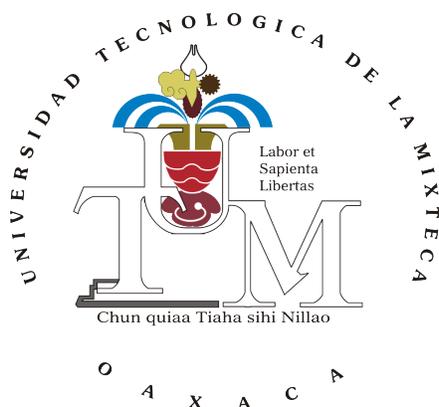


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA



“ DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GUANTE HÁPTICO CON RETROALIMENTACIÓN DE FUERZA ”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

ALDO ARAGÓN MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MANUEL ARIAS MONTIEL

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, JUNIO DE 2016

Tesis presentada en Junio de
2016 ante los sinodales:

Dr. Fermín Hugo Ramírez Leyva
Dr. José Aníbal Arias Aguilar
Dr. Carlos García Rodríguez

Director de tesis:

Dr. Manuel Arias Montiel

Dedico la presente como agradecimiento al apoyo brindado durante estos años de estudio y como reconocimiento de gratitud por haber finalizado la carrera.

A mi madre:

Silvestra Martínez López

A mi padre:

Andrés Aragón García

A mi hermana:

Thalia Andrea Aragón Martínez

Agradecimientos

Mi trayectoria en la universidad y este trabajo de tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron distintas personas, opinando, enseñándome, teniéndome paciencia, dándome ánimo, y acompañándome en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Por todo esto y mucho más, agradezco a las siguientes personas.

A mis padres Andrés y Silvestra por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi hermana por ser una parte importante de mi vida, por ser mi confidente, por todas las películas que vimos juntos, por las aventuras que hemos tenido a lo largo de nuestras vidas y por animarme en aquellos momentos tristes de mi vida.

A Aldahir por ser un gran amigo, por acompañarme durante nuestra estancia en la universidad, por el apoyo y la motivación brindado en los concursos de programación, por aceptar realizar proyectos complicados y por los gratos momentos que pasamos viendo anime.

A Jocelyn por ser una parte importante en mi vida, gracias por tu apoyo durante el último año de mi carrera y por el apoyo que me brindaste durante la realización de la tesis.

A mis amigos y compañeros de la carrera por los momentos compartidos durante la estancia en la universidad.

A mis amigos de bachillerato por la amistad que me han brindado desde que nos conocemos, por haber compartido buenos momentos juntos, y por seguir siendo mis amigos aún después de terminar nuestros estudios juntos.

Al profesor Manuel Arias Montiel por su apoyo en la dirección y realización de esta tesis, por tener una mente abierta y permitir el adentrarse en la investigación de la háptica, y por la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

A mis sinodales por tomarse el tiempo para revisar mi proyecto de tesis, por los comentarios y observaciones realizados con el fin de mejorar esta tesis, y por la aprobación de la misma.

A mis profesores por transmitirme sus conocimientos y enseñarme nuevas cosas durante mi estancia en la universidad.

Al profesor Enrique Guzmán Ramírez por su esfuerzo en enseñarnos, por incentivarlos con las prácticas de laboratorio realizadas, y por la oportunidad de trabajar con la realización de un videojuego como proyecto final.

A las profesoras Silvia Reyes Mora y Alma Lidia Piceno Rivera por sus interesantes y entretenidas clases de matemáticas.

A la profesora Celia Bertha Reyes Espinoza por su apoyo y por sus clases de programación, las cuales comenzaron mi gusto por la programación.

Al profesor Moisés Emmanuel Ramírez Guzmán por todo su apoyo brindado durante mi estancia en la universidad, por su apoyo en los concursos de programación, y por la confianza brindada.

A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.

Índice

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Índice general	xi
Índice de figuras	xvii
Índice de tablas	xix
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Interfaces hápticas	2
1.1.2. Exoesqueletos	6
1.1.3. Guantes hápticos con retroalimentación de fuerza	6
1.2. Planteamiento del problema	9
1.3. Justificación	10
1.4. Objetivos	11
1.4.1. Objetivo general	11
1.4.2. Objetivos específicos	11
1.5. Metodología de desarrollo	12
1.6. Estructura de la tesis	13
2. Marco teórico	15
2.1. Háptica y sistemas hápticos	15
2.1.1. Sistemas hápticos	17
2.1.2. Estructura del sistema háptico	18
2.1.3. Sistema de control	21
2.2. Mecanismos	21
2.2.1. Grado de libertad (GDL)	23
2.2.2. Clasificación de mecanismos	24
2.2.3. Mecanismos de centro remoto	24
2.3. Biomecánica de la mano	25

2.4.	Legó Mindstorms NXT®	28
2.5.	Adquisición de señales	30
2.5.1.	Acondicionamiento de señales	32
2.5.2.	Convertidor Analógico Digital (ADC)	32
2.5.3.	Bus de la PC	33
2.6.	Herramientas computacionales	33
2.7.	Impresión 3D	33
3.	Desarrollo del exoesqueleto	37
3.1.	Diseño mecánico	38
3.1.1.	Dedo mecánico	43
3.1.2.	Actuación	47
3.1.3.	Base del exoesqueleto	52
3.2.	Manufactura del exoesqueleto	55
3.2.1.	Preparación de la cama de impresión	56
3.2.2.	Preparación del archivo digital	56
3.2.3.	Impresión de la pieza	56
3.2.4.	Proceso posterior a la impresión 3D	58
3.3.	Ensamble del exoesqueleto	59
4.	Instrumentación del guante háptico	63
4.1.	Sensores de fuerza y posición	63
4.2.	Controlador de motores	66
4.3.	Adquisición y procesamiento de señales	66
4.4.	Tarjeta de conexiones	77
5.	Teleoperación del robot móvil	81
5.1.	Robot móvil	81
5.2.	Guante háptico	85
5.2.1.	Modo seguidor	86
5.2.2.	Modo de retroalimentación de fuerza	94
5.3.	Resultados	97
5.3.1.	Prueba de avance	97
5.3.2.	Prueba de giro	99
5.3.3.	Prueba de retroalimentación de fuerza	99
6.	Conclusiones y trabajos a futuro	105
6.1.	Conclusiones	105
6.2.	Trabajos a futuro	107
A.	Dibujos técnicos	109
B.	Programas para el cálculo del par de torsión	141

C. Propiedades de las piezas impresas en 3D	147
D. Herramientas para la adquisición de datos	163
D.1. Especificaciones de tarjeta	163
D.2. Especificaciones de la computadora	164
E. Instalación del complemento del kit <i>LEGO Mindstorms NXT</i>[®] para <i>Simulink</i>[®]	167
E.1. Configuración de la comunicación <i>bluetooth</i> entre el ladrillo NXT y la computadora	174
F. Subsistemas del modelo en <i>Simulink</i>[®] del robot móvil	177
Referencias	181

Índice de figuras

1.1.	<i>Algunas interfaces hápticas disponibles comercialmente</i> [27, 29, 62].	2
1.2.	<i>Algunos simuladores médicos disponibles comercialmente</i> [82].	3
1.3.	<i>Interacción del sistema HapCath</i> [96].	4
1.4.	<i>Manipulación visuo-háptica mediante la propuesta “Virtual Mitten”</i> [1].	5
1.5.	<i>Dispositivos Gravity Grabber y LinkTouch, respectivamente</i> [57, 91].	5
1.6.	<i>Guantes hápticos: CyberGrasp y Dexmo, respectivamente</i> [17, 19].	7
1.7.	<i>Sistema de telerehabilitación maestro-esclavo desarrollado por Cortesse et al. [14] - (a) Unidad maestra. (b) Unidad esclava: (1) exoesqueleto para la mano y (2) objeto sensorizado.</i>	8
1.8.	<i>Unidad esclava del sistema de rehabilitación diseñado por Cortesse et al. - (a) Exoesqueleto para la mano. (1) Módulo para el índice. (2) Módulo para el pulgar. (3) Módulo para la palma. (4) Módulo para el antebrazo. (b) Sistema de actuación y transmisión. (1) Motor DC con engranes. (2) Tornillos sin fin. (3) Deslizadores. (4) Encoder magnético incremental. (5) Sensor de fuerza de tensión del cable. (6) Cables enfundados.</i> [14].	9
1.9.	<i>Exoesqueleto RML - Glove</i> [99].	10
2.1.	<i>Taxonomía de las interacciones hápticas</i> [33].	16
2.2.	<i>Taxonomía de las percepciones hápticas</i> [33].	17
2.3.	<i>Diagrama a bloques de un sistema háptico con impedancia controlada en lazo abierto</i> [52].	19
2.4.	<i>Diagrama a bloques de un sistema con impedancia controlada en lazo cerrado con retroalimentación de fuerza</i> [52].	19
2.5.	<i>Diagrama a bloques de un sistema háptico con admitancia controlada en lazo abierto</i> [52].	20
2.6.	<i>Diagrama a bloques de un sistema háptico con admitancia controlada en lazo cerrado con lazo de retroalimentación de fuerza como control</i> [52].	20
2.7.	<i>Diagrama a bloques de un controlador PID</i> [64].	21
2.8.	<i>Juntas cinemáticas</i> [51].	22
2.9.	<i>Estructuras cinemáticas básicas</i> [51].	25
2.10.	<i>Huesos y articulaciones del pulgar</i> [9].	26
2.11.	<i>Modelo cinemático con cinco grados de libertad rotacionales</i> [9].	27
2.12.	<i>Huesos y articulaciones del dedo índice</i> [53].	27

2.13.	<i>Espacio de trabajo de los dedos</i> [3].	28
2.14.	<i>Ladrillo NXT</i> [63].	29
2.15.	<i>Sensores incluidos en el kit Lego Mindstorms NXT[®]</i> [12].	29
2.16.	<i>Estructura del motor NXT</i> [41].	30
2.17.	<i>Bloques del kit Lego Mindstorms NXT[®] en Simulink[®]</i> [55].	31
2.18.	<i>Partes de un sistema DAQ</i> [45].	32
2.19.	<i>Impresión 3D de Modelado por Deposición Fundida (FDM)</i> [15].	34
3.1.	<i>(a) RML-Glove</i> [98]. <i>(b) Exoesqueleto con mecanismos de centro remoto</i> [23].	38
3.2.	<i>(a) Mecanismo de cuatro barras en cada articulación en conjunto con las falanges de los dedos</i> [10]. <i>(b) ExoHand creada por Festo</i> [25].	39
3.3.	<i>(a) Acoplamiento de falanges mediante una junta de revoluta. (b) Acoplamiento de falanges mediante un mecanismo de cuatro barras como junta.</i> [23].	42
3.4.	<i>Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo.</i>	43
3.5.	<i>Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo índice.</i>	44
3.6.	<i>Modelo 3D de la falange proximal mecánica del dedo índice.</i>	44
3.7.	<i>Modelo 3D de la falange distal mecánica del dedo índice.</i>	45
3.8.	<i>Modelo 3D de un eslabón corto del dedo índice.</i>	45
3.9.	<i>Modelo 3D de los la falange proximal mecánica, en vista de sección, con sus eslabones.</i>	46
3.10.	<i>Modelo 3D de la falange media mecánica, en vista de sección, con sus eslabones.</i>	46
3.11.	<i>Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo medio.</i>	47
3.12.	<i>Diagrama de fuerzas del mecanismo para el exoesqueleto.</i>	48
3.13.	<i>Base del exoesqueleto del dedo índice.</i>	53
3.14.	<i>Eslabón corto para la transmisión del par de torsión del motor al exoesqueleto.</i>	53
3.15.	<i>Montaje para fijación de motor.</i>	53
3.16.	<i>Base del dorso para la colocación de los componentes del sistema.</i>	54
3.17.	<i>Hebillas para el ajuste de las correas de sujeción de la base del dorso.</i>	54
3.18.	<i>Impresora 3D modelo Prusa i3.</i>	55
3.19.	<i>Programa Slic3r.</i>	57
3.20.	<i>Propiedades de impresión.</i>	57
3.21.	<i>Temperaturas de precalentado para los materiales de impresión 3D en la impresora Prusa i3.</i>	58
3.22.	<i>Impresora 3D imprimiendo.</i>	58
3.23.	<i>Pieza impresa en 3D con material de soporte.</i>	59
3.24.	<i>Piezas impresas en 3D para el exoesqueleto del dedo índice.</i>	59
3.25.	<i>Tornillos M2x0.40 y banda síncrona con paso de 2mm.</i>	60
3.26.	<i>Colocación de bandas síncronas en los eslabones.</i>	60
3.27.	<i>Exoesqueleto para el dedo índice ensamblado.</i>	61
3.28.	<i>Subsistema mecánico completamente ensamblado.</i>	62
4.1.	<i>Circuito de acondicionamiento de señal del sensor FSR</i> [87].	63

4.2. Voltaje vs Fuerza, sensor FSR[87].	64
4.3. Potenciómetro conectado como divisor de voltaje.	64
4.4. Encoder magnético y discos de imanes[72].	65
4.5. Canales A y B del encoder magnético[72].	65
4.6. Controlador dual para motores de corriente directa[71].	66
4.7. Ventana de selección de controlador.	69
4.8. Librería de Real-Time Windows Target en Simulink.	70
4.9. Programa para adquirir datos del exoesqueleto para un dedo.	70
4.10. Configuración de entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos en Simulink.	72
4.11. Configuración del bloque PWM Generator.	72
4.12. Configuración de la salida digital de la tarjeta de adquisición de datos en Simulink.	73
4.13. Selección de la librería de Real-Time Windows Target.	74
4.14. Acceso al panel de control para la simulación en modo externo.	75
4.15. Ventana de panel de control para la simulación en modo externo.	76
4.16. Modificación de cantidad de muestras para las señales externas.	77
4.17. Construcción de código para la ejecución del programa en Simulink.	78
4.18. Circuito de la tarjeta de conexiones.	79
4.19. Tarjeta de conexiones para el guante háptico.	79
5.1. Robot móvil.	82
5.2. Preparación de modelo para trabajar con ladrillo NXT.	82
5.3. Ventana de configuración de parámetros para la selección del hardware.	82
5.4. Selección modo external.	83
5.5. Selección modo external.	83
5.6. Configuración del modelo para trabajar con la comunicación bluetooth.	84
5.7. Modelo en Simulink® del robot móvil.	85
5.8. Modelo en Simulink® de un dedo del guante háptico en modo seguidor.	87
5.9. Subsistema controlador modo seguidor.	88
5.10. Subsistema limitador del movimiento.	89
5.11. Bloques para el envío de datos mediante bluetooth.	89
5.12. Instalación y configuración del puerto serie en el bloque Packet Output.	90
5.13. Configuración del bloque Packet Output para la comunicación mediante bluetooth.	91
5.14. Bloques para la recepción de datos mediante bluetooth.	92
5.15. Subsistema de receptor de datos de lego.	92
5.16. Configuración del bloque Packet Input para la recepción de datos.	93
5.17. Subsistema generador de PWM.	93
5.18. Subsistema conversor voltaje-grads.	94
5.19. Subsistema conversor pulsos a grads.	95
5.20. Subsistema generador de la señal de retroalimentación.	95
5.21. Recepción de datos del robot móvil.	95
5.22. Subsistema controlador modo retroalimentación.	96

5.23. Modelo en Simulink® de un dedo del guante háptico en modo seguidor.	97
5.24. Guante háptico con retroalimentación de fuerzas.	98
5.25. Sistema del guante háptico y robot móvil.	98
5.26. Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de avance del robot móvil.	100
5.27. Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de giro del robot móvil.	101
5.28. Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de retroalimentación de fuerza.	103
5.29. Señales de los sensores de fuerza y distancia obtenida con el sensor ultrasónico.	104
C.1. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Layers and perimeters.	148
C.2. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Infill.	149
C.3. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Skirt and brim.	149
C.4. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Support material.	150
C.5. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Speed parte 1.	150
C.6. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Speed parte 2.	151
C.7. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Multiple Extruders.	151
C.8. Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Advanced.	152
C.9. Orientación de impresión de la falange proximal mecánica.	153
C.10. Orientación de impresión de la falange media mecánica.	154
C.11. Orientación de impresión de la falange distal mecánica.	155
C.12. Orientación de impresión del eslabón corto.	156
C.13. Orientación de impresión del eslabón largo simple.	157
C.14. Orientación de impresión de los eslabones largos conductores y conducidos.	158
C.15. Orientación de impresión de la base del exoesqueleto del dedo.	159
C.16. Orientación de impresión del montaje del motor.	160
C.17. Orientación de impresión de la base del dorso.	161
C.18. Orientación de impresión de las hebillas.	162
D.1. Diagrama a bloques de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024e[47].	164
D.2. Lista de pines de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024e[46].	165
D.3. Características de la computadora utilizada para las pruebas.	166
E.1. Instalación de complemento NXT paso 1.	167
E.2. Instalación de complemento NXT paso 2.	168
E.3. Instalación de complemento NXT paso 3.	168
E.4. Instalación de complemento NXT paso 4.	169
E.5. Instalación de complemento NXT paso 5.	169
E.6. Instalación de complemento NXT paso 6.	170
E.7. Instalación de complemento NXT paso 7.	170
E.8. Instalación de complemento NXT paso 8.	171

E.9. <i>Instalación de complemento NXT paso 9.</i>	171
E.10. <i>Instalación de complemento NXT paso 10.</i>	172
E.11. <i>Instalación de complemento NXT paso 11.</i>	172
E.12. <i>Instalación de complemento NXT paso 12.</i>	173
E.13. <i>Instalación de complemento NXT paso 13.</i>	173
E.14. <i>Instalación de complemento NXT paso 14.</i>	173
E.15. <i>Bloques instalados con el complemento para LEGO mindstorms NXT®.</i>	174
E.16. <i>Puertos COM asociados al módulo de bluetooth.</i>	175
F.1. <i>Subsistema para detectar los comandos y calcular la velocidad y el sentido de giro de los motores del robot móvil.</i>	178
F.2. <i>Subsistema que rige el comportamiento del robot móvil.</i>	178
F.3. <i>Subsistema para controlar los motores del robot móvil.</i>	179
F.4. <i>Controlador tipo P para controlar los motores del robot móvil.</i>	179
F.5. <i>Cálculo de la diferencia de giro de los motores del robot móvil.</i>	180
F.6. <i>Subsistema para la comunicación con el hardware del robot móvil.</i>	180

Índice de Tablas

2.1. Longitud de las falanges de cada dedo (mm) [3].	27
2.2. Rangos de movimiento de las articulaciones de los dedos [3].	28
3.1. Propuestas para el mecanismo del guante háptico.	40
3.2. Evaluación de las propuestas para el diseño mecánico del guante háptico.	41
3.3. Constantes del modelo matemático del par de torsión del guante háptico.	52
4.1. Tabla de pines del controlador dual para motores de corriente directa[71].	67
4.2. Tabla de asignación de pines de la tarjeta PCI-6024e.	71
C.1. Propiedades de impresión para la falange proximal mecánica.	153
C.2. Propiedades de impresión para la falange media mecánica.	154
C.3. Propiedades de impresión para la falange distal mecánica.	155
C.4. Propiedades de impresión para el eslabón corto.	156
C.5. Propiedades de impresión para el eslabón largo simple.	157
C.6. Propiedades de impresión para los eslabones largos conductores y conducidos.	158
C.7. Propiedades de impresión para la base del exoesqueleto del dedo.	159
C.8. Propiedades de impresión para el montaje del motor.	160
C.9. Propiedades de impresión para la base del dorso.	161
C.10. Propiedades de impresión para las hebillas.	162

Capítulo 1

Introducción

Dado el crecimiento de la cantidad y tipos de información que rodea a las personas, a la que se tiene que responder rápidamente, es crucial explorar nuevas maneras de interactuar con la información. Un sistema háptico con sus capacidades táctiles, cinestésicas y motoras, en conjunto con sus procesos cognitivos asociados, presenta un singular canal bidireccional de información a nuestro cerebro. Este canal brinda otra forma de interactuar con la información con lo cual se puede generar un gran número de aplicaciones [88].

Debido a que la háptica abarca muchas disciplinas, se ha generado una amplia variedad de aplicaciones que incluyen muchas áreas de las necesidades humanas, tales como diseño de productos, manufactura, educación, entrenadores médicos, y rehabilitación [88].

Las interfaces hápticas son dispositivos que permiten la medición de la posición y movimiento de nuestro cuerpo mientras que conjuntamente proveen información de retroalimentación en forma de tacto, fuerza o par torsional que es generada en un entorno virtual o remoto [99].

Dichos dispositivos han sido utilizados en múltiples aplicaciones tales como [33]:

- ✓ Telepresencia.- En estos sistemas no existe acoplamiento mecánico directo entre el operador y el entorno manipulado. Por lo cual la transmisión de señales hápticas es posible debido a que la interacción mecánica es convertida a otros tipos de energía que pueden ser transmitidos fácilmente. Los dispositivos son equipados comúnmente con funciones adicionales, principalmente un canal visual unidireccional para desplegar el entorno al operador del sistema de telepresencia.
- ✓ Entornos virtuales.- La segunda área principal de aplicación es la interacción con entornos virtuales, la cual se puede dividir en:
 - Entrenamiento médico: Las interfaces son diseñadas con el fin de proveer entrenamiento médico sin poner en peligro a pacientes reales, de tal manera que se genere una impresión realista de los procedimientos realizados.

- Diseño industrial: Los entornos virtuales son utilizados para simular operaciones de ensamble y evaluaciones subjetivas de prototipos.
- Electrónica de consumo: Se ha usado para la integración de retroalimentación háptica en juegos de video.

Para las aplicaciones de teleoperación y realidad virtual, retroalimentar fuerzas al usuario es de gran importancia debido a que con esto se puede mejorar la interacción entre el usuario y el entorno virtual o remoto.

La mano humana es capaz de obtener información a la vez que puede ejecutar tareas complejas. Esta tiene una variedad de funciones, entre las más importantes se encuentran las funciones sensoriales y motoras [3]. Es por esto que se tiene el interés en realizar dispositivos hápticos para la mano.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Interfaces hápticas

La investigación y la tecnología háptica se han centrado en el diseño y evaluación de prototipos de diferentes características y capacidades para su uso en entornos virtuales. La evidencia de esto es que algunos de estos prototipos se encuentran disponibles comercialmente, algunos de los cuales se muestran en la figura 1.1 [27, 29, 43, 58, 62]. De esta forma se han realizado aplicaciones de esta tecnología en muchos ámbitos, tales como: interfaces gráficas de usuario sofisticadas (GUI), juegos, edición multimedia, descubrimiento y visualización científica, artes y creación, industria automotriz, ingeniería, manufactura, telerobótica y teleoperaciones, educación y entrenamiento, así como simuladores y rehabilitadores médicos [65].



Figura 1.1: *Algunas interfaces hápticas disponibles comercialmente* [27, 29, 62].

Medicina

En el área de la medicina, las interfaces hápticas han sido ampliamente utilizadas en simuladores médicos, principalmente para mejorar las aplicaciones de entrenamiento, por lo cual se han desarrollado dispositivos para cubrir una variedad de diferentes especialidades médicas [11, 50]. Entre las interfaces hápticas que se han realizado se encuentran: simuladores de palpación para detectar la presencia o ausencia de anomalías anatómicas o fisiológicas debajo de la piel de los pacientes [11] y simuladores para realizar diversos tipos de procedimientos médicos (laparoscopias, endoscopias, procedimientos endovasculares, artroscopias, etc.) [11, 22], así como también simuladores de inyección de células microrobóticas [24], entre otros.

Comercialmente existen diversas empresas que desarrollan simuladores médicos con interfaces hápticas, esto con el fin de cubrir una gran variedad de especialidades médicas que requieren de entrenamiento para adquirir las habilidades que el médico necesita, algunas de estas son: Immersion [42], Surgical Science [80], Symbionix [82], Simendo [83], SimSurgery [84] y VirtaMed [93], por mencionar algunas. Algunos simuladores médicos que se encuentran disponibles comercialmente se muestran en la figura 1.2.



Figura 1.2: Algunos simuladores médicos disponibles comercialmente [82].

Las interfaces hápticas también se han utilizado para servir como apoyo en hospitales, tal es el caso del dispositivo “HapCath” [56], el cual es un catéter háptico que sirve como apoyo durante la cateterización vascular. En este dispositivo se mide la fuerza que se ejerce en la punta del catéter y se transmite la señal fuera del paciente con el fin de utilizarla para

controlar los actuadores en una interfaz háptica especial que provee al usuario de una fuerza amplificada y escalada, como se muestra en la figura 1.3. Dichas fuerzas escaladas permiten al usuario sentir la interacción de la punta con las paredes y obstrucciones dentro de las venas, lo que simplifica y acelera la navegación del catéter y reduce el riesgo de dañar las venas.

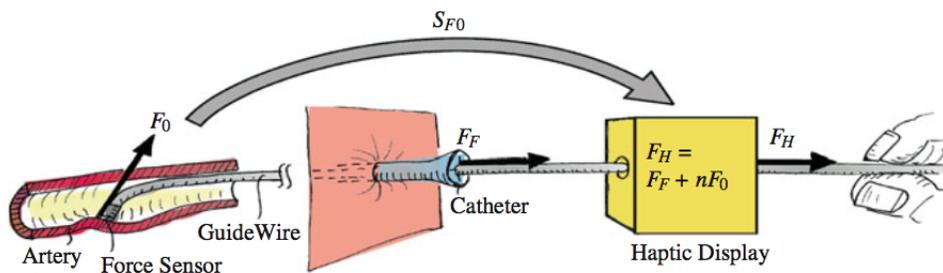


Figura 1.3: *Interacción del sistema HapCath* [96].

De la misma manera en que se desarrolló el sistema HapCath, otros dispositivos han sido desarrollados con el fin de mejorar la precisión de los médicos cuando realizan operaciones con instrumentos muy pequeños, en los cuales se requiere una gran destreza y precisión.

Telepresencia y realidad virtual

La realidad virtual es una tecnología que permite al usuario interactuar con un entorno simulado por computadora, el cual puede ser real o ficticio. Esta se encuentra fuertemente relacionada con la telepresencia la cual permite a los humanos interactuar en la distancia, creando el sentido de estar presente en una posición remota (mediante hardware) o en un entorno virtual. Una completa telepresencia se alcanza cuando el usuario se siente presente en una ubicación remota, sea virtual o real, en todas sus modalidades sensoriales y de actuación [74].

Las interfaces hápticas se diseñan teniendo en cuenta las condiciones que deben cumplir los sistemas a manipular, sean reales o virtuales. Estas interfaces han sido utilizadas con el fin de mejorar la manipulación de dichos sistemas. A continuación se presentan algunos ejemplos.

Con el enfoque de “Virtual Mitten” (figura 1.4), se diseñó un dispositivo para la manipulación de objetos 3D en aplicaciones de realidad virtual, el cual permite la interacción natural con los objetos proveyendo una retroalimentación pasiva a los dedos mediante una manopla con el fin de estimular diferentes percepciones hápticas [1].

Se han desarrollado dispositivos hápticos para las yemas de los dedos, con el fin de simular estímulos que se generan al tomar objetos, tal es el caso del “Gravity Grabber” [57], “LinkTouch” [91] (figura 1.5), y el dispositivo desarrollado por Prattichizzo *et al.*[73]. Estos se basan en la deformación que ocurre en las yemas de los dedos al coger objetos, inicialmente



Figura 1.4: Manipulación visuo-háptica mediante la propuesta “Virtual Mitten” [1].

analizan las deformaciones que se generan y después las reproducen con pequeños dispositivos que se colocan en la punta de los dedos.

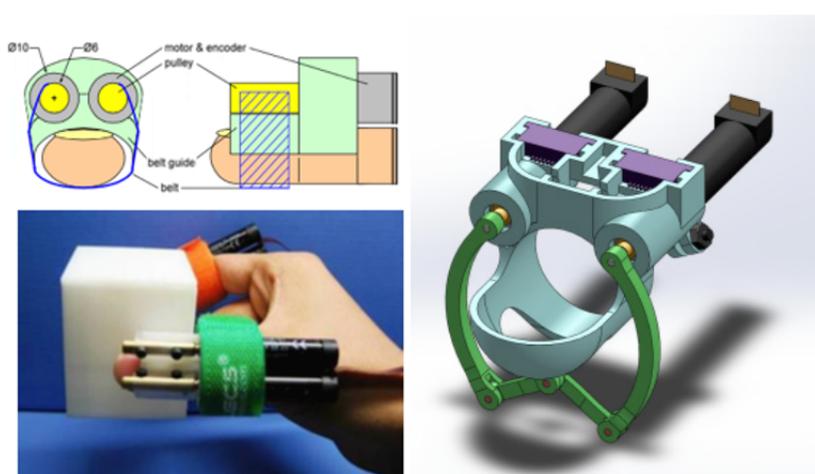


Figura 1.5: Dispositivos Gravity Grabber y LinkTouch, respectivamente [57, 91].

También se han desarrollado en aplicaciones para la industria, como en el diseño del producto [5], la manufactura [59], telerobótica [36, 37, 38, 74, 78] y simuladores de ensambles [81].

Videojuegos

La investigación háptica en el ámbito de los juegos de entretenimiento para el hogar y la informática ha tenido un gran crecimiento. La experiencia de juego comprende de cuatro aspectos: físico, mental, social y emocional. Las tecnologías de retroalimentación de fuerzas mejoran los aspectos físicos de la experiencia de juego, creando una sensación física más profunda durante el juego, mejorando las habilidades físicas de los jugadores e imitando el uso de artefactos físicos. Existe una gran variedad de juegos disponibles en el mercado que aprovechan los efectos hápticos que son ofrecidos por las principales interfaces hápticas. Algunas de estas interfaces son: volantes con retroalimentación de fuerzas, joysticks, mandos de juego y chalecos hápticos [65].

A su vez la investigación de los videojuegos serios se ha incrementado debido a la aplicación que estos pueden tener. Un videojuego serio se refiere a un juego de computadora que es utilizado con un propósito que va más allá del entretenimiento, lo cual incluye: entrenamiento, exploración policiaca, analítica, visualización, simulación, educación, salud y terapia [65].

En el área de la salud se han diseñado interfaces hápticas de videojuegos serios para asistir en el proceso de rehabilitación [7, 40, 86, 95], esto con el fin de hacer que dichas tareas sean menos tediosas para los pacientes. También se ha aplicado la tecnología háptica para mejorar el aprendizaje, de diversos temas, y entrenamiento de habilidades, tales como química [13, 26, 79] y escritura [21, 68], entre otros [2, 18, 39, 90].

1.1.2. Exoesqueletos

En robótica, un exoesqueleto es una estructura mecánica externa antropomórfica que permite la transferencia de energía mecánica de la estructura del exoesqueleto al cuerpo humano. Este es un sistema biomecatrónico, el cual integra componentes mecánicos, eléctricos, ingeniería de software y biología (el operador) [60].

Las interfaces hápticas tienen un papel importante en la manipulación de los exoesqueletos, al mejorar la destreza, precisión o incluso incrementar la fuerza del usuario; esto debido a que se espera que los exoesqueletos ejerzan fuerzas de retroalimentación al usuario. Los exoesqueletos permiten a los usuarios utilizar los movimientos naturales de su cuerpo como señales de control a la vez que estos ejercen fuerzas de retroalimentación sobre el usuario.

Algunos ejemplos del uso de los exoesqueletos se encuentran en el desarrollo de rehabilitadores para distintas partes del cuerpo, como es el caso de la mano [4, 8, 35, 48, 49, 54, 97].

También se han utilizado los exoesqueletos con el fin de generar interfaces hápticas portables o que se adapten mejor a la anatomía humana [3, 20, 74, 94, 99]. Estas se aplican en teleoperación, realidad virtual, videojuegos, entre otros.

1.1.3. Guantes hápticos con retroalimentación de fuerza

Centrándose en interfaces hápticas para la mano y principalmente en retroalimentación cinestésica, integrar exoesqueletos a interfaces hápticas es de gran utilidad para poder transmitir fuerzas de torsión a las articulaciones de la mano. A dichos sistemas se les puede llamar guantes hápticos con retroalimentación de fuerzas.

Comercialmente existen guantes que permiten la medición del movimiento de los dedos y otros que permiten la generación de fuerzas de retroalimentación, uno de ellos es CyberGrasp [17], este es un exoesqueleto que permite ejercer fuerzas a cada uno de los dedos el cual nece-

sita de un guante complementario [16] para realizar las mediciones de posición y movimiento de los dedos, su principal desventaja es que su costo es elevado y que el exoesqueleto no es portable. Dexmo [19] se encuentra en desarrollo, es simple y de bajo costo, es un exoesqueleto que permite medir la posición de los dedos de la mano con once grados de libertad y cuenta con dos versiones. Una de sus versiones permite la retroalimentación de fuerza, pero únicamente lo hace mediante el bloqueo del mecanismo con lo cual solo puede tener la sensación de sostener objetos sólidos pero no suaves. Los guantes mencionados se muestran en la figura 1.6.



Figura 1.6: Guantes hápticos: *CyberGrasp* y *Dexmo*, respectivamente [17, 19].

A nivel mundial se ha investigado el uso de diversos mecanismos para la actuación de las fuerzas de retroalimentación, tales como actuadores neumáticos [6], fluido magnetorreológico [94], y actuación mediante cables [14, 97, 44, 99]. Cada uno con un fin distinto, tales como mayor fuerza máxima de retroalimentación, reducción de peso del mecanismo o tamaño del dispositivo.

Los dispositivos hápticos para la mano pueden ser divididos en dispositivos de retroalimentación de fuerza pasiva o activa. Los pasivos usan frenos, amortiguamiento controlable o embragues electromagnéticos para proveer la fuerza de resistencia. El usuario puede sentir la fuerza de resistencia cuando el actuador pasivo es activado. La ventaja de estos dispositivos es la seguridad, debido a que nunca lastimarán al usuario, incluso si el dispositivo se vuelve incontrolable. Una desventaja es que cuando la mano no se mueve, no es posible proporcionar alguna fuerza de retroalimentación [3].

Por otra parte, los dispositivos activos utilizan por lo general actuadores de fuerza bilaterales como motores o dispositivos neumáticos. Un problema importante es que estos pueden llegar a lastimar al usuario si los dispositivos se vuelven incontrolables, por lo cual se suele utilizar fuerzas máximas de salida por debajo de las críticas para herir al usuario [3].

Recientemente, Cortese *et al.* [14] diseñaron un sistema mecatrónico para un rehabilitador de la mano mediante un robot. El sistema está compuesto de tres módulos principales: la

unidad maestra, la unidad esclava y el objeto sensorizado, como se muestra en la figura 1.7.

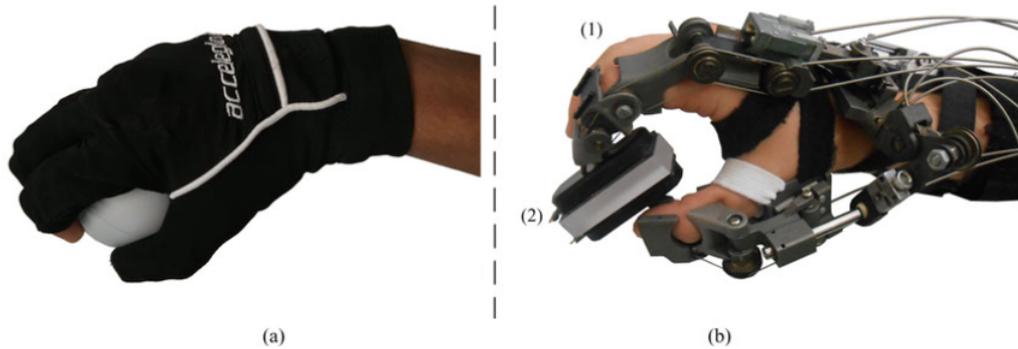


Figura 1.7: *Sistema de telerehabilitación maestro-esclavo desarrollado por Cortesse et al. [14]* - (a) *Unidad maestra.* (b) *Unidad esclava: (1) exoesqueleto para la mano y (2) objeto sensorizado.*

La unidad maestra consiste de un guante comercial con sensores llamado “Acceleglove”, el cual es utilizado por el terapeuta y permite registrar en línea los ejercicios de rehabilitación que la unidad esclava debe de repetir.

La unidad esclava consiste de una órtesis de potencia para la mano (exoesqueleto robótico), la cual es un sistema mecatrónico constituido de tres subsistemas principales: el exoesqueleto portable para la asistencia activa de los dedos índices y pulgar; el bloque de actuación remota conectado a la órtesis mediante un sistema de canales enfundados y la unidad de control.

El exoesqueleto portable a su vez se divide en los módulos para el antebrazo, la palma, el dedo índice y el dedo pulgar, como se muestra en la figura 1.8(a), y el bloque de accionamiento remoto se compone de los elementos mostrados en la figura 1.8(b).

El objeto sensorizado consiste de un paralelepípedo de plástico dotado de sensores de presión suave, el cual es utilizado para registrar las mejoras del paciente.

Con dicho sistema se pudo observar que el exoesqueleto esclavo fue capaz de conducir la mano del usuario por el camino impuesto, y también de mantener el agarre de los objetos de forma estable. El sistema de rehabilitación cumple con importantes requerimientos de diseño para sistemas de telerehabilitación para la mano: 1) un sistema confiable para la adquisición de los movimientos del terapeuta y el paciente con un continuo intercambio de información sin retrasos o pérdidas de datos, 2) compatibilidad cinemática y confort entre el usuario y el exoesqueleto para asegurar una correcta transmisión de las fuerzas de torsión a las articulaciones del paciente, y 3) un sistema seguro y efectivo.

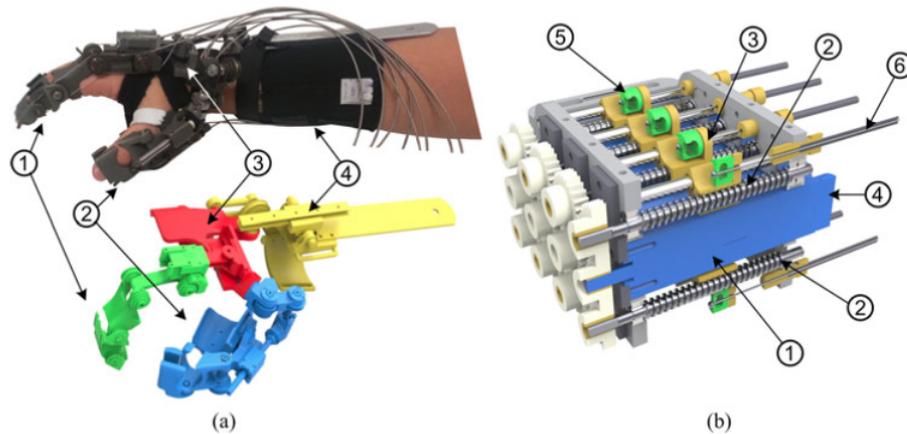


Figura 1.8: *Unidad esclava del sistema de rehabilitación diseñado por Cortesse et al.* - (a) *Exoesqueleto para la mano.* (1) *Módulo para el índice.* (2) *Módulo para el pulgar.* (3) *Módulo para la palma.* (4) *Módulo para el antebrazo.* (b) *Sistema de actuación y transmisión.* (1) *Motor DC con engranes.* (2) *Tornillos sin fin.* (3) *Deslizadores.* (4) *Encoder magnético incremental.* (5) *Sensor de fuerza de tensión del cable.* (6) *Cables enfundados.* [14].

Zhou *et al.* [99] han diseñado recientemente un exoesqueleto con retroalimentación háptica llamado “RML Glove”, el cual es un sistema mecatrónico ligero, portable y autónomo que cabe en la mano y provee retroalimentación de fuerza a cada dedo de la mano sin restringir su movimiento, como se muestra en la figura 1.9.

Las fuerzas de retroalimentación se generan con micromotores que se encuentran acoplados a alambres, los cuales sirven para transmitir la fuerza de retroalimentación a los dedos de la mano, y el exoesqueleto de cada dedo es modelado como un mecanismo de seis barras con el fin de permitir su libre movimiento.

Con dicho guante se realizaron pruebas experimentales de navegación de un robot móvil con y sin retroalimentación de fuerza, esto con el fin de demostrar las mejoras que se pueden obtener en teleoperación utilizando interfaces hápticas basados en métodos de múltiples dedos. De los resultados que se obtuvieron se pudo observar que el guante provee una retroalimentación de fuerza efectiva al usuario, aumentando de esta manera la telepresencia y mejorando la coordinación de los movimientos del robot.

1.2. Planteamiento del problema

Los seres humanos utilizan sus sentidos en la vida diaria para percibir lo que se encuentra a su alrededor. Al trabajar con entornos virtuales o remotos, por lo general se usan interfaces que utilizan el sentido de la vista y del oído para retroalimentar la información generada por dicho ambiente, los cuales son de gran utilidad para visualizar y manipular elementos dentro

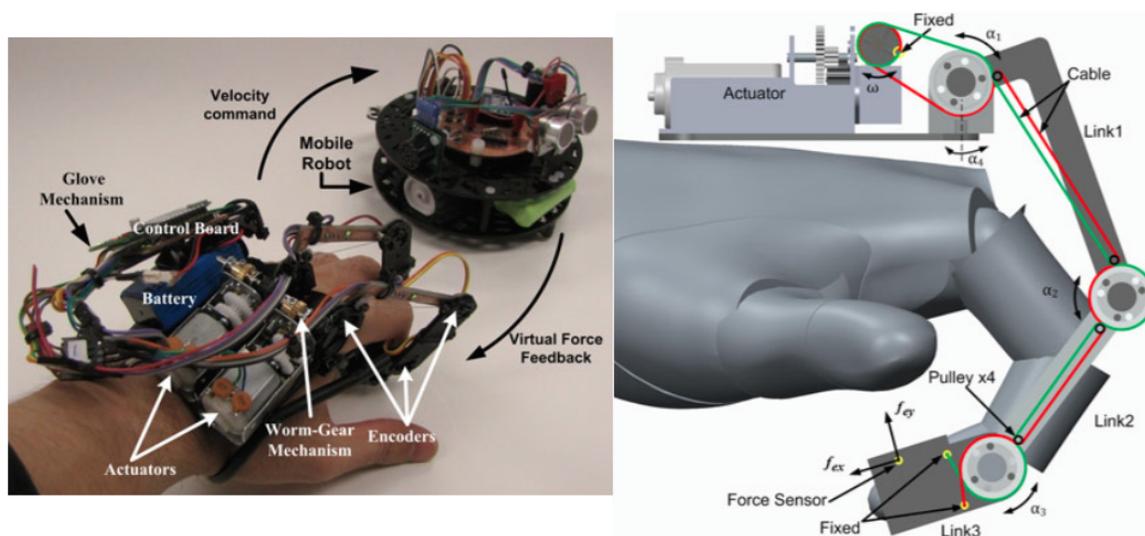


Figura 1.9: *Exoeskeleto RML - Glove* [99].

del entorno, sin embargo aún con estos sentidos, la telepresencia de los usuarios sigue siendo baja.

Una completa telepresencia se alcanza cuando el usuario se siente presente en una ubicación remota (o virtual) con todas sus modalidades sensoriales y de actuación. Es en este punto donde las interfaces hápticas tienen un papel importante, ya que éstas aprovechan el sentido del tacto, con el cual se puede percibir y manipular objetos, para retroalimentar información de un entorno (virtual o remoto) al usuario y así mejorar la telepresencia del mismo. Con base en lo antes mencionado y a la revisión realizada en la literatura, en este proyecto se planea diseñar y construir un prototipo de guante háptico para dos dedos con las siguientes capacidades: a) medir la posición de los dedos (índice y medio), y b) proporcionar retroalimentación de fuerza al usuario.

Debido a que una de las aplicaciones de los guantes hápticos es la teleoperación de robots, para el diseño del guante háptico se considerará como caso de aplicación la teleoperación de un robot móvil construido con un kit de *LEGO Mindstorms NXT*[®]. Los movimientos sensados de la mano se usarán para realizar el avance y giro del robot. Además, la retroalimentación de fuerza tendrá como fin que el usuario pueda detectar obstáculos en la trayectoria del robot.

1.3. Justificación

En Oaxaca no se han desarrollado guantes hápticos que permitan controlar con mayor precisión diversos sistemas reales y virtuales. Además, debido a los altos costos de las interfaces comerciales, es difícil adquirirlas. Dichas interfaces hápticas pueden ser de utilidad en industrias en las que operadores tengan que manipular robots industriales para realizar acti-

vidades complejas, a su vez son aplicables en el proceso de diseño de productos y su ensamble de manera virtual. También pueden tener aplicaciones en la industria del entretenimiento, en especial la industria de videojuegos, así como en tareas de rehabilitación física.

El desarrollo de interfaces hápticas dentro de la Universidad Tecnológica de la Mixteca es capaz de expandir la forma de manipular los diversos sistemas mecatrónicos con los que se cuenta y desarrolla (péndulo invertido, kits de LEGO, robots NAO, entre otros). A su vez, el desarrollo de la investigación para el diseño de guantes hápticos puede generar conocimiento que sirva como base para la mejora de los mismos y el desarrollo de diversas interfaces hápticas. Partiendo del punto de vista de un mecanismo capaz de medir el movimiento de los dedos y ejercer fuerzas sobre los mismos, se pueden desarrollar mecanismos rehabilitadores para personas que han sufrido lesiones que le impidan realizar los movimientos normales de la mano.

También se obtendrá el conocimiento que sirva de base para la reproducción del prototipo, su mejoramiento y el desarrollo de diversas interfaces hápticas o sistemas relacionados. Al contar con un prototipo de una interfaz háptica en la universidad se pueden expandir las formas de controlar diversos sistemas virtuales o reales y a su vez atraer a los jóvenes estudiantes a interesarse más en el desarrollo de sistemas que puedan ser controlados con una interfaz háptica, promoviendo así la generación de conocimiento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, construir y controlar un guante háptico para dos dedos capaz de medir la posición de los dedos (índice y medio) de una mano y proporcionar retroalimentación de fuerza al usuario para la manipulación de un robot móvil.

1.4.2. Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general se formulan los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Diseñar y construir:
 - un mecanismo que permita el movimiento de flexión y extensión de los dedos índice y medio de la mano
 - un sistema de actuación para ejercer retroalimentación de fuerza a los dedos
 - un sistema de medición para obtener la posición los dedos de la mano
 - un sistema para controlar el guante háptico
- ✓ Realizar la comunicación del guante háptico con una computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos y simulink

- ✓ Desarrollar un experimento de teleoperación de un robot móvil construido con un kit de *LEGO Mindstorms NXT*[®].
- ✓ Documentar las actividades realizadas

1.5. Metodología de desarrollo

Los sistemas hápticos son sistemas mecatrónicos que incorporan actuadores de potencia, estructuras cinemáticas sofisticadas, sensores especializados, y estructuras de control rigurosas, así como software complejo [32]. Es por esto que el desarrollo del proyecto se divide en subsistemas, los cuales son: subsistema mecánico, subsistema de instrumentación y subsistema de control.

