** Vista posterior. Circunducción del brazo. **B.** Vista superior. Flexión o anteversión y extensión o retroversión del brazo. Movimientos del codo. **A.** Flexión y extensión del antebrazo, vista lateral. **B.** Pronación y supinación del antebrazo, vista anterior [20].

2.4 Artrogriposis Múltiple Congénita.

La Artrogriposis Múltiple Congénita (AMC) es una enfermedad rara que ocurre aproximadamente en uno de cada 3,000 nacimientos. Esta enfermedad consiste en articulaciones o coyunturas curvas o en forma de gancho y un alcance de movimiento limitado en las articulaciones o coyunturas de las manos, las muñecas, las rodillas, los pies, los hombros y las caderas. La mayoría de los niños(as) con AMC tienen una inteligencia y un sentido del tacto normal.

Nombre Completo: Artrogriposis Múltiple Congénita

- Artro = articulaciones o coyunturas
- Gripo = curvada
- Múltiple = de diferentes formas
- Congénita = está presente al nacer

La Artrogriposis también es conocida como Contracturas Múltiples Congénitas

- Contracturas = movimiento limitado de las articulaciones o coyunturas
- Múltiples = muchas
- Congénita = de nacimiento

En algunos casos sólo algunas de las articulaciones o coyunturas son afectadas y el alcance de movimiento es casi normal. En casos severos, muchas de las articulaciones o coyunturas son afectadas, incluyendo, la quijada y la espalda.

La forma más común es Amioplastia (falta de formación muscular congénita).

- A = falta de
- Mio = músculo
- Plasia = desarrollo o crecimiento anormal

Esta condición consiste en contracturas múltiples en todas las extremidades. Las contracturas de las articulaciones o coyunturas son a menudo severas y afectan las mismas articulaciones o coyunturas en ambas extremidades [21].

2.4.1 Clasificación

La AMC se puede clasificar de diversas formas, atendiendo a diversos patrones como los siguientes:

Según la afección de las extremidades.

- Afección de extremidades sin otras alteraciones
- Afección de extremidades con otras anomalías.
- Afección de extremidades con deterioro neurológico.

La Artrogriposis se clasifica normalmente en dos grupos:

1- Clásica o Amioplastia

2- Artrogriposis distal

Se presenta de las siguientes formas:

- Cara redonda
- Hemangioma facial frontal
- Micrognatia
- Afección simétrica
- Extremidades sin pliegues

Tabla 2.3. Afecciones en las articulaciones.

Articulación	Afección	Articulación	Afección
Hombro	Rotula interna Aducción	Cadera	Luxada
Codo	Extensión Radio Luxado	Rodilla	Flexionada Extendida
Mano	Flexión Desviación cubital	Pie	Equinovaro severo Contracturado
Dedos	Rígidos Pulgar en la palma	Columna	Escoliosis (35%) Paralítica

Tabla 2.4. Afectaciones más frecuentes.

Extremidades Superiores	Extremidades inferiores
<ul style="list-style-type: none">• Camptodactilia• Hipoplasias• Ausencia de pliegues• Dedos entrecruzados• Desviación cubital de la muñeca	<ul style="list-style-type: none">• Pie equinovaro• Calcáneo valgo• Astrágalo vertical• Metatarso aducto

2.4.2. Manifestaciones Clínicas

Las manifestaciones clínicas de la enfermedad se hacen evidentes de la siguiente manera:

- Rigidez articular múltiple
- Intelecto generalmente normal
- Extremidades alargadas y/o deformes
- Falta pliegues cutáneos.
- Luxación articular.
- Escoliosis

[22]

2.4.3 Causas

En la mayoría de los casos la causa de esta afección no puede ser identificada. Las articulaciones o coyunturas que carecen de movilidad antes del nacimiento pueden resultar en contracturas de las articulaciones o coyunturas. Cuando las articulaciones o coyunturas no tienen movimiento por un período de tiempo, se desarrolla un tejido

conectivo extra. Este tejido fija la articulación o coyuntura en una posición rígida o cerrada. Esto también ocasiona que los tendones que conectan a las articulaciones o coyunturas no se estiren a su medida normal, haciendo difícil el movimiento normal de las articulaciones o coyunturas.

Las causas para la limitación en el movimiento de las articulaciones o coyunturas son:

- Los músculos no se desarrollan apropiadamente.
- Trastornos musculares

[21]

2.5 Terapia Ocupacional

La tendencia que existe y que ha brindado muy buenos resultados a la hora de atacar problemas de movilidad de extremidades en personas con afectaciones, es mediante un enfoque multidisciplinario donde la terapia física y la ocupacional juegan papeles fundamentales en el proceso de rehabilitación.

Según definición de la American Occupational Therapy Association (AOTA) de 1986, la Terapia Ocupacional se basa en "el uso terapéutico en las actividades de autocuidado, trabajo y juego para incrementar la función independiente, mejorar el desarrollo y prevenir la discapacidad. Puede incluir la adaptación de las tareas y el entorno para lograr la máxima independencia y mejorar la calidad de vida".

En Terapia Ocupacional se contemplan varias áreas de ocupación:

- Actividades de la vida diaria, de auto-mantenimiento o de auto-cuidado.
- Actividades productivas, que incluyen todas aquellas actividades, remuneradas o no, que suponen una aportación a la sociedad.
- Actividades de ocio.

El terapeuta ocupacional aborda al ser humano como un ser integral, utilizando como medios de base, la participación directa en ocupaciones y la relación terapéutica [23]. El entrenamiento en hábitos y programas terapéuticos ideados para crear oportunidades de participación en ocupaciones que fueran placenteras, creativas y educacionales constituye base fundamental en el desarrollo de esta especialidad [24].

En los últimos años la rehabilitación robótica se ha convertido en un campo emergente y las potencialidades de las terapias asistidas por robots han sido ampliamente investigadas [25] [26] [27] [28] [29]. Por otra parte, la terapia asistida por robot permite a los sujetos realizar movimientos activos, promoviendo la neurogénesis y neuroplasticidad, optimizando la recuperación funcional de la afectación neurológica. El robot es capaz de proveer una dosificación de terapia cuantificable en intensidad y repetitividad para su evaluación, permitiendo esto poder mejorar la recuperación funcional de los miembros afectados [30] [31].

Estos principios básicos tienen un profundo impacto a la hora de escoger y aprobar técnicamente la estructura mecánica a utilizar y las estrategias de control a implementar.

Una de las principales características que tiene que asegurar el sistema robótico para rehabilitación es un alto grado de docilidad, de forma tal que el usuario lo pueda mover percibiendo una baja impedancia mecánica [32], con el fin de no obstaculizar los movimientos voluntarios de los pacientes ejecutando una tarea específica y para no perturbar sus estrategias motoras naturales.

De acuerdo con investigaciones recientes en relación a interacción física humano-robot, el nivel de docilidad del robot tiene que ser definido no sólo para cumplir con restricciones "biomecánicas" ("fuerte"), sino también para hacer frente a las limitaciones "suaves" o "intrínsecas", que son de origen neural. Estas restricciones blandas son

impuestas por el cerebro humano para resolver las redundancias cinemáticas (mediante la reducción de los grados de libertad a los necesarios) [32].

2.6 Algunos de los robots diseñados para terapia de rehabilitación

Durante los últimos años se han ido diseñando robots con fines de brindar terapia de rehabilitación a pacientes con diversas incapacidades motoras; a continuación se mencionan algunos.

2.6.1 BUAP

Un grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, desarrolló un prototipo de robot con múltiples aplicaciones y alto desempeño. Este prototipo copia las fuerzas, trayectorias y posiciones específicas para practicar fisioterapia o asistir a personas incapacitadas [33].



Figura 2.9 Robot diseñado para rehabilitación BUAP [33].

2.6.2 Mit-Manus

En [25] se presenta el MIT-manus como un robot de ayuda a la rehabilitación. El robot es capaz de proporcionar movimiento pasivo continuo, fuerzas sensoriales y entrenamiento senso-motriz.



Figura 2.10 Robot MIT-manus rehabilitación [25].

2.6.3 GENTLE/s

Según [34] presenta el desarrollo de un sistema de 6 grados de libertad para rehabilitación de los miembros superiores.



Figura 2.11 Sistema GENTLE/s [34].

El sistema utiliza la robótica, la tecnología de la realidad virtual y la terapia física. Fue probada con pacientes con daño cerebro vascular y los resultados demostraron un rendimiento fiable. El robot es capaz de proporcionar movimiento pasivo continuo, fuerzas sensoriales y entrenamiento senso-motriz para la trayectoria.

2.7 Algunas aplicaciones de robots industriales en rehabilitación

Los robots industriales fueron pensados para aumentar la productividad en la realización de tareas repetitivas, de gran precisión o en ambientes hostiles que representan un gran peligro para el hombre. Con el paso del tiempo han ido evolucionando y se ha ido aprovechando la versatilidad que pueden tener para el cumplimiento de tareas alternativas como por ejemplo asistencia en terapias de rehabilitación.

2.7.1 REHAROB

El proyecto REHAROB [18] fue el primero en el mundo que buscó utilizar robots industriales en fisioterapia de pacientes que han sufrido un evento de EVC. A partir de un consorcio internacional, integrado por organizaciones de Hungría, Reino Unido, Alemania y Bulgaria, se empezó a trabajar en el desarrollo de un sistema robótico, comercialmente viable, de dos brazos. El objetivo era suministrar terapia de movimientos tridimensionales personalizados de los miembros superiores para pacientes con EVC.

El sistema REHAROB fue desarrollado en torno a dos robots industriales ABB cooperativos que podían programarse mediante una demostración (entrada de instrucciones de enseñanza) utilizando mediciones de fuerza/par. Estos robots son manipuladores reprogramables, capaces de mover una pieza o herramienta a lo largo de una trayectoria prescrita con una velocidad y orientación definidas.

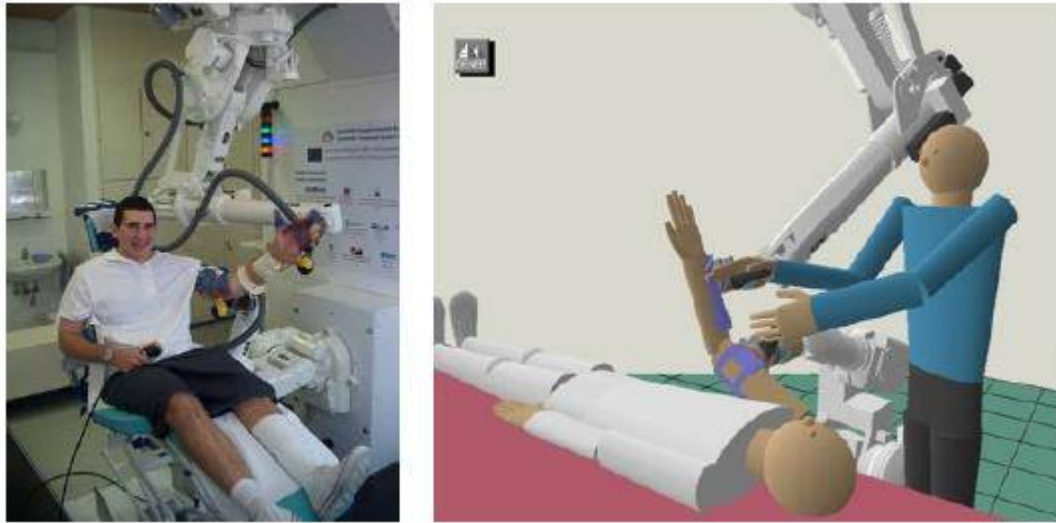


Figura 2.12 Sistema REHAROB [18].

Teniendo en cuenta la seguridad del paciente y del operador, los componentes elegidos para el sistema terapéutico REHAROB son dispositivos fabricados en serie, fiables y certificados; además el sistema fue complementado con varios dispositivos de seguridad redundantes. Además de estas medidas, el equipo del proyecto REHAROB redujo la máxima velocidad de los robots, que pasó de 3 m/s a 0,25 m/s.

La terapia mediante robots se configura en tres fases principales: el fisioterapeuta programa los robots demostrando una serie de ejercicios básicos hechos en presencia del paciente. A continuación se editan los ejercicios individualmente, adecuándolos a las necesidades del paciente, y se combinan para producir un programa terapéutico personalizado. Finalmente, los robots reproducen el programa, permitiendo al fisioterapeuta cambiar el orden, la velocidad y el número de repeticiones de cada fase.

Se realizaron ensayos clínicos del sistema terapéutico REHAROB, de conformidad con lo estipulado por la Declaración de Helsinki y por comités locales y nacionales de ética e investigación científica. El primer ensayo, que tuvo una duración de cuatro meses,

demonstró que la función del sistema de fisioterapia robótica es segura y fiable, que los pacientes no tienen miedo a los robots [35].

Todos los participantes mostraron una mejora significativa de su estado, de acuerdo con diversos indicadores de deterioro y discapacidad. A juicio de los pacientes, los ejercicios robóticos eran tan eficaces y relajantes como la tradicional fisioterapia hecha por el fisioterapeuta en persona. En ese proyecto, se desarrolló un sistema basado en un robot industrial adaptado para ayudar a proporcionar terapias de rehabilitación [35]. Los modos de operación del sistema para el movimiento son los siguientes:

- Movimientos pasivos. El robot impone las trayectorias a seguir por la extremidad superior lesionada, sin posibilidad de ser alteradas.
- Movimientos activos asistidos. El humano es capaz de modificar las trayectorias que impone el robot.
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en los movimientos para que el paciente realice su máximo esfuerzo.
- Movimientos en espejo. Una trayectoria descrita por la extremidad superior no lesionada es capturada por medio de un sistema especial para captura de movimiento. Después, la trayectoria es seguida por el robot tal como fue capturada o en espejo para la extremidad superior con hemiparesia, con la posibilidad de ser alterada.

2.7.2 MIME

El dispositivo robótico MIME [36], del inglés Mirror Image Movement Enabler o dispositivo habilitador de movimientos en espejo, fue desarrollado para la rehabilitación de hombro y codo en pacientes que han sufrido algún evento de EVC.

El dispositivo MIME basa su funcionamiento en el uso del manipulador industrial de 6 grados de libertad PUMA 560 de Unimation Inc., el cual se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13 Dispositivo robótico MIME [36].

El paciente se sienta en una silla de ruedas frente a una mesa de altura regulable y el miembro paralizado es sujetado a una órtesis de muñeca-antebrazo, que permite terapia de rehabilitación en espejo con respecto al miembro sin lesión. Los 6 grados de libertad del robot permiten que el antebrazo se mueva en una amplia gama de posiciones y orientaciones en el espacio tridimensional. La interacción paciente-robot se hace a través de un sensor de fuerza/par de 6 ejes y es capaz de realizar cuatros diferentes movimientos asistidos por el robot:

- Movimientos pasivos. El robot se encarga de mover la extremidad superior lesionada hacia el objetivo, con una trayectoria predeterminada.
- Movimientos activos asistidos. El paciente trabaja en conjunto con el robot para realizar los movimientos necesarios para llegar a su objetivo.
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en la dirección del movimiento deseado para que así el paciente llegue a la meta con máximo esfuerzo.
- Movimiento bilateral. Este sistema es capaz de reproducir, en forma de espejo, el movimiento continuo de un miembro no paralizado.

Los resultados de las pruebas clínicas son evidencia de que el programa implementado para el movimiento asistido por robots tiene ventaja con respecto a un programa intensivo con una terapia tradicional, principalmente en la reducción de la tasa de deterioro y en medidas cuantitativas del movimiento y fuerza [36].

3. Implementación del sistema de rehabilitación

En este capítulo se describen los componentes del sistema robótico de rehabilitación. También se describe como utilizarlo durante la captura de trayectorias así como durante la interacción humano-robot y el posterior análisis de la información. Esta información fue fundamental para lograr consolidar una rutina de procedimientos a implementar en el transcurso de las sesiones de terapia realizadas.

3.1 Componentes del sistema de rehabilitación

Para la implementación del sistema de rehabilitación se hizo uso del robot Fanuc LR Mate 200iC, el cual es un manipulador industrial de 6 grados de libertad, lo que lo hace atractivo para desarrollar el tipo de tareas mencionadas en un espacio tridimensional. El robot puede ser programado en línea desde un control de enseñanza o externamente mediante la programación de rutinas en lenguaje Karel. Para esto se hace uso de los siguientes equipos que lo componen e interactúan en conjunto con el terapeuta y el usuario.

- a) Robot Industrial marca FANUC LR Mate 200 iC.
- b) Controlador FANUC R-30iA Mate.
- c) Sensor de Fuerza marca FANUC FS-10iA.
- d) *Teach Pendant* FANUC LTD.
- e) Terminal de enseñanza
- f) Computadora marca DELL OPTIPLEX 745.

3. implementación del sistema de rehabilitación

La serie LR Mate 200iC de FANUC Robotics es una familia de robots pequeños de seis juntas con una base para su fácil instalación ya sea horizontal como verticalmente. Estos están diseñados para ofrecer el mejor desempeño, una alta precisión, operación a alta velocidad. El tamaño de la base, perfil delgado del brazo, peso ligero, mayor destreza, alta velocidad sostenida y superior precisión de posicionamiento hacen del robot la solución perfecta para incontables aplicaciones industriales, comerciales y alternativas.



Figura 3.1. Robot Industrial marca FANUC LR Mate 200 iC. Sensor de Fuerza marca FANUC FS-10iA.

Tabla 3.1 Características del Robot Industrial marca FANUC LR Mate 200 iC.

Ejes	Carga Máxima	Alcance	Repetitividad	Peso
6	5 Kg	704 mm	±0.02 mm	0.56 Kg

3. Implementación del sistema de rehabilitación.

Tabla 3.2 Características del Robot Industrial marca FANUC LR Mate 200 iC.

Junta	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Velocidad (grados/seg)	350	350	400	450	450	720
Rango de movimiento (grados (°))	360	200	388	380	240	720

En el extremo final del robot, o face plate, se cuenta con un sensor de fuerza Fanuc modelo FS-10iA. El mismo tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 3.3 Características del sensor de fuerza FANUC FS-10iA (Tomado de FANUC Force Sensor Data sheet).

Items	FS-10iA
Dimensiones (mm)	90 x 43
Peso (kg)	0.56
Carga Nominal	
Fx, Fy, Fz (kgf)	10
Mx, My, Mz (kgf *cm)	80
Tolerancia a sobrecarga estática	
Fx, Fy, Fz (kgf)	160
Mx, My, Mz (kgf *cm)	1280
Resolución	
Fx, Fy, Fz (kgf)	0.040
Mx, My, Mz (kgf *cm)	0.160
Precisión	
Fx, Fy, Fz	2% o menos
Mx, My, Mz	

3. Implementación del sistema de rehabilitación

El sensor de fuerza FANUC está construido exclusivamente para robótica, optimizado desde su diseño de tamaño pequeño y robustez. Puede tener varias aplicaciones que facilitan el trabajo con el robot, como son:

- Seguimiento de contorno: Aplicando una fuerza constante en la superficie de una parte o pieza mientras la herramienta o efector final se mueve a lo largo de la trayectoria de la misma realizando una operación. La programación de las rutinas fuerzas en contorno incluyen velocidad de aproximación, fuerza de contacto, fuerza de empuje e información de la dirección del empuje.
- Acoplamiento de fase: Realiza acoplamientos variables tipo spline antes de una operación de inserción. Las rutinas de acoplamiento de fase incluyen fuerza de contacto inicial, fuerza de empuje, torque de acoplamiento de fase, velocidad de rotación, profundidad del acoplamiento de fase y el tiempo del acoplamiento.
- Acoplamiento de cara: Provee un alineamiento uniforme entre el robot y la superficie de contacto de un subensamble.
- Empuje constante: Provee la fuerza de empuje uniforme mientras se realiza el montaje o la unión de una pieza a un subensamble.
- Con diagnóstico incorporado: Monitoreo de los datos del sensor que muestra un mensaje de alarma para reemplazar el sensor si los datos que arroja están fuera de rango.

La integración de los seis grados de libertad del robot con el sensor de fuerza trae como resultado un robot inteligente que puede “sentir”, esta característica lo hace adecuado para realizar las tareas más demandantes.

El robot cuenta con un controlador FANUC R-30iA Mate que cuenta con las siguientes características:

- Sencilla carga y descarga de programas del robot al servidor.
- 28 entradas y 24 salidas como configuración estándar
- 16 o 32 módulos de conexión posibles con un rack externo

3. Implementación del sistema de rehabilitación

- Tipos disponibles de I/O;
- DI/DO (digital)
- RI/RO en el brazo del robot (digital)
- GI/GO (I/O digital agrupada)
- UI/UO (I/O digital para control remoto por PLC externo)
- AI/AO (analógica)
- Controlador R30iA Mate Open Air tamaño PC industrial



Figura 3.2 Controlador FANUC R30iA Mate.

El iPendant con que cuenta el robot FANUC es un teach pendant inteligente y está disponible como equipo estándar. El teach pendant permite programar rutinas de movimientos al robot, así como escoger las rutinas ya guardadas en el controlador para ejecutarlas. También en la pantalla informa que está ejecutando el robot en tiempo real.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

El teach pendant cuenta con las siguientes características:

- Vista del estado de equipos periféricos y de servidores de páginas web html de otros robots (cuando esté disponible)
- Pantalla de color, multi-ventanas
- Pantalla personalizable
- Más fácil trabajar con el robot, aumenta la productividad
- Puerto USB
- Ergonómico
- Peso reducido
- Leds que indican “Power” y “Fault”
- Cambio de Grupo

La terminal de enseñanza desarrollada en [37] cuenta con un mango donde es posible presionar un botón que tiene la función de “hombre muerto” y 4 botones tipo “push” que se utilizan como interfaz de comunicación entre el terapeuta y el controlador. Para este proyecto de tesis solo se utilizan dos de los cuatro botones con que cuenta la terminal conectada al controlador, el primer botón permite al terapeuta cambiar mediante la interacción física de manera rápida el tipo de movimiento del robot ya sea: movimiento total (posición y orientación) o únicamente posición u orientación según se desee (Figura 3.3). A su vez en la pantalla del teach pendant se va informando al operador el tipo de movimiento y la acción que se está ejecutando, el otro botón es para indicar el guardado de trayectorias que el terapeuta ha establecido durante el guiado del robot a través del control de impedancia, por último se presiona el botón que indica la finalización del programa.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

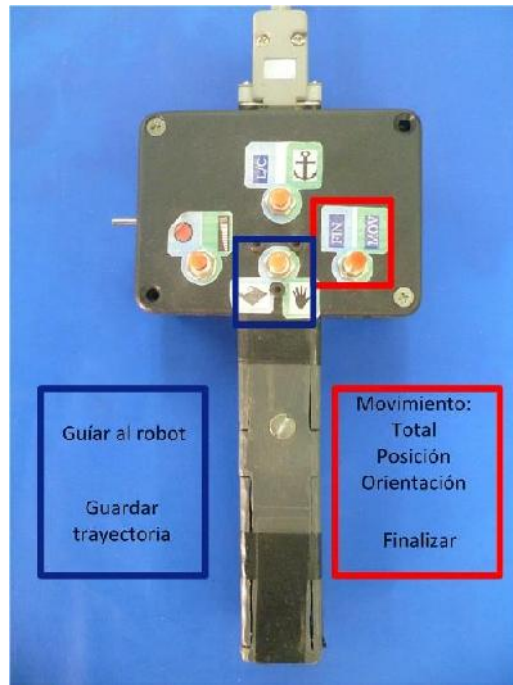


Figura 3.3 Terminal de enseñanza [16].

Para este proyecto de tesis se contó con una computadora de escritorio marca DELL OPTIPLEX 745 (Figura 3.4) que se conecta al robot haciendo uso de una red local del laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la U.A.S.L.P. Esto es posible mediante la implementación de un protocolo TCP-IP, haciendo uso de la comunicación por sockets, con el objetivo de guardar y procesar toda la información de los experimentos, así como el posterior procesamiento.



Figura 3.4 Computadora de escritorio marca DELL OPTIPLEX 745.

3.2 Control de impedancia

El control de la interacción física entre el robot y su entorno es crucial para la exitosa ejecución de un gran número de tareas prácticas donde el efector final del robot tiene que manipular un objeto o desarrollar alguna operación sobre una superficie [38]. Durante el contacto, el ambiente puede contener restricciones dentro de la trayectoria a seguir por el efector final, denotadas como *restricciones cinemáticas*. Esta situación, correspondiente al contacto con una superficie rígida, se conoce como **restricción de movimiento**. Las tareas de contacto pueden tener características inerciales, disipativas o elásticas y en cualquier caso, el uso del control de movimiento puro es propenso a fallas, por lo que surge el concepto de **control de impedancia** [14].

Hogan [39] pretende el desarrollo de un modelo dinámico que represente la interacción entre una admitancia, la cual es representada por el entorno de trabajo y una impedancia, comportamiento que será adquirido por el robot. Este enfoque de manipulación, denominado **control de impedancia**, pretende que la interacción dinámica entre el manipulador y su entorno sea modulada, regulada y controlada por la variación de dicha impedancia. [14].

En [40], se presentan dos enfoques de control de impedancia, por retroalimentación de torque y por retroalimentación de posición. A diferencia del control de impedancia simple, en este último enfoque se necesita de una retroalimentación de fuerzas para generar comandos de posición en el controlador interno del robot. Esta forma de control se basa en el control de posición preciso del manipulador. Al control de impedancia propuesto se agrega un lazo de control adicional a la posición controlada por el manipulador. Considerando la relación entre esfuerzo y movimiento dado por la trayectoria nominal del efector final con la rigidez, amortiguamiento e inercia considerados [14].

3. Implementación del sistema de rehabilitación

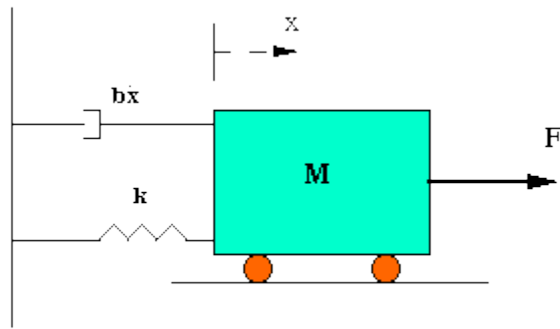


Figura 3.5 Sistema masa resorte amortiguador.

Para llevar a cabo los ejercicios de rehabilitación por medio del robot industrial, es necesario poder controlar tanto la posición como la fijación de la orientación del efector final. El robot se asemeja a un sistema idealizado masa-resorte-amortiguador en la que le corresponde la relación dinámica mediante la cual se genera la respuesta para cada grado de libertad cartesiano en traslación, ante la interacción del efector final y su entorno. Las fuerzas y torques son sensados explícitamente por el sensor de fuerza FS-10iA y son expresadas de manera discreta, los comandos de posición son expedidos para el controlador de lazo interno. Se crea un vector de ajuste de posición mediante el filtrado de las medidas de interacción de fuerzas y torques obteniendo como resultado el vector de ajuste de posición que permite generar la nueva trayectoria del robot manipulador [16].

En el proceso se emplea el método de resolución numérica Runge-Kutta de segundo orden. El parámetro M_d es la matriz de inercia, B_d es la matriz de amortiguamiento y K_d es la matriz de rigidez, dichas matrices se consideran diagonales, ya que esto permite que cada grado de libertad pueda ser controlado independientemente, obteniendo la respuesta del sistema de control para cada grado de libertad mediante la resolución de la ecuación diferencial de segundo orden (3.1).

$$F_e = M_d \ddot{x}_a + B_d \dot{x}_a + K_d x_a \quad (3.1)$$

3. Implementación del sistema de rehabilitación

Para el caso de este trabajo de tesis se controla la posición manteniendo el movimiento en orientación restringido. Se implementa el control de impedancia desarrollado en [14] en lenguaje karel para cada uno de los grados de libertad del robot.

Resolviendo las ecuaciones 3.1 por el método numérico de Runge Kutta de segundo orden se obtiene la siguiente solución.

$$x_a = x_0 + \tau \left(\dot{x}_0 + \frac{\tau}{2M_d} (F_e - B_d \dot{x}_0 - K_d x_0) \right) \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_a = \dot{x}_0 + \frac{\tau}{M_d} \left(F_e - B_d \left(\dot{x}_0 + \frac{\tau}{2M_d} (F_e - B_d \dot{x}_0 - K_d x_0) \right) \right) - K_d \left(x_0 + \frac{\tau \dot{x}_0}{2} \right) \quad (3.3)$$

Donde las variables x_0 y \dot{x}_0 representan las condiciones iniciales de posición y velocidad de cada iteración. M, B y K son los parámetros de impedancia de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente, F_e representa la fuerza de interacción y τ el tiempo de muestreo del sistema o paso de iteración.

Al solucionar el sistema se obtienen las posiciones x_a de ajuste, las cuales se agregan a la trayectoria nominal x_d para generar un comando de posición global x_d como se muestra en la ecuación 3.4.

$$x_e = x_a + x_d \quad (3.4)$$

La entrada de fuerza al sistema F_e está definida por la fuerza de referencia o fuerza deseada F_d menos la fuerza de interacción con el entorno F_{int} como se puede apreciar en la ecuación 3.5.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

$$F_e = F_d + F_{int} \quad (3.5)$$

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama a bloques del sistema.

Para efectos de este proyecto se propone implementar y evaluar que tan viable será la utilización de este control de impedancia quitándole el valor de rigidez del resorte para cumplir tareas de enseñanza del robot durante la realización de las terapias, como posible mejora al sistema de rehabilitación.

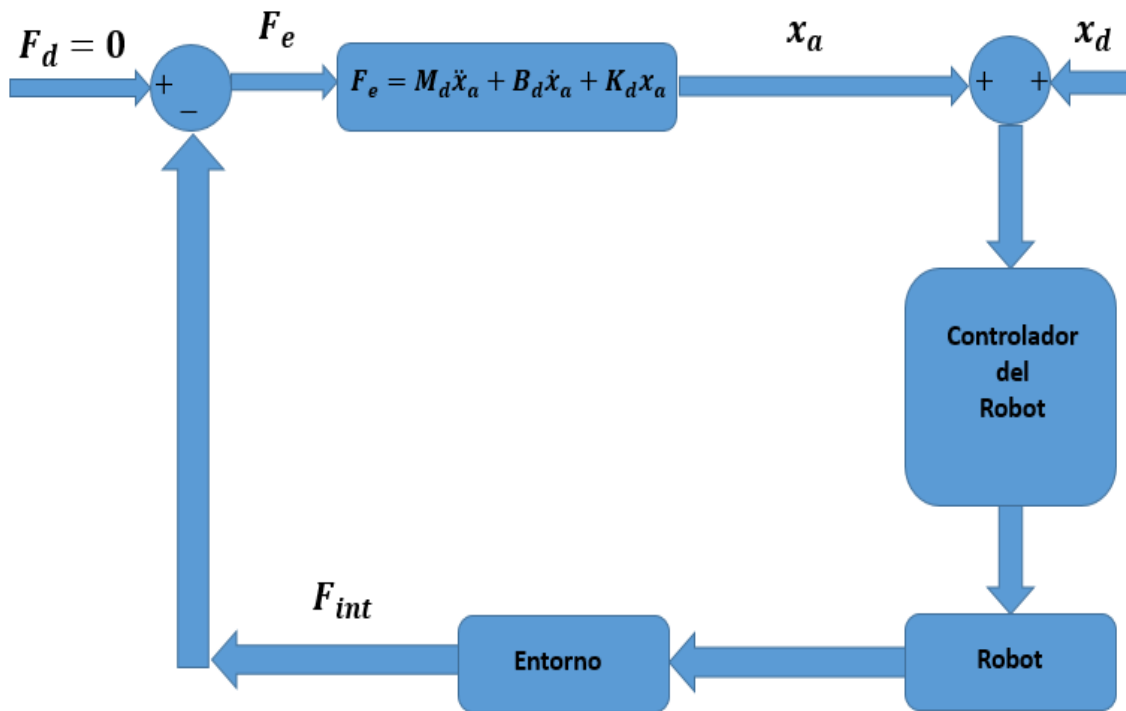


Figura 3.6 Diagrama a bloques de sistema de control de impedancia.

El sistema de rehabilitación robótica, como ya se había mencionado, se basa en especificar los parámetros de la impedancia. En el actual proyecto de tesis se sintonizaron los parámetros para cada movimiento de la terapia. La selección de dichos parámetros se realiza por un método heurístico, probando y eligiendo el que mejor

3. Implementación del sistema de rehabilitación

comportamiento presente en el robot para su aplicación en lo que a terapias de rehabilitación se refiere.

Por tratarse de un sistema de segundo orden, el tipo de respuesta está dado por el valor de los parámetros de impedancia, se define el coeficiente o factor de amortiguamiento ξ como:

$$\xi = \sqrt{\frac{B_d^2}{4M_dK_d}}$$

De acuerdo a lo anterior el tipo de respuesta del sistema puede presentar diferentes casos los cuales se describen a continuación (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Tipo de respuesta del Sistema según factor de amortiguamiento.

Caso	Tipo de respuesta	Descripción
$\xi > 1$	Sobreamortiguada	El sistema no presenta oscilaciones ante una entrada de impulso o un escalón.
$\xi = 1$	Críticamente amortiguada	El sistema no presenta oscilaciones ante una entrada de impulso o un escalón, pero es difícil encontrarlo en la práctica debido a la precisión numérica de los parámetros.
$\xi < 1$	Subamortiguada	El sistema presenta oscilaciones al someter al sistema a una entrada de impulso escalón.
$\xi = 0$		El sistema presenta oscilaciones de forma permanente.

De acuerdo a los casos anteriores se eligieron parámetros de impedancia de tal forma que cumplan con el caso $\xi > 1$ debido a las características ya mencionadas, se simula en Matlab para un eje cartesiano la respuesta a un escalón unitario de 1 Newton (N) para cada movimiento.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

Se realizó una prueba simulada en Matlab para observar la respuesta del controlador ante una entrada escalón de fuerza de 1N para un eje cartesiano (Figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10). Esta prueba se implementó con los parámetros propuestos para el controlador de impedancia de masa, amortiguamiento, rigidez y factor de amortiguamiento (M_d, B_d, K_d, ζ_d). Los parámetros se muestran en la tabla corresponden solo al movimiento de posición ya que es el único movimiento que interviene para la captura de dicha trayectoria; los valores seleccionados se muestran en la tabla 3.5.

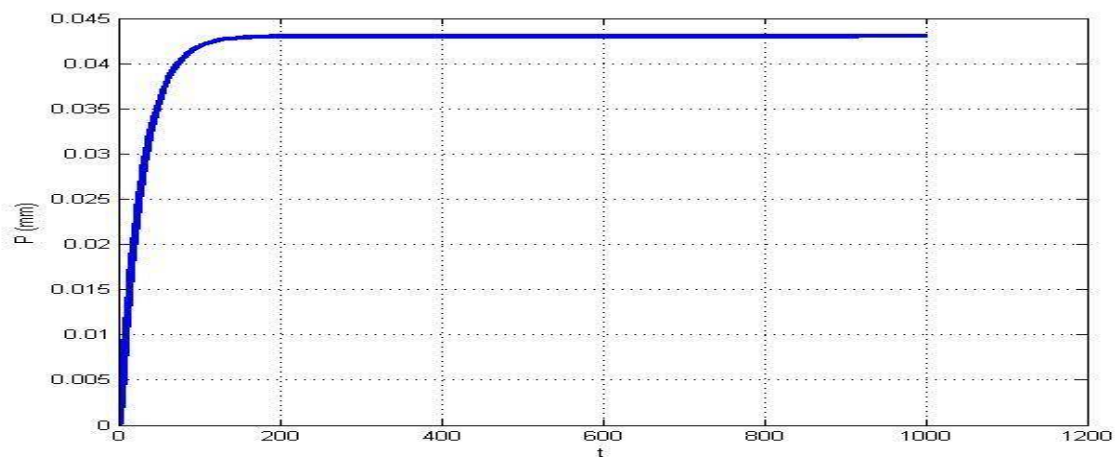


Figura 3.7. Respuesta en posición del sistema a una entrada de fuerza unitaria.

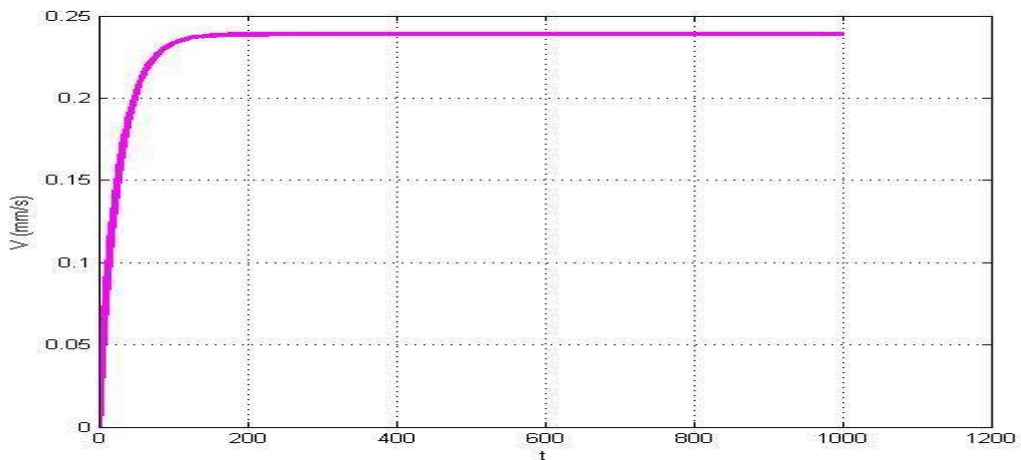


Figura 3.8. Respuesta en velocidad del sistema a una entrada de fuerza unitaria.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

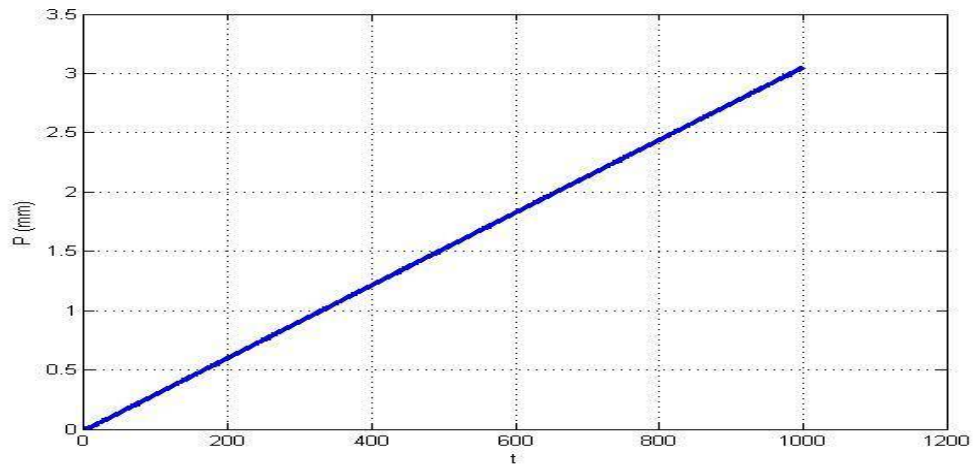


Figura 3.9. Respuesta en posición del sistema a una entrada de fuerza unitaria para Experimento 4 con $K=0$.

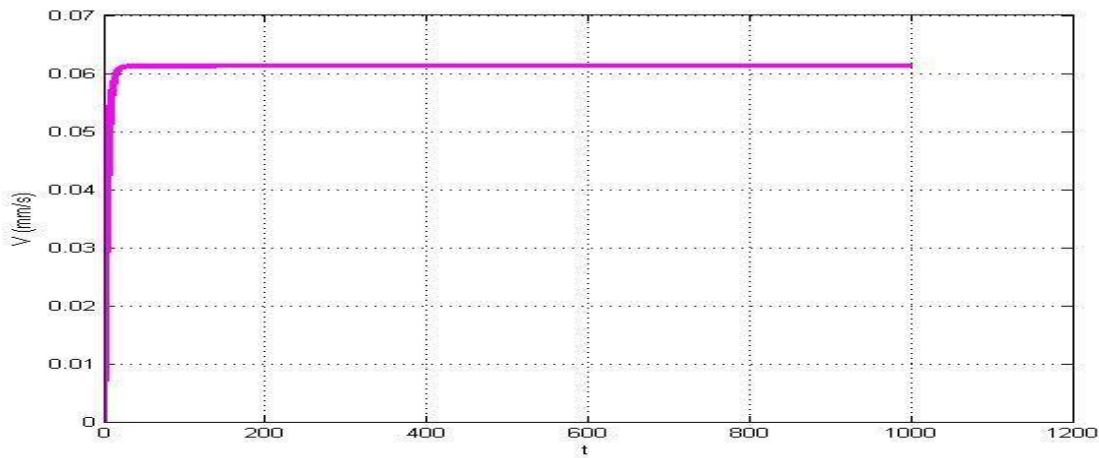


Figura 3.10. Respuesta en velocidad del sistema a una entrada de fuerza unitaria para Experimento 4 con $K=0$.

Tabla 3.5 Parámetros de impedancia determinados.

M_d	B_d	K_d	ζ
30	160	200	1.0328

La tabla 3.6 muestra la nomenclatura de los parámetros así como las unidades correspondientes de los movimientos de traslación.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

Tabla 3.6 Parámetros de Impedancia.

Movimiento de traslación		
Nomenclatura	Símbolo	Unidades
Masa	M	Kg
Rigidez	K	N/m
Amortiguamiento	B	$N.s/m$
Fuerza externa	F	N

Así, el enfoque de control de impedancia basado en posición se fundamenta en el control preciso de posición del manipulador, dentro del lazo de control de impedancia. Apoyándonos en la propuesta de [41], sabiendo que el robot presenta una arquitectura cerrada y la experiencia que tiene el grupo de trabajo con este esquema de control, es que se realizó esta investigación empleando el control de impedancia basado en retroalimentación de posición.

El diagrama de flujo que se muestra en la Figura 3.7 es la parte principal del algoritmo para implementar el controlador de impedancia en el lenguaje Karel.

Primero se indica una posición deseada, para lograr el seguimiento de una trayectoria preestablecida durante la ausencia de contacto con su entorno. Luego se obtienen las fuerzas resultantes de la interacción humano-robot, el cual permite obtener una posición de ajuste del efector final del manipulador. Por último se actualiza la posición a la que se moverá el manipulador, la cual se obtiene de restar la posición deseada menos la posición obtenida por el filtrado de fuerza. Este procedimiento es cíclico y se repetirá hasta que sea completada la tarea deseada, en este caso la trayectoria de rehabilitación.

3. Implementación del sistema de rehabilitación

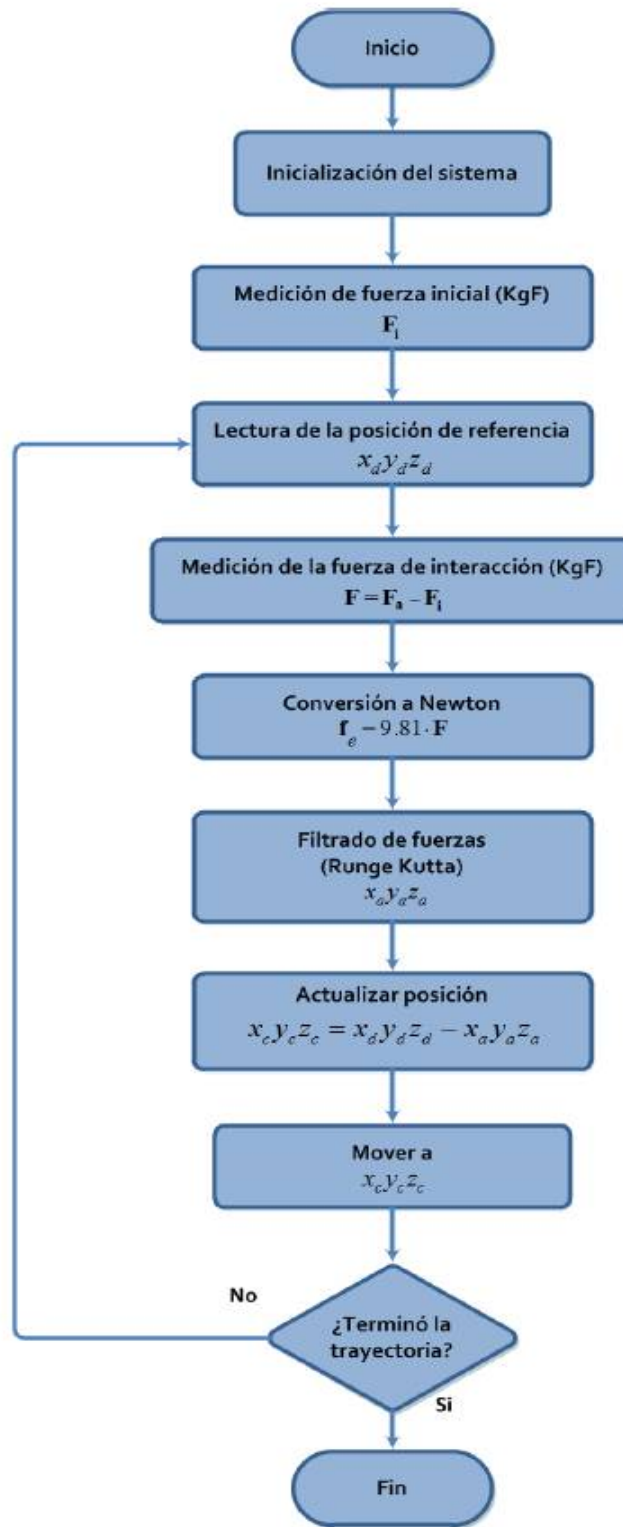


Figura 3.11 Algoritmo del controlador de impedancia programado en karel. (Tomado de [14])

3.3 Sistema de captura de trayectorias

En trabajos anteriores [14] para la captura de trayectorias se utiliza el equipo 3D Guidance trakStar, que es usado típicamente en aplicaciones de captura de movimiento. Este sistema cuenta con 4 sensores electromagnéticos de posición/orientación independientes, un transmisor y una unidad electrónica de recepción de datos.

Este sistema tiene su principio de funcionamiento basado en la generación de campos magnéticos y su correspondiente medición en los vectores de campo, permitiendo obtener la posición y orientación tridimensional, se encuentra diseñado para aplicaciones que requieren poco alcance en el seguimiento de movimiento [16].

Este sistema presenta las desventajas de ser muy costoso y de ser sensible a interferencias de equipos eléctricos que estén cerca del área de trabajo arrojando resultados incongruentes.

Con el fin de poder adaptar las rutinas de rehabilitación a cada paciente y ofrecer un sistema que sea más viable de implementar con menos gastos se propone el sistema de captura de trayectorias para las terapias de rehabilitación mediante un algoritmo en lenguaje Karel para la comunicación directa con el robot. Esto permite la simplificación del sistema y un ahorro considerable de recurso material al evitar el uso del sistema 3D Guidance trackStar.

Con la implementación de este sistema se hace posible trazar la rutina de rehabilitación guiando al robot bajo el enfoque de control de impedancia y generando el archivo de trayectorias dentro del controlador del robot [16].

Para el sistema de captura de trayectorias se usa la terminal de enseñanza desarrollada en [37]. Para la captura de trayectorias de las rutinas a repetir, es necesario elegir el

3. Implementación del sistema de rehabilitación

tipo de movimiento de solo posición (x,y,z) por medio del botón tipo “push” restringiendo el movimiento del robot en orientación (w,p,r) , ya que el robot consta de seis grados de libertad (6 DOF) permite compensar el giro en la orientación, toda acción elegida con esta terminal de enseñanza se refleja en la pantalla del teach pendant.

Una vez elegido el tipo de movimiento que se va a ejecutar y luego de terminar el terapeuta ha establecido la trayectoria a seguir mediante el guiado del robot (Figura 3.9). Se procede al guardado de la trayectoria mediante el botón destinado para esto y se indica la finalización del programa presionando el botón de finalización.

Una vez terminado ese proceso se obtienen las coordenadas necesarias para la reproducción de la trayectoria a seguir por el robot punto a punto en un archivo de texto en la unidad controladora del robot. Posteriormente, se extraen los datos para utilizarlos como referencia para los movimientos activos-asistidos que se ejecutarán durante la interacción paciente-robot.

Este procedimiento denominado enseñanza del robot permite al terapeuta guiar al robot por la trayectoria que determine necesaria para la interacción paciente robot en la ejecución de rutinas de rehabilitación mediante el enfoque de control de impedancia.



Figura 3.12 Terminal de enseñanza

3. Implementación del sistema de rehabilitación



Figura 3.13. Teach pendant indicando finalización del grabado de la trayectoria.

3.4 Lectura de trayectorias

Ya terminada la etapa de enseñanza del robot las trayectorias generadas son guardadas en su controlador. Se extraen los datos en un archivo de texto para ser utilizados como referencia por el controlador de impedancia durante la interacción paciente-robot.

Mediante programación en Karel se puede modificar el modo de lectura punto a punto o cada cierto número determinado de puntos; así como el número de ciclos que se desee reproducir la trayectoria.

La comunicación del sistema robótico se realiza por una red local del Laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la U.A.S.L.P mediante protocolo TCP/IP,

3. Implementación del sistema de rehabilitación

haciendo uso de la programación por sockets y de un sistema cliente-servidor. En el actual proyecto de tesis el cliente es una computadora de escritorio la cual le hace una petición al servidor, esta petición indica al robot la acción que debe realizar, posteriormente el robot recibe de la PC las posiciones a la que se desea mover el efector final del robot. La lectura de trayectorias a reproducir y comunicación de las mismas al robot se facilita mediante una interfaz gráfica diseñada en Visual Studio C++ que no se modifica. Para este proyecto solo se hizo necesario hacer programas o modificaciones de estos en Karel; tanto para los movimientos del robot como para la lectura de los puntos a reproducir y ciclos de repetición.

3.5 Recolección de Información

Para la recolección de la información se contó con la supervisión y apoyo de una terapeuta experta que colabora con centros de rehabilitación locales como el CREE-SLP.

Se validó el sistema de rehabilitación monitoreando los datos recolectados mediante la captura y análisis de los datos del sensor de fuerza, también tomándose en cuenta el tiempo de completamiento de las rutinas y el seguimiento de trayectorias (tanto la de enseñanza como la de interacción) en la realización de las rutinas de rehabilitación por los pacientes. Estos datos servirán para documentar la evolución de los pacientes mediante el análisis comparativo de las variables controladas y validar la correcta implementación del control de impedancia para cada uno de los movimientos de codo y hombro involucrados en las rutinas de rehabilitación.

3.6 Interacción paciente-robot

Mientras se está llevando a cabo la interacción paciente-robot en una sesión de rehabilitación, el sistema va guiando al paciente por la trayectoria “enseñada”

3. Implementación del sistema de rehabilitación

anteriormente por el terapeuta, dándole la posibilidad de modificarla. Esto es posible por el enfoque de control de impedancia que se utiliza. En los experimentos se eligen parámetros de impedancia con el objetivo que los pacientes sean capaces de interactuar con una resistencia adecuada a lo que se busca lograr con la rutina de terapia a ejecutar.

Durante la terapia de rehabilitación el robot brinda las siguientes configuraciones:

- **Movimientos pasivos:** El robot se encarga de mover la extremidad lesionada en este caso la muñeca hacia el objetivo, con una trayectoria predeterminada.
- **Movimientos activos asistidos:** El paciente trabaja en conjunto con el robot para realizar los movimientos necesarios para llegar a su objetivo.
- **Movimientos activos restringidos:** El robot proporciona cierta resistencia en la dirección del movimiento deseado para que así el paciente llegue a la meta con máximo esfuerzo.

En el caso del modo *Movimientos pasivos* es posible implementarlos en el robot con la desactivación del funcionamiento del control de impedancia. El modo *Movimientos activos asistidos* es posible implementarlo con el control de impedancia activo y el modo *Movimientos activos restringidos* se puede implementar aumentando o disminuyendo la velocidad disminuyendo o aumentando la velocidad del robot, propiciando con esto un aumento o disminución de la rigidez del mismo mediante la variación no lineal de los parámetros de impedancia que tienen lugar.

Del sensor de fuerza FS-10iA se obtienen las señales de fuerza que el paciente ejerce durante la terapia de rehabilitación y a la vez se monitorean las posiciones x, y, z de desplazamiento. En la pantalla del teach pendant se va informando tanto al terapeuta como al paciente en tiempo real si se encuentra ejerciendo fuerza o no. Los datos recibidos servirán para a partir de ellos crear un archivo clínico de cada paciente donde se podrá monitorear el grado de avance cuantitativo que permita ir evaluando su progreso en la recuperación de sus funciones motoras.

3.7 Herramienta de agarre

Otro aspecto relacionado con lograr una adecuada interacción humano-robot y efectuar correctamente la terapia de rehabilitación, es el diseño de herramientas a colocar en el efector final para transmitir las fuerzas de Interacción al robot y sujetar la extremidad afectada. Con el objetivo de desarrollar la habilidad de agarre se diseñó esta herramienta con una base para evitar el deslizamiento de la mano al agarrarla. Anteriormente se había empezado con la herramienta de la figura 3.8 y al notar la falta de consistencia en el agarre por parte de algunos pacientes se procedió a la modificación de la base de la herramienta para evitar eso. También se instaló un dispositivo láser que permite una referencia visual en tiempo real al paciente para la ejecución de las rutinas de rehabilitación.



Figura 3.14 Primera herramienta de agarre.



Figura 3.15 Herramienta de agarre definitiva.

3.8 Juegos de ejercitación

Para la ejecución de los ejercicios de las terapias de ejercitación se escogieron como referencia dibujos con colores vivos que sirvan como base para la realización de una actividad amena y agradable a la vista.

Experimento 1: Movimiento en círculo (medalla)

Para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible del borde del círculo que representa la medalla. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el borde de la ilustración, con la interacción paciente-robot mediante el control de impedancia. El movimiento a evaluar es uno de los más simples para contribuir al mejoramiento de la confianza del paciente en el sistema robótico y cumplir el principio de aprendizaje de partir desde lo fácil a lo complejo.



Figura 3.16 Experimento 1

Experimento 2: Movimiento en forma de copa.