Para el desarrollo del proyecto se propone la siguiente metodología:

- ✓ Revisión de literatura para realizar propuestas para el subsistema mecánico, el subsistema de instrumentación, y el subsistema de control.
- ✓ Determinar los componentes a utilizar en los subsistemas del guante háptico y realizar el diseño mecánico con base en estos.
- ✓ Realizar los modelos tridimensionales de las piezas del guante háptico con el software computacional SolidWorks[®].
- ✓ Revisar la documentación e instalar los programas necesarios para la utilización de una impresora 3D modelo Prusa i3 para la manufactura de las piezas de la estructura mecánica.
- ✓ Manufacturar las piezas de la estructura mecánica mediante la técnica de impresión 3D.
- ✓ Ensamblar el subsistema mecánico e integrarlo con el subsistema de instrumentación.
- ✓ Asignación de una computadora en el laboratorio de mecatrónica para la realización de pruebas e instalación de los drivers de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments[®] PCI-6024e.
- ✓ Adquirir señales del guante háptico en Simulink[®] mediante la tarjeta de adquisición de datos y enviar señales para controlar los motores del guante háptico.
- ✓ Instalación de los paquetes de programación y complementos para Matlab-Simulink[®] del kit *LEGO Mindstorms NXT*[®]. Se revisará la documentación existente para su utilización.
- ✓ Ensamblar las piezas del kit *LEGO Mindstorms NXT*[®] para construir el prototipo de robot móvil.
- ✓ Programar el robot *LEGO Mindstorms NXT* con Simulink[®] para su funcionamiento de manera autónoma.

- ✓ Realizar la comunicación entre el guante háptico y el robot móvil para la teleoperación del mismo.
- ✓ Realizar pruebas del guante háptico con el robot móvil y redactar el documento final.

1.6. Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se presenta una introducción y los antecedentes al tema que se plantea, se establece el planteamiento y la justificación del problema a abordar, se especifican los objetivos a cumplir durante la realización de la tesis, y por último se describe la metodología a seguir durante el desarrollo del trabajo. En el Capítulo 2 se resume la teoría que se utiliza en el desarrollo del guante háptico, se describen los sistemas hápticos y conceptos referentes a los subsistemas mecánico, de instrumentación y de control. En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo del subsistema mecánico, el proceso de diseño, manufactura y ensamble del mecanismo. En el Capítulo 4 se aborda el subsistema de instrumentación en el cual se describen los componentes electrónicos utilizados para realizar las mediciones de las variables físicas, así como el medio de adquisición de las señales en una computadora. En el Capítulo 5 se presenta la aplicación de teleoperación de un robot móvil, se describe el robot móvil a utilizar y la lógica que lo gobierna, se describe el subsistema de control para generar la lógica que regirá el comportamiento del guante háptico, y se presentan los resultados obtenidos comparando gráficas de las señales obtenidas de los dos sistemas. Por último, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del trabajo de tesis, se plantean mejoras en el guante háptico para obtener un mejor desempeño y se mencionan posibles trabajos a futuro a partir del trabajo realizado.

Capítulo 2

Marco teórico

En esta sección se presentan algunas definiciones de términos y conceptos que serán de utilidad para el desarrollo del sistema háptico.

2.1. Háptica y sistemas hápticos

La háptica se refiere a sentir y manipular nuestro entorno mediante el tacto. Inicialmente el término háptica fue utilizado por psicólogos para estudiar el sentido del tacto en los humanos, pero debido al desarrollo tecnológico que se ha realizado con respecto al tacto, fue necesario redefinir el término. La nueva definición de la háptica incluye todos los aspectos de la adquisición de información y manipulación de objetos mediante el tacto realizado por humanos, máquinas o la combinación de ambos; los cuales pueden estar involucrados con entornos reales, virtuales o teleoperados [88].

Según Kant, el tacto es uno de los sentidos más indispensables de los humanos. Con él, somos capaces de percibir espacialmente nuestro entorno. Solo éste nos permite sentir y clasificar impresiones recolectadas con ayuda de otros sentidos, ponerlos en contexto, y entender los conceptos espaciales. También se puede observar su importancia en el hecho de que la piel, que es parte de este sentido, cubre la superficie completa de los seres humanos. Esto permite definir el límite físico de la persona [33].

Las interfaces hápticas permiten a los humanos interactuar con entornos reales o virtuales mediante habilidades mecánicas, sensoriales, motoras y cognitivas. Las interacciones consisten de una o más operaciones, que pueden ser clasificadas en: control de movimiento y percepción [33].

Las operaciones que se ubican dentro de la clasificación de percepción son las siguientes:

- ✓ Detección.- Describe cómo la presencia de un estímulo es detectada por una persona.
- ✓ Discriminación.- En caso de detectar más de un estímulo, se requiere describir cómo la

información es percibida.

- ✓ Identificación.- Permite la clasificación de la información contenida en el estímulo.
- ✓ Ajuste.- Permite describir el comportamiento de los ajustes cuando las propiedades de los estímulos y objetos son clasificadas.

Por otra parte, las operaciones que se ubican dentro de la clasificación de control de movimiento son las siguientes:

- ✓ Desplazamiento.- El movimiento de las extremidades, cuerpo entero o substitutos virtuales (avatares) es usado para buscar o alcanzar un destino u objeto, para explorar entornos conocidos o desconocidos, o para modificar nuestra posición.
- ✓ Selección.- Especialmente en entornos virtuales, el marcar y/o seleccionar un objeto o una función es una operación vital. Permite la interacción con el entorno en primera persona.
- ✓ Modificación.- Está basada en la selección de un objeto o función y describe un cambio en la orientación, posición u otras propiedades de un objeto o bien la combinación de más de un objeto en uno solo.

Las operaciones antes mencionadas se observan en la figura 2.1, la cual muestra la clasificación de las interacciones hápticas introducida por Samur [33].

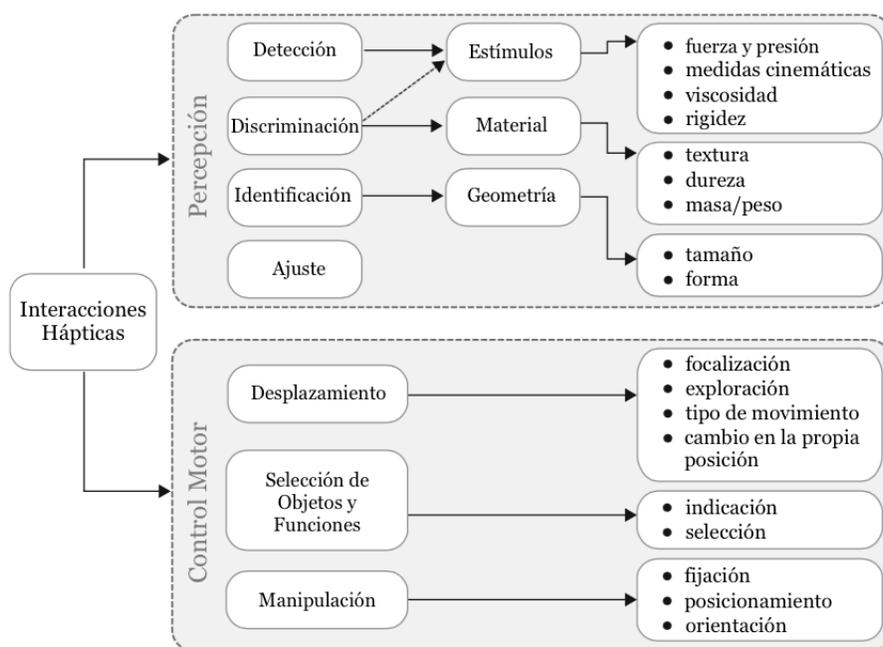


Figura 2.1: *Taxonomía de las interacciones hápticas* [33].

La percepción háptica también puede ser clasificada en propiedades de percepción cines-tésicas y táctiles (figura 2.2), con base en características fisiológicas. Estas son definidas en la

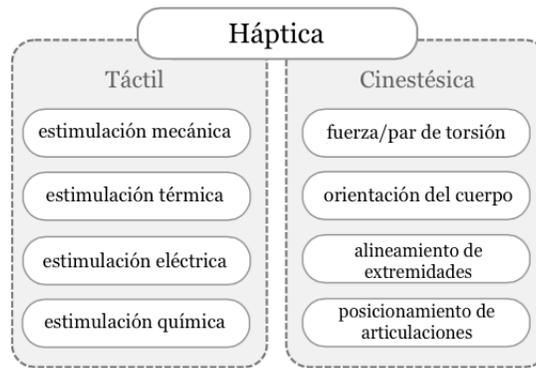


Figura 2.2: *Taxonomía de las percepciones hápticas* [33].

norma ISO 9241-910 [33].

- ✓ La percepción cinestésica describe la percepción del estado del sistema locomotor humano, particularmente la posición de las articulaciones, la alineación de las extremidades, la orientación del cuerpo y la tensión de los músculos.
- ✓ La percepción táctil describe la percepción basada en receptores sensoriales localizados en la piel humana.

Los canales táctiles y cinestésicos trabajan juntos para proveer a los seres humanos, medios para percibir y actuar sobre su entorno, por lo cual las interfaces hápticas generan señales mecánicas que estimulan dichos canales de los seres humanos [34].

Las interfaces hápticas son dispositivos que permiten la interacción con entornos virtuales o sistemas remotos teleoperados. Son utilizados para tareas que son usualmente realizadas con las manos en el mundo real, tales como la exploración manual y la manipulación de objetos [88].

Los métodos hápticos para múltiples dedos proveen de una interfaz humano-máquina realista y natural que mejora la inmersión cuando se interactúa con entornos simulados o remotos [28]. Entre estos se encuentran los guantes hápticos que tienen la capacidad de simular sensaciones reales basadas en interacciones virtuales con el fin de permitir al usuario percibir objetos virtuales, como si estos fueran reales [3, 17, 19, 30, 94, 99]. A su vez, debido a la alta destreza que pueden ofrecer estos dispositivos, son aplicables en el control de movimientos complejos de robots remotos.

2.1.1. Sistemas hápticos

Los sistemas hápticos interactúan con un usuario humano utilizando los medios de percepción e interacción háptica. Estos también se pueden referir como dispositivos hápticos. Los

sistemas hápticos abarcan no solamente las entradas y salidas hápticas fundamentales, sino también los sistemas de control que se requieren para manejar actuadores, leer sensores, y ocuparse del procesamiento de la información [31].

Las interfaces hápticas vinculan la percepción del usuario con funciones de accionamiento, pero también registran las intenciones del usuario con funciones sensoriales dedicadas. Esta información se alimenta a la aplicación y evocan comandos al sistema o visualización bajo control. Dependiendo de la aplicación, una entrada mecánica del usuario puede provocar una retroalimentación háptica directa. Las interfaces se utilizan sobretodo como dispositivos operativos universales para transmitir interacciones con diferentes entornos artificiales o reales [31].

2.1.2. Estructura del sistema háptico

Las interfaces hápticas demuestran varias estructuras básicas definidas por sus entradas y salidas mecánicas, comúnmente conocidas como estructuras de sistema de impedancia o admitancia. Según [52] existen cuatro grandes clases de posibles diseños de sistemas:

- ✓ Sistemas de impedancia controlada en lazo abierto.
- ✓ Sistemas de impedancia controlada en lazo cerrado.
- ✓ Sistemas de admitancia controlada en lazo abierto.
- ✓ Sistemas de admitancia controlada en lazo cerrado.

Los sistemas de impedancia controlada se basan en las características de transferencia de una impedancia mecánica $Z = \frac{F}{v}$ y son típicamente para la estructura de muchos dispositivos cinestésicos. Generan una fuerza como salida y miden un posición como entrada. Por otra parte, los sistemas de admitancia controlada se basan en la definición de admitancia mecánica $Y = \frac{v}{F}$, que describe características de transferencia con fuerza como entrada y velocidad como salida. Estos sistemas generan un cambio de posición como retroalimentación háptica y obtienen una reacción de fuerza por parte del usuario como entrada. En el caso de los sistemas controlados en lazo cerrado, esta fuerza es medida y usada para la corrección de la posición [52].

Los sistemas de impedancia controlada en lazo abierto están basados en una estructura simple (Figura 2.3). Una señal de fuerza S_F es transferida mediante un controlador a una forma de energía de fuerza proporcional E_F . Esta energía después es alterada en la salida de fuerza F_O por un actuador G_{D1} . Esta fuerza de salida interfiere con una fuerza de perturbación F_{noise} . Este ruido es el resultado de los movimientos generados por el usuario x_{out} y las propiedades mecánicas del diseño cinemático G_{D3} . Típicamente, tales fuerzas de perturbación son la fricción y la inercia. La suma de ambas fuerzas es la fuerza de salida real F_{out} del sistema de impedancia controlada. Usualmente, existe una parte opcional del sistema, un sensor G_{D2} , el cual mide los movimientos y la posición actual del sistema háptico.

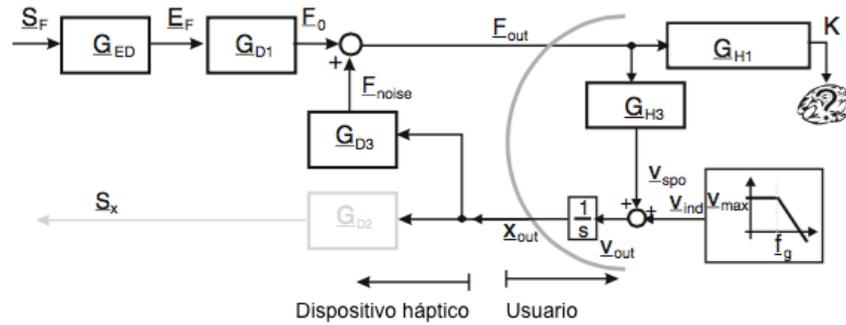


Figura 2.3: Diagrama a bloques de un sistema háptico con impedancia controlada en lazo abierto [52].

Los sistemas de impedancia controlada en lazo cerrado (Figura 2.4) difieren de los sistemas de impedancia controlada en lazo abierto de tal manera que la fuerza de salida F_{out} es medida por un sensor de fuerza G_{FSense} y es usada como una variable de control para generar un valor de diferencia ΔS_F con el valor nominal. Un componente adicional típico es un controlador G_{CD} en la trayectoria de control, optimizando las propiedades dinámicas del lazo de retroalimentación. Los lazos cerrados hacen posible la compensación de fuerza F_{noise} que resulta de la mecánica del sistema.

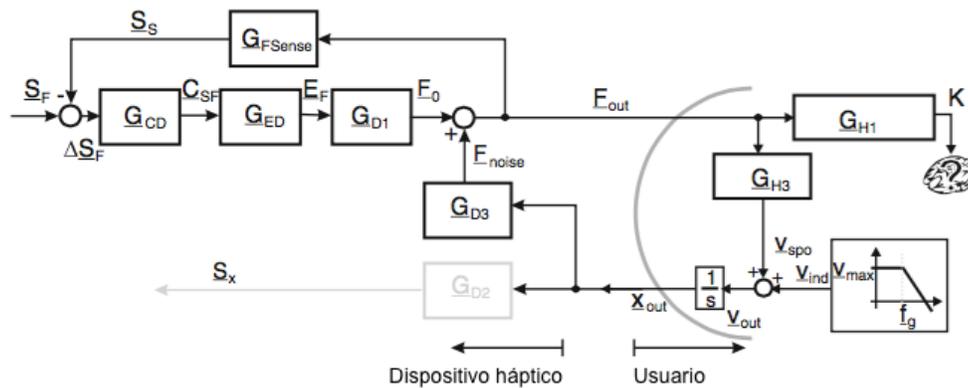


Figura 2.4: Diagrama a bloques de un sistema con impedancia controlada en lazo cerrado con retroalimentación de fuerza [52].

Los sistemas de admitancia controlada en lazo abierto (Figura 2.5) proveen una salida de posición. Proporcionalmente al valor de entrada S_X , una cadena de control con un convertidor de energía G_{ED} y la cinemática G_{D1} , provee un desplazamiento x_O . Este desplazamiento interfiere con una variable de perturbación x_{noise} la cual es dependiente de las propiedades mecánicas de la cinemática G_{D3} y la reacción directa del usuario F_{out} . En la práctica un sistema de admitancia controlada en lazo abierto típicamente presenta un diseño que permite despreciar la influencia de la variable de perturbación. Otro elemento opcional para los siste-

mas de admitancia controlada en lazo abierto es la medición de la fuerza de salida F_{Sense} sin cerrar el lazo de control.

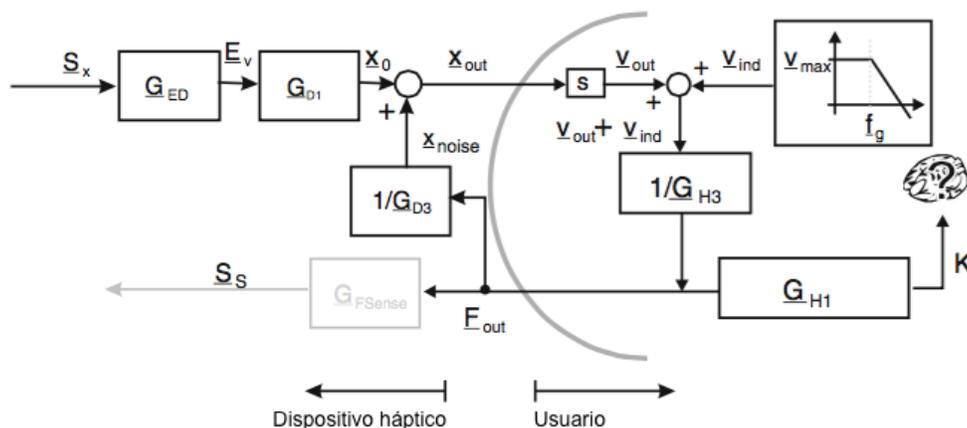


Figura 2.5: Diagrama a bloques de un sistema háptico con admitancia controlada en lazo abierto [52].

Los dispositivos de admitancia controlada en lazo cerrado (Figura 2.6) proveen una salida de posición y una fuerza de entrada para el elemento de control idénticos a los dispositivos de impedancia controlada. La medición obligatoria de la fuerza de salida F_{out} es usada como variable de control S_S para calcular la diferencia ΔS_F con el valor de referencia S_F . Esta diferencia es entonces alimentada a través del controlador G_{CD} al circuito de control. Como resultado, el desplazamiento x_{out} es ajustada hasta que una fuerza F_{out} esperada es alcanzada.

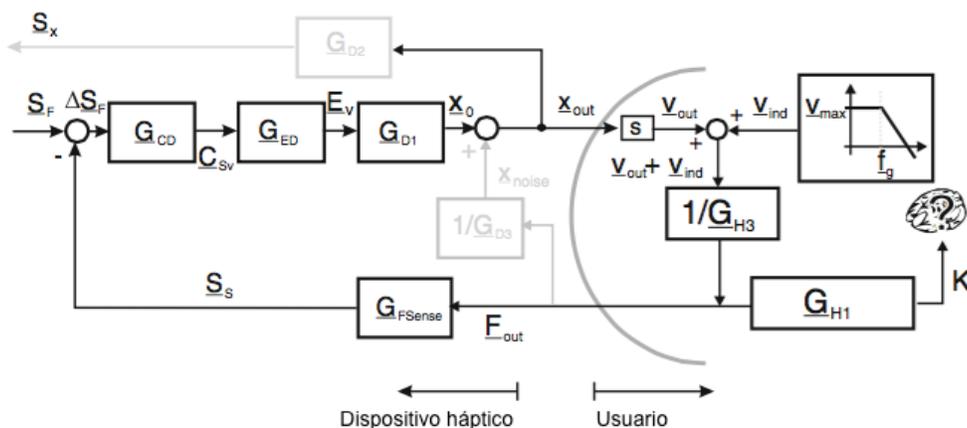


Figura 2.6: Diagrama a bloques de un sistema háptico con admitancia controlada en lazo cerrado con lazo de retroalimentación de fuerza como control [52].

2.1.3. Sistema de control

El sistema de control háptico es la parte del sistema real que no sólo controla los componentes mecánicos y eléctricos individualmente para asegurar una adecuada detección, manipulación y despliegue de información háptica, sino también se ocupa de la conexión con otras partes del sistema háptico. Lo cual puede ser, por ejemplo, la conexión entre la interfaz háptica y el manipulador o la interfaz de algún software de realidad virtual [64].

Uno de los controladores usados con mayor frecuencia es la combinación en paralelo de un controlador proporcional (P), uno integral (I) y uno derivativo (D). Esta combinación es usada en muchas variantes incluyendo el controlador P, la combinación PI, la combinación PD, o la estructura completa PID. Usando la estructura PID se combinan todas las ventajas de los componentes individuales [64]. La correspondiente función de transferencia se describe de la siguiente manera:

$$G_R = K_R \left(1 + \frac{1}{T_N s} + T_V s \right) \quad (2.1.3.0.1)$$

En la figura 2.7 se muestra la equivalencia en diagrama a bloques de la estructura de control. Los parámetros ajustables en este controlador son la ganancia proporcional K_R , la constante de integración en el tiempo T_N , y el tiempo derivativo T_V . Con el ajuste de parámetros optimizados, se puede realizar una amplia variedad de tareas de control.

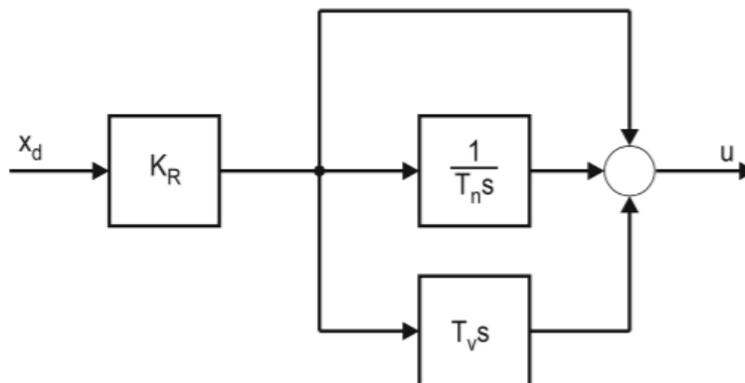


Figura 2.7: Diagrama a bloques de un controlador PID [64].

2.2. Mecanismos

Un **mecanismo** es un sistema de elementos acomodados para transmitir movimiento de una forma predeterminada. También se puede definir como una cadena cinemática en la cual por lo menos un eslabón se ha “fijado” o sujetado al marco de referencia (el cual por sí mismo

puede estar en movimiento). La principal diferencia entre los mecanismos y las máquinas es la magnitud de las fuerzas que transmiten. En general, las **máquinas** se componen de mecanismos que están diseñados para producir y transmitir fuerzas significativas [61].

Los elementos básicos de un mecanismo son: eslabones, juntas, bancada y el TCP (punto central de la herramienta por sus siglas en inglés). La **bancada** es la parte del mecanismo (eslabón o eslabones) que está fija (inmóvil) con respecto al marco de referencia. Esto significa que todos los cálculos a realizar para diseñar el mecanismo (así como todos los cálculos que se ejecuten durante la operación de la interfaz háptica) posición, velocidad y aceleración se realizarán con respecto a la bancada [51, 61].

Los eslabonamientos son los bloques de construcción básicos de todos los mecanismos, estos se componen de eslabones y juntas. Un **eslabón** es un cuerpo rígido (supuesto) que posee por lo menos dos nodos que son puntos de unión con otros eslabones, éstos pueden ser binarios, ternarios o cuaternarios. Una **junta** (también llamado par cinemático) es una conexión entre dos o más eslabones (en sus nodos), lo cual permite algún movimiento, o movimiento potencial, entre los eslabones conectados [61].

Los eslabones y las juntas se unen para formar una **cadena cinemática** que conecte la bancada con el TCP. Las juntas más usadas en los mecanismos son: revoluta, prismáticas, helicoidales, universales, cilíndricas, esféricas y planares [51]. Éstas se muestran en la figura 2.8.

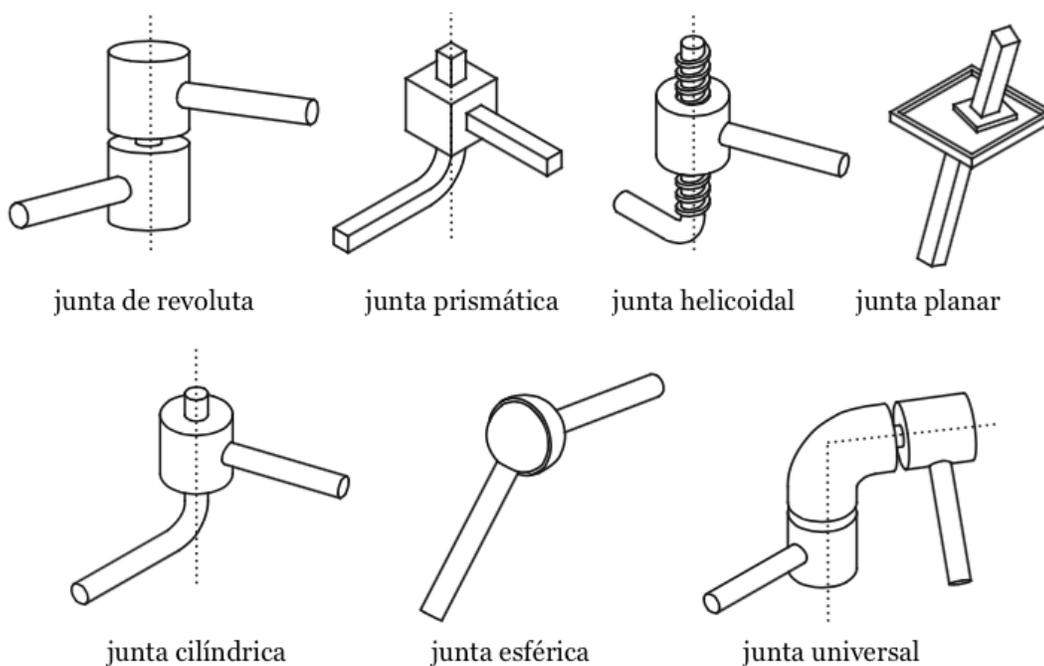


Figura 2.8: *Juntas cinemáticas* [51].

El **TCP** (Tool Center Point) es el punto de interacción entre el mecanismo y el entorno;

es capaz de moverse en el espacio con un cierto número de grados de libertad. En el caso de las interfaces hápticas, la retroalimentación háptica y la interacción del usuario usualmente se llevan a cabo mediante este punto [51].

2.2.1. Grado de libertad (GDL)

El GDL del sistema, también llamado movilidad (M), es igual al número de parámetros (mediciones) independientes que se requieren para definir de manera única su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo. También se puede definir como el número de entradas que se necesita proporcionar para crear una salida predecible [61].

Para determinar el GDL global de cualquier mecanismo plano, se debe considerar el número de eslabones, así como las juntas y las interacciones entre ellos. El GDL de cualquier ensamble de eslabones se puede pronosticar utilizando la **ecuación de Gruebler** [61]:

$$M = 3L - 2J - 3G \quad (2.2.1.0.2)$$

donde:

M = grado de libertad o movilidad

L = número de eslabones

J = número de juntas

G = número de eslabones conectados a tierra

Hay que observar que en cualquier mecanismo real, aún cuando más de un eslabón de la cadena cinemática esté conectado a tierra, el efecto neto será crear un eslabón conectado a tierra de mayor orden y más grande, ya que sólo puede haber un plano de tierra. Por lo tanto, G siempre es uno y la ecuación de Gruebler se convierte en:

$$M = 3(L - 1) - 2J \quad (2.2.1.0.3)$$

Los **eslabonamientos de cuatro barras** son los mecanismos articulados más simples posibles para el movimiento controlado con un grado de libertad simple. Tomando en cuenta que la menor cantidad de partes que puede realizar el trabajo en general será la solución menos cara y más confiable, el eslabonamiento de cuatro barras deberá estar entre las primeras soluciones a problemas de control de movimiento a ser investigados. La **condición de Grashof** es una relación muy simple que predice el comportamiento de rotación o **rotabilidad** de las inversiones de un eslabonamiento de cuatro barras basado sólo en las longitudes de los eslabones. Una **inversión** es creada por la conexión a tierra de un eslabón diferente en la cadena cinemática [61].

Sea:

S = longitud del eslabón más corto

L = longitud del eslabón más largo

P = longitud de un eslabón restante

Q = longitud de otro eslabón restante

Luego, si:

$$S + L \leq P + Q \quad (2.2.1.0.4)$$

el eslabonamiento es de Grashof y por lo menos un eslabón será capaz de realizar una revolución completa con respecto al plano de bancada. Si la desigualdad no es cierta, entonces el eslabonamiento no es Grashof y ningún eslabón será capaz de realizar una revolución completa con respecto a cualquier otro eslabón.

Un cuerpo rígido libre de moverse dentro de un marco de referencia, en el caso general, tendrá **movimiento complejo**, el cual es una combinación simultánea de **rotación** y **traslación**. En el espacio tridimensional, puede haber rotación alrededor de un eje (cualquier eje oblicuo o uno de los tres ejes principales) y también traslación simultánea que se puede resolver en elementos a lo largo de tres ejes [61].

2.2.2. Clasificación de mecanismos

Los mecanismos se pueden clasificar dependiendo de sus cadenas cinemáticas en [51]:

- ✓ *Serial*: son de cadena cinemática abierta. Sus principales ventajas son su diseño simple y su amplio espacio de trabajo. Son más fáciles de controlar, especialmente en tareas de posicionamiento, debido a la secuencia serial de las juntas y los rodamientos que permite la aplicación de transformaciones matemáticas paso a paso.
- ✓ *Paralelo*: son de cadena cinemática cerrada, en la que por lo menos existen dos caminos desde la bancada hasta el TCP. Su principal ventaja es que la carga en el TCP se distribuye a través de varias cadenas cinemáticas, lo que permite diseñar estructuras rígidas más livianas.
- ✓ *Híbridos*: combinación de mecanismos seriales y paralelos.

Las estructuras cinemáticas básicas con respecto a esta clasificación se pueden observar en la figura 2.9.

2.2.3. Mecanismos de centro remoto

Un mecanismo de centro remoto (RCM por sus siglas en inglés) es aquel donde un eslabón puede rotar alrededor de un punto fijo distante del propio mecanismo, y no existe una junta de revoluta física en el punto fijo. Los mecanismos RCM son principalmente desarrollados

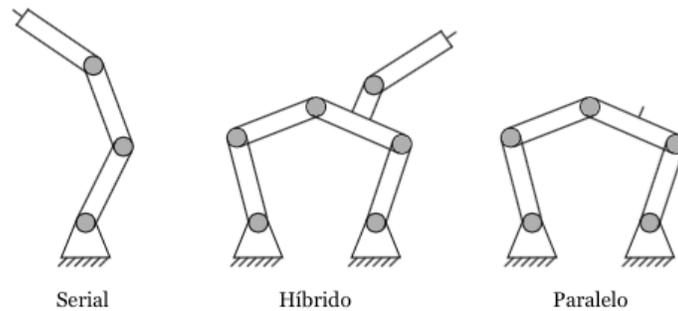


Figura 2.9: *Estructuras cinemáticas básicas* [51].

para posicionar y manipular herramientas en aplicaciones para robots cirujanos y cirujías de invasión mínima [100].

Si un punto dentro de un eslabón de un mecanismo planar puede ser rotado alrededor de un punto fijo dentro del plano, y no existe una junta de revoluta real en este punto, este mecanismo es definido como un mecanismo planar de centro virtual (VC). Por otra parte, si un eslabón del mecanismo planar puede ser rotado alrededor de un punto fijo dentro de un plano, y no existe una junta de revoluta real en el punto fijo, el mecanismo se define como un mecanismo virtual de centro de movimiento (VCM) [100].

La diferencia entre un mecanismo VC y un mecanismo VCM es que en los mecanismos VC uno o más puntos pueden ser rotados alrededor de un punto fijo, pero en el mecanismo VCM existe al menos un eslabón que puede ser rotado alrededor de un punto fijo [100].

Por otro lado, la diferencia entre un mecanismo VCM y un mecanismo RCM es que en un mecanismo RCM la posición del centro virtual se encuentra distante del propio mecanismo, pero en los mecanismos VCM, el centro virtual se puede localizar en cualquier parte. Considerando la relación entre los mecanismos VC, VCM o RCM, se puede construir un nuevo mecanismo VCM o RCM mediante la combinación de dos mecanismos VC [100].

2.3. Biomecánica de la mano

La biomecánica combina el campo de la ingeniería mecánica con los campos de la biología y la fisiología. En la biomecánica, los principios de la mecánica son aplicados a la concepción, diseño, desarrollo, y análisis de equipo y sistemas en biología y medicina. En esencia, la biomecánica es una ciencia multidisciplinaria que se encarga de la aplicación de principios mecánicos al cuerpo humano en movimiento y reposo [66].

La mano humana es uno de los principales órganos para poder interactuar con el entorno. Cada mano contiene aproximadamente 29 huesos y 34 músculos que permiten mover todos

los dedos. Tales grados de libertad, y conexiones neuronales masivas, proveen una enorme flexibilidad para realizar todo tipo de movimiento de los dedos, tales como tocar, presionar, agarrar, apretar, tirar, etc. Por otra parte, la complejidad de su propiedad mecánica hace que el modelar la cinemática de la mano y su movimiento sea un gran desafío [3].

Para lograr el funcionamiento completo de la mano, o incluso la capacidad mínima de agarre, se requiere que el pulgar trabaje en combinación con el dedo índice. La oponibilidad del pulgar y su fuerza es fundamental para la interacción con las manos y la manipulación de objetos. Se considera comúnmente que el pulgar es el responsable de al menos el 50 % de la función global de la mano [9].

Desde la muñeca hasta la punta del pulgar, existen cuatro huesos: el trapecio (hueso carpiano), el primer metacarpiano, la falange proximal y la falange distal. Las tres articulaciones del pulgar son: articulación carpometacarpiana (CMC), articulación metacarpofalángica (MCP) y articulación interfalángica (IP) [9]. Estos se muestran en la figura 2.10.

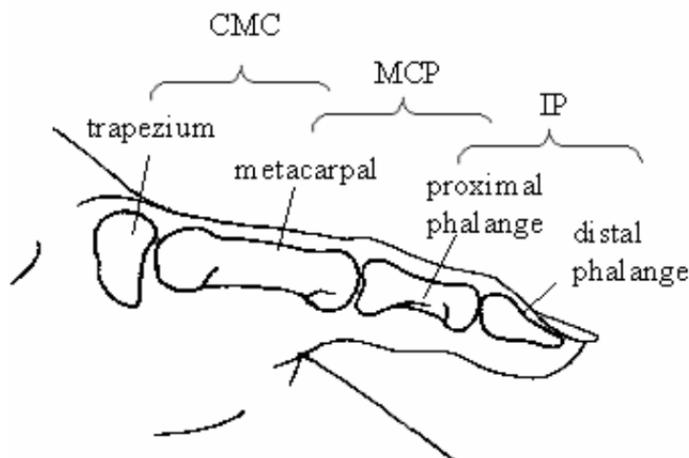


Figura 2.10: *Huesos y articulaciones del pulgar* [9].

Por lo general, en los modelos cinemáticos del pulgar se considera la articulación IP como una articulación con un eje para su flexión-extensión (FE). Sin embargo, existen discrepancias en la forma de modelar las articulaciones MCP y CMC. Un modelo de cinco grados de libertad, propone estas articulaciones con un eje para la flexión-extensión y otro eje para la abducción-aducción (AA) [9], como se muestra en la figura 2.11.

Los dedos índice, medio, anular y meñique tienen una estructura anatómica similar. Desde la muñeca hasta la punta de los dedos, estos se componen de cuatro huesos: metacarpiano (MC), falange proximal (PP), falange media (MP) y falange distal (DP). Las articulaciones que lo componen se nombran de la siguiente manera: articulación metacarpofalángica (MCP), articulación interfalángica proximal (PIP) y articulación interfalángica distal (DIP) [53], como

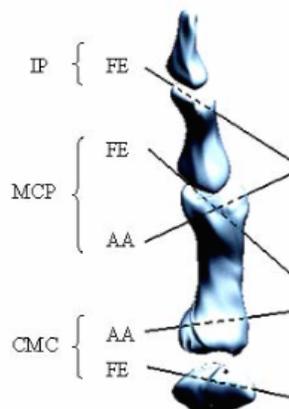


Figura 2.11: *Modelo cinemático con cinco grados de libertad rotacionales* [9].

se muestra en la figura 2.12.

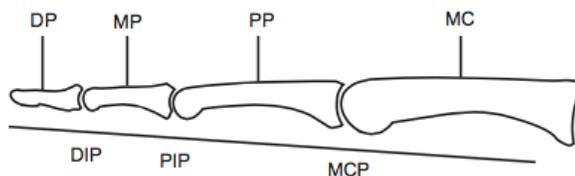


Figura 2.12: *Huesos y articulaciones del dedo índice* [53].

La información antropométrica de la longitud promedio de cada falange de los dedos se lista en la tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1: *Longitud de las falanges de cada dedo (mm)* [3].

Dedo	Falange proximal	Falange media (Metacarpiano para el pulgar)	Falange distal
Índice	48.3	28.2	19.1
Medio	52.4	33.5	21.3
Anular	48.1	32.5	21.1
Meñique	40.2	23.0	18.3
Pulgar	38.6	49.4	31.1

Zhou y Pinhas [3] usan modelos cinemático de cuatro grados de libertad para los dedos de la mano y proponen los rangos de movimiento angular mostrados en la tabla 2.2 con el fin de realizar una guante háptico que se adapte a una mayor población.

Tabla 2.2: Rangos de movimiento de las articulaciones de los dedos [3].

Dedo	Rango de movimiento angular (Grados)
MCP FE	[-90, 30]
MCP AA	[-20, 20]
PIP FE	[-100, 0]
DIP FE	[-70, 5]
Pulgar CMC FE	[-100, 10]
Pulgar CMC AA	[-100, 0]
Pulgar MCP FE	[-90, 10]
Pulgar IP FE	[-90, 20]

Basados en la longitud de los dedos y los rangos de movimiento para las articulaciones definidos en las tablas 2.1 y 2.2, Zhou y Phinas obtuvieron el espacio de trabajo 3D para todos los dedos, como se muestra en la figura 2.13.

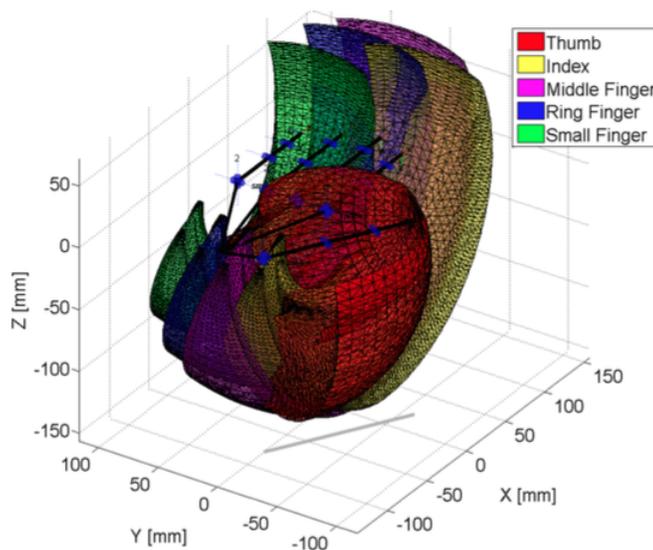


Figura 2.13: Espacio de trabajo de los dedos [3].

2.4. Lego Mindstorms NXT[®]

El kit Lego Mindstorm NXT[®] es un dispositivo programable con un microprocesador de 32 bits, 4 puertos de entrada localizados en la parte inferior del ladrillo *NXT* (enumerados del 1 al 4), 3 puertos de salida localizados en la parte superior del ladrillo (enumerados del A

al C), comunicación *bluetooth*, una bocina y una pantalla LCD de 100x64, como se muestra en la figura 2.14. También el *NXT* incluye tres motores con sensores de rotación integrados. Este cuenta con una interfaz para su programación de manera gráfica para la generación de programas de una manera sencilla y rápida [67].



Figura 2.14: *Ladrillo NXT* [63].

El kit *NXT* cuenta con varios sensores diseñados específicamente para éste. Los sensores que se incluyen el kit son de cinco tipos: tácto, luz, sonido, ultrasónico y rotación, los cuales se muestran en la figura 2.15. Los sensores rotacionales del *NXT* se encuentran convenientemente integrados a los ejes de los motores de tal manera que la posición y la velocidad siempre están disponibles en los programas del *NXT* [67].

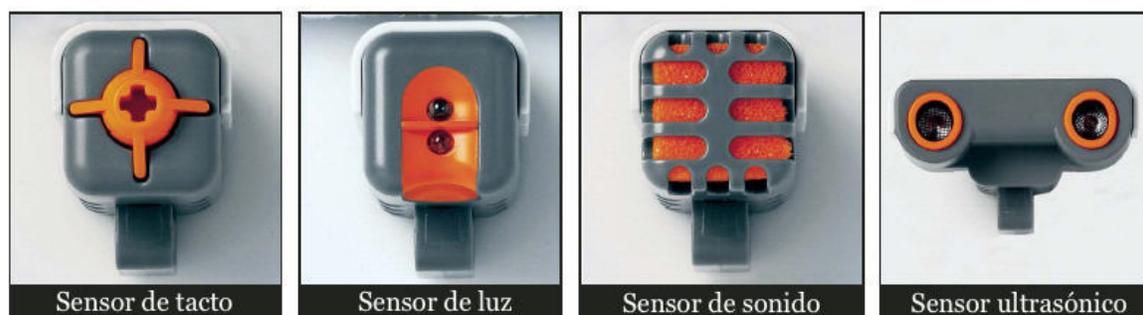


Figura 2.15: *Sensores incluidos en el kit Lego Mindstorms NXT[®]* [12].

El sensor ultrasónico contiene una bocina y un micrófono ultrasónicos que funcionan a 40 kHz. También cuenta con un microcontrolador dentro del propio sensor que permite medir el tiempo que tarda el sonido en ir a un objeto, rebotar y regresar al sensor, calculando con esto la distancia a la que se encuentra del objeto y enviando dicho dato como salida del sensor. Para objetos grandes, como una pared, la medición de la distancia es muy buena, sin embargo si el entorno es complejo y tiene objetos pequeños o curvos, la medición no es muy confiable.

El rango de medición del sensor es de 0 a 2.5 metros con una precisión de ± 3 cm [67].

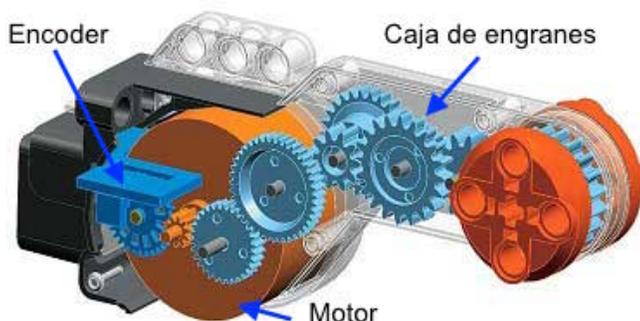


Figura 2.16: Estructura del motor NXT [41].

Los motores del kit *NXT* son una combinación de un motor de corriente continua, una caja reductora de engranes con una relación de 48 para aumentar el par de torsión del motor y un sensor rotacional para retroalimentación con una precisión de un grado, como se muestra en la figura 2.16 [67].

El ladrillo *NXT* se puede programar en distintos lenguajes y programas de software desde una computadora, tales como: *NXT-G*, *NXC*, *Robot-c*, *Java*, *Labview*[®] y *Simulink*[®]. *NXT-G* es el lenguaje de programación que viene con el kit, es altamente gráfico y consiste de bloques que realizan distintas operaciones de entradas, salidas, cálculos y cambio en el flujo de ejecución.

En el caso de *Simulink*[®], se agrega un complemento el cual permite agregar bloques que representan los distintos accesorios que se pueden conectar al ladrillo *NXT* como se observa en la figura 2.17. El complemento permite generar programas para el *NXT* para que se ejecuten de manera autónoma, también permite la ejecución simultánea de los programas en conjunto con la computadora de tal manera que se pueden monitorear las variables del ladrillo *NXT* y modificar parámetros en tiempo real.

2.5. Adquisición de señales

La adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) o adquisición de señales es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable, como se muestra en la figura 2.18. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable [45].

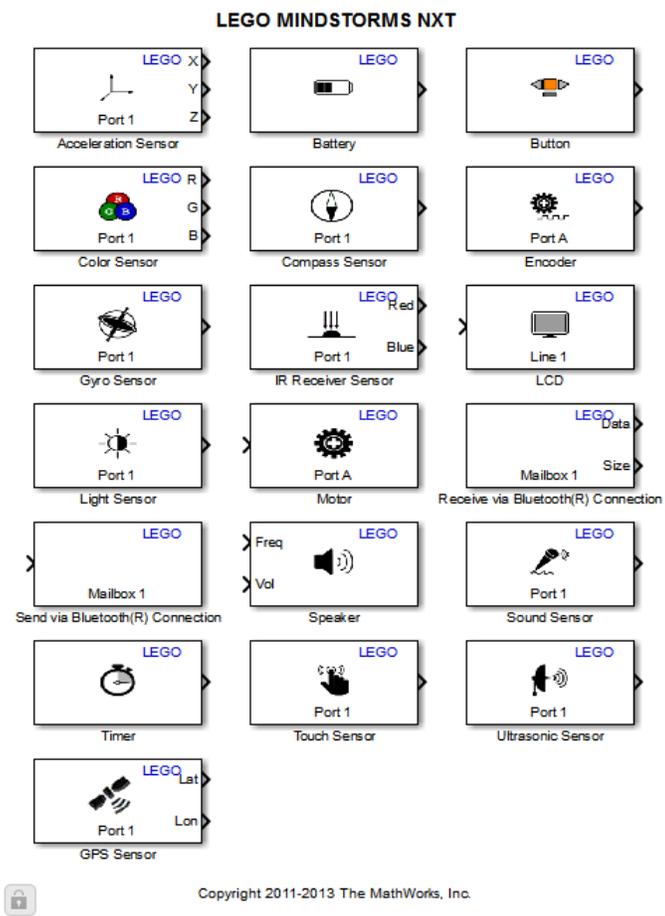


Figura 2.17: Bloques del kit *LEGO Mindstorms NXT*[®] en *Simulink*[®] [55].



Figura 2.18: *Partes de un sistema DAQ* [45].

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales [45].

Entre los componentes clave de un dispositivo DAQ se encuentra el acondicionamiento de señales, convertidor analógico digital (ADC) y el BUS de la PC.

2.5.1. Acondicionamiento de señales

Las señales de los sensores o del mundo exterior pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que es apropiado para entrada a un ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento. Algunos dispositivos DAQ incluyen acondicionamiento de señales integrado diseñado para medir tipos específicos de sensores [45].