Para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible del borde de la copa. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el borde de la ilustración, con la interacción paciente-robot mediante el control de

3. Implementación del sistema de rehabilitación

impedancia. El movimiento a evaluar conlleva un grado mayor de dificultad. Este movimiento ya introduce más complejidad al no ser el contorno a seguir un contorno completamente uniforme como el círculo.



Figura 3.17 Experimento 2

Experimento 3: Movimiento en forma de ola.

Para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible de la ilustración. En este caso escogimos la punta de una ola. Se ejecutan 5 ciclos siguiendo la silueta de las olas hasta un punto y de regreso al punto inicial.



Figura 3.18 Experimento 3

3. Implementación del sistema de rehabilitación

Experimento 4: Movimiento en forma de círculo (movimiento activo restringido) libre.

Para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible de la ilustración. En este caso se escogió unas veces el centro del círculo y otras veces un punto del contorno como inicio. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el contorno del círculo desde el punto inicial con el control de impedancia configurado para movimientos activos restringidos, pero con los parámetros de Masa, Rigidez y Amortiguamiento de forma tal que el paciente haga los movimientos con poca resistencia del robot dando la impresión de movimiento libre. Esto será otra forma de seguir el comportamiento del seguimiento de trayectorias del paciente y la evolución del control muscular grueso y fino.

3.9 Sistemas de seguridad

En este sistema la seguridad juega un papel importante debido a la capacidad que tiene el robot con el que se trabajó y las tareas para las que se está utilizando, dígame interacción humano-robot.

Con respecto a este tema

El sistema de rehabilitación robótica cuenta con una serie de botones de paro de emergencia situados en lugares cercanos al robot fácilmente accesibles. Estos botones cumplen la función de detener todo el sistema, cortando el flujo de energía al presionarlo en cualquier momento. Esto puede ocurrir por distintas situaciones como: el terapeuta estima conveniente parar la ejecución de la terapia por algún motivo, inseguridad del paciente o percepción de riesgo inminente de afectación a la integridad física del paciente por parte del acompañante o del terapeuta.

Los paros de emergencia están localizados en:

- Marco donde está soportado el robot (Figura 3.15).
- Controlador del robot (Figura 3.15).
- Cerca del área de trabajo (Figura 3.16)

3. Implementación del sistema de rehabilitación

- Terminal de enseñanza del robot (teach pendant) (Figura 3.15)

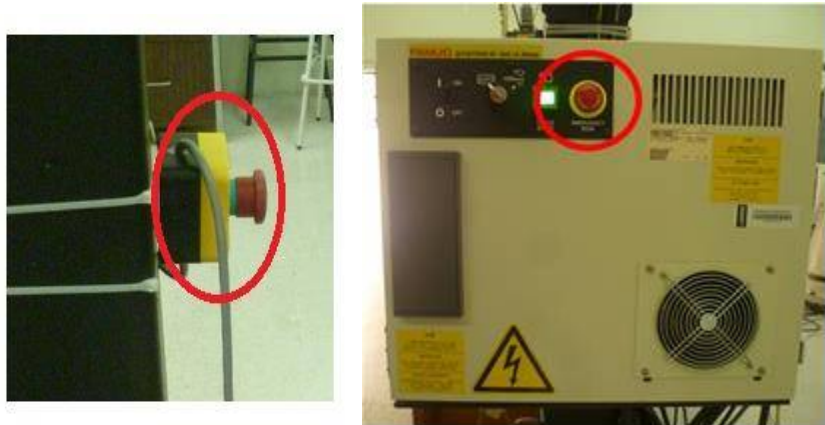


Figura 3.19 Botones de emergencia.

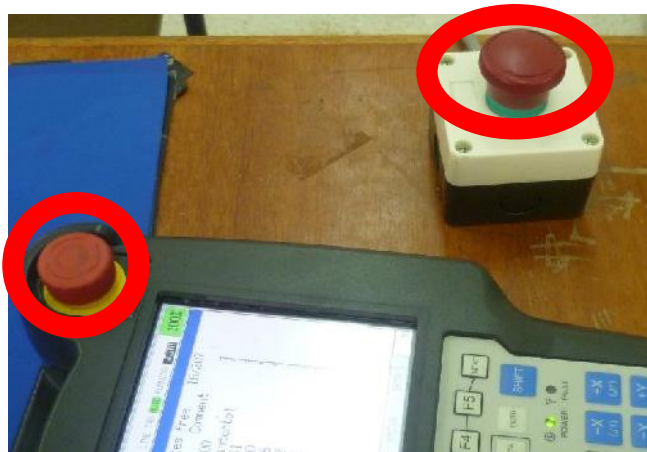


Figura 3.20 Botones paro de emergencia.

Como complemento a las medidas de seguridad se implementaron restricciones al espacio de trabajo del sistema mediante programación en karel. Así en caso de surgir algún tipo de descontrol que atente contra el buen curso de la terapia, al salir el robot del espacio de trabajo determinado se dispara esa protección apagando el sistema por completo.

4. Resultados experimentales

Para poder cumplir con la meta de extender el uso de estos sistemas robóticos con personas afectadas es imprescindible observar y evaluar el comportamiento del mismo. Para esto se realizaron varias pruebas de desempeño del sistema realizando tareas de rehabilitación. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, con personas afectadas de entre 5 y 15 años de edad, que participaron voluntariamente. Estas personas son pacientes del Centro de Rehabilitación y Educación Especial de la San Luis Potosí (CREE-SLP).

Pensando en el tipo de paciente que se iba a recibir se implementaron las referencias visuales (dibujos de trayectorias) con colores vivos que estimulen a la realización de los ejercicios, con una amplitud adecuada para la ejercitación de hombro y codo. Todo esto fue posible por la búsqueda del autor de ejercicios básicos de grafología a implementar y la aprobación de la terapeuta ocupacional que nos asesoró. También se implementó un láser en la herramienta de agarre como referencia visual del seguimiento de la trayectoria a seguir.

En este proyecto se propone implementar el sistema desarrollado en [14] con las siguientes variaciones:

- El sistema de captura de trayectorias a seguir por los pacientes ya no se realiza con el sistema *3D Guidance trackStar* fabricado por la compañía Ascension Technology Corporation. Se establece un medio de enseñanza-aprendizaje en el robot industrial por medio del control de impedancia cinemático basado en posición y orientación a través del lenguaje karel que es propio del manipulador.
- Supresión de la constante K , que caracteriza el resorte en el modelo masa-resorte-amortiguador a partir del cual se basa el control de impedancia.

- implementado para la enseñanza del robot, pensando en un aumento de la docilidad del sistema durante el grabado de trayectorias.
- La implementación y validación del controlador de impedancia cinemático basado en posición por primera vez mediante la realización de experimentos con personas afectadas por la enfermedad a tratar.
- Validar la correcta ejecución del seguimiento activo de trayectorias con el robot y evaluar el desempeño del sistema mediante la participación de personas enfermas por primera vez.

Los tipos de trayectorias propuestas para seguimiento con asistencia activa del robot son:

- Trayectoria modelo capturada con el terapeuta durante la demostración al paciente y enseñanza del robot. Reproducida por la persona afectada en interacción con el robot.
- Trayectoria compleja basada en el desarrollo de juego didáctico desarrollado en un plano.

El robot intenta guiar a la persona sujeta al efector final del manipulador reproduciendo una trayectoria de referencia. La persona es capaz de modificar la trayectoria del manipulador por medio de las fuerzas de interacción durante el cumplimiento de la rutina de rehabilitación.

La realización de las pruebas se hizo siguiendo el protocolo elaborado para la ejecución de las pruebas (Anexo 1), previa revisión y aprobación de la terapeuta del CREE-SLP, especialista colaboradora del proyecto. En esta sección se presenta la descripción de los procedimientos seguidos para la implementación de las actividades de rehabilitación y los resultados que arrojaron los distintos experimentos.

4.1 Actividades y Procedimientos

Ante todo se recibieron a los pacientes y se les hizo una explicación detallada de los procedimientos a los que será sometido así, como de los riesgos principales que enfrentarán y las medidas y dispositivos de seguridad que tendrán a mano. También se les recomendó asistir con vestimenta cómoda que no le constituya un freno en cuanto a la libertad de movimientos necesaria para la complementación del trabajo a ejecutar por sus extremidades superiores.

Se les hizo lectura y posteriormente se firmó un consentimiento informado donde se dio a conocer al voluntario los inconvenientes que pudieran surgir durante la ejecución de las rutinas, las distintas formas de lidiar con algún problema de seguridad y donde autoriza a realizar el procedimiento con conocimiento de causa.

Los voluntarios después de ser recibidos con la explicación del experimento a realizar, se les hizo una demostración que constituya una estimulación visual y sirva como una familiarización con los procedimientos a realizar, así como enseñanza del robot.

Una vez listos, los pacientes fueron sentados en una silla frente a la superficie de trabajo cercana del robot, su mano estaba sujeta al efector final situado a continuación del sensor de fuerza, en estado de reposo (sin ejercer fuerza alguna).

Se llevaron a cabo las rutinas de ejercicios con las cuatro actividades propuestas basadas en ejercicios de grafología, ejercicios, que normalmente realizan los pacientes en terapia ocupacional. Las trayectorias fueron seguidas en las siguientes configuraciones:

- Movimientos activos asistidos. El humano es capaz de modificar las trayectorias que impone el robot. (Experimentos 1,2,3)
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en los movimientos para que el paciente realice su máximo esfuerzo. (Experimento 4)

4. Resultados experimentales

Una vez concluidas las rutinas se da por concluido el experimento con la persona. Se realizó la recopilación de la información obtenida de los pacientes (trayectoria, fuerza y tiempo) para el posterior procesamiento.

4.2 Configuración inicial del sistema.

El sistema se configura mediante programación, de forma tal que el robot toma una posición inicial donde el efector final se ubica a una distancia adecuada del dibujo utilizado como referencia para el seguimiento de trayectorias. Esta posición inicial también propicia la adopción de una postura adecuada por parte del paciente que ejecuta la actividad de rehabilitación, empezando con un agarre adecuado y firme de la herramienta situada en el efector final del robot y utilizando la referencia visual del láser como guía en el seguimiento de las trayectorias contenidas en los juegos.



Figura 4.1. Posición inicial.

4.3 Pruebas de desempeño

Para la presentación de resultados de las pruebas de desempeño se toman los resultados de tres de los pacientes participantes en el estudio, con edades en un rango

4. Resultados experimentales

de 5 a 15 años, por ser los que más asistieron a las sesiones de rehabilitación y también quienes más constancia tuvieron con su asistencia periódica a las sesiones.

Las sesiones de rehabilitación se sucedieron dos veces a la semana durante seis meses. Para la ejecución de las rutinas de rehabilitación se escogieron juegos con colores vistosos que fácilmente llamen la atención a los niños y se mantengan enfocados en completar la tarea a realizar. La implementación de los juegos atiende a técnicas de grafología que permiten facilitar la función motora del miembro superior y específicamente la acción de escribir. Las trayectorias son reducidas debido a que obedecen a la edad de los pacientes a rehabilitar. Esto pudo ser posible gracias a la aprobación de la terapeuta ocupacional.

Los juegos diseñados responden a una metodología diseñada por el autor con aporte de la terapeuta ocupacional, donde se sigue el principio de ir de lo más simple a lo más complejo. Se utilizaron trayectorias continuas como el círculo y la copa de principio. Después se introdujo una trayectoria más compleja, donde hay que llevar el efector final a puntos específicos (Experimento 3 Ola)

Por motivos de confidencialidad, los pacientes serán llamados "M, T, K". Los tres pacientes participaron en los experimentos 1, 2,3. La paciente K fue la participante en el experimento 4 junto a varios sujetos de control sanos que, para los efectos de la investigación, serán llamados P6 hasta P9.

4.3.1 Experimento 1: Seguimiento de trayectoria circular

Como se explicó en sección anterior, para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible del borde del círculo que representa la medalla. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el borde de la ilustración, con la interacción paciente-robot en configuración *Movimientos activos asistidos* mediante el control de impedancia. El movimiento a evaluar es uno de los más simples.

4. Resultados experimentales

Las gráficas que se muestran a continuación muestran los resultados evolutivos de los pacientes analizando cronológicamente la realización de trayectorias. La nomenclatura de los mismos responde a la identificación del paciente, la trayectoria y la fecha de realización de la misma

Paciente T

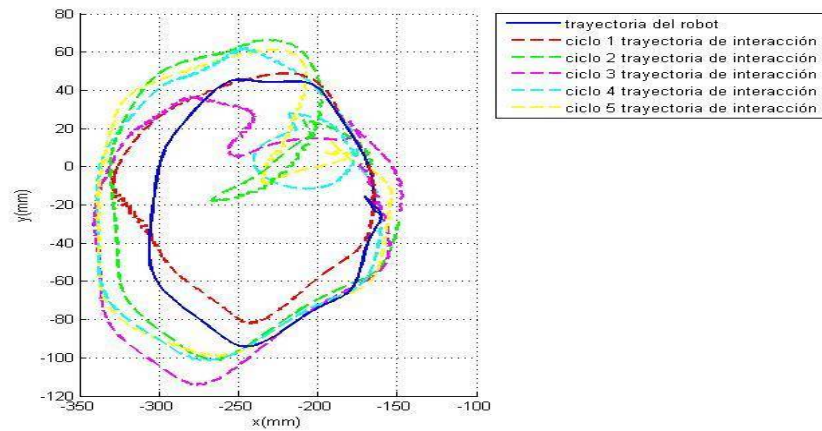


Figura 4.2. Trayectoria paciente T. T_T1_170415_Tr

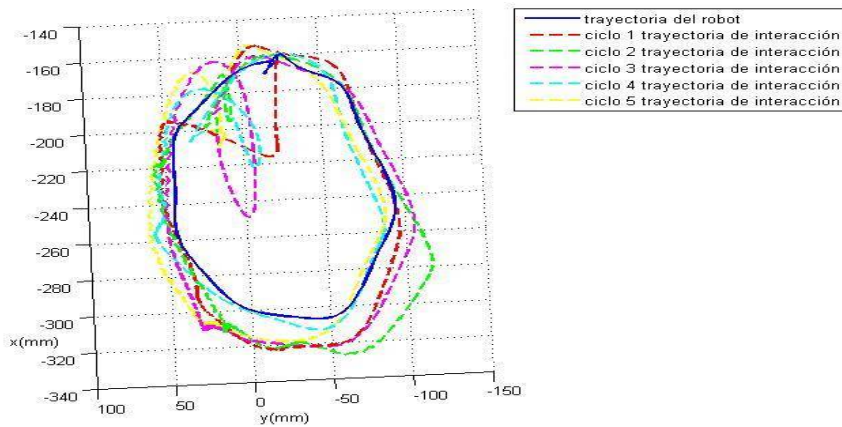


Figura 4.3 . Trayectoria paciente T T_T1_280415_Tr

4. Resultados experimentales

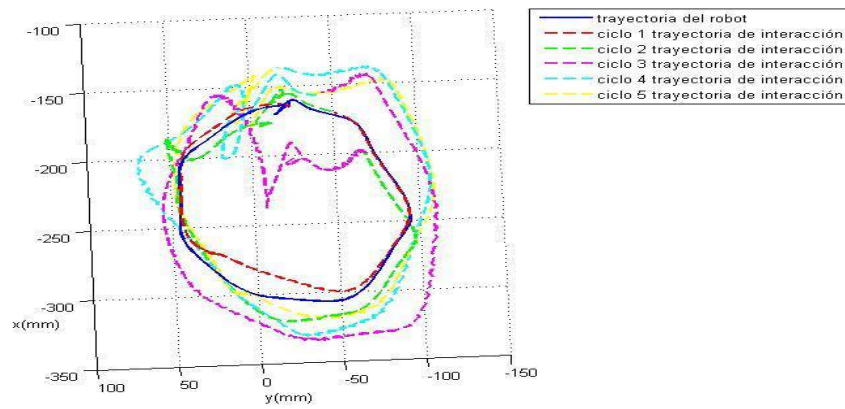


Figura 4.4. Trayectoria paciente T T_T1_220515

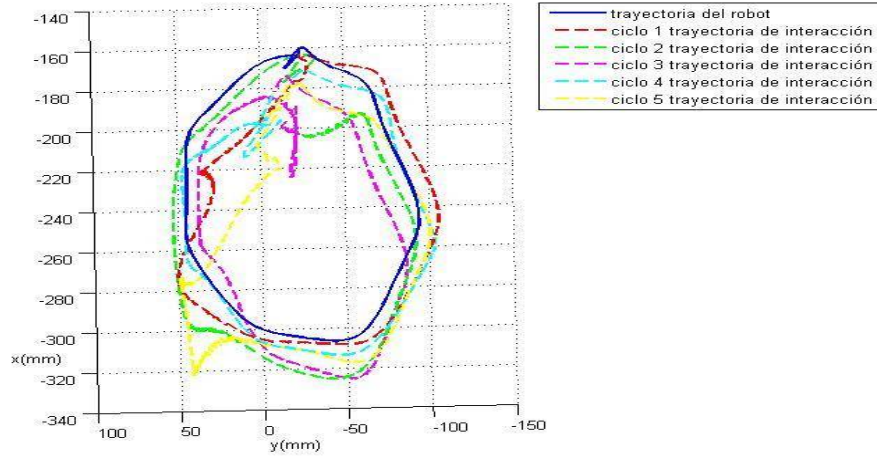


Figura 4.5. Trayectoria paciente T_T1_220515_I_Tr

En la tabla 4.1 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente T para el experimento 1.

4. Resultados experimentales

Tabla 4.1. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente T, prueba 1.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
T_T1_100315_D	-2.41	-0.49	1.66	3.01
T_T1_170415_D	-17.53	-6.72	27.57	42.62
T_T1_280415_D	-17.65	-10.46	23.26	37.98
T_T1_280415_I	-13.03	1.41	25.59	33.45
T_T1_220515_D	-12.86	-0.05	5.74	28.20
T_T1_220515_I	-17.78	-0.18	20.09	30.27

Tabla 4.2. Componentes de fuerza. Paciente T, prueba 1.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	FM	Fym	Fzm	
T_T1_100315_D	-0.54	-0.27	0.86	1.06
T_T1_170415_D	-5.45	-1.52	3.67	6.75
T_T1_280415_D	-4.62	-2.29	3.65	6.32
T_T1_280415_I	-5.16	0.15	2.75	5.85
T_T1_220515_D	-1.16	-0.15	2.68	2.93
T_T1_220515_I	-4.00	-0.15	3.68	5.44

Paciente K

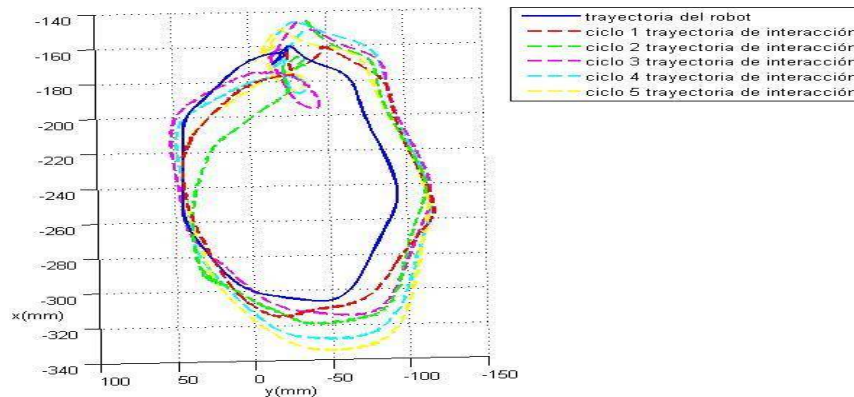


Figura 4.6. Trayectoria paciente k_T1_260515_D_Tr

4. Resultados experimentales

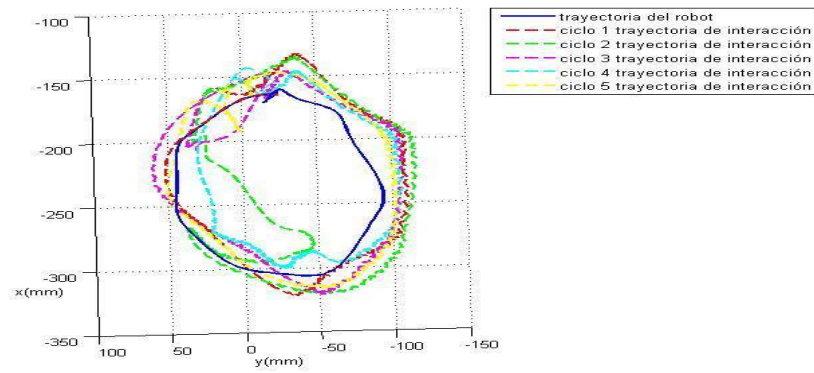


Figura 4.7. Trayectoria paciente k_T1_050615_D_Tr

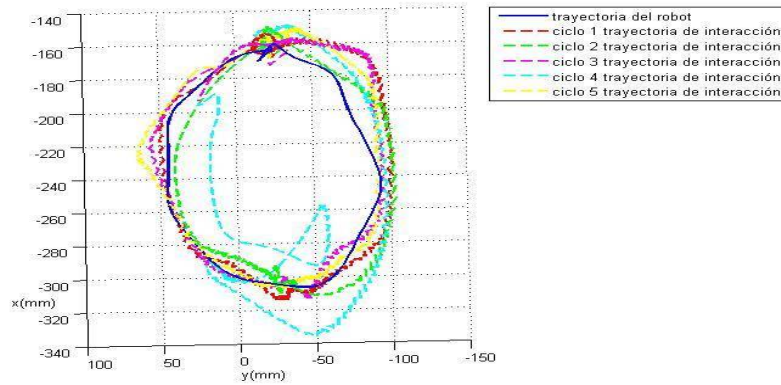


Figura 4.8. Trayectoria paciente k_T1_210715_D_Tr

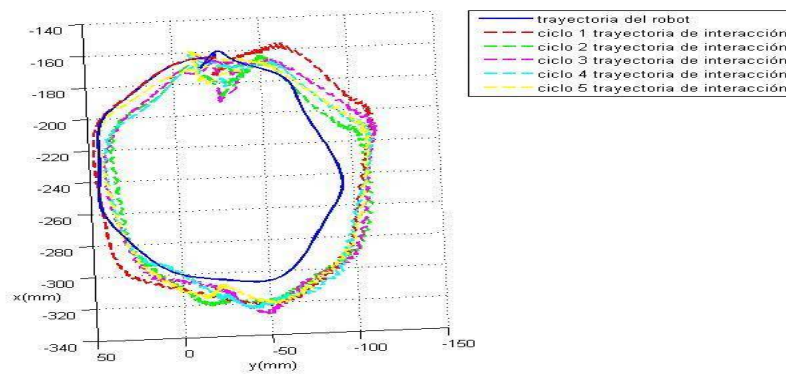


Figura 4.9. Trayectoria paciente k_T1_070715_D_Tr

4. Resultados experimentales

En la tabla 4.3 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente K para el experimento 1.

Tabla 4.3. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente K, prueba 1.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Kas_T1_260515_D	-3.67	11.91	9.35	25.26
Kas_T1_050615_D	-17.79	4.36	8.30	54.98
Kas_T1_170615_D	-22.39	8.95	2.84	45.56
Kas_T1_190615_D	-24.09	6.99	9.43	54.96
Kas_T1_230615_D	-40.07	7.22	4.11	57.75
Kas_T1_260615_D	-35.58	12.35	12.63	56.61
Kas_T1_300615_D	-39.41	10.70	16.36	65.52
Kas_T1_070715_D	-37.67	13.41	15.15	63.58
Kas_T1_210715_D	-30.85	8.71	15.62	72.25

Tabla 4.4. Componentes de fuerza. Paciente K, prueba 1.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	
Kas_T1_260515_D	-1.87	2.31	0.87	3.09
Kas_T1_050615_D	-1.57	0.76	3.65	4.05
Kas_T1_170615_D	-0.52	1.71	4.62	4.95
Kas_T1_190615_D	-1.81	1.28	4.98	5.45
Kas_T1_230615_D	-0.65	1.26	8.23	8.35
Kas_T1_260615_D	-2.41	2.32	7.36	8.08
Kas_T1_300615_D	-3.15	1.94	8.07	8.88
Kas_T1_300615_D	-2.92	2.48	7.76	8.65
Kas_T1_300615_D	-3.00	1.59	6.40	7.24

Paciente M

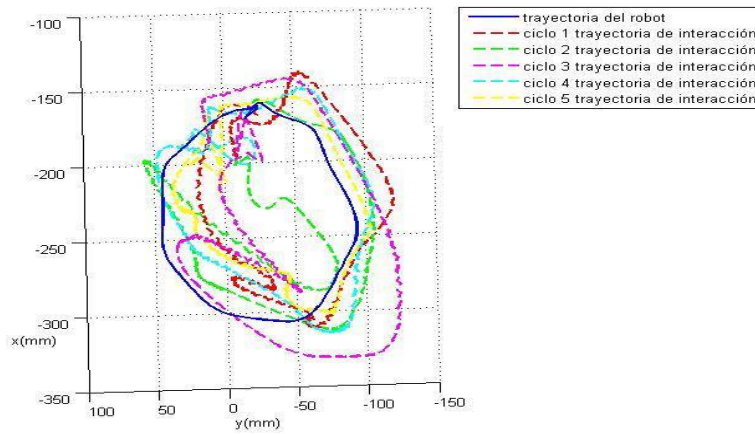


Figura 4.10. Trayectoria paciente M_T1_140415_D_Tr

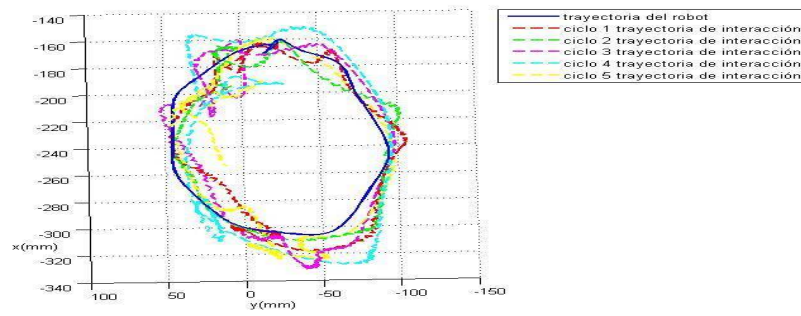


Figura 4.11. Trayectoria paciente M_T1_210415_D_Tr

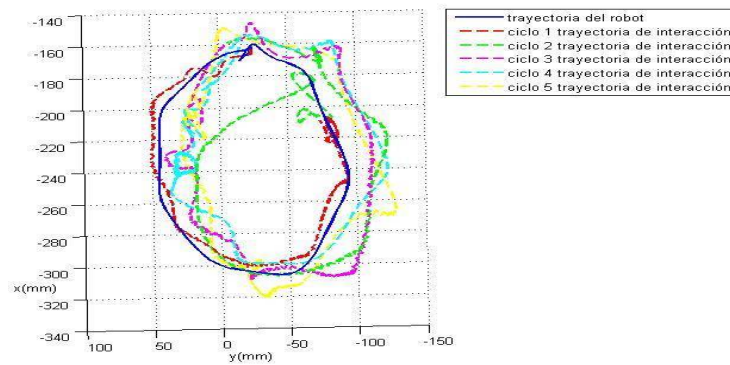


Figura 4.12. Trayectoria paciente M_T1_220515_D_Tr

4. Resultados experimentales

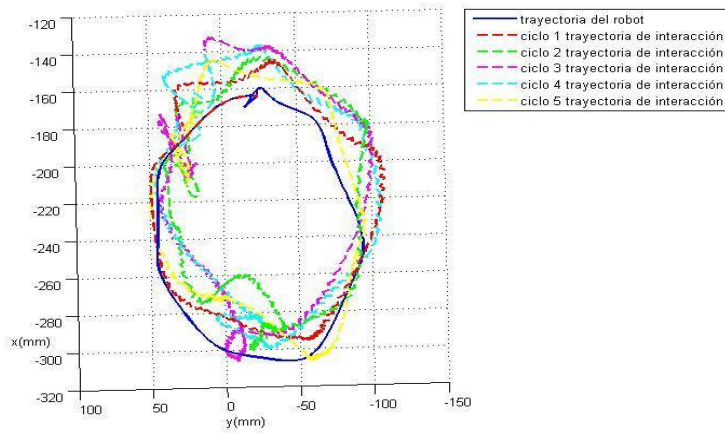


Figura 4.13. Trayectoria paciente M_T1_160715_D_Tr

Gráficas de componentes de fuerza Paciente M

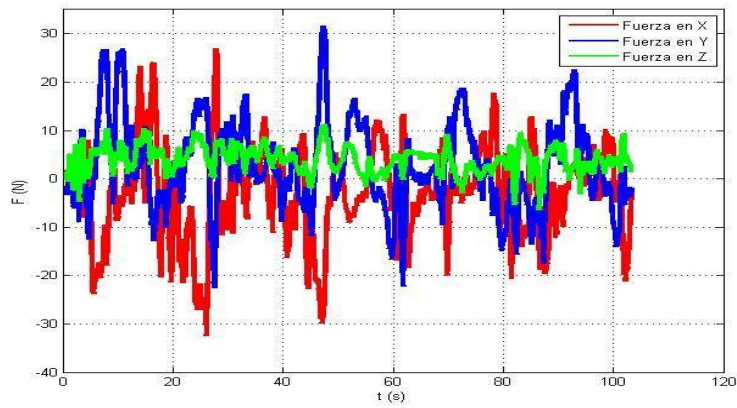


Figura 4.14. Fuerzas paciente M_T1_140415_D_Tr

4. Resultados experimentales

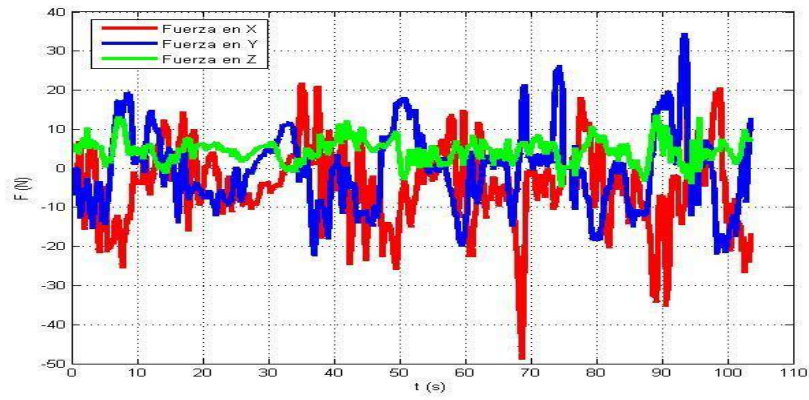


Figura 4.15. Fuerzas paciente M_T1_210415_D_Tr

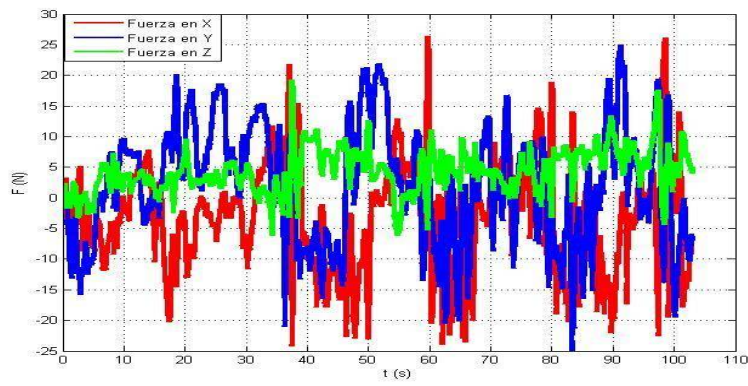


Figura 4.16. Fuerzas paciente M_T1_220515_D_Tr

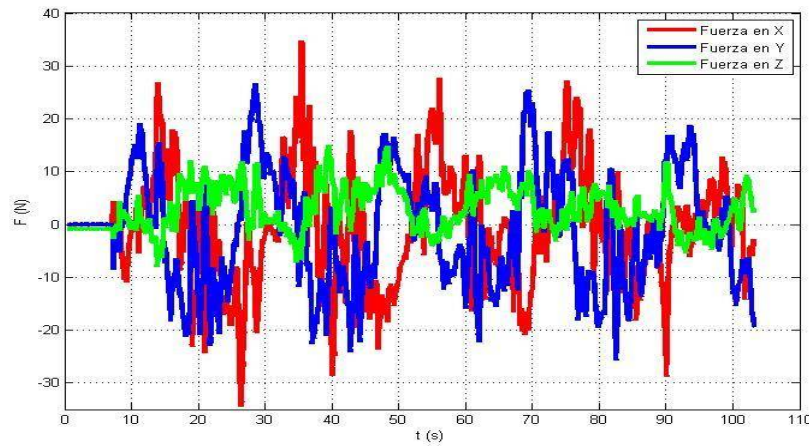


Figura 4.17. Fuerzas paciente M_T1_160715_D_Tr

4. Resultados experimentales

En la tabla 4.5 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente M para el experimento 1.

Tabla 4.5. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente M, prueba 1.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Mar_T1_140415_D	-17.98	12.02	17.45	47.26
Mar_T1_210415_D	-20.44	-4.18	24.71	55.02
Mar_T1_240415_D	-16.17	5.56	20.55	56.65
Mar_T1_190515_D	-22.39	-3.09	22.96	55.87
Mar_T1_220515_D	-18.71	8.25	18.84	49.69
Mar_T1_160615_D	-12.83	-6.24	7.17	54.90

Tabla 4.6. Componentes de fuerza. Paciente M, prueba 1.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	
Mar_T1_140415_D	-3.60	2.23	3.80	5.69
Mar_T1_210415_D	-5.16	-1.00	4.26	6.76
Mar_T1_240415_D	-4.04	1.00	3.35	5.34
Mar_T1_190515_D	-4.47	-0.78	4.59	6.46
Mar_T1_220515_D	-3.83	1.42	3.96	5.69
Mar_T1_160615_D	-1.44	-1.50	2.63	3.36

4.3.2 Experimento 2: Movimiento en forma de copa.

Como se explicó en sección anterior, para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible del borde de la copa. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el borde de la ilustración, con la interacción paciente-robot en configuración *Movimientos activos asistidos* mediante el control de impedancia. El movimiento a evaluar conlleva un grado de dificultad mayor que el del

4. Resultados experimentales

experimento anterior. Este movimiento ya introduce más complejidad al no ser el contorno a seguir un contorno completamente uniforme como el círculo.

Las gráficas que se muestran a continuación muestran los resultados evolutivos de los pacientes analizando cronológicamente la realización de trayectorias.

Paciente T

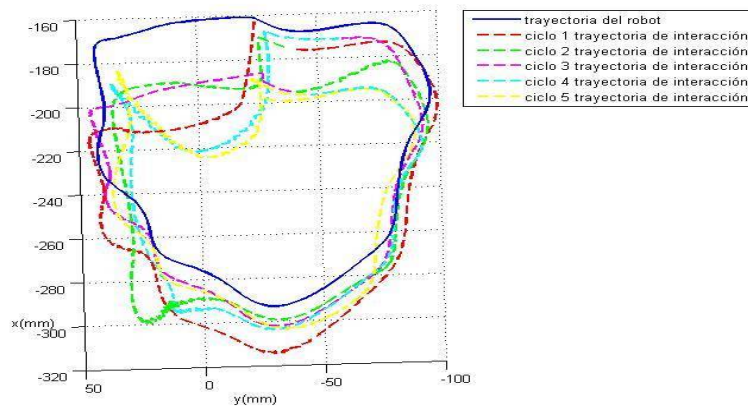


Figura 4.18. Trayectoria paciente T (T_T2_170415_Tr)

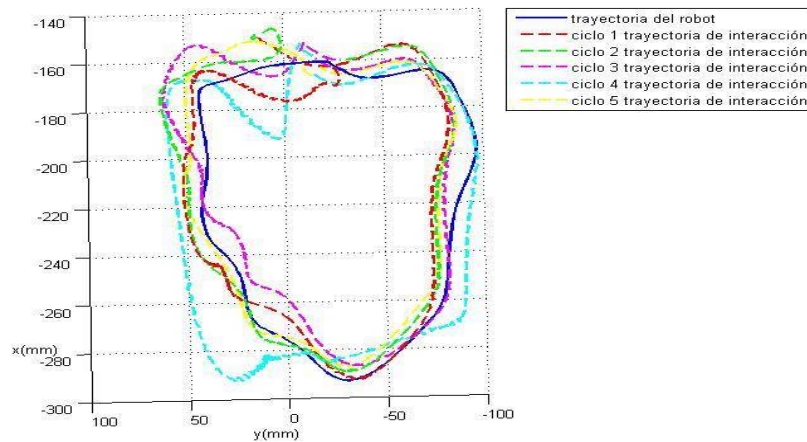


Figura 4.19. Trayectoria paciente T T_T2_240415_Tr

4. Resultados experimentales

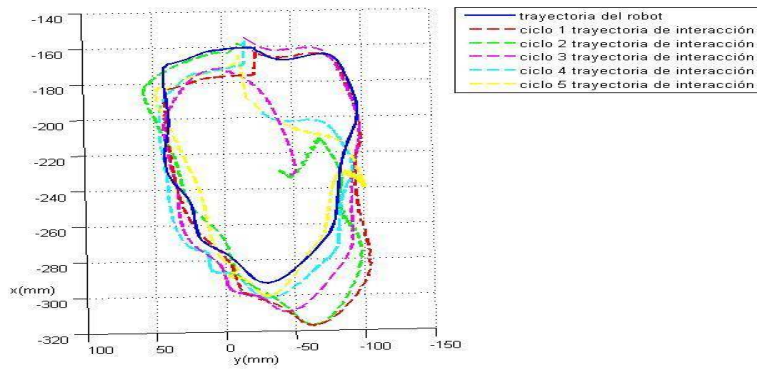


Figura 4.20. Trayectoria paciente T (T_T2_280415_Tr)

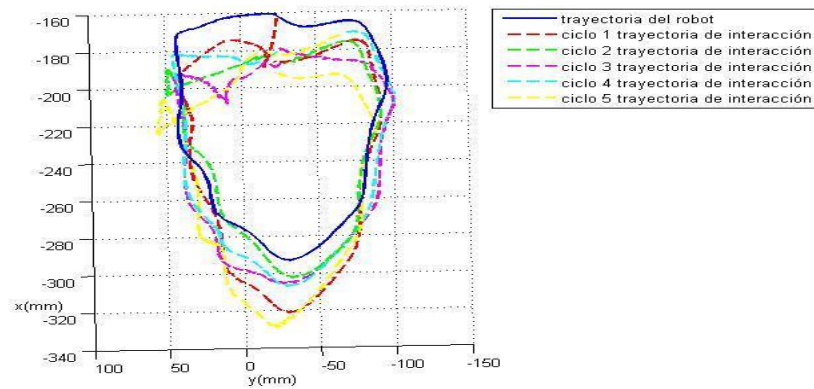


Figura 4.21. Trayectoria paciente T T_T2_280415_I_Tr

En la tabla 4.7 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente T para el experimento 1.

Tabla 4.7. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente T, prueba 2.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
T_T2_200315_D	-18.51	-9.42	6.53	23.53
T_T2_170415_I	-12.02	1.7	22.86	26.98
T_T2_240415_D	1.83	-8.15	-1.67	16.61
T_T2_280415_D	-15.96	4.13	19.99	30.98
T_T2_280415_I	-12.74	-3.6	21.27	27.46

4. Resultados experimentales

Tabla 4.8. Componentes de fuerza. Paciente T, prueba 2.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	ZF
T_T2_200315_D	-1.27	-2.04	3.74	4.45
T_T2_170415_I	-4.62	0.24	2.54	5.28
T_T2_240415_D	0.35	-1.66	-0.42	1.75
T_T2_280415_D	-4.06	0.75	3.38	5.34
T_T2_280415_I	-4.30	-0.83	2.66	5.12

Paciente K

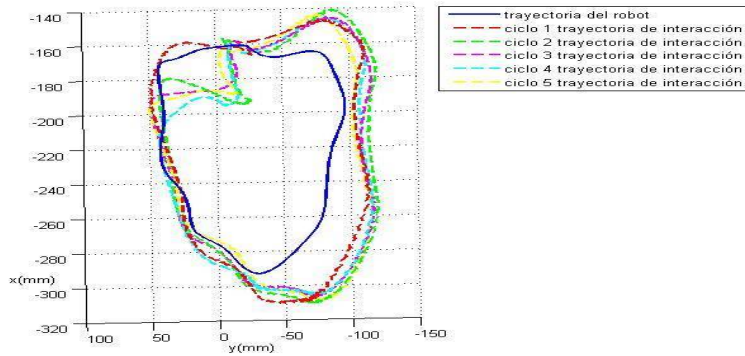


Figura 4.22. Trayectoria paciente k_T2_260515_D_Tr

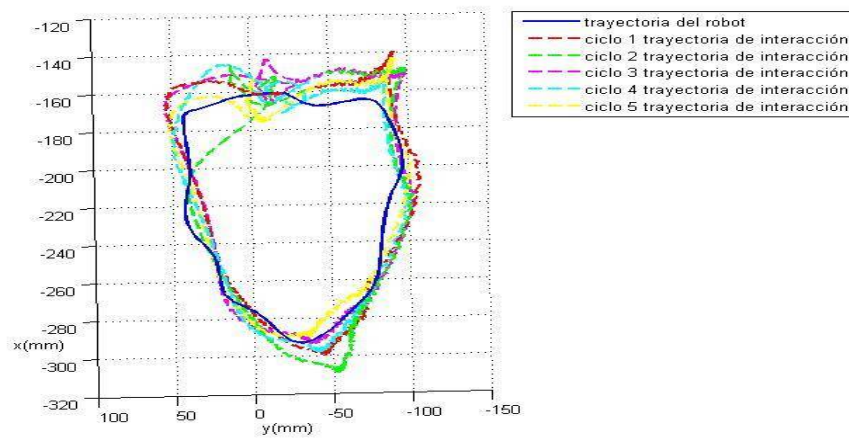


Figura 4.23. Trayectoria paciente k_T2_050615_D_Tr

4. Resultados experimentales

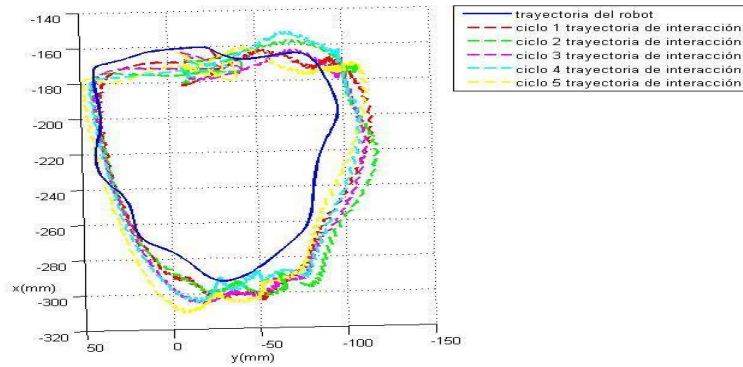


Figura 4.24. Trayectoria paciente k_T2_070715_D_Tr

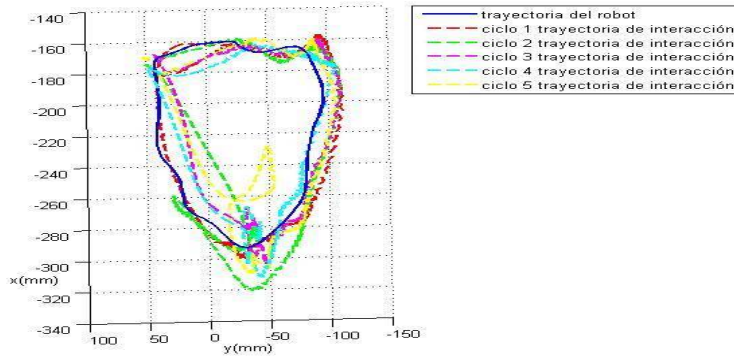


Figura 4.25. Trayectoria paciente k_T2_210715_D_Tr

En la tabla 4.1 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente T para el experimento 1.

Tabla 4.9. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente K, prueba 2.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Kas_T2_260515_D	-3.67	11.91	9.35	25.26
Kas_T2_050615_D	-17.79	4.36	8.30	54.98
Kas_T2_170615_D	-22.39	8.95	2.84	45.56
Kas_T2_190615_D	-24.09	6.99	9.43	54.96
Kas_T2_230615_D	-40.07	7.22	4.11	57.75
Kas_T2_260615_D	-35.58	12.35	12.63	56.61
Kas_T2_300615_D	-39.41	10.70	16.36	65.52
Kas_T2_070715_D	-37.67	13.41	15.15	63.58
Kas_T2_210715_D	-30.85	8.71	15.62	72.25

4. Resultados experimentales

Tabla 4.10. Componentes de fuerza. Paciente K, prueba 2.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	ZF
Kas_T2_260515_D	-2.05	2.47	7.07	7.76
Kas_T2_050615_D	0.46	1.81	5.86	6.15
Kas_T2_170615_D	0.72	2.60	6.03	6.61
Kas_T2_190615_D	-1.12	3.26	7.15	7.93
Kas_T2_230615_D	-0.71	2.23	8.59	8.90
Kas_T2_260615_D	-2.69	3.58	8.15	9.30
Kas_T2_300615_D	-2.71	4.37	8.79	10.18
Kas_T2_300615_D	-2.66	3.90	9.49	10.60
Kas_T2_300615_D	-5.39	3.30	6.86	9.33

Paciente M

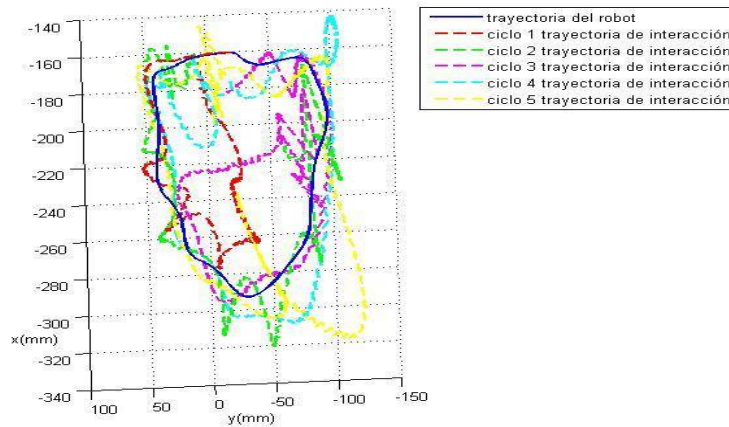


Figura 4.26. Trayectoria paciente M_T2_270315_D_Tr

4. Resultados experimentales

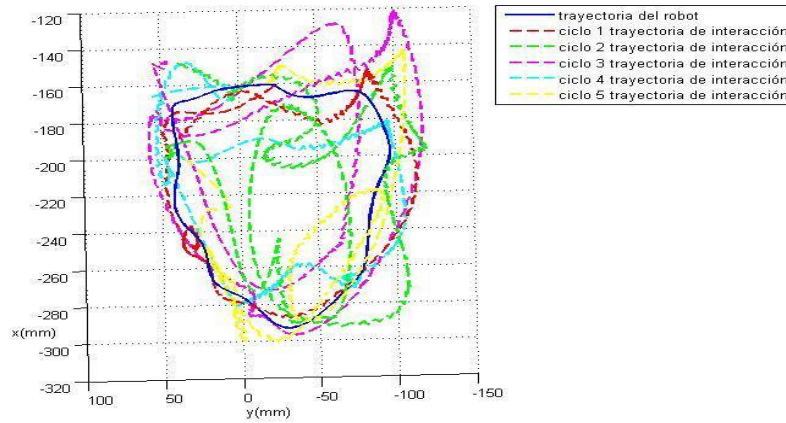


Figura 4.27. Trayectoria paciente M_T2_140415_D_Tr

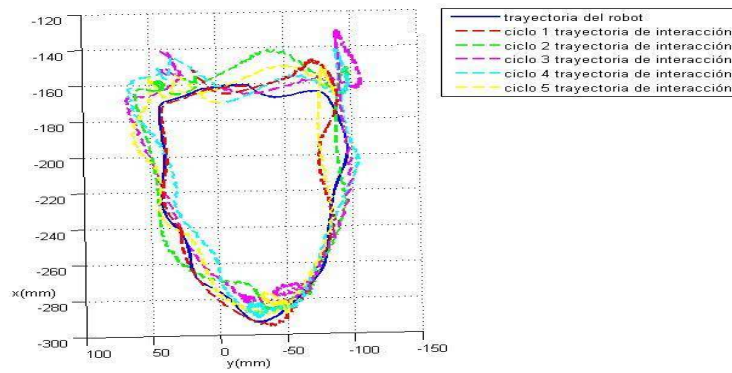


Figura 4.28. Trayectoria paciente M_T2_160615_D_Tr

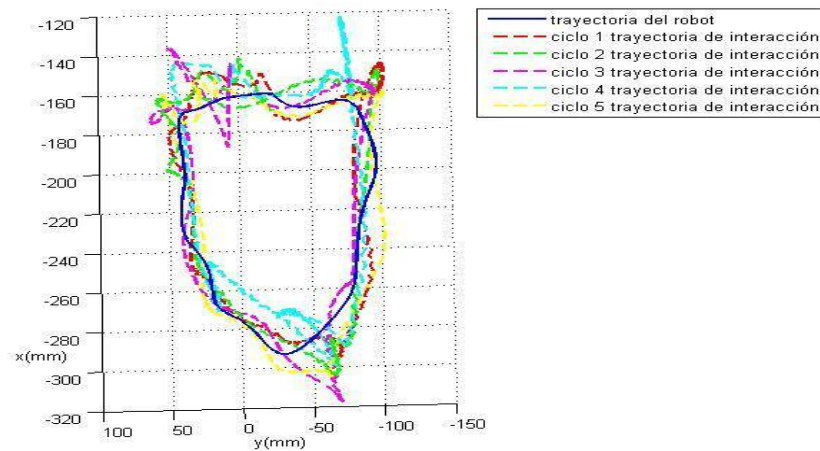


Figura 4.29. Trayectoria paciente M_T2_230615_D_Tr

4. Resultados experimentales

En la tabla 4.1 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente T para el experimento 1.

Tabla 4.11. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente M, prueba 2.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Mar_T2_270315_D	-23.36	-5.24	13.06	74.35
Mar_T2_140415_D	-24.97	1.82	1.98	49.16
Mar_T2_240415_D	-20.08	-6.95	3.41	73.71
Mar_T2_190515_D	-14.15	-1.96	9.02	36.28
Mar_T2_220515_D	-21.14	0.08	10.88	52.97
Mar_T2_160615_D	13.64	-2.07	-0.54	55.52
Mar_T2_230615_D	-15.68	6.13	10.47	68.37

Tabla 4.12. Componentes de fuerza. Paciente M, prueba 2.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	
Mar_T2_270315_D	-2.45	0.42	5.55	6.08
Mar_T2_140415_D	-0.25	0.11	5.06	5.07
Mar_T2_240415_D	-0.56	1.70	4.06	4.43
Mar_T2_190515_D	-1.77	-0.54	2.89	3.43
Mar_T2_220515_D	-2.05	-0.32	4.32	4.79
Mar_T2_160615_D	0.10	-0.63	-2.73	2.80
Mar_T2_230615_D	-2.02	1.09	3.19	3.93

4.3.3 Experimento 3: Movimiento en forma de ola.

Como se explicó en sección anterior, para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible de la ilustración. En este caso escogimos la punta de una ola. Se ejecutan 5 ciclos siguiendo la silueta de las olas hasta dos puntas de cresta más *adelante* y luego de regreso al punto inicial, con la interacción paciente-robot en configuración *Movimientos activos asistidos* mediante el control de impedancia. Este movimiento introduce una mayor complejidad que los casos

4. Resultados experimentales

anteriores al tratarse de una trayectoria abierta, con cambios pronunciados, con un contorno menos uniforme que el de la copa o el círculo.

Las gráficas que se muestran a continuación muestran los resultados evolutivos de los pacientes analizando cronológicamente la realización de trayectorias.