2.5.2. Convertidor Analógico Digital (ADC)

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza “muestras” periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software [45].

2.5.3. Bus de la PC

Los dispositivos DAQ se conectan a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos. Los dispositivos DAQ se ofrecen en los buses de PC más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet. Recientemente, los dispositivos DAQ han llegado a estar disponibles para 802.11 Wi-Fi para comunicación inalámbrica. Hay varios tipos de buses y cada uno de ellos ofrece diferentes ventajas para diferentes tipos de aplicaciones [45].

2.6. Herramientas computacionales

Actualmente, existe una gran variedad de herramientas computacionales que facilitan el proceso de diseño, prueba y manufactura de un producto. Tal es el caso de los programas de Dibujo Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés), los cuales se han desarrollado para generar dibujos y modelos tridimensionales para la creación y visualización de prototipos virtuales antes de manufacturar los productos. Solidworks[®] es un programa de este tipo en el cual además de poder generar modelos tridimensionales, es posible generar ensambles de diferentes modelos y analizar el movimiento de los mismos, así como analizar la resistencia mecánica de los prototipos. También integra herramientas para poder generar automáticamente diseños de diferentes elementos comunes tales como engranes, tornillos, arandelas, etc.

Por otra parte, existen programas para facilitar el cálculo y solución de modelos matemáticos los cuales se utilizan en la simulación de sistemas, tal es el caso de Simulink[®] y Mathematica[®]. Simulink[®] es un ambiente para la generación de diagramas de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos. Soporta la simulación, generación automática de código, pruebas continuas y verificación de sistemas embebidos [85].

Simulink[®] provee un editor gráfico, librerías de bloques personalizables, y solucionadores para modelado y simulación dinámica de sistemas. Se encuentra integrado en MATLAB[®], permitiendo que se incorporen algoritmos de MATLAB[®] en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB[®] para su futuro análisis [85].

2.7. Impresión 3D

La impresión 3D es un proceso de manufactura aditiva que consiste en generar un sólido a partir de un modelo digital diseñado en algún programa CAD. Este tipo de proceso es utilizado sobre todo en la fabricación de prototipos (funcional y de concepto) y producción de baja escala [89].

La tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés) es un método de fabricación aditiva patentado por Stratasys. Las impresoras 3D que ejecutan

la tecnología FDM construyen las piezas capa por capa al calentar el material termoplástico hasta un estado casi líquido y lo extruyen según rutas controladas por una computadora [89].

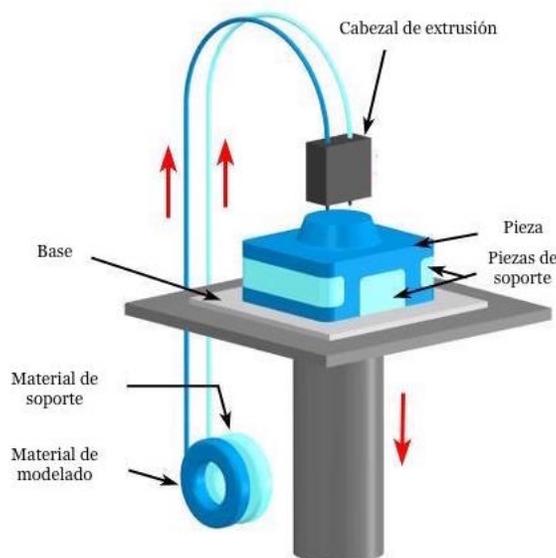


Figura 2.19: *Impresión 3D de Modelado por Deposición Fundida (FDM)* [15].

FDM usa dos materiales para ejecutar un trabajo de impresión: material de modelado, que constituye la pieza terminada, y el material de soporte, que actúa como estructura. Los filamentos de la impresora 3D se transmiten al cabezal de impresión, que se mueve en coordenadas X e Y, a la vez que deposita el material para completar cada capa antes de que la base (o el cabezal) se mueva en el eje Z y comience la capa siguiente, como se muestra en la figura 2.19. Cuando la impresora 3D termina de construir, el usuario retira el material de soporte rompiéndolo o disolviéndolo en agua y la pieza está lista para usar [89].

Algunas ventajas de utilizar la tecnología FDM son:

- ✓ La tecnología es limpia, fácil de usar y adecuada para oficinas.
- ✓ Los termoplásticos de producción compatibles son estables mecánica y medioambientalmente.
- ✓ Las geometrías y las cavidades complejas que podrían ser problemáticas al usar otros sistemas se convierten en tarea fácil gracias a la tecnología FDM.

Para poder manufacturar una pieza con impresión 3D es necesario generar el código G que reconocen las máquinas CNC. Cada máquina CNC tiene su estructura en particular, por lo cual se utilizan diferentes códigos y configuraciones para cada una de las máquinas.

Para generar códigos con la impresora Prusa i3, y otras impresoras 3D, se pueden utilizar diferentes programas que convierten un modelo tridimensional en capas a imprimir y generan

el archivo .g, tales programas son llamados cortadores. Alguno de estos programas son: Slic3r, Simplify3D, Cura, KISSlicer, por mencionar algunos.

Capítulo 3

Desarrollo del exoesqueleto

En la bibliografía se han utilizado distintos tipos de mecanismos para poder hacer retroalimentación háptica a los dedos de la mano. Por la parte de retroalimentación táctil, se han utilizado micromotores los cuales se hacen vibrar a cierta frecuencia para tener la sensación de tacto de un objeto virtual o remoto, la desventaja de este tipo de retroalimentación es que únicamente se tiene estímulos en los dedos que representan sensaciones como tomar un objeto, pero no se realizan restricciones sobre el usuario como sucedería si se tomara un objeto real.

Por otra parte, con la retroalimentación cinestésica se pueden generar tales restricciones para que la interacción sea más real. En los dispositivos que utilizan retroalimentación cinestésica se utiliza generalmente la generación de fuerzas en las yemas de los dedos, sea con elementos pasivos o activos. Algunos elementos pasivos que se utilizan son resortes, pistones, frenos o estructuras flexibles. Sin embargo, el dispositivo se limita a únicamente generar fuerzas de resistencia, sin poder manipular las fuerzas que se ejercen a un usuario que no genere movimiento.

Los dispositivos que utilizan elementos activos para retroalimentar fuerzas sobre el usuario tienen la ventaja de poder controlar la fuerza que se genera al usuario independientemente de que éste se encuentre o no en movimiento, lo cual permite simular una mayor gama de interacciones cuando se aplican estos dispositivos en sistemas hápticos, por ejemplo en realidad virtual o teleoperación. Esto se logra con actuadores de fuerza bilaterales, tales como motores o dispositivos neumáticos.

Debido a que se busca realizar un dispositivo que sea capaz de seguir el movimiento de la mano y a su vez generar fuerzas que permitan mover el dedo, se opta por realizar un guante háptico con retroalimentación de fuerza activa. Para poder realizar la transmisión de las fuerzas generadas por los actuadores bilaterales a la yema de los dedos del usuario, se requiere la utilización de un mecanismo. Los exoesqueletos son los mecanismos que brindan una mejor transmisión de fuerza a la vez que permiten acoplarse a la estructura definida por el esqueleto del usuario.

3.1. Diseño mecánico

En la literatura se identificaron distintos exoesqueletos para la transmisión de fuerzas en la mano, algunos de los cuales se muestran en las figuras 3.1 y 3.2. El guante RML, mostrado en la figura 3.1 (a), trabaja con cables tensores para poder transmitir la fuerza del motor a la punta del dedo, consta de tres eslabones principales con canales para los cables, un motor, un engrane de tornillo sin fin y la base del motor. Para la medición de la posición se integran sensores de efecto hall e imanes que permiten medir el ángulo de cada junta del mecanismo. La fuerza generada por el usuario es medida con sensores de fuerza resistivos (FSR, por sus siglas en inglés).

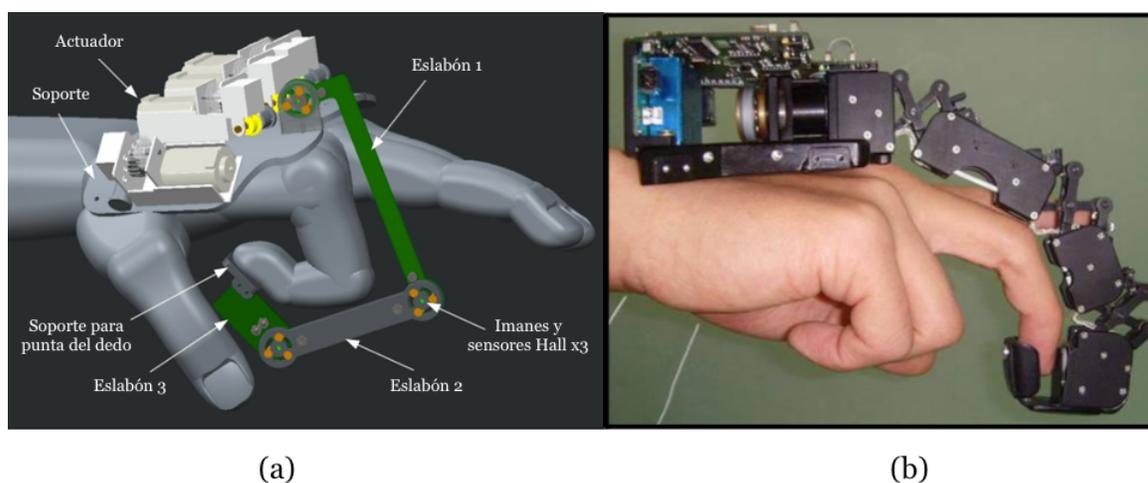


Figura 3.1: (a) *RML-Glove* [98]. (b) *Exoesqueleto con mecanismos de centro remoto* [23].

El exoesqueleto con mecanismos de centro remoto, mostrado en la figura 3.1 (b), tiene tres eslabones principales similares a las falanges del usuario, pero en las articulaciones se incorporan mecanismos de centro remoto para evitar la interferencia entre el exoesqueleto y el dedo del usuario. La fuerza de actuación la genera un motor en el dorso de la mano y la transmisión de fuerza entre las falanges se realiza mediante el mecanismo de centro remoto, la transmisión de fuerza entre cada articulación se realiza mediante cables y poleas dentro de las falanges. La posición se obtiene mediante el encoder del motor debido a que sólo se cuenta con un grado de libertad y la fuerza se mide con sensores de fuerza resistivos.

El exoesqueleto mostrado en la figura 3.2 (a), utiliza las propias falanges del usuario para generar mecanismos de cuatro barras para cada articulación, agregando dos eslabones que se unen a bases acopladas sobre las falanges proximal y media. La fuerza se genera en el dorso de la mano y se transmite mediante los eslabones y engranes en cada una de las falanges. La posición se obtiene mediante un potenciómetro en la base de la mano debido a que tiene un solo grado de libertad.

Festo realizó un exoesqueleto para la mano para el incremento de fuerza o la teleoperación

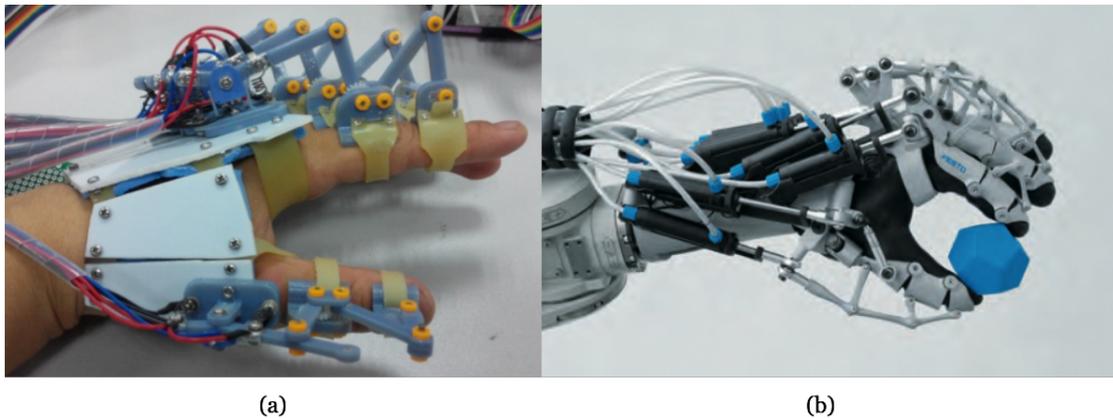


Figura 3.2: (a) Mecanismo de cuatro barras en cada articulación en conjunto con las falanges de los dedos [10]. (b) ExoHand creada por Festo [25].

de una mano mecánica con una estructura similar, éste se muestra en la figura 3.2 (b). Utiliza únicamente eslabones que se acoplan a las falanges de los dedos. La fuerza es generada por pistones y se transmite al dedo del usuario mediante los eslabones acoplados. Utiliza potenciómetros lineares para medir el desplazamiento de los pistones y sensores de presión para medir la fuerza ejercida por los pistones.

Tomando como base los exoesqueletos descritos, se generaron siete propuestas para el diseño mecánico del guante háptico, cuyas características se muestran en la tabla 3.1. Para elegir el mecanismo a utilizar, se evaluaron las propuestas elaborando una matriz de selección [92]. Las propuestas que se generaron se introducen en la parte superior de la matriz y en la parte izquierda de la matriz se introducen los criterios de evaluación, así como la importancia o el peso de cada uno de estos en forma de porcentaje. A continuación se evalúan cada una de las propuestas contra los criterios asignándoles un valor en la escala del 1 al 5. Para tener una mejor evaluación se recomienda evaluar todas las propuestas con respecto a un criterio a la vez.

Una vez que se realiza la evaluación, para cada propuesta, se ponderan las evaluaciones y se suman para obtener la evaluación total. Con la evaluación total se le asigna un número a cada propuesta desde la evaluación más alta, hasta la más baja como se muestra en la tabla 3.2. Analizando los resultados se selecciona la propuesta mejor posicionada.

Las propuestas se evaluaron con base en los siguientes criterios: peso del mecanismo, número de piezas, geometría de las piezas, análisis cinemático, análisis dinámico, facilidad de sensor posición, facilidad de sensor fuerzas, número de actuadores, facilidad para controlar el guante háptico, seguridad del mecanismo. De la evaluación se obtuvo que la estructura mecánica que utiliza mecanismos de centro remoto es la más indicada para desarrollar debido a los criterios antes mencionados.

Tabla 3.1: *Propuestas para el mecanismo del guante háptico.*

	RML Glove	RML Glove	Centro Remoto	Centro Remoto	Mecanismos de 4 barras por articulación	Mecanismos de 4 barras por articulación	ExoHand
Grados de libertad	1	3	1	3	1	3	1
Conexiones mecánicas	2	2	2	2	4	4	4
Número de piezas por dedo	~ 5	< 10	~ 20	~ 20	< 20	< 20	< 15
Número de piezas distintas por dedo	~ 5	< 10	< 10	< 10	< 15	< 15	< 15
Geometría de las piezas	Sencilla	Sencilla	Compleja	Compleja	Sencilla	Sencilla	Compleja
Análisis cinemático	Mecanismo de 6 barras	Mecanismo de 6 barras	Mecanismos de 4 barras	Mecanismos de 4 barras	Mecanismos de 4 barras	Mecanismos de 4 barras	Mecanismo de 12 barras
Número de sensores de posición	3	3	1	3	1	3	1
Número de sensores de fuerza	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1 - 2	3 - 6	3 - 6	3 - 6
Número de actuadores	1	3	1	3	1	3	1

Tabla 3.2: Evaluación de las propuestas para el diseño mecánico del guante háptico.

Criterios	%	RML Glove	RML Glove	Centro Remoto	Centro Remoto	Mecanismos de 4 barras por articulación	Mecanismos de 4 barras por articulación	ExoHand
		Evaluación 1-5	Evaluación 1-5	Evaluación 1-5				
Peso del mecanismo	8	3	2	2	1	3	2	3
Número de piezas	8	4	3	2	2	3	3	3
Geometría de las piezas	5	3	2	2	2	3	3	3
Análisis cinemático	10	3	3	3	3	3	4	2
Análisis dinámico	10	2	3	2	2	2	3	2
Facilidad de sensar posición	10	2	2	4	3	4	3	4
Facilidad de sensar fuerza	12	3	3	3	3	1	1	1
Número de actuadores	15	3	2	3	2	3	2	3
Facilidad de controlar el guante háptico	10	2	2	3	2	1	1	2
Seguridad del mecanismo	12	2	3	3	3	3	3	3
Total		2.66	2.52	2.79	2.36	2.56	2.43	2.56
Posición		2	5	1	7	4	6	3

Al modelar las articulaciones como mecanismos de centro remoto, el exoesqueleto puede seguir el movimiento del dedo sin que interfieran entre sí. Estos mecanismos permiten que los eslabones principales, que simulan las falanges, tengan un movimiento equidistante a las falanges reales de los dedos del usuario. Caso contrario a cuando se modela la articulación como una junta de revoluta simple. Esto se puede observar en la figura 3.3.

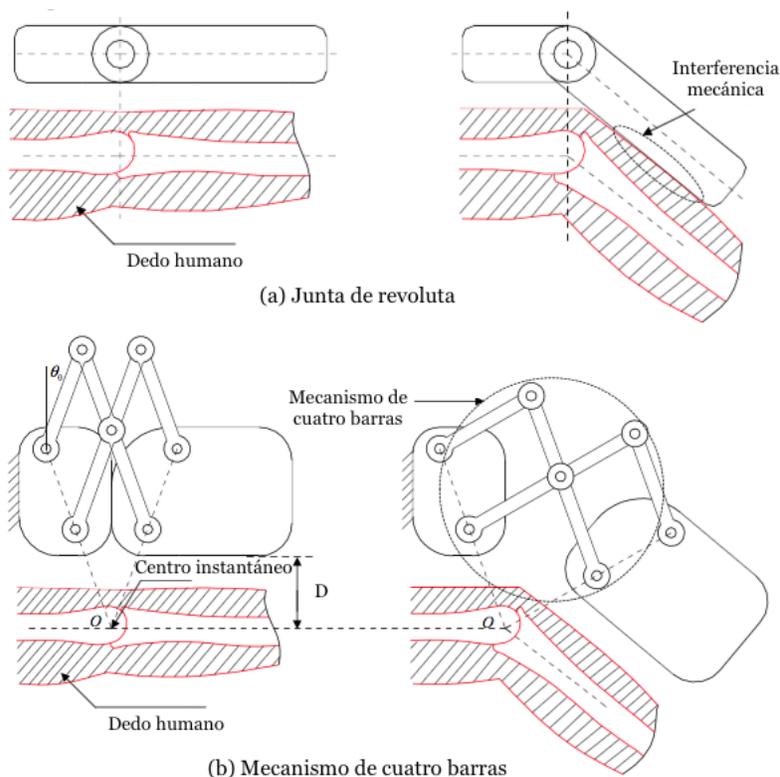


Figura 3.3: (a) Acoplamiento de falanges mediante una junta de revoluta. (b) Acoplamiento de falanges mediante un mecanismo de cuatro barras como junta.[23]

Las longitudes promedio de las falanges reportadas en la tabla 2.1 concuerdan con las medidas del autor, por lo que se tomaron dichas medidas como base y se procedió a generar el diseño del mecanismo en Solidworks[®]. El dibujo técnico de cada uno de los elementos se muestra en el Apéndice A

3.1.1. Dedo mecánico

El mecanismo de centro remoto a utilizar se basa en dos mecanismos paralelos acoplados, como se muestra en la figura 3.4. Este tipo de mecanismo tiene como principal característica que las longitudes de los eslabones opuestos son iguales.

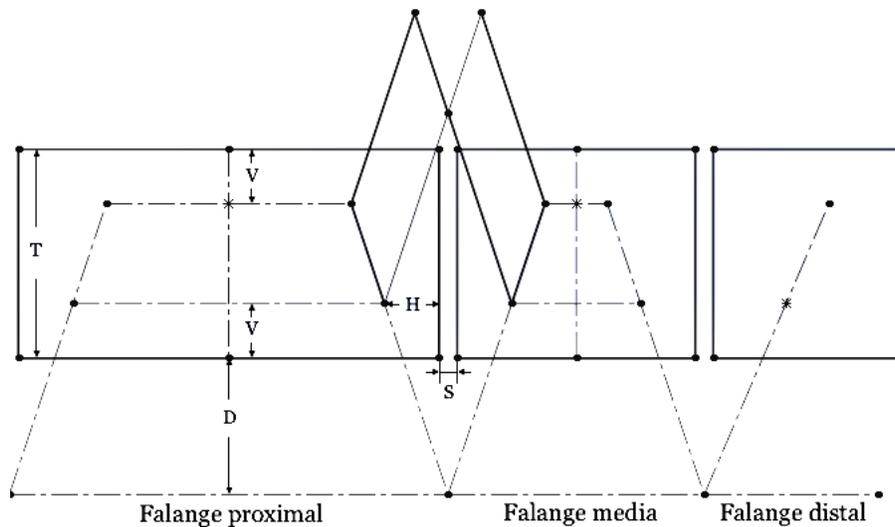


Figura 3.4: *Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo.*

Para obtener las longitudes de los eslabones del mecanismos de cuatro barras para el exoesqueleto del dedo índice, se realizaron las siguientes consideraciones:

- ✓ La distancia (D) entre la base de las falanges mecánicas y las falanges del usuario es de 15 mm, para que el mecanismo no interfiera con el dedo.
- ✓ La separación (S) entre las falanges mecánicas cuando el exoesqueleto se encuentra en extensión es de 2 mm.
- ✓ El alto (T) de las falanges mecánicas es de 23 mm.
- ✓ La distancia vertical (V) entre las juntas y el borde de la falange mecánica es de 6 mm.
- ✓ La distancia horizontal (H) entre las juntas inferiores y el borde de la falange mecánica es de 6 mm.
- ✓ Los eslabones para cada articulación serán de la misma longitud.

Con dichas restricciones, se dibujó el croquis para el dedo índice que se muestra en la figura 3.5. Se observa que del centro de las articulaciones se extienden dos líneas punteadas las cuales atraviesan la falange mecánica, estas líneas sirven como base para dibujar el mecanismo. Se dibujaron las juntas sobre las líneas y se dibujan dos mecanismos paralelos, siendo la distancia entre las juntas los primeros eslabones. Se agregó la restricción de coincidencia

entre los eslabones inferiores y se agregó la colinealidad entre el eslabón inferior derecho del mecanismo izquierdo y el eslabón superior del mecanismo derecho, de igual manera con el eslabón inferior izquierdo del mecanismo derecho y el eslabón superior del mecanismo izquierdo.

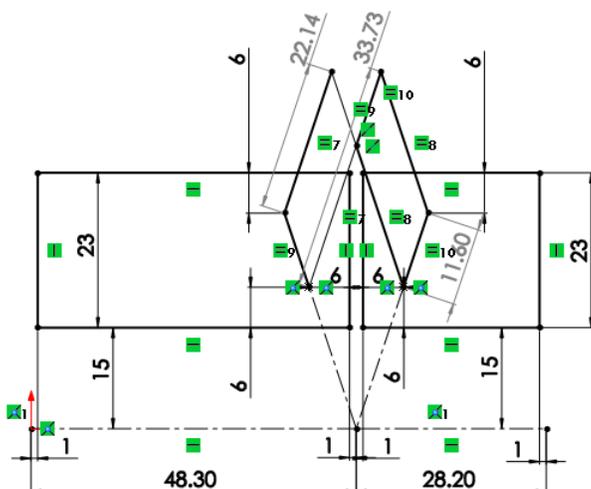


Figura 3.5: *Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo índice.*

Una vez que se dibujó el croquis con las condiciones indicadas y se agregaron las restricciones, el croquis quedó completamente definido, con lo cual se obtuvieron las medidas de los eslabones de uno de los mecanismos paralelos, siendo iguales las medidas del mecanismo izquierdo y del derecho. Las medidas obtenidas se muestran en la figura 3.5. Con estas medidas se prosiguió a realizar los modelos tridimensionales de las falanges mecánicas y de los eslabones, se consideró el ancho del dedo de 22 mm, en vista superior.

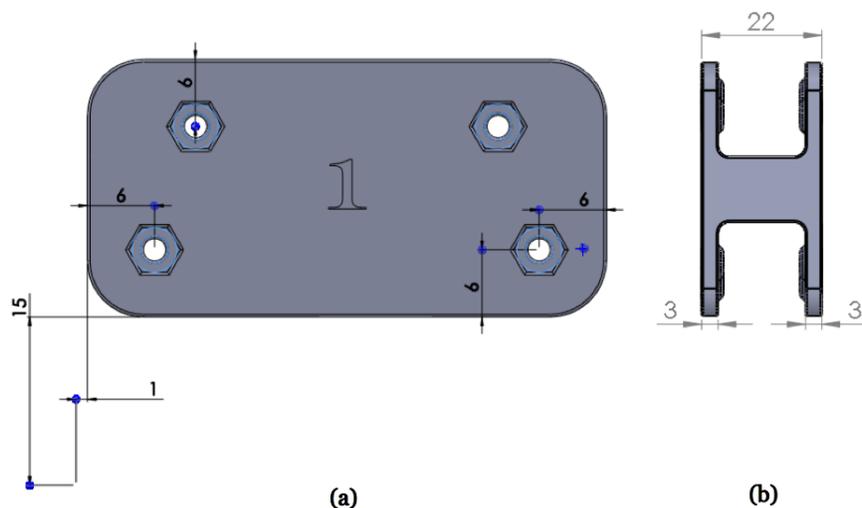


Figura 3.6: *Modelo 3D de la falange proximal mecánica del dedo índice.*

Las falanges se modelaron conforme a la longitud de las falanges del usuario, con las medidas que se muestran en la figura 3.4 y con un espesor de pared de 3 mm. Se realizó la prueba con la falange dividida en dos partes cortada de manera vertical a lo largo del dedo pero el diseño tenía poca estabilidad por lo cual se modeló como una sola pieza. En la figura 3.6 (a) se muestra la vista lateral de la falange proximal del exoesqueleto para el dedo índice, en la figura 3.6 (b) se muestra la vista superior. De igual manera se realizó el modelo tridimensional para la falange media.

La falange distal se modeló de tal manera que se pudiera colocar el sensor de fuerza en la yema del dedo por lo cual se le agregó un soporte donde se introduce la punta del dedo del usuario, como se muestra en la figura 3.7.

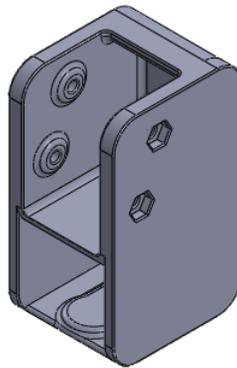


Figura 3.7: *Modelo 3D de la falange distal mecánica del dedo índice.*

Los eslabones del mecanismo de centro remoto son de dos tipos, los eslabones largos que son las uniones entre los dos mecanismos paralelos y los eslabones cortos que sirven para definir a cada uno de los mecanismos paralelos. Los eslabones cortos se modelaron de manera simple como una barra y un soporte como se muestra en la figura 3.8.

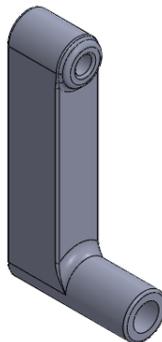


Figura 3.8: *Modelo 3D de un eslabón corto del dedo índice.*

Para la transmisión de la fuerza entre una articulación y otra, se utilizaron bandas síncronas y poleas dentadas integradas a los eslabones largos del mecanismos de centro remoto.

Debido a que el movimiento es opuesto entre los eslabones largos dentro de una falange, la banda se colocó de forma cruzada. Por lo cual se generaron dos tipos de eslabones largos dentro de una falange mecánica, el eslabón conductor y el eslabón conducido para diferenciarlos. Al eslabón conducido se integró un polea dentada normal mientras que al eslabón conductor se integró una polea simple con un soporte dentado para fijar la banda síncrona, en la figura 3.9 se muestran los eslabones largos de la falange proximal.

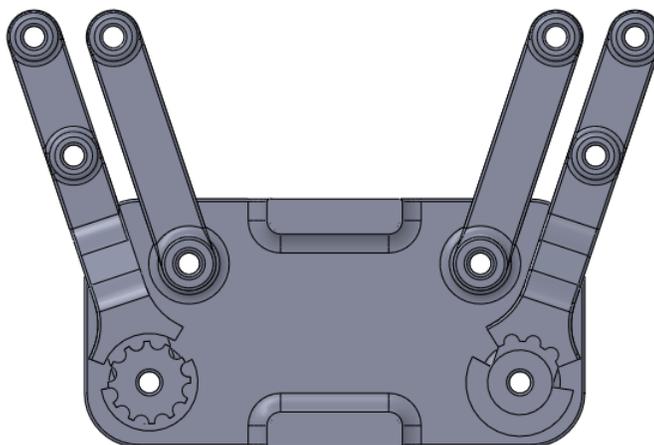


Figura 3.9: *Modelo 3D de la falange proximal mecánica, en vista de sección, con sus eslabones.*

Las poleas de los eslabones largos de la falange proximal tienen el mismo diámetro de paso debido a la relación existente entre el movimiento de la falange proximal y la falange media, pero debido a que la falange distal tiene menor movimiento angular que la falange media, las poleas de los eslabones largos de la falange media tienen distinto diámetro de paso, como se muestra en la figura 3.10

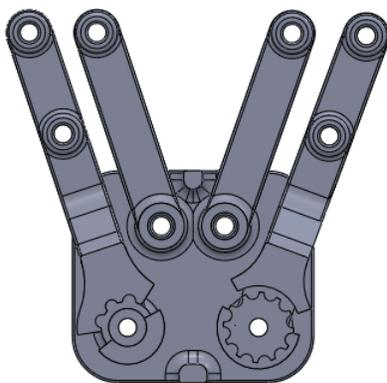


Figura 3.10: *Modelo 3D de la falange media mecánica, en vista de sección, con sus eslabones.*

De la misma forma en la que se realizó el modelo del exoesqueleto para el dedo índice,

se obtuvieron las medidas para el exoesqueleto del dedo medio (figura 3.11) y se realizó el modelo tridimensional con las siguientes consideraciones:

- ✓ La distancia (D) entre la base de las falanges mecánicas y las falanges del usuario es de 15 mm, para que el mecanismo no interfiera con el dedo.
- ✓ La separación (S) entre las falanges mecánicas cuando el exoesqueleto se encuentre en extensión es de 2 mm.
- ✓ El alto (T) de las falanges mecánicas es de 23 mm.
- ✓ La distancia vertical (V) entre las juntas y el borde de la falange mecánica es de 7 mm.
- ✓ La distancia horizontal (H) entre las juntas inferiores y el borde de la falange mecánica es de 8 mm.
- ✓ Los eslabones para cada articulación serán de la misma longitud.

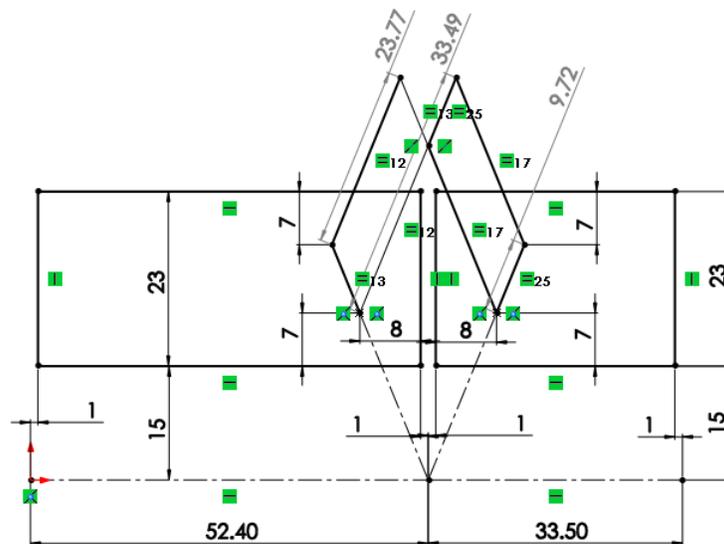


Figura 3.11: *Mecanismo de centro remoto para el exoesqueleto del dedo medio.*

3.1.2. Actuación

En [77] se menciona que la carga nominal o fuerza sobre el usuario para una aplicación cinestésica se encuentra en el rango de 5 a 100 N. Por lo cual, se realizó el cálculo del par de torsión requerido en la base del exoesqueleto para generar una fuerza de magnitud $f_t = 5N$ sobre la punta del dedo del usuario y con dicho valor seleccionar el actuador adecuado. Para realizar el cálculo, se omite la masa de los eslabones de los mecanismos de centro remoto, tomando únicamente en consideración la masa de las falanges mecánicas, como se muestra en la figura 3.12.

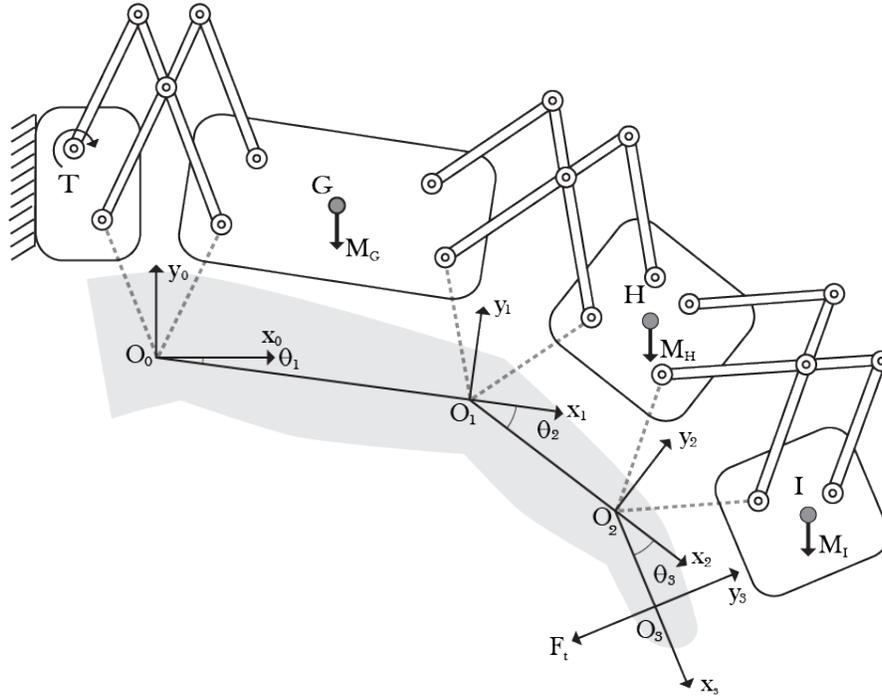


Figura 3.12: Diagrama de fuerzas del mecanismo para el exoesqueleto.

Al diseñar el exoesqueleto con un sólo grado de libertad, los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 para las falanges del usuario no tienen movimientos independientes, las magnitudes de estos ángulos son proporcionales considerando el rango de movimiento para cada falange (tabla 2.2). El espacio de trabajo que se define para el exoesqueleto es de 0° a 90° para la falange proximal, 0° a 90° para la falange media y 0° a 70° para la falange distal. Por lo cual, los ángulos se relacionan mediante las ecuaciones 3.1.2.0.1.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta \\ \theta_2 &= K_1\theta_1 = \theta \\ \theta_3 &= K_2\theta_1 = \frac{70}{90}\theta\end{aligned}\tag{3.1.2.0.1}$$

El cálculo del par de torsión se realizó mediante el principio de trabajo virtual [23], usando la ecuación 3.1.2.0.2.

$$T_0 \frac{d}{dt}\theta(t) = \Delta W(F_t) + \Delta W(F_{gravedad}) + \Delta W(F_{inercia})\tag{3.1.2.0.2}$$

donde $\Delta W(F_t)$ es el trabajo virtual generado por la fuerza F_t , $\Delta W(F_{gravedad})$ es el trabajo virtual generado por la gravedad y $\Delta W(F_{inercia})$ es el trabajo virtual generado por la fuerza inercial de las falanges mecánicas.

Para determinar la posición y orientación de los sistemas de coordenadas para las falanges de los dedos se utilizan matrices de transformación. Siendo l_1 la longitud de la falange proximal, l_2 la longitud de la falange media y l_3 la longitud de la falange distal, se calculan las

matrices de transformación y los vectores de los sistemas de coordenadas con respecto al origen.

Se calculan los vectores para los sistemas de coordenadas unidos por las falanges del usuario como se muestra a continuación

$${}^0\overrightarrow{O_0O_1} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta) \\ l_1 \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.3)$$

$${}^1\overrightarrow{O_1O_2} = \begin{bmatrix} l_2 \cos(K_1\theta) \\ l_2 \sin(K_1\theta) \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.4)$$

$${}^2\overrightarrow{O_2O_3} = \begin{bmatrix} l_3 \cos(K_2\theta) \\ l_3 \sin(K_2\theta) \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.5)$$

Se construyen las matrices de transformación para los sistemas de coordenadas

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & l_1 \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & l_1 \sin(\theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.6)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(K_1\theta) & -\sin(K_1\theta) & l_2 \cos(K_1\theta) \\ \sin(K_1\theta) & \cos(K_1\theta) & l_2 \sin(K_1\theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.7)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(K_2\theta) & -\sin(K_2\theta) & l_3 \cos(K_2\theta) \\ \sin(K_2\theta) & \cos(K_2\theta) & l_3 \sin(K_2\theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.8)$$

Para obtener la matriz de transformación del segundo sistema de coordenadas con respecto al origen, se multiplican las matrices de transformación 3.1.2.0.6 y 3.1.2.0.7.

$${}^0_2T = {}^0_1T {}^1_2T \quad (3.1.2.0.9)$$

Para obtener la matriz de transformación del tercer sistema de coordenadas con respecto al origen se multiplican las matrices de transformación 3.1.2.0.6, 3.1.2.0.7 y 3.1.2.0.8, o bien las matrices 3.1.2.0.9 y 3.1.2.0.8.

$${}^0_3T = {}^0_2T {}^2_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (3.1.2.0.10)$$

Con las matrices de transformación obtenidas es posible transformar un vector en cualquiera de los sistemas de coordenadas a un vector en el sistema de coordenadas del origen.

El trabajo virtual de la fuerza se define de la siguiente manera:

$$\Delta W(\vec{F}_t) = \vec{F}_t \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overrightarrow{O_0O_3} \quad (3.1.2.0.11)$$

Por lo cual es necesario obtener el vector del punto de aplicación de la fuerza del usuario. Éste se puede obtener multiplicando la matriz de transformación del segundo sistema de

coordenadas y el vector extendido de posición del tercer sistema de coordenadas con respecto al segundo, el vector extendido se obtiene agregando un valor de 1 para la escala.

$$\begin{bmatrix} {}^0\overline{O_0O_3} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0_2T \begin{bmatrix} {}^2\overline{O_2O_3} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.12)$$

La fuerza aplicada por el usuario es perpendicular a la falange distal para obtener el vector de fuerza, se crea un vector unitario perpendicular al eje x del tercer sistema de coordenadas, de la matriz de transformación 0_3T se obtiene la orientación del vector unitario y se multiplica por la magnitud de la fuerza (f_t) obteniendo así el vector de la fuerza, como se muestra en la ecuación 3.1.2.0.13.

$${}^0\vec{F}_t = f_t \begin{bmatrix} {}^0_3T_{(2,1)} \\ -{}^0_3T_{(1,1)} \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.13)$$

Al derivar el vector ${}^0\overline{O_0O_3}$ y realizar el producto punto entre la derivada y el vector de fuerza, se obtiene el trabajo virtual de la fuerza. Los cálculos algebraicos se realizaron con la herramienta computacional *Mathematica*[®]. Siendo ω la derivada con respecto al tiempo de θ , es decir la velocidad angular.

$$\Delta W(\vec{F}_t) = -f_t((1 + K_1 + K_2)l_3 + (1 + K_1) \cos(K_2\theta) + l_1 \cos((K_1 + K_2)\theta))\omega \quad (3.1.2.0.14)$$

El trabajo virtual generado por la gravedad se describe con la ecuación 3.1.2.0.15.

$$\Delta W(F_{gravedad}) = M_G \vec{g} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overline{O_0G} + M_H \vec{g} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overline{O_0H} + M_I \vec{g} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overline{O_0I} \quad (3.1.2.0.15)$$

Por lo que se tiene que obtener los vectores de los centros de masa de cada una de las falanges mecánicas, así como sus primeras derivadas. Al modelar las falanges mecánicas de forma simétrica, el centro de masa se encuentra en el centro geométrico de la pieza. Siendo h la distancia perpendicular entre la falange del usuario y el centro de masa de las falanges mecánicas, se obtienen los vectores de los centros de masa de cada una de las falanges.

$${}^1\overline{O_1G} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}l_1 \\ h \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.16)$$

$${}^2\overline{O_2H} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}l_2 \\ h \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.17)$$

$${}^3\overline{O_3I} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}l_3 \\ h \end{bmatrix} \quad (3.1.2.0.18)$$

Transformando los vectores de los centros de masa de sus respectivos sistemas de coordenadas al sistema de coordenadas del origen:

$${}^0\overline{O_0G} = {}^0_1T {}^1\overline{O_1G} \quad (3.1.2.0.19)$$

$${}^0\overrightarrow{O_0\dot{H}} = {}^0T {}^2\overrightarrow{O_2\dot{H}} \quad (3.1.2.0.20)$$

$${}^0\overrightarrow{O_0\dot{I}} = {}^0T {}^3\overrightarrow{O_3\dot{I}} \quad (3.1.2.0.21)$$

Multiplicando las masas por la gravedad y realizando el producto punto con la derivada de los vectores de los centros de masa de cada falange mecánica, se obtiene el trabajo virtual generado por la fuerza de gravedad.

$$\begin{aligned} \Delta W(F_{gravedad}) = & \frac{1}{2}g(-l_1(M_G + 2(M_H + M_I)) \cos(\theta(t)) \\ & -(1 + K_1 + K_2)l_3M_I \cos((1 + K_1)\theta(t)) + 2hM_H \sin((1 + K_1)\theta(t))) \\ & + 2h(1 + K_1 + K_2)\theta(t))\omega \end{aligned} \quad (3.1.2.0.22)$$

El trabajo virtual generado por la inercia de las falanges mecánicas se describe de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Delta W(F_{inercia}) = & M_G \frac{d^2}{dt^2} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{G}} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{G}} + M_H \frac{d^2}{dt^2} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{H}} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{H}} + M_I \frac{d^2}{dt^2} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{I}} \cdot \frac{d}{dt} {}^0\overrightarrow{O_0\dot{I}} \\ & + (I_G + K_1I_H + K_2I_I) \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \cdot \frac{d}{dt} \theta(t) \end{aligned} \quad (3.1.2.0.23)$$

donde I_G , I_H e I_I son la inercia de las falanges mecánicas. Como ya se conocen los vectores de los centros de masa y su primera derivada, solo resta realizar la segunda derivada de los vectores de los centros de masa. Realizando los cálculos en *Mathematica*[®] y siendo la aceleración angular (α) la segunda derivada de la posición angular (θ), se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta W(F_{inercia}) = & \frac{1}{4}\omega(2(-2h(K_1 + K_2)(1 + K_1 + K_2)l_1M_I \cos((K_1 + K_2)\theta(t)) \\ & +(1 + K_1)(-2hK_1l_1M_H \cos(K_1\theta(t)) - K_1l_1l_2(M_H + 2M_I) \sin(K_1\theta(t)) \\ & - K_2(1 + K_1 + K_2)l_2M_I(2h \cos(K_2\theta(t)) + l_3 \sin(K_2\theta(t)))) \\ & - (K_1 + K_2)(1 + K_1 + K_2)l_1l_3M_I \sin((K_1 + K_2)\theta(t)))\omega^2 \\ & +(4I_G + 4I_HK_1 + 4I_IK_2 + l_1^2M_G + (4l_1^2 + l_2^2 + K_1(2 + K_1)(4h^2 + l_2^2))M_H \\ & + 4h^2(M_G + M_H) + (4(h^2(1 + K_1 + K_2)^2 + l_1^2 + (1 + K_1)^2l_2^2) \\ & + (1 + K_1 + K_2)^2l_3^2)M_I + 4(1 + K_1 + K_2)l_1l_3M_I \cos((K_1 + K_2)\theta(t)) + \\ & 4(1 + K_1)(l_1l_2(M_H + 2M_I) \cos(K_1\theta(t)) - 2hl_1M_H \sin(K_1\theta(t)) \\ & + (1 + K_1 + K_2)l_2M_I(l_3 \cos(K_2\theta(t)) - 2h \sin(K_2\theta(t)))) \\ & - 8h(1 + K_1 + K_2)l_1M_I \sin((K_1 + K_2)\theta(t)))\alpha \end{aligned} \quad (3.1.2.0.24)$$

De la ecuación 3.1.2.0.2 que describe el sistema, se puede observar que cada uno de los trabajos virtuales generados contienen el factor ω , por lo cual al despejar la ecuación para obtener el par de torsión se puede eliminar el factor ω .

$$T_0 = \frac{1}{\omega}(\Delta W(F_t) + \Delta W(F_{gravedad}) + \Delta W(F_{inercia})) \quad (3.1.2.0.25)$$

Una vez que se tiene el modelo matemático del sistema, se evalúa numéricamente. En la tabla 3.3 se concentran los valores de las constantes en el modelo matemático.

Tabla 3.3: *Constantes del modelo matemático del par de torsión del guante háptico.*

Constante	Valor	Unidades
l_1	52.4	mm
l_2	33.5	mm
l_3	21.3	mm
K_1	1	-
K_2	70/90	-
M_G	8.48	g
M_H	4.77	g
M_I	5.17	g
I_G	1901.1	gmm^2
I_H	621.66	gmm^2
I_I	624.89	gmm^2
h	26.5	mm
g	9.81	m/s^2
f_t	5	N

En *MATLAB*[®] se generó un programa con las ecuaciones obtenidas para calcular el par de torsión dependiendo de la fuerza f_t deseada y del ángulo en el que se encuentra el dedo. El programa de *MATLAB*[®] y el *notebook* de *Mathematica*[®] para los cálculos algebraicos se muestran en el Apéndice B. Con el programa se obtuvo un par de torsión máximo de $0.918Nm$ cuando el dedo se encuentra extendido. También se pudo notar que los pares de torsión generados por la gravedad y la inercia son considerablemente pequeños e incluso podrían llegar a ser despreciables en comparación con el par de torsión aplicado al usuario debido a la fuerza f_t .

Con base en los resultados obtenidos, se tomó la decisión de utilizar micromotores de corriente directa de alta potencia con caja de engranes. Esto debido a que son de tamaño reducido, tienen poco peso y con una caja reductora 1000 : 1, se tiene el par de torsión suficiente para generar la fuerza deseada sobre el dedo del usuario.

3.1.3. Base del exoesqueleto

Se modeló la base del exoesqueleto para que se colocara en el dorso de la mano, así como también se diseñaron bases individuales para acoplar los exoesqueletos de los dedos y los micromotores, como se muestra en la figura 3.13. Las bases se diseñaron de tal manera de que un eslabón se acoplara en el eje del micromotor y el micromotor se fijara directamente en la base del dedo en la posición de la junta del eslabón, el eslabón se muestra en la figura 3.14. También se diseñaron los montajes para fijar los motores mostradas en la figura 3.15, basados en los montajes de *Pololu* mostrados en [70].