Paciente K

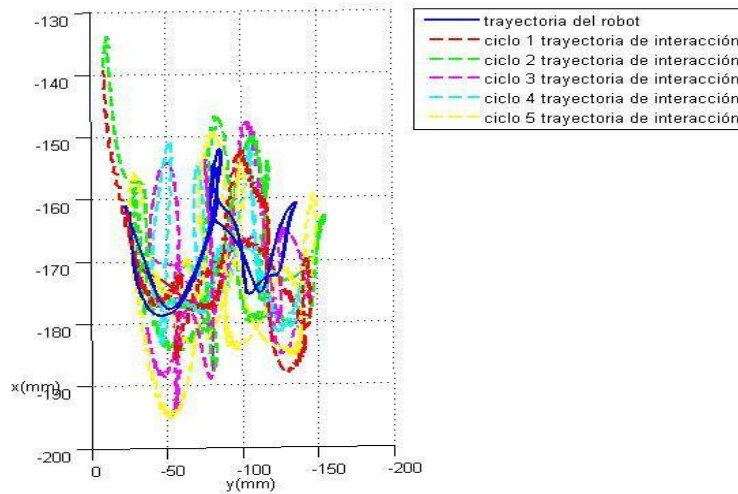


Figura 4.30. Trayectoria paciente k_T3_260515_D_Tr

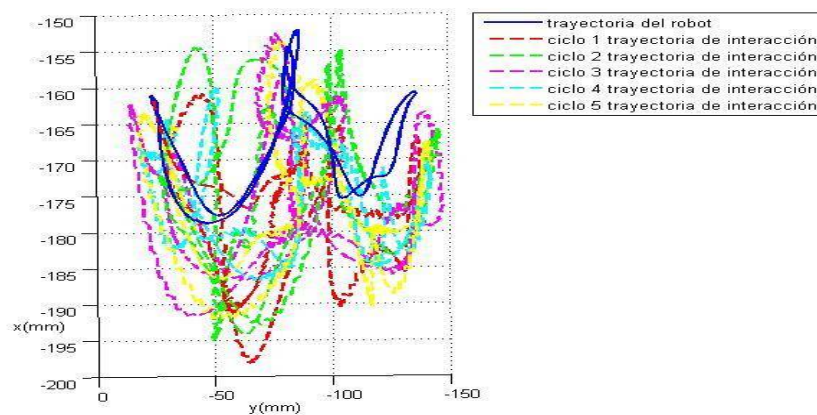


Figura 4.31. Trayectoria paciente k_T3_190615_D_Tr

4. Resultados experimentales

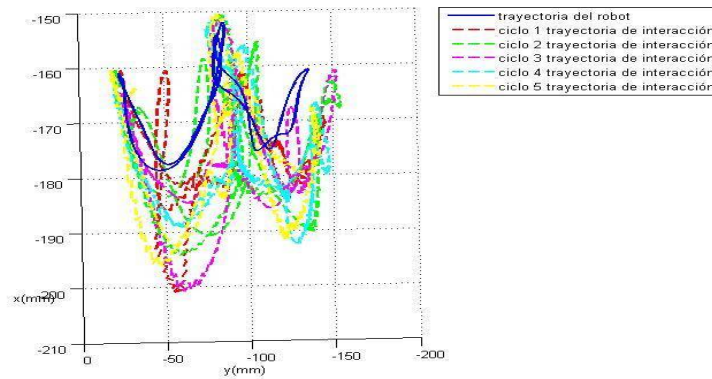


Figura 4.32. Trayectoria paciente k_T3_070715_D_Tr

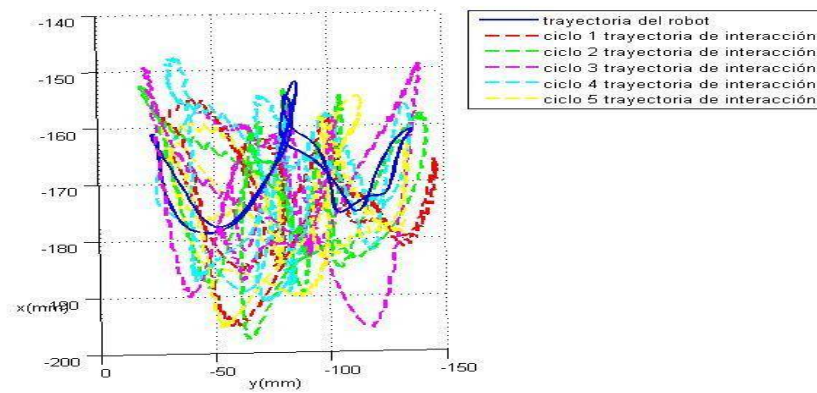


Figura 4.33. Trayectoria paciente k_T3_210715_D_Tr

En la tabla 4.1 se muestra la evolución cronológica de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente T para el experimento 1.

4. Resultados experimentales

Tabla 4.13. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente K, prueba 3.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Kas_T3_260615_D	-47.39	12.88	3.61	57.53
Kas_T3_190615_D	-32.16	8.09	7.71	46.22
Kas_T3_230615_D	-29.23	10.26	1.57	39.05
Kas_T3_260615_D	-47.64	14.57	7.39	57.93
Kas_T3_300615_D	-49.29	15.71	9.76	61.14
Kas_T3_070715_D	-47.21	14.71	8.28	57.35
Kas_T3_210715_D	-35.75	6.52	4.68	58.23

Tabla 4.14. Componentes de fuerza. Paciente K, prueba 3.

Trayectorias	Componentes de fuerza			ZF
	Fxm	Fym	Fzm	
Kas_T3_260615_D	-0.59	2.37	9.72	10.02
Kas_T3_190615_D	-2.05	0.55	5.32	5.73
Kas_T3_230615_D	-0.25	1.90	5.98	6.28
Kas_T3_260615_D	-1.39	2.70	9.77	10.23
Kas_T3_300615_D	-1.86	2.94	10.10	10.69
Kas_T3_300615_D	-1.48	2.69	9.63	10.11
Kas_T3_300615_D	-0.77	1.10	7.32	7.44

Paciente M

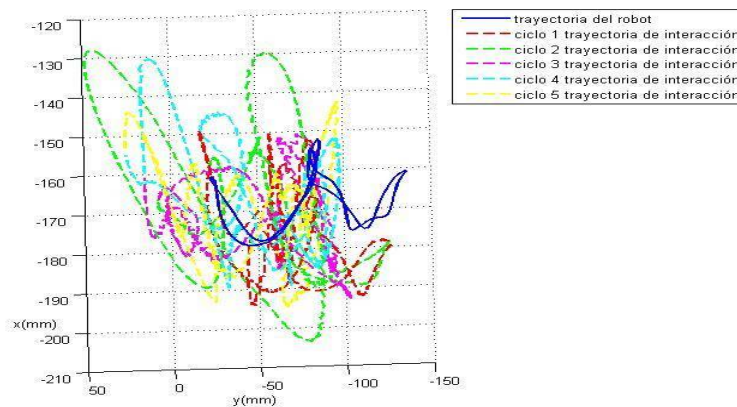


Figura 4.34. Trayectoria paciente M. M_T3_140415_D_Tr

4. Resultados experimentales

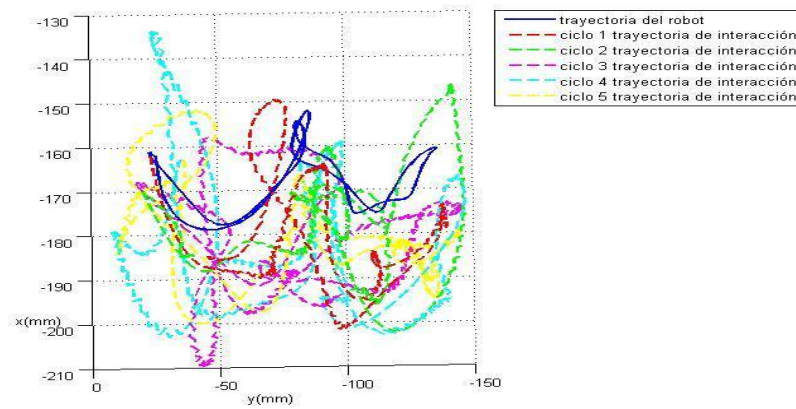


Figura 4.35. Trayectoria paciente M. M_T3_210415_D_Tr

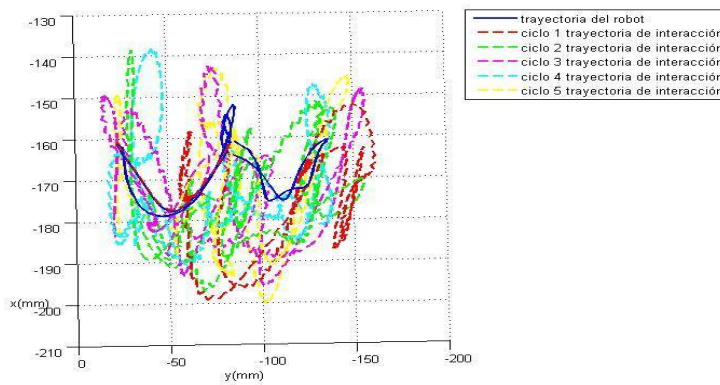


Figura 4.36. Trayectoria paciente M_T3_160615_D_Tr

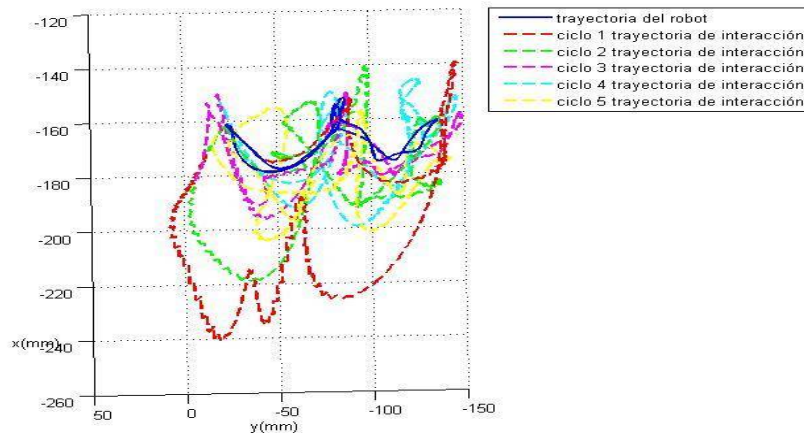


Figura 4.37. Trayectoria paciente M_T3_230615_D_Tr

4. Resultados experimentales

En la tabla 4.13 se muestra la evolución de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente M para el experimento 3.

Tabla 4.15. Diferencia de seguimiento de trayectoria. Paciente M, prueba 3.

Trayectorias	Seguimiento trayectoria media			Resultante
	X	Y	Z	
Mar_T3_140415_D	-32.73	-21.97	4.15	47.40
Mar_T3_190515_D	-15.66	9.28	12.97	41.88
Mar_T3_160615_D	-19.98	9.80	5.21	33.66
Mar_T3_230615_D	-11.25	4.84	6.77	31.11

Tabla 4.16. Componentes de fuerza. Paciente M, prueba 3.

Trayectorias	Componentes de fuerza			Resultante
	Fxm	Fym	Fzm	
Mar_T3_140415_D	-0.64	-4.73	6.50	8.06
Mar_T3_190515_D	-2.64	1.82	3.34	4.63
Mar_T3_160615_D	-1.07	1.85	4.14	4.66
Mar_T3_230615_D	-1.25	1.11	2.32	2.86

Al término de las sesiones se tiene la opinión que la evolución de los pacientes fue satisfactoria, presentando claros signos de mejoría. Una muestra de esto es el promedio de la diferencia del seguimiento de trayectorias de los pacientes con respecto a la enseñada por el terapeuta al robot y posteriormente reproducido por el mismo. (Tablas 4.1 hasta 4.16)

Tabla 4.17. Promedio de diferencia en el seguimiento de trayectorias.

Promedio de diferencia en el seguimiento de trayectorias (mm)				
Paciente	Trayectoria	X	Y	Z
T	T1	-13.54	-2.75	17.32
	T2	-11.48	-3.07	13.80
M	T1	-18.09	2.05	18.61
	T2	-15.62	0.05	6.76
	T3	-19.91	0.49	7.27
K	T1	-27.95	9.4	10.42
	T2	-36.64	16.75	9.7
	T3	-41.24	11.82	6.14

4.3.4 Experimento 4: Movimiento en forma de círculo (movimiento activo restringido) libre.

Como se explicó en sección anterior, para este experimento se coloca inicialmente la referencia visual (láser) en un punto fácilmente reconocible de la ilustración. En este caso se escogió unas veces el centro del círculo y otras veces un punto del contorno como inicio. Se ejecutan 5 ciclos de una vuelta por el contorno del círculo desde el punto inicial con el control de impedancia configurado para movimientos activos restringidos, pero con los parámetros de Masa, Rigidez y Amortiguamiento de forma tal que el paciente haga los movimientos con poca resistencia del robot dando la impresión de movimiento libre. Esto es otra forma de seguir el comportamiento del seguimiento de trayectorias del paciente y la evolución del control muscular grueso y fino.

Las gráficas que se muestran a continuación muestran los resultados evolutivos de la paciente analizando cronológicamente la realización de trayectorias.

4. Resultados experimentales

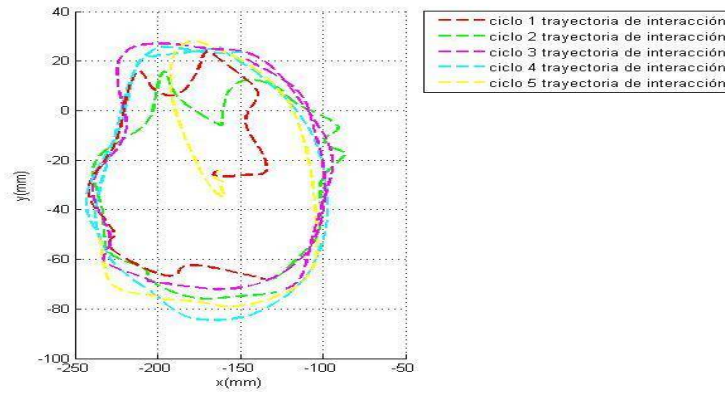


Figura 4.38. Trayectoria paciente K. Tray_K_D_190615

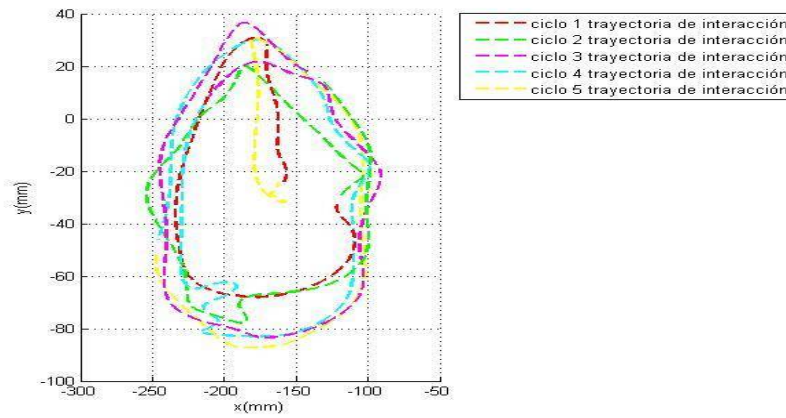


Figura 4.39. Trayectoria paciente K. Tr_K_I_260515T3

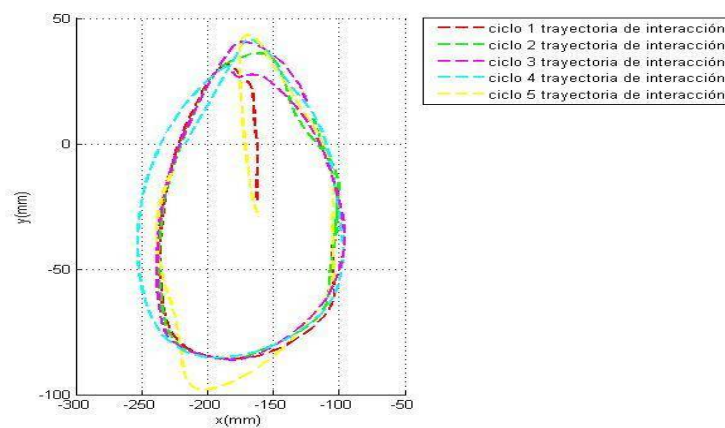


Figura 4.40. Trayectoria paciente k_T3_070715_D_Tr

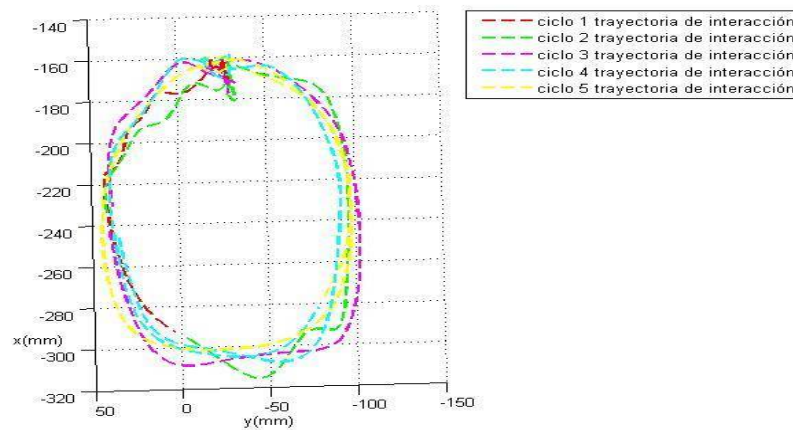


Figura 4.41. Trayectoria paciente k_T_210715_Tr

4.3.5 Experimentos con pacientes sanos

Para la realización de este experimento se escogieron personas sanas que de una forma u otra están familiarizadas con la realización de estas actividades con el robot por dos razones:

- El ahorro de tiempo que supone no tener que hacer el experimento con personas a las que habría que familiarizarlas con el sistema y explicarle como hacer la actividad.
- La mayor probabilidad del completamiento de las tareas con un seguimiento de trayectoria aceptable.

En las figuras 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45 se presenta el completamiento de la trayectoria por parte de los sujetos de control (PS 6, PS 7, PS 8 y PS 9).

4. Resultados experimentales

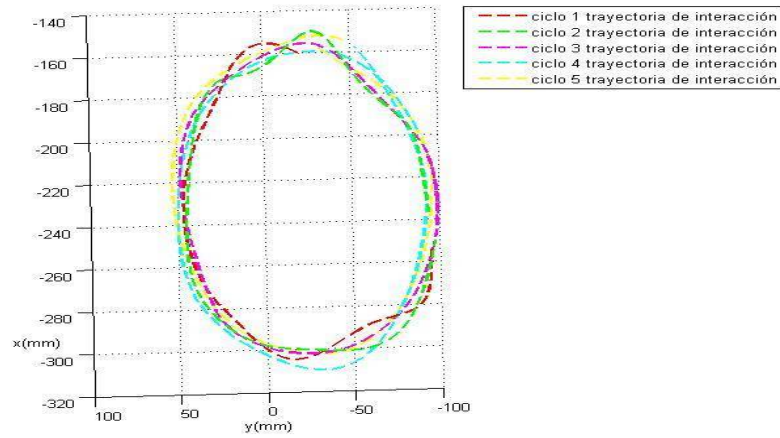


Figura 4.42. Realización de trayectoria circular PS 6.

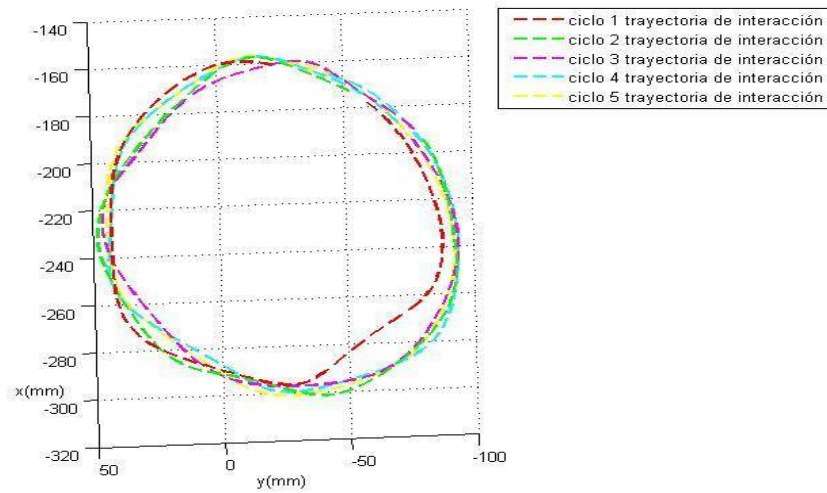


Figura 4.43. Realización de trayectoria circular PS 7.

4. Resultados experimentales

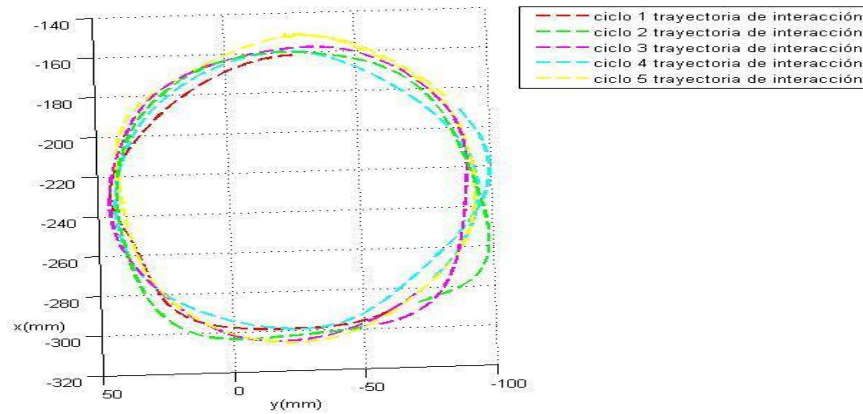


Figura 4.44. Realización de trayectoria circular PS 8.

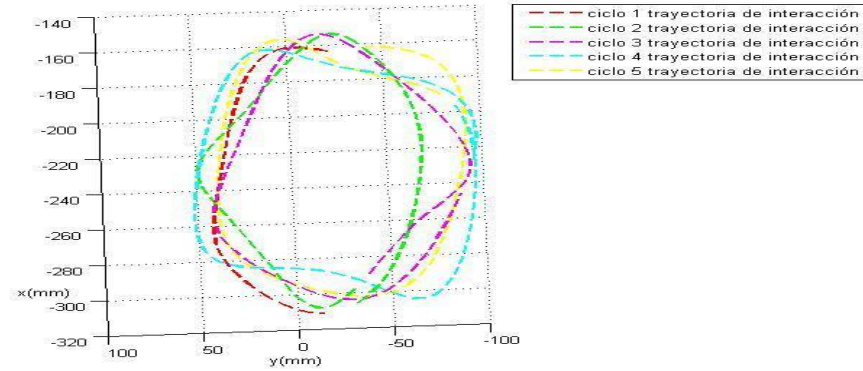


Figura 4.45. Realización de trayectoria circular PS 9.

En las figuras 4.46, 4.47, 4.48 y 4.49 se presenta la comparación de la trayectoria realizada por la paciente en la última sesión que participó y las realizadas por los sujetos de control sanos.

4. Resultados experimentales

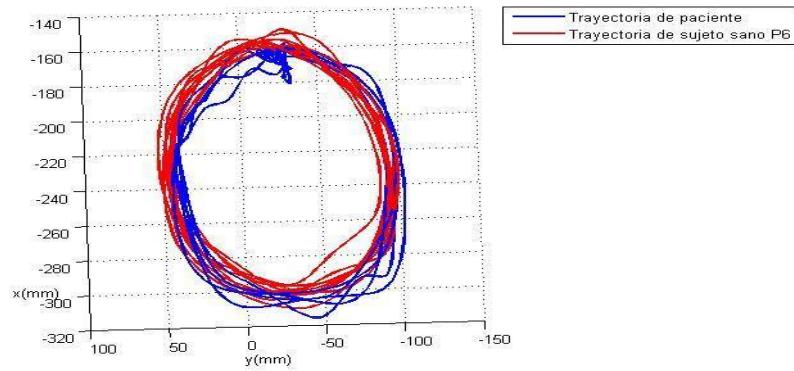


Figura 4.46. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P6.

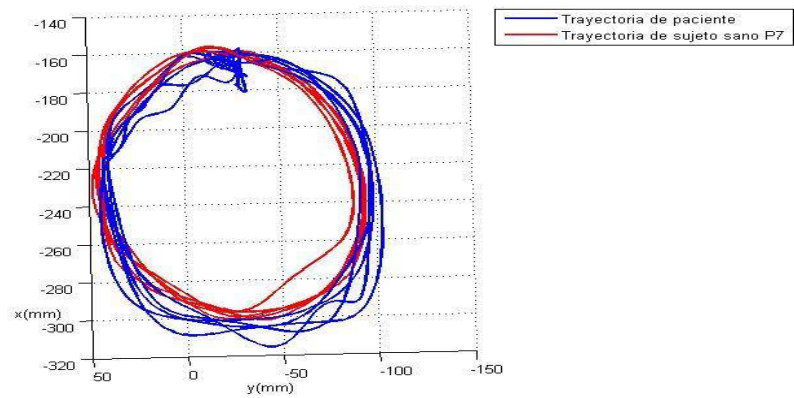


Figura 4.47. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P7.

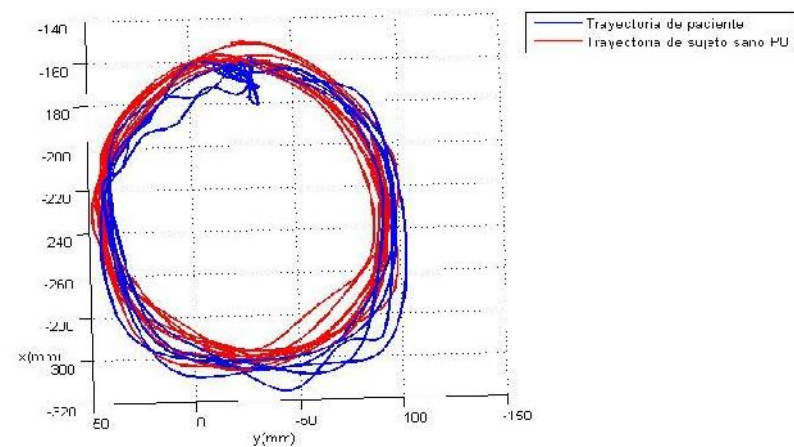


Figura 4.48. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P8.

4. Resultados experimentales

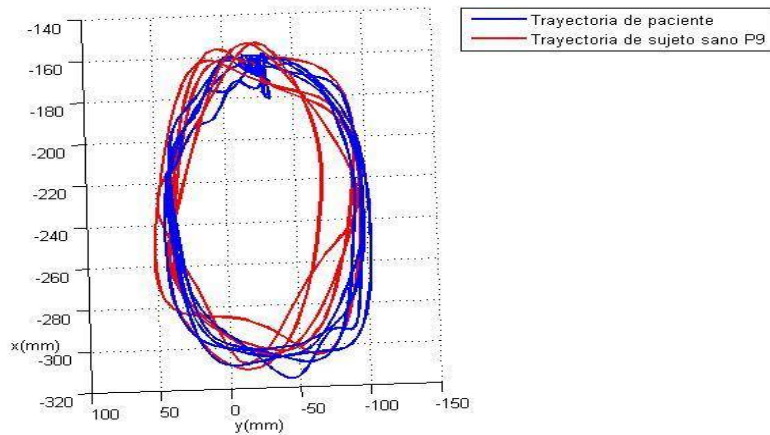


Figura 4.49. Comparación de trayectoria generada por paciente K y sujeto de control P9.

4.3.6 Experimento Interacción en modo enseñanza sin constante elástica ($K=0$).

Para la realización de esta prueba se contó con la opinión de la terapeuta que apoyó en todo el transcurso del proyecto y los miembros del equipo de trabajo del laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, involucrados con tareas de rehabilitación en sus temas de investigación. Esto nos dio una cantidad de 5 expertos.

La actividad consiste en que cada uno de los expertos ejecute la enseñanza del robot con el programa en lenguaje karel modificado de forma tal que se hace 0 el parámetro que caracteriza el resorte del sistema masa-resorte-amortiguador modelado para el control de impedancia. Los parámetros del control de impedancia quedan como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.18 Parámetros y condiciones iniciales del control de impedancia para prueba con expertos.

Parámetros del control de impedancia		
M_d	B_d	K_d
30	160	0

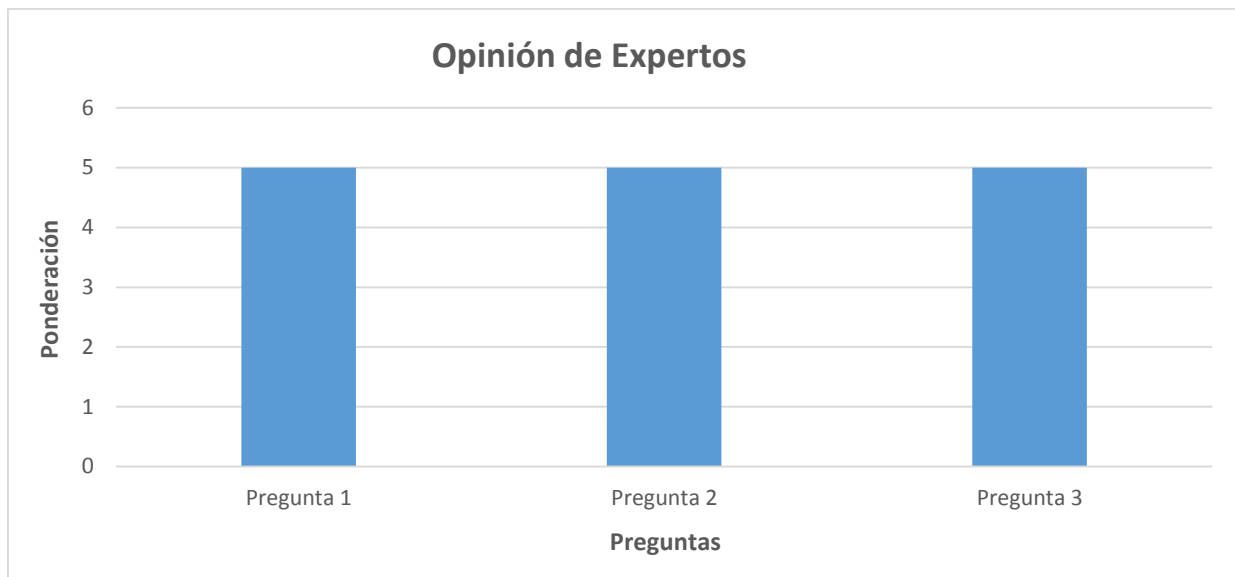
4. Resultados experimentales

Para pensar en la realización de estas pruebas se partió desde el razonamiento de qué pasa con un sistema masa-resorte-amortiguador si se le quita el resorte.

En la figura 4.2 se logra apreciar los resultados obtenidos de las siguientes preguntas valorativas mediante el promedio de las ponderaciones de las respuestas recogidas de los expertos participantes. Estas preguntas fueron respondidas por los expertos con una ponderación de 1 a 5; donde 5 es el máximo con respecto a una respuesta positiva y 1 es lo mínimo o lo más negativo:

- 1) ¿Al guiar el robot percibe que este es capaz de seguir correctamente la trayectoria?
- 2) ¿Cuándo disminuye o aumenta la fuerza que ejerce sobre el robot para la realización de la tarea el dispositivo se lo permite con facilidad?
- 3) ¿Le fué posible cumplir el objetivo deseado?

Tabla 4.19. Facilidad de guiar el robot.



4.3.6.1 Valoración de los pacientes por parte de la terapeuta ocupacional.

Después de finalizar el ciclo de terapias con el sistema robótico, procedemos a solicitar la valoración de la situación de los pacientes, antes y después, por parte de la terapeuta ocupacional. Esta valoración se considera fundamental por ver más allá de aspectos puramente técnicos. A continuación se muestra la valoración de la terapeuta.

Se comenzó con la importancia del contexto físico del lugar que se ha considerado para realizar las intervenciones terapéuticas, con el fin de facilitar la practicidad y prevención de riesgos, evitando en lo posible un ambiente inadecuado tanto para las personas que implementarán los proyectos como para los clientes que recibirán tratamientos.

Considerando que por ser una Institución Educativa y no un Centro de tratamiento se cuenta con barreras arquitectónicas que no favorecen el traslado de los clientes, en esta primera parte se sugieren medios y técnicas de traslados y transferencias, ya que de acuerdo a las nuevas legislaciones para la inclusión de personas con discapacidad se sugiere que en todos los lugares públicos se considere este aspecto en bien de la sociedad.

Los clientes reclutados como prueba piloto de los Proyectos ya mencionados se consideraron con las siguientes características:

- o Problemas osteoarticulares : Artrogriposis, artritis reumatoide, amputaciones
- o En edades de 5 a 15 años con la capacidad cognitiva adecuada, así como la comunicación y lenguaje adecuados a la edad, esto con la finalidad de que nos puedan expresar con libertad y honestidad los beneficios así como las deficiencias que hay en el protocolo proyectado.

Dentro de la profesión de Terapia Ocupacional se realizan evaluaciones y valoraciones adaptadas para valorar el desempeño ocupacional así como las habilidades del individuo por lo que se tomaron en cuenta 2:

1. Para el cliente: Matriz de Análisis por componente y

2. Análisis de Juguete (aunque no es un juguete se valora el tipo de juego o actividad de acuerdo a la gama total de características que se puede lograr con el mismo)

Proyecto “Experimentos de interacción humano-robot en pacientes con deficiencias motoras”.

El desempeño ocupacional desde el desarrollo motor favorece en la postura y movimiento, así como el control volitivo del brazo y la mano además de fuerza y destreza gruesa y fina. En el aspecto sensoriomotor será de gran ayuda para el aspecto vestibular, propioceptivo y táctil. En cuanto a la integración sensorial es adecuado a la integración de esquema corporal así como la praxis en la planeación visual; a nivel social es un juego en solitario que le permite la variedad de diferentes trayectorias; en el aspecto emocional varía la respuesta de acuerdo a la personalidad, provocando gusto por trabajar con un aditamento de gran tamaño o temor por la magnitud del mismo. En el aspecto cognitivo es de beneficio en la concentración, categorización, memoria visual y resolución de problemas

Dentro de los 10 clientes invitados a participar al proyecto se consideraron sus características propias por su padecimiento así como por la edad, con lo que como primera respuesta fue que del total de participantes sólo lo realizaron de manera constante 3 de ellos. Considerando entre los factores externos que implicaron la falta de aceptación se encontró:

- o Distancia del lugar de sesiones otorgadas.
- o Costo del traslado a las terapias.
- o Clima fluctuante en el Estado de San Luis Potosí que afecta a las condiciones físicas de los clientes.

(Cliente M)

A. Componente Sensoriomotor

1. Integración Sensorial: Se percibió un notable avance en la percepción e integración de sí mismo.

a. Consciencia sensorial: Favoreció el resultado de las terapias a una mejor conciencia de su ser integral aún y con el traumatismo adquirido

b. Procesamiento Sensorial: Adecuado e integrado en todos sus sentidos los cuales le aportan un avance físico notorio

c. Destrezas perceptuales: le aportó buenos beneficios en cuanto a su integración de esquema corporal así como a la cinestesia y estereognosia, mejorando su relación en el espacio y orientación topográfica

2. Neuromuscular: Mejoró tono muscular así como rango de movimiento articular del miembro afectado e integración bilateral y manual en lo más posible con uso de su órtesis, mejorando fuerza y resistencia motriz con un adecuado control motor postural

3. Motor: Mejoría notable en la coordinación gruesa y fina así como en la lateralización e integración visomotora para pinza gruesa y fina.

B. Integración cognitiva y Componentes cognitivos

Proceso cognitivo de acuerdo a la edad, logrando atención, habilidad de inicio y termino de la actividad. Obteniendo una adecuada respuesta en secuencia, resolución de problemas y aprendizaje.

C. Destrezas psicosociales y componentes psicológicos.

1. Psicológico: Logró superar su proceso de duelo con el avance físico que él mismo iba notando.

2. Social: Mejoró su integración social al participar activa y voluntariamente con ánimo y corresponsabilidad.

3. Manejo de sí mismo: Logro un autocontrol y aceptación de su proceso de traumatismo físico.

Contexto del Desempeño

A. Aspectos Temporales: Buena respuesta de acuerdo a la edad y aspecto de vida, no sintiendo ni expresando una discapacidad.

B Ambiente: Se logró una integración física y cultural que le beneficia en lo familiar y social como medio de aceptación.

(Cliente T)

A. Componente Sensoriomotor

1. Integración Sensorial: Adaptada de acuerdo a sus capacidades y habilidades físicas.

a. Consciencia sensorial: Mejoría en la aceptación de su persona y capacidad de vida.

b. Procesamiento Sensorial: Adecuados y con mejor respuesta sobre todo en el aspecto propioceptivo-vestibular.

c. Destrezas perceptuales: Mejor integración a su esquema corporal con mejor posición en el espacio, con una adecuada visión complementaria total.

2. Neuromuscular: Mínimo pero favorable y notable rango de movimiento así como fuerza y resistencia con mejor control motor y alineación postural.

3. Motor: Adecuada integración y coordinación gruesa y fina con buen manejo bimanual e integración bilateral, mejorando su destreza y habilidad motriz visomotora.

B. Integración cognitiva y Componentes cognitivos

4. Resultados experimentales

Atenta, cooperadora con buena respuesta a la resolución de problemas así como al seguimiento de secuencias y categorizaciones que le aportan un beneficio en el aprendizaje

C. Destrezas psicosociales y componentes psicológicos

1. Psicológico: Buena aceptación y adaptación a su vida
2. Social: Comunicativa, participativa y sociable con todos los que la tratan
3. Manejo de sí mismo: Se sobre exige mejor respuesta en sus habilidades, manteniendo el control y destreza para aceptar las dificultades que se le presenten.

Contexto del Desempeño

A Aspectos Temporales

De acuerdo a su edad cronológica responde adecuadamente a las actividades sugeridas, así como al desarrollo de tareas solicitadas con buena respuesta

B Ambiente

Desde su aspecto familiar ella se reconoce y acepta física, social y culturalmente por lo que no le afecta en lo mínimo su estado físico apoyándole a un mejor desarrollo.

(Cliente K)

A. Componente Sensoriomotor

1. Integración Sensorial

Adaptada desde su realidad y conocimiento del padecimiento físico actual.

a. Consciencia sensorial

Conocimiento de sus habilidades psicomotrices y capacidades sensoriales.

b. Procesamiento Sensorial

Mejor control propioceptivo vestibular que le ha favorecido a una mejor alineación y control volitivo para realizar sus actividades de forma independiente con mayor estado de alerta en todos sus sentidos lo que le ha aportado un beneficio psicomotriz.

c. Destrezas perceptuales

De acuerdo a los ejercicios de repetición se observa aumento de rango de movimiento articular disminuyendo dolor, con mejor integración consciente de esquema corporal, mejorando la orientación topográfica lo que le permite un adecuado control postural e integración de esquema corporal.

2. Neuromuscular

Con las rutinas sugeridas se observa mejor respuesta a reflejos así como aumento de rango de movimiento articular, mejorando tono muscular, aumentando fuerza y destreza aumentando resistencia de acuerdo a las pautas sugeridas, con mejor control y alineación segmentaria de forma consciente.

3. Motor

Logra mejor control y precisión de pinza gruesa y fina, adecuado uso de lateralidad, con mejor integración bimanual para actividades de precisión aún con dificultad a elevar extremidades superiores sin apoyo sin embargo se observa adecuado control motor e integración visomotora que le permite realizar sus movimientos de forma voluntaria y dirigida al realizar sus actividades de la vida diaria personales.

B. Integración cognitiva y Componentes cognitivos

Adecuado procesamiento cognitivo lo que le permite la realización de tareas de principio a fin con favorable actitud de respuesta a la resolución de problemas de mayor complejidad de acuerdo a la edad.

C. Destrezas psicosociales y componentes psicológicos

1. Psicológico

Mejor autoconcepto, aceptándose a sí misma, valorando sus habilidades y cualidades innatas de ella misma, reconociendo sus avances como un logro personal u significativo.

2. Social

Integración social adecuada, disminuyendo timidez y sobretodo la retracción que por su padecimiento la bloqueaba de acercarse a las demás personas.

3. Manejo de sí mismo

Con logro de una autoestima equilibrada, con mejor autocontrol ante las situaciones de vida diaria, logrando una integración positiva en su ser y hacer.

Contexto del Desempeño

A. Aspectos Temporales

Conforme a su edad cronológica se observa una respuesta favorable respecto a sus intereses personales ya que logra una mejor realización de actividades conforme a su edad, aún a pesar de sus limitaciones motoras.

B Ambiente

Su ambiente no ha tenido adaptaciones para un mejor desempeño de sus tareas sin embargo ella logra la realización de éstas desde la adaptación de ella al lugar, con un adecuado ambiente social que le ha aportado avances significativos sobre todo en su área espiritual pues su iglesia a la que pertenece le ha motivado a continuar su proceso de recuperación lo que de alguna manera culturalmente éste aspecto la lleva a tomar las cosas como un proceso de aprendizaje y oportunidad de vida.

En conclusión se puede deducir que el resultado no solo implica un resultado físico como tal, sino el ambiente de la persona, así como el deseo de ocuparse o habilitarse para una vida en sociedad.

Los protocolos son adecuados, la respuesta dependerá del valor que se le otorgue al mismo proceso de desarrollo y evolución del cliente en beneficio de una recuperación e integración social.

Como prueba piloto se puede concretar que se requieren mejoras a las barreras arquitectónicas del lugar así como a las dinámicas de juego para los clientes pues en este caso como niños requieren de un desarrollo cognitivo constante. Dentro de los beneficios de la tecnología adaptada hay buena respuesta en bien de los que así lo requieran.

4.4 Conclusiones preliminares.

En este capítulo se realizaron distintas pruebas para evaluar el grado de avance de los pacientes. Realizando un seguimiento de trayectorias adecuado usando el sistema robótico. También se prueba la factibilidad de una propuesta de mejora al sistema de rehabilitación basado en control de impedancia con las características propuestas en el capítulo 3.

A partir de todas las pruebas realizadas, las cuales se muestran en las secciones anteriores, así como en el apéndice C; se concluye que el sistema de rehabilitación realiza un buen seguimiento de trayectorias en interacción y que los pacientes muestran un buen grado de mejora.

En las tablas (4.1 a 4.16) se muestra la evolución de los promedios de seguimiento de trayectoria por parte del cliente calculado como:

4. Resultados experimentales

$$S_t = \sqrt{(X_r - X_i)^2 + (Y_r - Y_i)^2 + (Z_r - Z_i)^2}$$

Y luego:

$$S_{tt} = \frac{\sum S_t}{n}$$

Donde:

X_r, Y_r, Z_r : Trayectoria enseñada al robot.

X_i, Y_i, Z_i : Componentes de la trayectoria de interacción.

n : Cantidad de mediciones o puntos de la trayectoria.

S_t : Diferencia del seguimiento de trayectoria en un punto.

S_{tt} : Promedio de seguimiento de trayectoria de la prueba.

En la mayoría de los experimentos se nota que disminuye la diferencia del seguimiento de trayectoria según avanzó el cliente cumpliendo las sesiones de terapias. En los casos en que no se comporta así, a medida que aumenta el valor de la diferencia del seguimiento de trayectoria aumenta también la fuerza ejercida por el paciente beneficiándolo de igual manera.

En el caso donde aumenta la fuerza entra con mucho peso la valoración del terapeuta, ya que esto podría interpretarse como aumento en la rigidez de la extremidad afectada. La experiencia y la valoración del terapeuta cumplen un papel fundamental a la hora de decidir. En los casos que se estudiaron se constató que el aumento de fuerza en el paciente se debe a recuperación funcional y fortalecimiento de la extremidad afectada.

Al término de las sesiones se constata que la evolución de los pacientes fue satisfactoria, presentando claros signos de mejoría.

Conclusiones

Para personas afectadas por Artrogriposis Múltiple Congénita la rehabilitación tiene un papel fundamental, como sucede con otras enfermedades osteoarticulares. Es por esto que la adecuación de las nuevas tecnologías como apoyo para la realización de estas tareas nos motivó para el desarrollo de esta tesis.

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se presentó la implementación y validación de un sistema de rehabilitación basada en el uso de un robot industrial y en el uso de un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia, en pacientes que presentan deficiencias motoras en extremidades superiores (codo y hombro). Esto fue posible por los resultados obtenidos de seguimiento de trayectorias por parte de los mismos, el comportamiento de la fuerza ejercida y la valoración por parte de la terapeuta. Los objetivos planteados al inicio del trabajo han sido alcanzados, dentro de estos resaltamos los siguientes:

Se logró el ajuste y programación del robot para la realización de las actividades de rehabilitación con personas afectadas. No se presentaron síntomas de comportamientos no deseados del sistema durante la realización de las rutinas de enseñanza por parte de la terapeuta y los expertos, y el cumplimiento de las rutinas de rehabilitación por parte de los pacientes.

Se confeccionó el protocolo de experimentación atendiendo aspectos fundamentales como: Diseño del estudio, variables a evaluar, actividades y procedimientos, consideraciones éticas, medidas de seguridad adoptadas para el caso dado de una eventualidad, y otros aspectos no menos relevantes a tener en cuenta para el proceso de experimentación.

Para las trayectorias a seguir durante las terapias de rehabilitación se propusieron diferentes juegos. Estos juegos fueron diseñados metodológicamente con base en las técnicas de la grafología para el seguimiento de trayectorias de ejercicios básicos.

Teniendo en cuenta las amplitudes de los movimientos a lograr en las sesiones según los pacientes a tratar y la aprobación de la terapeuta ocupacional.

Se logró contar por primera vez en el grupo de robótica de la UASLP con la participación de pacientes en un proyecto rehabilitación robótica. Estos pacientes fueron provenientes del Centro de Rehabilitación y Educación Especial de San Luis Potosí (CREE-SLP) para el seguimiento de trayectorias con el sistema robótico como apoyo para los movimientos realizados durante las terapias.

Luego de implementar el sistema de rehabilitación robótica se simula el control de impedancia como prueba de comportamiento del sistema previa a su uso.

Finalmente se propone una modificación en el proceso de enseñanza del robot, donde se elimina del sistema modelado la constante que caracteriza el resorte. Esta modificación le aporta mayor docilidad al robot a la hora de ejecutar el proceso de enseñanza por parte del terapeuta por el hecho que el sistema no presenta la tendencia a ejercer una fuerza en el proceso de interacción con dirección el punto de origen y no presenta comportamientos no deseados.

Según el desempeño de los pacientes observamos que:

- Los movimientos activos-asistidos son muy buenos para aumentar la fuerza (motricidad gruesa).
- Los movimientos libres son convenientes para desarrollar la precisión (motricidad fina).

Este trabajo de tesis presenta las siguientes aportaciones:

- Implementación y validación de un sistema rehabilitación robótica basado en el uso de un robot industrial y en el uso de un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia, aplicable en pacientes que presentan deficiencias motoras por causa de enfermedades osteoarticulares.

- Propuesta metodológica de juegos a realizar como rutinas de rehabilitación para el uso del sistema robótico de rehabilitación.
- Grabado de trayectorias mediante rutinas implementadas en lenguaje karel propio del robot y mediante el control de impedancia, sin uso de componentes extras en el sistema.
- Publicación de artículo “El uso de robots como apoyo en terapia ocupacional”. Publicado en la revista “Saberes y Ciencias” del periódico “La Jornada de Oriente”. Abril 2015, número 38, año 4, Suplemento mensual.
- Primer acercamiento a pruebas de interacción humano robot de un sistema de rehabilitación basado en un robot industrial con pacientes afectados en el grupo de trabajo de robótica de la UASLP y en México, según se tiene conocimiento.

Trabajo futuro

En base a la experiencia adquirida durante el desarrollo del trabajo de tesis, parten estas recomendaciones en posibles áreas de oportunidad del tema.

- Hacer más extensivo en tiempo, patologías a tratar y pacientes, el servicio de terapia de rehabilitación brindado en el laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ejecutar una comparación con dos grupos de pacientes. Uno que ejecuten rehabilitación con terapia ocupacional convencional y otro que se rehabilite mediante la terapia ocupacional asistida por el sistema robótico.
- Analizar las señales de los pacientes por medio de métodos de análisis como por ejemplo: DFA o transformada de Fourier. Esto será con el objetivo de establecer grado de avance mediante otros métodos.

ANEXOS

ANEXO A



Maestría en Ingeniería Mecánica Mecatrónica y Sistemas Mecánicos.

Protocolo de experimentación

Proyecto:

“Experimentos de interacción humano-robot en pacientes con deficiencias motoras.”

Autor: Joel Abad Puentes

Asesor: Dr. Emilio J. González Galván

Título: Experimentos de interacción humano-robot en pacientes con deficiencias motoras.

Investigadores

Ing. Joel Abad Puentes

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP-FI)
Av. Dr. Manuel Nava #8 Edificio P
Zona Universitaria, CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P. México.

Tel/fax (444) 8-17-33-81

Email:josalsa9@gmail.com

Dr. Emilio J. González Galván

Facultad de Ingeniería, UASLP
Av. Dr. Manuel Nava #8 Edificio P
Zona Universitaria, CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P. México
Tels. (+52) (444) 826.2330 al 2339 Fax: (+52) (444) 826.2336
Email: emilio.j.gonzalez.galvan@gmail.com

Planteamiento del Problema:

Con el paso del tiempo el hombre se ha ido preguntando cual es la mejor manera de recuperar a personas que por un motivo u otro han perdido movilidad motora. La respuesta está indudablemente en la simbiosis que necesariamente tendrá que hacer el terapeuta con las nuevas tecnologías.

La rehabilitación con terapia ocupacional auxiliada por robots simula actividades con movimientos funcionales para la vida diaria con retroalimentación visual a través de juegos y gráficas, lo cual permite que la terapia sea más interesante para el que la realiza. Los robots tienen alta capacidad de repetición, pueden medir de manera precisa las características de una actividad terapéutica (evaluación), y ejecutar retroalimentación, por lo que presentan todas las ventajas para ser utilizado como apoyo del terapeuta en su trabajo diario.

Marco Teórico:

Terapia ocupacional

Según definición de la American Occupational Therapy Association (AOTA) de 1986, la Terapia Ocupacional se basa en “el uso terapéutico en las actividades de autocuidado, trabajo y juego para incrementar la función independiente, mejorar el desarrollo y prevenir la discapacidad. Puede incluir la adaptación de las tareas y el entorno para lograr la máxima independencia y mejorar la calidad de vida”.

En Terapia Ocupacional se contemplan varias áreas de ocupación:

- Actividades de la vida diaria, de auto-mantenimiento o de auto-cuidado.
- Actividades productivas, que incluyen todas aquellas actividades, remuneradas o no, que suponen una aportación a la sociedad.
- Actividades de ocio.

El terapeuta ocupacional aborda al ser humano como un ser integral, utilizando como medios de base, la participación directa en ocupaciones y la relación terapéutica. El entrenamiento en hábitos y programas terapéuticos ideados para crear oportunidades de participación en ocupaciones que fueran placenteras, creativas y educacionales constituye base fundamental en el desarrollo de esta especialidad.

En los últimos años la rehabilitación robótica se ha convertido en un campo emergente y las potencialidades de las terapias asistidas por robots han sido ampliamente investigadas.

Durante las sesiones tradicionales de neurorehabilitación el rol del paciente es pasivo y la participación de las estructuras de alto nivel de su sistema nervioso son limitadas. Por otra parte, la terapia asistida por robot permite a los sujetos realizar movimientos activos, promoviendo la neurogénesis y neuroplasticidad, optimizando la recuperación funcional de la afectación neurológica. Además, el robot es capaz de proveer una dosificación de terapia cuantificable en intensidad y repetitividad para su evaluación, permitiendo esto poder mejorar la recuperación funcional de heridas neurológicas.

Estos principios básicos tienen un profundo impacto a la hora de escoger y aprobar técnicamente la estructura mecánica a utilizar y las estrategias de control a implementar.

Una de las principales características que tiene que asegurar el Sistema robótico para neurorehabilitación es un alto grado de docilidad, de forma tal que el usuario lo pueda mover percibiendo una baja impedancia mecánica, con el fin de no obstaculizar los movimientos voluntarios de los pacientes ejecutando una tarea específica y para no perturbar sus estrategias motoras naturales.

De acuerdo con investigaciones recientes en relación a interacción física humano-robot, el nivel de docilidad del robot tiene que ser definido no sólo para cumplir con restricciones "biomecánicas" ("fuerte"), sino también para hacer frente a las limitaciones "suaves" o "intrínsecas", que son de origen neural. Estas restricciones blandas son impuestas por el cerebro humano para resolver las redundancias cinemáticas (mediante la reducción de los Grados de libertad a los necesarios) y poner en marcha estrategias para la eficiencia del motor.

Control de impedancia.

La idea original del controlador de impedancia pretende caracterizar al robot con un comportamiento igual al de una impedancia mecánica y especificar los parámetros de comportamiento de dicha impedancia según la tarea o superficie de operación sobre la cual el robot será manipulado. En este ámbito ya se han desarrollado diversos mecanismos enfocados al área de rehabilitación, donde se pretende tenga su principal desarrollo el presente proyecto de tesis.

El control de impedancia no se limita a definir el comportamiento de un sistema masa-resorte-amortiguador en el marco de referencia de la herramienta o centro de la herramienta (TCP; Tool Center Point) del robot, sin embargo, esta interpretación aunque sencilla, es la que más se ajusta para su implementación en sistemas robóticos de arquitectura cerrada, es decir, no se tiene acceso a los pares de control sino que se controla indicando la posición articular, cartesiana o angular deseada.

El control de fuerza de interacción entre el operador y el robot implementado en este trabajo de tesis es el denominado control de impedancia de tipo cinemático puesto que la arquitectura original del robot es cerrada y se encuentra basado en posición y velocidad, prácticamente se trata de un control indirecto de fuerza.

Las fuerzas involucradas en el control de impedancia se obtienen a través de las mediciones que proporciona el sensor de fuerza FS-10iA, dichas señales de fuerza son muestreadas y expresadas de manera discreta para ser transformadas en el vector de ajuste de posición que permite generar la nueva trayectoria del robot manipulador, el método para la discretización de dichas señales que se utiliza en este proyecto es el método de resolución numérica de Runge-Kutta de segundo orden.

Para llevar a cabo los ejercicios de rehabilitación por medio del robot de tipo industrial es necesario poder controlar tanto la posición como la fijación de la orientación del efector final, el robot se asemeja a un sistema idealizado masa-resorte-amortiguador en la que le corresponde la relación dinámica mediante la cual se genera la respuesta para cada grado de libertad cartesiano en traslación, ante la interacción del efector final y su entorno; en tanto que para la orientación la relación dinámica que se impone es un sistema momento de inercia-resorte-amortiguador, de forma que el control del momento ejercido en la herramienta sea congruente dimensionalmente con el estímulo que perciben los grados de libertad de orientación.

Estado del arte.

REHAROB

- Movimientos pasivos. El robot impone las trayectorias a seguir por la extremidad superior lesionada, sin posibilidad de ser alteradas.

- Movimientos activos asistidos. El humano es capaz de modificar las trayectorias que impone el robot.
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en los movimientos para que el paciente realice su máximo esfuerzo.
- Movimientos en espejo. Una trayectoria descrita por la extremidad superior no lesionada es capturada por medio de un sistema especial para captura de movimiento. Después, la trayectoria es seguida por el robot tal como fue capturada o en espejo para la extremidad superior con hemiparesia, con la posibilidad de ser alterada.

MIME

- Movimientos pasivos. El robot se encarga de mover la extremidad superior lesionada hacia el objetivo, con una trayectoria predeterminada.
- Movimientos activos asistidos. El paciente trabaja en conjunto con el robot para realizar los movimientos necesarios para llegar a su objetivo.
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en la dirección del movimiento deseado para que así el paciente llegue a la meta con máximo esfuerzo.
- Movimiento bilateral. Este sistema es capaz de reproducir, en forma de espejo, el movimiento continuo de un miembro no paralizado.

Objetivo:

El presente proyecto de contempla la validación de un sistema de rehabilitación basada en el uso de un robot industrial y en el uso de un esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia, en pacientes que presentan deficiencias motoras en extremidades superiores (codo y hombro).

Objetivos específicos

- Confección de herramienta auxiliar necesaria para agarre y sujeción de extremidades superiores al robot en caso de ser necesaria.
- Análisis de datos experimentales para validación del sistema de rehabilitación.

Metodología

Diseño del estudio:

El diseño de esta investigación será de forma experimental ya que mediante la realización de rutinas por personas afectadas y con ayuda del robot se validará la factibilidad del uso del sistema de rehabilitación bajo el esquema de control de interacción humano-robot, basado en control de impedancia.

Actividades y Procedimientos:

Ante todo se recibirá al paciente y se le hará una explicación detallada de los procedimientos a los que será sometido así como de los riesgos principales que enfrentará y las medidas y dispositivos de seguridad que tendrá a mano. También se le recomendará asistir con vestimenta cómoda que no le constituya un freno en cuanto a la libertad de movimientos necesaria para la complementación del trabajo a ejecutar por sus extremidades superiores.

Se le hará lectura y posteriormente se firmará un consentimiento informado donde se da a conocer al voluntario los inconvenientes que pueden surgir durante la ejecución de las rutinas, las distintas formas de lidiar con algún problema de seguridad y donde autoriza a realizar el procedimiento con conocimiento de causa.

Los voluntarios después de ser recibidos con la explicación del experimento a realizar, se les hará una demostración que constituya una estimulación visual y sirva como una familiarización con los procedimientos a realizar.

Adicionalmente se realizarán movimientos sobre el plano transversal de extensión y flexión del brazo y antebrazo, pidiéndoles identificar los puntos máximos y mínimos (aquellos en los cuales la persona considere como un límite para su fisiología no causándole daño o incomodidad a la reproducción del mismo) para cada uno de estos movimientos. Estos serán fijados como el área de trabajo efectivo donde se moverá el robot en las configuraciones experimentales.

Una vez listo el paciente será sentado en una silla frente a una superficie de trabajo cercana del robot, su mano estará sujeta al sensor de fuerza situado en el efector final, su brazo será situado horizontalmente y con ayuda de algunos suplementos de sujeción sostenido de tal manera que se encuentre en un estado de reposo (no ejerciendo alguna fuerza).

Se llevarán a cabo las rutinas de ejercicios que normalmente realizan los pacientes en terapia ocupacional con la enseñanza previa de la trayectoria a seguir por el robot en las distintas configuraciones:

- Movimientos pasivos. El robot impone las trayectorias a seguir por la extremidad superior lesionada, sin posibilidad de ser alteradas.
- Movimientos activos asistidos. El humano es capaz de modificar las trayectorias que impone el robot.
- Movimientos activos restringidos. El robot proporciona cierta resistencia en los movimientos para que el paciente realice su máximo esfuerzo.

Una vez concluidas las rutinas estará concluido el experimento con la persona. Se realizará la recopilación de la información obtenida de la persona para el posterior procesamiento.

Variables:

Variable	Definición operacional	Tipo de variable	Categorías	Método de recolección
Fuerza	Acción sobre estado de movimiento o reposo.	Cuantitativa-continua	Dado en Kg/cm ²	Base de datos
Tiempo	Duración de acontecimientos	Cuantitativa-continua	En segundos	Base de datos
Trayectoria	Localización en el espacio	Cuantitativa-continua	Enseñanza-Real	Base de datos

Recolección de Información:

Para la recolección de la información se contará con la supervisión y apoyo de terapeutas expertos que colaboran con centros de rehabilitación locales como el CREE-SLP.

Se validará el sistema de rehabilitación monitoreando los datos recolectados mediante la captura y análisis de los datos del sensor de fuerza, también tomándose en cuenta el tiempo de completamiento de las rutinas y el seguimiento de trayectorias (tanto la de enseñanza como la de interacción) en la realización de las rutinas de rehabilitación por los pacientes. Estos datos servirán para documentar la evolución de los pacientes mediante el análisis comparativo de las variables controladas y validar la correcta implementación del control de impedancia para cada una de los movimientos de codo y hombro involucrados en las rutinas de rehabilitación.

Plan de Análisis:

El análisis, será de tipo **Concordancia** (mediante la validación del método del esquema de interacción humano-robot bajo el esquema de control de impedancia). Esto se hará mediante el análisis de datos y gráficas mediante el software Matlab.

Consideraciones Éticas:

Este estudio será de gran importancia para la implementación de un sistema de rehabilitación asistido por un robot que por lo repetitivo de los movimientos a efectuar y la capacidad de medir la fuerza que se ejerce mediante un sensor de fuerza, otorga beneficios tales como la asistencia al terapeuta en la ejecución de terapias altamente repetitivas y la comparación del nivel de mejora del paciente en función del tiempo de trabajo. El sistema a implementar cuenta con medidas de seguridad previamente implementadas; siendo fundamental la redundancia de los botones de paro de emergencia para el caso que así lo requiera.

Se asegurará la total confidencialidad del paciente participante en el estudio.

Cronograma:

Tabla 4.Cronograma de experimentación.

Actividades	Meses						
	1	2	3	4	5	6	7
Ajuste de la instrumentación	X						
Recolección de la información.		X	X	X	X	X	X
Procesamiento de datos		X	X	X	X	X	X
Análisis de la información			X	X	X	X	X
Escritura de informe final				X			X

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA ESTUDIO DE VALIDACIÓN DE SISTEMA DE REHABILITACIÓN BASADO EN EL USO DE UN ROBOT INDUSTRIAL COMO APOYO EN PACIENTES QUE PRESENTAN DEFICIENCIAS MOTORAS EN EXTREMIDADES SUPERIORES (CODO Y HOMBRO).

Nombre del paciente _____ Fecha de nacimiento __/__/__

Edad ____ sexo ____ Domicilio _____

Representación Legal y/o familiar responsable _____

Relación con el paciente _____

Universidad Autónoma de San Luis Potosí ____ de _____ 20__

Yo _____ en pleno uso de mis facultades mentales y en mi calidad de paciente o representante legal de este:

DECLARO EN FORMA LIBRE Y VOLUNTARIA LO SIGUIENTE:

Autorizo al personal del laboratorio de robótica de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y a la terapeuta _____

_____ para realizar todos los tratamientos, estudios y rutinas ocupacionales que sean necesarias para mi atención como voluntario en un estudio de aplicación de nuevas técnicas en rehabilitación.

Manifiesto que recibí una explicación detallada de los procedimientos a los que voy a ser sometido (a) así como de los riesgos principales, los cuales son:

También he comprendido que existen riesgos connaturales e imprevistos en acto de atención médica, según lo fundamentado en la Ley General de la Salud.

Así mismo autorizo al prestador del servicio (estudio terapéutico) para la atención de contingencias y urgencias derivadas del acto autorizado, atendiendo al principio de libertad prescripta.

Estoy enterado (a) de que no se puede tener una garantía absoluta sobre los resultados del procedimiento. De igual manera he sido enterado de que, en cualquier momento y sin necesidad de explicación alguna puedo renunciar por escrito a seguir en el estudio en cuestión.

Manifestando que la anterior información se me dio a conocer en un lenguaje claro y sencillo y respondiendo el médico a cada una de mis dudas, por lo que no existe inconveniente alguno en otorgar mi más amplia autorización.

Nombre y firma del paciente

Nombre y firma del terapeuta

Nombre y firma del responsable

ANEXO B

Manual del usuario (terapeuta) del Sistema robótico de rehabilitación robótica de codo y hombro asistida con robot FANUC LR 200 Mate iC.

Sistema desarrollado en:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE ROBÓTICA

Autor: **Ing. Joel Abad Puentes**

Asesor: **Dr. Emilio Jorge González Galván**

FANUC LR Mate 200iC



Contenido

Introducción.	137
1. Encendido y apagado del sistema robótico FANUC LR Mate 200iC.	137
2. Manejo del Teach Pendant.	138
3. Ubicación del robot en la posición inicial para rehabilitación.	138
4. Botones de la terminal de enseñanza.	139
5. Sistema de captura de trayectorias para rehabilitación de codo y hombro.	139
6. Extracción de la trayectoria generada.	140
7. Lectura de trayectoria generada y terapia de rehabilitación.	140
8. Archivo clínico del paciente.	141
9. Solución de problemas.	142
10. Fin de la terapia de rehabilitación.	143

Introducción.

Este manual provee información de referencia para el uso del sistema de rehabilitación robótica de extremidades superiores (codo y hombro) implementado con el robot FANUC LR Mate 200 iC, equipado con un sensor de fuerza FANUC FS-10iA que provee las variables a analizar en el desempeño de la interacción del paciente con el robot.

Este manual incluye información esencial para el buen uso del sistema y la seguridad, tanto de las personas, como del sistema robótico. Se recomienda antes de operar el sistema leer este manual cuidadosamente.

1. Encendido y apagado del sistema robótico FANUC LR Mate 200iC.

Para el encendido o apagado del sistema de rehabilitación robótica, subir el *switch* ubicado del lado superior izquierdo del controlador del sistema robótico FANUC SYSTEM R-30iA Mate a la posición *on*. Para el apagado del sistema bajar el *switch* ubicado del lado superior izquierdo del controlador del sistema robótico a posición *off* (figura 1).



Figura B.0.1. Botón de encendido y apagado del sistema robótico Fanuc LR Mate 200iC.

2. Manejo del Teach Pendant.

Esta sección contiene la identificación de los botones del *Teach Pendant* FANUC LTD (Figura 2). A lo largo de este manual se ilustra el uso y funciones de cada botón. Estos son necesarios para el buen uso del sistema de rehabilitación robótica, cada uno de ellos cumple con una función específica.

1



Figura B.0.2. Botones de Teach Pendant.

3. Ubicación del robot en la posición inicial para rehabilitación.

Antes de iniciar cualquier captura de trayectoria es necesario colocar al robot en la posición inicial adecuada, para ello se hace uso del *Teach Pendant* FANUC LTD, oprimir el botón SELECT, se desplegarán en pantalla todos los programas ejecutables que se encuentran almacenados en el robot, localizar por medio de las flechas de desplazamiento el nombre del programa BRACREE1, una vez localizado el programa a ejecutar presionar la tecla ENTER, posteriormente presionar el botón CYCLE START ubicado en el lado superior izquierdo del controlador, el cual se iluminará de color verde; el robot se colocará en la posición inicial programada.

4. Botones de la terminal de enseñanza.

Para la captura de una trayectoria, es necesario utilizar la terminal de enseñanza (Figura A.3), para ello se muestran los 2 botones tipo “push” esenciales para dicha ejecución, uno de ellos tiene la función de guardar la trayectoria en el controlador del robot y el otro ejecuta el tipo de movimiento que se quiera lograr del robot, ya sea en orientación, posición o total, y la finalización del programa de enseñanza.

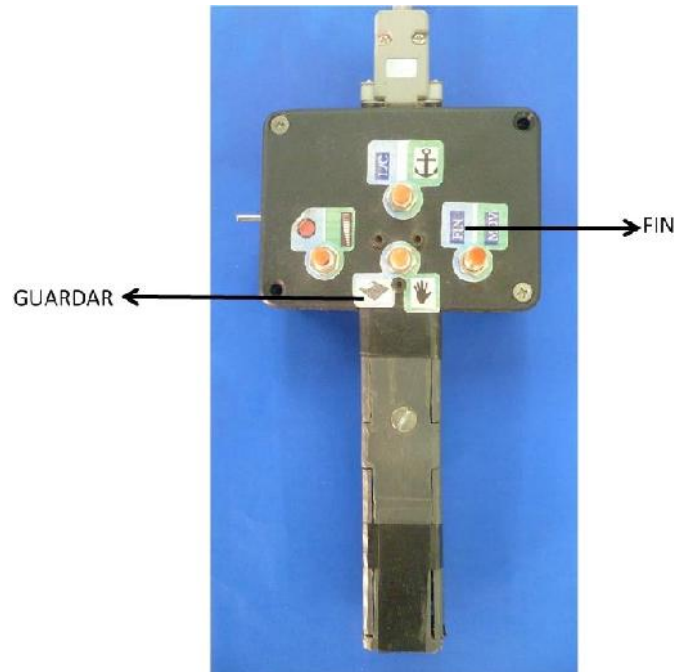


Figura B.0.3. Botones de guardado de trayectorias y finalización del programa en la enseñanza del robot.

5. Sistema de captura de trayectorias para rehabilitación de codo y hombro.

Para lograr la captura de trayectorias se hace necesario terminar la ejecución del programa de enseñanza del robot. Para ello, nuevamente se hace uso del *Teach Pendant* FANUC LTD. Oprimir la siguiente secuencia de botones FCTN / 1 (ABORT ALL) / RESET, guiándose por medio de la pantalla del *Teach Pendant*, con ello se indica al robot que aborte todas las tareas que se encuentra ejecutando. Luego de seguir esos pasos, se puede elegir el programa para captura de trayectorias de interacción presionando nuevamente el botón SELECT, los cuales se desplegarán en pantalla, localizar por medio de las flechas de desplazamiento el nombre del programa BRACREE2, una vez localizado

el programa a ejecutar presionar la tecla ENTER, se recomienda subir la velocidad al 100% por medio de los botones ubicados en la parte inferior derecha del *Teach Pendant* o bien a consideración del operador, posteriormente presionar el botón CYCLE START ubicado en el lado superior izquierdo del controlador, el cual se iluminará de color verde.

Inmediatamente después aparecerá en la pantalla de *Teach Pendant* la leyenda “Guiando se ha establecido la posición actual como fija”, colocar la mano agarrando la herramienta del robot y generar la trayectoria deseada por el área de trabajo, regresando a la posición de inicio para cerrar el ciclo de la trayectoria a ejecutar; una vez realizada dicha trayectoria se hace uso de la terminal de enseñanza presionando el botón tipo “push” GUARDAR (ícono de un diskette), apareciendo en pantalla del *Teach Pendant* la leyenda: “Grabado de puntos” y por último presionamos FIN, que despliega en pantalla: “Ha finalizado el grabado de puntos”, esto nos garantiza que la trayectoria ha sido guardada dentro del controlador del robot.

6. Extracción de la trayectoria generada.

Una vez más abortamos el programa que se ejecutó por medio de la secuencia FCTN / 1 (ABORT ALL) / RESET, posteriormente presionamos en el *Teach pendant* la secuencia MENU / 7 (FILE) / ALL FILES / ENTER, con ello se accede a los archivos almacenados en el controlador del robot, por medio de la flechas de desplazamiento se busca el archivo “trayectoriaumd.kl”, se inserta la memoria USB menor a 1 GB en la parte lateral de *Teach Pendant*, se presiona la secuencia NEXT / F2 (COPY) / F4 (CHOICE) / 6 (UT1) / F1 (DO COPY) y esperar hasta que aparezca la leyenda “Copied to UT1:\<nombre del archivo>”, y extraer memoria USB de la unidad. Así queda extraída la trayectoria modelo o deseada ejecutada por el terapeuta.

7. Lectura de trayectoria generada y terapia de rehabilitación.

Insertar la memoria USB en la computadora de escritorio marca DELL OPTIPLEX 745 del laboratorio de robótica, convertir el archivo trayectoriaumd.kl a .txt, abrir el archivo, ubicarse en la barra de menú y oprimir las funciones EDITAR / Seleccionar todo / EDITAR / Tabulación / Disminuir tabulación / Guardar / Cerrar.

Abrir la carpeta que se encuentra en el escritorio de la PC la interfaz en C++ para la comunicación con el sistema robótico. Abrir el proyecto llamado Inercial.vcproj; una vez abierto el programa oprimir el ícono PLAY el cual se encuentra en parte superior de la pantalla, se desplegará una interfaz la cual contiene las funciones esenciales para la comunicación con el sistema. Una vez desplegada la interfaz, tomar el *teach pendant* presionando nuevamente el botón SELECT para desplegar los programas, se busca el programa BRACREE1 para la ejecución de los ejercicios de rehabilitación de codo y hombro, lo selecciona con el botón ENTER y presione el botón CYCLE START.

Una vez realizado esto se sienta al paciente cerca del dispositivo robótico, colocando su mano en la herramienta de trabajo, teniendo cuidado y precaución que tanto el agarre como toda la extremidad superior se mantengan firmes.

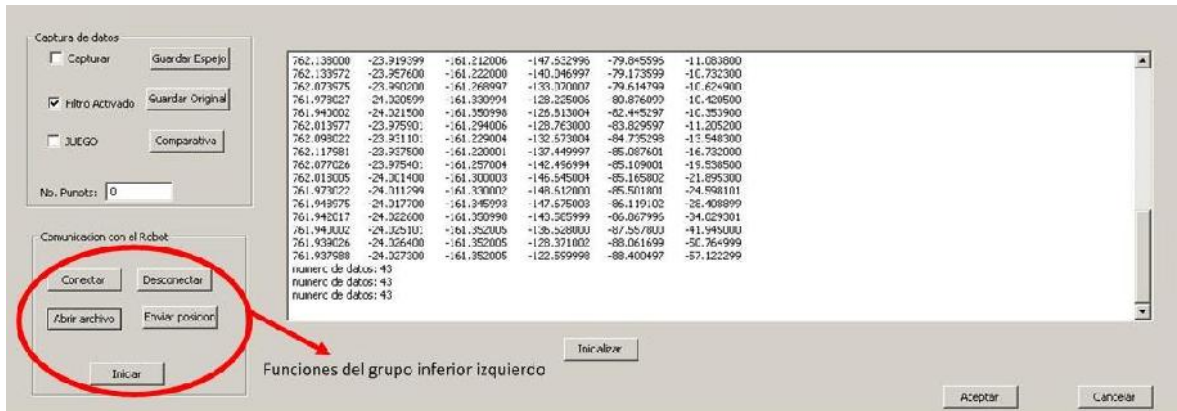


Figura B.0.4. Botones de la interfaz para la comunicación con el sistema de rehabilitación robótica.

Se dirige a la computadora de escritorio y se utilizan los botones del grupo inferior izquierdo (Figura 4) mediante la siguiente secuencia: Conectar /Abrir archivo/ <nombre del archivo> / Abrir / Enviar a posición / Iniciar; inmediatamente después de ello el robot iniciará la terapia de rehabilitación para el paciente.

8. Archivo clínico del paciente.

Al terminar la terapia de rehabilitación se extraen del controlador del robot las fuerzas generados por el paciente y la trayectoria ejecutada por el paciente durante la sesión. Con esos datos se puede graficar la trayectoria descrita por el paciente en la interacción, las componentes de fuerza ejecutadas en los distintos ejes y obtener datos estadísticos que describen el comportamiento del paciente en la terapia. Todo esto mediante el programa llamado INTROB, código desarrollado en Matlab para estos casos. La comparación de la trayectoria realizada por el paciente con la realizada por el terapeuta o por el mismo paciente en una sesión anterior se efectúa mediante el programa llamado SUPROB, código desarrollado en Matlab para esto. Con esto se puede crear el archivo clínico de los pacientes; el procedimiento es el mismo de la extracción de las trayectorias generadas en la enseñanza, solo que el nombre de los archivos a extraer son los que se muestran en la tabla B.0.1.

Tabla B.0.1. Nombre de los archivos.kl que se guardan en el controlador del robot después de una sesión de terapia de rehabilitación.

NOMBRE DEL ARCHIVO	DESCRIPCIÓN
trayectoriaumd2.kl	Trayectoria que realiza el paciente durante la terapia de rehabilitación en la interacción humano-robot.
fuerumd2.kl	Fuerzas detectadas por el sensor de fuerza FS-10iA que ejerce el paciente durante la terapia.

9. Solución de problemas.

Durante el uso del sistema de rehabilitación robótica se pueden o no presentar algunos inconvenientes los cuales se presentan en la tabla 0.2, y a su vez se describen los pasos para su solución.

Tabla B.0.2. Problemas comunes que se pueden presentar durante el uso del sistema de rehabilitación y sus posibles soluciones.

PROBLEMA	SOLUCIÓN
La computadora de escritorio no conecta con el robot. (Mensaje “Esperando cliente”)	Asegúrese de que el cable del modem se encuentre bien conectado a la PC, si es así desconecte el modem, espere 10 segundos y vuelva a conectar.
Los archivos de enseñanza o interacción no se guardan en el controlador.	Elimine algunos de los archivos .kl que se encuentran en el controlador: MENU / 7 (FILE) / ALL FILES / ENTER y seleccione los archivos a eliminar , posteriormente oprima NEXT / F1 (DELETE) / F4 (YES)
El LED indicador de la unidad controladora no enciende.	Aborte todo por medio de <i>Teach Pendant</i> : FCNT/ ABORT ALL / RESET y vuelva a cargar el programa.
Al presionar algún paro de emergencia se presenta un error en <i>Teach Pendant</i>.	Quitar el paro de emergencia dando medio giro al botón de paro y abortar todo FCNT / ABORT ALL / RESET.

10. Fin de la terapia de rehabilitación.

Una vez terminada la sesión de rehabilitación y la extracción de los datos que servirán de base para la comparativa en el avance terapéutico de los pacientes, se cierran los programas ejecutados de la PC y se apaga al sistema robótico bajando el *switch* que se encuentra en la esquina superior izquierda del controlador FANUC SYSTEM R-30iA Mate a la posición OFF.

Gráficas de resultados de pacientes durante la realización de los experimentos

- Paciente T

Experimento 1

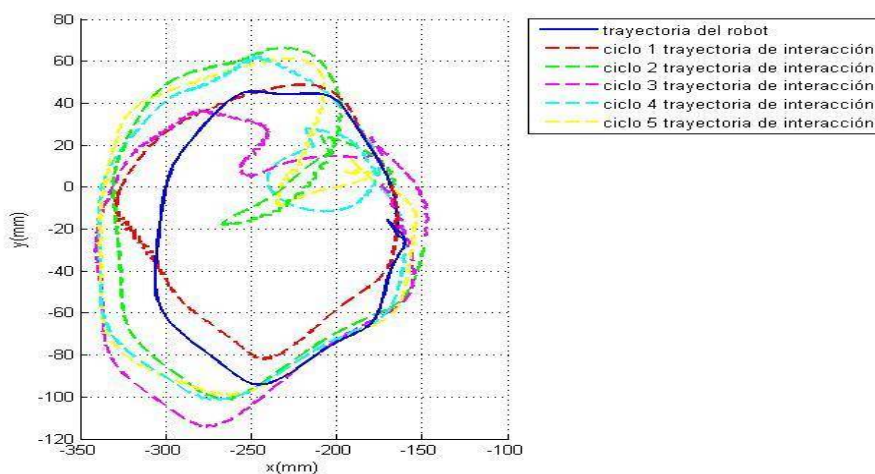


Figura C.0.1. Trayectoria experimento 1 T1_170415_D_Tr.

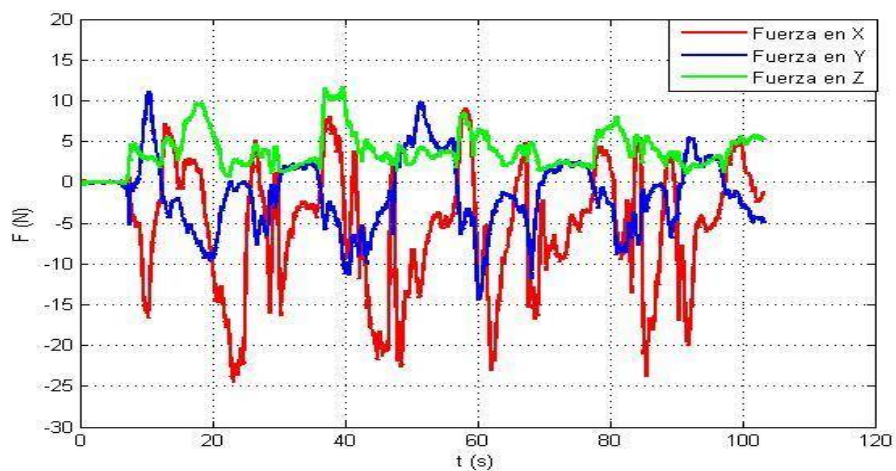


Figura C.0.2. Componentes de fuerza experimento 1 T1_170415_D_F.

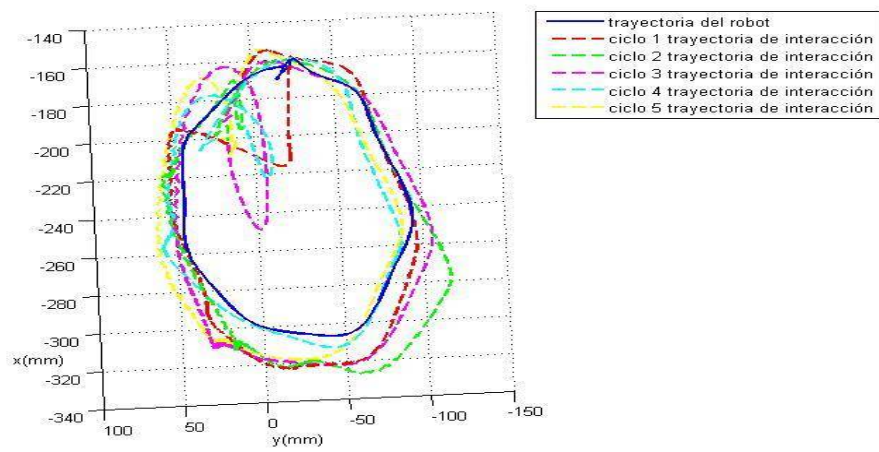


Figura C.0.3. Trayectoria experimento 1 T1_280415_D_Tr.

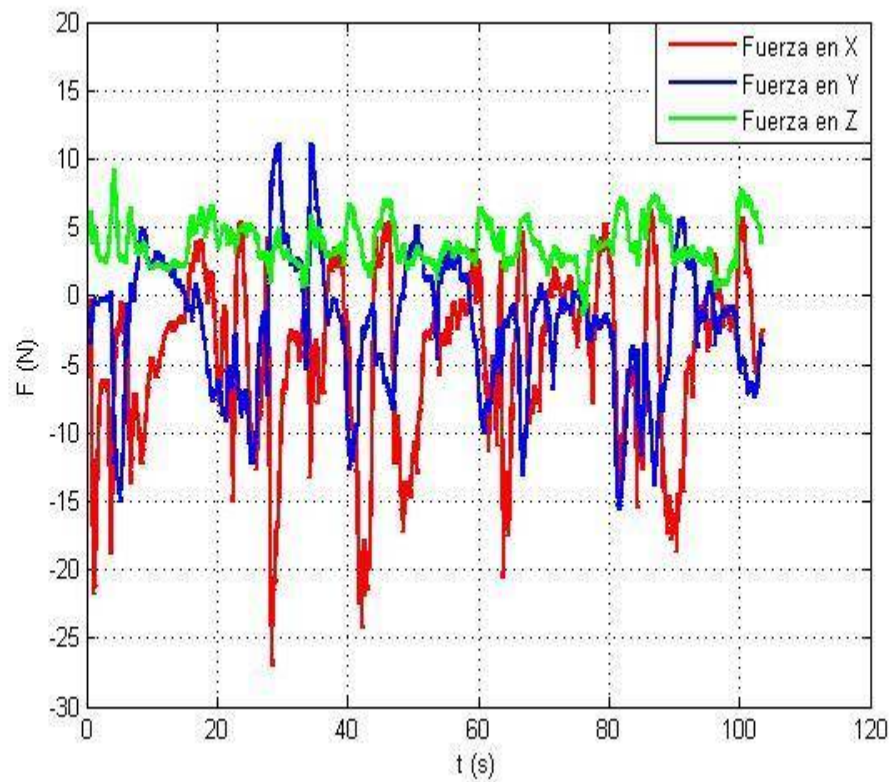


Figura C.0.4. Componentes de fuerza experimento 1 T1_280415_D_FB.

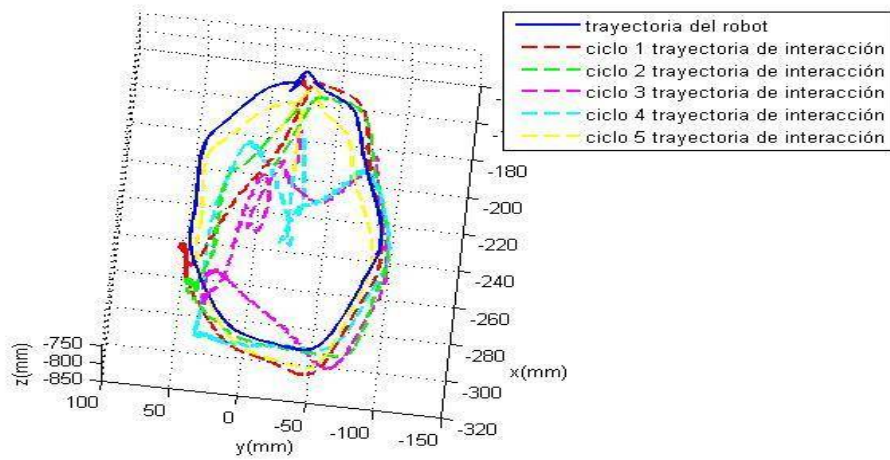


Figura C.0.5. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_280415_I_Tr

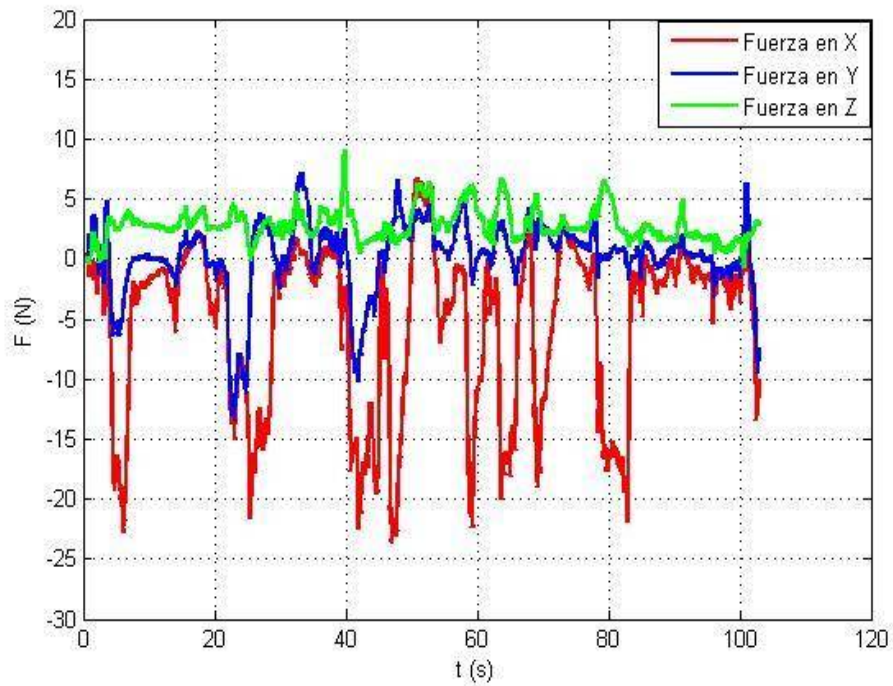


Figura C.0.6. Componentes de fuerza experimento 1 T1_280415_I_FB.

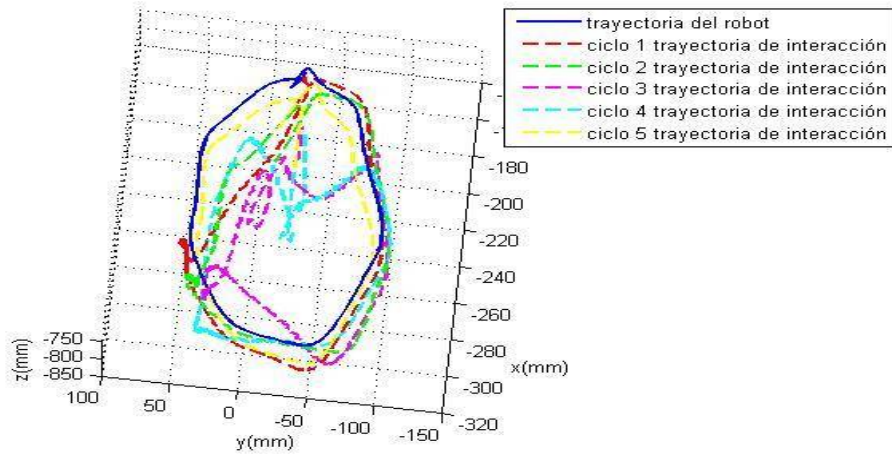


Figura C.0.7. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_220515_D_Tr.

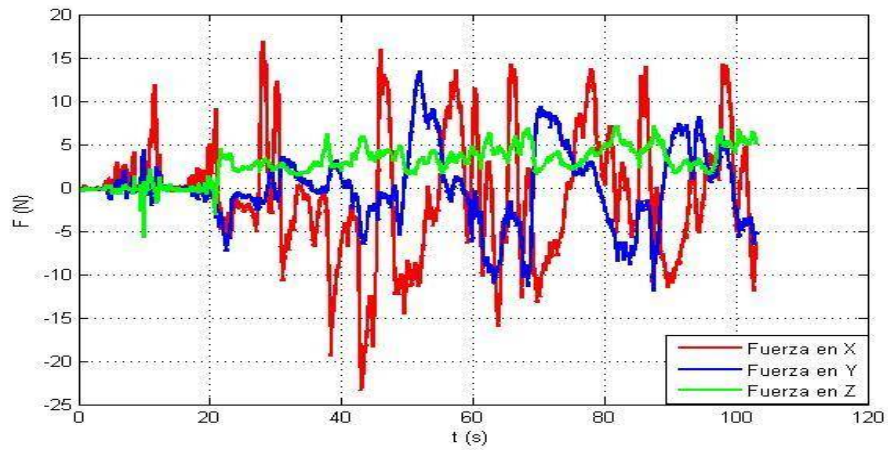


Figura C.0.8. Componentes de fuerza experimento 1 T1_220515_D_F.

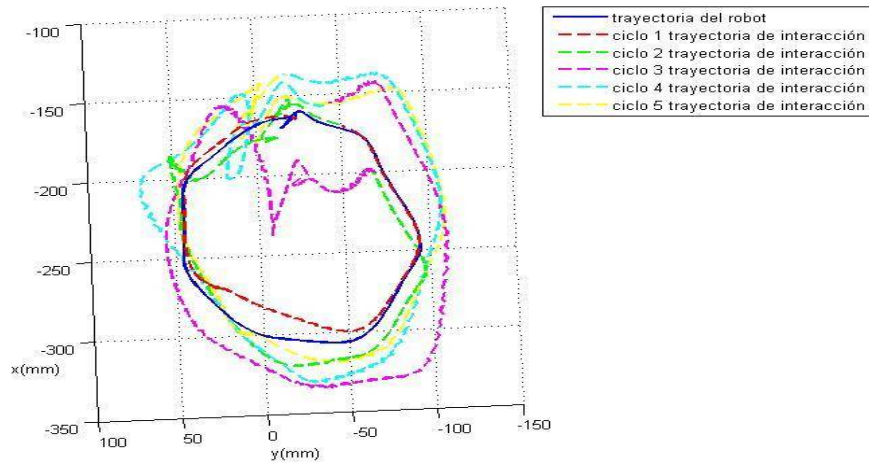


Figura C.0.9. Seguimiento de trayectoria experimento 1 T1_220515_I_Tr.

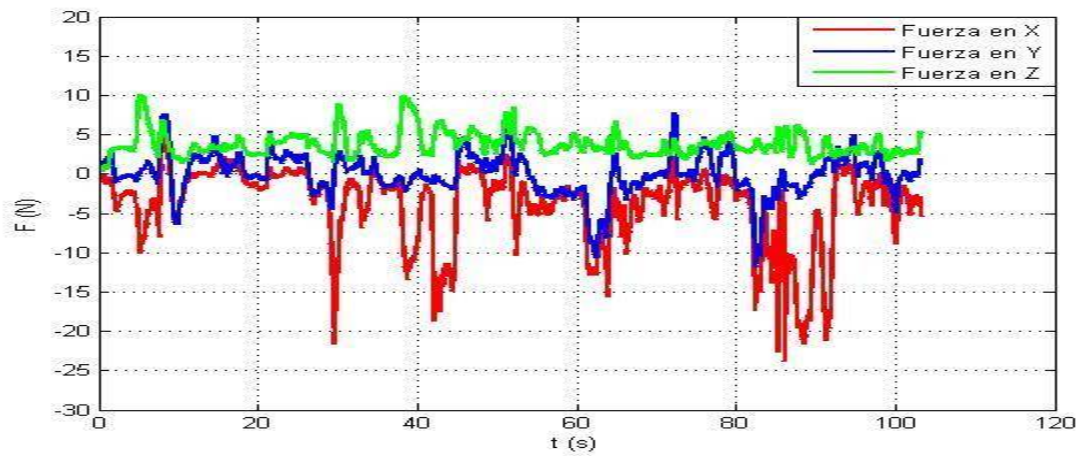


Figura C.0.10. Componentes de fuerza experimento 1 T1_220515_I_F.

- Gráficas Generales de fuerza

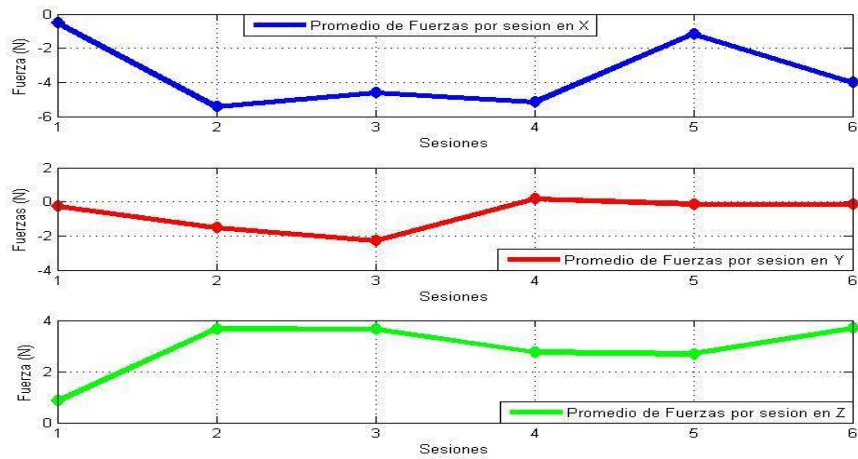


Figura C.0.11. Promedios de Componentes de fuerza experimento. Promedio1 T_T1.

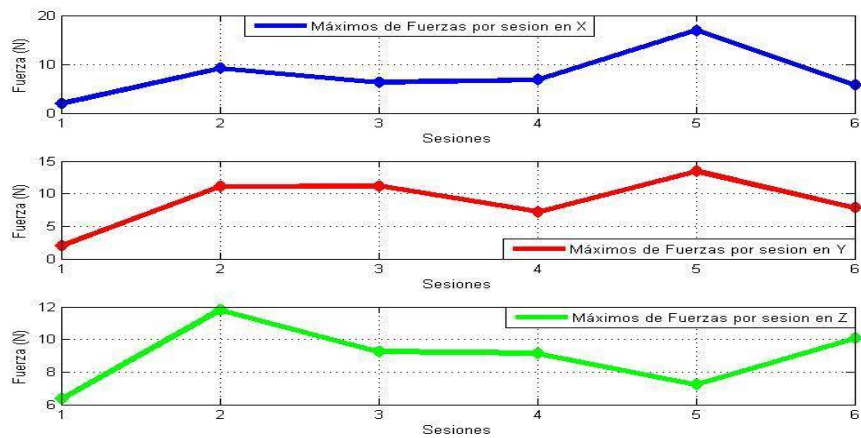


Figura C.0.12. Máximos. Componentes de fuerza experimento. MáximosFza1 T_T1.

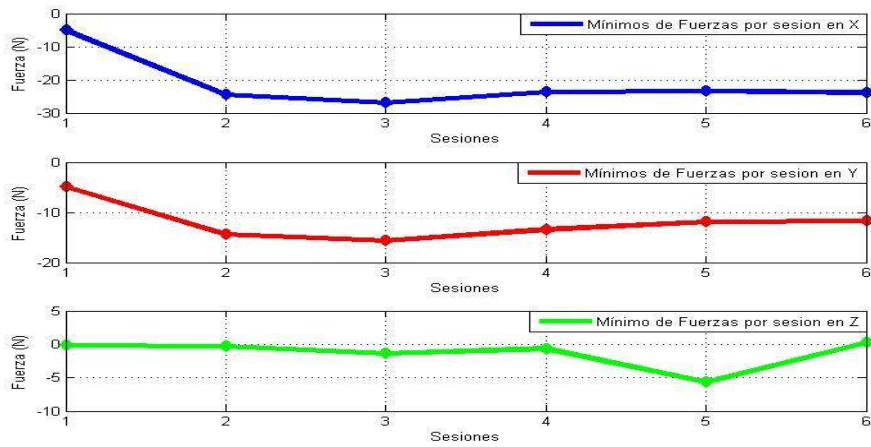


Figura C.0.13. Mínimos Componentes de fuerza experimento. MínimosFza1 T_T1.

- Variables estadísticas.

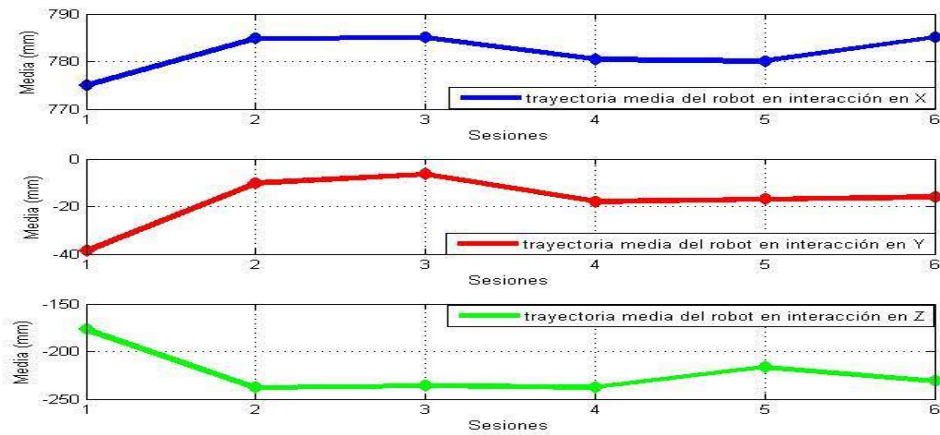


Figura C.0.14. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media T_T1.

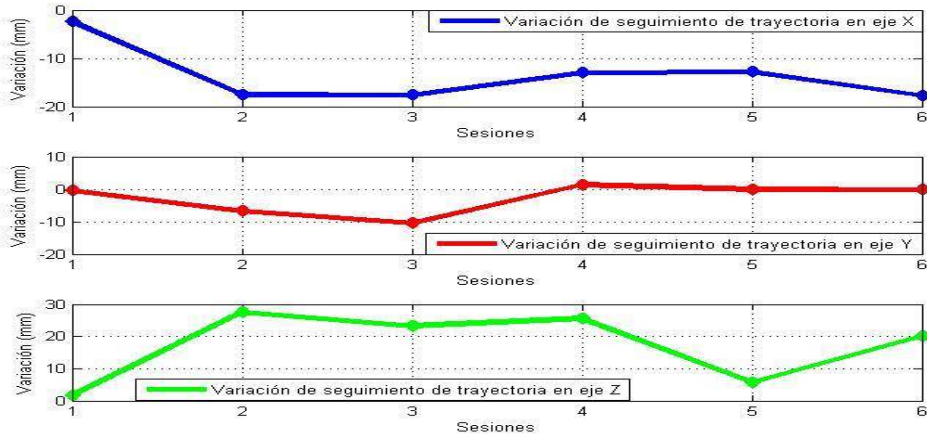


Figura C.0.15. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seg Tray. T_T1.

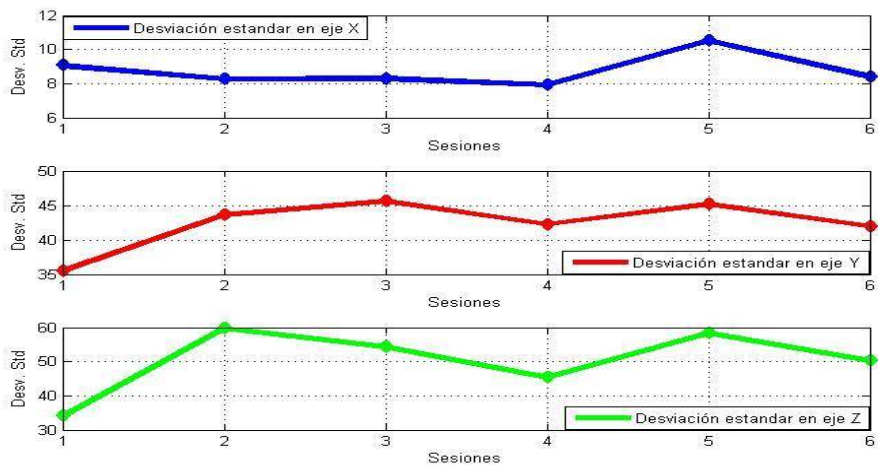


Figura C.0.16. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std T_T1.

Experimento 2

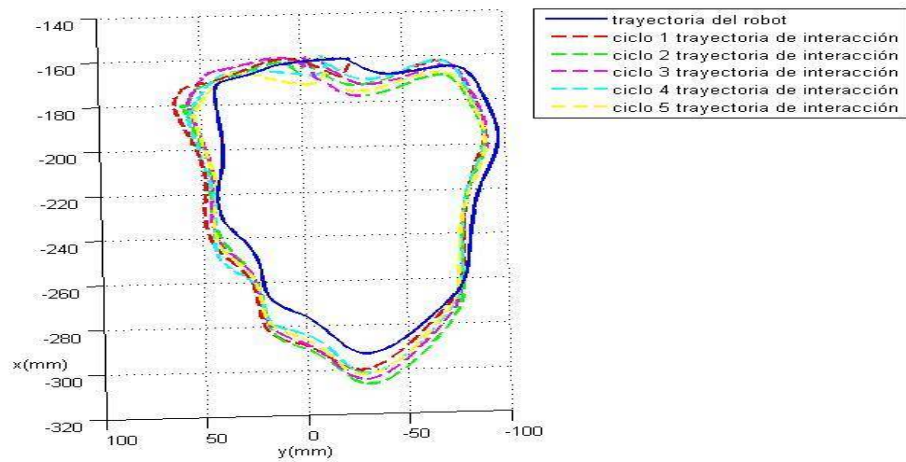


Figura C.0.17 Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_200315_D_Tr.

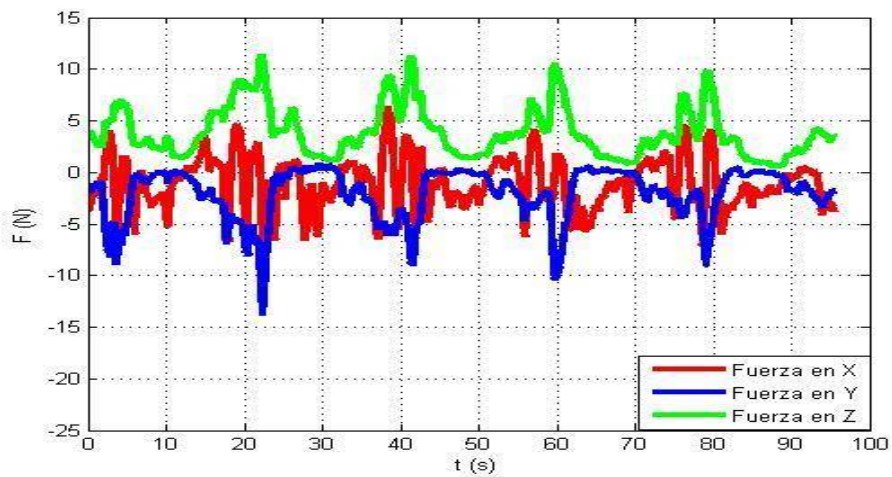


Figura C.0.18. Componentes de fuerza experimento 2. T2_200315_D_F.

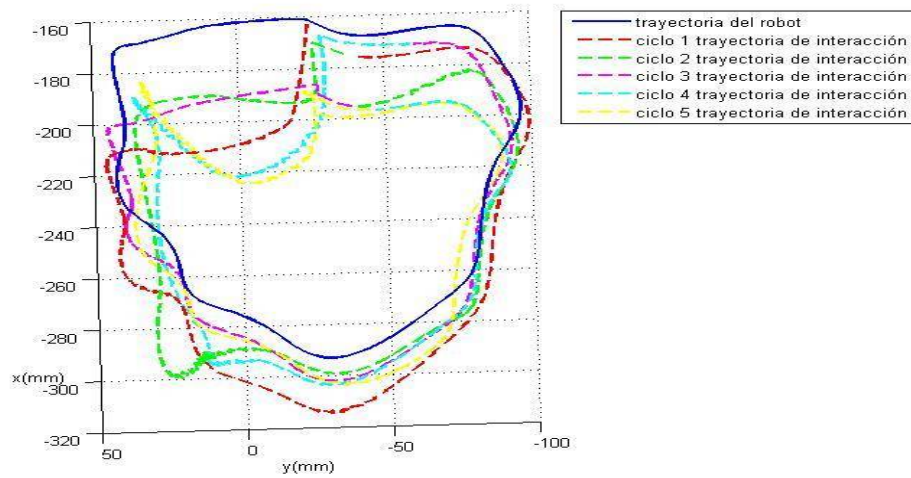


Figura C.0.19 Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_I_Tr.

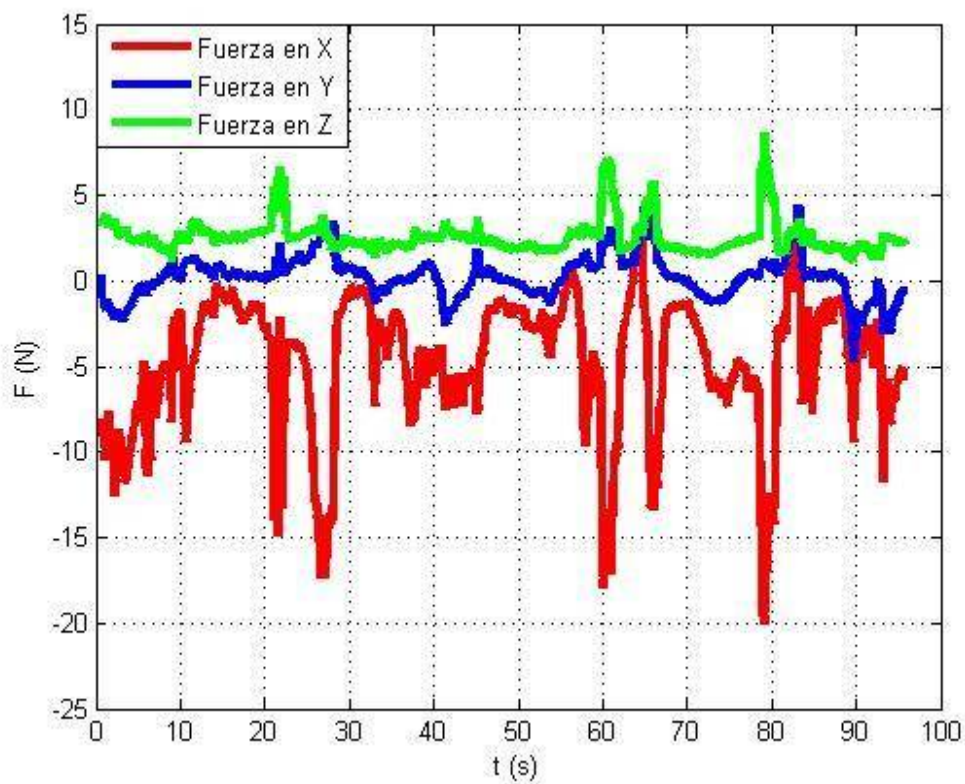


Figura C.0.20. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_I_F.

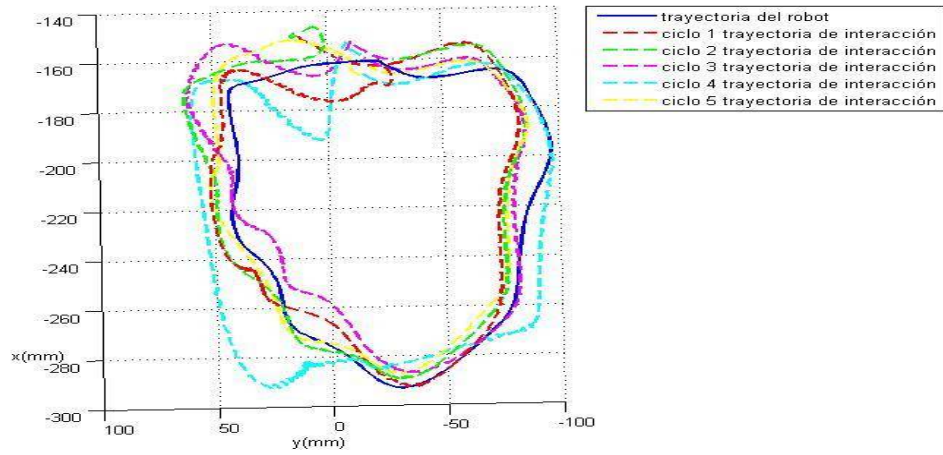


Figura C.0.21. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_Tr.

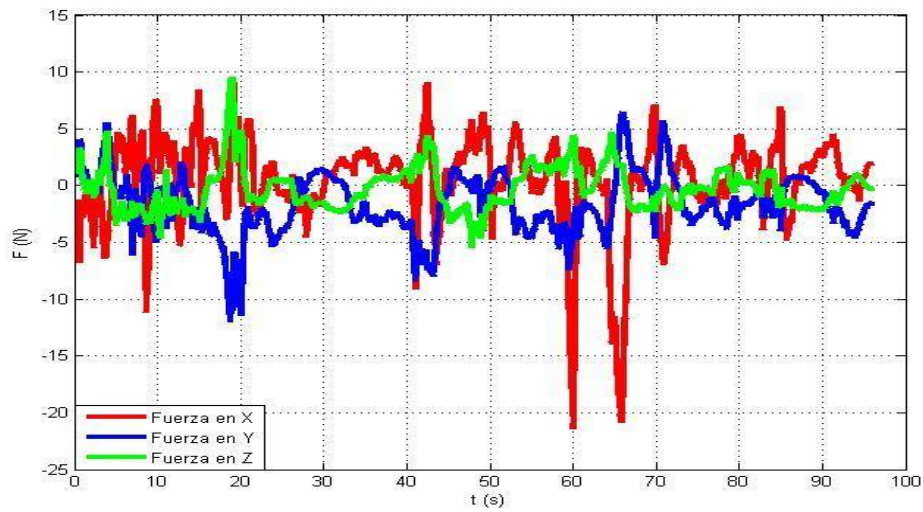


Figura C.0.22. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_F.