La base del dorso para colocar los exoesqueletos de los dedos y sus bases se diseñó toman-

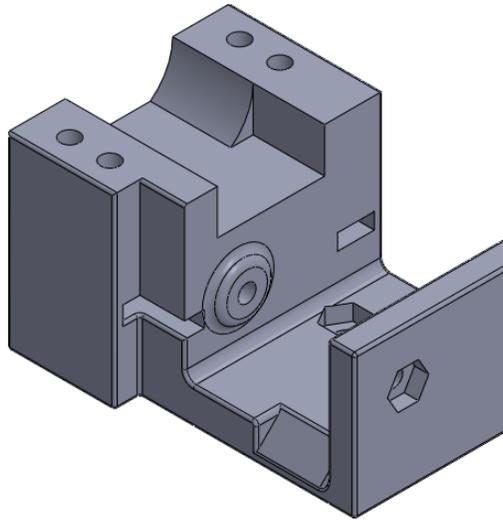


Figura 3.13: *Base del exoesqueleto del dedo índice.*

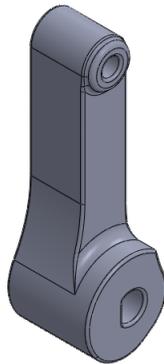


Figura 3.14: *Eslabón corto para la transmisión del par de torsión del motor al exoesqueleto.*

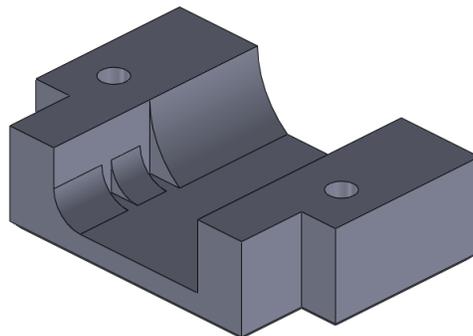


Figura 3.15: *Montaje para fijación de motor.*

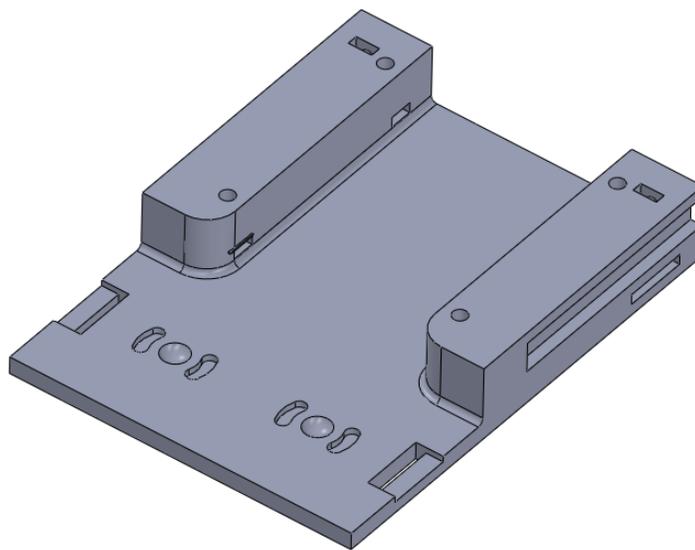


Figura 3.16: *Base del dorso para la colocación de los componentes del sistema.*

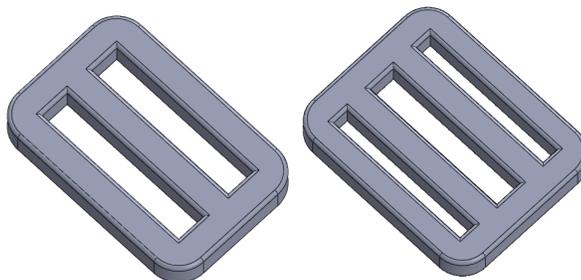


Figura 3.17: *Hebillas para el ajuste de las correas de sujeción de la base del dorso.*

do en cuenta la forma de sujetarse a la mano y la forma de colocar el circuito electrónico que requiere el sistema. Adicionalmente se agregó un grado de libertad no actuado en cada dedo para permitir la abducción y adducción de los dedos mediante un balín como pivote y tornillos con rieles para limitar el movimiento y sujetar las bases de los exoesqueletos de los dedos a la base del dorso, como se muestra en la figura 3.16. Cabe mencionar que el modelo de la base requirió de varias iteraciones en el proceso de diseño y es el último modelo en ser terminado debido a que se requirió que los demás subsistemas hayan sido definidos completamente.

Para sujetar la base del dorso a la mano, se utilizan correas que se sujetan a la base y se ajustan mediante las hebillas que se muestran en la figura 3.17.

3.2. Manufactura del exoesqueleto

El exoesqueleto para el guante háptico, se manufacturó utilizando la técnica de impresión 3D FDM, con una impresora Prusa i3 como se muestra en la figura 3.18. Las características de la impresora 3D Prusa i3 son[75]:

- ✓ Área de impresión de 800cm^3 (200 x 200 x 200 mm)
- ✓ Extrusor de 0.4 mm
- ✓ Filamento de 1.75mm
- ✓ Altura de capa desde 0.1 mm
- ✓ Cama de impresión caliente para evitar el pandeo en la impresión 3D
- ✓ Velocidad máxima de impresión de 200 mm/s
- ✓ Soporta los materiales: PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Nylon, entre otros.
- ✓ Tamaño de paso en los ejes X/Y de 10 micrometros

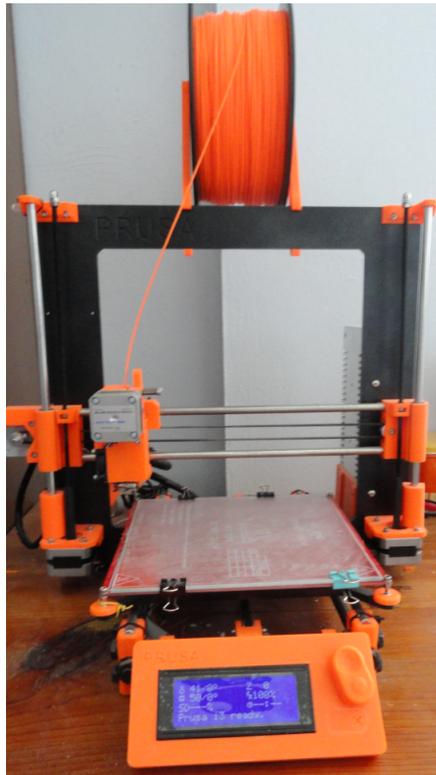


Figura 3.18: *Impresora 3D modelo Prusa i3.*

Los materiales que se utilizan con mayor frecuencia son el ABS y el PLA. Se utilizó el termoplástico ABS debido a sus propiedades mecánicas, las cuales son mejores que las del

PLA. Para poder realizar la impresión de cada una de las piezas, se sigue el procedimiento que se describe a continuación.

3.2.1. Preparación de la cama de impresión

Para poder realizar la impresión de plástico ABS sobre una cama de vidrio templado, se requiere preparar previamente la cama de vidrio. Esto para asegurar que el material de impresión se adhiera a la superficie del vidrio y evitar que la pieza se despegue o se pandee durante la impresión de la misma.

Para esto, se limpia el vidrio con agua tibia y jabón, y se deja secar. Posteriormente, se aplica uniformemente una capa de pegamento en barra a la cama de vidrio y por último se aplica con un rociador una capa de ABS disuelto en acetona en toda la superficie del vidrio. Con esto se asegura que el material de impresión se adhiera correctamente a la superficie del vidrio.

3.2.2. Preparación del archivo digital

Se guarda el modelo tridimensional realizado en SolidWorks en formato STL, para que el cortador lo reconozca. En un programa para generar el código G, tal es el caso del programa Slic3r, se importa el archivo .stl y se coloca la pieza en la posición y orientación que se desee, como se muestra en la figura 3.19. Cabe mencionar que el programa Slic3r se encuentra previamente configurado para poder ser utilizado con la impresora 3D Prusa i3, la configuración y los controladores de la impresora se pueden descargar directamente de la página del fabricante [76].

Dependiendo de la geometría de la pieza, se modifican las propiedades de impresión, tales como porcentaje de relleno, material de soporte, número de contornos y altura de la capa, como se muestra en la figura 3.20. Las especificaciones para cada una de las piezas del exoesqueleto se muestran en el Apéndice C.

Una vez especificadas las propiedades, la posición y la orientación de la pieza. Se genera el archivo .gcode y se guarda en una tarjeta microSD para su posterior manufactura en la impresora 3D.

3.2.3. Impresión de la pieza

Para la impresión de la pieza en 3D, se enciende la impresora 3D, se inserta la tarjeta con el archivo .gcode y se espera a que la impresora reconozca la tarjeta. Se calienta el extrusor y la cama de impresión a las temperaturas adecuadas para el material ABS como se muestra en la figura 3.21, siendo estas de 255 y 100 grados Celsius, respectivamente.

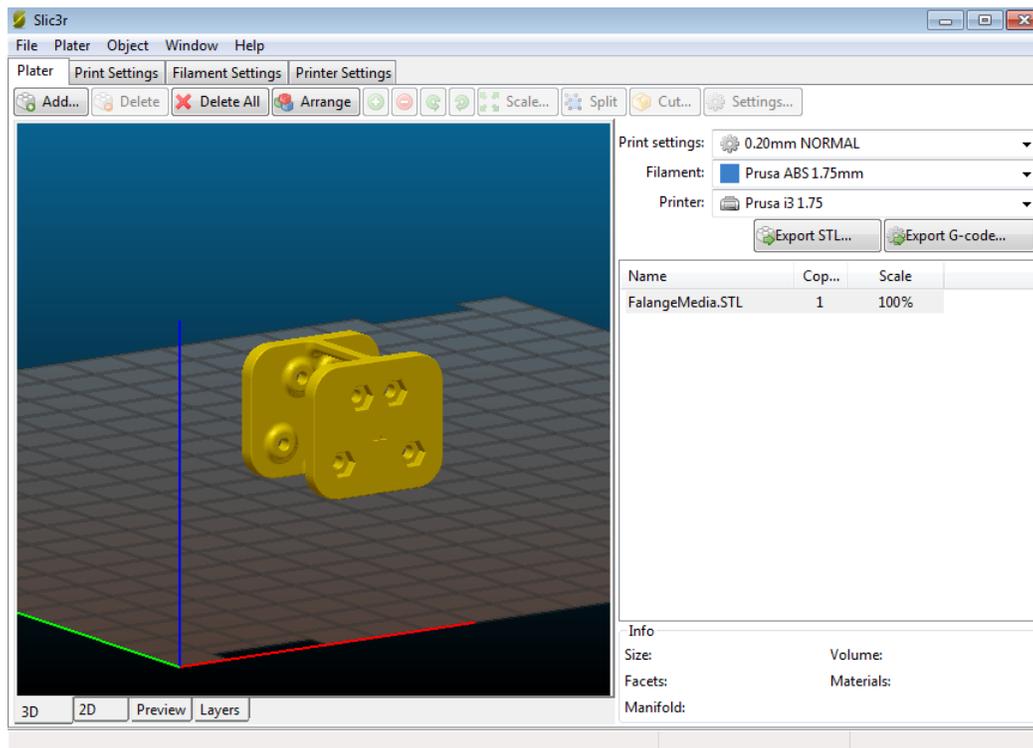


Figura 3.19: Programa Slic3r.

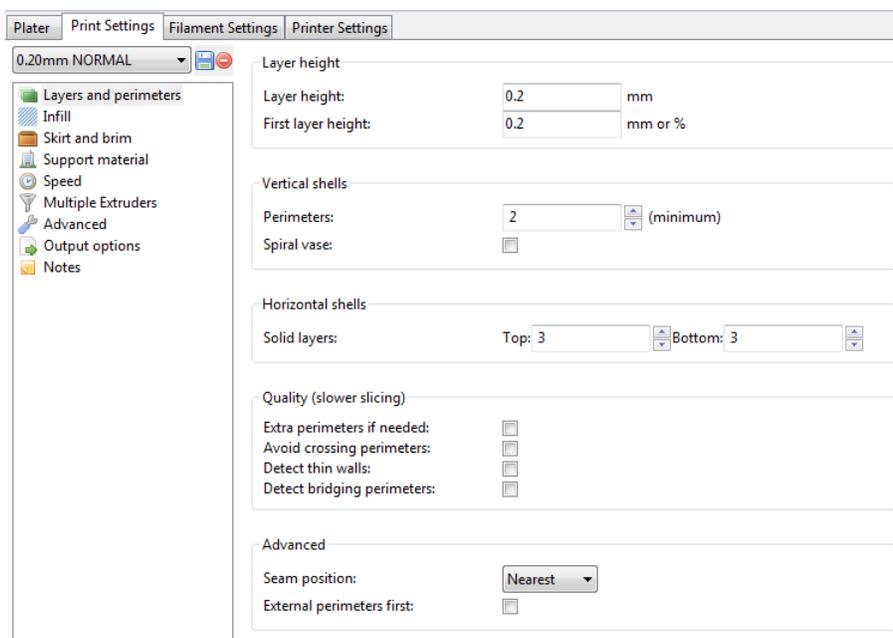


Figura 3.20: Propiedades de impresión.



Figura 3.21: *Temperaturas de precalentado para los materiales de impresión 3D en la impresora Prusa i3.*

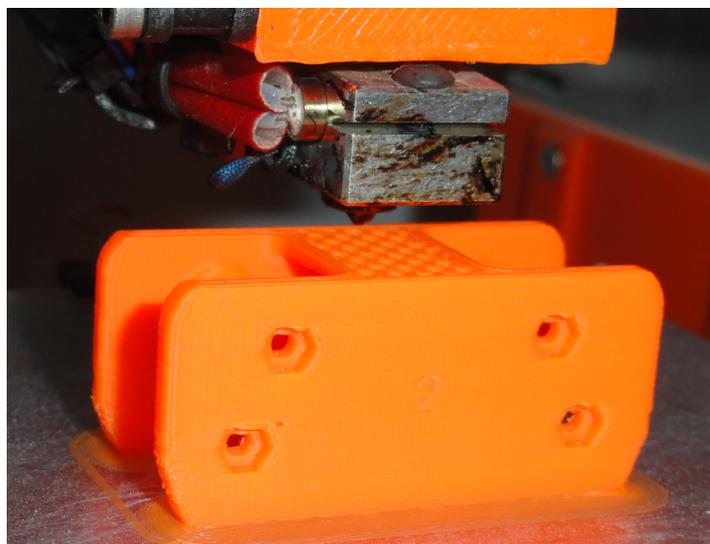


Figura 3.22: *Impresora 3D imprimiendo.*

Una vez caliente la impresora 3D, se selecciona el archivo a imprimir y la impresora comenzará a realizar la impresión. Primero moverá el extrusor a la posición de inicio (cero máquina) y comenzará a moverse trazando una línea de seguridad mientras extruye material para garantizar que al imprimir la pieza, exista material dentro del extrusor. Para evitar inconvenientes o fallas durante la impresión de la pieza, se debe de observar con detalle que el material se extruya de manera correcta en las primeras capas de impresión y que estas se adhieran a la cama de la impresora 3D. En la figura 3.22 se muestra el proceso de impresión de una pieza.

3.2.4. Proceso posterior a la impresión 3D

Si la pieza que se imprimió requirió de material de soporte, como se muestra en la figura 3.23, éste se tiene que retirar manualmente de la pieza impresa. Para esto, el programa cortador genera un patrón fácil de retirar para el material de soporte, de tal forma que este se

despega de la pieza al aplicar un poco de fuerza sobre el material de soporte.

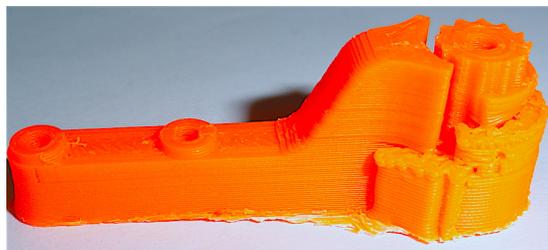


Figura 3.23: *Pieza impresa en 3D con material de soporte.*

Una vez retirado las partes que se despegan con facilidad, en ocasiones es necesario detallar la pieza con una herramienta con filo, por lo cual se procede a quitar aquel material excedente para finalmente obtener la pieza terminada. En la figura 3.24 se muestran las piezas terminadas para el exoesqueleto del dedo índice.



Figura 3.24: *Piezas impresas en 3D para el exoesqueleto del dedo índice.*

3.3. Ensamble del exoesqueleto

Para el ensamble del exoesqueleto, se utilizan tornillos M2x0.40 de 20 mm y 16 mm de longitud, así como bandas síncronas con paso de 2 mm. Las bandas síncronas se pueden comprar o conseguir de impresoras, solo se tienen que recortar de tal manera que tengan un ancho de 2 mm. Los elementos mencionados se muestran en la figura 3.25.

Para facilitar el ensamble de las bandas, se colocan dos tramos de banda síncrona en cada falange. Para esto, se colocan los eslabones largos de tal manera que se encuentren en la posición para que el dedo este extendido, se mide la longitud de la banda a colocar, teniendo en cuenta que la banda se coloca de forma cruzada, y se corta. Se retiran los eslabones y se



Figura 3.25: Tornillos $M2 \times 0.40$ y banda síncrona con paso de 2mm.



Figura 3.26: Colocación de bandas síncronas en los eslabones.

coloca la banda de manera adecuada, asegurándola con anillos de metal en los extremos para evitar que se deslice, como se muestra en la figura 3.26. Se vuelven a introducir los eslabones largos dentro de la falange mecánica y se colocan los tornillos para que los eslabones se muevan entorno a estos.

Se colocan los eslabones cortos con sus respectivas juntas y con tornillos se conectan los eslabones de las falanges para darle forma a los mecanismos de centro remoto, teniendo finalmente ensamblado el dedo mecánico, como se muestra en la figura 3.27.

Para ensamblar la base de los exoesqueletos de los dedos, se colocan los motores en sus respectivas posiciones y se fijan con tornillos, se colocan los eslabones largos para cada uno de los dedos y una vez ensamblados los dedos mecánicos del exoesqueleto, se conectan los eslabones para darle forma a los mecanismos de centro remoto. Finalmente, se coloca un balín entre la base de los dedos y la base del dorso y se atornillan para restringir su movimiento, el ensamble final se muestra en la figura 3.28.

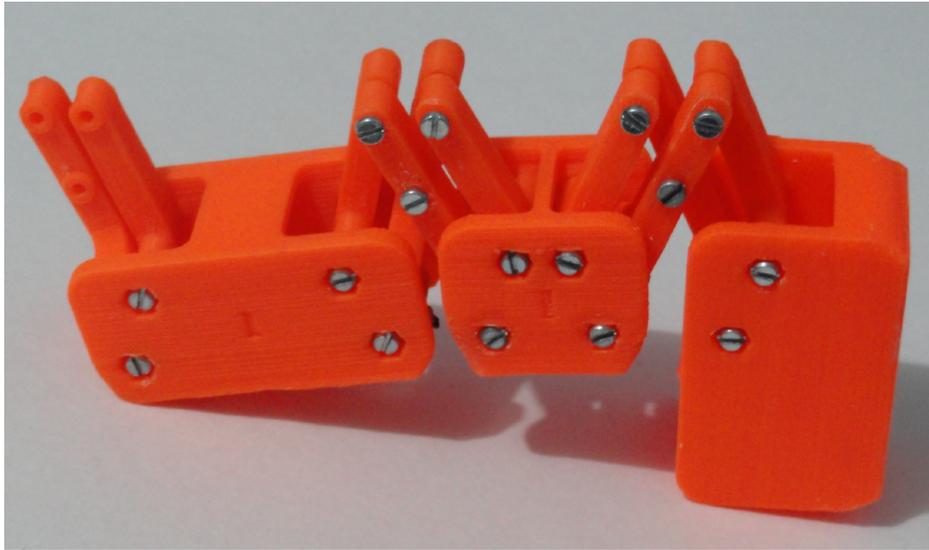


Figura 3.27: *Exoesqueleto para el dedo índice ensamblado.*

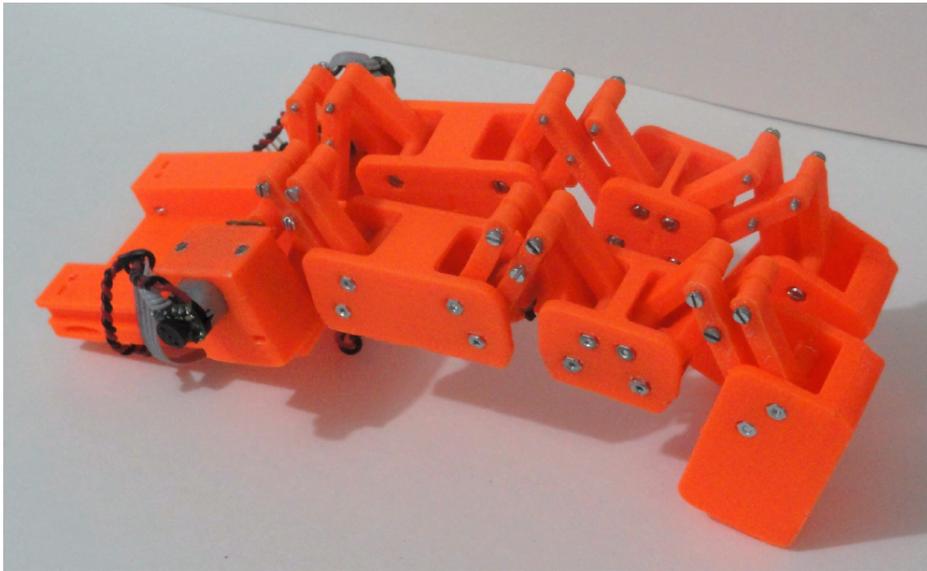


Figura 3.28: *Subsistema mecánico completamente ensamblado.*

Capítulo 4

Instrumentación del guante háptico

El subsistema de instrumentación tiene como principales funciones el sensar la fuerza de los dedos y detectar la posición de los dedos, así como realizar la comunicación entre el guante háptico y la computadora en tiempo real. Por tal motivo, se seleccionaron sensores de fuerza resistivos (FSR) para detectar la fuerza del usuario y micromotores con decodificadores ópticos (encoders) acoplados a estos. Como elemento redundante para medir la posición del dedo, se agregaron presets. Además se agregaron dos potenciómetros, uno por cada dedo, para calibrar el sensor de fuerza. Para la comunicación entre la computadora y el guante háptico se utilizó una tarjeta de adquisición de datos, la cual se describe más adelante.

4.1. Sensores de fuerza y posición

Los sensores de fuerza resistivos cambian su resistencia dependiendo de la fuerza que se aplica sobre estos, por lo cual al integrarlos a un circuito divisor de voltaje, se puede convertir ese cambio de resistencia en un cambio de voltaje. Si se conecta el FSR a voltaje positivo en el divisor de voltaje, el voltaje en el nodo intermedio aumenta conforme la fuerza sobre el FSR aumenta, en caso contrario cuando la fuerza aumenta sobre el sensor, el voltaje disminuye. En la figura 4.1 se observa el circuito de acondicionamiento utilizado para sensar la fuerza sobre FSR.

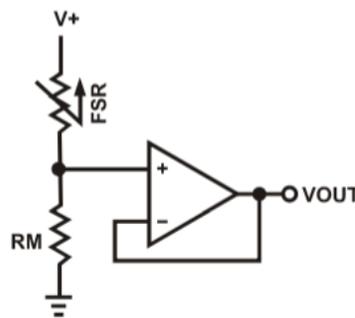


Figura 4.1: *Circuito de acondicionamiento de señal del sensor FSR*[87].

De la hoja de datos del FSR, se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 4.2. En la cual se observa la relación entre el voltaje y la fuerza al variar la resistencia (RM) del divisor de voltaje que se muestra en la figura 4.1 alimentado con 5 volts. Como se puede observar el comportamiento del sensor es logarítmico. Debido a que se desea trabajar entre los valores de fuerza de 0 y 5 N, se elige la resistencia de $100k\Omega$ para el circuito de sensado de la fuerza.

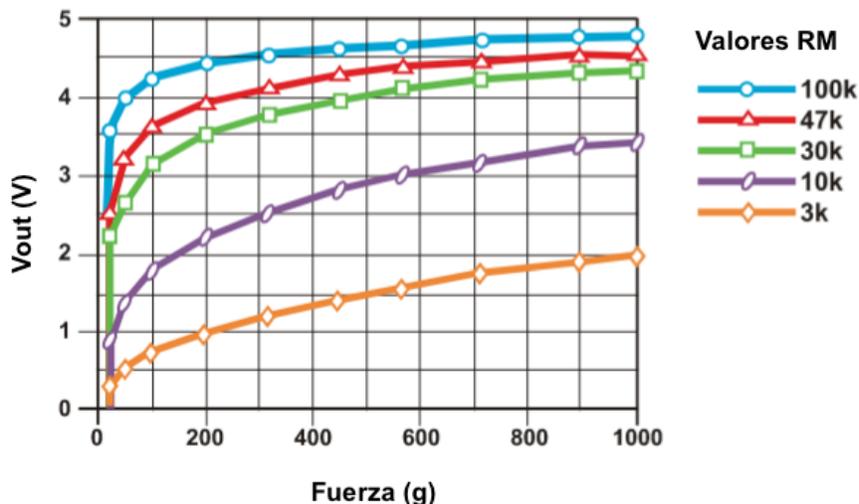


Figura 4.2: Voltaje vs Fuerza, sensor FSR[87].

Los preset y los potenciómetros se conectaron como divisor de voltaje, uniendo un pin de los extremos del elemento con voltaje positivo y el otro con tierra. De este modo se obtiene el voltaje en el pin de enmedio. Esto se observa en el diagrama de la figura 4.3.

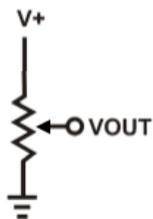


Figura 4.3: Potenciómetro conectado como divisor de voltaje.

Los encoders utilizados en los micromotores son encoders magnéticos distribuidos por Pololu modelo *enc03a* los cuales funcionan en conjunto con discos con imanes acoplados al eje extendido de los micromotores. Los encoders tienen cuatro pines: dos de alimentación y dos canales (A y B). Tienen una precisión máxima de 12 cuentas por revolución del eje extendido. Provee de salidas digitales y puede operar desde 2.7 volts hasta 18 volts. En la figura 4.4 se puede observar la imagen del encoder.

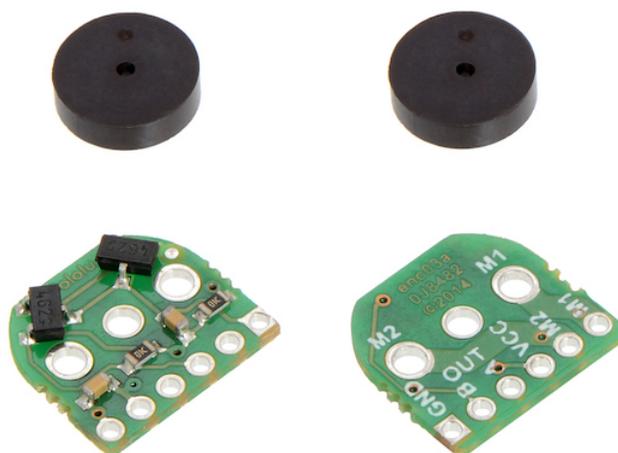


Figura 4.4: *Encoder magnético y discos de imanes*[72].

Los canales A y B de los encoders generan trenes de pulsos desfasados como se muestra en la figura 4.5. Al utilizar ambos canales es posible detectar el sentido de giro del motor y el movimiento del mismo. Para detectar el movimiento se utiliza la detección de flancos de los trenes de pulsos, la determinación del sentido de giro se realiza dependiendo del estado lógico en el que se encuentren los canales al realizarse los flancos. Por ejemplo, en la figura 4.5 la señal 1 es el canal A y la señal 2 el canal B, suponiendo que el motor gira en sentido positivo, al detectarse un flanco positivo en el canal A, el canal B se encuentra en 1 lógico, al detectarse un flanco negativo en el canal A, el canal B se encuentra en 0 lógico. Pero si se invierte el sentido de giro del motor, los flancos positivos se vuelven flancos negativos y al detectarse el flanco el canal B se encuentra en 1 lógico, por lo cual se puede determinar en que sentido gira el motor.

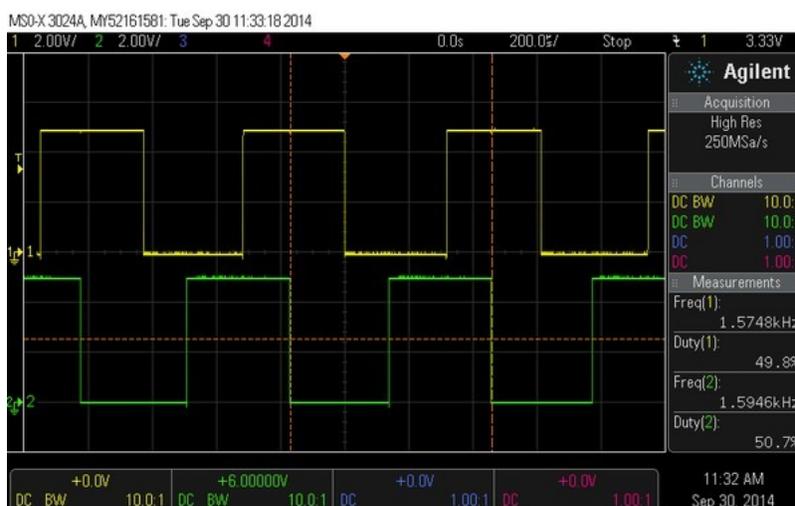


Figura 4.5: *Canales A y B del encoder magnético*[72].

4.2. Controlador de motores

Para controlar la velocidad y el giro de los motores, se utiliza un controlador dual para motores de corriente directa, el cual está basado en el puente H completo *MC33926*. Permite que los motores se alimenten desde 5 volts hasta 28 volts con una corriente máxima de 3 amperes por canal y 5 amperes como corriente pico. La tarjeta se alimenta de 3 a 5 volts, permite controlar dos motores de corriente directa de forma independiente y puede trabajar a una frecuencia de hasta 20 kHz. Adicionalmente tiene protección contra sobre voltaje, temperaturas altas y sobre corrientes. El controlador se muestra en la figura 4.6.

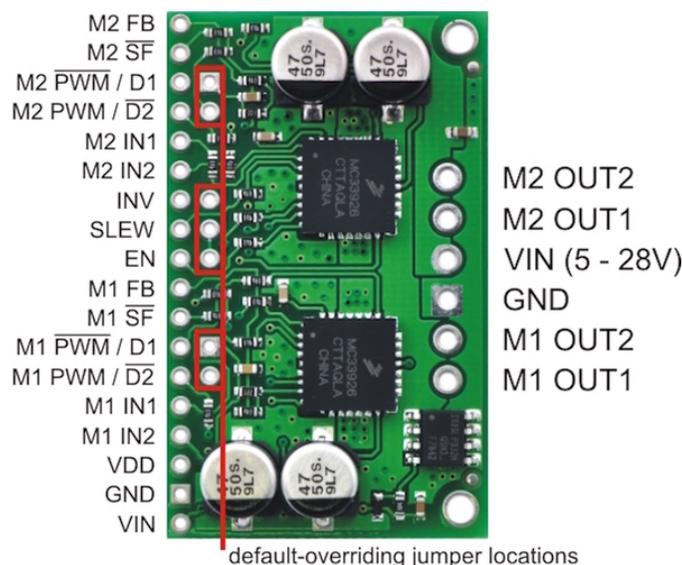


Figura 4.6: Controlador dual para motores de corriente directa[71].

En la tabla 4.1 se describen los pines del controlador, para controlar los motores es necesario generar la señal de PWM para conmutar los MOSFET internos del controlador y así suministrar voltaje al motor. Se requiere proporcionar dos señales en los pines IN1 e IN2 del controlador, el PWM y el inverso del PWM. Dependiendo del ciclo de trabajo del PWM, es la velocidad y el sentido de giro del motor. Con un ciclo de trabajo de 50% el motor permanece estático, a un 100% gira en un sentido a su máxima velocidad y a 0%, el motor gira en otro sentido a su máxima velocidad.

4.3. Adquisición y procesamiento de señales

Otra característica importante del guante háptico es que debe de ser capaz de transmitir la información de los sensores y recibir información para manipular los actuadores en tiempo real. El *toolbox Real-Time Windows Target* permite capturar y generar señales en tiempo real mediante diagramas de bloques generados con *Simulink*[®], a la vez que permite visualizarlas

Tabla 4.1: *Tabla de pines del controlador dual para motores de corriente directa*[71].

Pin	Default	Descripción
VIN	HIGH	Alimentación principal de los motores (5-28 V)
GND	LOW	Conexión a tierra para la lógica y alimentación de motores
OUT2	HIGH	Pin de salida para el motor controlado por IN2
OUT1	HIGH	Pin de salida para el motor controlado por IN1
VDD	HIGH	Conexión de alimentación para la lógica (3-5 V). El pin solo es usado para la resistencia pull up de SF y para los jumpers.
IN2	HIGH	Entrada de la lógica de control para la salida 2. Se puede aplicar una señal de PWM a este pin
IN1	HIGH	Entrada de la lógica de control para la salida 1. Se puede aplicar una señal de PWM a este pin
PWM /D2	LOW	Cuando D2 está en bajo, OUT1 y OUT2 son puestos en alta impedancia.
PWM /D1	HIGH	Cuando D1 está en alto, OUT1 y OUT2 son puestos en alta impedancia.
SF	HIGH	Salida de bandera de estado: Una sobre corriente o sobre temperatura cambiará el estado de la bandera a bajo.
FB	LOW	La salida FB provee retroalimentación analógica de corriente de aproximadamente 525 mV por ampere.
EN	LOW	Entrada de habilitación: cuando EN está en bajo, los circuitos integrados se encuentran en modo de reposo.
SLEW	LOW	Cuando el pin se encuentra en alto, se ocupan altas frecuencias en el PWM (arriba de 10 kHz). Este pin determina la velocidad de subida de los circuitos integrados.
INV	LOW	Un valor lógico alto en INV invierte el significado de IN1 e IN2 para ambos motores.

e incluso modificar los parámetros en tiempo real.

El hardware para la adquisición de datos es una tarjeta de *National Instruments*[®] modelo *PCI-6024e*, esta tarjeta se seleccionó debido a que puede utilizarse en *Simulink*[®] para poder realizar la comunicación con el guante háptico y el procesamiento de las señales. Además de que es un recurso con el cual se cuenta. Las características de la tarjeta se pueden encontrar en el Apéndice D.

La adquisición de las señales en *Simulink* se realiza mediante la creación y configuración de un modelo con los respectivos bloques para leer señales analógicas y digitales. Antes de poder utilizar los bloques para adquirir los datos es necesario instalar los controladores de la tarjeta en la computadora, así como el *kernel* de *Real-Time Windows Target* a *MATLAB*[®]. El procedimiento para la configuración de la tarjeta de adquisición en *MATLAB*[®], versión

2012b, se describe a continuación.

- ✓ Instalar los controladores de la tarjeta *PCI-6024e*, en este caso el driver es *NI-DAQmx Runtime 15.5*.
- ✓ En caso de tener instalado *MATLAB*[®], comprobar que el *kernel* de *Real-Time Windows Target* haya sido instalado junto con *MATLAB*[®], para esto se escribe el comando *rtwintgt* en *MATLAB*[®]. Si se obtiene como respuesta un error, se requiere instalarlo. Para lo cual se ejecuta el archivo de instalación de *MATLAB*[®] y se selecciona únicamente el paquete de *Real-Time Windows Target*.
- ✓ En caso de no tener instalado *MATLAB*[®], se marca la opción de instalación completa para asegurarse de que todos los componentes se instalen correctamente.
- ✓ Para utilizar el paquete de *Real-Time Windows Target*, es necesario instalarlo de manera individual debido a que durante la instalación de *MATLAB*[®] solo se copian los archivos del paquete. En la ventana de comandos de *MATLAB*[®] se escribe el comando *rtwintgt -setup*, con lo cual se obtiene como respuesta:

```
>>rtwintgt -setup
```

```
You are going to install the Real-Time Windows Target kernel.
```

```
Do you want to proceed? [y]:
```

- ✓ Para confirmar se teclea la letra *y*, a lo cual el programa responde con la confirmación de que se ha logrado instalar el *kernel*.

```
The Real-Time Windows Target kernel has been successfully installed.
```

- ✓ Para corroborar la instalación correcta se teclea el comando *rtwintgt -version* en la ventana de comandos de *MATLAB*[®]

```
>>rtwintgt -version
```

```
The installed version of the Real-Time Windows Target kernel is 4.1.0.
```

- ✓ Para que *MATLAB*[®] reconozca la tarjeta de adquisición de datos, se tiene indicar manualmente el controlador de la placa tecleando el comando *rtload*, con lo que aparece la ventana de windows para seleccionar el controlador, como se muestra en la figura 4.7.
- ✓ En la ventana se busca la carpeta de *National Instruments* y se selecciona el archivo correspondiente a la tarjeta *PCI-6024E.rwd*. Para comprobar si se ha reconocido el controlador, se teclea el comando *rtwho*. En la respuesta se puede observar que la elección fue correcta debido a que muestra la dirección que ocupa la tarjeta.

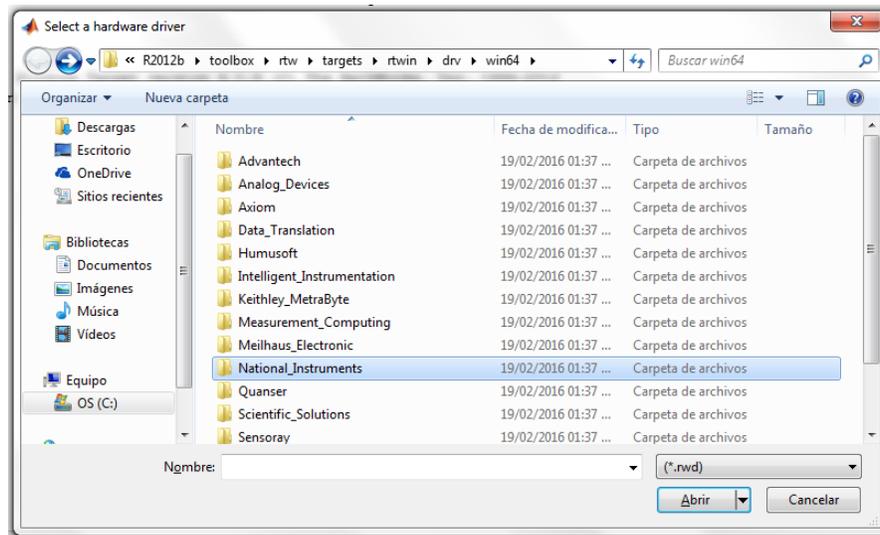


Figura 4.7: Ventana de selección de controlador.

```
>>rtwho Real-Time Windows Target version 4.1.9 (C) The MathWorks, Inc. 1994-2012
Running on 64-bit computer.
DRIVERS: Address Name
0         National Instruments PCI-6024E
```

Una vez que se ha comprobado la correcta instalación de la tarjeta con el programa *MATLAB*[®], es posible crear la interfaz para la comunicación con el guante háptico.

La interfaz para la comunicación con el guante háptico requiere adquirir las señales de los siguientes elementos: FSR, Encoder del micromotor, Preset de redundancia y Potenciómetro de ajuste. Así como también requiere generar las señales de PWM para controlar los micromotores. Por lo cual se utiliza un bus con 9 líneas por dedo, siendo dos líneas para la alimentación, 5 líneas de lectura de sensores y 2 líneas para el control de actuadores, cada una de estas líneas se conecta a un pin específico de la tarjeta como se muestra en la tabla 4.2

El programa para adquirir datos de la tarjeta se modeló con *Simulink* utilizando los bloques del *toolbox* de *Real-Time Windows Target*, para esto es necesario configurar el entorno de *Simulink*. A continuación se describen los pasos para la creación y configuración de un programa para adquirir y enviar datos de uno de los dedos del guante háptico.

- ✓ Crear un nuevo modelo de *Simulink*
- ✓ En la librería de *Simulink*, buscar el *toolbox* de *Real-Time Windows Target*, como se muestra en la figura 4.8.
- ✓ Colocar en el modelo los bloques de la *toolbox* de *Real-Time Windows Target* llamados *Analog Input*, *Digital Input* y *Digital Output*. Para la adquisición y generación de señales, así como los bloques *Scope* para mostrar las señales y el bloque *PWM Generator* (ubicado en el *toolbox* de *Simscape*) para generar el PWM, como se muestra en la figura 4.9.

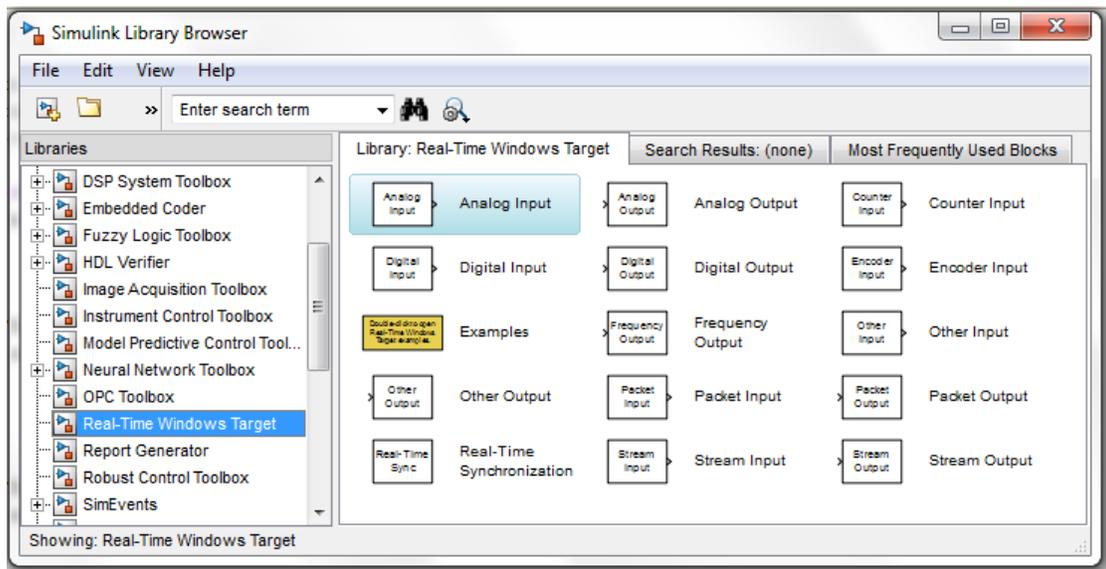


Figura 4.8: Librería de Real-Time Windows Target en Simulink.

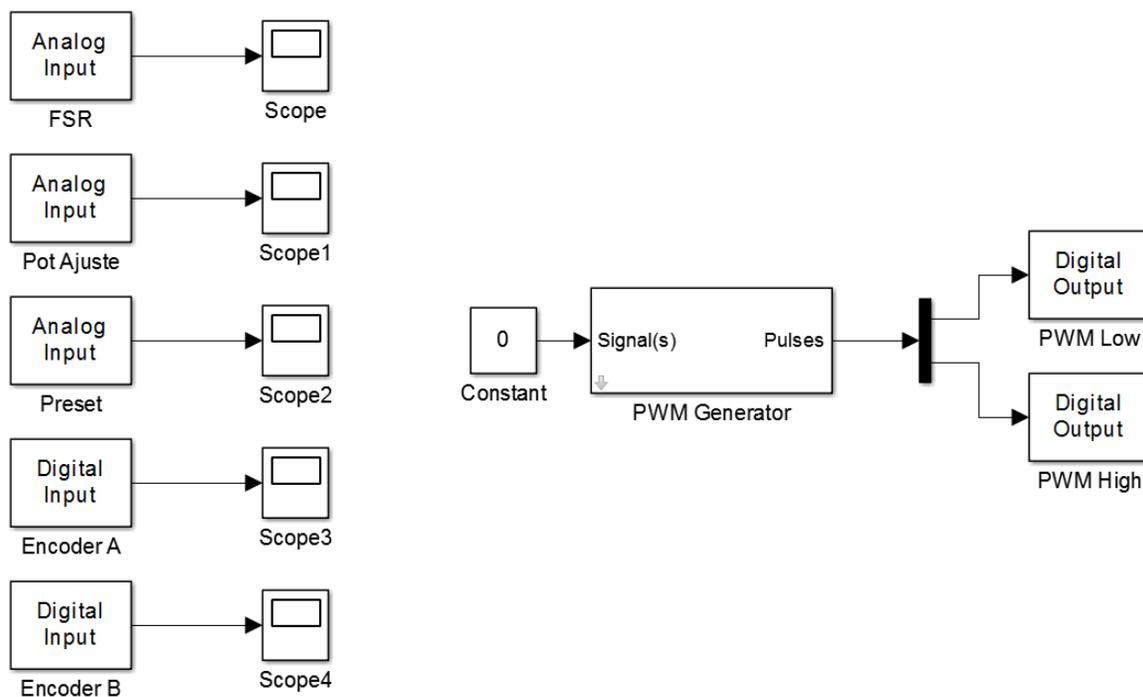


Figura 4.9: Programa para adquirir datos del exoesqueleto para un dedo.

Tabla 4.2: *Tabla de asignación de pines de la tarjeta PCI-6024e.*

Dedo índice			
Señales	Pin en bus	Puerto de la tarjeta	Pin de la tarjeta
VCC	1	VCC	14
GND	2	GND	13
FSR	3	AI0	68
Potenciómetro de ajuste	4	AI1	33
Preset	5	AI2	65
Encoder A	6	DIO0	52
Encoder B	7	DIO1	17
PWM Low	8	DIO4	19
PWM High	9	DIO5	51
Dedo medio			
Señales	Pin en bus	Puerto de la tarjeta	Pin de la tarjeta
VCC	1	VCC	8
GND	2	GND	7
FSR	3	AI3	30
Potenciómetro de ajuste	4	AI4	28
Preset	5	AI5	60
Encoder A	6	DIO2	49
Encoder B	7	DIO3	47
PWM Low	8	DIO6	16
PWM High	9	DIO7	48

- ✓ Es necesario configurar los bloques analógicos, para que se vinculen a los respectivos pines de la tarjeta de adquisición de datos *PCI-6024e*. Presionando dos veces sobre el bloque, se accede a los parámetros del bloque. Dentro de los parámetros de configuración del bloque se selecciona la tarjeta a utilizar, se especifica el canal de entrada para cada uno de los bloques con base en la tabla 4.2 (iniciando en $AI0 = 1$), y se asigna el tiempo de muestreo como se muestra en la figura 4.10. Para los bloques analógicos, el tiempo de muestreo mínimo para obtener buenos resultados en las pruebas fue de 10 ms, esto es debido a las características de la computadora que se muestran en el Apéndice D.
- ✓ De igual manera es necesario configurar los bloques digitales de entrada, en los cuales se obtiene la señal de los encoders por tal motivo requiere de un tiempo de muestreo más pequeño, siendo este de 0.0001 s. Al ser una señal digital, la computadora realiza la lectura de los datos con mayor rapidéz.
- ✓ Para generar la señal de salida del PWM se ocupa el bloque *PWM Generator*. En la configuración del bloque se selecciona el modo *1-arm bridge (2 pulses)* para generar dos señales, el PWM y el inverso del PWM, como se muestra en la figura 4.11 . Se ocupa una frecuencia portadora de 1000 Hz para obtener buenos resultados con las características de la computadora.

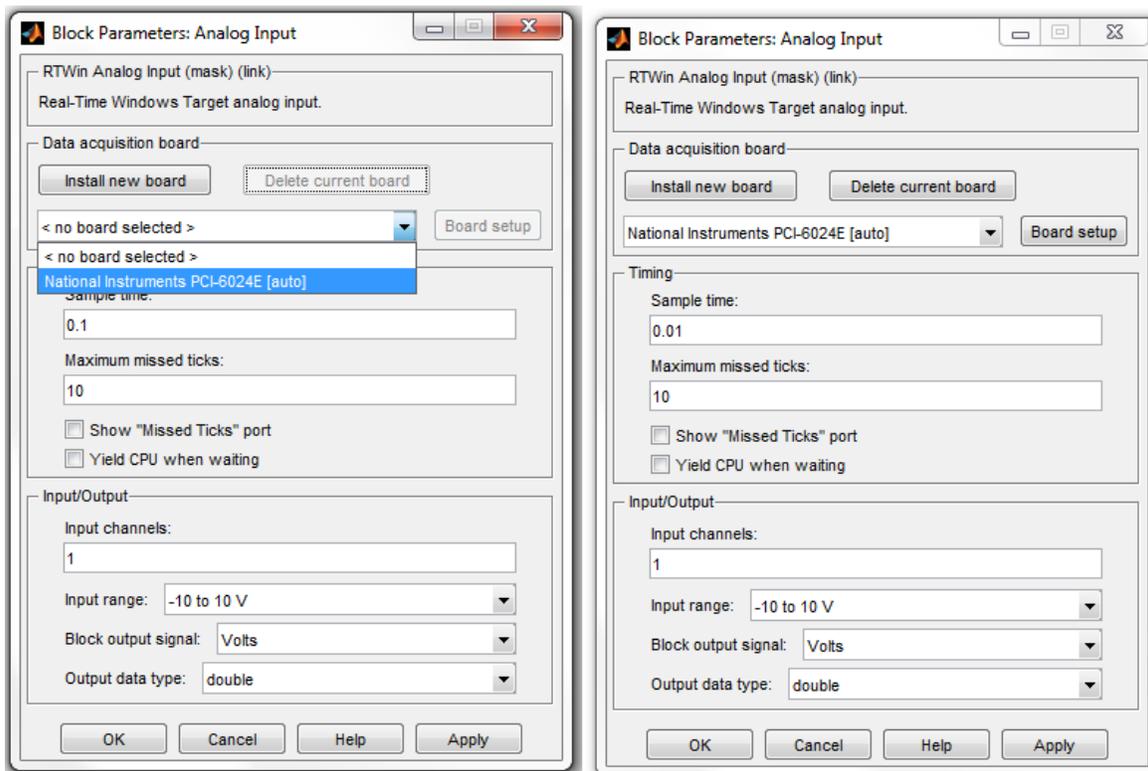


Figura 4.10: Configuración de entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos en Simulink.

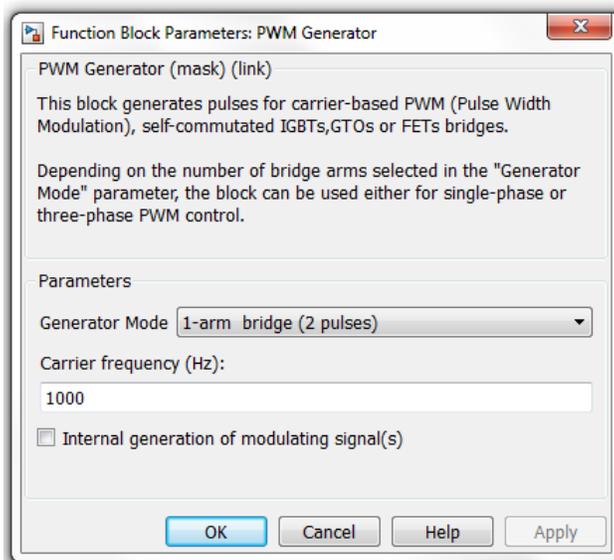


Figura 4.11: Configuración del bloque PWM Generator.

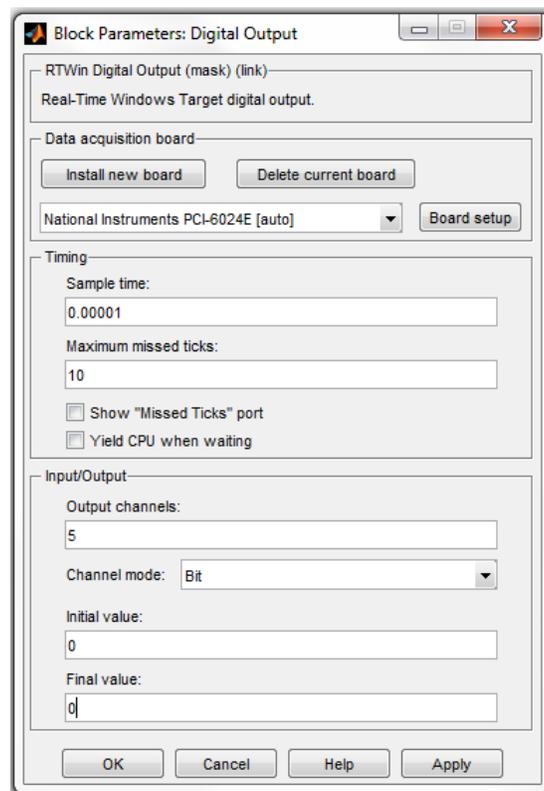


Figura 4.12: Configuración de la salida digital de la tarjeta de adquisición de datos en Simulink.

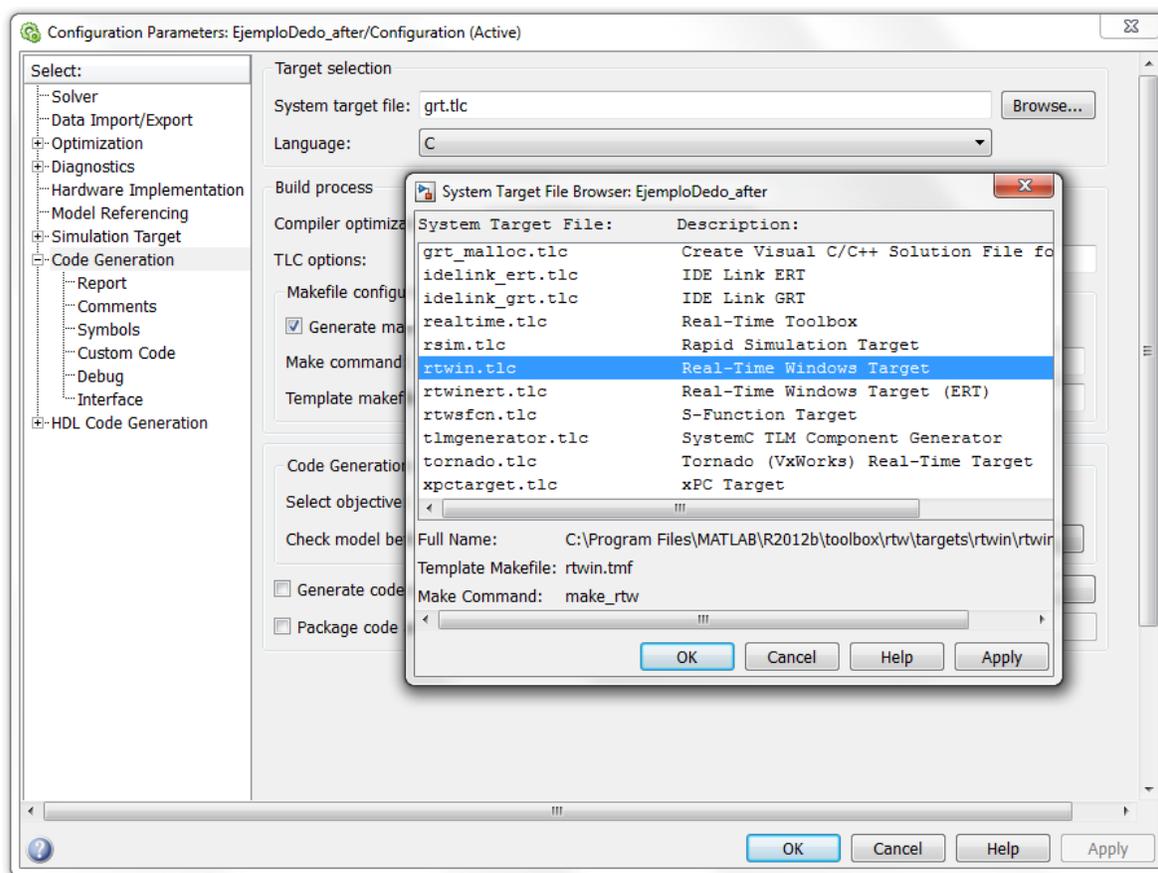


Figura 4.13: Selección de la librería de Real-Time Windows Target.

- ✓ Debido a la frecuencia de la portadora del PWM y para obtener la misma señal en la salida de los puertos digitales de la tarjeta de adquisición de datos, el bloque de salida digital utiliza un tiempo de muestreo de 0.00001 s. En los parámetros del bloque también se configura el canal de salida y, como medida de seguridad, se indica que el valor inicial y el valor final del canal sea 0, como se muestra en la figura 4.12.
- ✓ Al utilizar los bloques del *toolbox* de *Real-Time Windows Target*, es necesario cambiar la configuración general del modelo. Haciendo clic en el menú *Simulation* y seleccionando *Model Configuration Parameters*, se accede a la configuración general del modelo. En la sección *Code Generator*, en el recuadro *System target file*, se elige la librería requerida por los bloques del *toolbox* de *Real-Time Windows Target*, esta es *rtwin.tlc*, como se muestra en la figura 4.13.
- ✓ Para adquirir las señales mediante la tarjeta es necesario ejecutar el programa en modo externo. El panel de control para manipular el modo externo se accede desde el menú *Code*, haciendo clic sobre *External Mode Control Panel* como se muestra en la figura 4.14.
- ✓ En el panel de control del modo externo se puede manipular la conexión con la tarjeta,

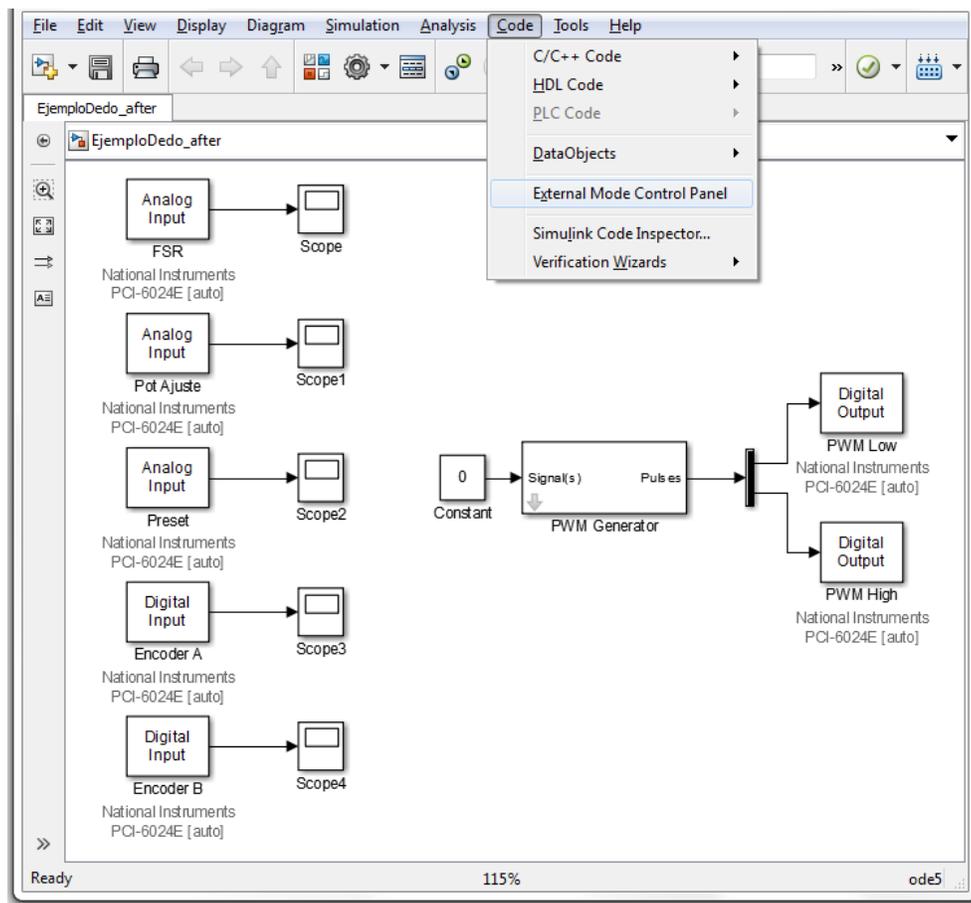


Figura 4.14: Acceso al panel de control para la simulación en modo externo.

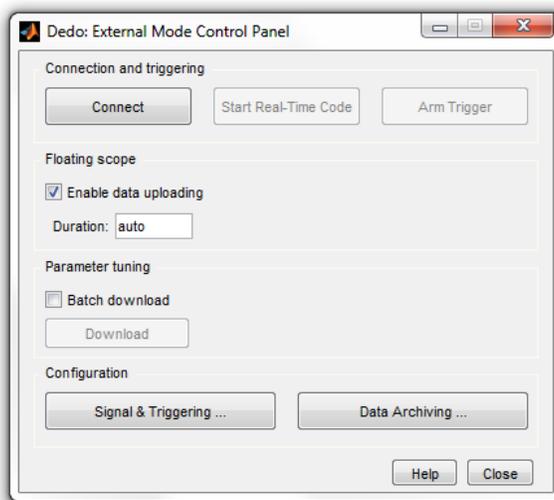


Figura 4.15: Ventana de panel de control para la simulación en modo externo.

así como también se configuran los datos de muestreo de las señales que se adquieren. La ventana se muestra en la figura 4.15.

- ✓ Para poder observar las señales en los *Scopes*, es necesario modificar la duración de la señal o el número de muestras que se adquieren. Para esto, en el panel de control del modo externo se hace clic sobre *Signal & Triggering...* con lo que se abre la ventana que se muestra en la figura 4.16. En ésta ventana se modifica la duración de las señales escribiendo el valor de 100000 en el recuadro *Duration*.
- ✓ Antes de poder ejecutar el programa en *Simulink* es necesario compilarlo. En la ventana de *Simulink* se hace clic sobre el botón de *Build Model* que aparece en la figura 4.17 o se presiona la combinación de teclas *Ctrl + B*.
- ✓ Una vez configurado y compilado el programa, se realiza la conexión con la tarjeta desde el panel de control del modo externo, figura 4.15 haciendo clic sobre el botón *Connect*. Para ejecutar el programa se hace clic sobre el botón *Start Real-Time Code* y para detener la ejecución del código se hace clic sobre el botón *Stop Real-Time Code*.

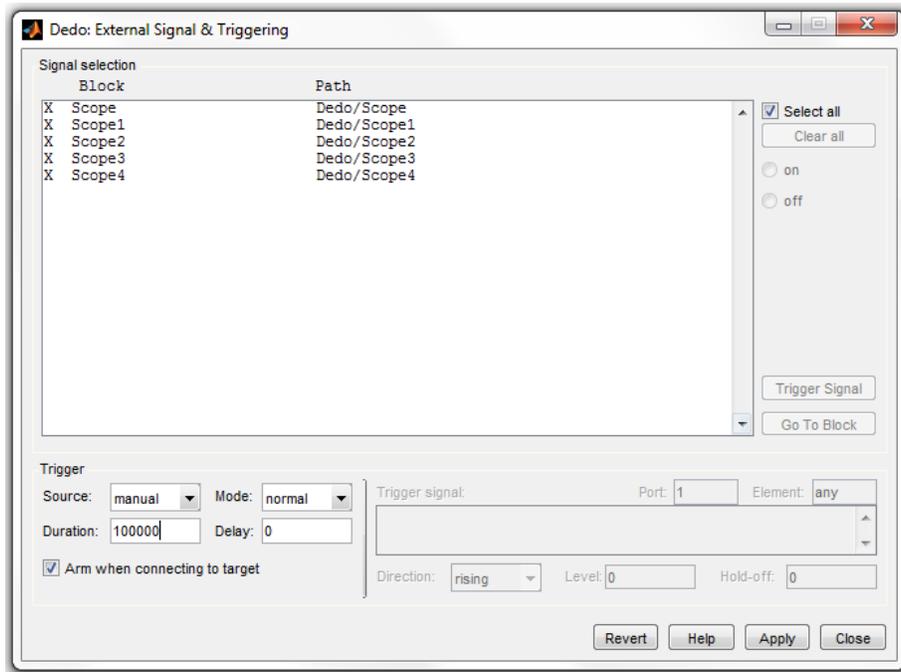


Figura 4.16: *Modificación de cantidad de muestras para las señales externas.*

4.4. Tarjeta de conexiones

Para realizar las conexiones entre los circuitos utilizados en el guante háptico, se diseñó una tarjeta. En la tarjeta se integró el amplificador operacional *LM358* y las resistencias utilizadas para el circuito acondicionador de los FSR, así como pines para permitir la conexión y desconexión de los sensores, potenciómetros, presets y cables de comunicación para la tarjeta de adquisición de datos y el controlador de los motores. El circuito diseñado se muestra en la figura 4.18.

En la figura 4.19 se puede observar la tarjeta de conexiones con los componentes soldados. Las dimensiones de la tarjeta son de 49 mm x 44 mm.

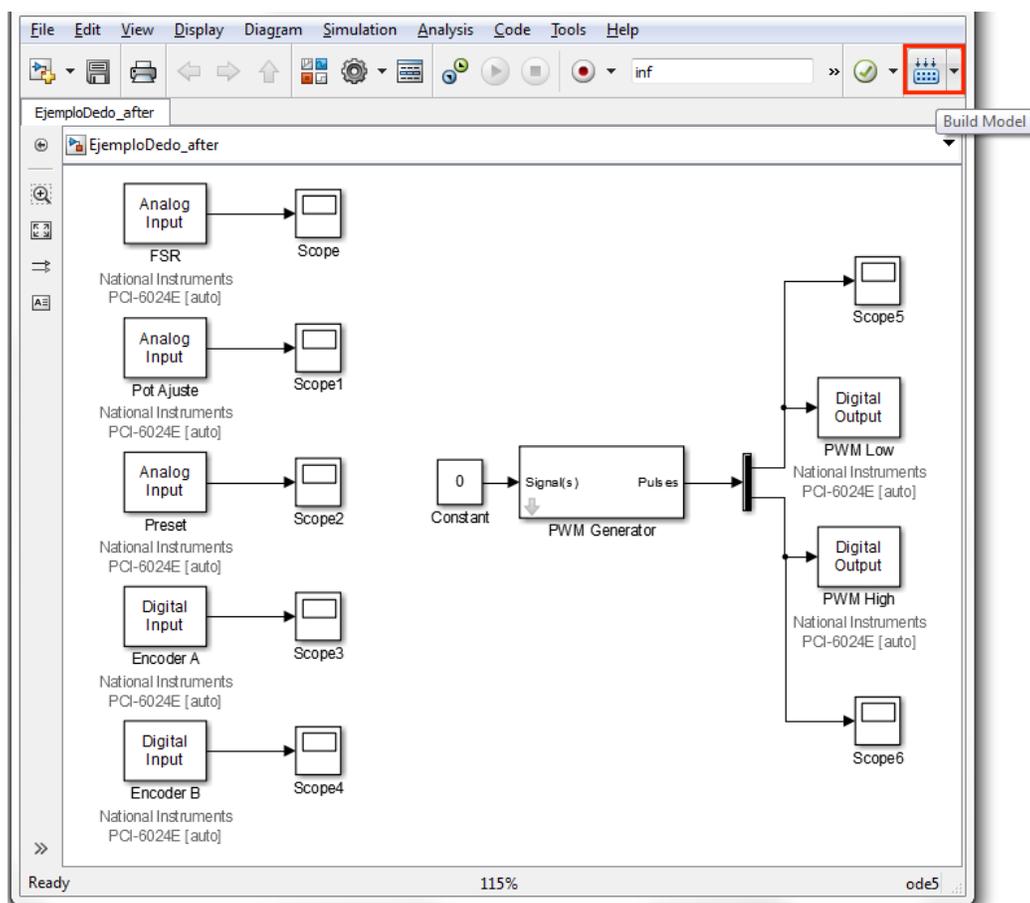


Figura 4.17: Construcción de código para la ejecución del programa en Simulink.

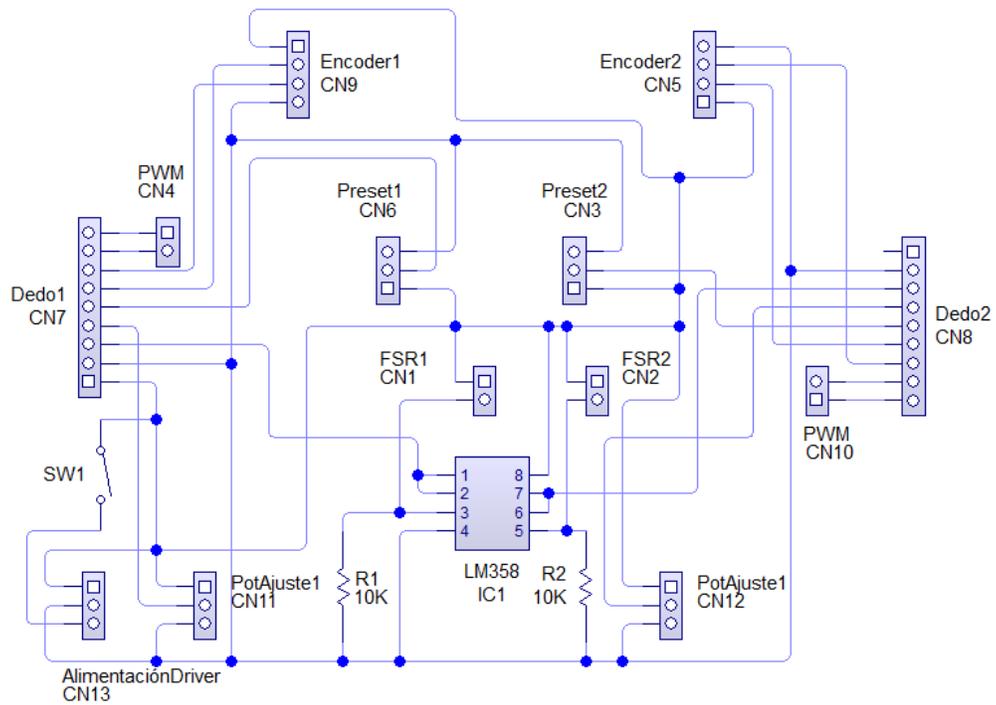


Figura 4.18: *Circuito de la tarjeta de conexiones.*

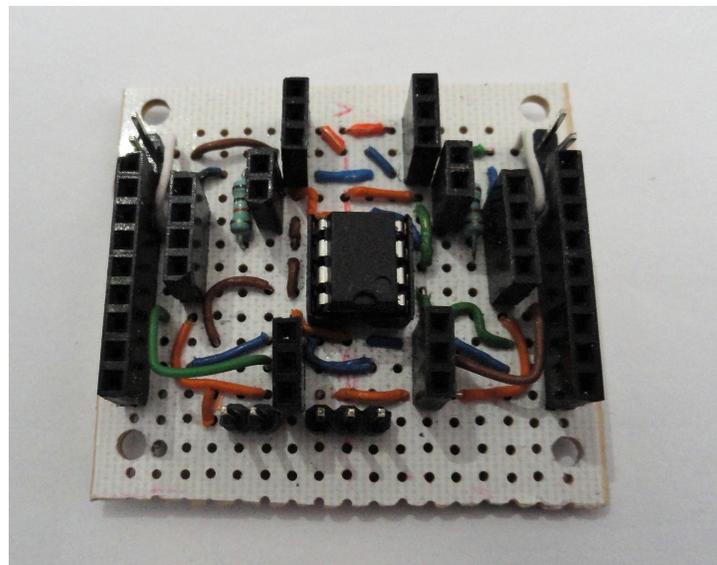


Figura 4.19: *Tarjeta de conexiones para el guante háptico.*

Capítulo 5

Teleoperación del robot móvil

Como caso de aplicación para el guante háptico se plantea la teleoperación de un robot móvil basado en el kit *LEGO Mindstorms NXT*[®]. Para la operación del robot, se usarán gestos de las manos como instrucciones para dar movilidad al robot y se retroalimentará en forma de fuerza la distancia a los obstáculos que detecta el robot, de tal forma que se incremente la telepresencia del usuario.

5.1. Robot móvil

La estructura del robot móvil se basó en el modelo Castor Bot publicado en [69], donde también se pueden encontrar los pasos para su ensamble. En la figura 5.1 se muestra el robot móvil ensamblado, éste cuenta con un sensor ultrasónico para la detección de obstáculos, dos motores para realizar el desplazamiento, una rueda loca para la estabilidad de la estructura y el ladrillo *NXT* para controlar el robot.

El robot móvil se programó con *Simulink*[®] de *MATLAB*[®] versión 2014a al cual se tiene que agregar el complemento de *LEGO Mindstorms NXT*[®]. En el Apéndice E se pueden encontrar los pasos para la instalación del complemento. Para configurar el modelo de tal manera que se pueda utilizar con el kit *LEGO Mindstorms NXT*[®], se requiere seguir el procedimiento que se describe a continuación.

- ✓ En un nuevo modelo de *Simulink*[®] seleccionar el menú *Tools*, seleccionar *Run on Target Hardware* y elegir *Prepare to Run*, como se muestra en la figura 5.2.
- ✓ Aparecerá una ventana en la cual se tiene que elegir el hardware a utilizar, se elige *LEGO MINDSTORMS NXT* como se muestra en la figura 5.3.
- ✓ Al elegir el hardware el modelo automáticamente se configurará. A continuación se modela el programa utilizando los bloques del *NXT* en conjunto con los de *Simulink*[®].



Figura 5.1: Robot móvil.

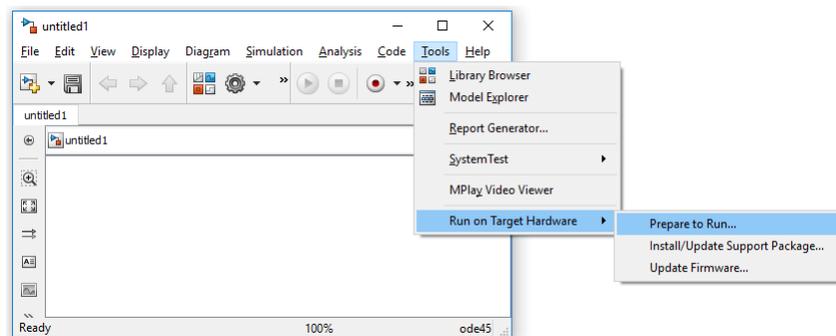


Figura 5.2: Preparación de modelo para trabajar con ladrillo NXT.

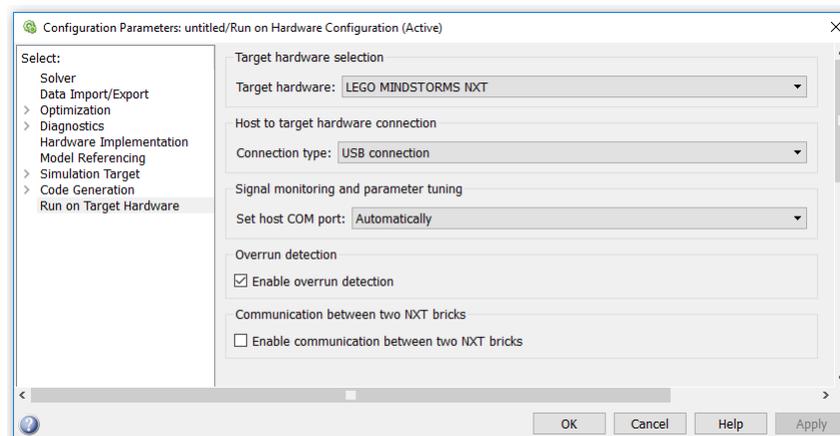


Figura 5.3: Ventana de configuración de parámetros para la selección del hardware.

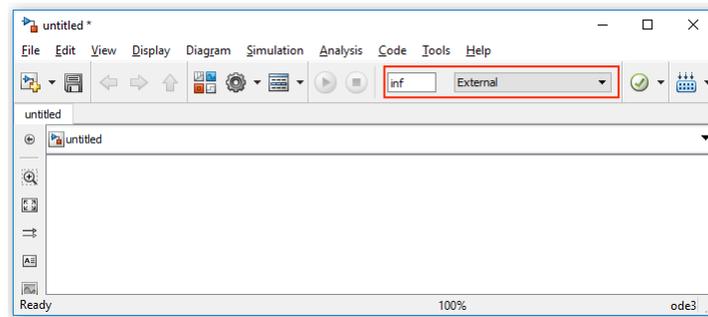


Figura 5.4: Selección modo external.

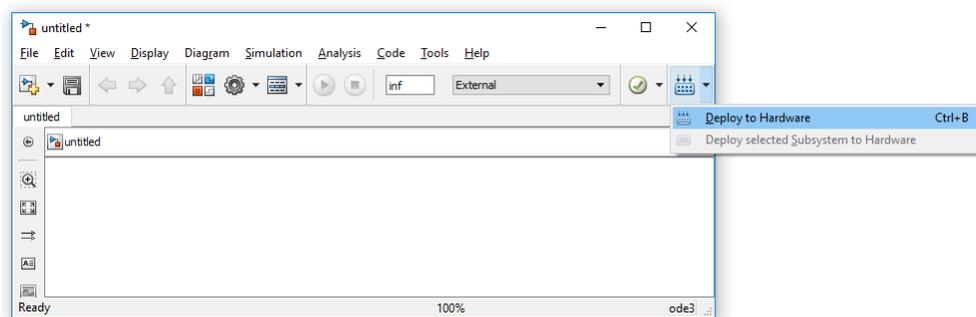


Figura 5.5: Selección modo external.

Para la ejecución del programa, el paquete del kit *NXT* permite ejecutarlo de manera autónoma en el ladrillo *NXT* o simultáneamente con *Simulink*®.

- ✓ En caso de ejecutar el modelo junto con *Simulink*® para modificar los parámetros del modelo en tiempo real, se elige la opción *external* en el modo de ejecución como se muestra en la figura 5.4. Si se quiere ejecutar el programa durante un determinado tiempo, se escribe el tiempo deseado en el recuadro, en caso de que se quiera ejecutar el programa por un tiempo indefinido, se escribe *inf* en el recuadro como se muestra en la figura.
- ✓ En caso de ejecutar el modelo únicamente en el ladrillo *NXT*, se oprime el botón *Deploy to Hardware*, como se muestra en la figura 5.5, o se tecléa la combinación de teclas *Ctrl + B*.

Los modelos del *NXT* y la tarjeta de adquisición de datos no se pueden correr simultáneamente debido a que ocupan distintas librerías de *Simulink*®, por lo cual se programó el ladrillo *NXT* para que trabaje de manera autónoma. El ladrillo *NXT* recibe únicamente como datos, el ángulo de cada uno de los dedos y envía a la computadora la distancia del sensor ultrasónico y la posición angular de cada una de las ruedas.

La comunicación entre la computadora y el ladrillo *NXT* se realiza mediante un adaptador *bluetooth* en la computadora y el *bluetooth* integrado en el *NXT*, los pasos para configurar

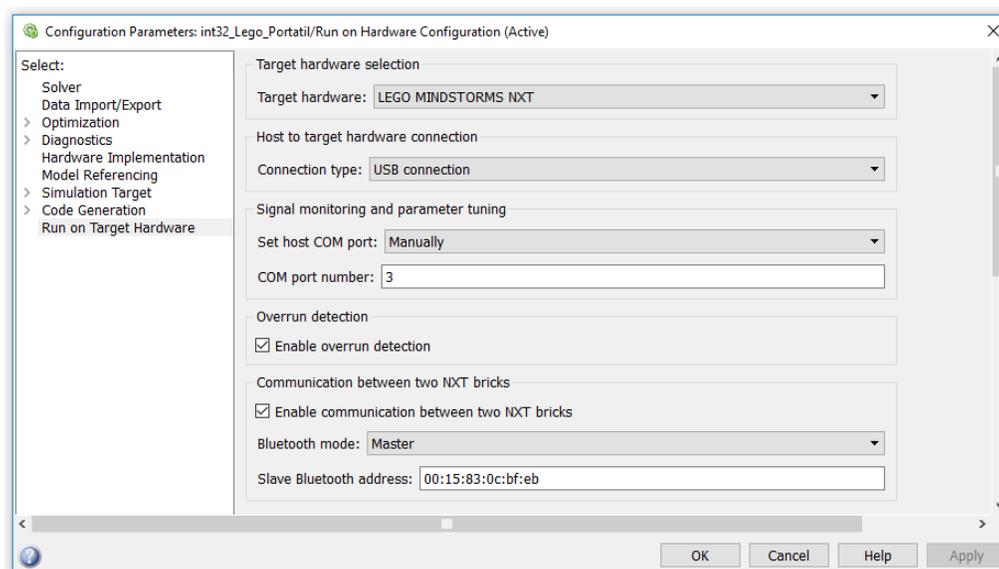


Figura 5.6: Configuración del modelo para trabajar con la comunicación bluetooth.

el adaptador *bluetooth* se muestran en el Apéndice E. Para que se pueda iniciar la comunicación es necesario que el *bluetooth* del ladrillo *NXT* se comporte como un dispositivo maestro y se conecte de manera automática a la computadora al iniciar la ejecución del programa del ladrillo *NXT* y la simulación del modelo. Esto se configura dentro del programa en *Simulink*[®]. Como se muestra en la figura 5.6, se accede a la configuración de los parámetros y en la sección de *Run on Target Hardware*, se activa la casilla para permitir la comunicación entre dispositivos *NXT*, se indica que este se comporte como maestro y se escribe la dirección física del adaptador Bluetooth para la computadora.

Una vez que el modelo se encuentra configurado, se procede a generar la lógica del robot. Para esto, se agregan los bloques del kit *LEGO Mindstorms NXT*[®], los cuales son: Sensor ultrasónico, Encoder, Motor, LCD, Receive Lego, Send Lego. El comportamiento del robot móvil es el siguiente:

- ✓ Leer los sensores del robot.
- ✓ Recibir datos desde la computadora mediante la comunicación *bluetooth*.
- ✓ Determinar los comandos (avance, giro, reposo) con base en los datos recibidos y realizar la acción.
- ✓ En caso de una colisión inminente, detener el robot móvil para su propia seguridad.
- ✓ Enviar mediante la comunicación *bluetooth* la distancia obtenida por el sensor ultrasónico y la posición angular de las llantas obtenidas de los *encoders*.
- ✓ Desplegar datos recibidos en la pantalla del ladrillo *NXT*.

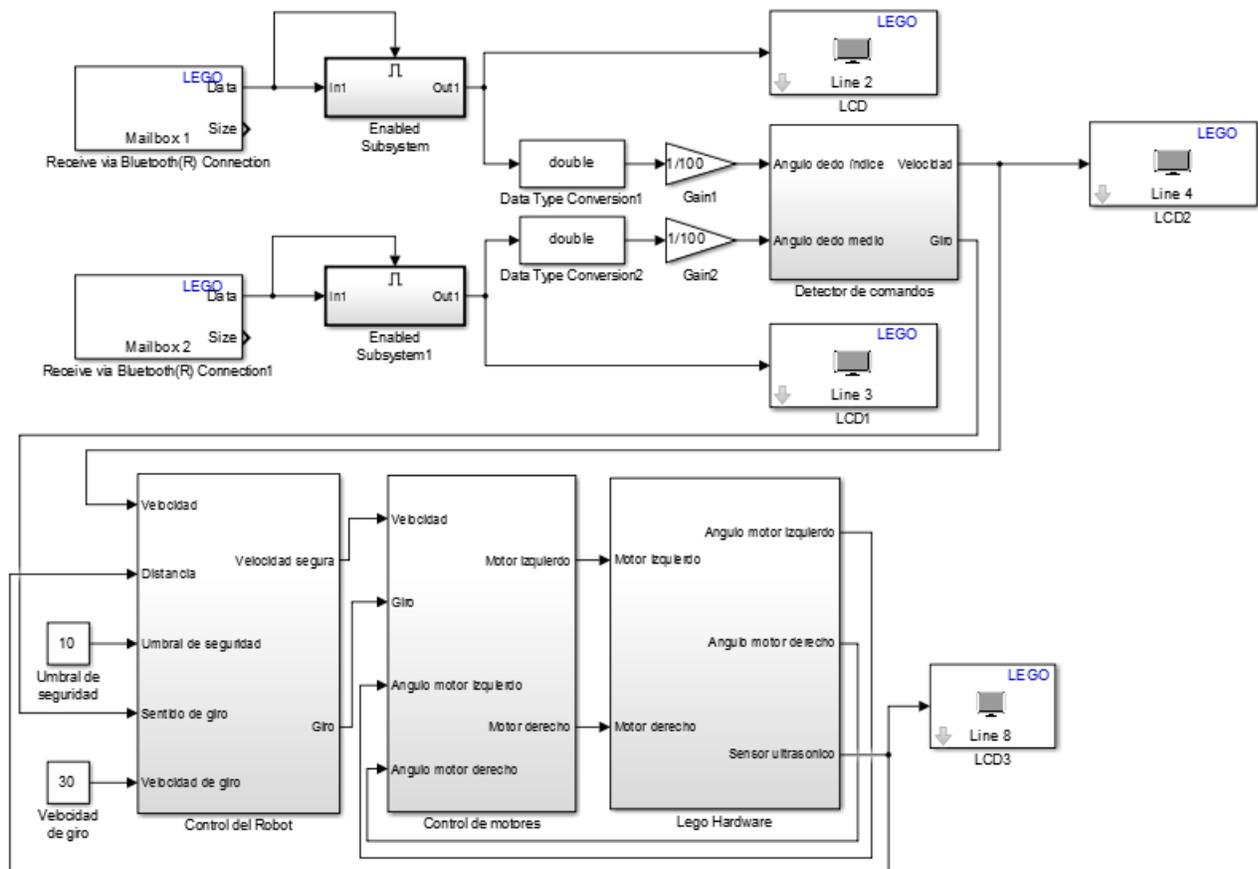


Figura 5.7: *Modelo en Simulink® del robot móvil.*

El programa final se muestra en la figura 5.7, cabe mencionar que se generaron subsistemas para que el modelo tuviera una forma más compacta, los diferentes subsistemas se desglosan en el Apéndice F. El tiempo de muestreo de los bloques de los encoders y el sensor ultrasónico es el mismo para poder realizar la comunicación *bluetooth*, el cual está limitado por la velocidad de lectura del sensor ultrasónico permitiendo un tiempo de muestreo mínimo de 0.04 s.

5.2. Guante háptico

El guante háptico diseñado tiene como finalidad medir la posición de los dedos índice y medio de una mano y proporcionar al usuario retroalimentación de información en forma de fuerza. Para probar el dispositivo se definió la aplicación de teleoperación de un robot móvil, en la cual la medición de la posición de los dedos se traduce a comandos y la información que se retroalimenta al usuario es la traducción de la distancia al objeto más cercano en su trayectoria de avance.

Para manipular el robot móvil se definen los comandos de avance, reposo, giro a la izquierda y giro a la derecha. Estos comandos se mapean con gestos de la mano de la siguiente manera: el comando de avance se mapea con la flexión de ambos dedos, el reposo se mapea con la extensión de ambos dedos, el giro a la izquierda se mapea con la flexión del dedo medio y la extensión del dedo índice (para la mano izquierda), y el giro a la derecha se mapea con la extensión del dedo medio y la flexión del dedo índice (para la mano izquierda).

La aplicación se divide en dos problemas principales:

- ✓ Medir la posición de los dedos. Establecer la comunicación mediante *bluetooth* para transmitir la posición de los dedos al robot móvil para generar los comandos y recibir la distancia al objeto más cercano. Al mismo tiempo, detectar el movimiento del dedo del usuario y permitir que el exoesqueleto siga dicho movimiento.
- ✓ Traducir la información de la distancia en fuerza de resistencia sobre los dedos del usuario.

Con base en los problemas principales, se generan dos modos de comportamiento del guante háptico. El *modo seguidor* y el *modo de retroalimentación de fuerza*. El primer modo se enfoca en la solución del primer problema, cuya solución es indispensable para generar ambos modos.

5.2.1. Modo seguidor

Los exoesqueletos de los dedos cuando no están acoplados a los micromotores se pueden mover sin mucho esfuerzo de tal manera que sigan el movimiento de los dedos. Pero al acoplar los exoesqueletos a los micromotores, la fuerza necesaria para que el exoesqueleto siga el movimiento del dedo es considerable. Por lo cual, es necesario detectar el movimiento del dedo del usuario y mover el exoesqueleto de tal manera que siga el dedo del usuario y permita su movimiento con un mínimo esfuerzo. Hasta este punto el movimiento es independiente para cada uno de los dedos por lo que se controlan por separado.

Para detectar el movimiento del dedo del usuario se utiliza un sensor de fuerza en la posición del exoesqueleto en la que la yema del dedo del usuario hace contacto con éste. El estado de reposo del exoesqueleto es cuando los dedos se encuentran completamente extendidos, en dicha posición la yema del usuario no entra en contacto con el sensor de fuerza y el sistema permanece en reposo. Pero al entrar en contacto la yema del usuario con el exoesqueleto se comienza a medir la fuerza que éste ejerce, si esta fuerza sobrepasa un umbral el exoesqueleto comienza su movimiento de flexión para reducir la fuerza que ejerce el usuario y así seguir su movimiento de flexión.

En caso de que el usuario disminuya la fuerza debajo del umbral establecido, pero que aún se encuentre la yema del usuario en contacto con el exoesqueleto, el sistema permanece sin movimiento esperando a que el usuario aumente o retire la fuerza sobre el sensor. Si el usuario extiende el dedo o elimina el contacto con el exoesqueleto, se interpreta que el usuario

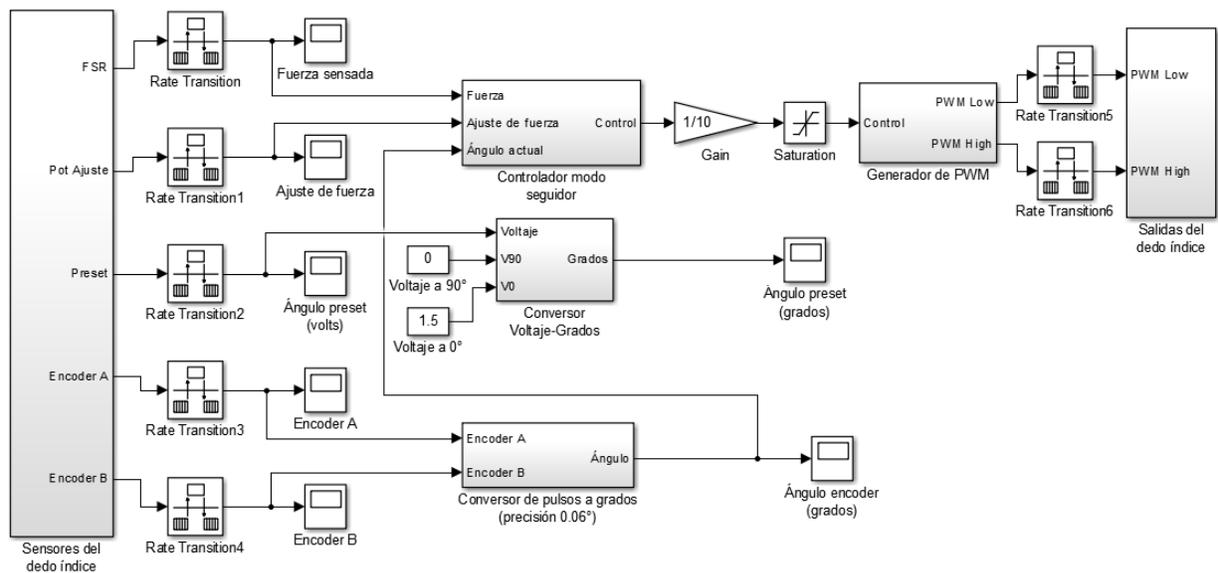


Figura 5.8: Modelo en Simulink® de un dedo del guante háptico en modo seguidor.

trata de extender el dedo y por lo tanto el exoesqueleto comienza su movimiento de extensión hasta llegar a la posición de reposo o recuperar el contacto con la yema del dedo del usuario.

Lo descrito anteriormente se modela en Simulink®. Se utilizan las señales mencionadas en el capítulo de instrumentación. Se leen los *encoders* de los motores para determinar el ángulo del dedo, se leen los sensores para determinar la dirección de movimiento, se generan las señales de PWM para controlar los micromotores y se realiza la comunicación mediante *bluetooth* con el robot móvil enviando el valor de los ángulos para que este interprete los comandos. También como parte de la comunicación se lee la distancia que sensa el robot móvil, y el movimiento de las llantas, para desplegarlos en un *scope*. En la figura 5.8 se muestra el modelo de un dedo del sistema en modo seguidor.

En la figura 5.9 se muestra el controlador del sistema en modo seguidor, en el cual se calcula el error de la fuerza. Como se busca que el exoesqueleto realice el movimiento de flexión y extensión con la información de un sólo sensor, se agrega un *offset* para que el error oscile entre valores positivos y negativos, indicando de esta manera el sentido de giro de los micromotores. El ajuste de fuerza se agrega para regular el umbral de fuerza necesario para mover el dedo.