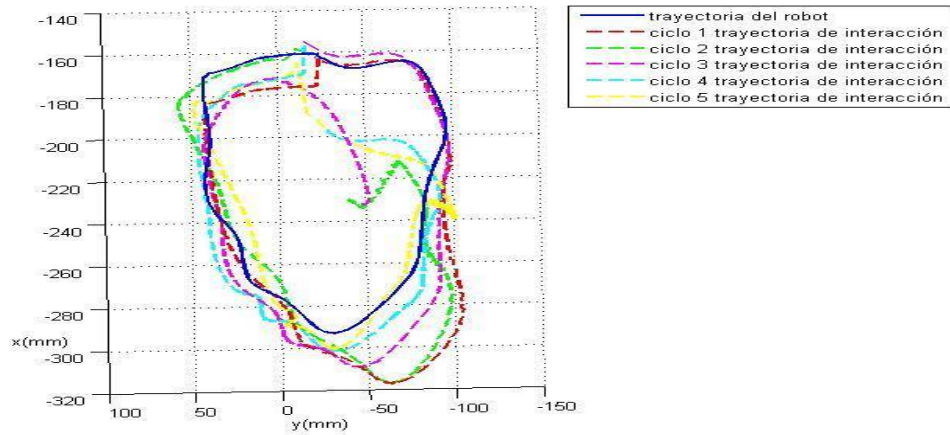


Figura C.0.23. Seguimiento de trayectoria experimento. T2_280415_D_Tr.

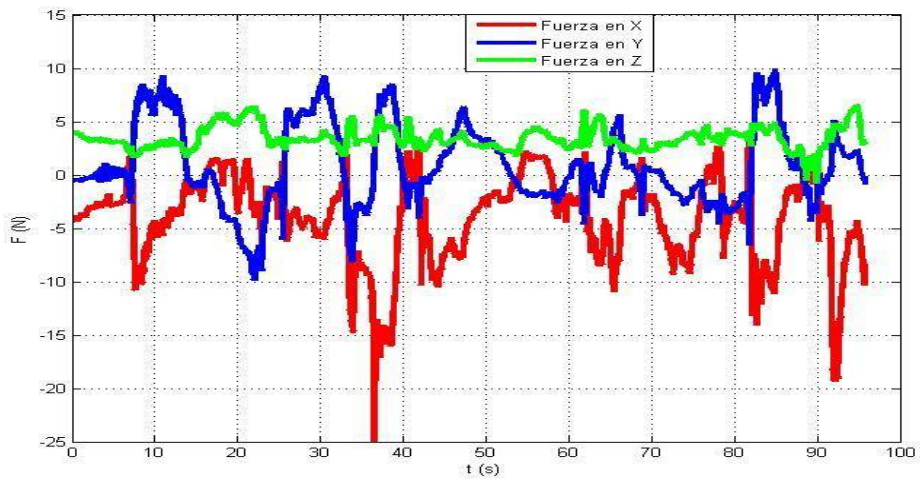


Figura C.0.24. Componentes de fuerza experimento 2. T2_280415_D_F.

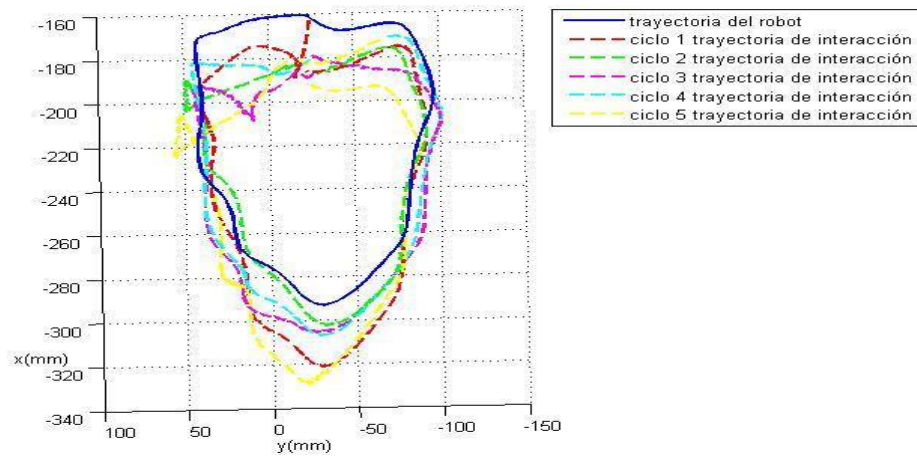


Figura C.0.25. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_280415_I_Tr.

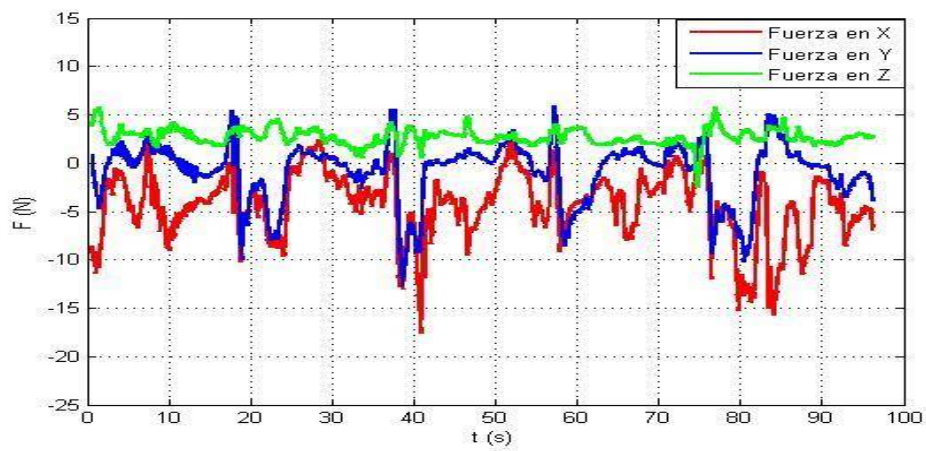


Figura C.0.26. Componentes de fuerza experimento 2. T2_280415_I_FB.

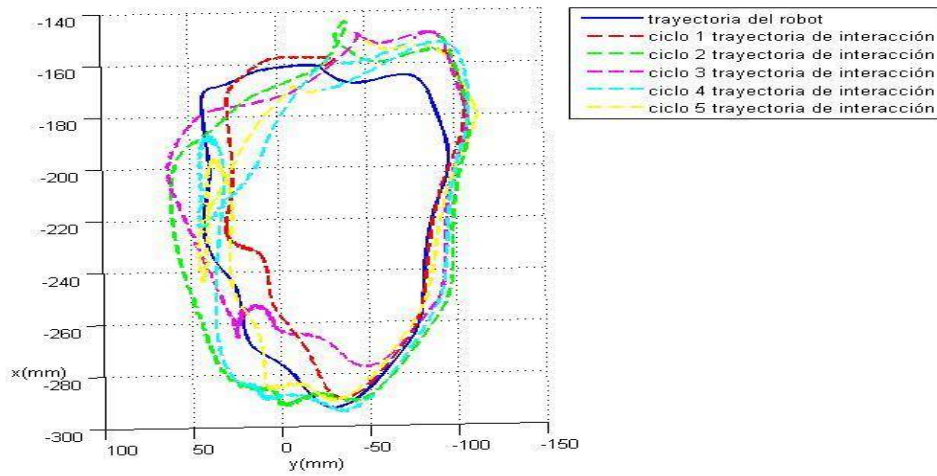


Figura C.0.27. Seguimiento de trayectoria experimento 2. T2_170415_Tr

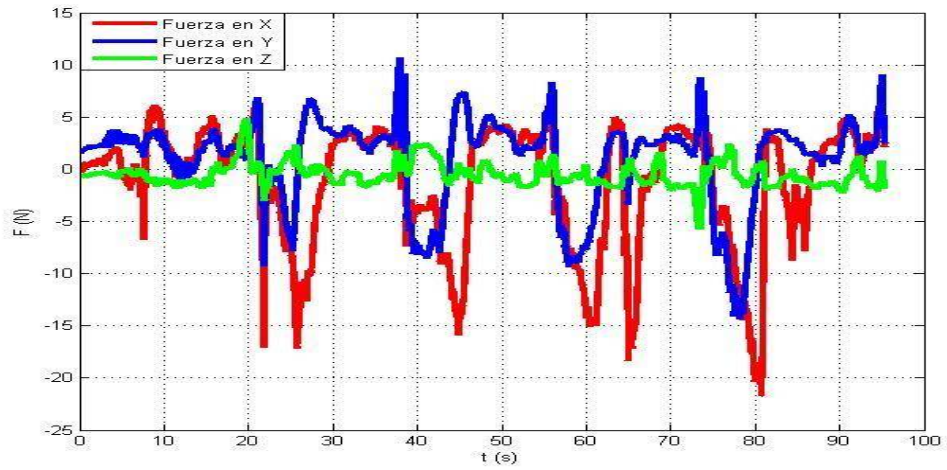


Figura C.0.28. Componentes de fuerza experimento 2. T2_170415_F.

Variables estadísticas

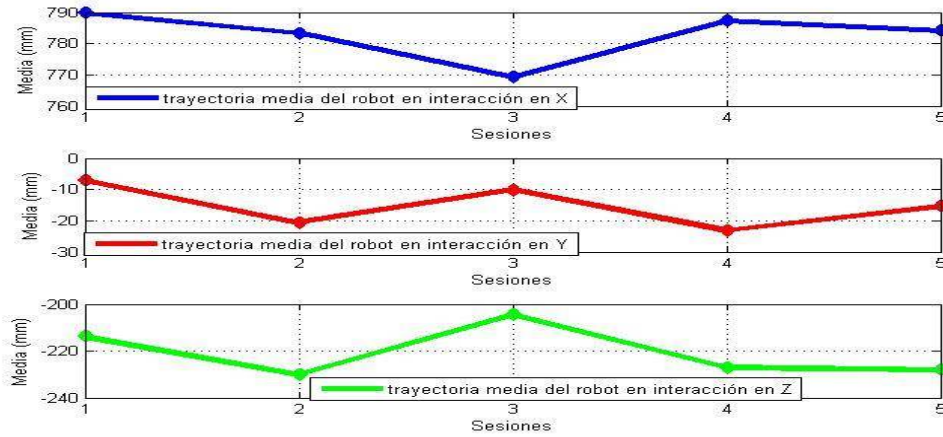


Figura C.0.29. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media T_T2.

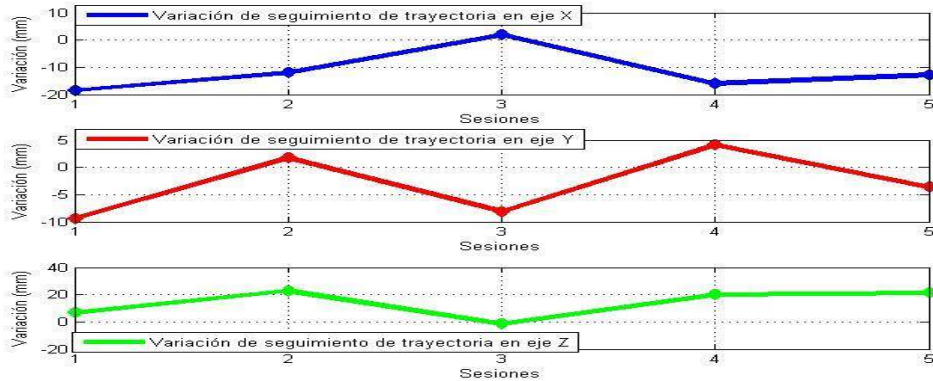


Figura C.0.30. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error T_T2.

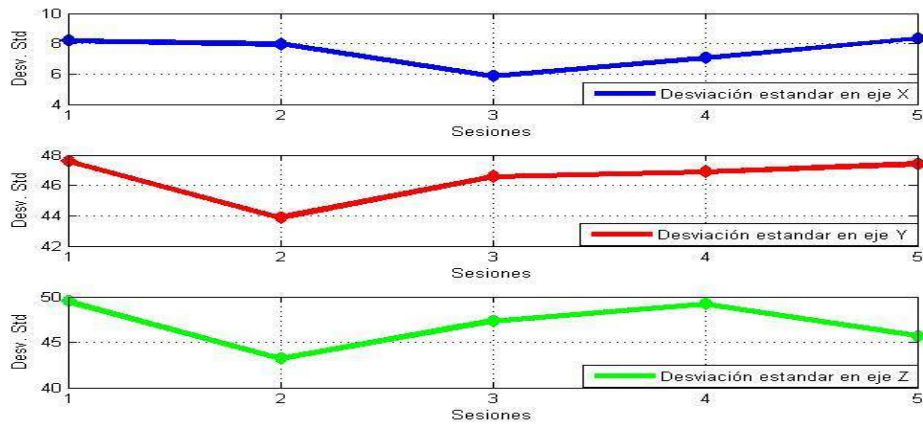


Figura C.0.31. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std T_T2.

Gráficas Generales de fuerza

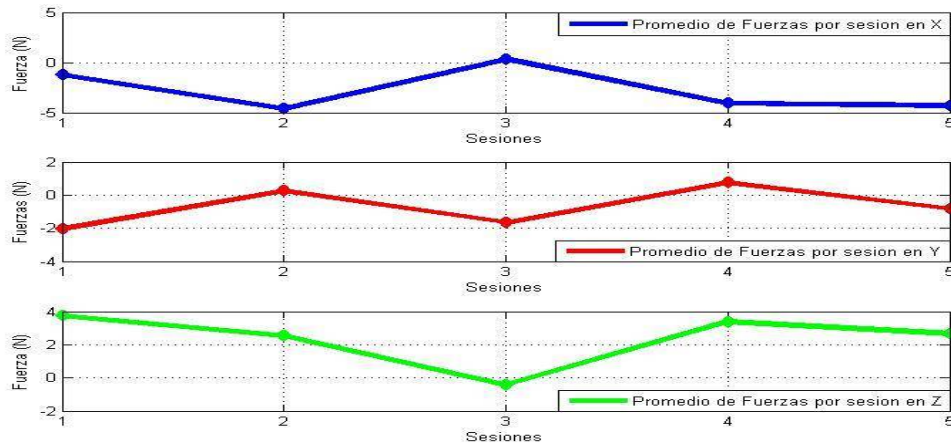


Figura C.0.32. Promedios de Componentes de fuerza experimento. Promediofza1 T_T2.

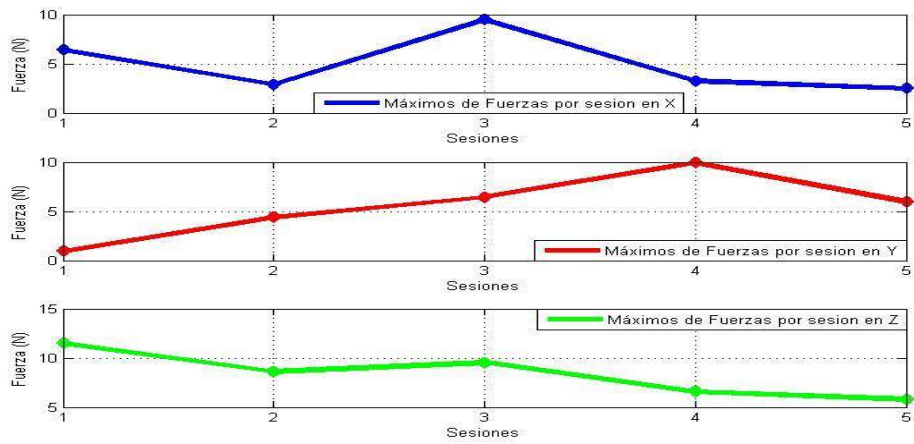


Figura C.0.33. Máximos. Componentes de fuerza experimento. Máximosfza1 T_T2.

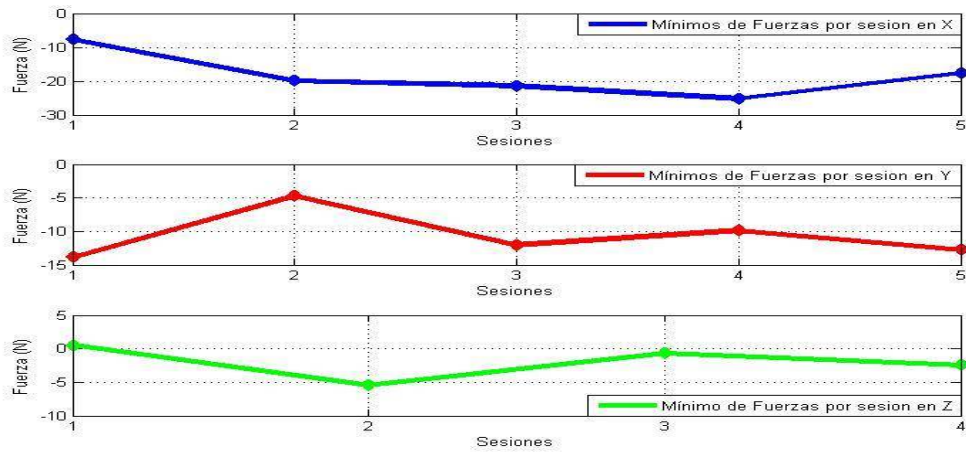


Figura C.0.34. Mínimos Componentes de fuerza experimento. Mínimosfza1 T_T2.

• Paciente K

Experimento 1

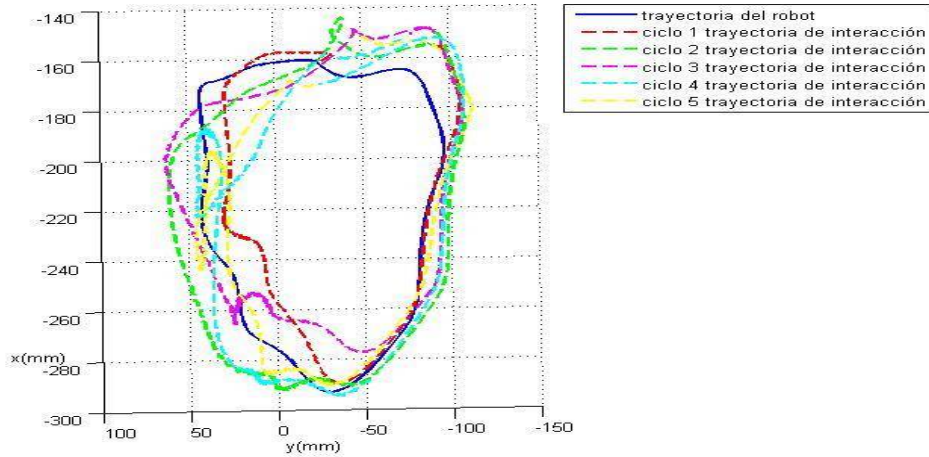


Figura C.0.35. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_260515_D_Tr.

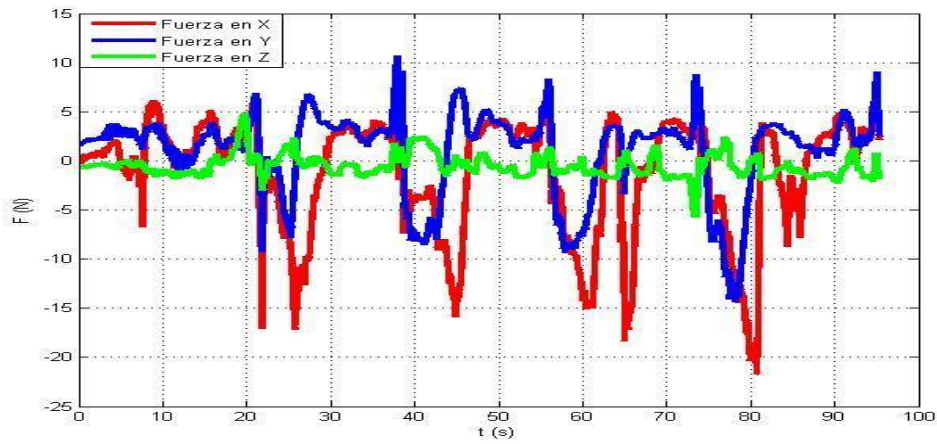


Figura C.0.36. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_260515_D_F.

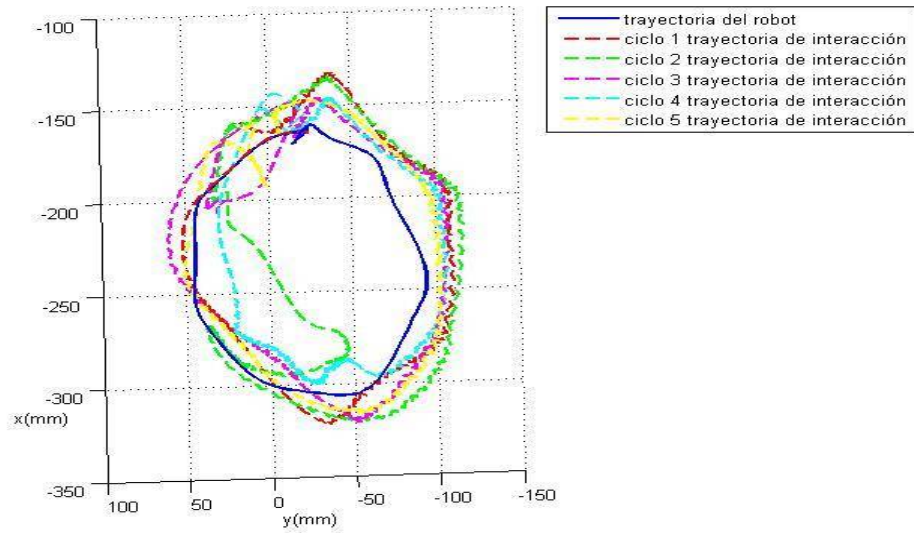


Figura C.0.37. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_050615_D_Tr.

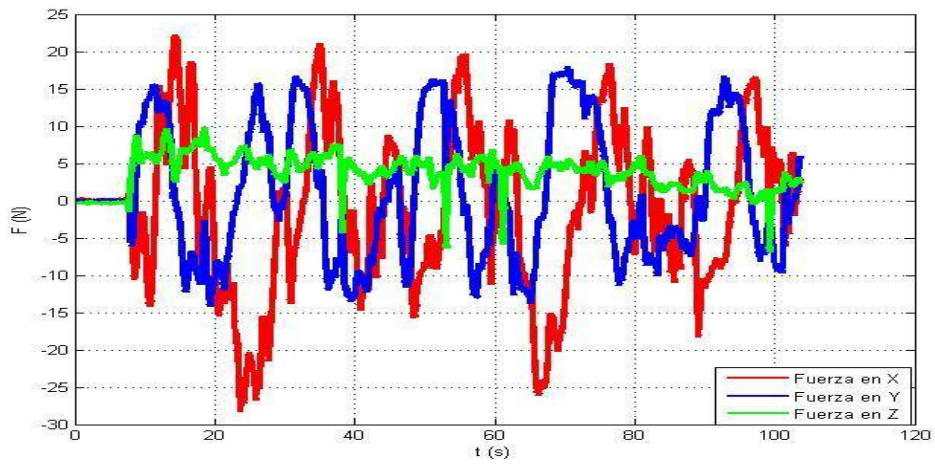


Figura C.0.38. Seguimiento de trayectoria experimento 1 K_T1_050615_D_F.

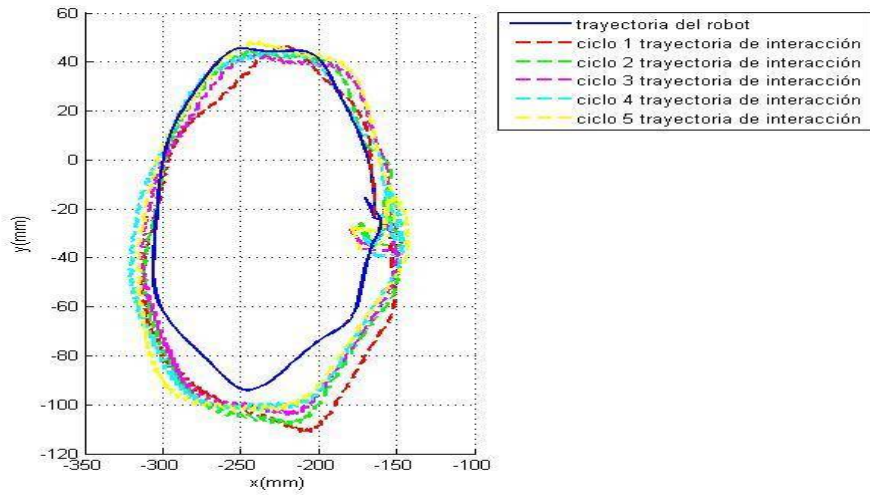


Figura C.0.39. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_170615_Tr.

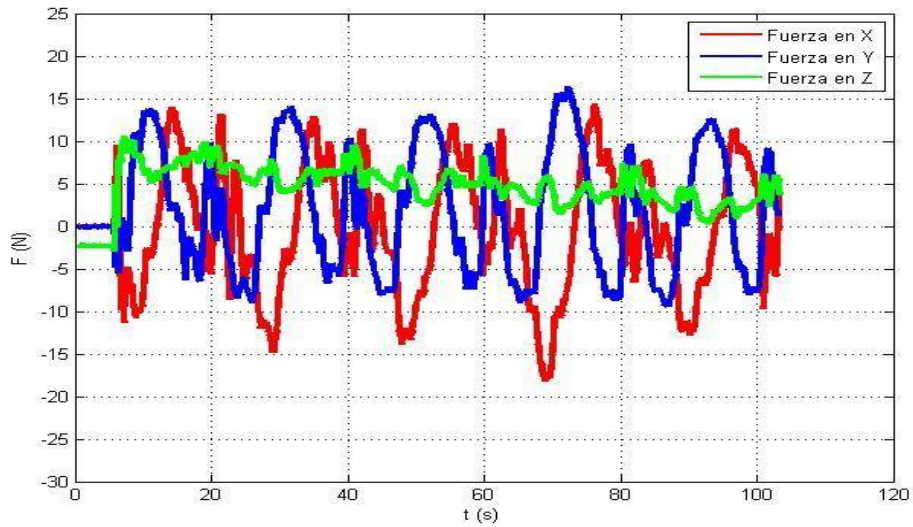


Figura C.0.40. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_170615_F.

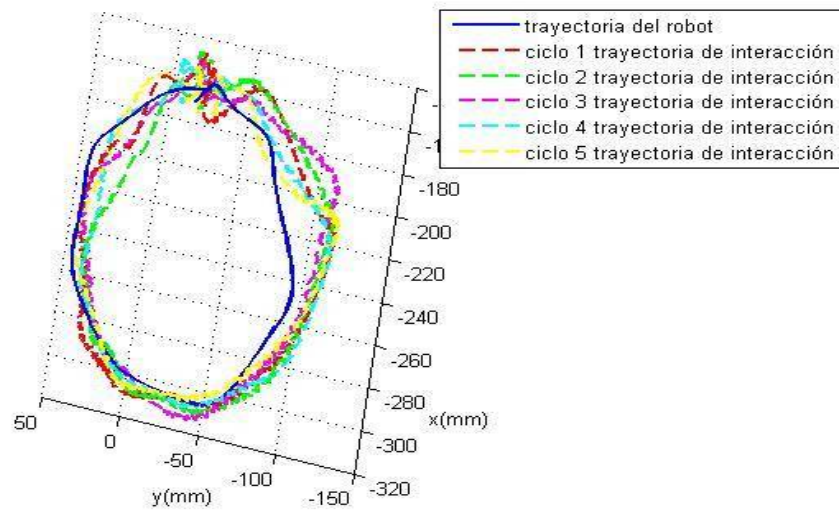


Figura C.0.41. Seguimiento de trayectoria experimento 1k_T1_190615_D_Tr.

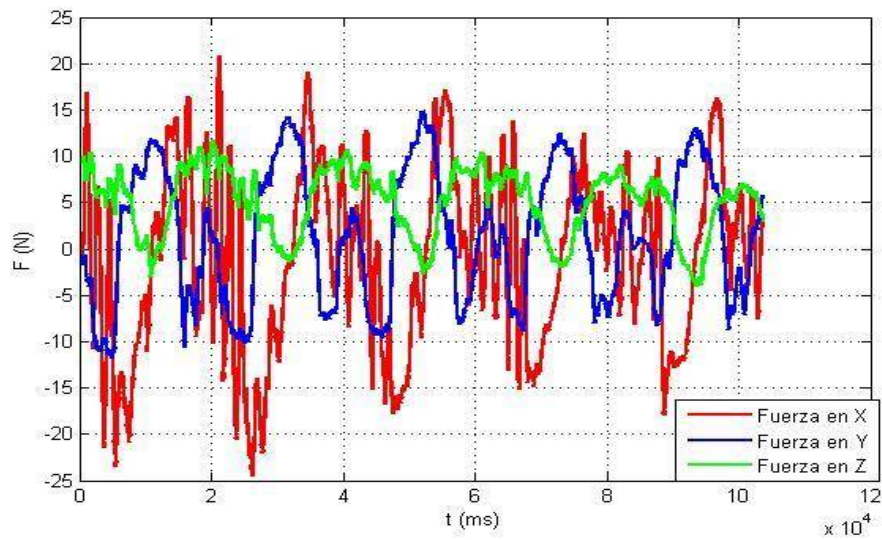


Figura C.0.42. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_190615_D_F.

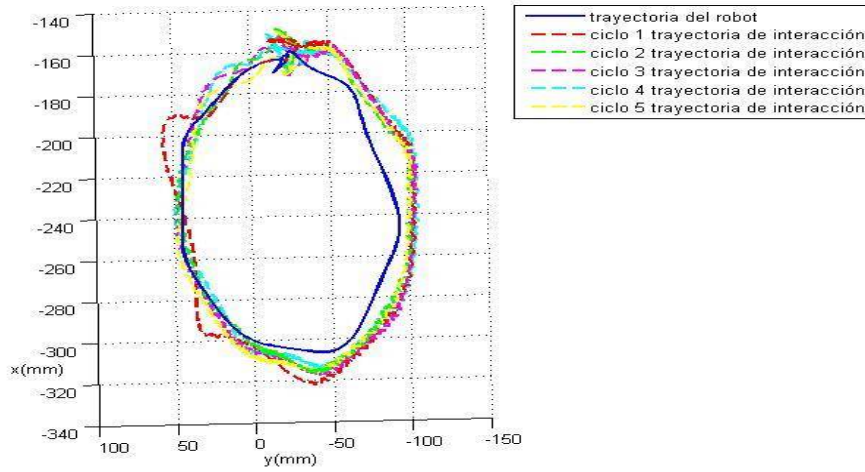


Figura C.0.43. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_230615_D_Tr.

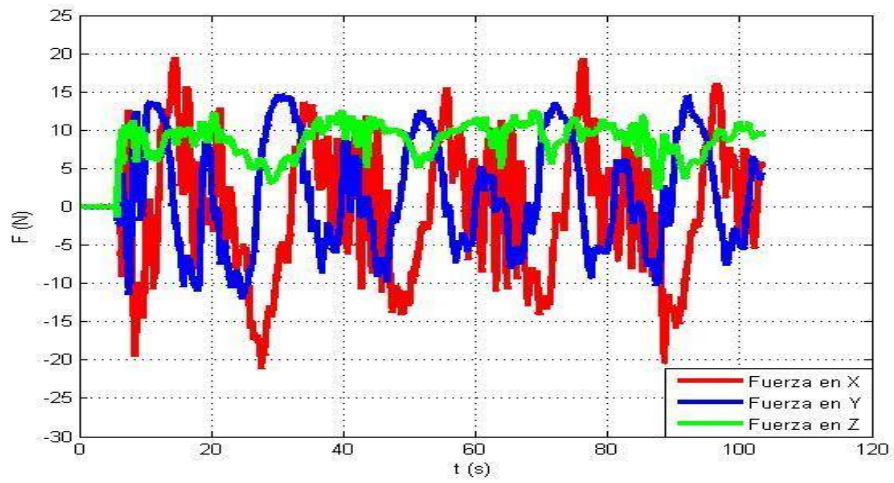


Figura C.0.44. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_230615_D_F

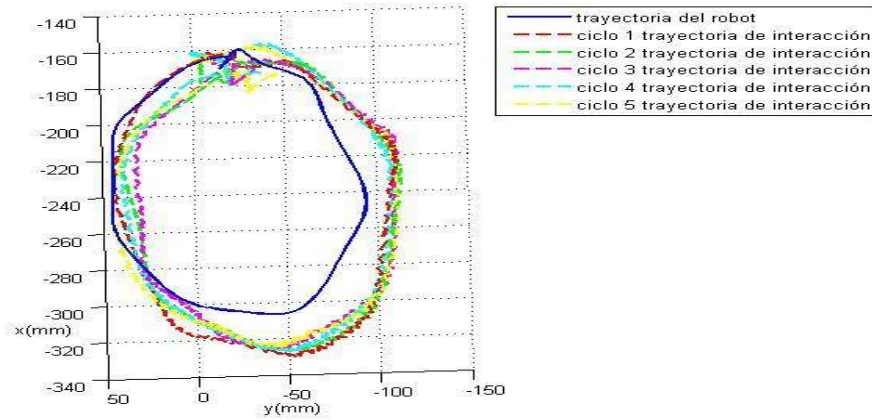


Figura C.0.45. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_260615_D_Tr.

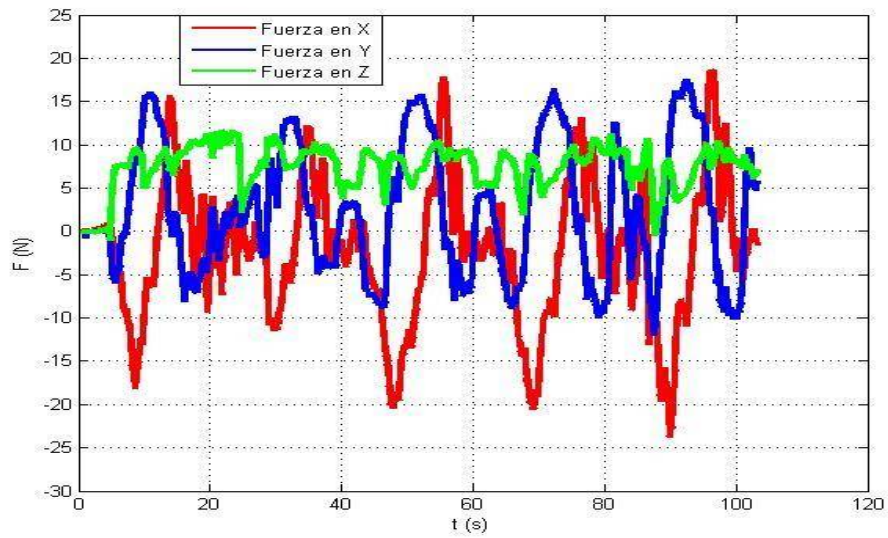


Figura C.0.46. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_260615_D_F.

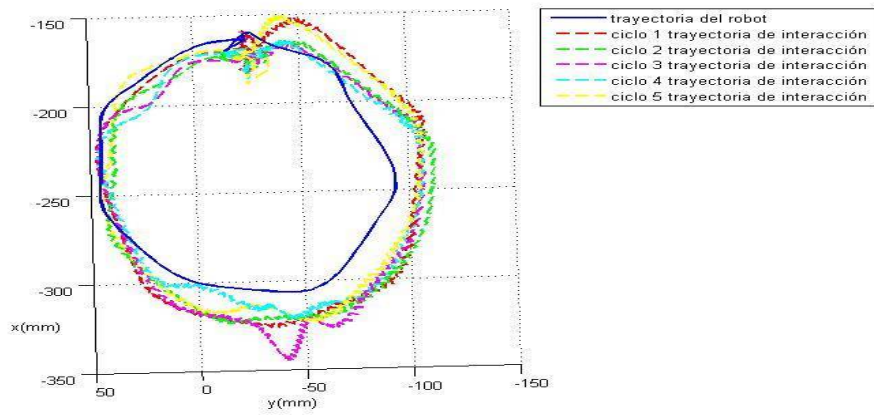


Figura C.0.47. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_300615_D_Tr.

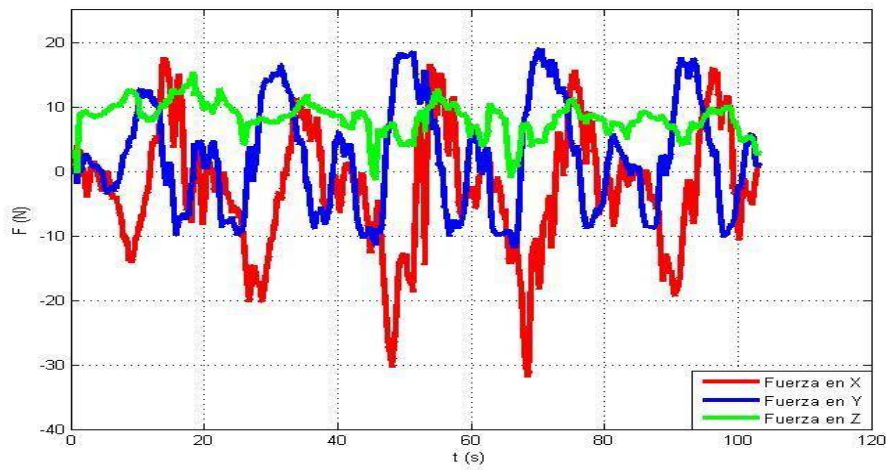


Figura C.0.48. Componentes de fuerza experimento 1. k_T1_300615_D_F.

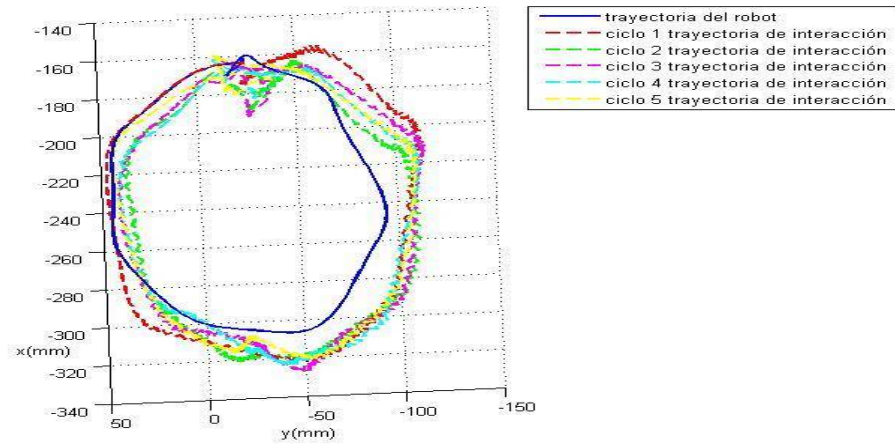


Figura C.0.49. Seguimiento de trayectoria experimento 1. K_T1_070715_Tr.

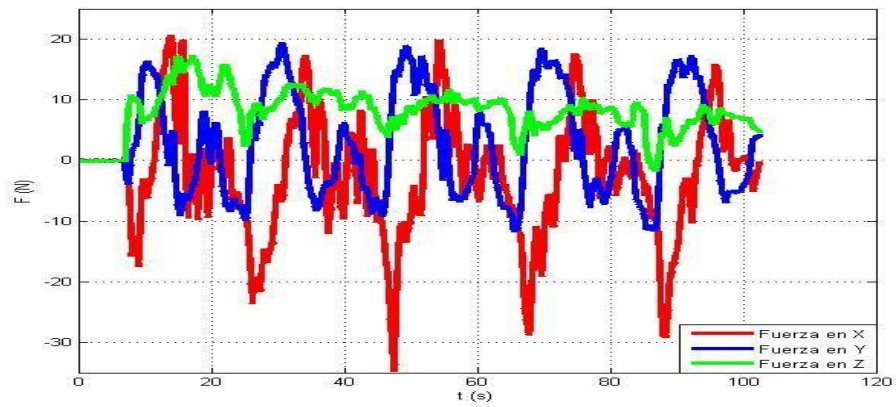


Figura C.0.50. Componentes de fuerza experimento 1. K_T1_070715_F.

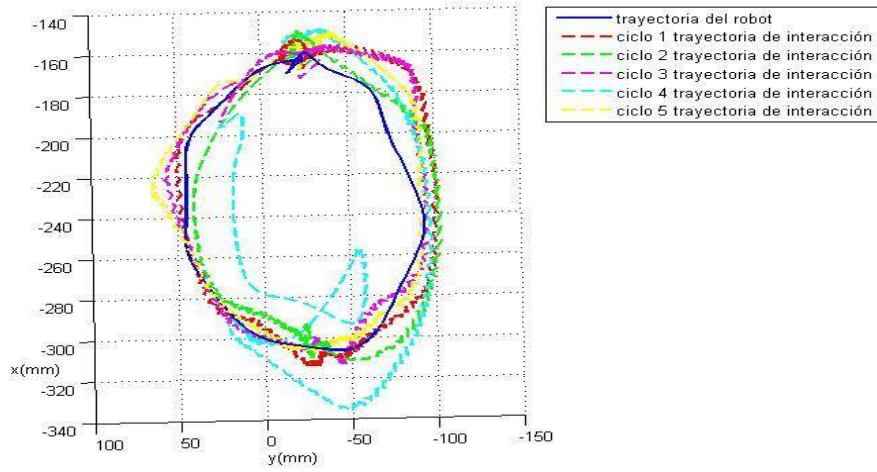


Figura C.0.51. Seguimiento de trayectoria experimento 1. k_T1_21C715_D_Tr.

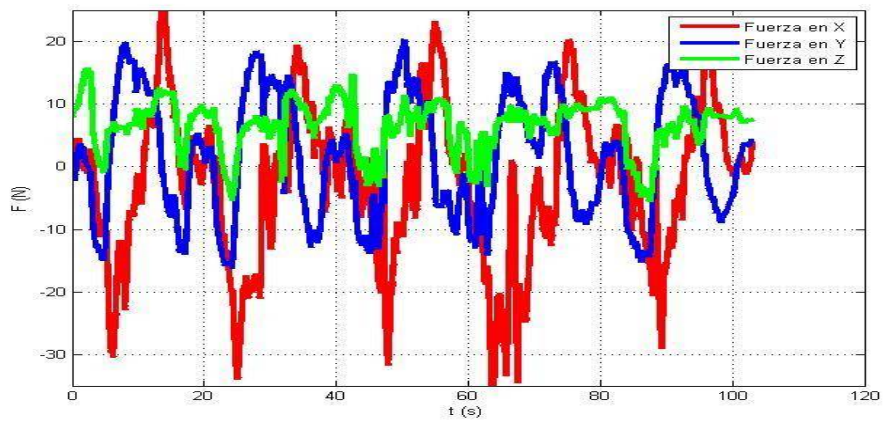


Figura C.0.52. Componentes de fuerza experimento 1.k_T1_210715_D_F.

Variables estadísticas

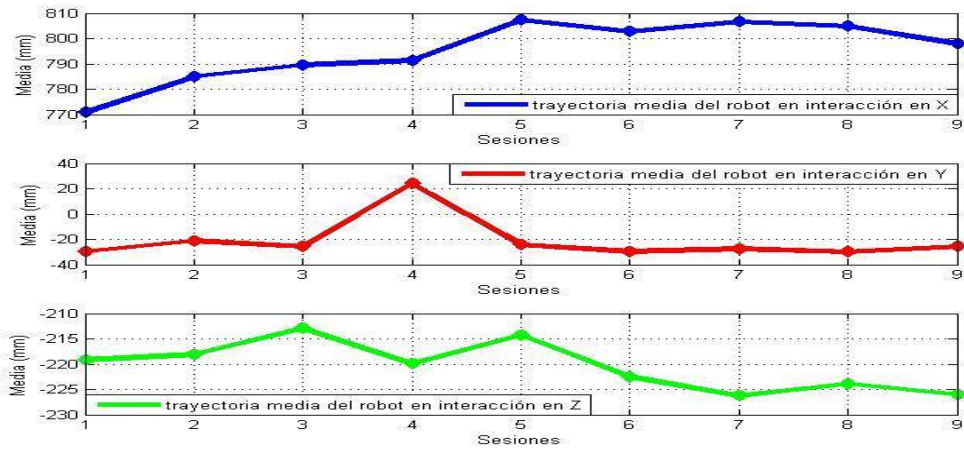


Figura C.0.53. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media K_T1.

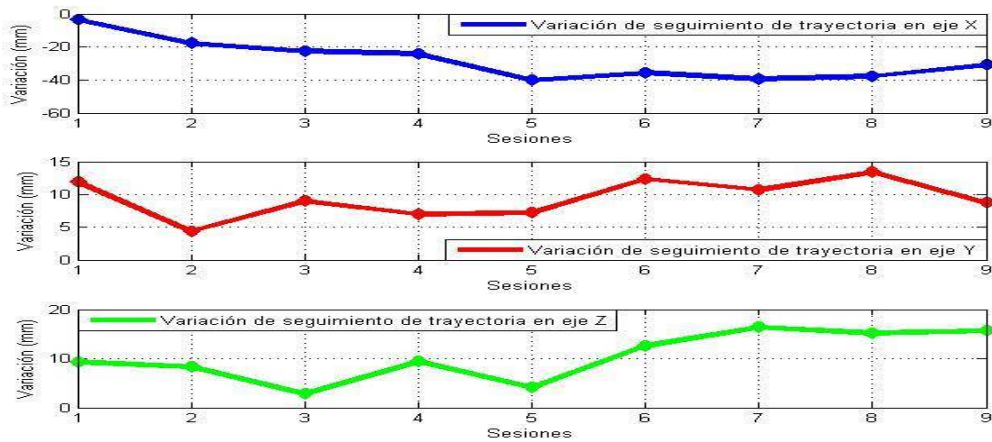


Figura C.0.54. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T1.

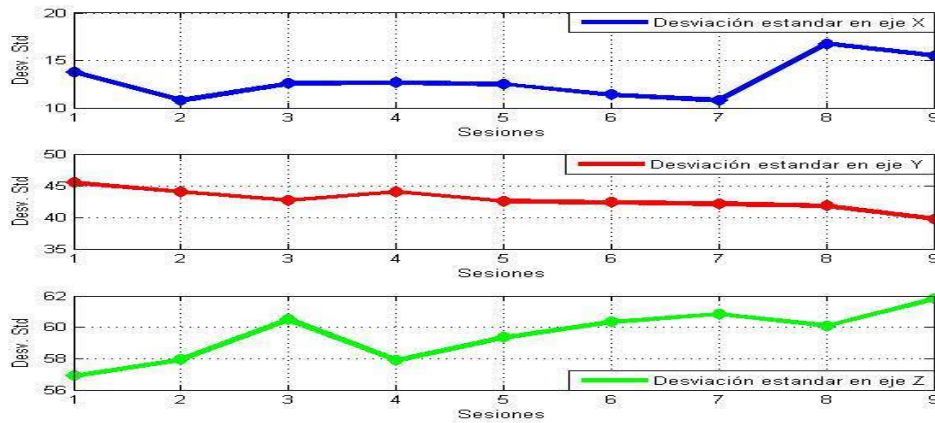


Figura C.0.55. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std K_T1.

Gráficas Generales de fuerza

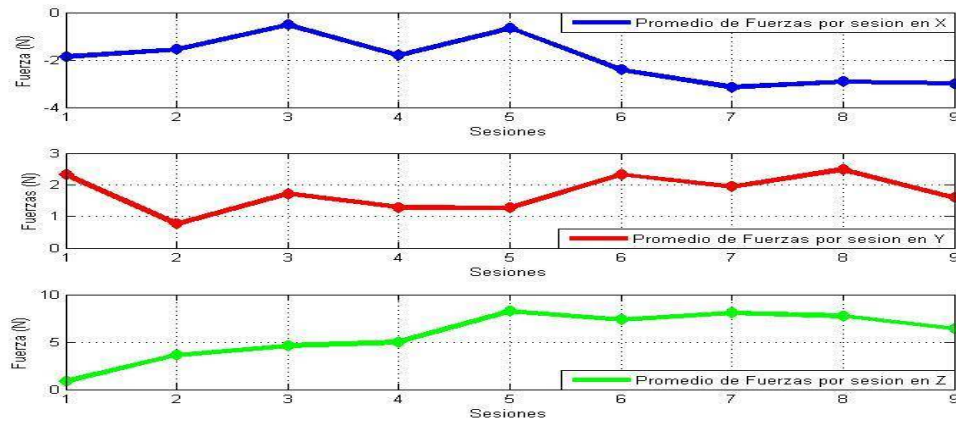


Figura C.0.56. Promedios de Componentes de fuerza. Promedio K_T1.

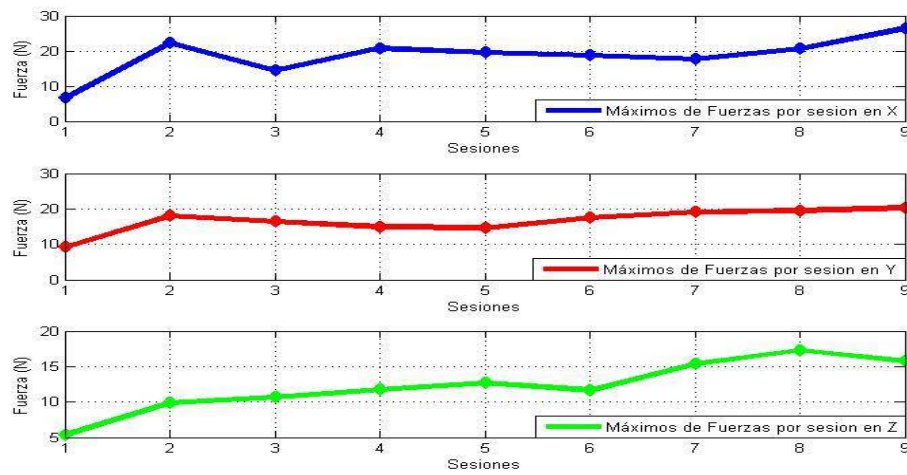


Figura C.0.57. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza K_T1.

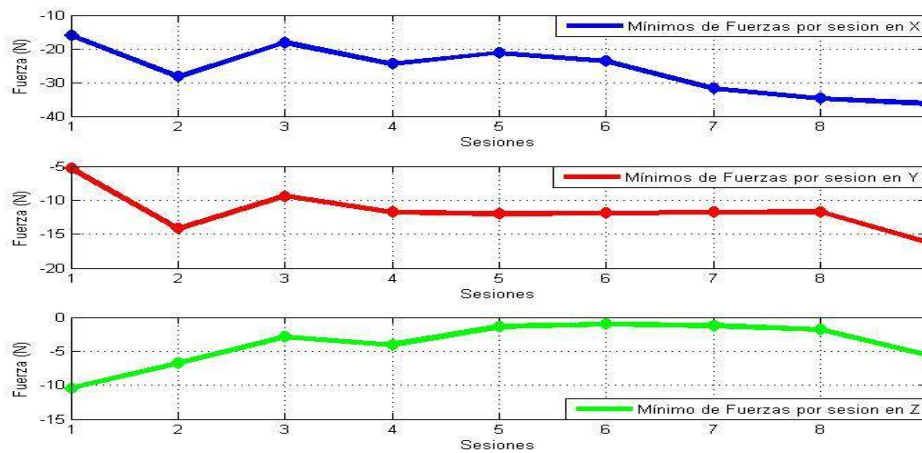


Figura C.0.58. Mínimos Componentes de fuerza . Mínimosfza K_T1.

Experimento 2

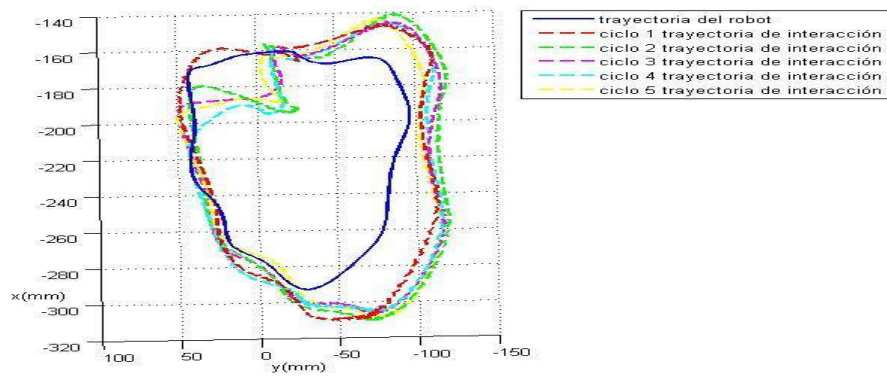


Figura C.0.59. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_260515_D_Tr.

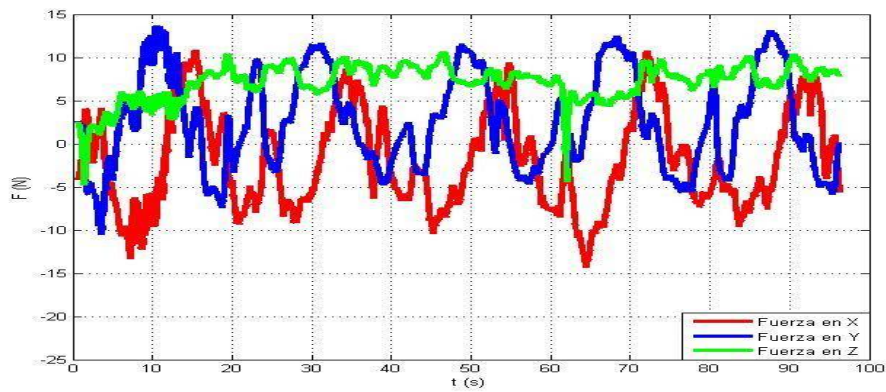


Figura C.0.60. Componentes de fuerza experimento 1. k_T2_260515_D_F.