Debido a que el control del sistema se basa en regular la fuerza sobre el dedo del usuario y no toma en cuenta la posición en la que se encuentra el dedo, se agrega un limitador de movimiento con un rango establecido para evitar que el exoesqueleto se salga de su área de trabajo. El limitador de movimiento transmite la señal de control en caso de que el exoesqueleto se encuentre dentro del área de trabajo, cuando el exoesqueleto se sale del área de trabajo pueden ocurrir dos casos: la señal de control se transmite si ésta hace que el exoesqueleto vuelva al área de trabajo, o la señal de control se bloquea en el caso donde la señal de control

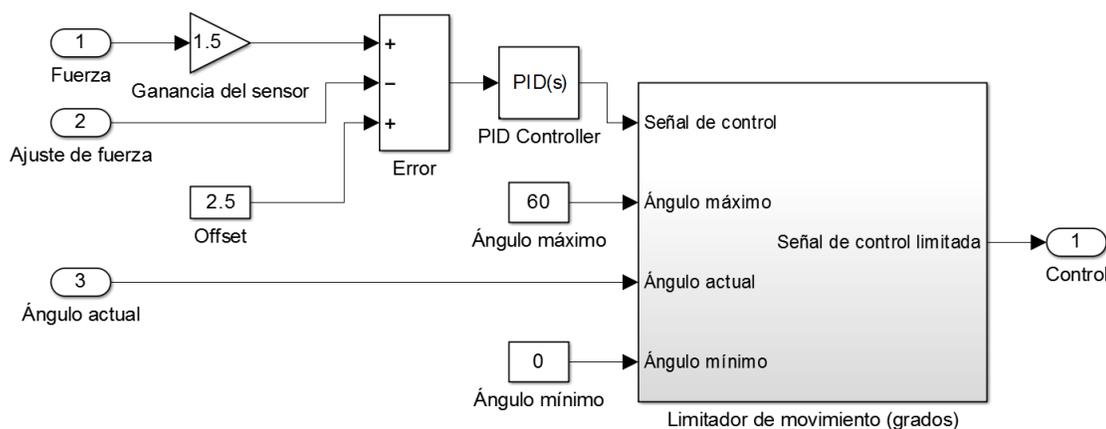


Figura 5.9: *Subsistema controlador modo seguidor.*

hace que el exoesqueleto se mueva fuera del área de trabajo. Esto se modela en la figura 5.10.

Para realizar la comunicación mediante *bluetooth* fue necesario conocer la trama de los paquetes enviados por el bloque *Send Lego* del complemento para el kit *LEGO Mindstorms NXT*[®]. Decodificando uno de estos paquetes se obtuvo la siguiente trama:

- ✓ Byte 1,2: Tamaño en bytes de los siguientes datos del paquete, siendo el byte 1 el byte menos significativo.
- ✓ Byte 3: Número de Mailbox.
- ✓ Byte 4,...: Bytes de información, enviando primero los bytes menos significativos.

Los bloques del complemento del *LEGO Mindstorms NXT*[®] ocupan identificadores (Mailbox) para seleccionar los datos obtenidos mediante la transmisión *bluetooth* y así poder usarlos como señales dentro del modelo en *Simulink*[®]. El envío de los datos mediante la comunicación *bluetooth* se realiza con el bloque *Packet Output* del toolbox *Real-Time Windows Target*, como se muestra en la figura 5.11. Mediante un *mux* se unen los datos en un vector para generar la trama y enviarlos mediante la comunicación serial.

Para utilizar el bloque *Packet Output* para transmitir datos mediante *bluetooth*, es necesario que el ladrillo *NXT* y la computadora se encuentren emparejados. Al emparejarlos, se crea un puerto serie estándar en la computadora para la transmisión de la información. Para configurar el bloque se presiona el puntero dos veces sobre el bloque y se accede a la configuración del bloque, se oprime el botón *Install new board*, se selecciona el menú *Standard Devices*, se selecciona *Serial Port* y se configura el puerto serial creado al emparejar el ladrillo *NXT*, como se muestra en la figura 5.12.

Para conservar precisión en los valores de los ángulos, se multiplican por una ganancia de 100 y se envían como datos de 32 bits. En la figura 5.13 se muestra la configuración del

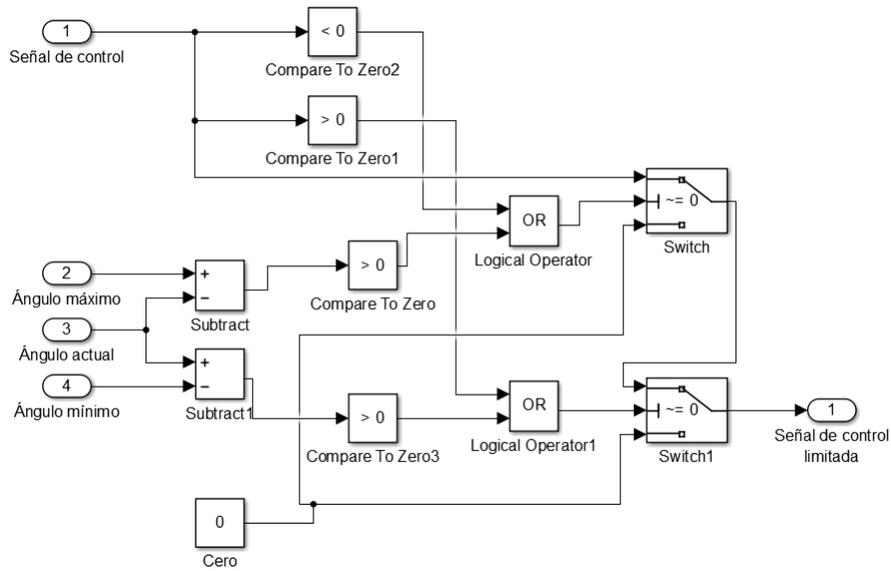


Figura 5.10: *Subsistema limitador del movimiento.*

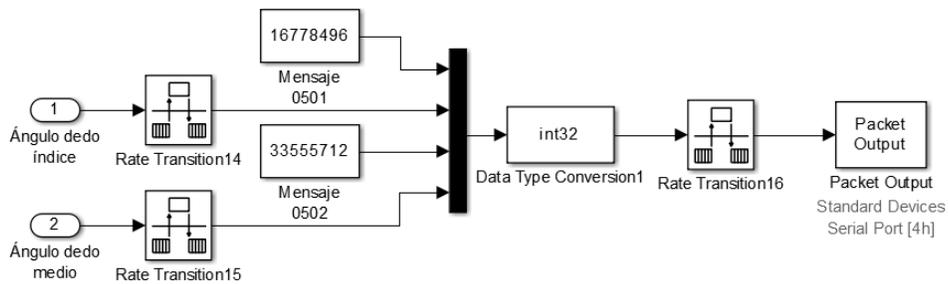


Figura 5.11: *Bloques para el envío de datos mediante bluetooth.*

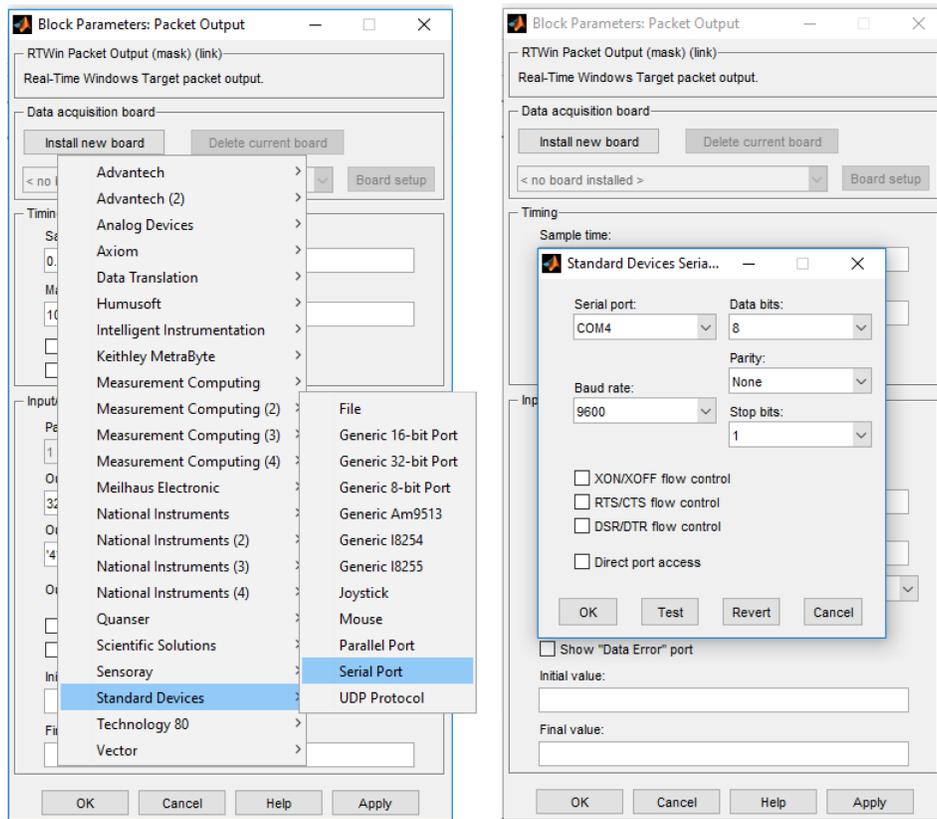


Figura 5.12: Instalación y configuración del puerto serie en el bloque Packet Output.

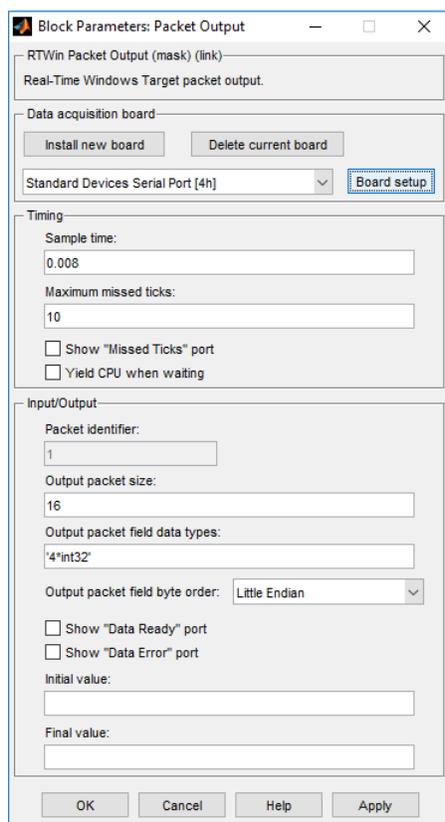


Figura 5.13: Configuración del bloque *Packet Output* para la comunicación mediante *bluetooth*.

bloque *Packet Output* para enviar cuatro datos de 32 bits.

Los datos enviados por el ladrillo *NXT* son recibidos con el bloque *Receptor de datos del Lego* en el cual se separan los paquetes y se obtiene la distancia, la posición angular del motor 1 y la posición angular del motor 2. A los valores obtenidos de los motores 1 y 2 se les aplica un filtro para desplegar en *scopes* la velocidad de los motores, como se muestra en la figura 5.14.

Al igual que se utiliza el bloque *Packet Output* para enviar datos mediante el *bluetooth*, el bloque *Packet Input* se utiliza para recibir datos mediante el *bluetooth*. En la figura 5.15 se muestra la forma en que se obtienen. El robot móvil envía la distancia del sensor ultrasónico como un entero de 8 bits y la posición angular de los motores como enteros de 32 bits, por lo cual con un *demux* se separa el vector de datos proporcionado por el bloque *Packet Input*, se obtienen los datos de información y se omiten los demás bytes de la trama. La configuración del bloque *Packet Input* se muestra en la figura 5.16.

El control de los micromotores requiere de generar la señal de PWM, esto se realiza con el bloque *PWM Generator*. Al utilizar una frecuencia portadora de 1000Hz para el PWM, el micromotor vibra al tener una señal de control cercana a cero debido a que la polaridad del voltaje en el micromotor se mantiene el tiempo suficiente para cambiar el giro de rotación

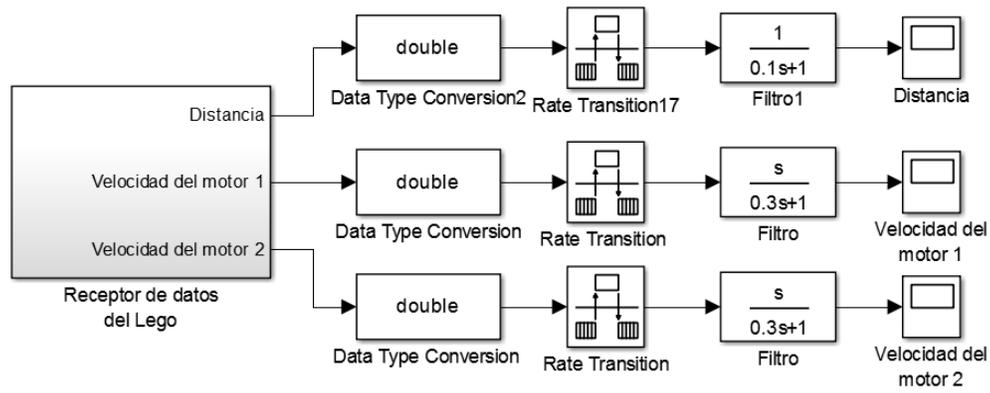


Figura 5.14: *Bloques para la recepción de datos mediante bluetooth.*

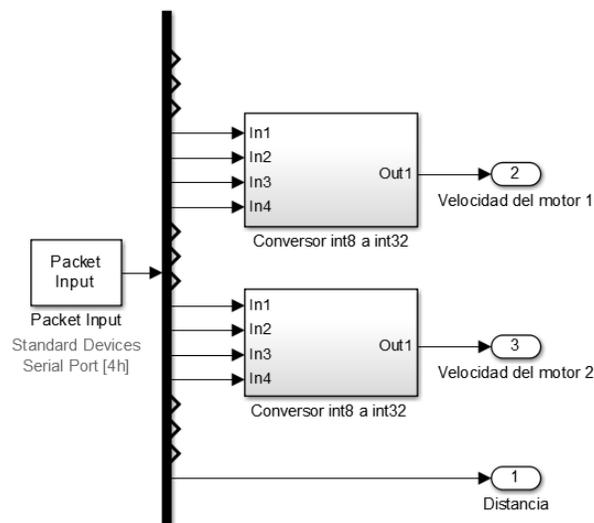


Figura 5.15: *Subsistema de receptor de datos de Lego.*

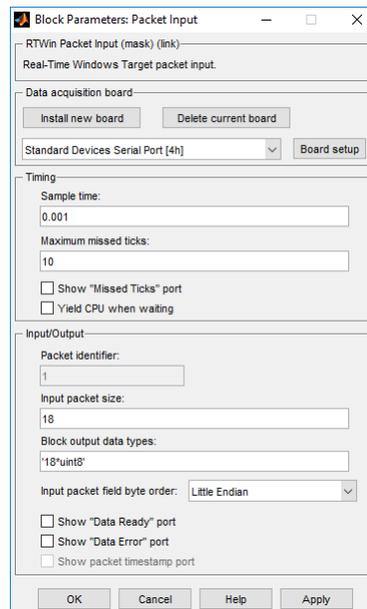


Figura 5.16: Configuración del bloque *Packet Input* para la recepción de datos.

entre valores positivos y negativos. Por este motivo se limita la salida del PWM de tal manera que cuando la señal de control es cercana a cero, las salidas de PWM se vuelve cero evitando la vibración y calentamiento de los micromotores. Lo anterior se modela en la figura 5.17.

Para convertir la señal obtenida del potenciómetro a grados, se mide el voltaje del potenciómetro cuando el exoesqueleto se encuentra en su posición extendida y cuando se encuentra flexionado. Con estos datos se modela la interpolación lineal que se muestra en la figura 5.18.

El cálculo de la posición del motor con los encoders se realiza mediante la detección de flancos. Se detectan los flancos positivos y negativos del canal B y se comparan con el valor lógico del canal A. Los resultados de las comparaciones se convierten en datos dobles para

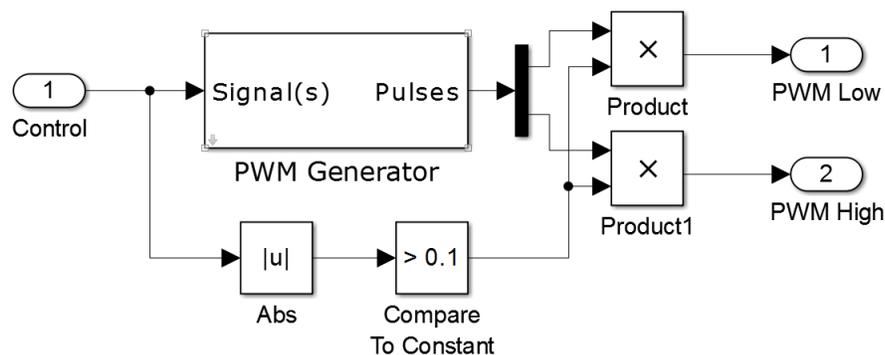


Figura 5.17: Subsistema generador de PWM.

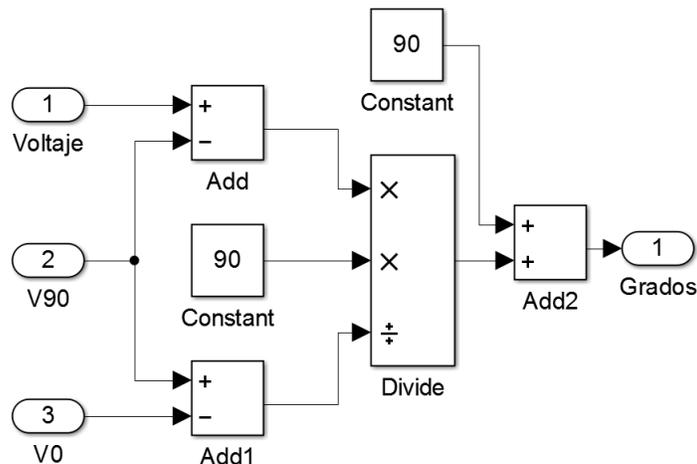


Figura 5.18: *Subsistema convertidor voltaje-grados.*

sumarlos y realizar el conteo de los pulsos, incrementando el número de pulsos en un sentido y disminuyéndolos en el otro sentido. Dicho valor se almacena para conservar la cuenta y se multiplica por el factor de conversión para obtener la posición angular en grados como se observa en la figura 5.19.

5.2.2. Modo de retroalimentación de fuerza

El sensor de fuerza genera una señal logarítmica en función de la fuerza aplicada. Mediante el circuito configurado genera una señal de 0 V a 3.0 V para una fuerza de $5N$, según la gráfica mostrada en la figura 4.2. Para traducir la información de la distancia recibida del robot móvil a fuerza de retroalimentación, se define un rango de distancias en las que actúa la fuerza de resistencia, desde D_{max} , hasta D_{min} , siendo la forma en la que la distancia se comporta al acercarse a un objeto. Con dicho rango se realiza la interpolación entre los valores de 0V para D_{max} y 3.0 V para D_{min} .

Para evitar que las distancias fuera del rango definido influyan en el comportamiento de la señal de control, se satura la señal obtenida de tal manera que no existan valores negativos. Con esto se logra que la fuerza solo actúe hasta que se llegue a la distancia D_{max} y tenga su valor máximo en la distancia D_{min} . En la figura 5.20 se observa el modelo de la conversión de la distancia en un valor de referencia para ingresarlo en el cálculo del error de la fuerza.

El subsistema generado de la señal de retroalimentación se alimenta del valor de la distancia obtenido mediante la comunicación *bluetooth* como se muestra en la figura 5.21.

Al controlar los dedos de manera independiente, la fuerza de resistencia persiste mientras el robot móvil se encuentre cerca de colisionar, sin que importe si se desea avanzar o girar para

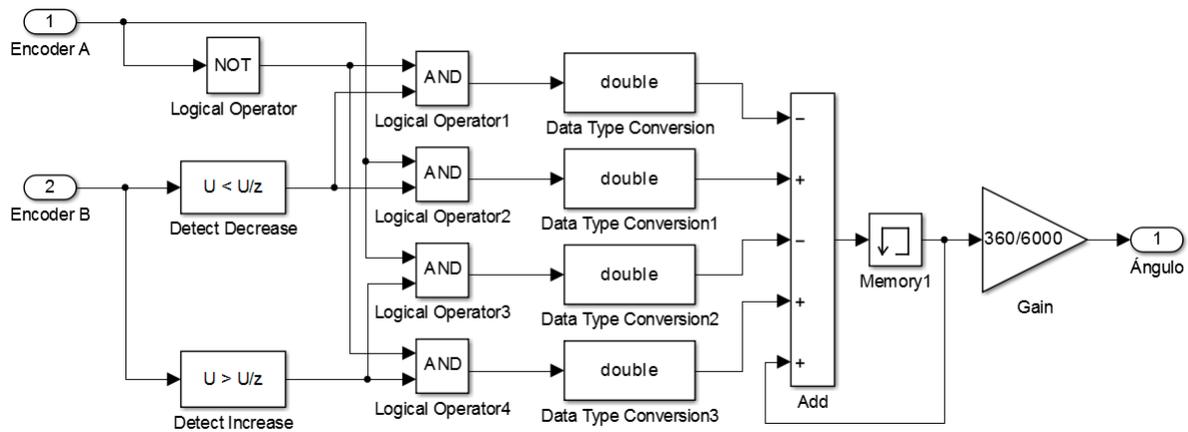


Figura 5.19: Subsistema conversor pulsos a grados.

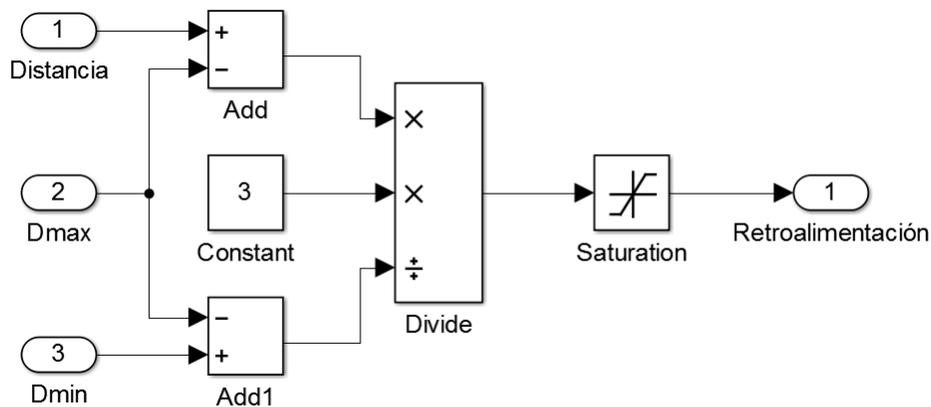


Figura 5.20: Subsistema generador de la señal de retroalimentación.

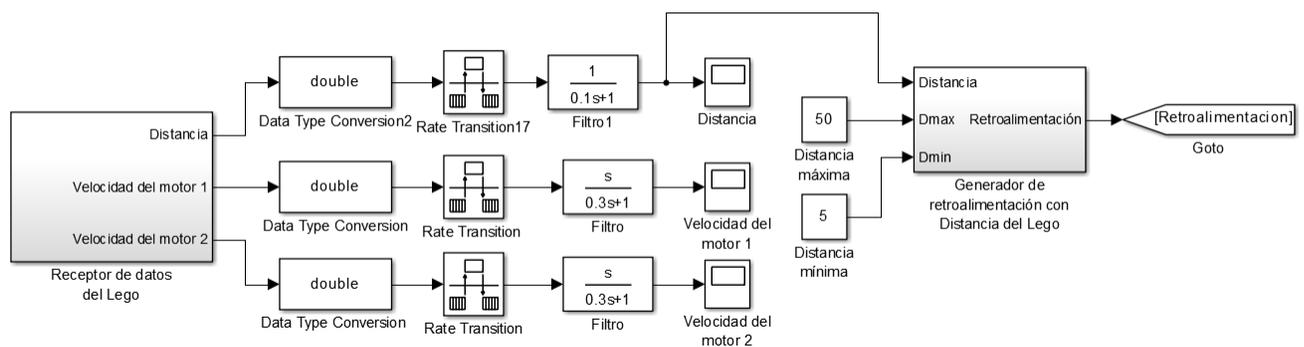


Figura 5.21: Recepción de datos del robot móvil.

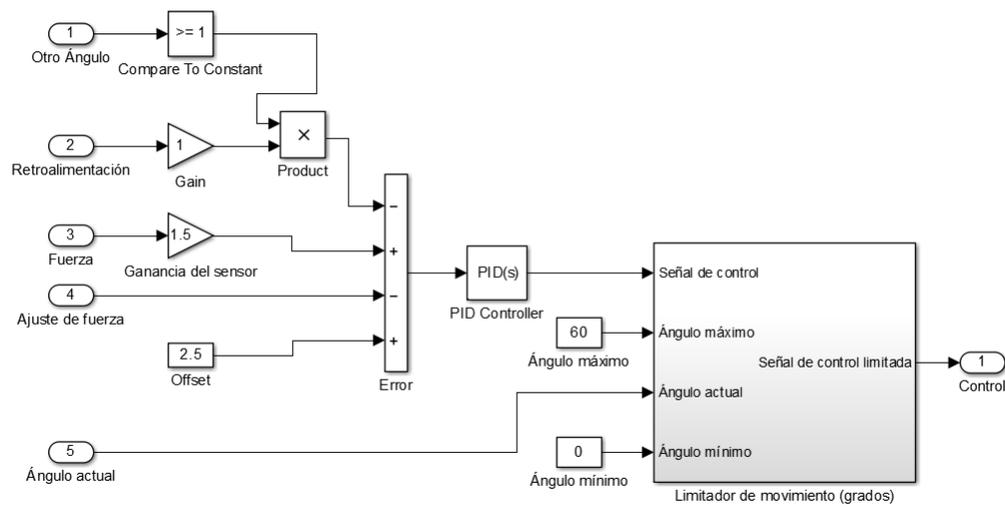


Figura 5.22: *Subsistema controlador modo retroalimentación.*

evitar la colisión. Para evitar este problema, cada dedo se retroalimenta con la información del ángulo del otro para saber si se desea avanzar o girar y de esta manera habilitar o deshabilitar la fuerza de resistencia, respectivamente. En la figura 5.22 se muestra el modelo del control en modo de retralimentación de fuerza.

El modelo del sistema para un dedo en modo de retroalimentación de fuerza se muestra en la figura 5.23.

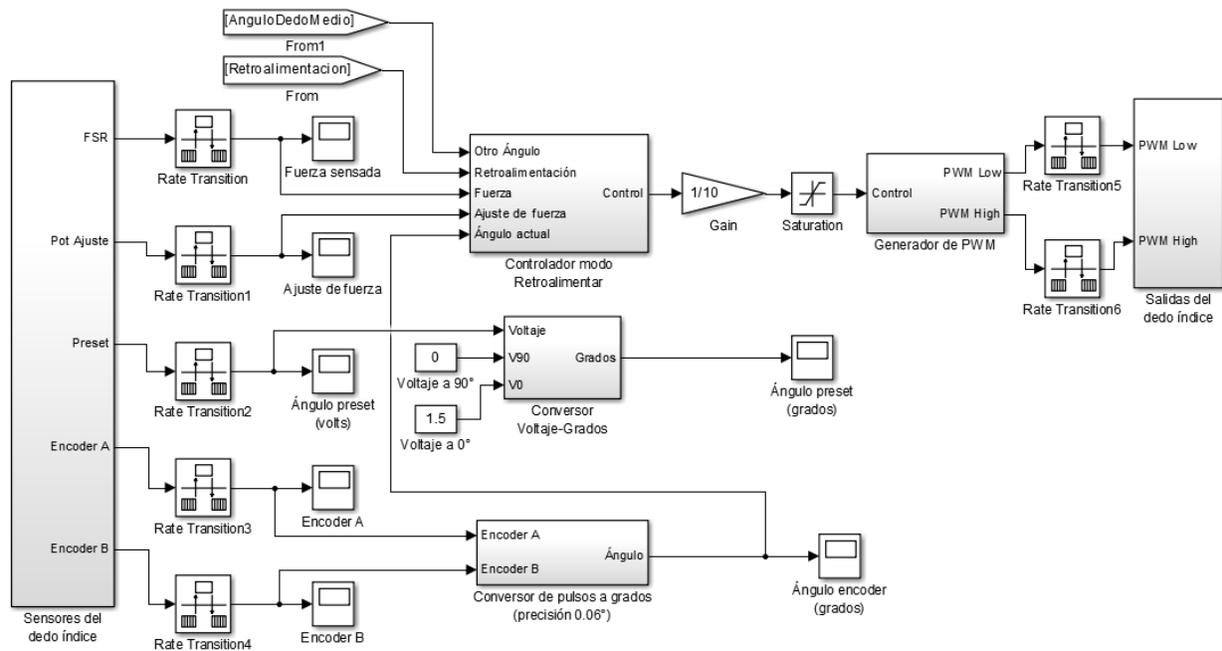


Figura 5.23: Modelo en Simulink[®] de un dedo del guante háptico en modo seguidor.

5.3. Resultados

La integración del subsistema mecánico, el subsistema de instrumentación y el subsistema de control dan como resultado un prototipo final del guante háptico cumpliendo la característica de ser un guante ligero con una masa aproximada de 270 gramos, éste se muestra en la figura 5.24. En la figura 5.25 se muestra el sistema completo en conjunto con el robot móvil.

Para evaluar el correcto funcionamiento del sistema háptico se realizaron tres pruebas principales. Todas las pruebas se realizaron utilizando el guante háptico en su modo de retroalimentación de fuerza, las pruebas se listan a continuación:

- ✓ Prueba de avance: Avance del robot móvil en relación con la posición angular de los dedos.
- ✓ Prueba de giro: Giro del robot móvil sobre su propio eje en ambos sentidos.
- ✓ Prueba de retroalimentación de fuerza: Retroalimentación de la distancia obtenida del sensor en forma de fuerza.

5.3.1. Prueba de avance

Para la prueba de avance, se colocó el robot móvil sobre una superficie plana sin obstáculos a su alrededor. Se encendieron el guante háptico y el robot móvil, se esperó a que se estableciera la conexión entre ambos sistemas y se procedió a realizar el movimiento del robot móvil. La interacción realizada con el guante háptico consistió de flexionar significativamente

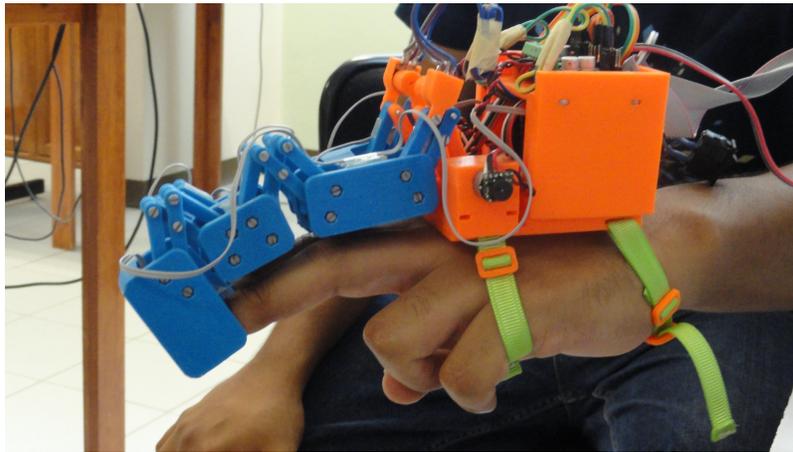


Figura 5.24: *Guante háptico con retroalimentación de fuerzas.*

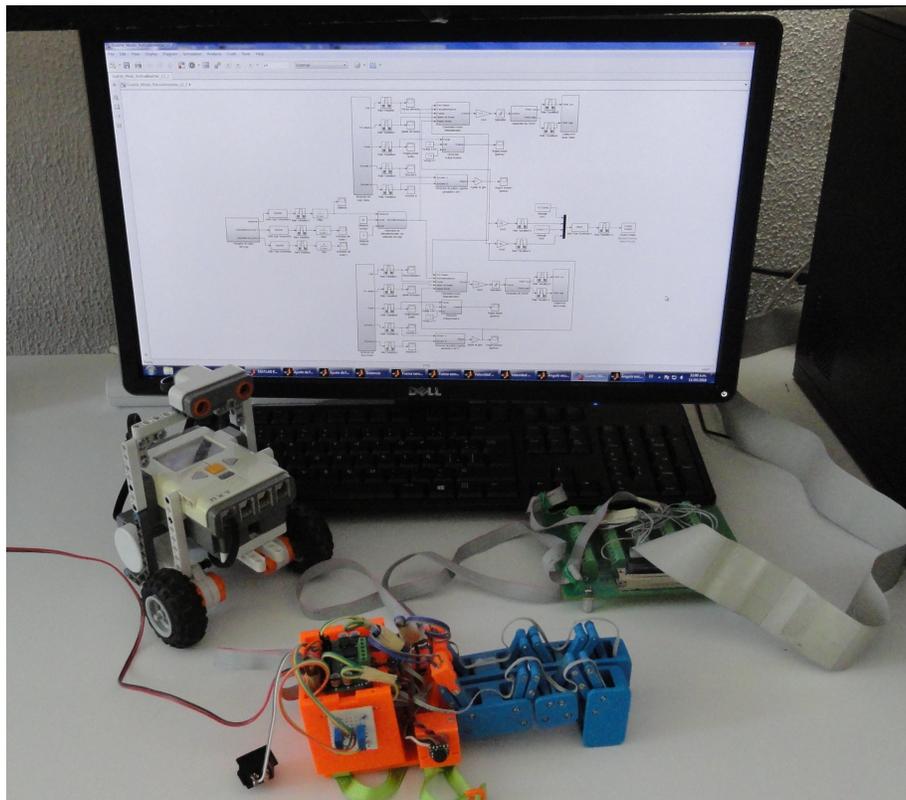


Figura 5.25: *Sistema del guante háptico y robot móvil.*

los dedos, extenderlos ligeramente y finalmente extender los dedos hasta la posición de reposo.

En la figura 5.26 se observan las gráficas de la posición angular para cada dedo y la velocidad de los motores del robot móvil. Como se puede observar cuando se flexionan ambos dedos para que el robot móvil se desplace en línea recta, la velocidad de los motores aumenta al mismo tiempo y cuando se extienden ligeramente los dedos, la velocidad de los motores disminuye proporcionalmente. Al extender completamente los dedos, los motores reducen su velocidad hasta llegar al reposo.

El desfase observado entre las gráficas de la posición angular de los dedos y la velocidad de los motores se debe al retardo inducido por el filtro-derivador utilizado para el cálculo de la velocidad a partir de la lectura de los encoders de los servomotores del robot.

5.3.2. Prueba de giro

Para la prueba de giro, se colocó el robot móvil sobre una superficie plana sin obstáculos a su alrededor. Se encendieron el guante háptico y el robot móvil, se esperó a que se estableciera la conexión entre ambos sistemas y se procedió a realizar el movimiento del robot móvil. La interacción realizada con el guante háptico consistió de flexionar el dedo índice y dejar extendido el dedo medio, posteriormente extender el dedo índice hasta su posición de reposo y flexionar el dedo medio, finalmente extender ambos dedos a su posición de reposo.

En la figura 5.27 se observan las gráficas de la posición angular para cada dedo y la velocidad de los motores del robot móvil. Como se puede observar al flexionar el dedo índice, la velocidad del motor izquierdo aumenta positivamente y la velocidad del motor derecho aumenta negativamente haciendo que el robot móvil gire a la derecha. Cuando se extiende el dedo índice y se flexiona el dedo medio, la velocidad del motor izquierdo aumenta negativamente y la velocidad del motor derecho aumenta positivamente haciendo que el robot móvil gire a la izquierda.

5.3.3. Prueba de retroalimentación de fuerza

Para la prueba de retroalimentación de fuerza, se colocó el robot móvil sobre una superficie plana en frente de una pared, para que se detectara un obstáculo. Se encendieron el guante háptico y el robot móvil, se esperó a que se estableciera la conexión entre ambos sistemas y se procedió a realizar el movimiento del robot móvil. La interacción realizada con el guante háptico consistió de flexionar ambos dedos para que el robot avanzara, esperar la retroalimentación de la distancia en forma de fuerza y extender ambos dedos hasta su posición de reposo para evitar la colisión.

En la figura 5.28 se observan las gráficas de la posición angular de cada dedo y la velocidad de los motores del robot móvil. Se observa la flexión de ambos dedos durante un breve tiempo en el que el robot móvil avanza, posteriormente se extienden ambos dedos causando

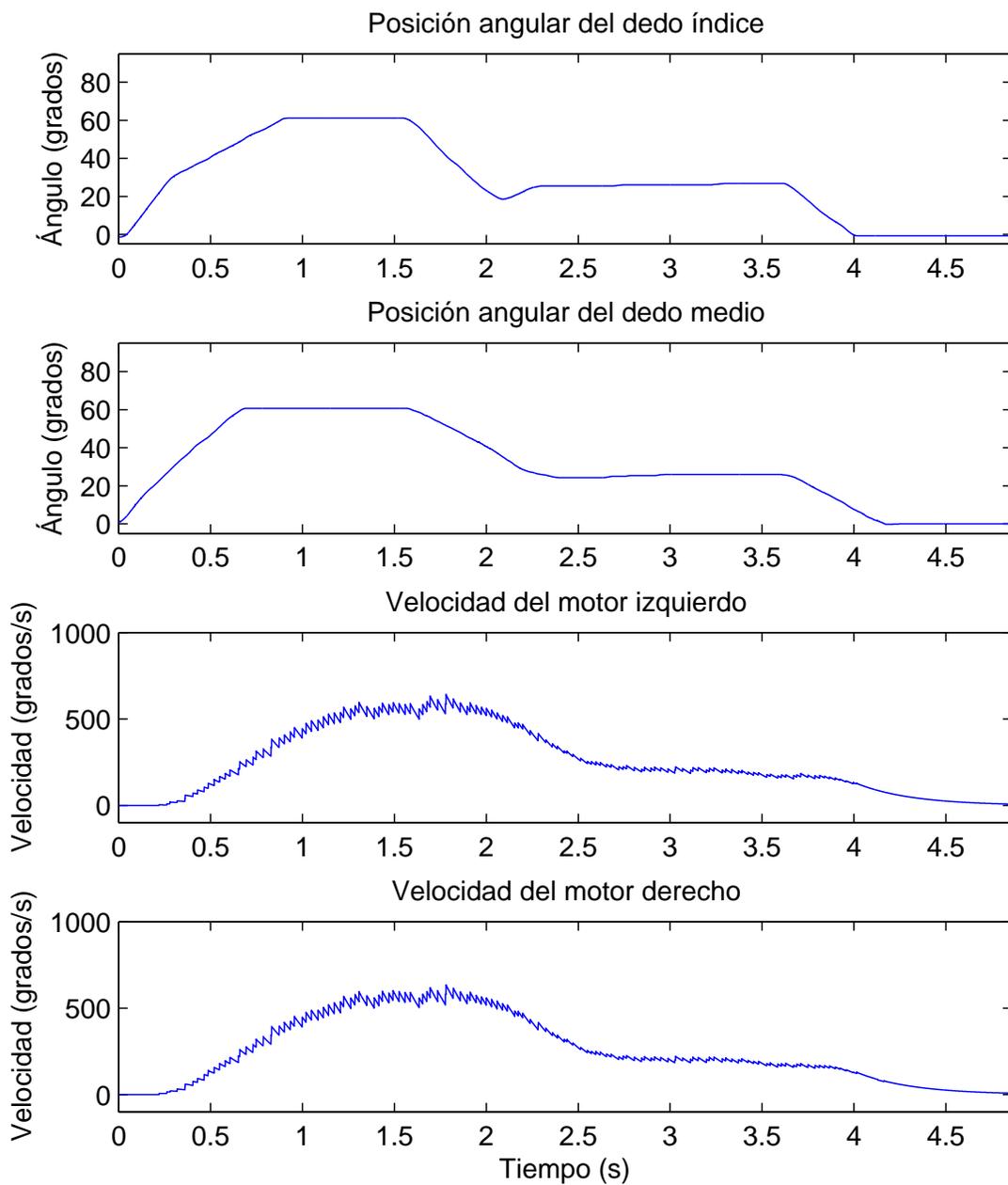


Figura 5.26: Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de avance del robot móvil.

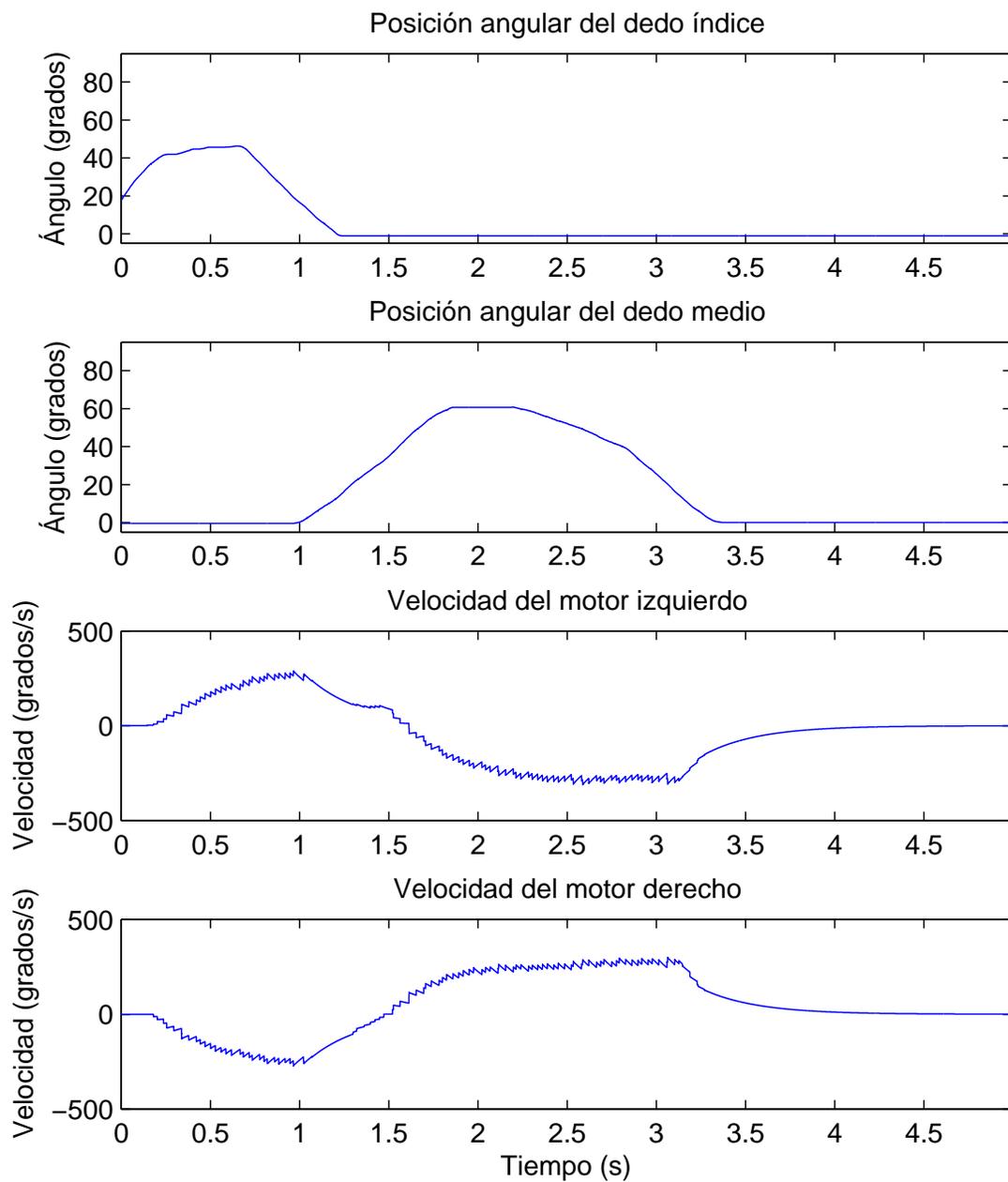


Figura 5.27: Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de giro del robot móvil.

el frenado del robot móvil.

En la figura 5.29 se observan las señales de los sensores de fuerza y la distancia obtenida por el sensor ultrasónico. En las gráficas se observa que la fuerza en ambos dedos se incrementa conforme la distancia disminuye. Comparando las figuras 5.28 y 5.29, se observa que la posición angular de los dedos permanece estable durante el incremento de la fuerza lo cual indica que el guante háptico genera una mayor fuerza para devolver el exoesqueleto a su estado de reposo, dicho incremento de fuerza se debe a que el robot móvil se aproxima a una colisión. Posteriormente, la señal de los sensores disminuye y la distancia permanece constante debido al frenado del robot.

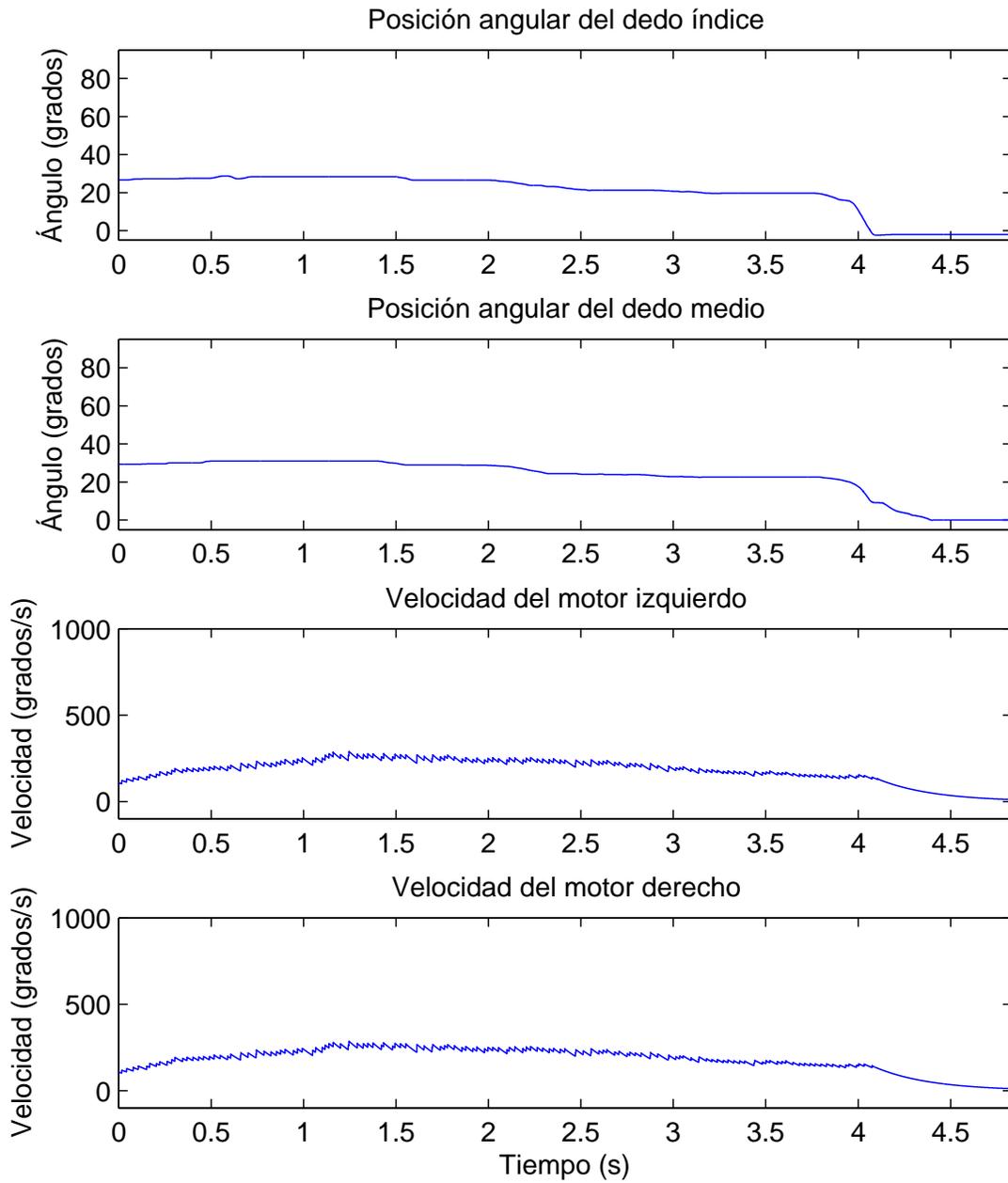


Figura 5.28: Posición angular de los dedos y velocidad de los motores en la prueba de retroalimentación de fuerza.

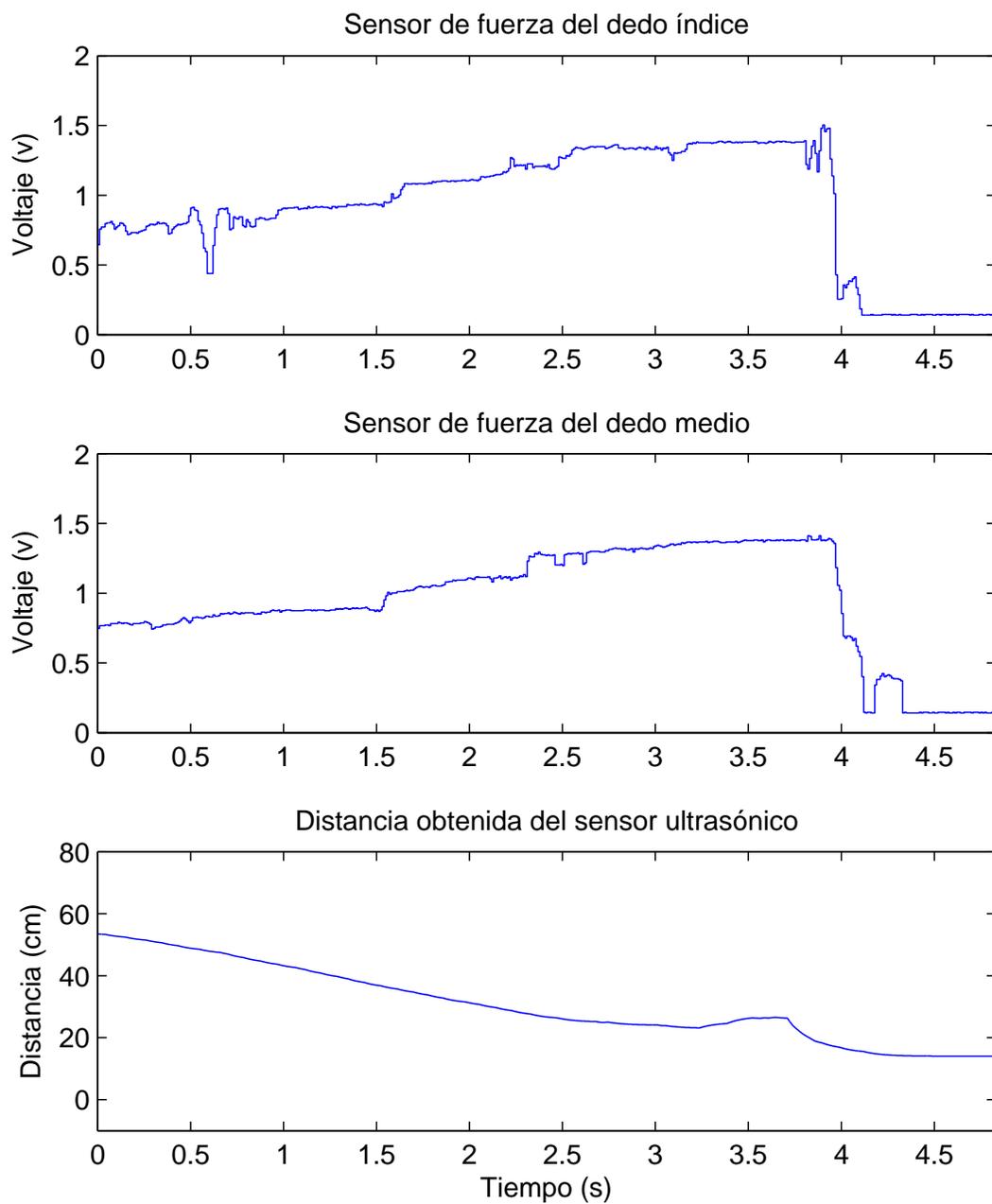


Figura 5.29: Señales de los sensores de fuerza y distancia obtenida con el sensor ultrasónico.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos a futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas. Para dar seguimiento al tema desarrollado, también se presentan propuestas para posibles mejoras y aplicaciones para el guante háptico.

6.1. Conclusiones

Se desarrolló un prototipo capaz de convertir el movimiento de los dedos de la mano en señales de control para manipular algún sistema físico o virtual, en este caso la teleoperación de un robot móvil. Así mismo, se lograron generar fuerzas de retroalimentación sobre el usuario con base en la información suministrada por el sistema manipulado.

La mano humana es una de las partes de cuerpo con mayor complejidad debido a la cantidad de interacciones que se puede realizar con éstas. Al modelar el dedo como eslabones acoplados por juntas de revoluta, se restringe su capacidad a únicamente los movimientos de flexión y extensión. Las capacidades se reducen aún más cuando el movimiento del dedo completo se realiza como un sólo grado de libertad. Sin embargo, aún con todas esas limitantes, es posible realizar una amplia gama de interacciones con el movimiento de los dedos de la mano.

El tratar de modelar y replicar el dedo a una forma más cercana a la realidad con todos sus grados de libertad es una tarea muy compleja debido a que aún cuando se logre permitir el movimiento en cada grado de libertad, queda el problema de actuar dichos grados de libertad para poder generar los movimientos naturales de la mano. Esto se debe principalmente a que el tamaño de las manos es muy reducido, siendo muy difícil y costoso conseguir actuadores de reducidas dimensiones y grandes fuerzas.

Por las observaciones hechas anteriormente es que se busca simplificar el modelo cinemático de la mano, y de los dedos, para poder generar exoesqueletos capaces de seguir el movimiento, amplificarlo o generar fuerzas de retroalimentación.

Al diseñar un exoesqueleto que se acople a la anatomía del humano, es necesario que

éste no interfiera con el usuario. Para evitar interferencias entre el exoesqueleto y los dedos del usuario, modelados como eslabones y juntas de revolutas, se pueden utilizar diferentes mecanismos de centro remoto, tal es el caso de los mecanismos paralelos. Utilizando estos mecanismos se logra que el exoesqueleto siga el movimiento de los dedos, permitiendo a las falanges mecánicas rotar entorno a las articulaciones de los dedos evitando así interferencias.

La impresión 3D brinda una gran ventaja para manufacturar prototipos. Al ser un proceso de manufactura de bajo costo, es posible probar físicamente los prototipos modelados sin elevar considerablemente el costo. Así como también es sencillo personalizar el guante háptico dependiendo de las características del usuario y manufacturarlo.

De igual manera al utilizar la impresión 3D se pueden obtener prototipos con geometrías complejas en menor tiempo en comparación con otros procesos de manufactura y los prototipos obtenidos mediante este proceso son más ligeros debido al material utilizado y a la capacidad de generar piezas que no son completamente sólidas.

En el desarrollo de la tesis se realizó la división del sistema del guante háptico en subsistemas, siendo esto de gran utilidad para enfocarse en resolver problemas más pequeños. Sin embargo, existen decisiones de diseño que involucran a más de un subsistema. Dichas decisiones deben de realizarse tomando en cuenta a todos los subsistemas involucrados para poder continuar con su desarrollo. Es por esto que la resolución de los subsistemas se tiene que desarrollar de manera concurrente y es necesario realizar varias iteraciones en el proceso de diseño.

La integración de diferentes subsistemas tiene un papel muy importante en el desarrollo de proyectos debido a que en ocasiones cuando éstos se desarrollan de manera independiente y se unen para formar el sistema final, se requiere de trabajo adicional para generar dicha unión. Tal es el caso de la decisión inicial de diseño de utilizar el kit *LEGO Mindstorms NXT*[®] para construir el robot y la tarjeta *PCI-6024E* para adquirir datos del guante háptico, debido a la experiencia previa de trabajar con ambos sistemas de manera individual en el entorno *Simulink*[®]. Pero al integrarlos, los modelos tenían librerías incompatibles y no era posible ejecutar en un mismo programa ambos modelos. Por lo cual, realizando pruebas se llegó a la solución final de ejecutar el programa en el robot móvil de manera autónoma y comunicarse, con paquetes de datos mediante *bluetooth*, con el modelo del guante háptico en *Simulink*[®] ejecutado en la computadora para poder adquirir datos mediante la tarjeta *PCI-6024E*.

6.2. Trabajos a futuro

Con el fin de darle seguimiento al tema desarrollado en esta tesis, a continuación se enlistan los posibles puntos a mejorar, así como nuevos objetivos a desarrollar.

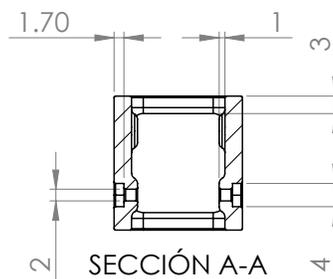
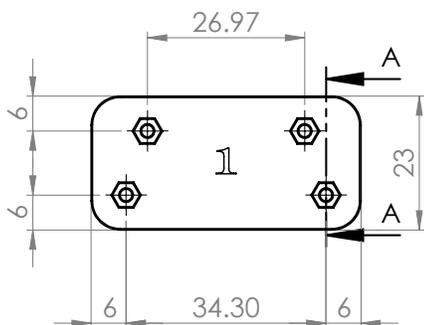
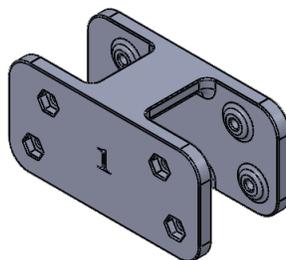
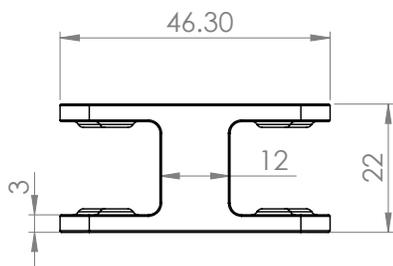
- ✓ Aplicar un control robusto para seguir el movimiento del dedo y generar la fuerza de retroalimentación.
- ✓ Cambiar los motores por unos con mayor par de torsión para incrementar la fuerza de retroalimentación.
- ✓ Modificar la transmisión de la fuerza entre los motores y el exoesqueleto con el fin de extender el guante háptico a los demás dedos de la mano.
- ✓ Modificar la adquisición y procesamiento de señales con el fin de hacer portable el guante háptico.
- ✓ Modificar el exoesqueleto de tal manera que sea ajustable a un rango más amplio de tamaños de la mano del usuario.
- ✓ Extender el exoesqueleto al brazo para ampliar la gama de interacciones.

Entre las posibles aplicaciones que puede tener el prototipo desarrollado, y las mejoras del mismo, se encuentran:

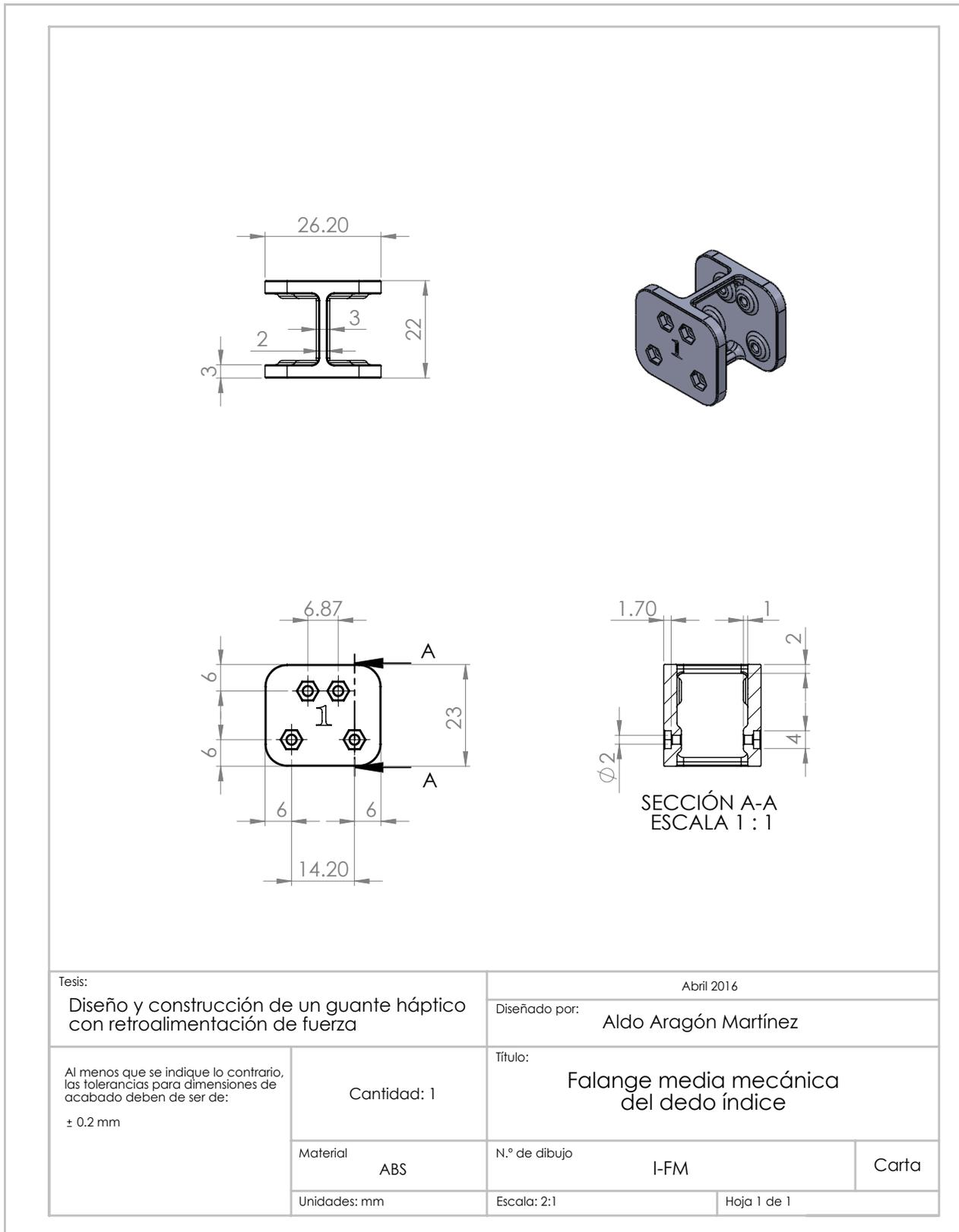
- ✓ Rehabilitación para lesión de la mano.
- ✓ Manipulación de objetos en realidad virtual.
- ✓ Manipulación de objetos en realidad aumentada.
- ✓ Teleoperación de robots con otras configuraciones, por ejemplo: manos y brazos robóticos, drones, robots cartesianos, etc.
- ✓ Traducir mensajes del lenguaje a señas.
- ✓ Prótesis para la amplificación de la fuerza de agarre de una persona.
- ✓ Mandos a distancia para la manipulación de programas computacionales.

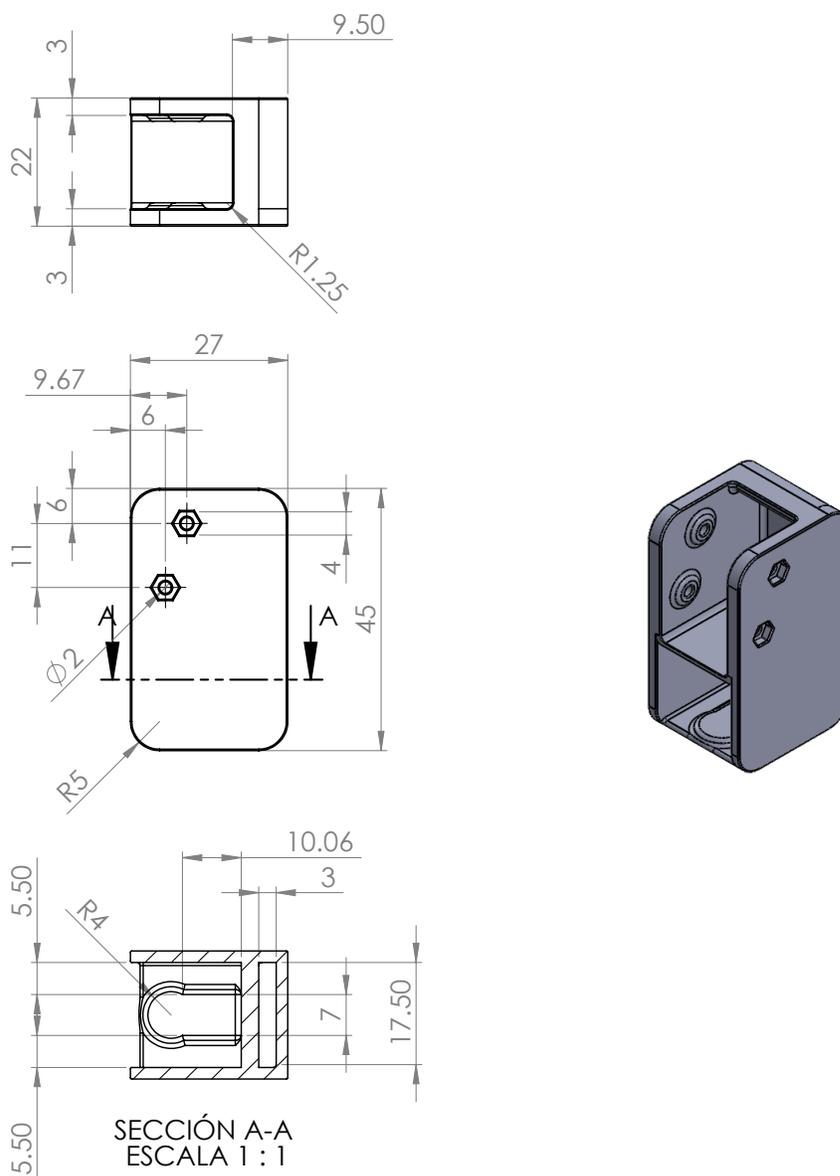
Apéndice A

Dibujos técnicos

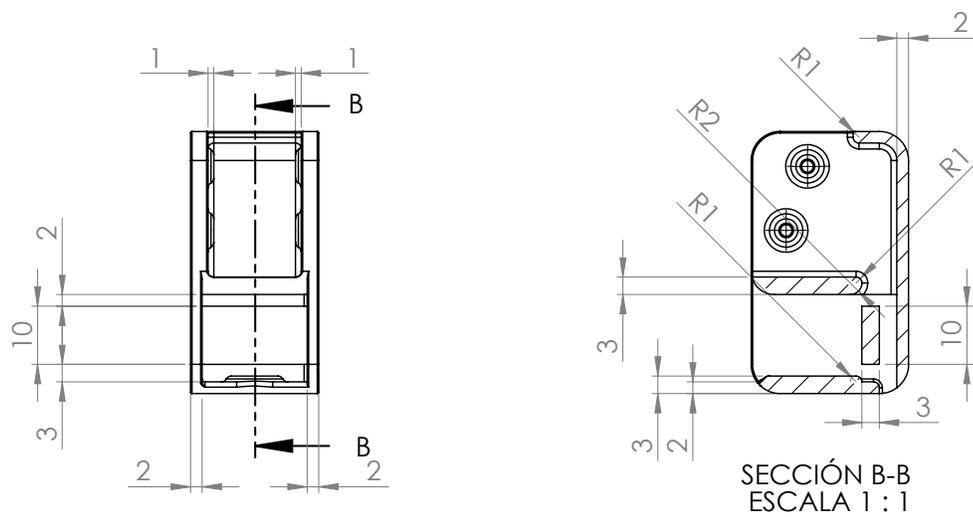


Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange proximal mecánica del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-FP	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 1

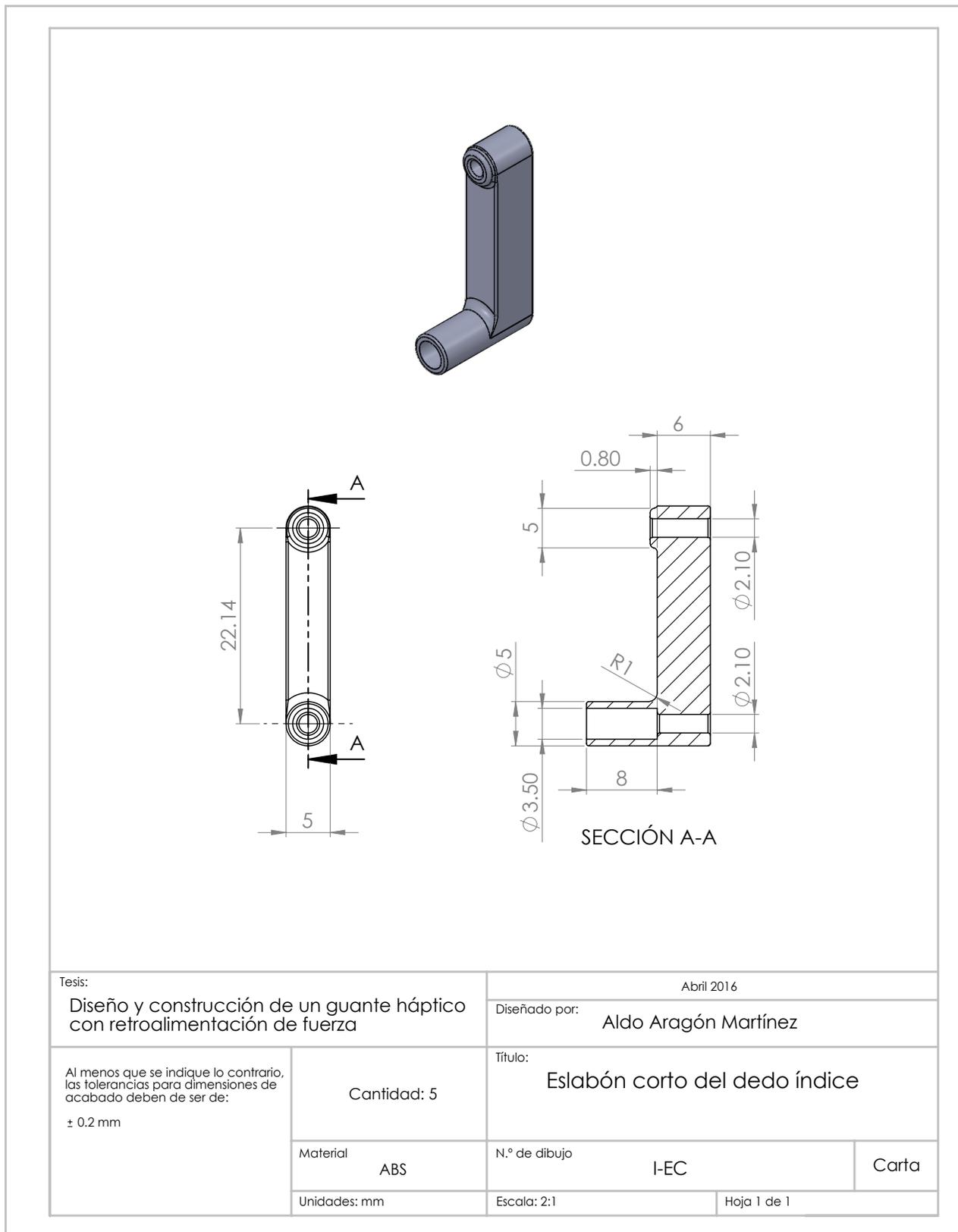




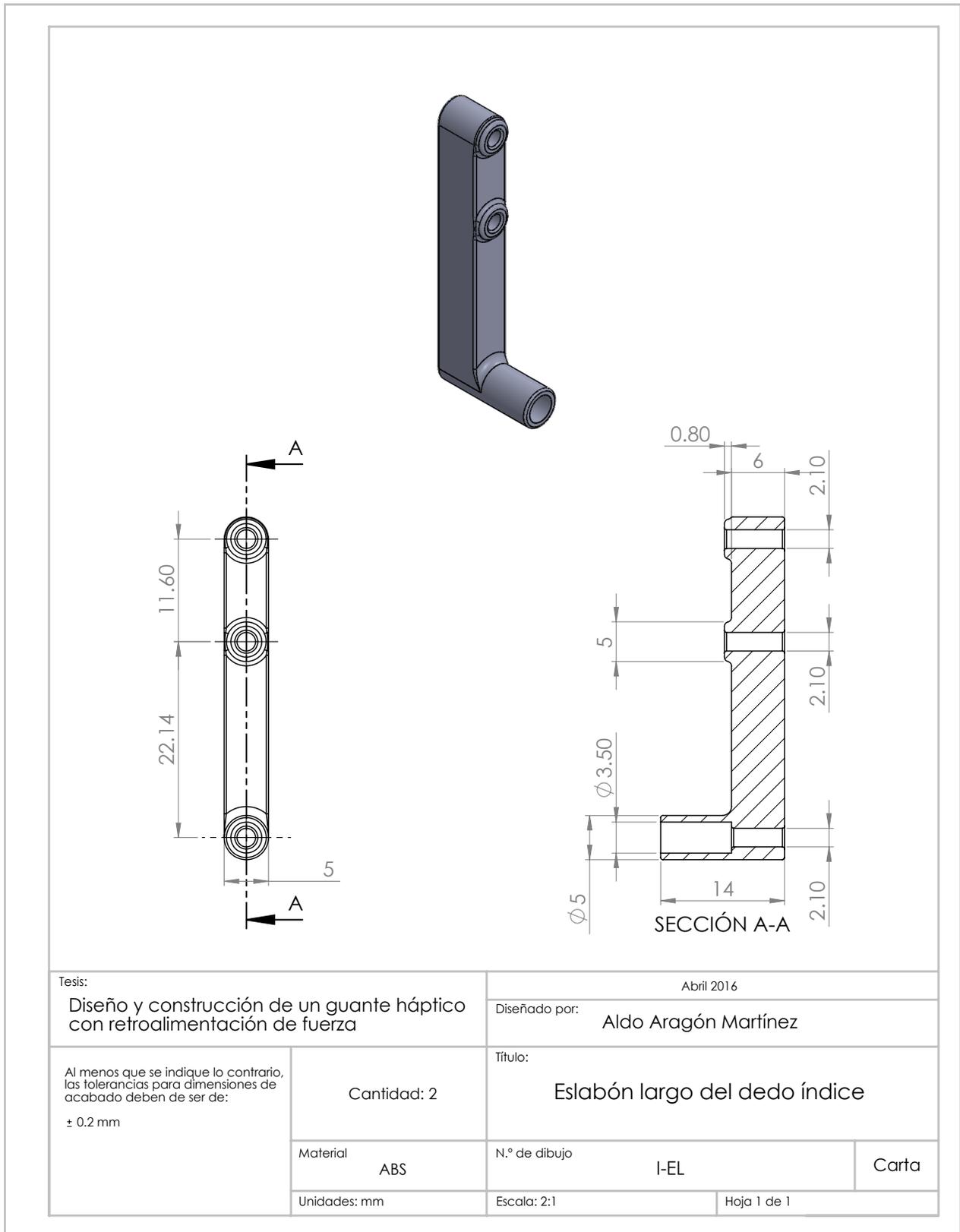
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange distal mecánica del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-FD	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 2

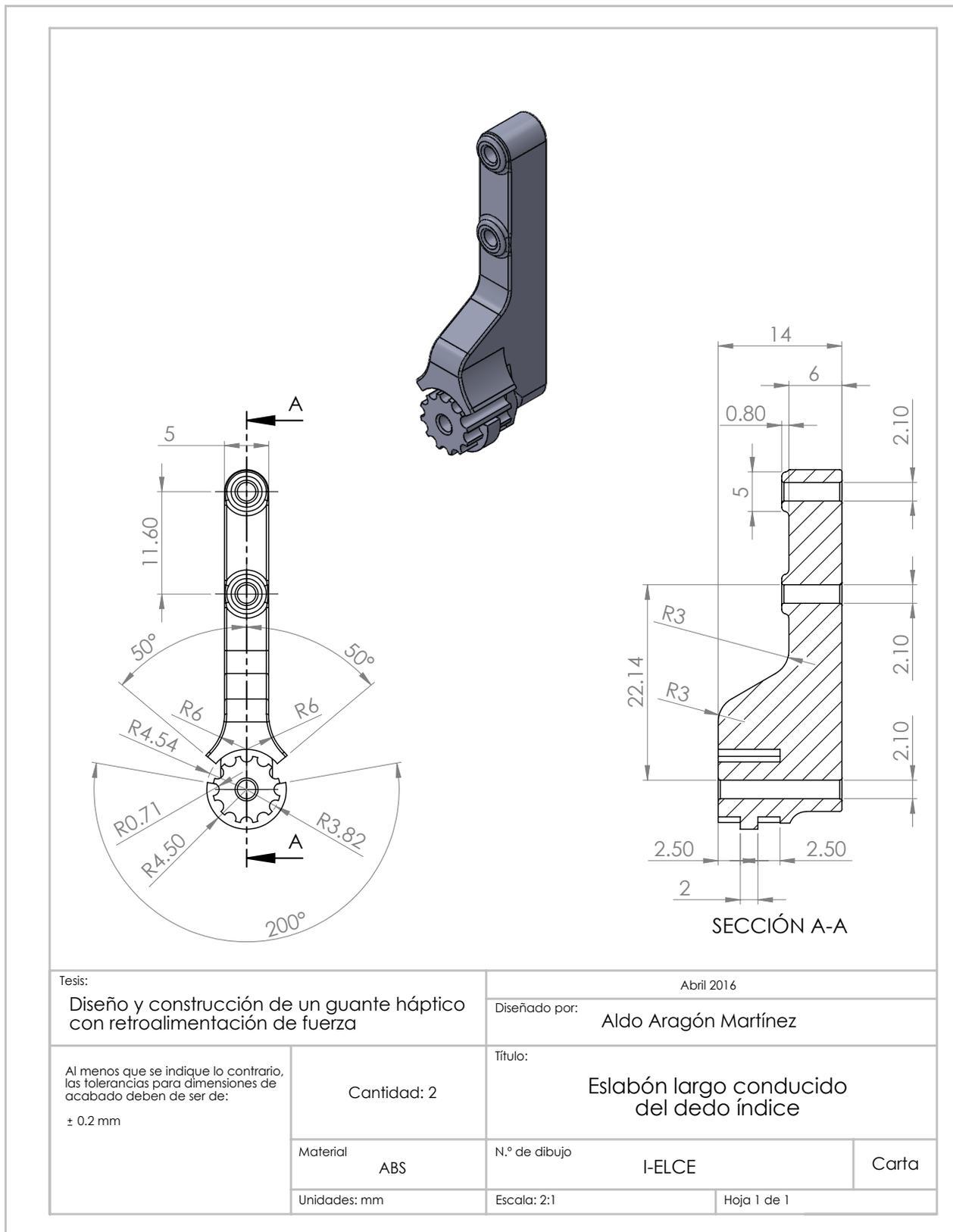


Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange media mecánica del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-FM	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 2 de 2

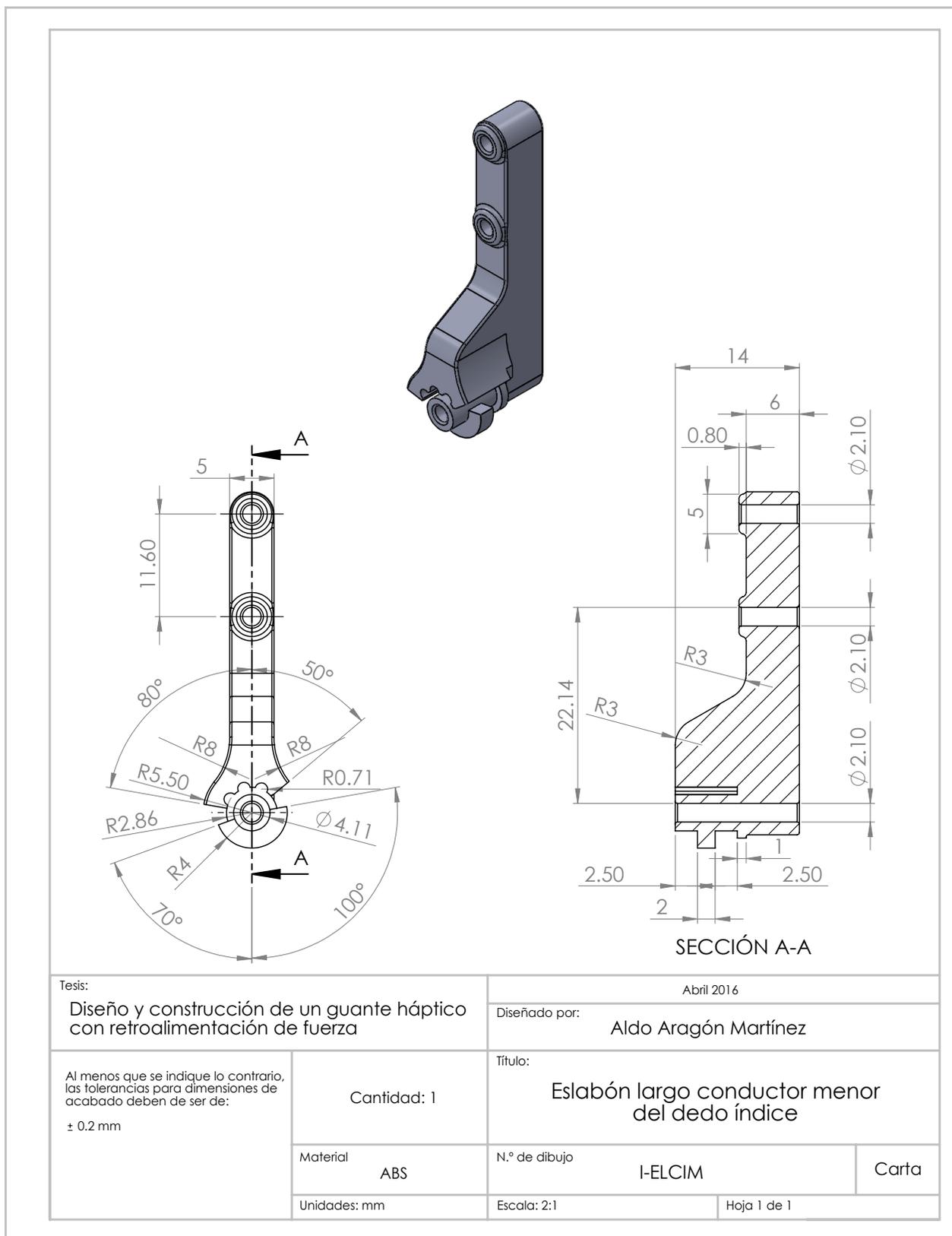


Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 5	Título: Eslabón corto del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-EC	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1

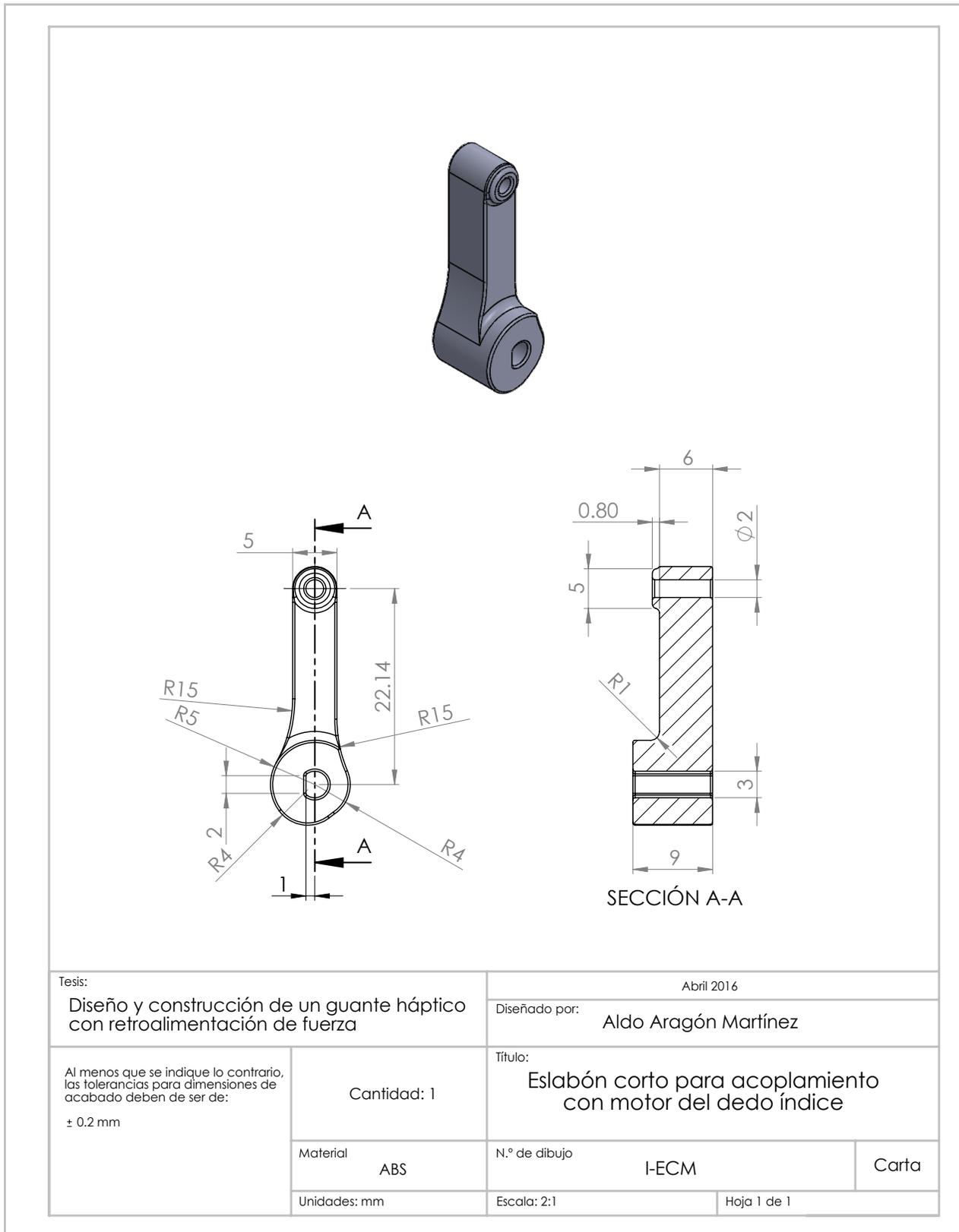




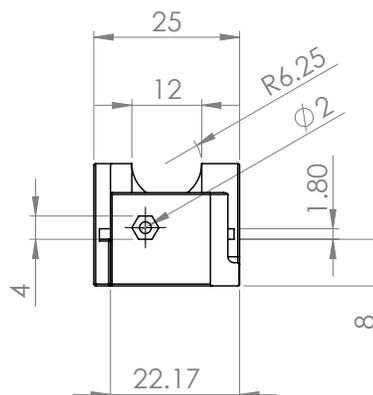
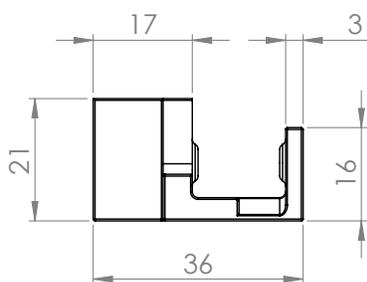
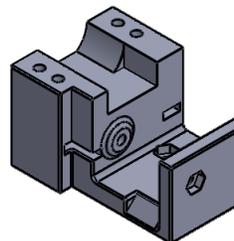
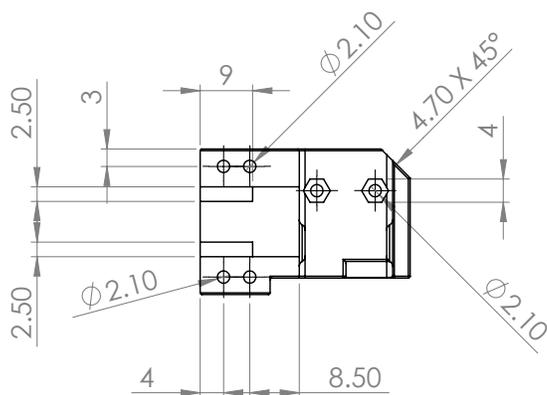
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 2	Título: Eslabón largo conducido del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-ELCE	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1



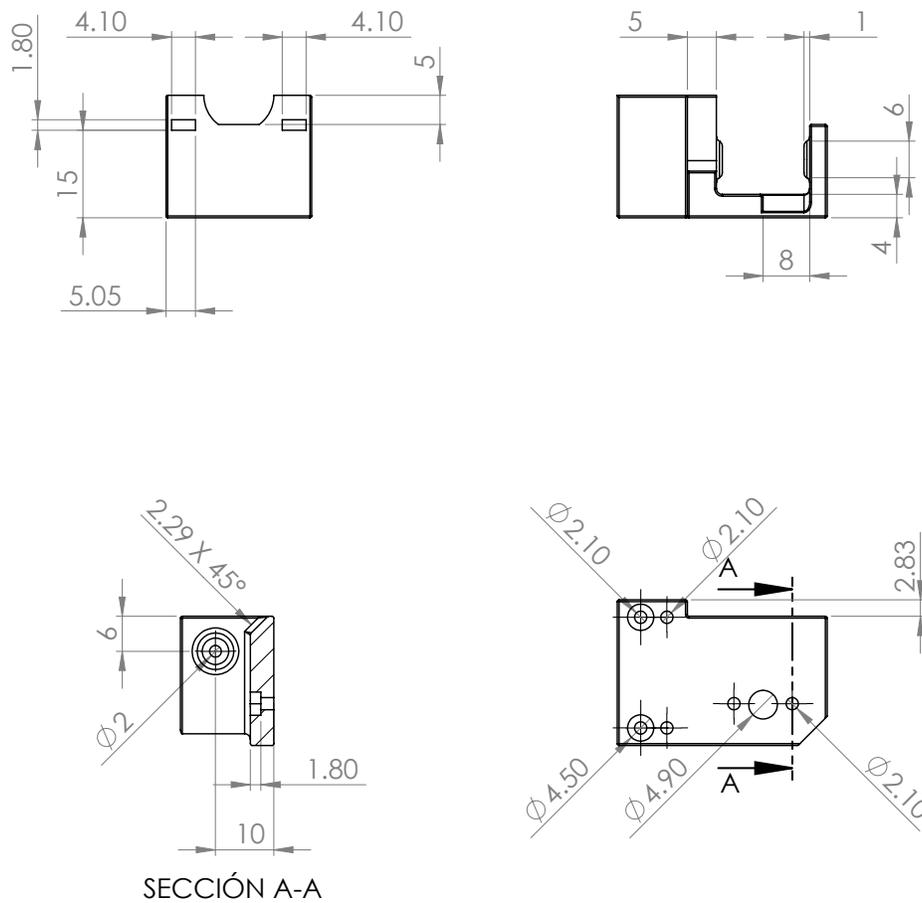
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: $\pm 0.2 \text{ mm}$	Cantidad: 1	Título: Eslabón largo conductor menor del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-ELCIM	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1



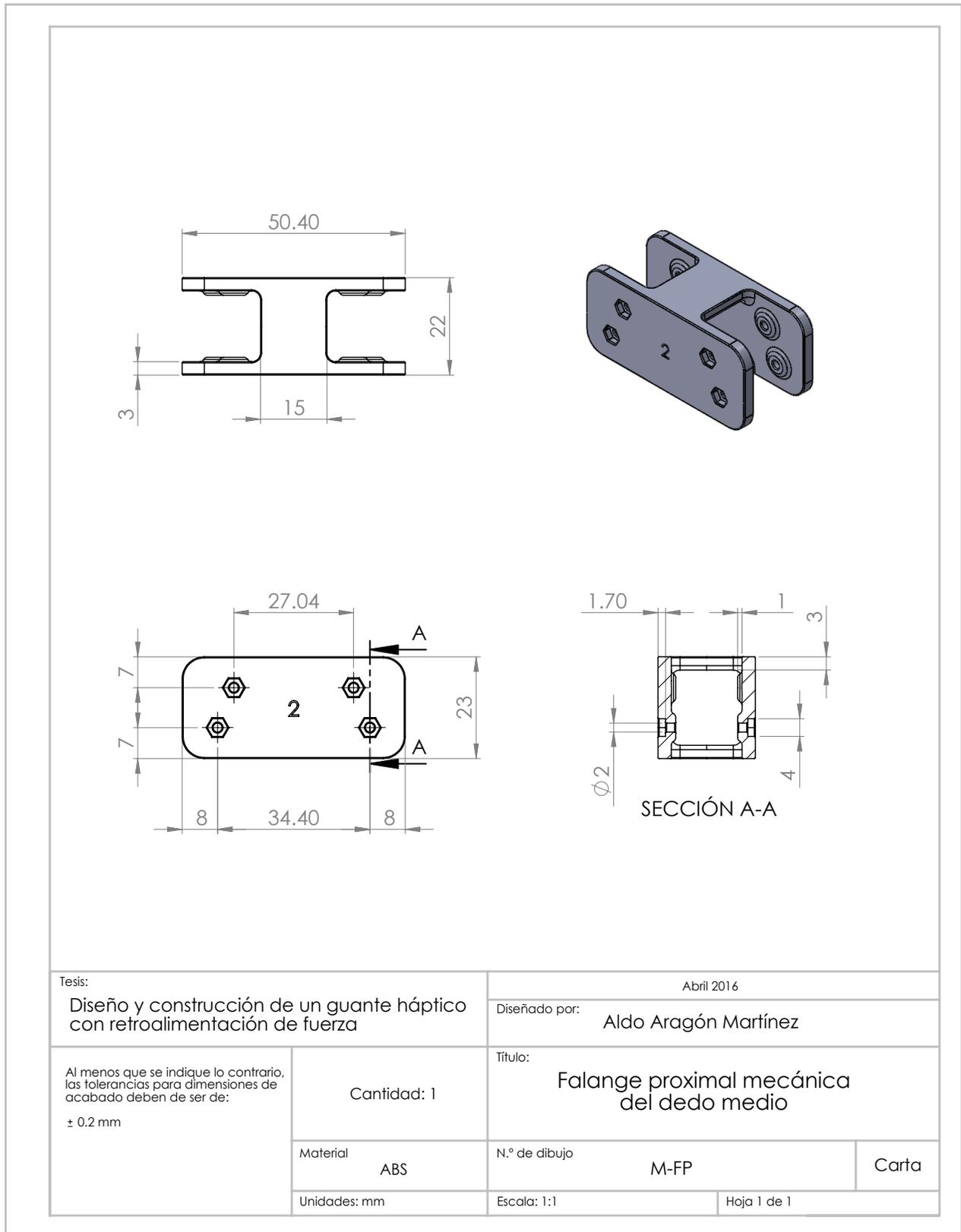
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Eslabón corto para acoplamiento con motor del dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-ECM	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1