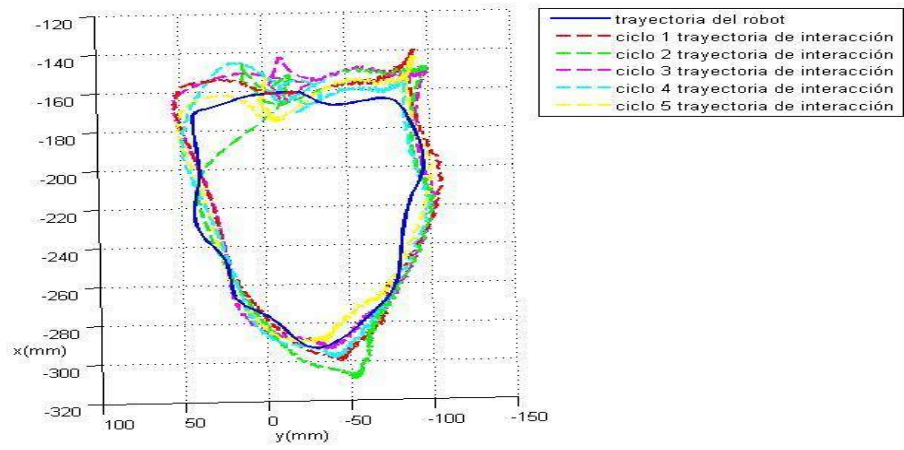


Figura C.0.61. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_050615 _D_Tr.

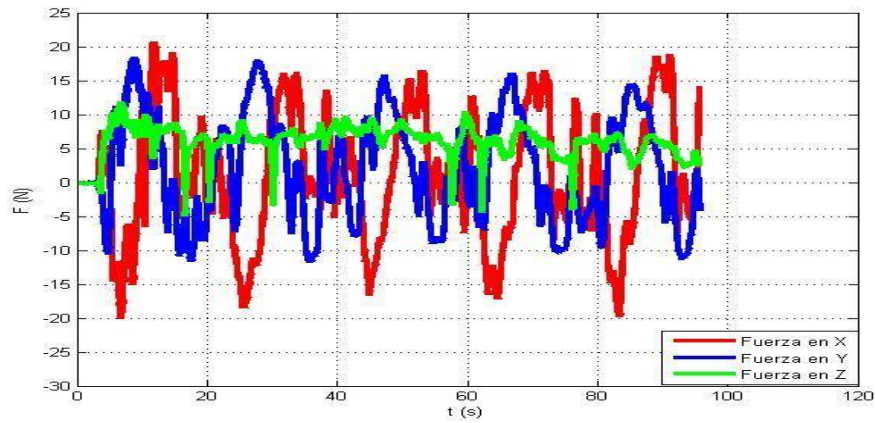


Figura C.0.62. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_050615 _D_F.

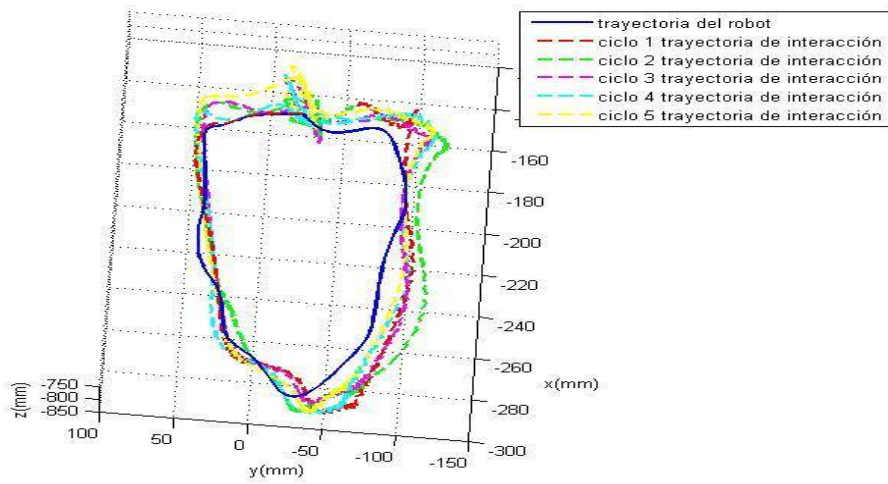


Figura C.0.63. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_170615_Tr.

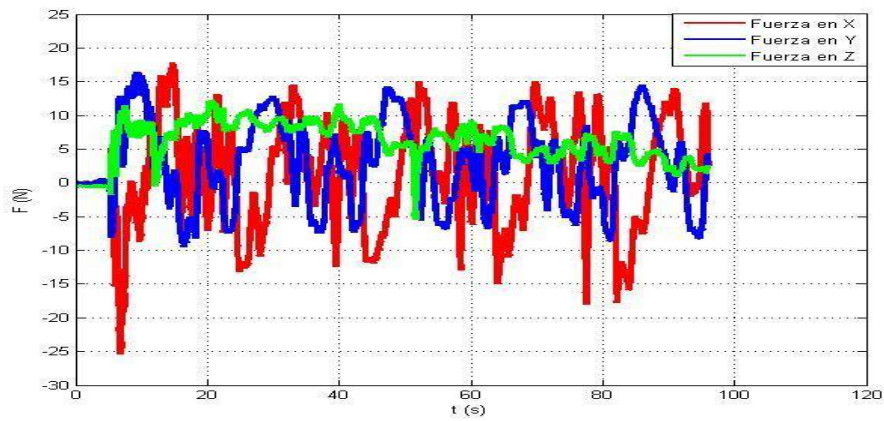


Figura C.0.64. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_170615_F.

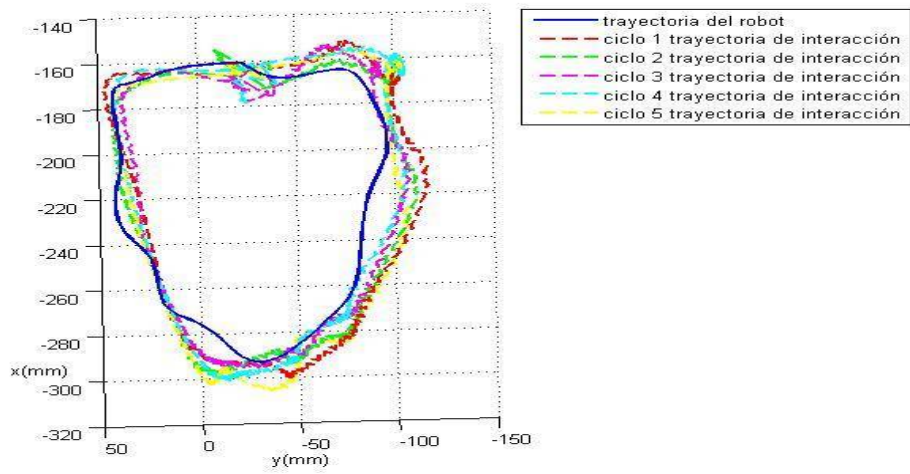


Figura C.0.65. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T1_190615_D_Tr.

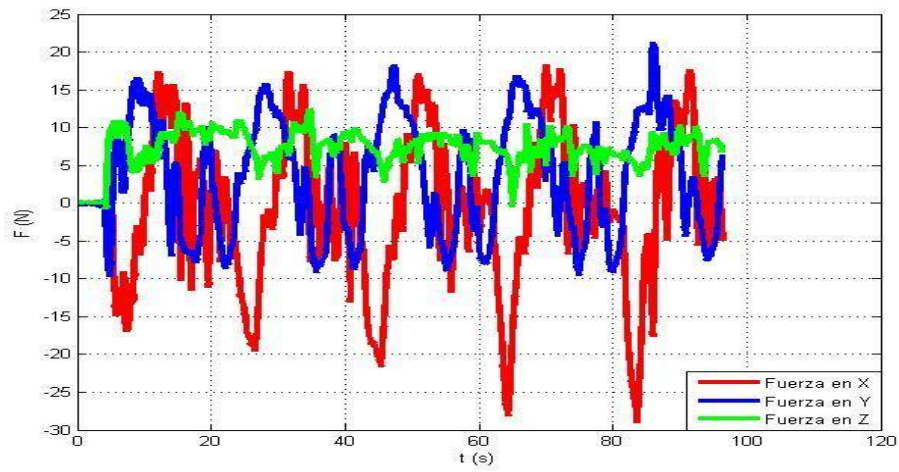


Figura C.0.66. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T1_190615_D_F.

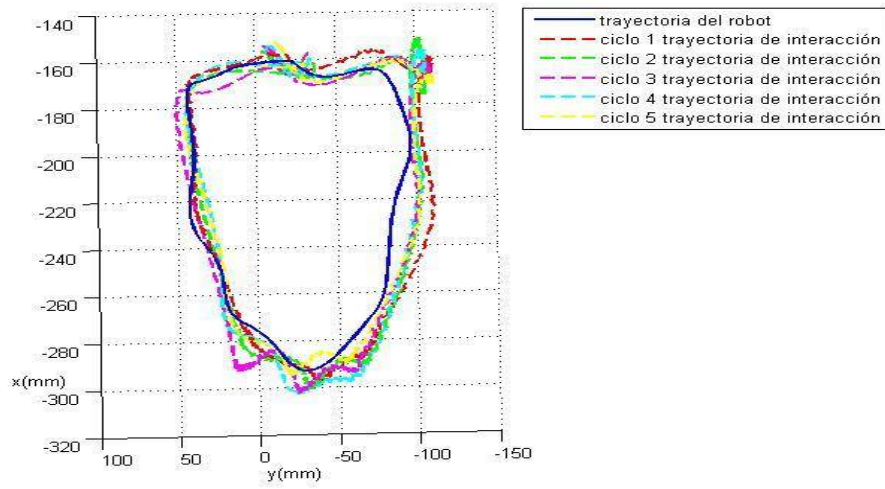


Figura C.0.67. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_230615_D_Tr.

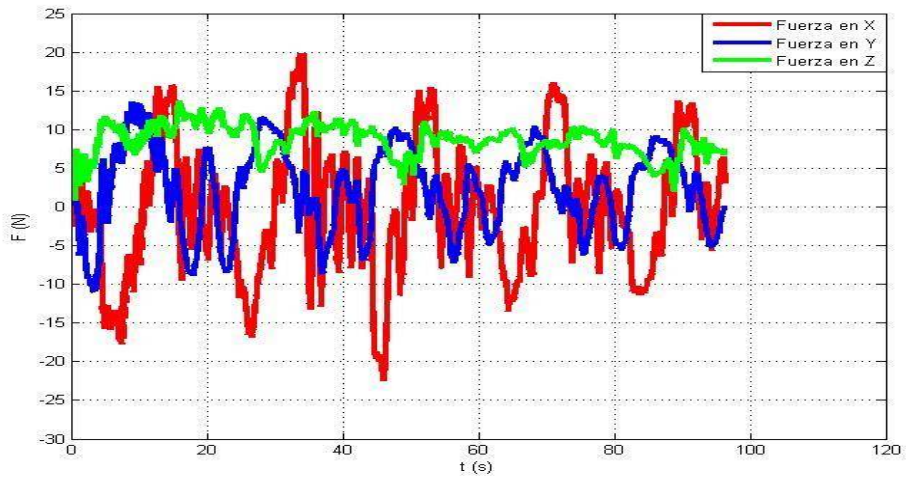


Figura C.0.68. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_230615_D_F.

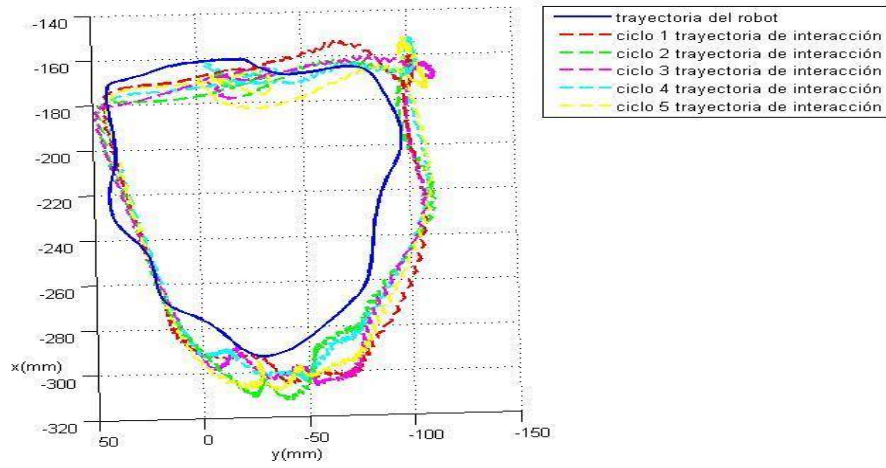


Figura C.0.69. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_260615_D_Tr.

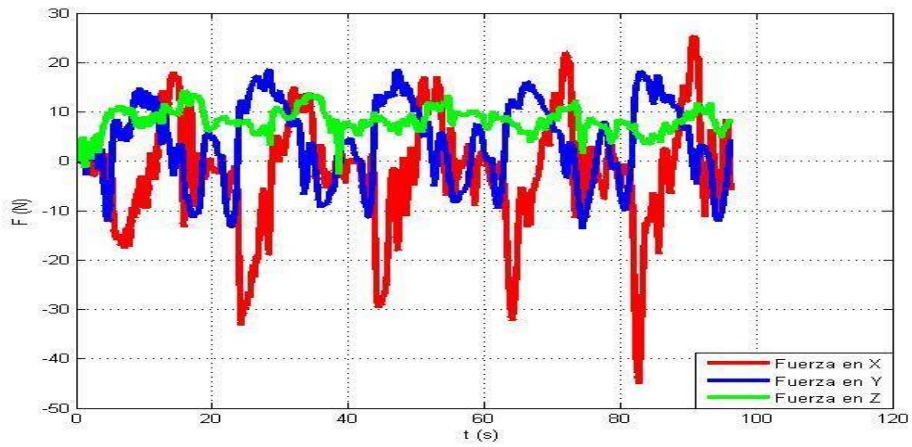


Figura C.0.70. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_260615_D_F.

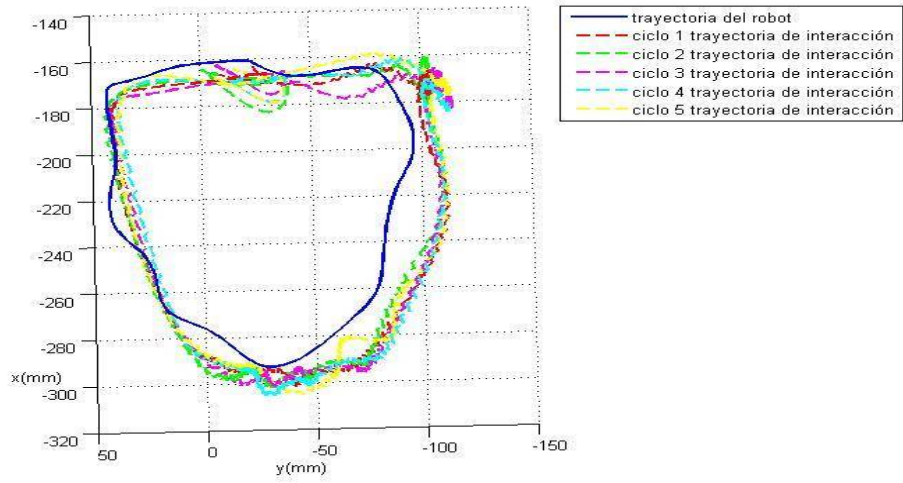


Figura C.0.71. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_300615_Tr.

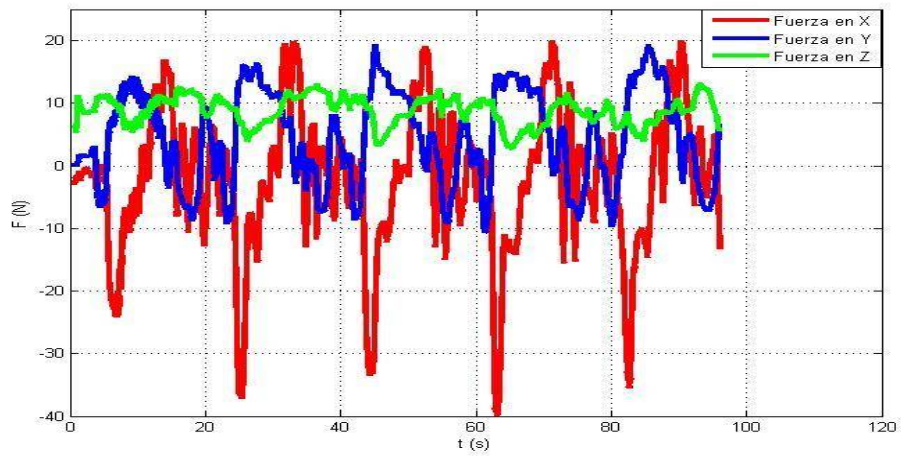


Figura C.0.72. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_300615_F.

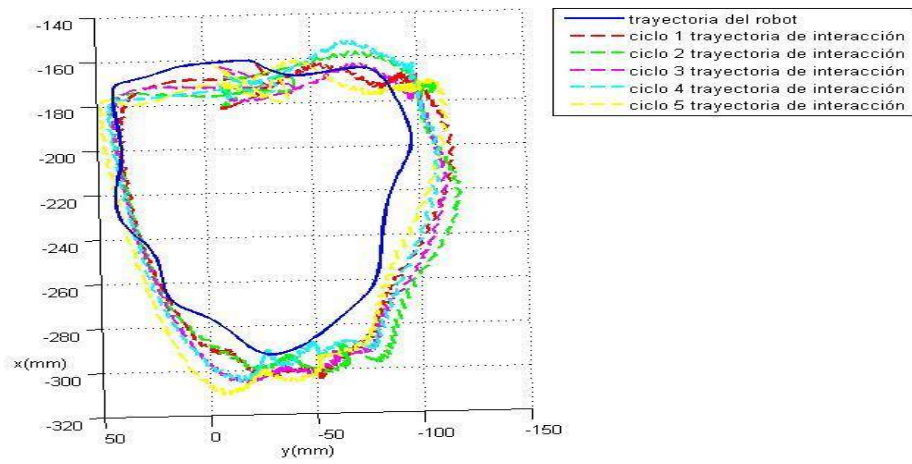


Figura C.0.73. Seguimiento de trayectoria experimento 2. K_T2_070715_Tr.

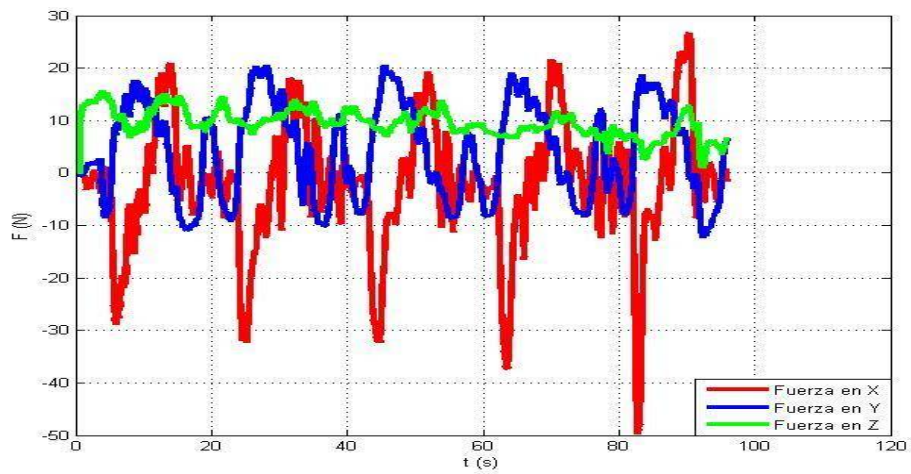


Figura C.0.74. Componentes de fuerza experimento 2. K_T2_070715_F.

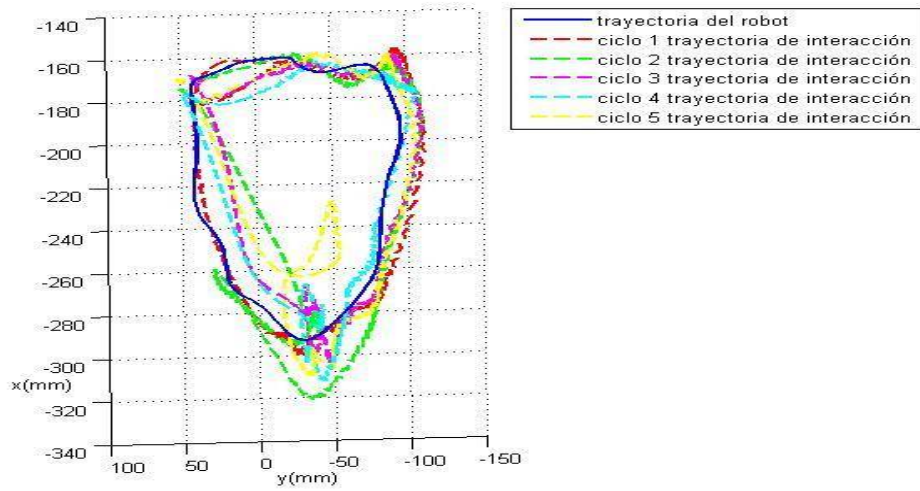


Figura C.0.75. Seguimiento de trayectoria experimento 2. k_T2_210715_D_Tr.

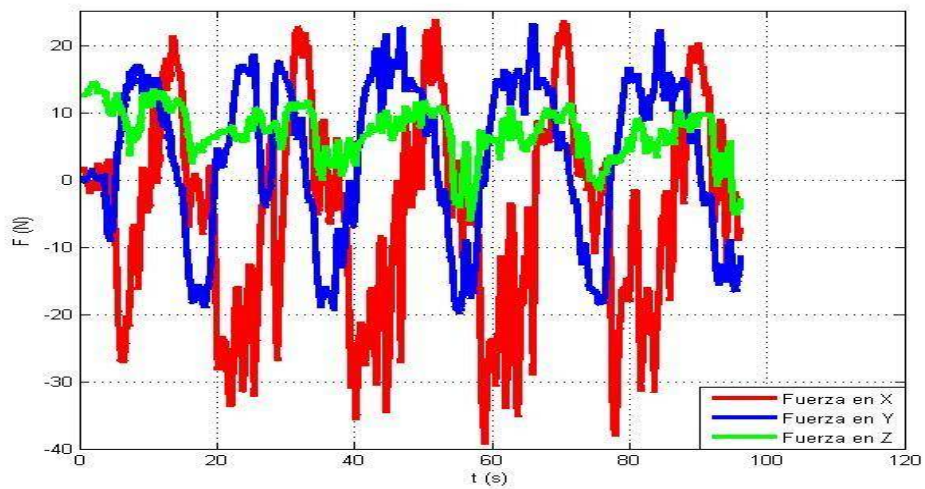


Figura C.0.76. Componentes de fuerza experimento 2. k_T2_210715_D_F.

Variables estadísticas

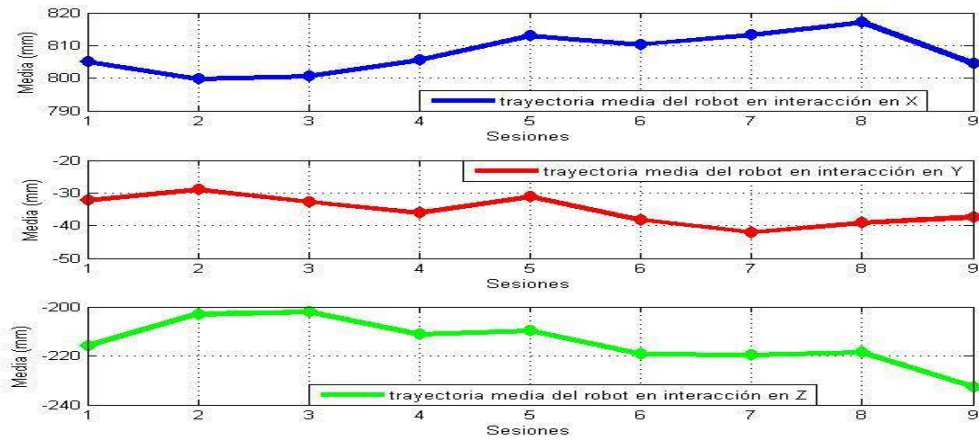


Figura C.0.77. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media K_T2.

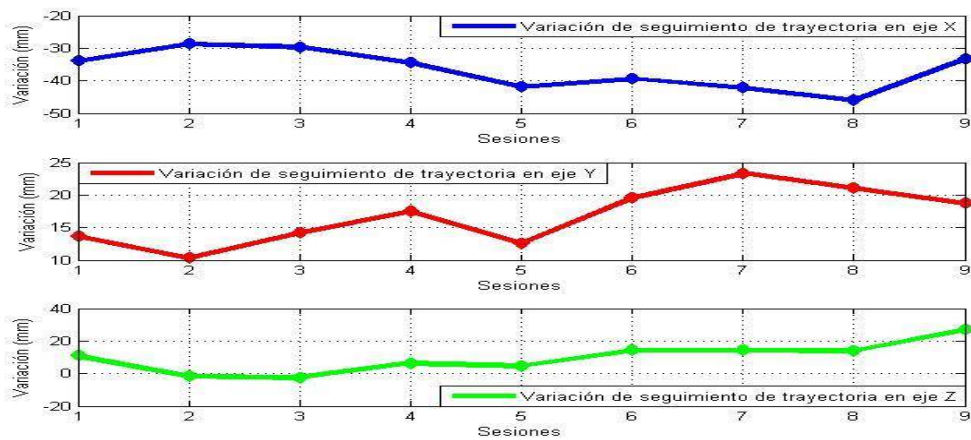


Figura C.0.78. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T2.

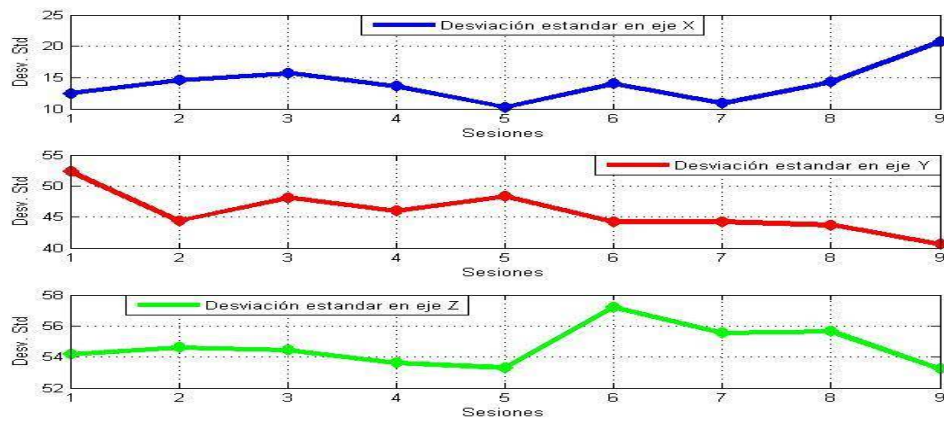


Figura C.0.79. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std K_T2.

Experimento 3

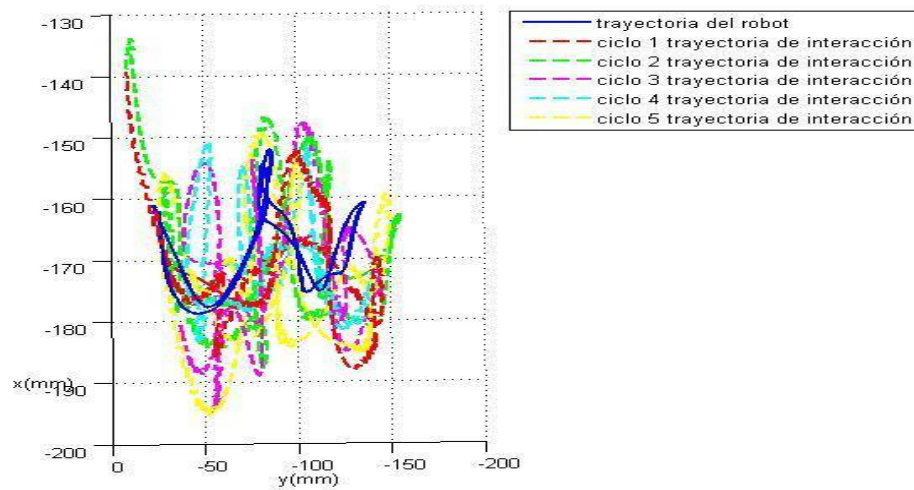


Figura C.0.80. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_260515_D_Tr.

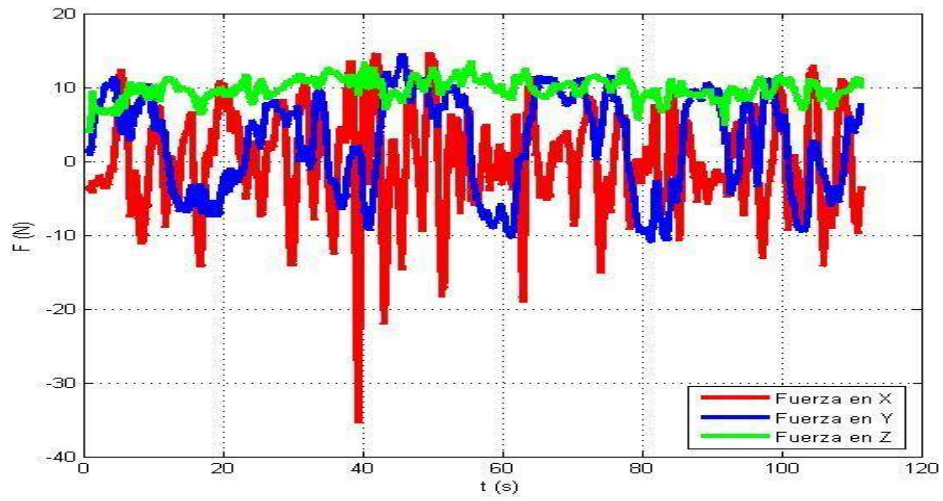


Figura C.0.81. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_260515_D_Tr.

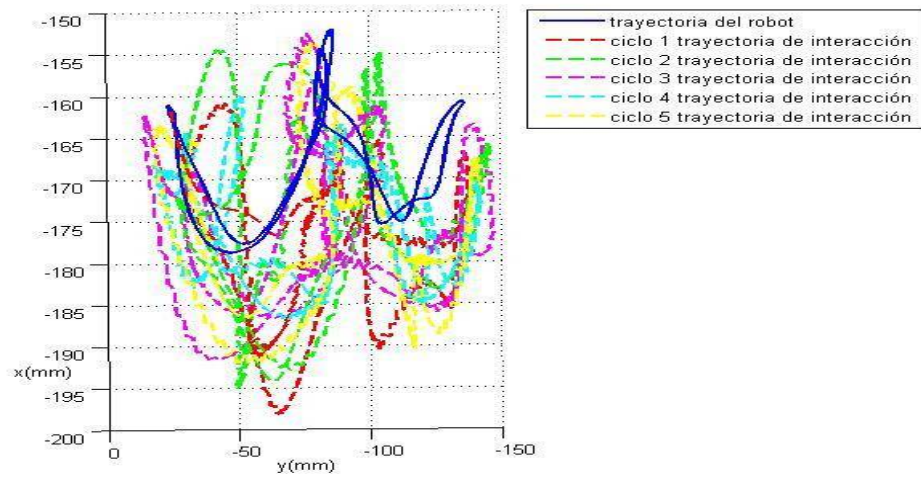


Figura C.0.82. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_190615_D_Tr

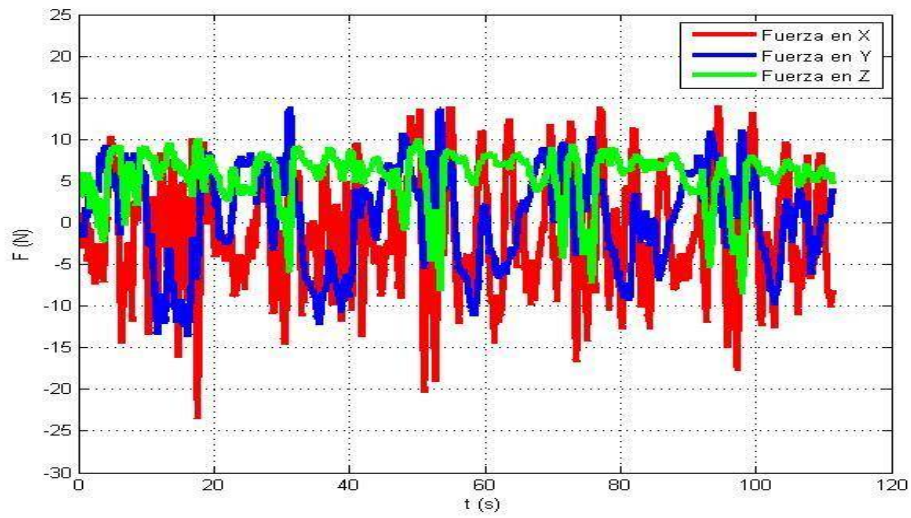


Figura C.0.83. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_190615_I_F.

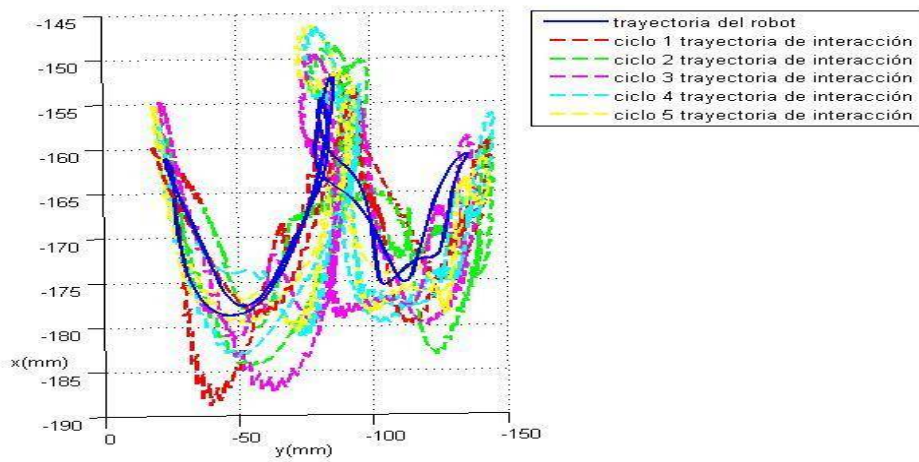


Figura C.0.84. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_23061515_D_Tr.

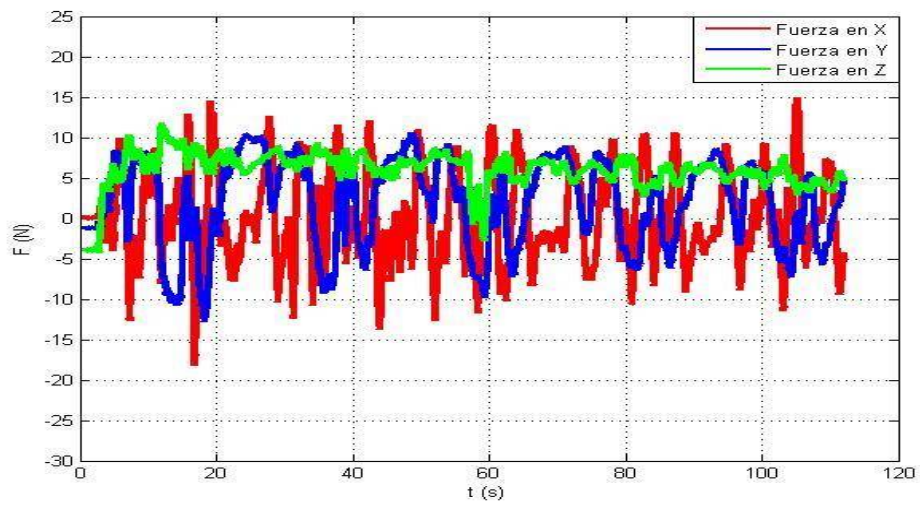


Figura C.0.85. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_23061515_D_F.

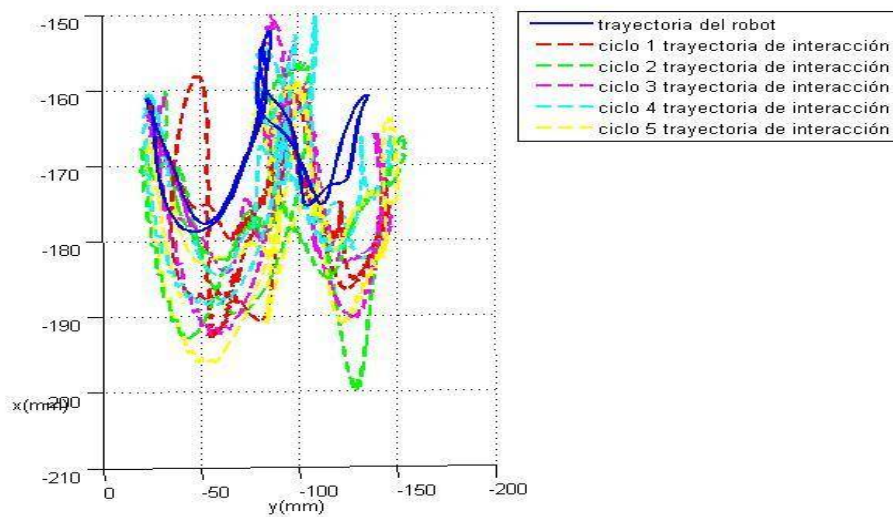


Figura C.0.86. Seguimiento de trayectoria experimento 3. k_T3_260615_D_Tr.

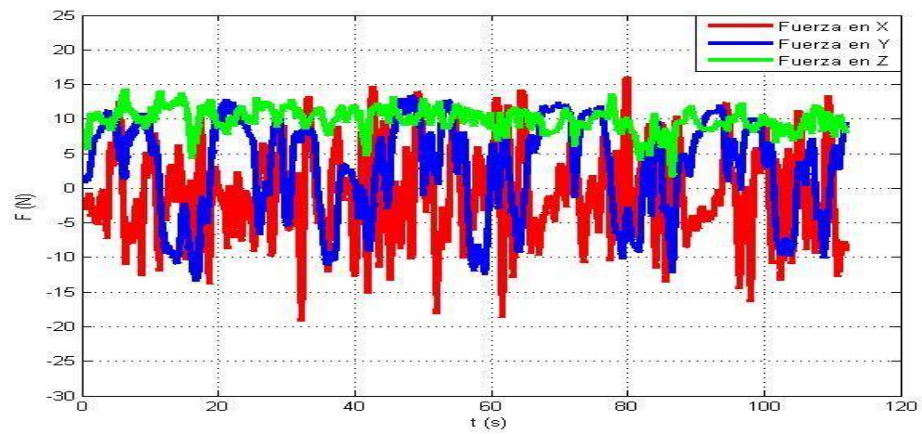


Figura C.0.87. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_260615_D_F.

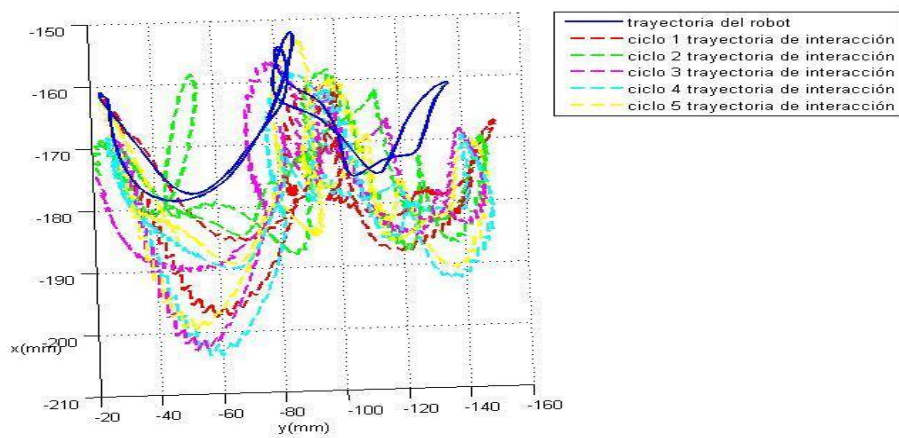


Figura C.0.88. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_300615_Tr.

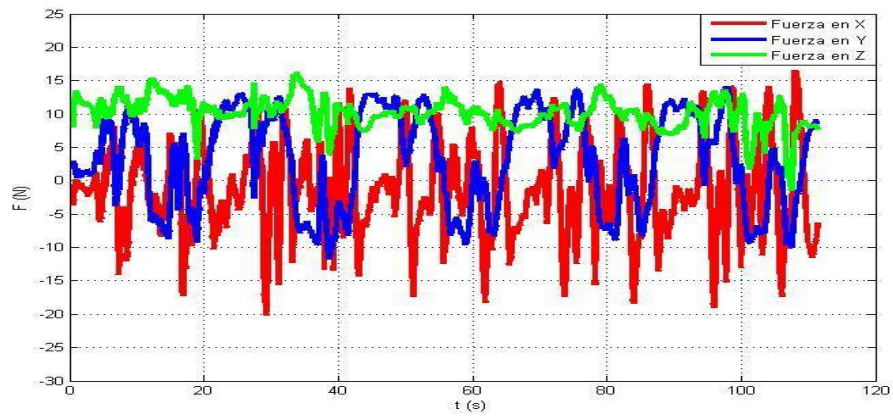


Figura C.0.89. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_300615_F.

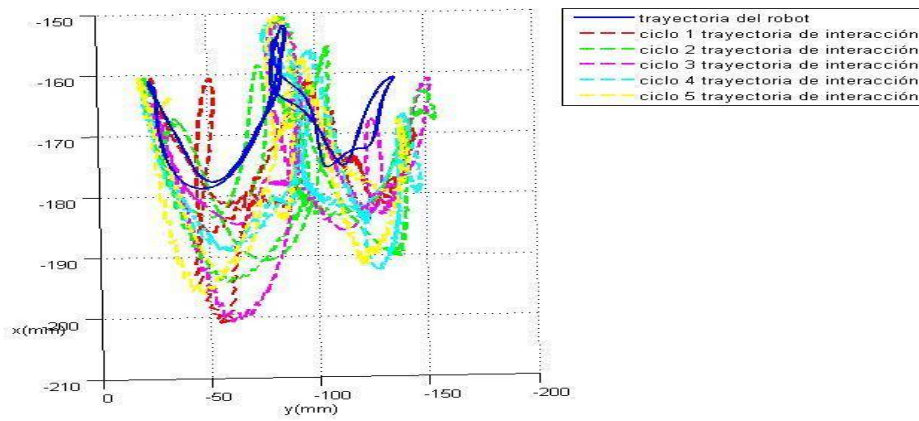


Figura C.0.90. Seguimiento de trayectoria experimento 3. K_T3_070715_Tr.

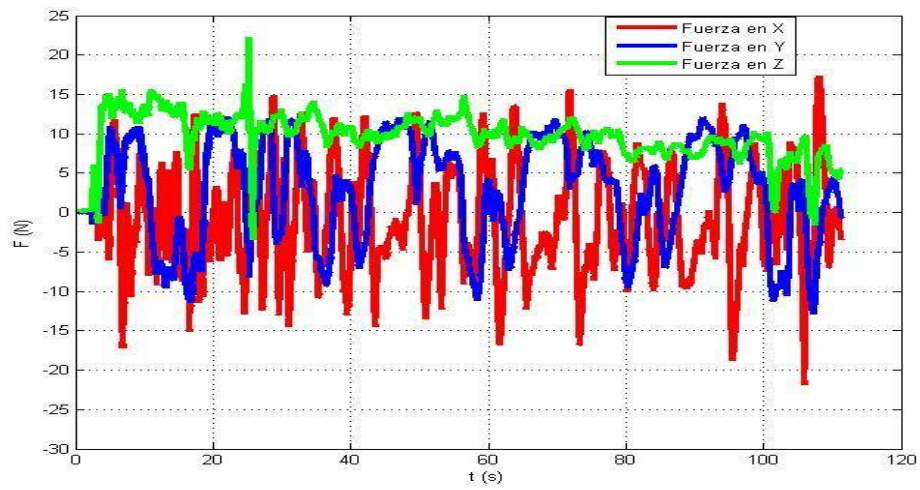


Figura C.0.91. Componentes de fuerza experimento 3. K_T3_070715_F.

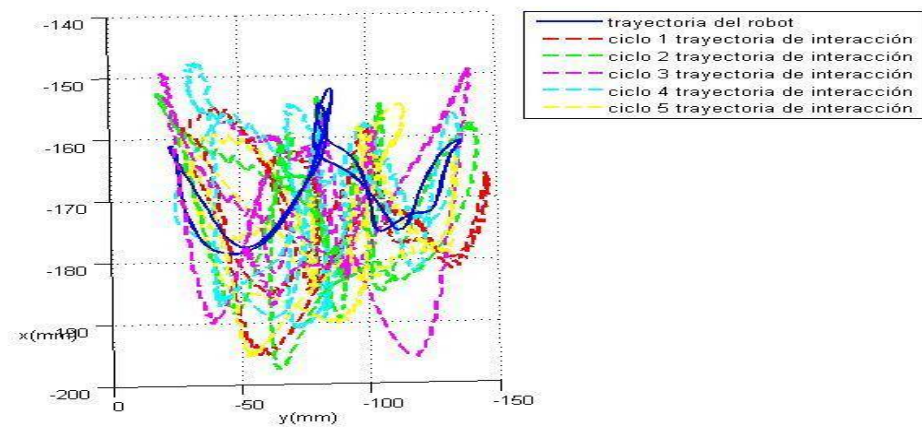


Figura C.0.92. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_210715_F.

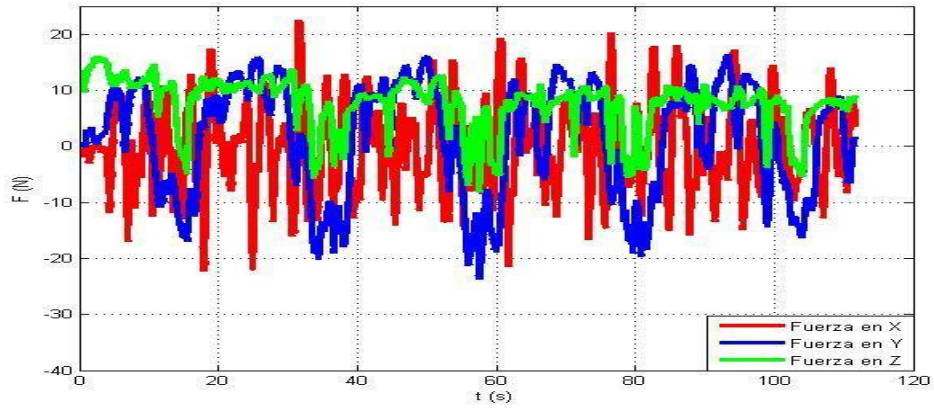


Figura C.0.93. Componentes de fuerza experimento 3. k_T3_210715_F

Variables estadísticas

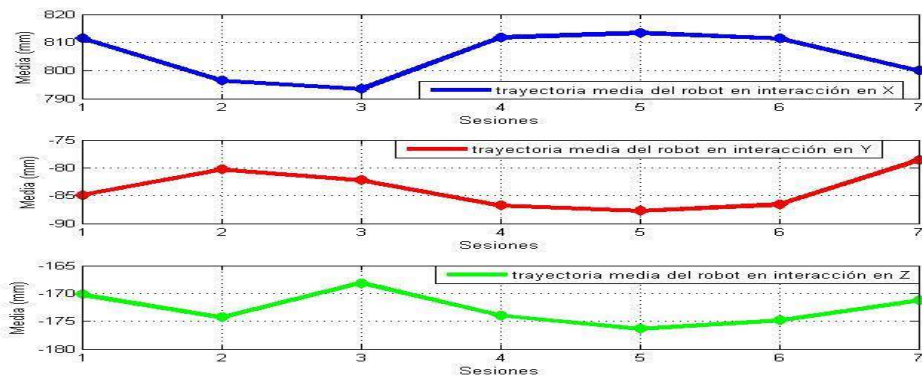


Figura C.0.94. Componentes por ejes. Trayectoria media del robot en interacción por sesiones. Media

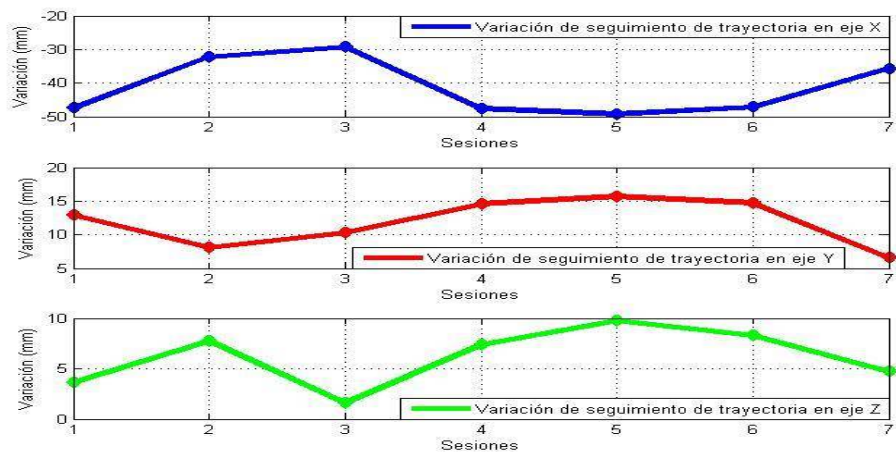


Figura C.0.95. Componentes por cada eje. Variación de seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error K_T3.

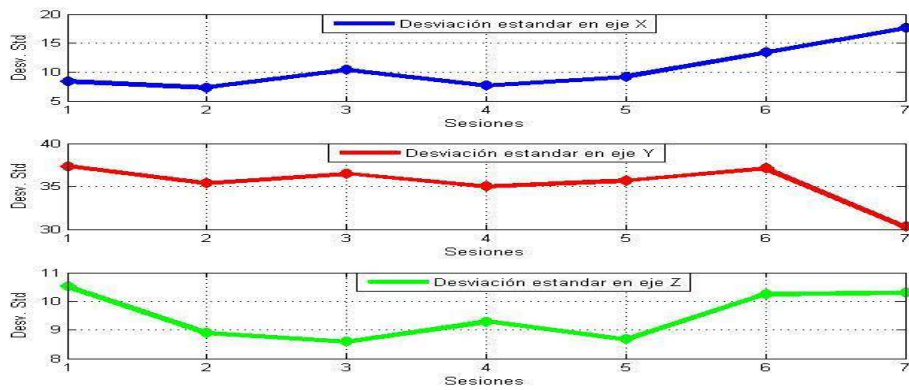


Figura C.0.96. Componentes por cada eje. Desviación estándar por sesiones. Desv std K_T3.

Gráficas Generales de Fuerza

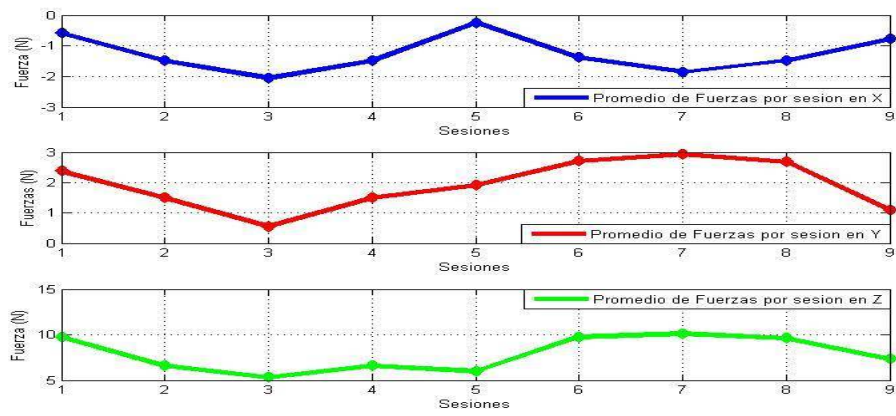


Figura C.0.97. Promedio de fuerzas por sesión. Promedio fza K_T3.

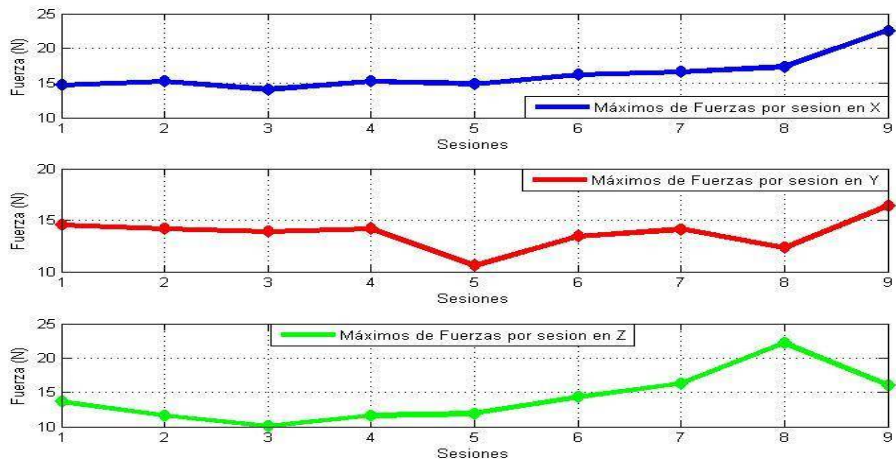


Figura C.0.98. Máximos de fuerza por sesión. Máximos fza1 K_T3.

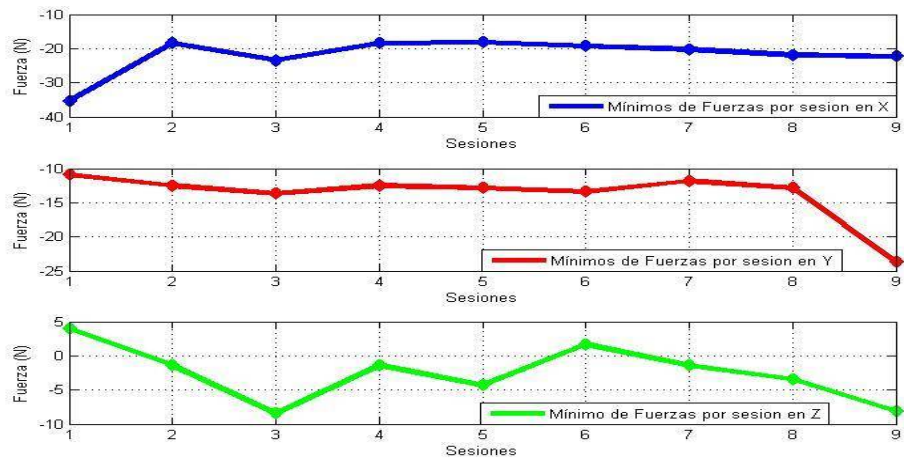


Figura C.0.99. Mínimos de fuerza por sesión. Mínimosfza1 K_T3.

Experimento 4

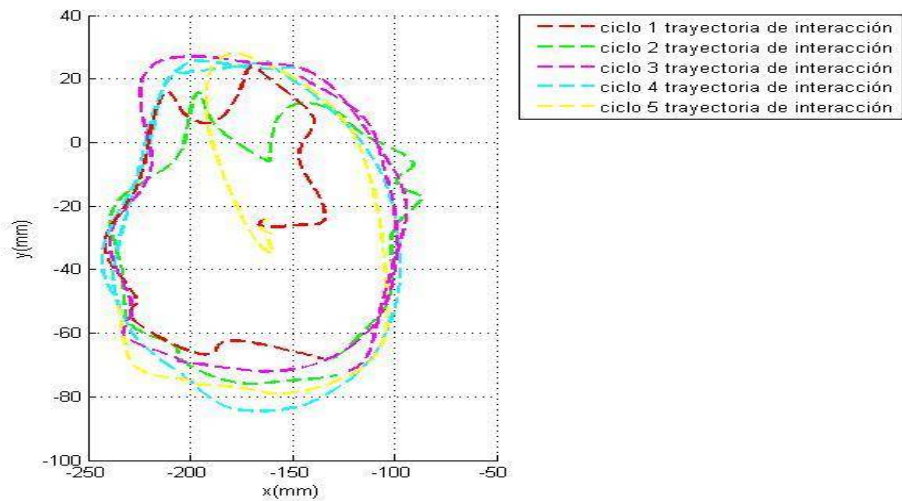


Figura C 0.100. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_D_190615.

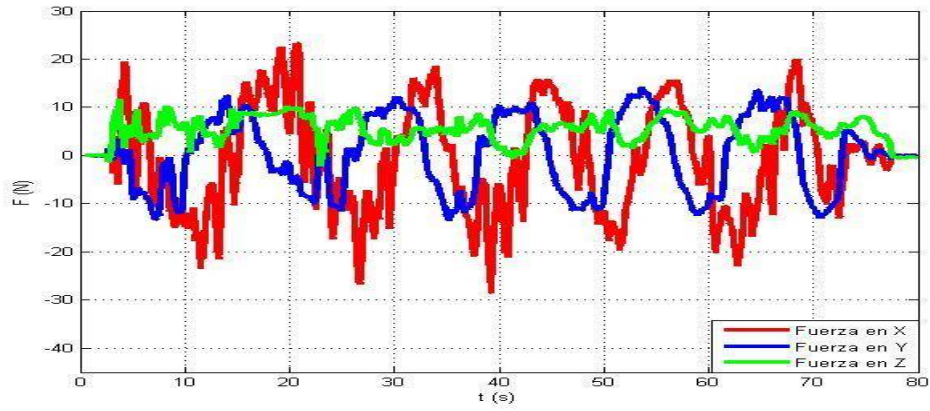


Figura C 0.101. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_D_190615.

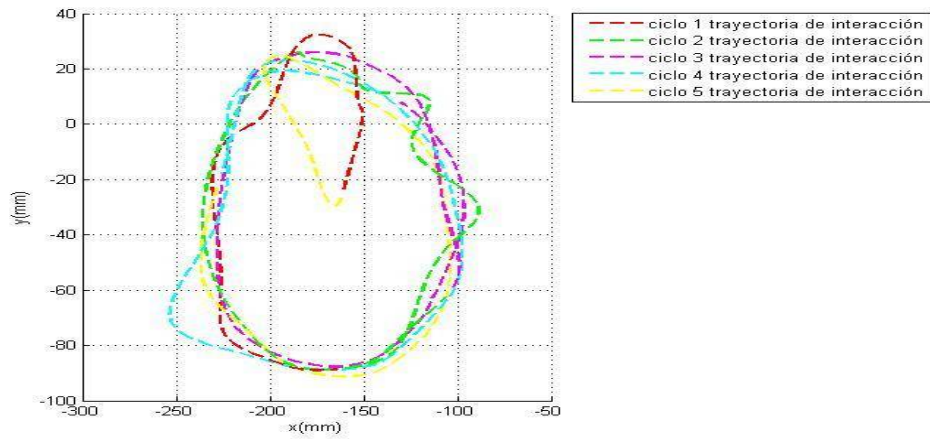


Figura C.0.102. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_Total_K_190615.

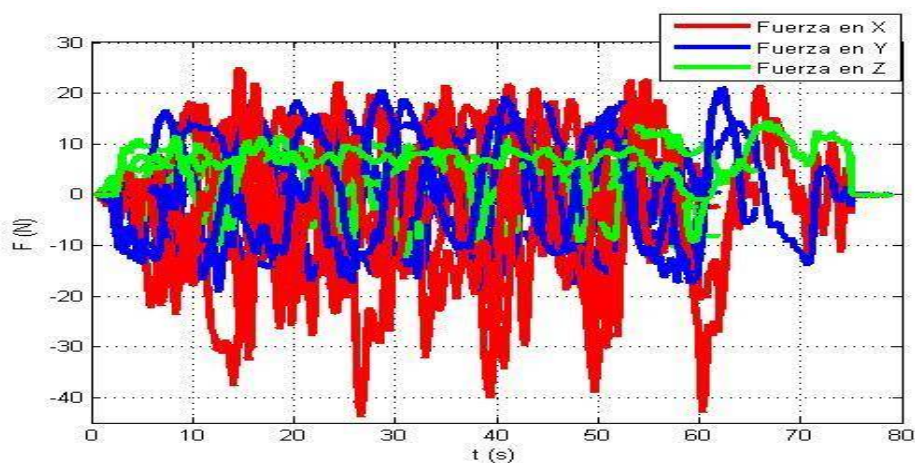


Figura C.0.103. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_190615.

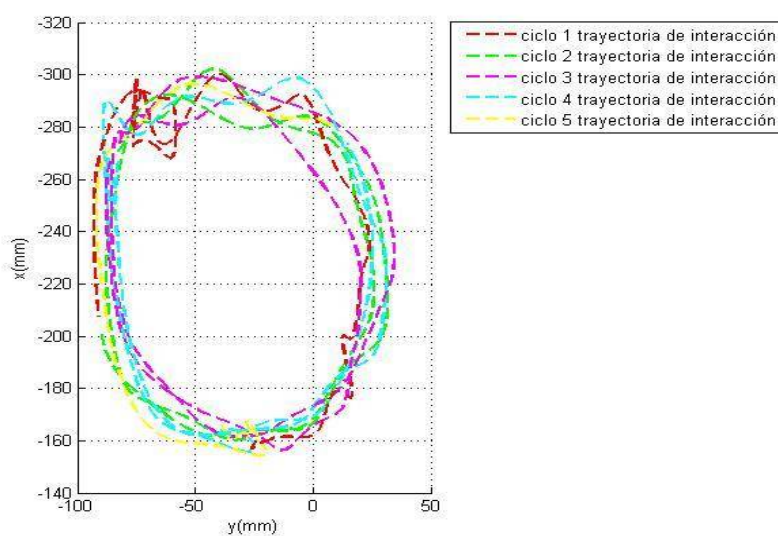


Figura C.0.104. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_230615.

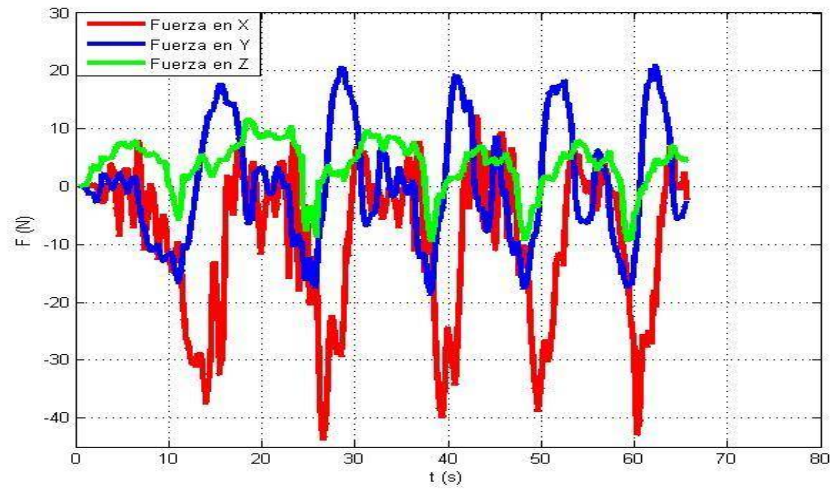


Figura C.0.105. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Fza_K_230615

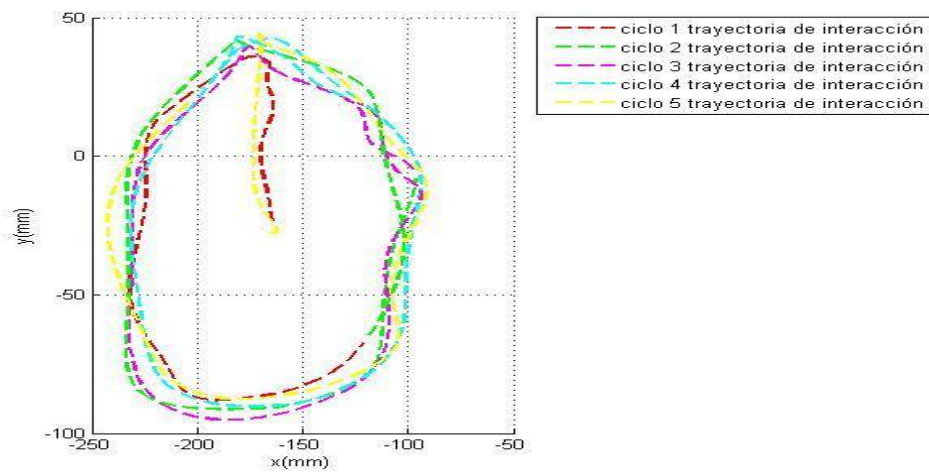


Figura C.0.106. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_D_260615.

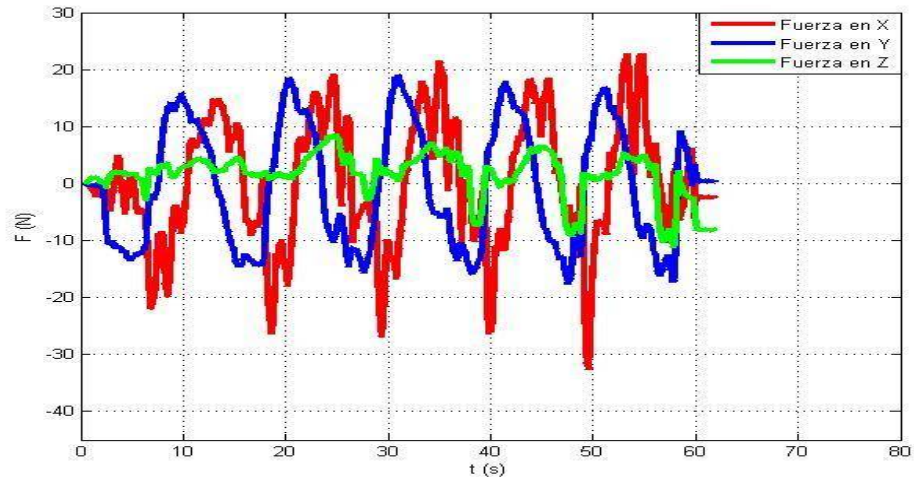


Figura C.0.107. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_D_260615.

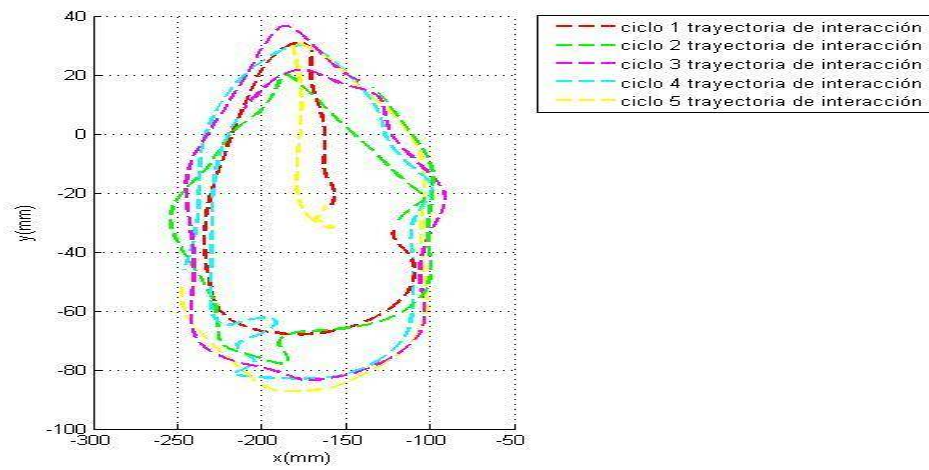


Figura C.0.108. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_I_260615.

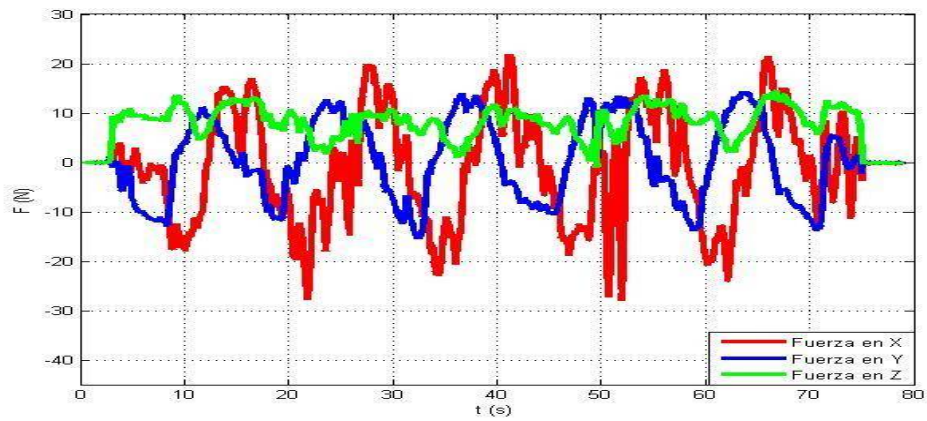


Figura C.0.109. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_I_260615.

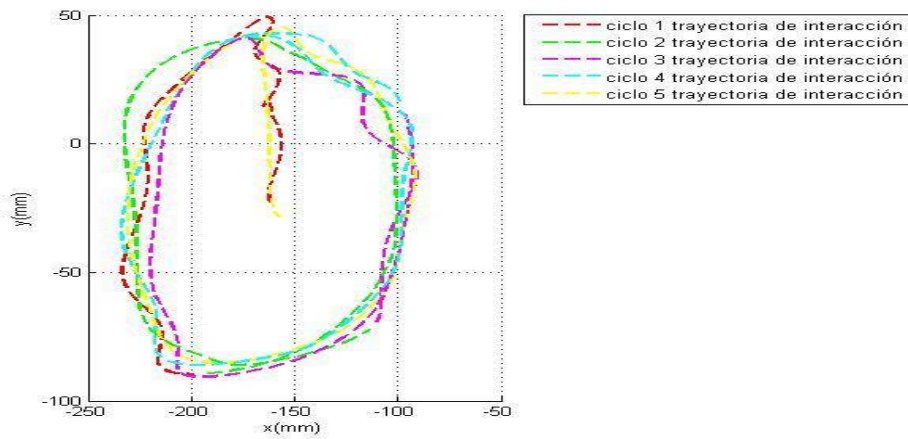


Figura C.0.110. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_I_300615.

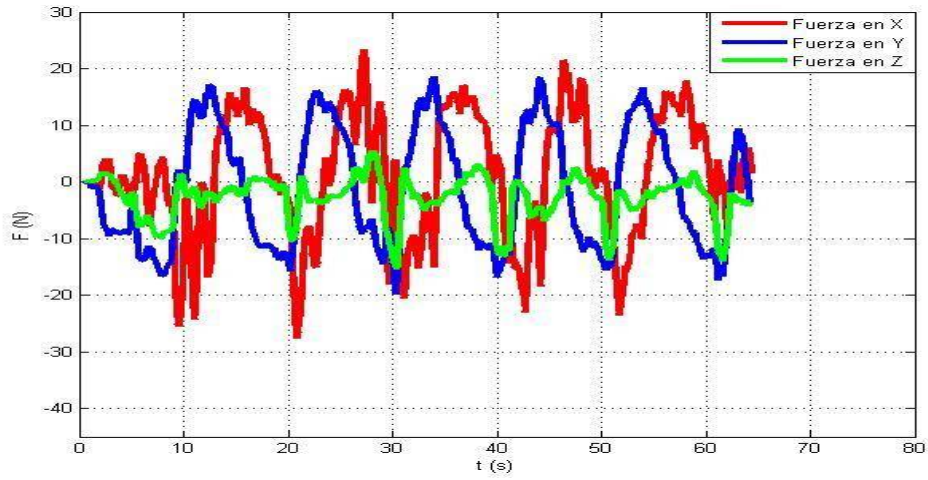


Figura C.0.111. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_300615.

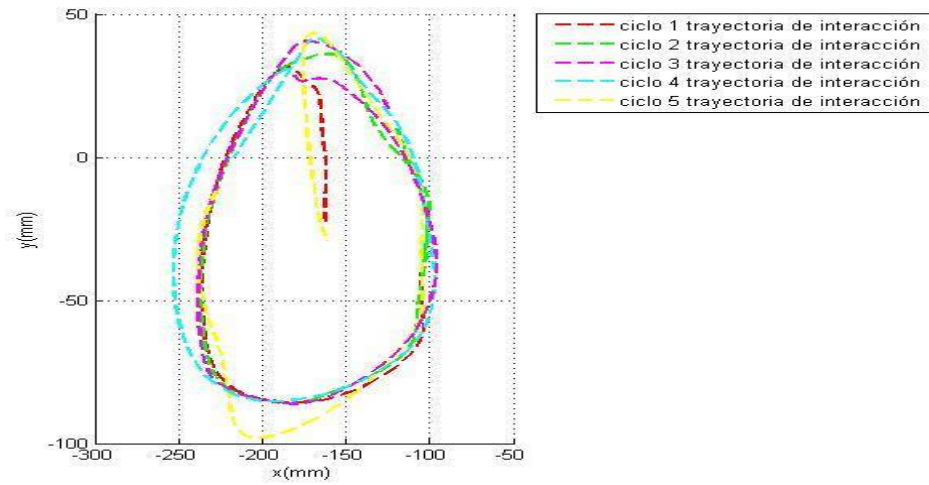


Figura C.0.112. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Tray_K_070715.

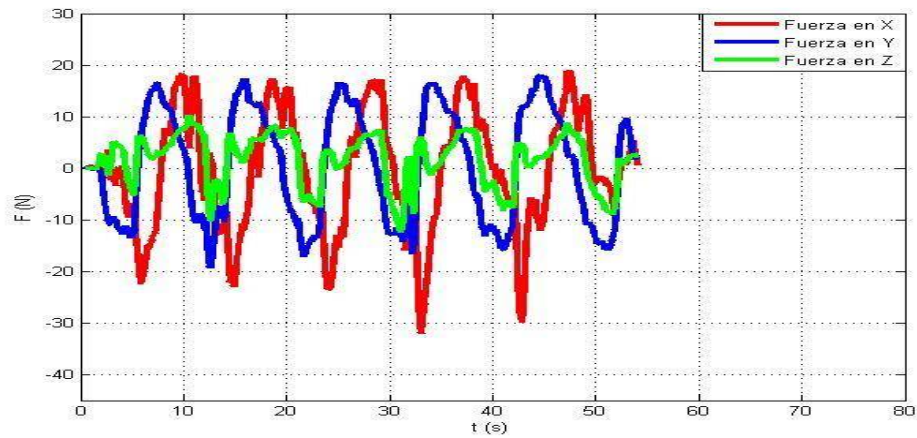


Figura C.0.113. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_070715.

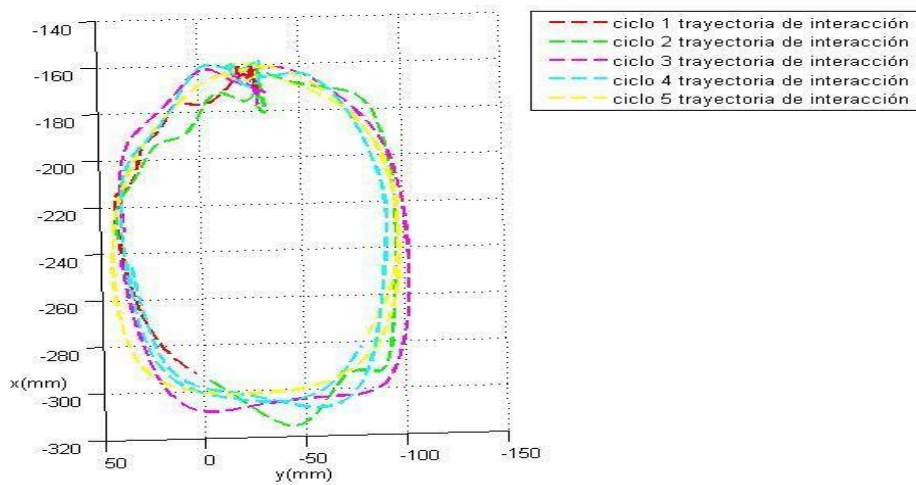


Figura C.0.114. Seguimiento de trayectoria experimento 4. Fza_K_210715.

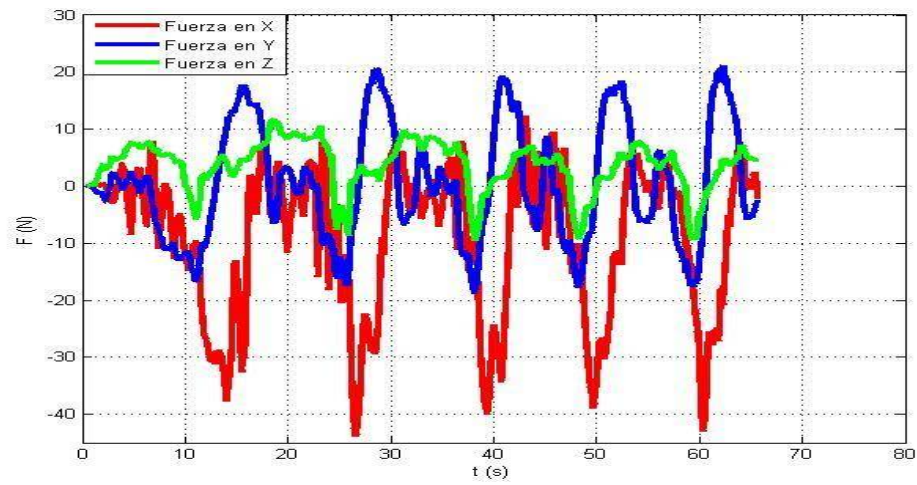


Figura C.0.115. Componentes de fuerza experimento 4. Fza_K_210715.

- **Paciente M**

Experimento 1

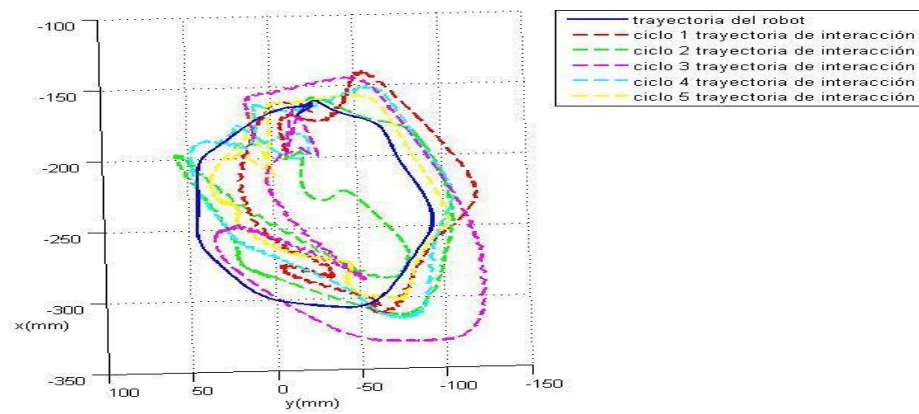


Figura C.0.116. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_140415_D_Tr.

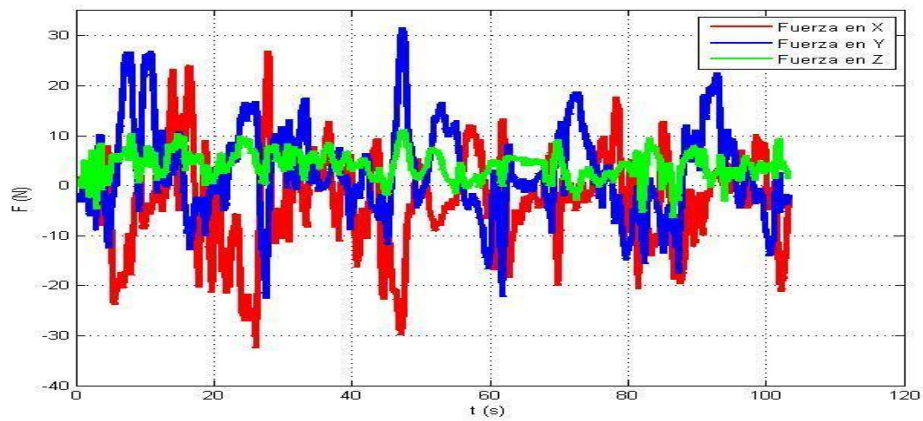


Figura C.0.117. Componentes de fuerza experimento 1. Marcelo_T1_140415_D_F.

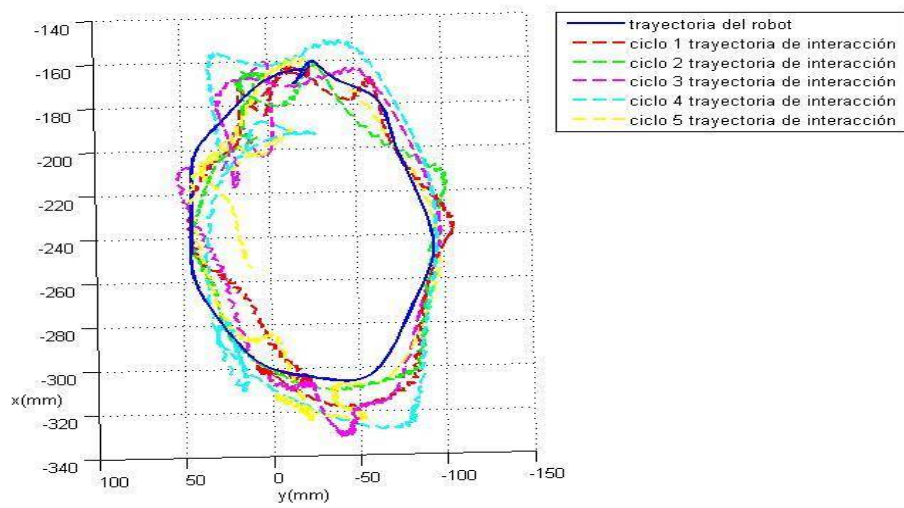


Figura C.0.118. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_140415_D_Tr.

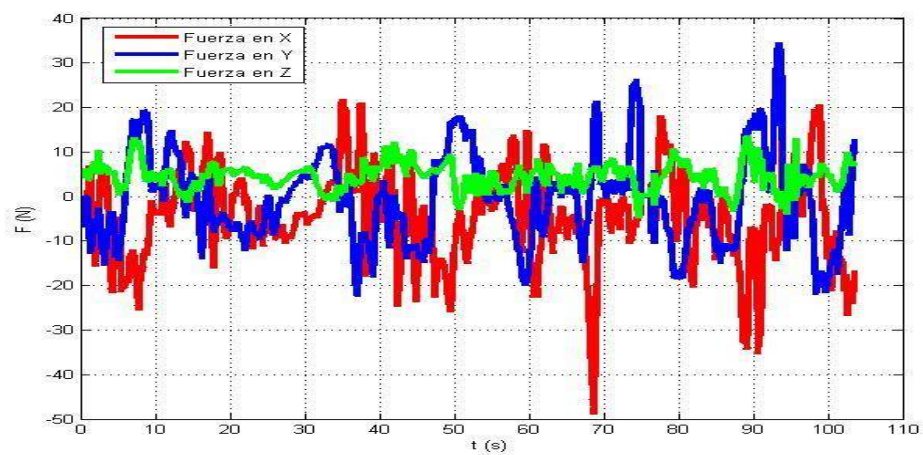


Figura C.0.119. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_140415_D_F.

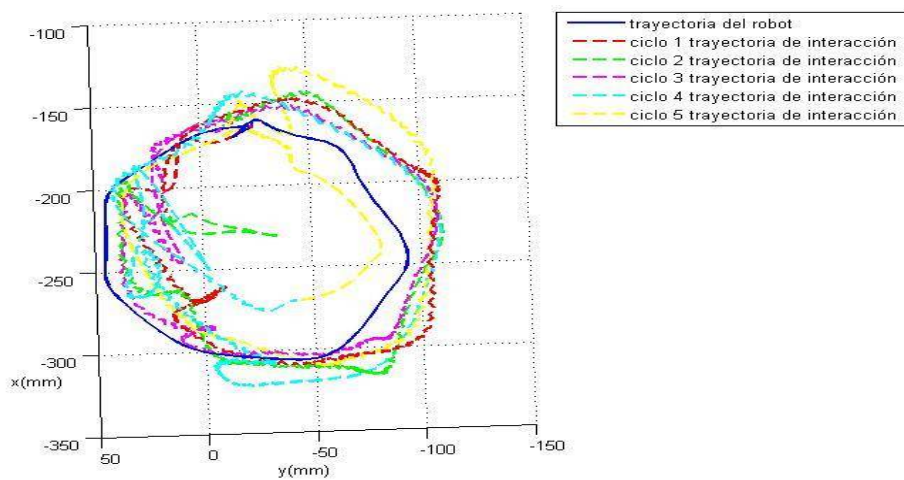


Figura C.0.120. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_240415_D_Tr.

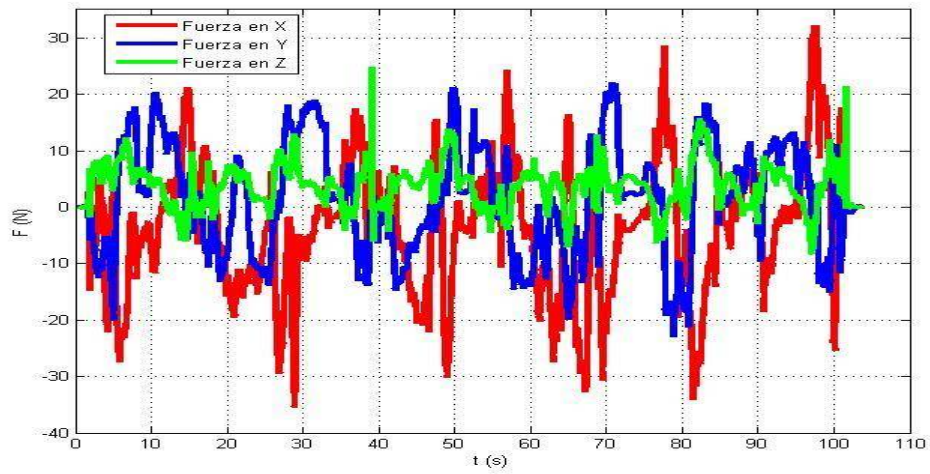


Figura C.0.121. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_240415_D_F.

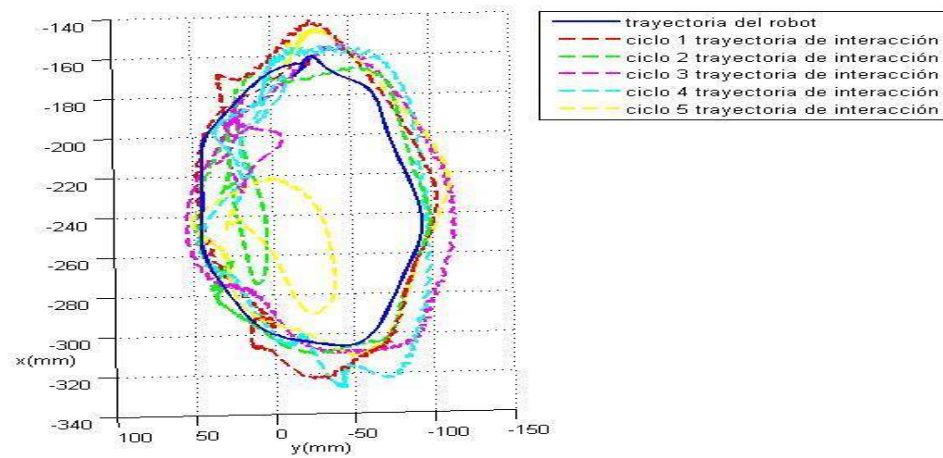


Figura C.0.122. Seguimiento de trayectoria experimento 1. M_T1_240415_D_F.

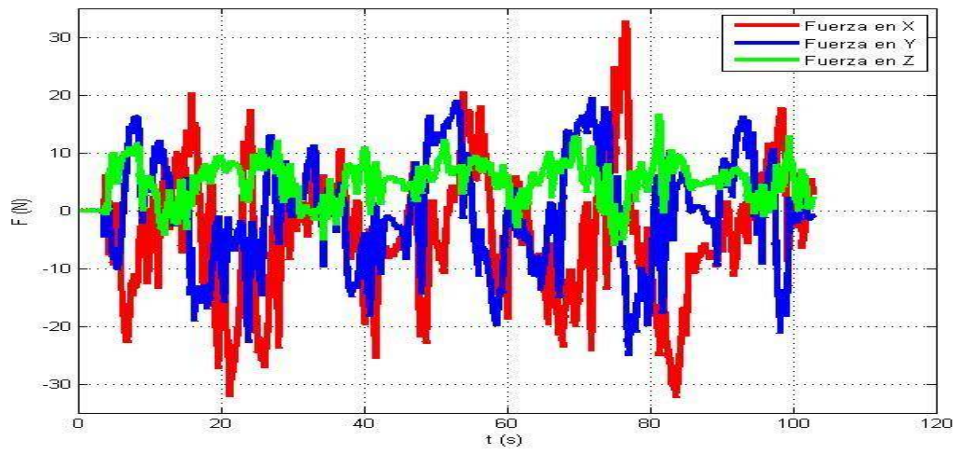


Figura C.0.123. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_240415_D_F.

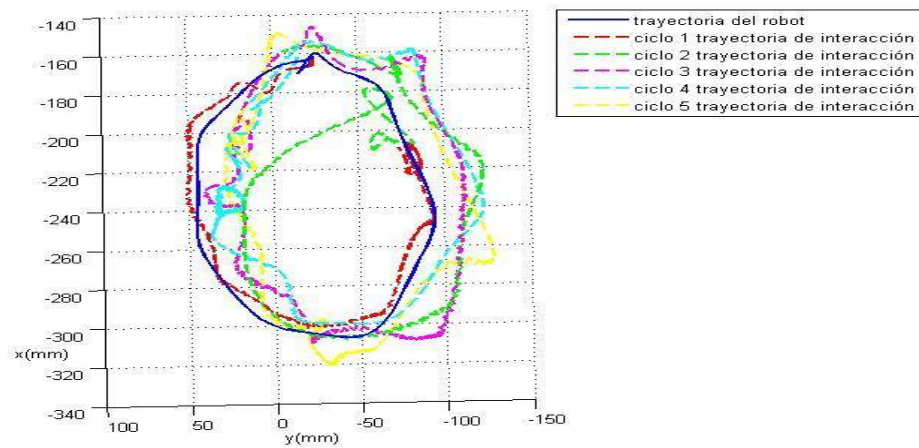


Figura C.0.124. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_220515_D_Tr

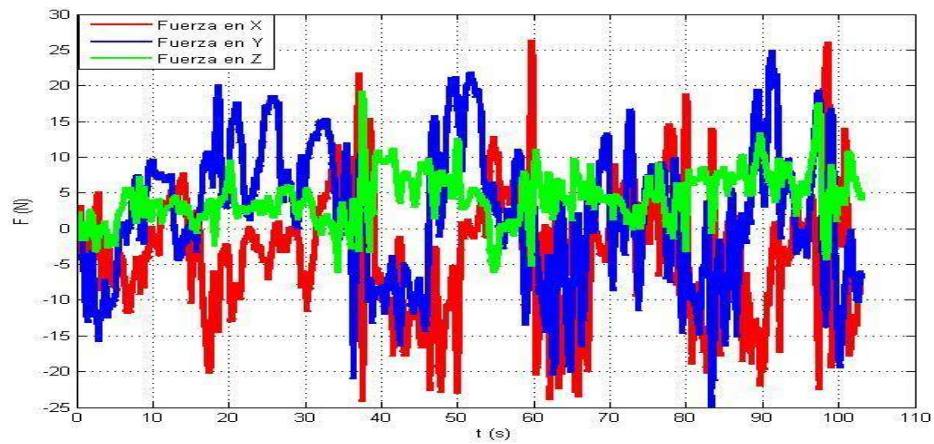


Figura C.0.125. Componentes de fuerza experimento 1. M_T1_220515_D_F

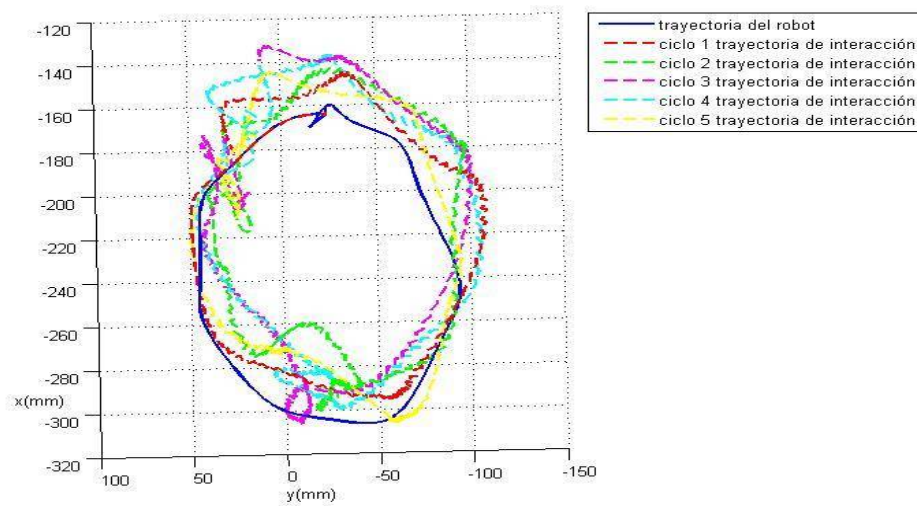


Figura C.0.126. Seguimiento de trayectoria experimento 1. Marcelo_T2_160615_D_Tr.

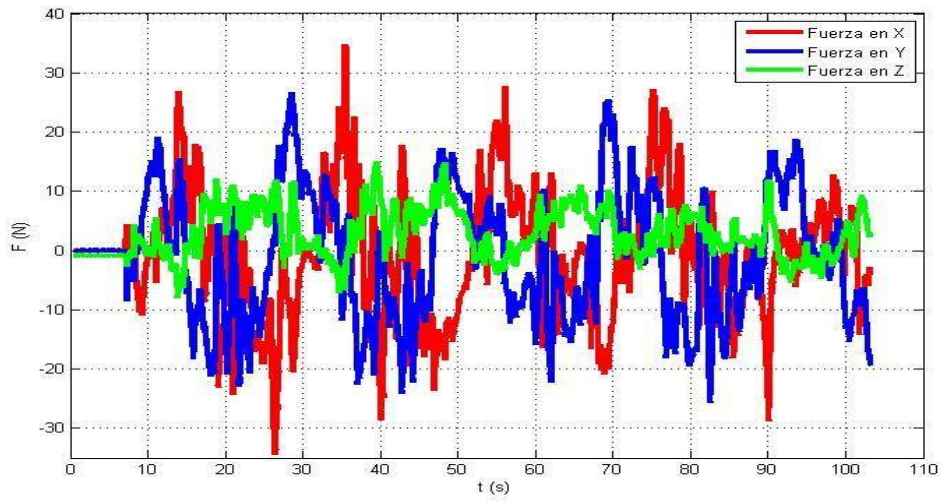


Figura C.0.127. Componentes de fuerza experimento 1. Marcelo_T2_160615_D_F.

Variables estadísticas.

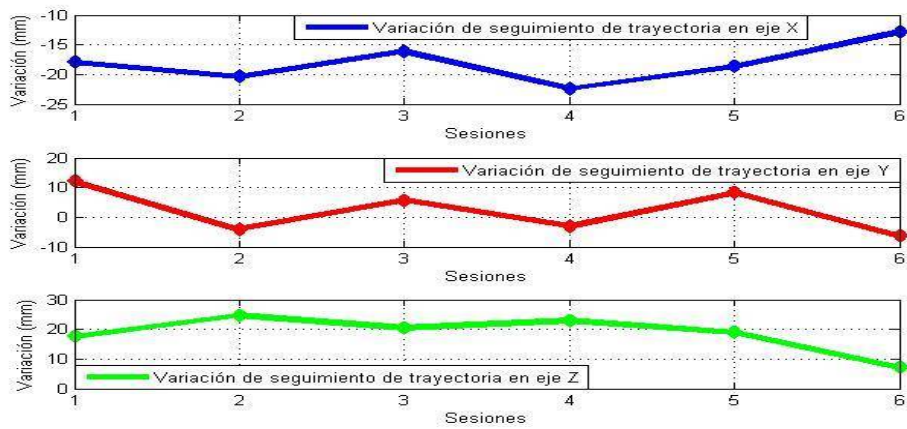


Figura C.0.128. Variación en seguimiento de trayectoria 1. Seguimiento Tray. error M_T1.

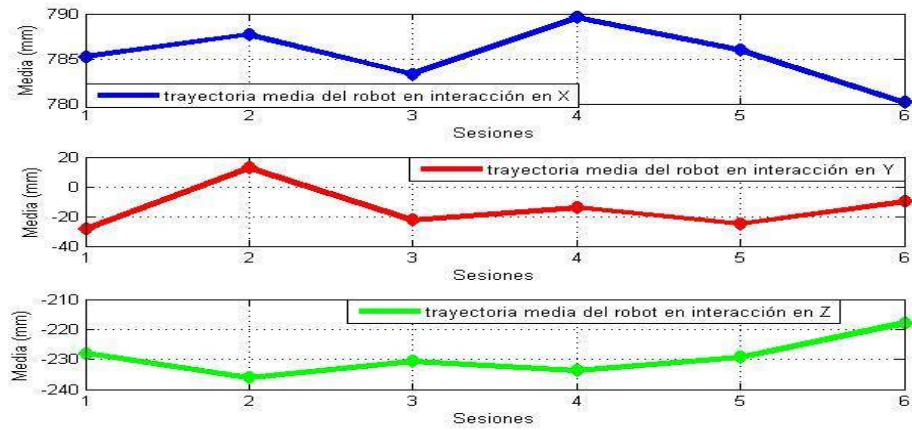


Figura C.0.129. Trayectoria media del robot en interacción 1. Media M_T1.

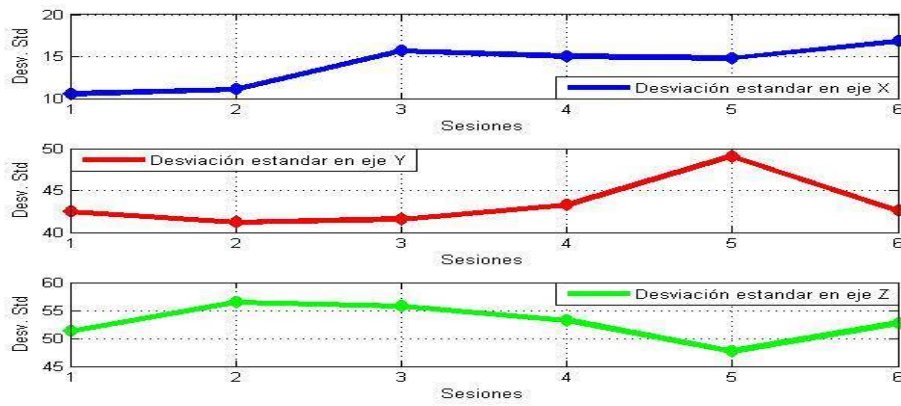


Figura C.0.130. Desviación estándar. Desv std M_T1.

Gráficas Generales de fuerza

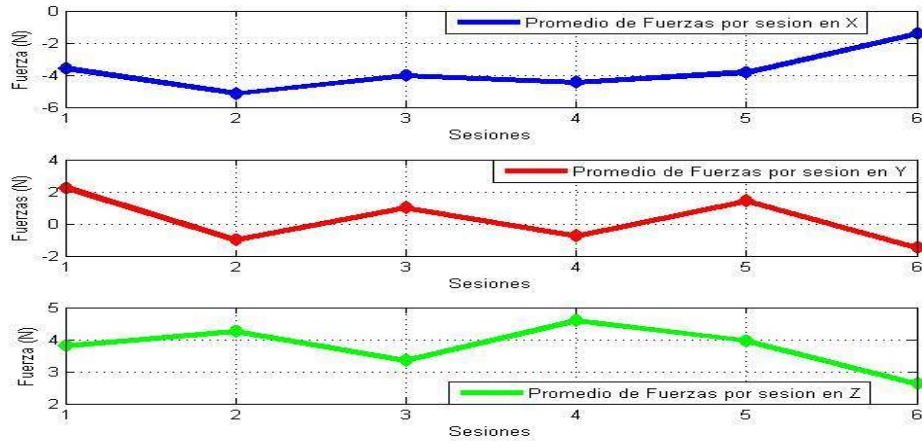


Figura C.0.131. Promedio de fuerza por sesión. Promedio M_T1.

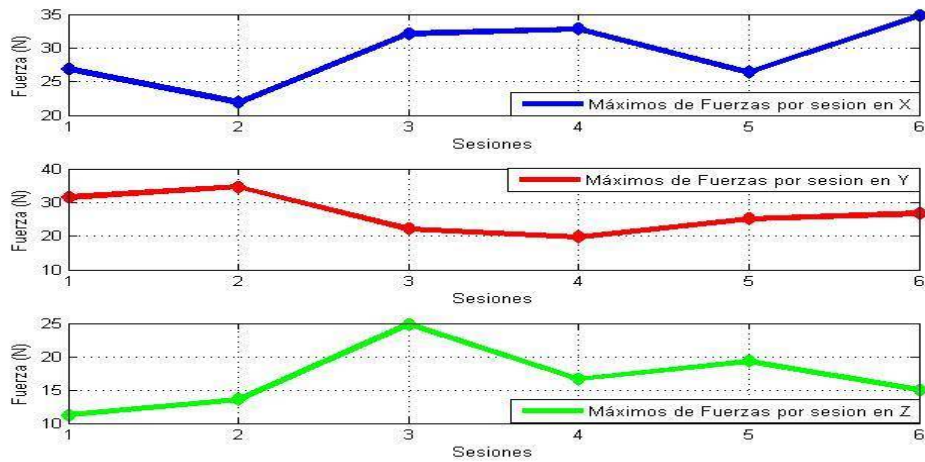


Figura C.0.132. Máximos de componentes de fuerza por sesión. Máximosfza M_T1

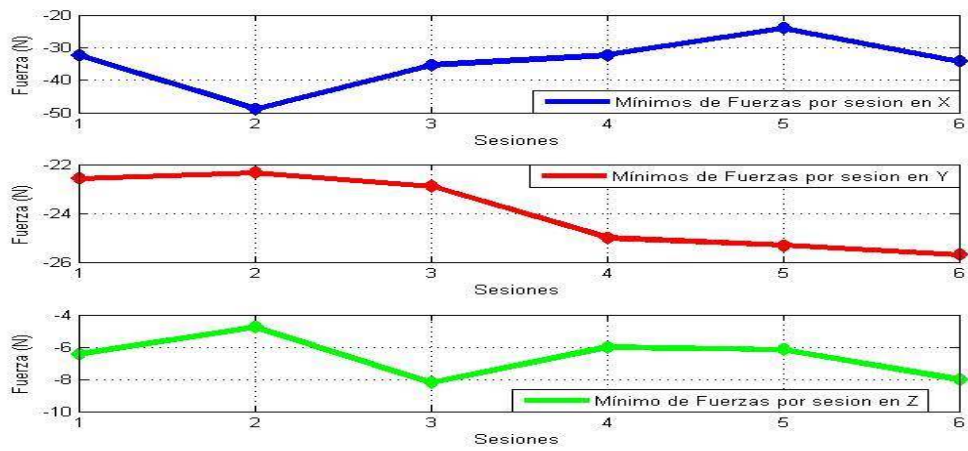


Figura C.0.133. Mínimos de componentes de fuerza por sesión. Mínimosfza M_T1.

Experimento 2

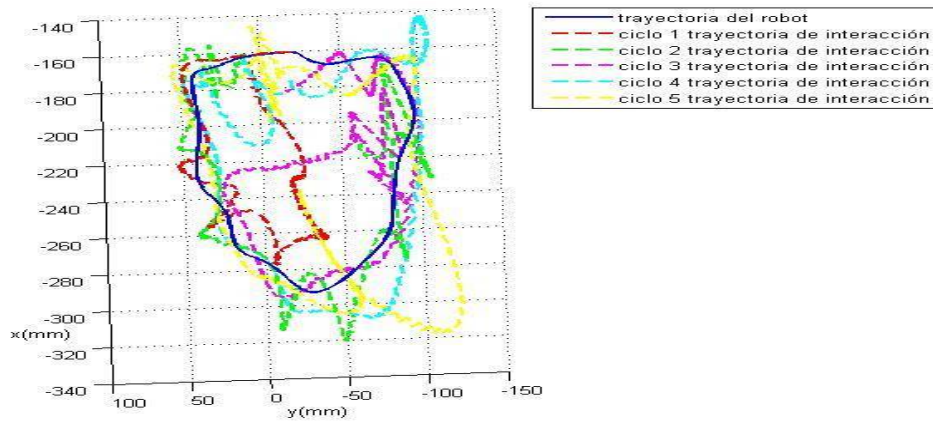


Figura C.0.134. Seguimiento de trayectoria experimento 2. Marcelo_T1_270315_D_Tr.

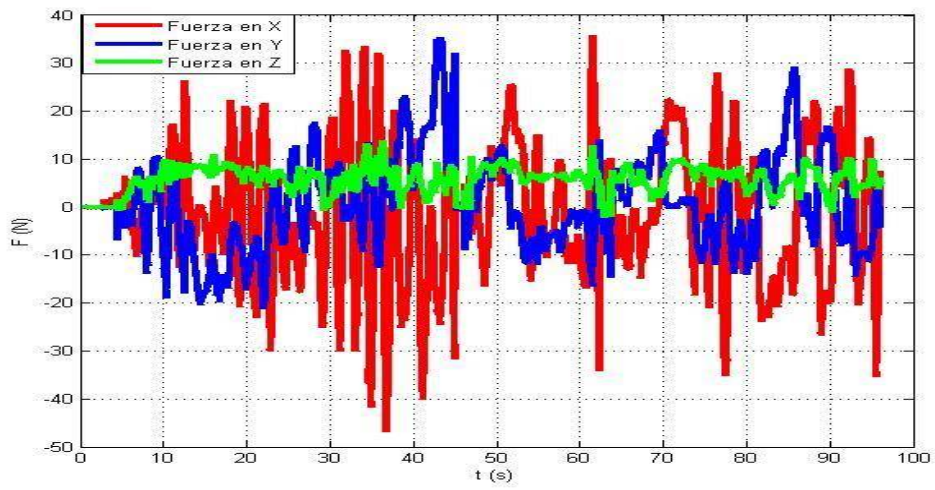


Figura C.0.135. Componentes de fuerza experimento 2. Marcelo_T1_270315_D_F.

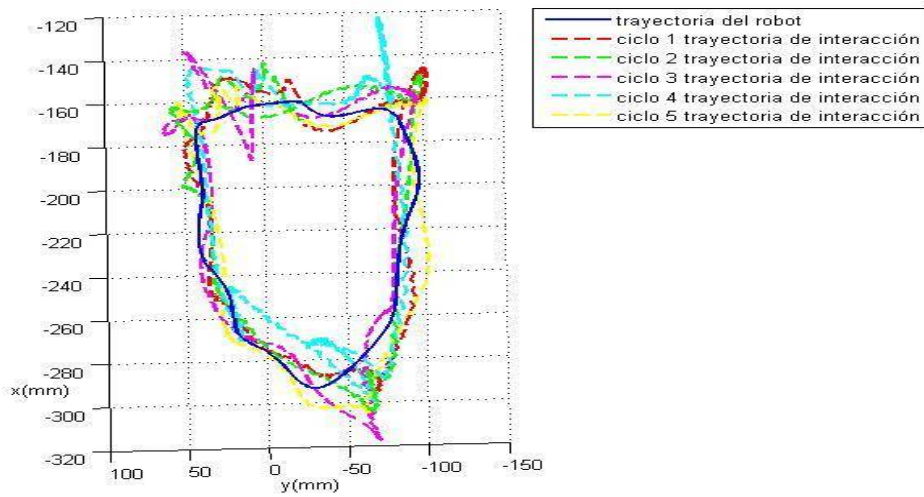


Figura C.0.136. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_140415_D_Tr.

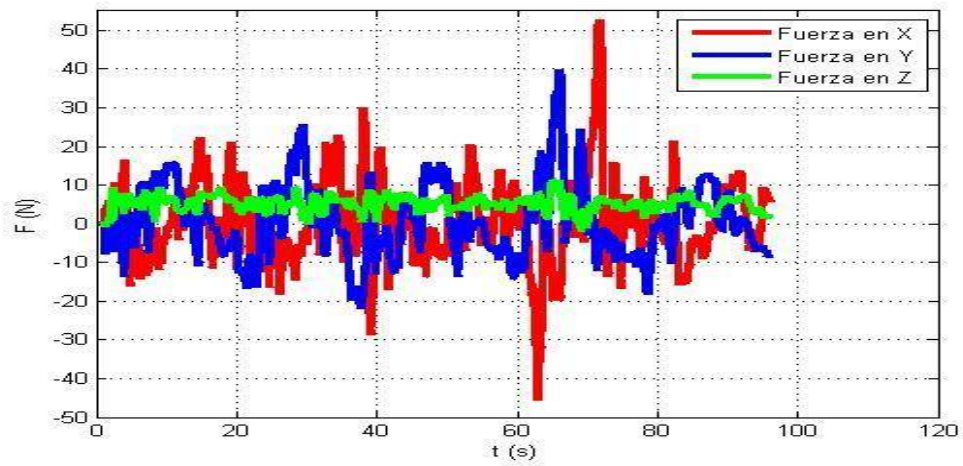


Figura C.0.137. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_140415_D_F.

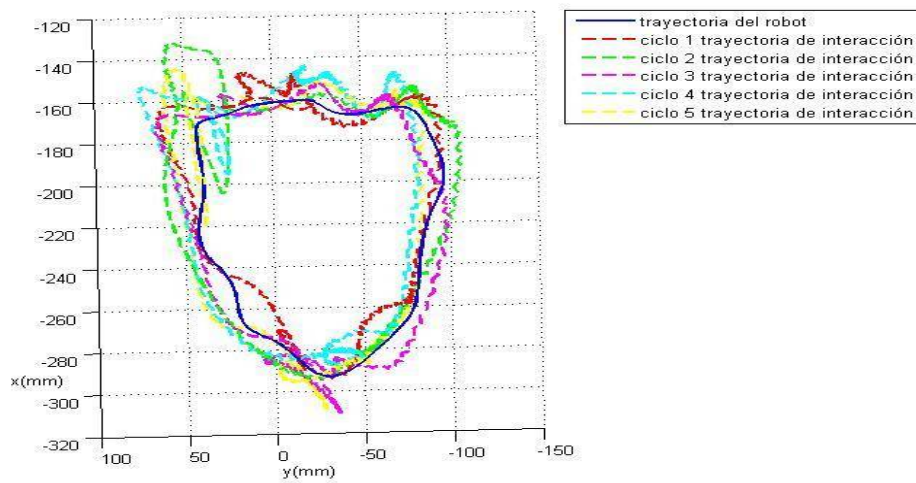


Figura C.0.138. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_240415_D_Tr.

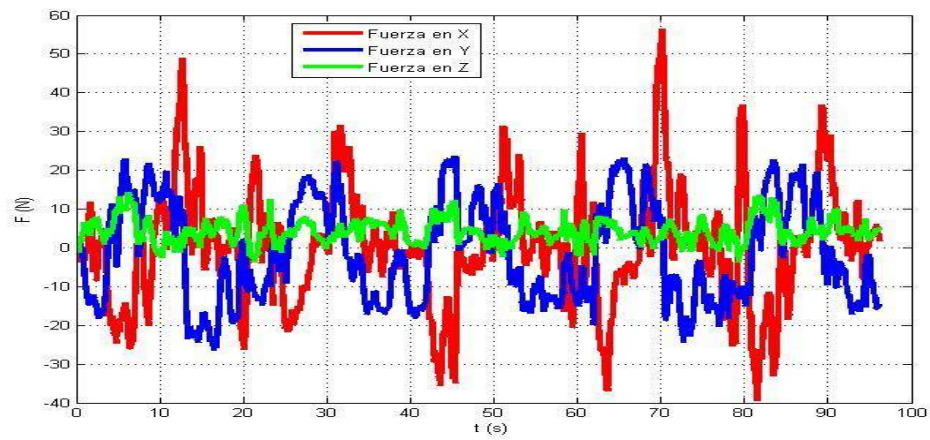


Figura C.0.139. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_240415_D_F.

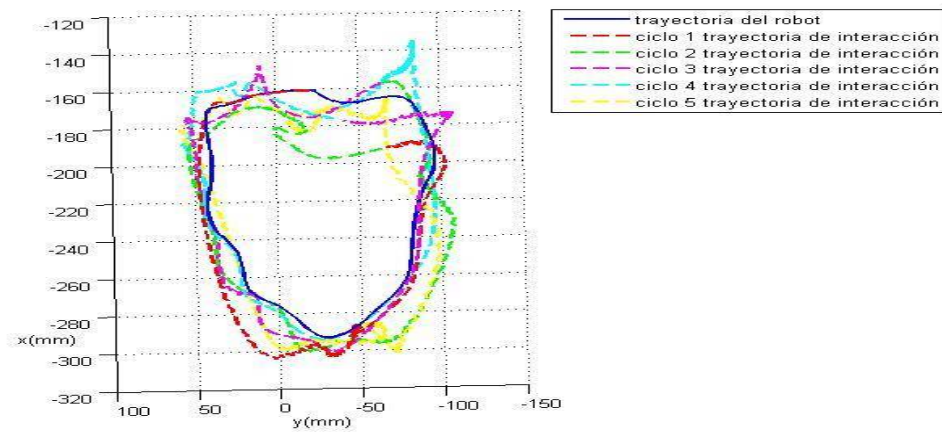


Figura C.0.140. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_190515_D_Tr.

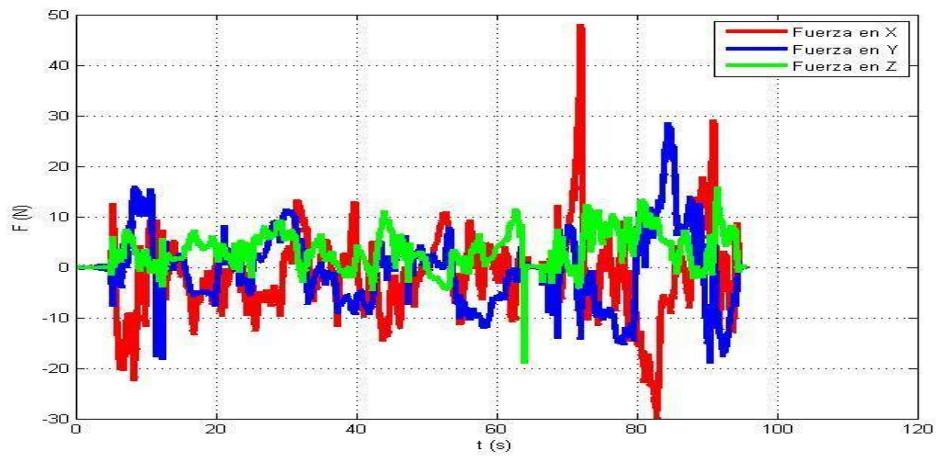


Figura C.0.141. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_190515_D_F.

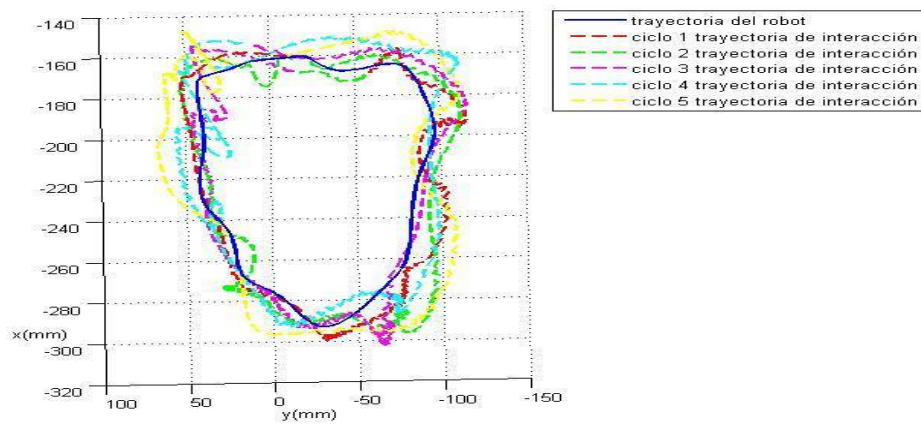


Figura C.0.142. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_220515_D_F.

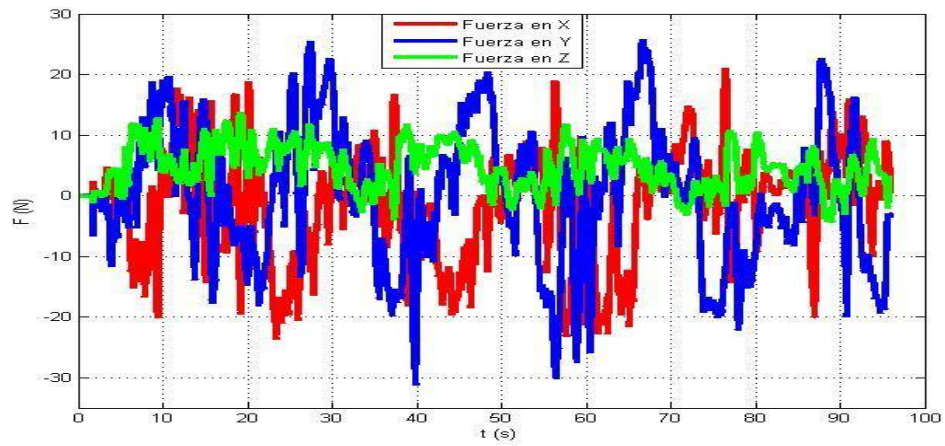


Figura C.0.143. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_220515_D_F.

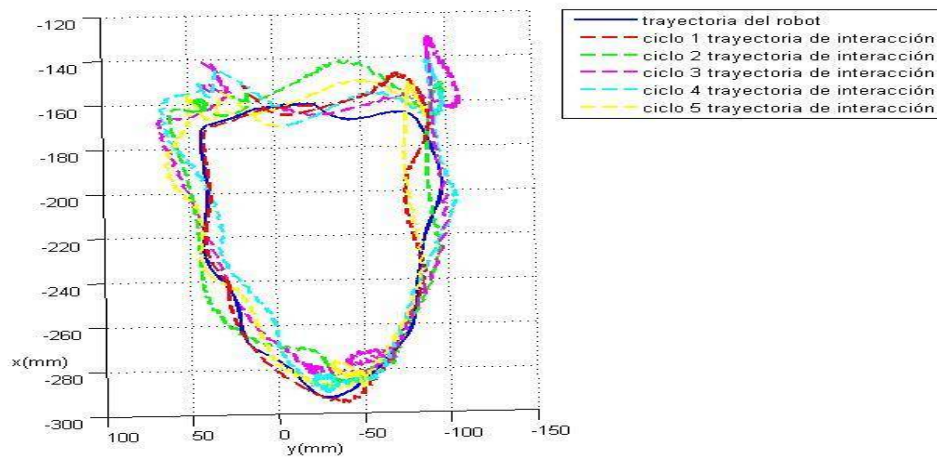


Figura C.0.144. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_160615_D_Tr.

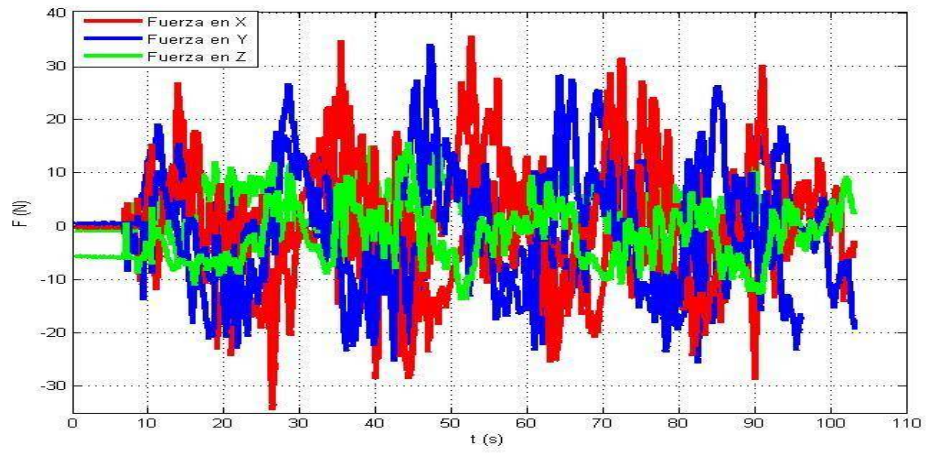


Figura C.0.145. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_160615_D_F.

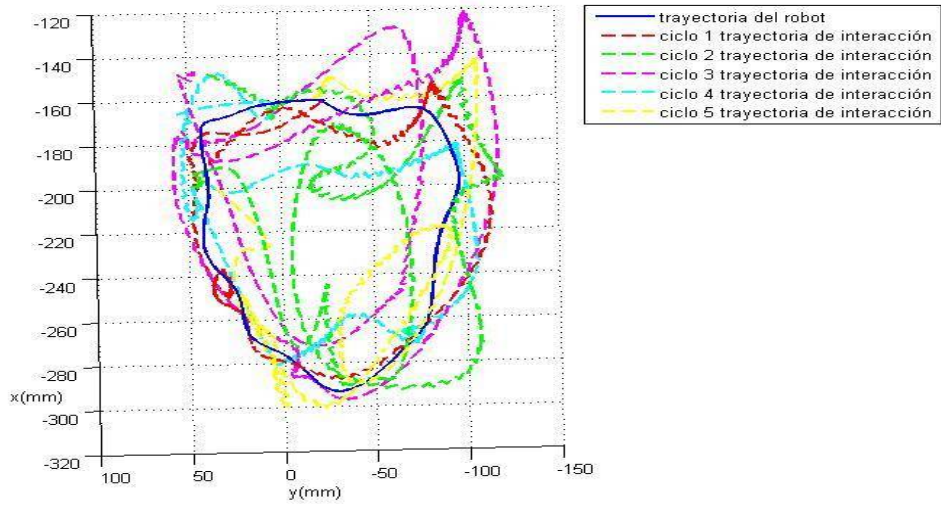


Figura C.0.146. Seguimiento de trayectoria experimento 2. M_T2_230615_D_Tr.

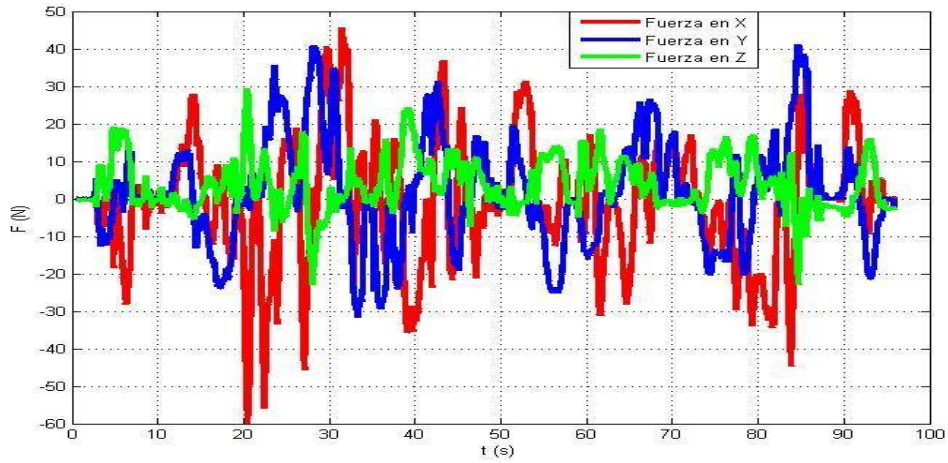


Figura C.0.147. Componentes de fuerza experimento 2. M_T2_230615_D_F.

Variables estadísticas

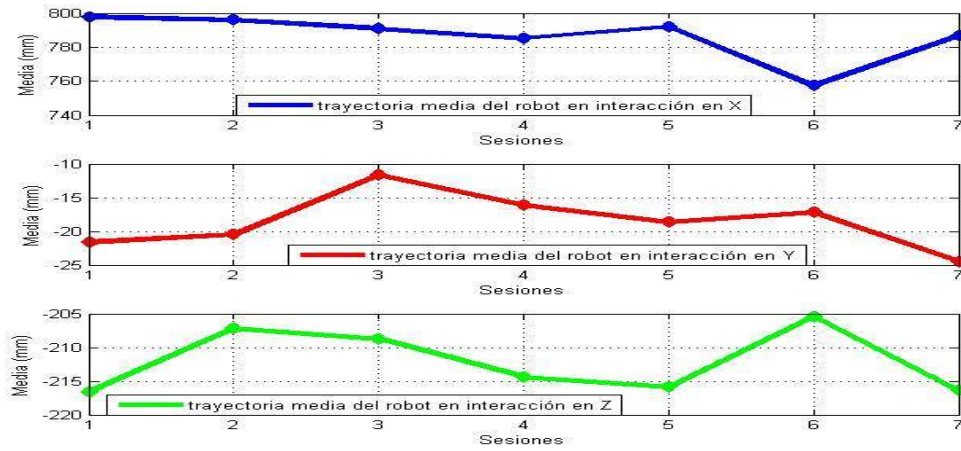


Figura C.0.148. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media M_T2.

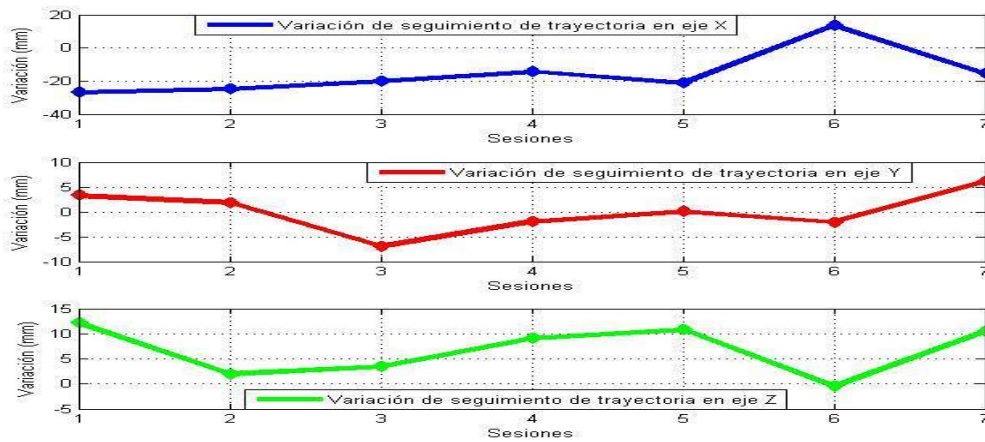


Figura C.0.149. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error M_T2.

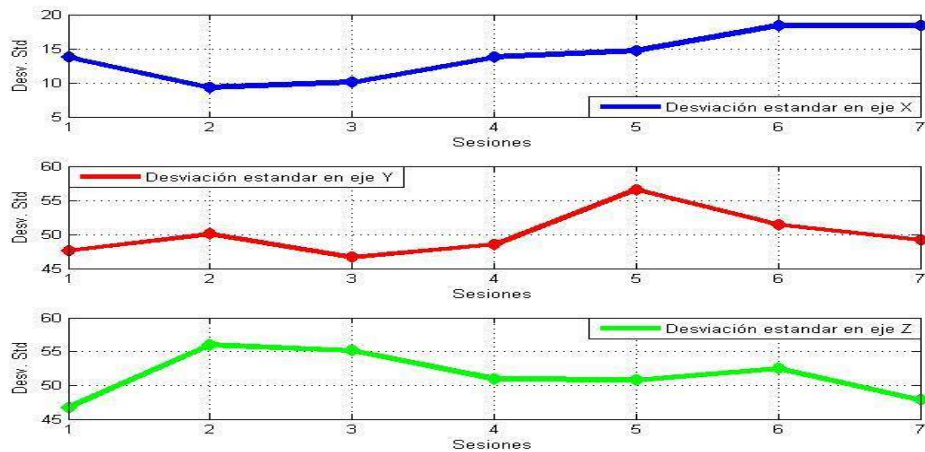


Figura C.0.150. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std M_T2.

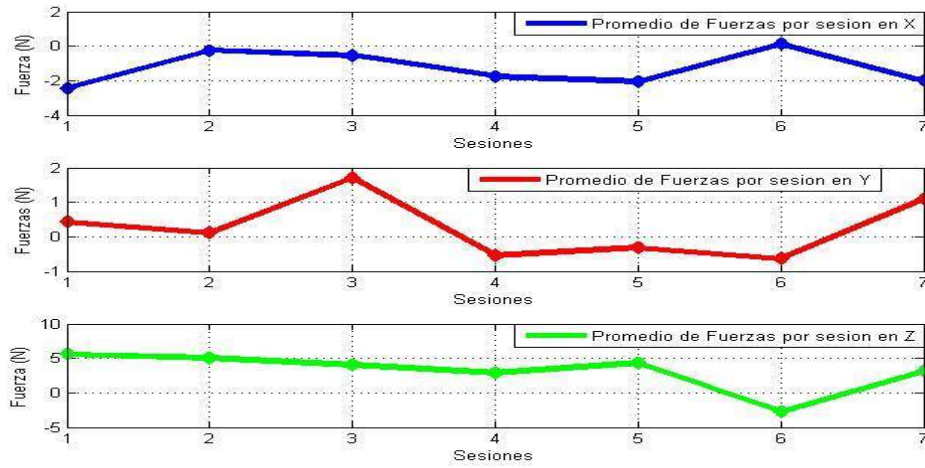


Figura C.0.151. Promedios de Componentes de fuerza. Media M_T2.

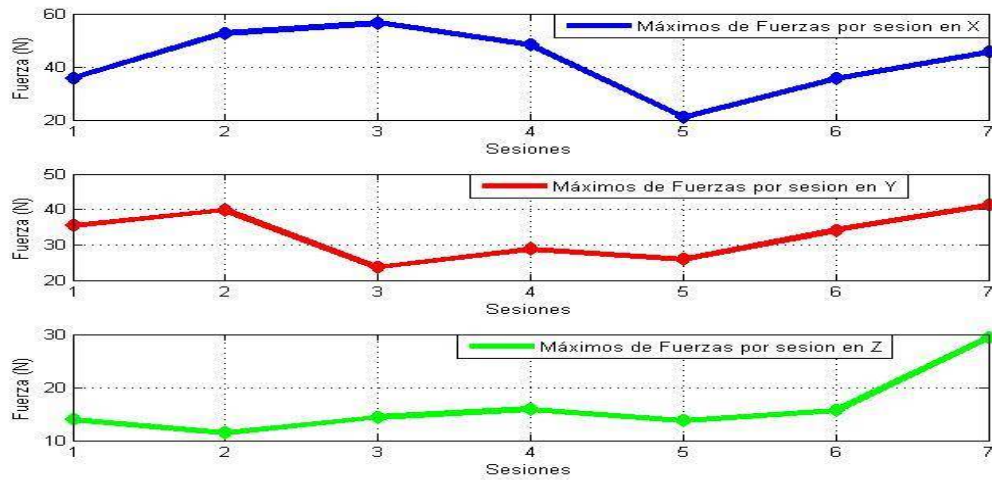


Figura C.0.152. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza1 M_T2.

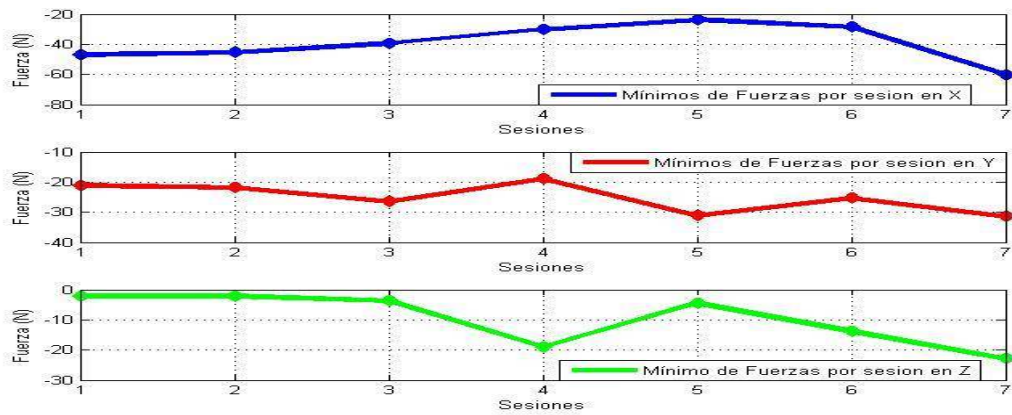


Figura C.0.153. Mínimos. Componentes de fuerza. Mínimosfza M_T2.

Experimento 3

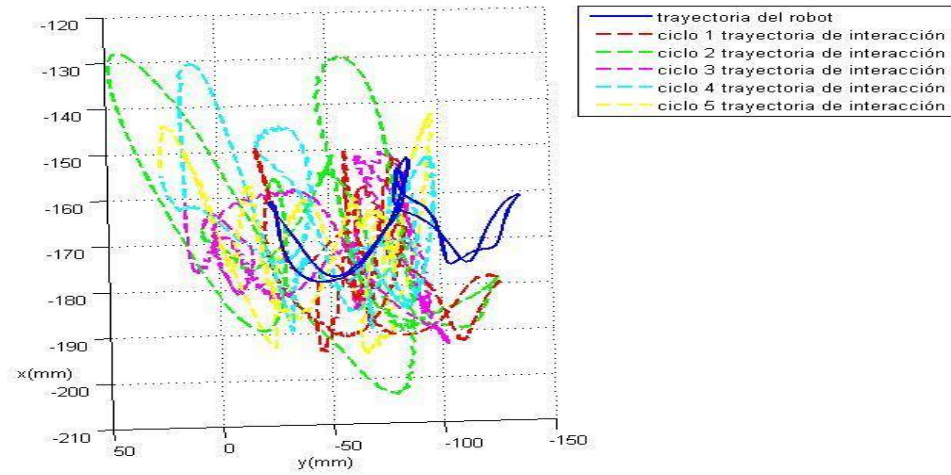


Figura C.0.154. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_140415_D_Tr

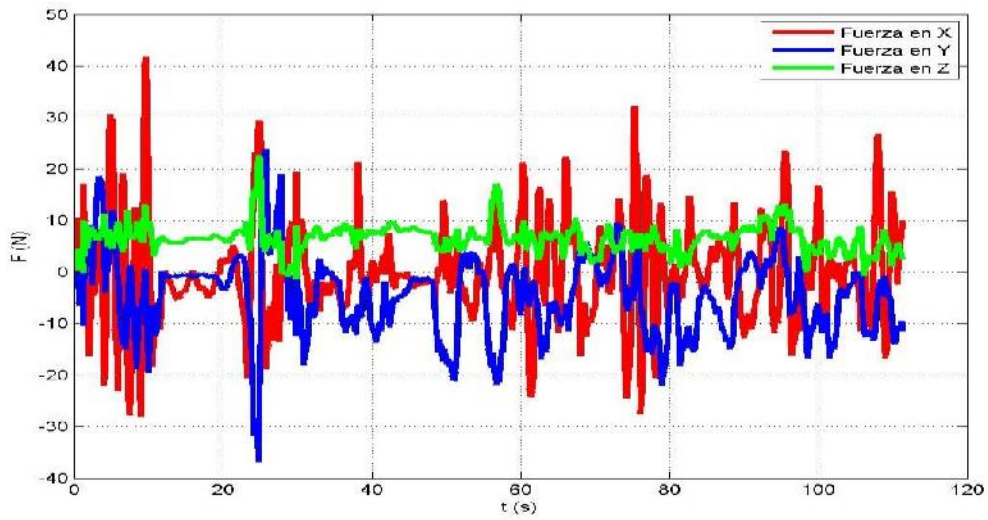


Figura C.0.155. Componentes de fuerza experimento 3. Marcelo_T3_140415_D_F.

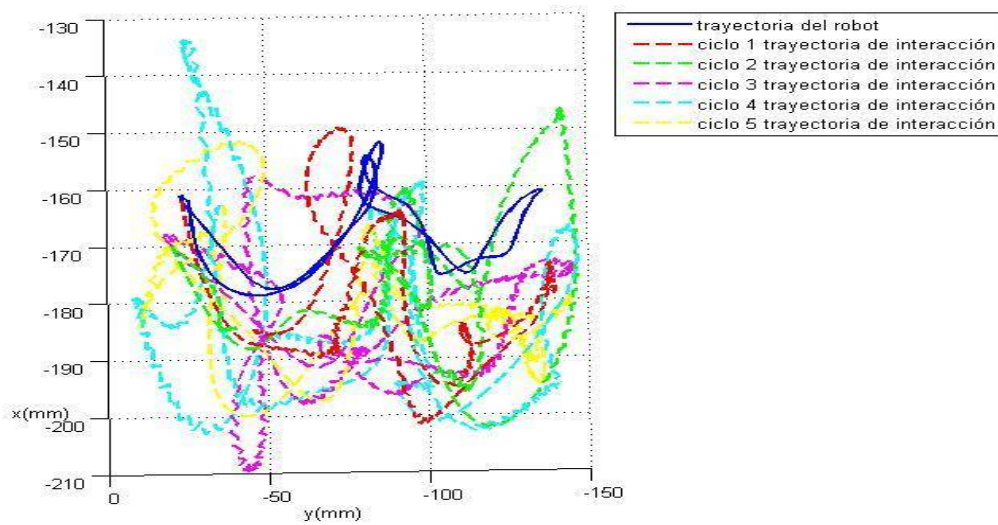


Figura C.0.156. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_190515_D_Tr.

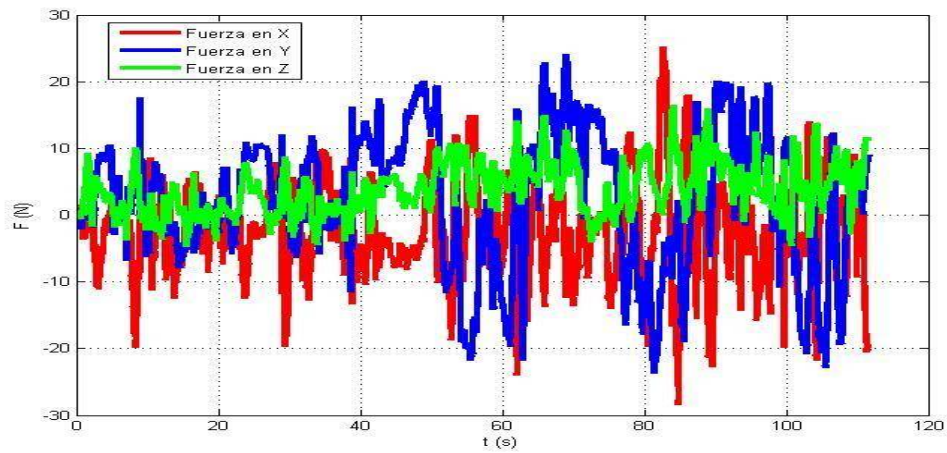


Figura C.0.157. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_190515_D_F.

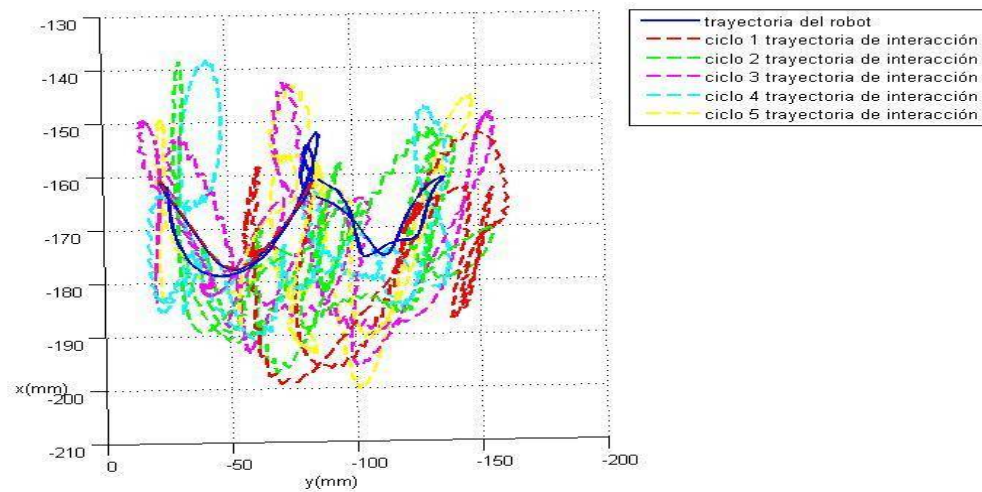


Figura C.0.158. Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_160615_D_Tr

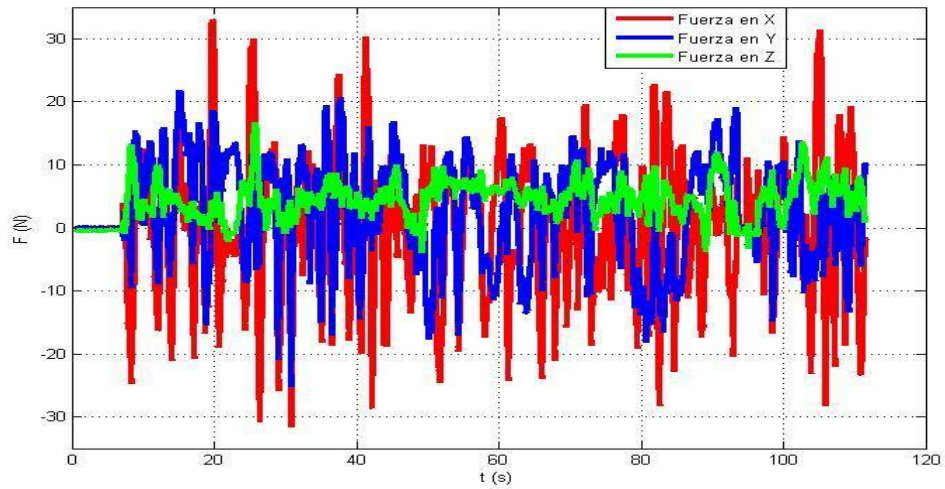


Figura C.0.159. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_160615_D_F.

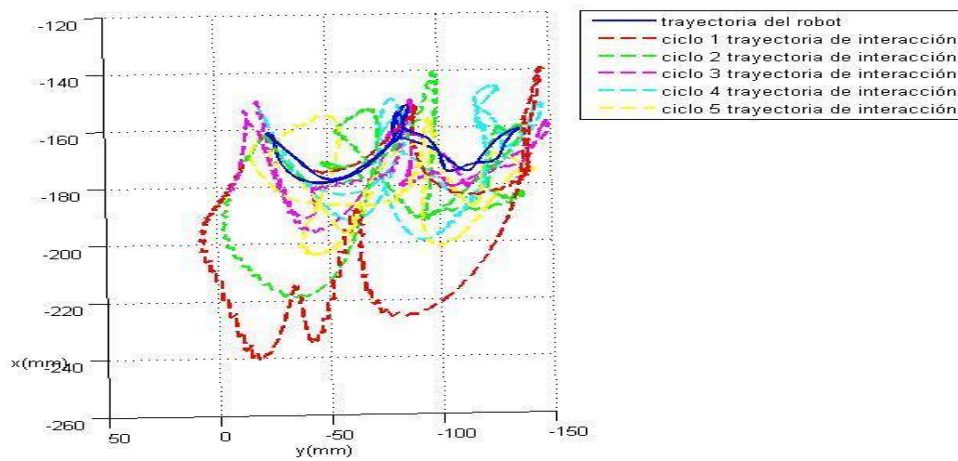


Figura C.0.160. . Seguimiento de trayectoria experimento 3. M_T3_230615_D_F.

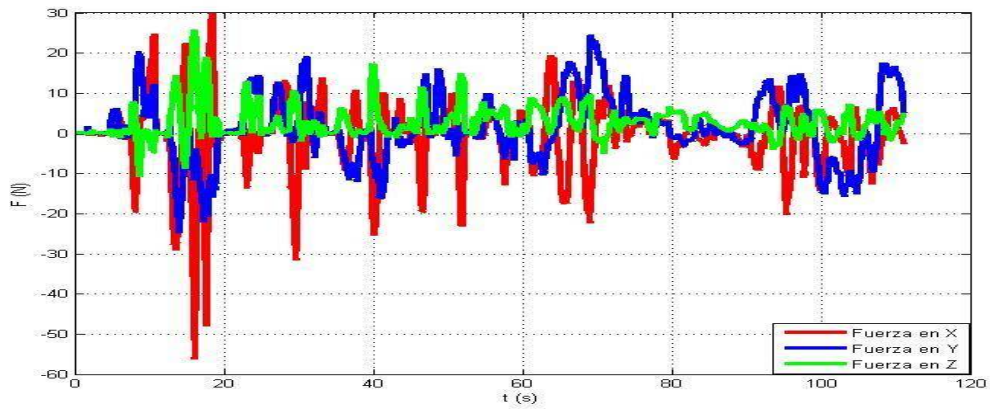


Figura C.0.161. Componentes de fuerza experimento 3. M_T3_230615_D_F.

Variables estadísticas

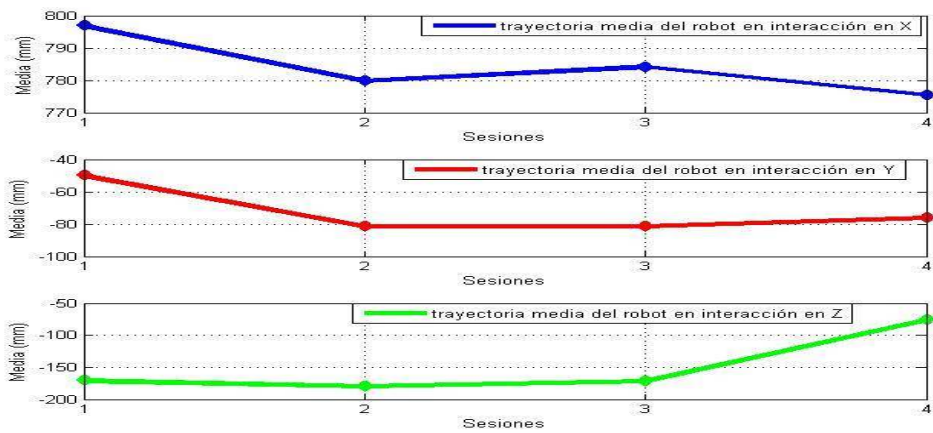


Figura C.0.162. Media de la trayectoria de interacción por sesión. Media M_T3.

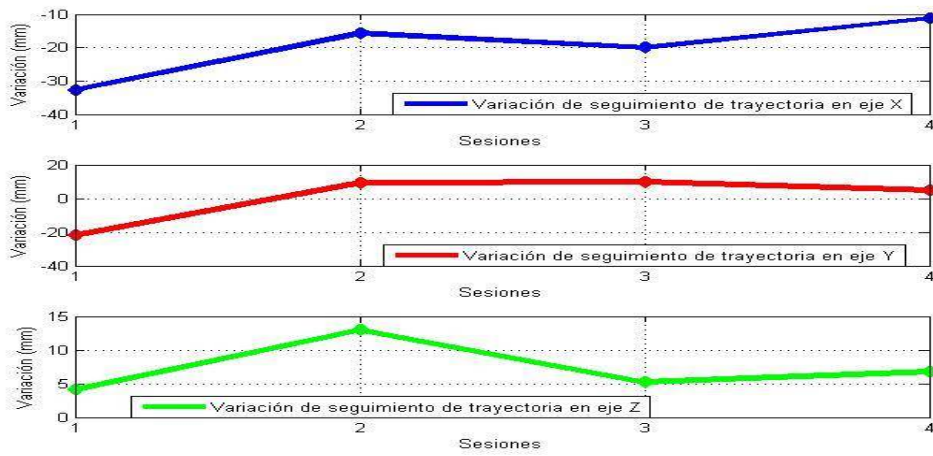


Figura C.0.163. Variación en el seguimiento de trayectoria en interacción. Seguimiento Tray. error M_T3.

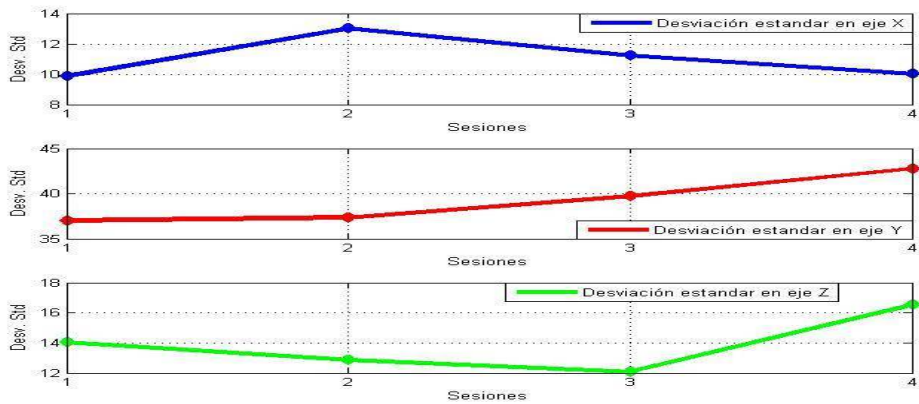


Figura C.0.164. Desviación estándar del seguimiento de trayectoria en los tres ejes. Desv std M_C3.

Gráficas Generales de fuerza

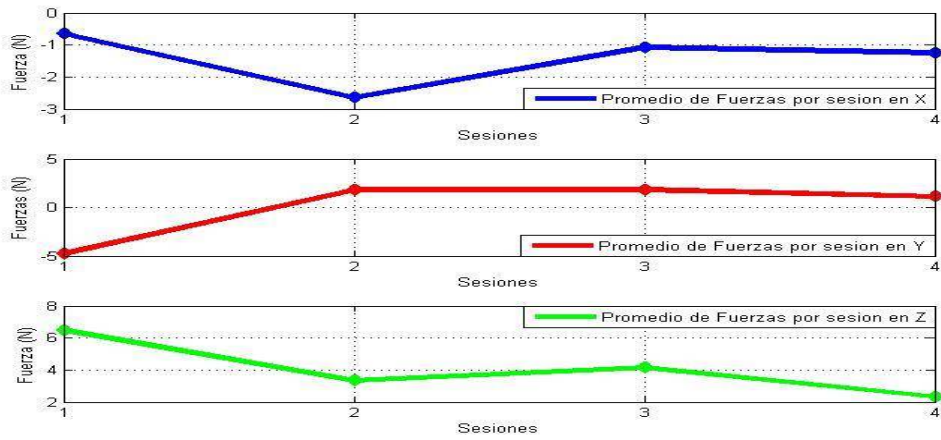


Figura C.0.165. Promedios de Componentes de fuerza. Promediofza1 M_T3.

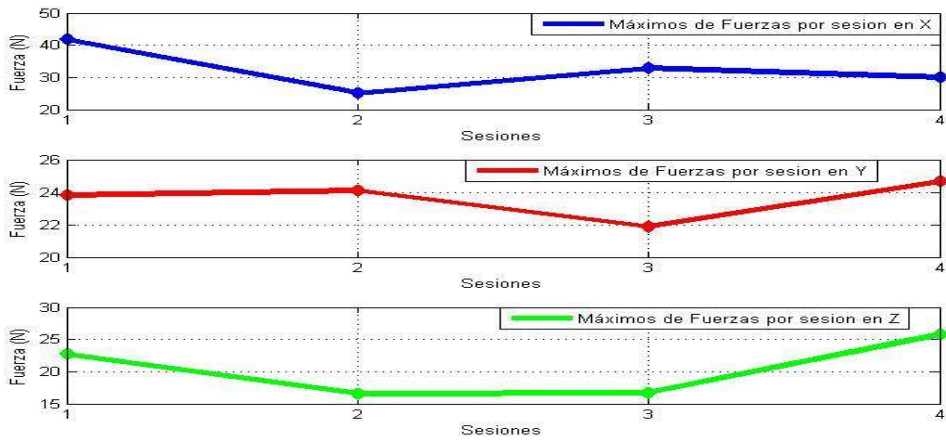


Figura C.0.166. Máximos. Componentes de fuerza. Máximosfza M_T3.

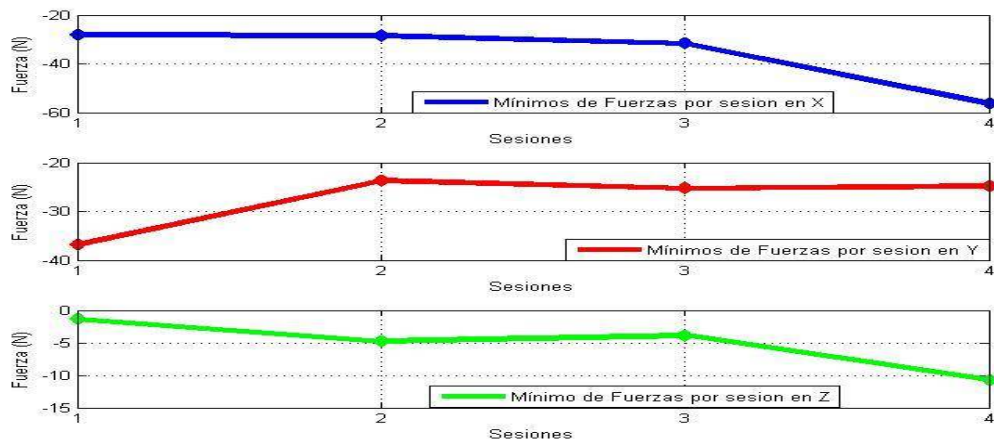


Figura C.167. . Mínimos. Componentes de fuerza. Mínimosfza1 M_T3.

Bibliografía

- [1] Martínez I., Reyes K., Martínez Y., Bernal G., «Diagnóstico prenatal de Artrogriposis múltiple congénita.» Revista cubana de pediatría., vol. 85, nº 1, pp. 137-144, 2013.
- [2] Ruiz F., Pachajoa H., Saldarriaga W., Isaza C., «Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología.» Artrogriposis Múltiple Congénita en gemelo monocoriónico biamniótico. Reporte de caso y revisión de la literatura., vol. 60, nº 1, pp. 79-82, 2009.
- [3] «Infogen.» [En línea]. Available: <http://infogen.org.mx/artrogriposis-articulaciones-fijas/>. [Último acceso: Abril 2015].
- [4] Mellado M., «Universidad Politécnica de Valencia (UPV),» [En línea]. Available: https://poliformat.upv.es/access/content/group/OCW_7166_2008/0%20Presentaci%C3%B3n%20asignatura%20rob%C3%B3tica.pdf.. [Último acceso: Febrero 2015].
- [5] Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M., Robot Modeling and Control, México: John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Sánchez F.M, Millán F., Salvador J., Palou J., Rodríguez F., Esquena S., Villavicencio H., «Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I),» Actas Urológicas Españolas, vol. 31, nº 2, pp. 69-76, 2007.
- [7] «Universidad de Guadalajara.Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías.,» [En línea]. Available: <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r64/r64.htm>.. [Último acceso: marzo 2015].
- [8] Craig J.J., Robótica, México: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [9] Jardón A., «Assistive robot design methodology. Application to portable service robots.,» [En línea]. Available: http://roboticslab.uc3m.es/publications/Tesis_Alberto_Jardon.pdf. [Último acceso:

marzo 2015].

- [10] «C.I.P ETI Tudela,» [En línea]. Available: <http://www.etitudela.com/profesores/rpm/rpm/downloads/robotica.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2014].
- [11] González J., Galindo C., Fernández J.A., Blanco J.L., Muñoz, Arévalo V., «La silla robótica SENA. Un enfoque basado en la interacción hombre-máquina.,» RIAI, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial., vol. 5, 2008.
- [12] Valenzuela R., « “La Robótica al servicio de la salud” .,» Revista de Sociedad española de informática de la salud., vol. 77, 2009.
- [13] Barea R. , «Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España.,» [En línea]. Available: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/5/RoboticaMedica.pdf>. [Último acceso: marzo 2015].
- [14] Ávila L. I. Sistema de apoyo para rehabilitación usando un robot industrial, «Sistema de apoyo para rehabilitación usando un robot industrial.,» UASLP San Luis Potosí, 2012.
- [15] Bonilla I., «Control de interacción de robots manipuladores en tareas industriales y de rehabilitación,» Tesis de Doctorado, UASLP San Luis Potosí. , 2011.
- [16] Martínez U., «Desarrollo de un sistema para rehabilitación de muñeca,» Tesis de Maestría, UASLP San Luis Potosí, 2015.
- [17] «Medular Digital,» [En línea]. Available: <http://www.medulardigital.com/?act=dnews&s=24&n=246013>. [Último acceso: Abril 2015].
- [18] Toth A., Fazekas G., Arz G., Jurak M., Horvath M., «Passive Robotic Movement Therapy of the Spastic Hemiparetic Arm with REHAROB: Report of the First Clinical Test and the Follw-up System Improvement,» de Proceedins of the 2005 IEEE 9th Internacional Conferen, Chicago IL, USA, 2005.
- [19] Ruíz A. F., «Sistema Robótico Multimodal para Análisis y Estudios en Biomecánica, Movimiento Humano y Control Neuromotor.,» Tesis de Doctorado, U. Carlos III Madrid, 2008.

- [20] E. Pró, "Anatomía Clínica", Médica Panamericana, 2012.
- [21] «PATIENT EDUCATION: Amb. Care Arthrogyrosis. Texas Scottish Rite Hospital for children.,» [En línea]. Available: <http://www.tsrhc.org/downloads/PDF/Amb-033a.pdf>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [22] García J.O., « Artrogriposis múltiple congénita. Ortopedia Pediátrica». Universidad Autónoma de Nuevo León.,» [En línea]. Available: <http://www.medicina.uanl.mx/traumatologia/wp-content/uploads/2014/10/ArtrogriposisMultipleCongenita.pdf> . [Último acceso: Febrero 2015].
- [23] De las Heras CG. (2010) , «Promoción de la Participación Ocupacional: Rol del Terapeuta Ocupacional.,» IJOT, 2011.
- [24] Callejo J. , «Protocolo de intervención desde la terapia ocupacional en los cad del instituto de adicciones.,» Documento técnico Instituto de Adicciones de la Ciudad de Madrid. Edición digital., Madrid, 2013.
- [25] Krebs H.I., Volpe B.T., Ferraro M., Fasoli S., Palazzolo J., Rohrer B., Edelstein L., Hogan N., « Robot-Aided Neurorehabilitation: From Evidence-Based to Science-Based Rehabilitation,» Top Stroke Rehabil , vol. 8, nº 4, pp. 54-70, 2002.
- [26] Burgar C. G., Lum P, Peggy C.S., Van der Loos M., «Development of robots for rehabilitation therapy: The Palo development of robots for rehabilitation therapy: The Palo Alto Stanford experience.,» Journal of rehabilitation research and development, vol. 37, nº 6, pp. 663-673, 2000.
- [27] Lum P., Reinkensmeyer D., Mahoney R., Rymer W.Z., Burgar C. , «Robotic devices for movement therapy after stroke: Current status and challenges to clinical acceptance.,» Topics in stroke rehabilitation, vol. 8, nº 4, p. 40–53, 2002.
- [28] Reinkensmeyer D., Hogan N., Krebs H., Lehman S.L., Lum P., Rehabilitators, robots and guides: new tools for neurological rehabilitation". In: Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement., New York: Springer-Verlag , 2000, pp. 516-534.
- [29] Riener R., Lunenburger L., Colombo G. , «Human-centered robotics applied to gait training and assessment.,» Journal of rehabilitation research and development, vol. 43, nº 5, pp. 679-694, 2006.

- [30] Schaechter J. D., «Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke.,» ELSEVIER Progress in Neurobiology, vol. 73, nº 1, pp. 61-72, 2004.
- [31] Teasell R., Bayona N. A., Bitensky J. , «Topics in Stroke Rehabilitation,» Plasticity and reorganization of the brain post stroke, vol. 12, nº 3, pp. 11-26, 2005.
- [32] Scordia M., Formica D., Tagliamonta N. L., Campolo D., Guglielmelli E. , «Effects on Human Motor Strategies of Physical Interaction with a Force-controlled Wrist Rehabilitation Robot.,» de Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, The University of Tokyo, Japan., Tokyo, 2010.
- [33] «BUAP,» [En línea]. Available: http://www.buap.mx/portal_pprd/wb/comunic/crean_en_la_buap_robot_capaz_de_practicar_1606. . [Último acceso: Julio 2014].
- [34] Coote S., Stokes E.K., «Effect of robot-mediated therapy on upper extremity dysfunction post-stroke—a single case study,» Chartered Society of Physiotherapy, vol. 91, pp. 250-256, 2005.
- [35] Toth A., Emolaev E. ., «Robots para los pacientes,» Revista ABB, vol. 3, 2006.
- [36] Lum P. S., Burgar C. G., Van der Loos M., Shor P. C. , «The MIME robotic system for upper-limb neuro-rehabilitation: results from a clinical trial in subacute stroke.,» de Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics , Chicago, IL, USA, 2005.
- [37] Soubervielle R., «Sistema para el el guiado activo de robots industriales,» Tesis de Maestría, UASLP San Luis Potosí, 2013.
- [38] Siciliano B. y Khatib O. , Springer handbook of robotics, Springer, 2008.
- [39] Hogan N. , «Impedance control - An approach to manipulation. I - Theory. II - Implementation. III – Applications.,» ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control., vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [40] Lawrence D.A. , «Impedance control stability properties in common implementations. In Robotics and Automation.,» de Proceedings.,1988 IEEE International Conference, Philadelphia, 1988.
- [41] Bonilla I., Gonzalez E. J., Chávez C., Mendoza M., Loredó A., Reyes F., Biao Z.,

«A vision-based, impedance control strategy for industrial robot manipulators,» de Automation Science and Engineering (CASE), 2010 IEEE Conference on., Toronto, 2010.

- [42] Rohen J.W., Yokochi C., Drecoll E.L., Atlas de anatomía humana, Madrid, España: Elsevier España, 2003.