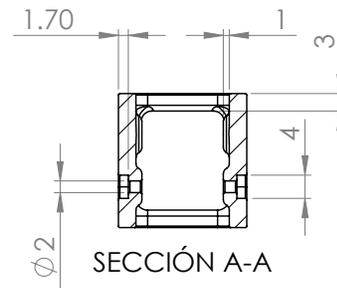
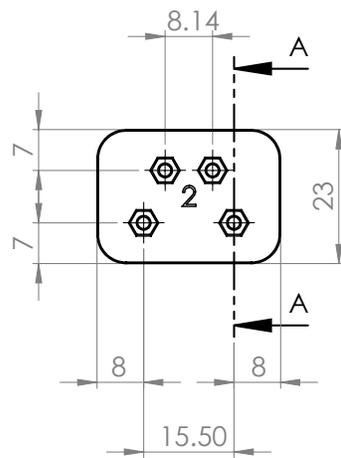
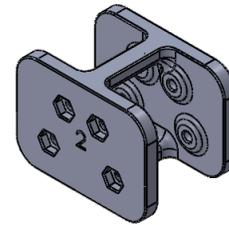
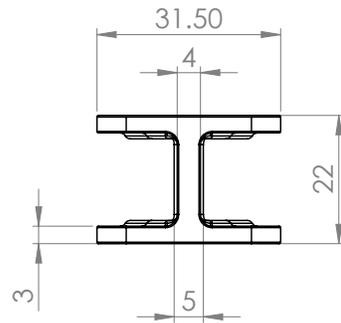
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Base del exoesqueleto para el dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-BED	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 2



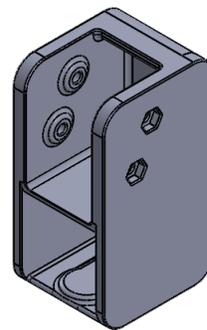
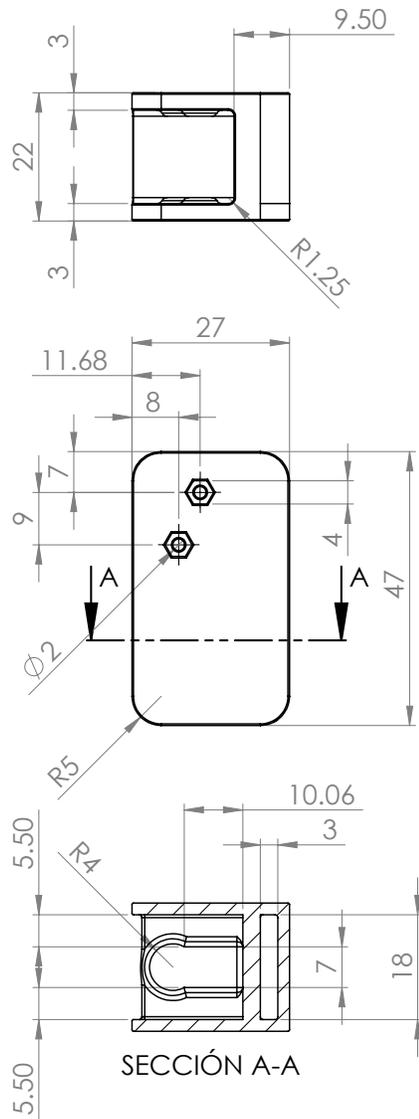
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Base del exoesqueleto para el dedo índice	
	Material ABS	N.º de dibujo I-BED	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 2 de 2



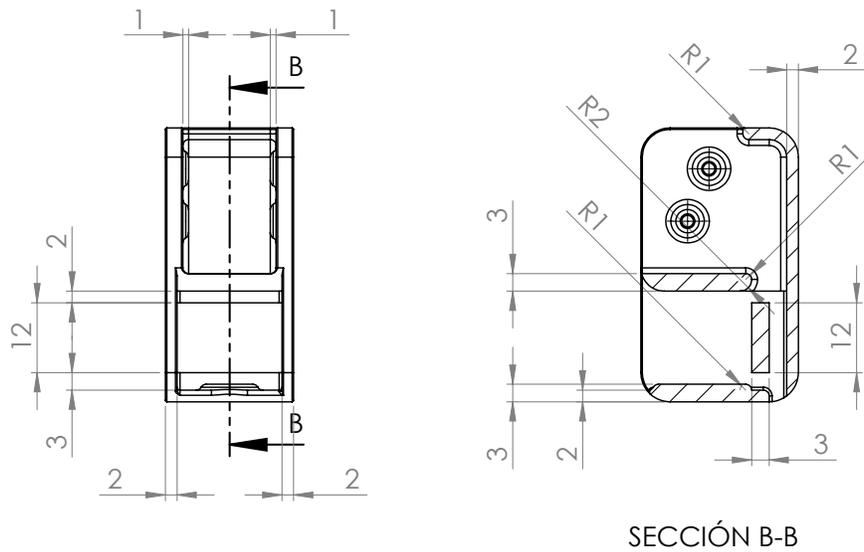
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange proximal mecánica del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-FP	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 1



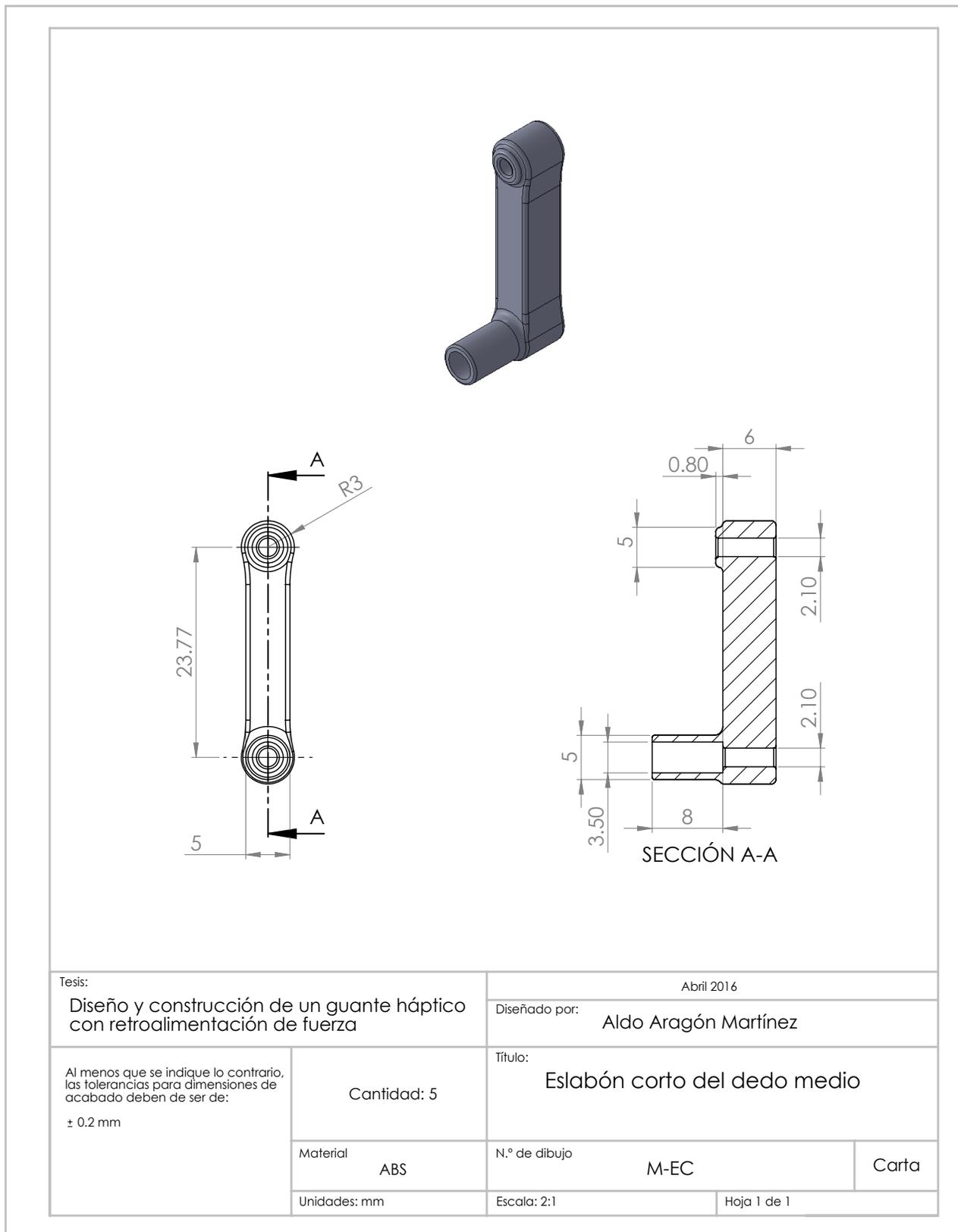
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange media mecánica del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-FM	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 1



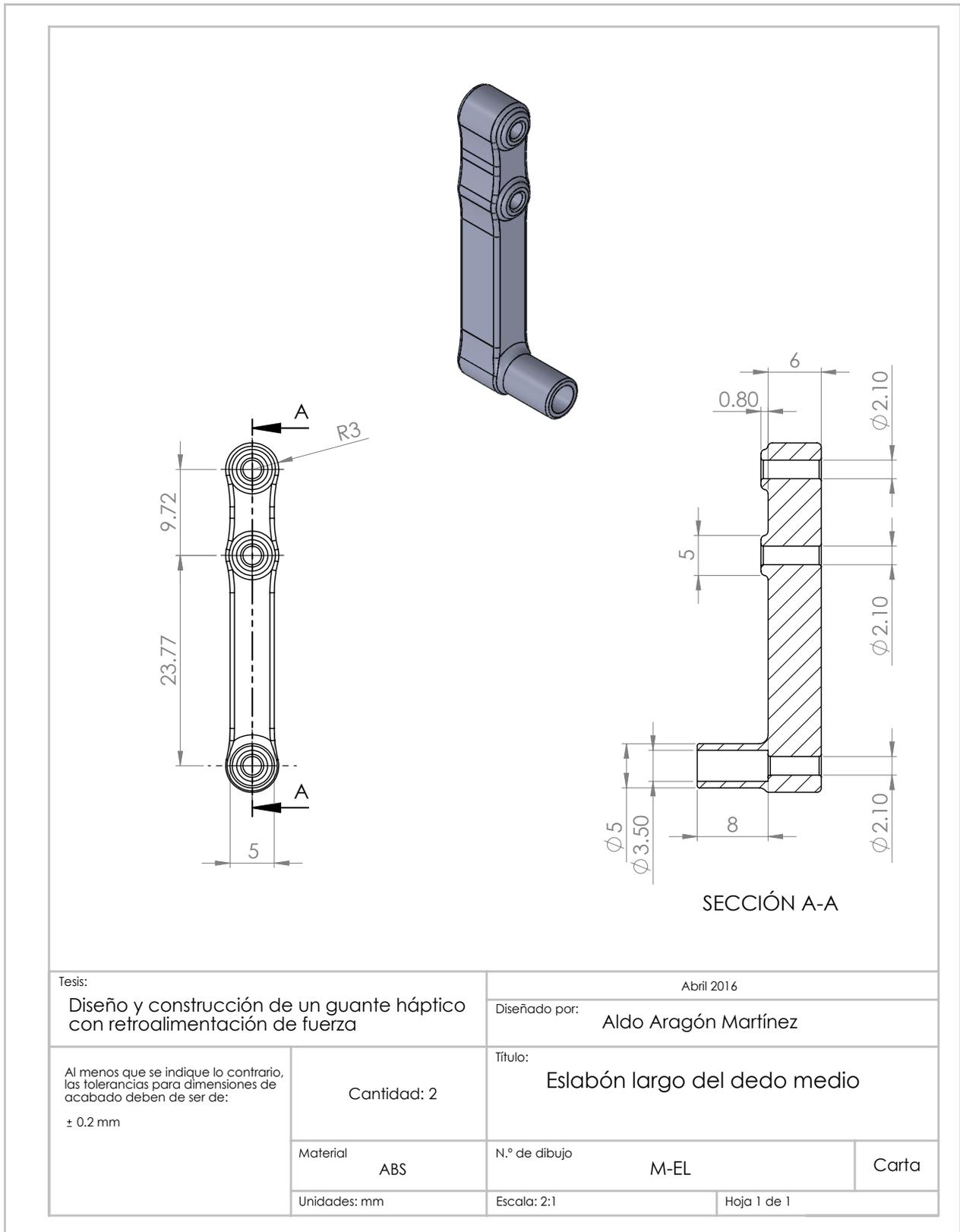
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange distal mecánica del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-FD	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 2

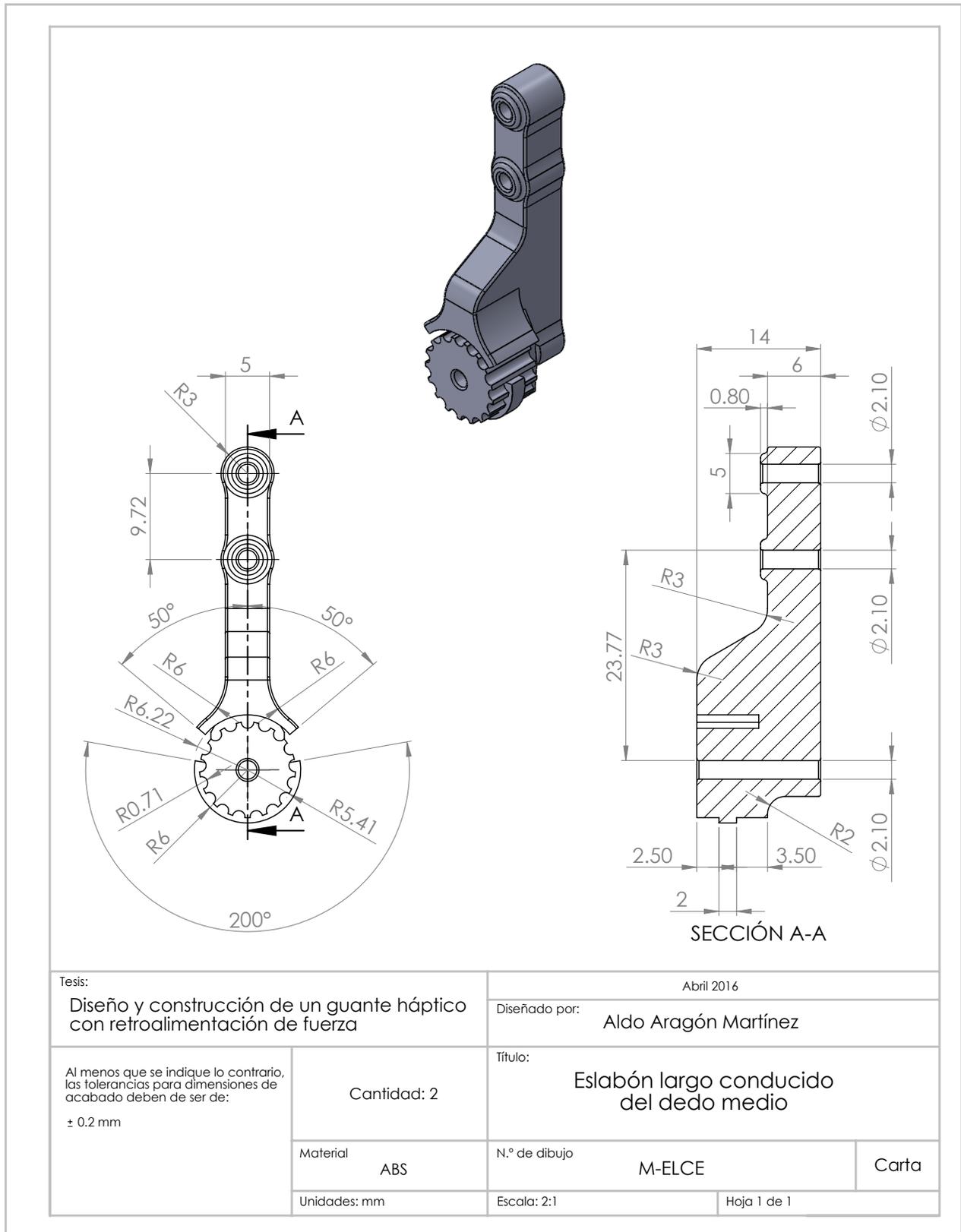


Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Falange distal mecánica del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-FD	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 2 de 2

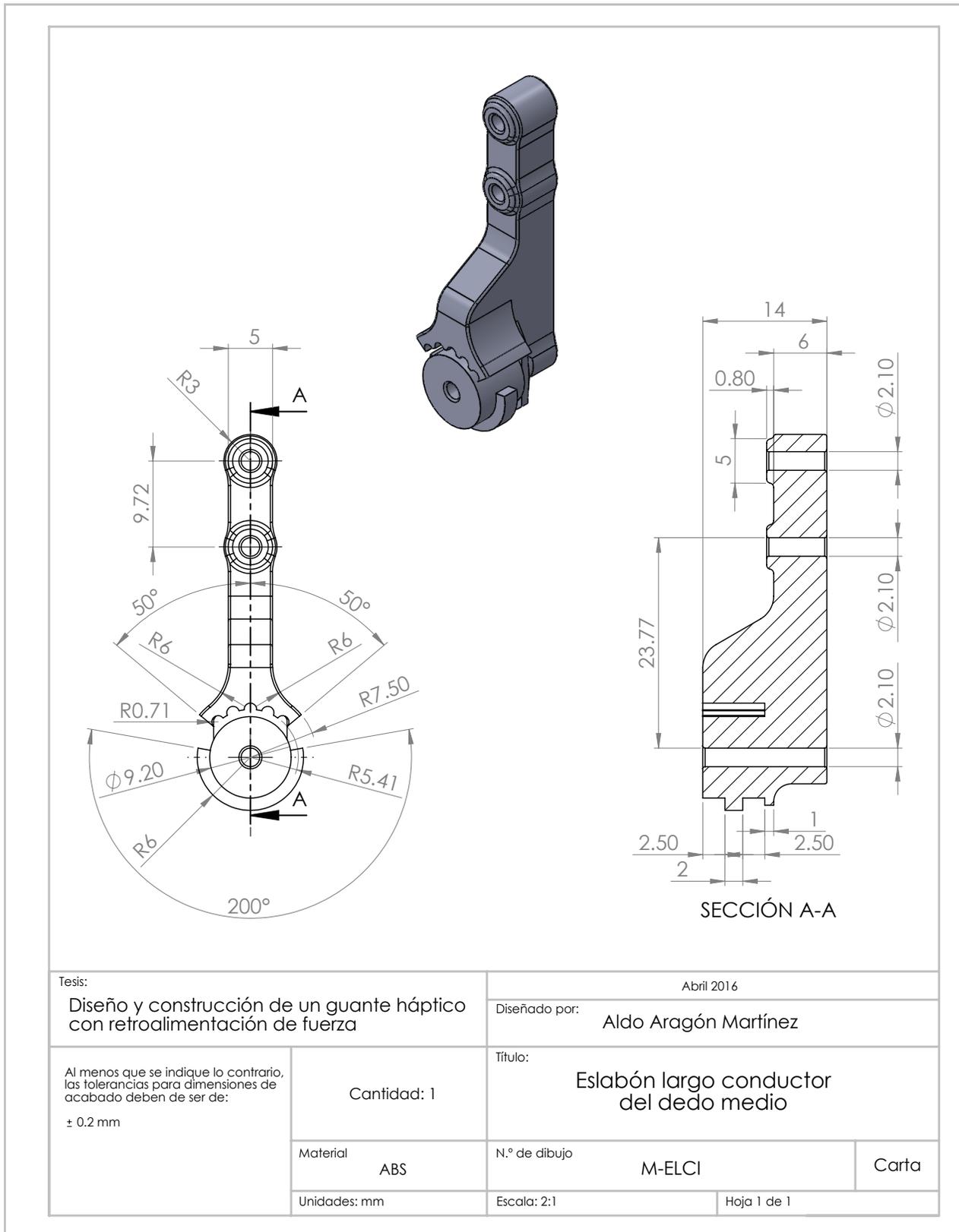


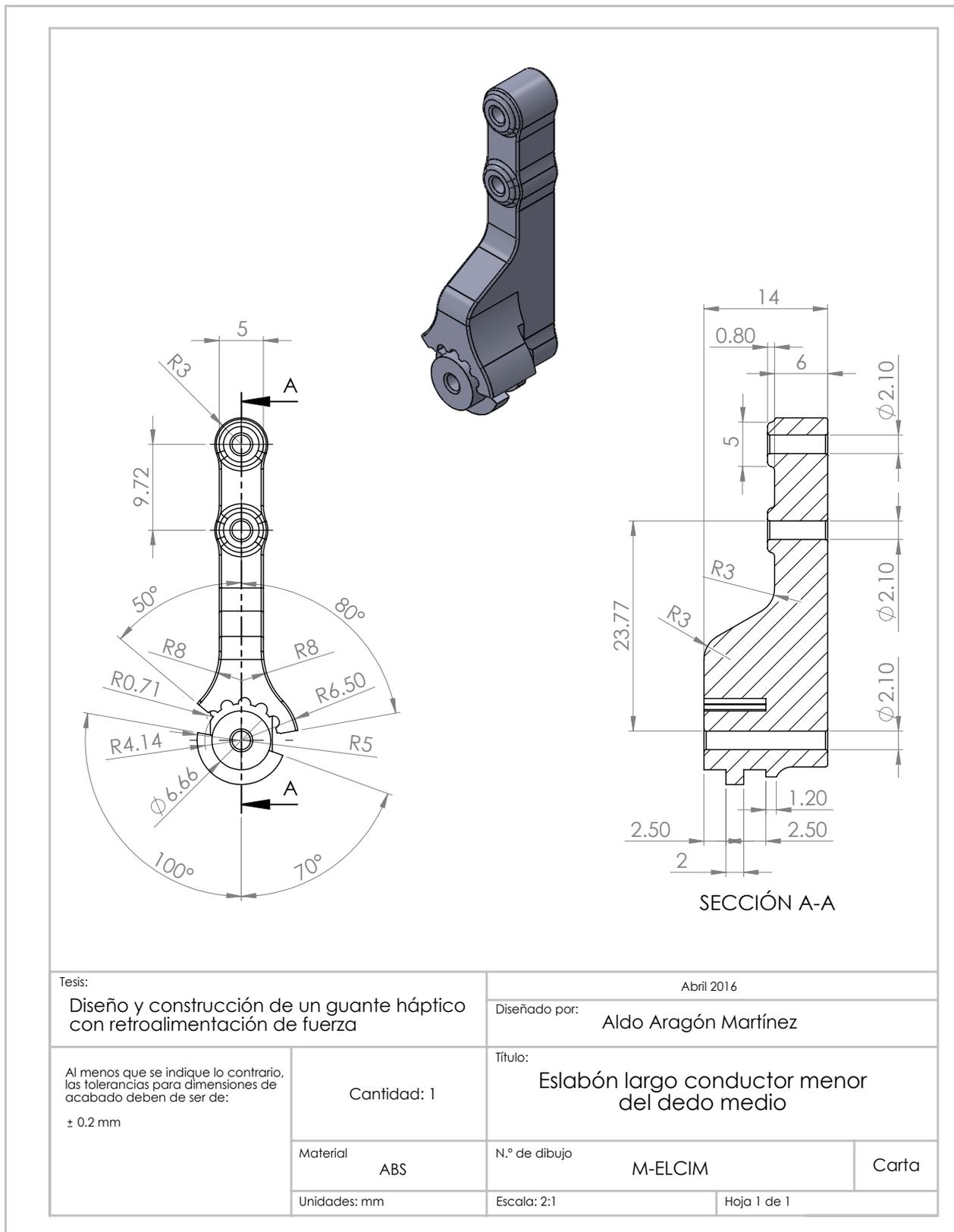
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 5	Título: Eslabón corto del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-EC	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1

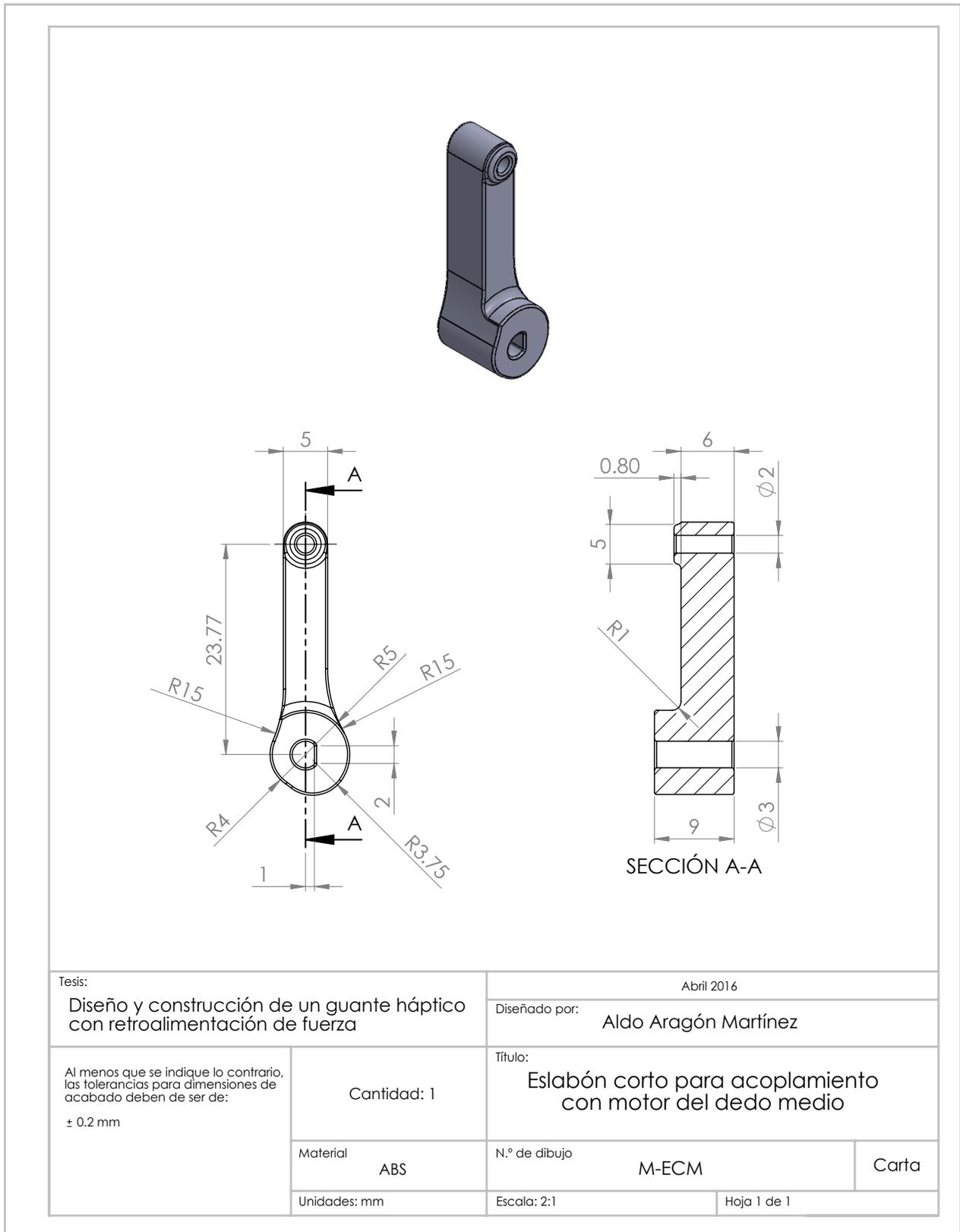




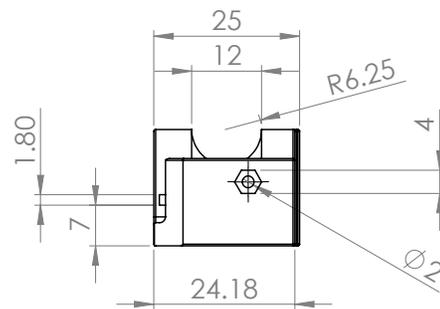
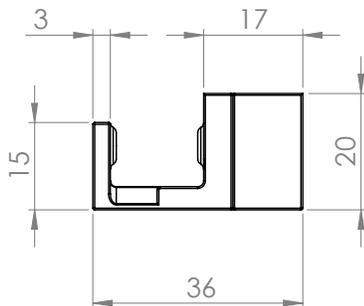
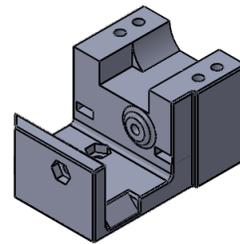
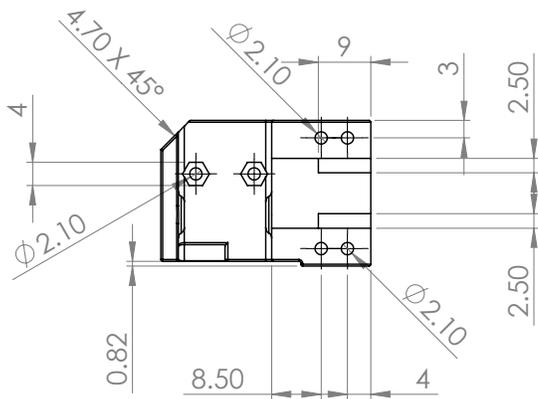
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 2	Título: Eslabón largo conducido del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-ELCE	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1



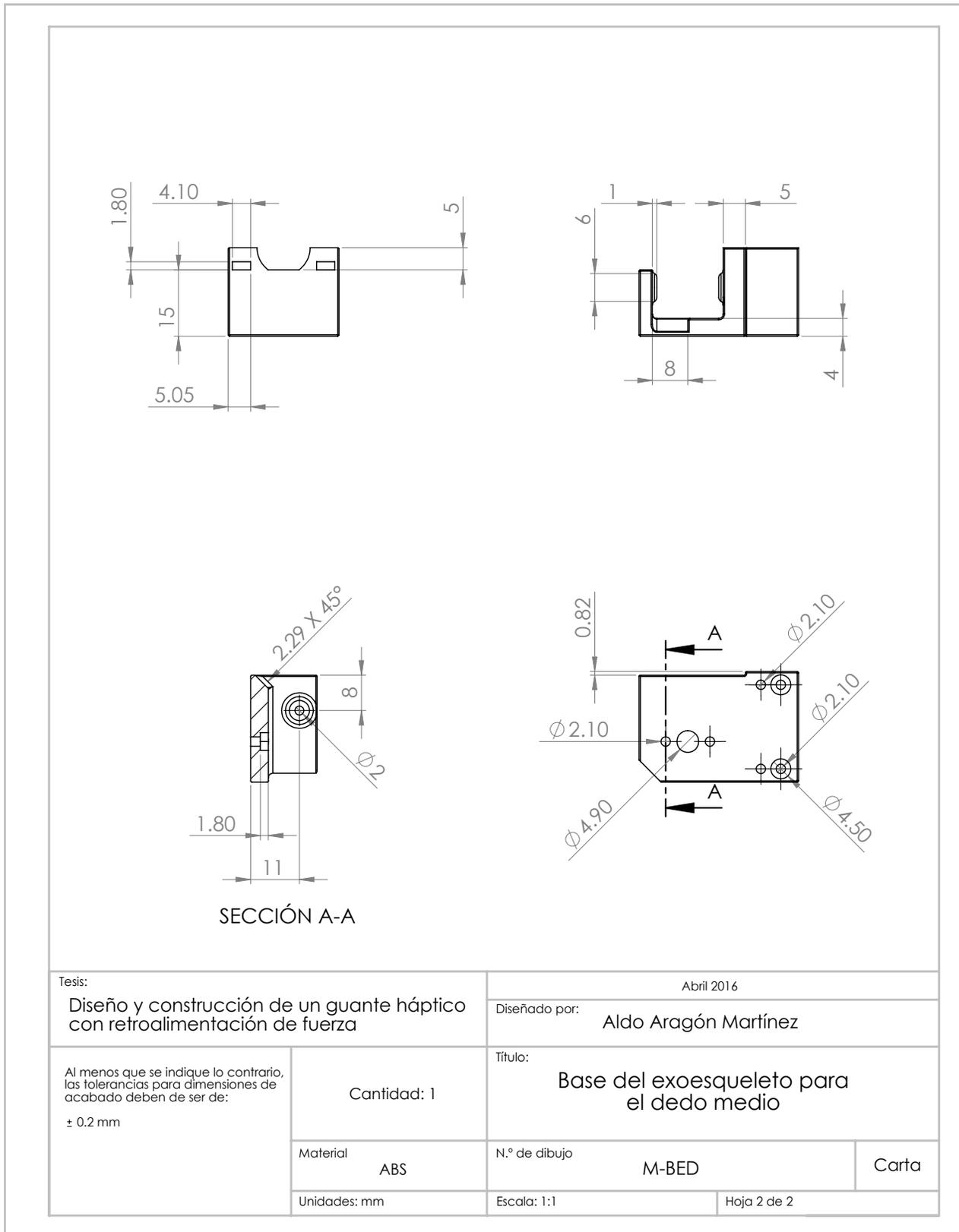


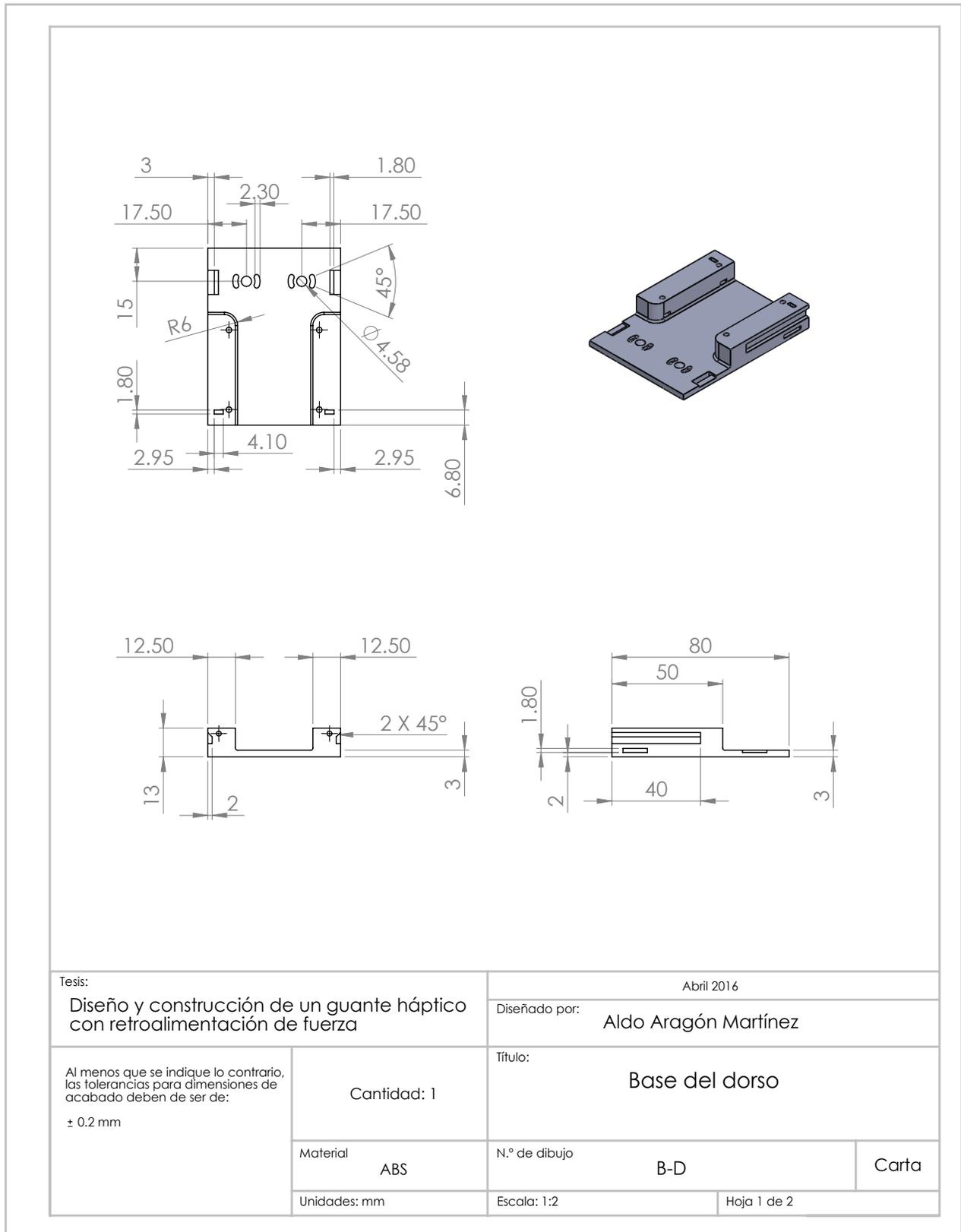


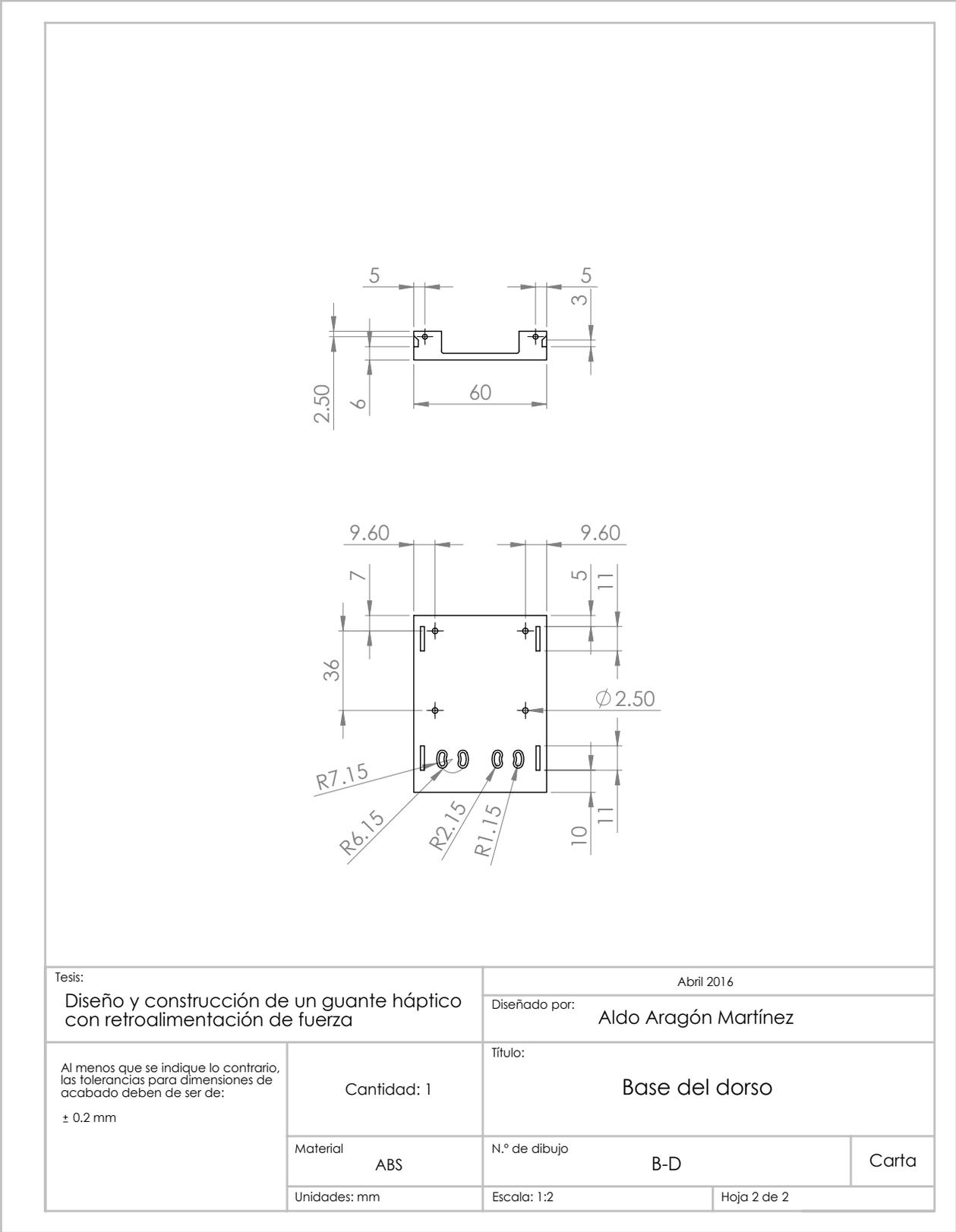
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Eslabón corto para acoplamiento con motor del dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-ECM	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1



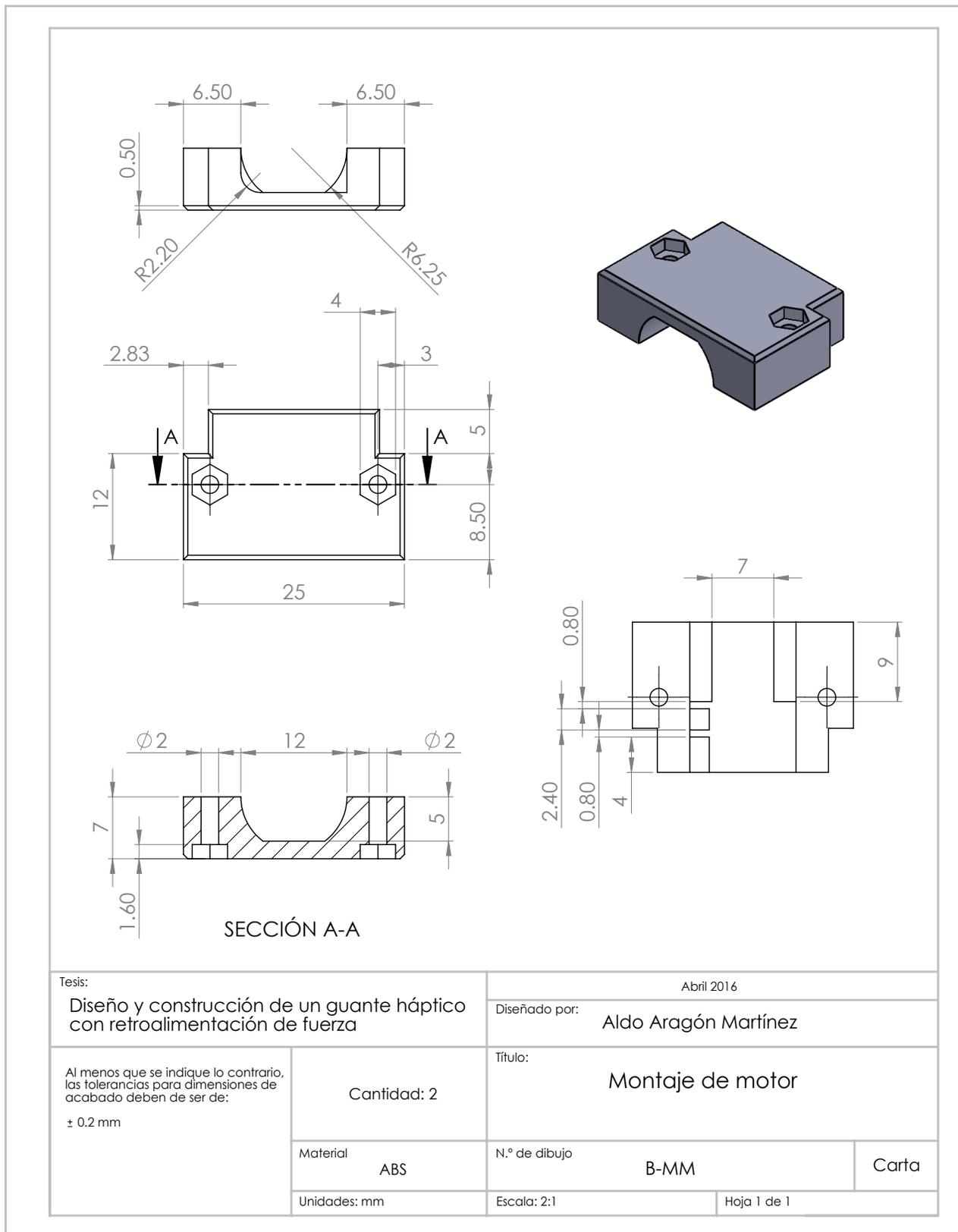
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Base del exoesqueleto para el dedo medio	
	Material ABS	N.º de dibujo M-BED	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:1	Hoja 1 de 2

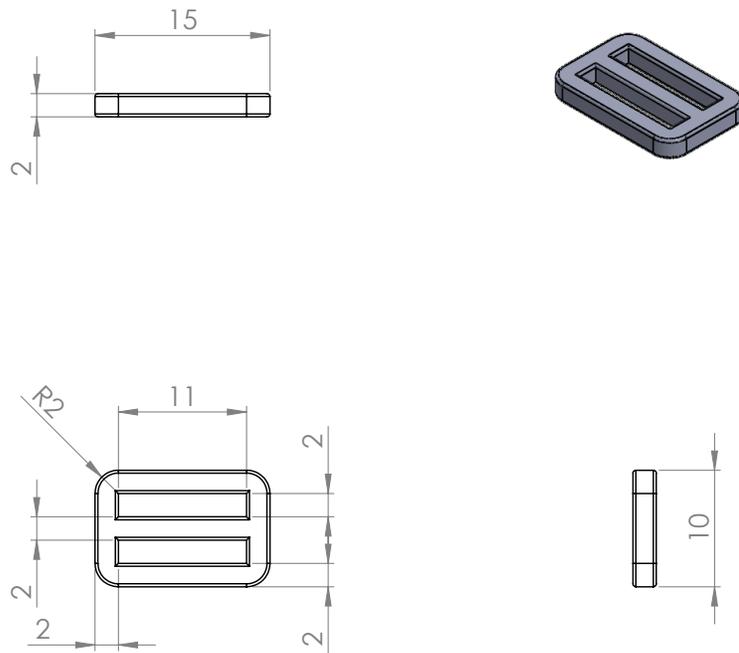




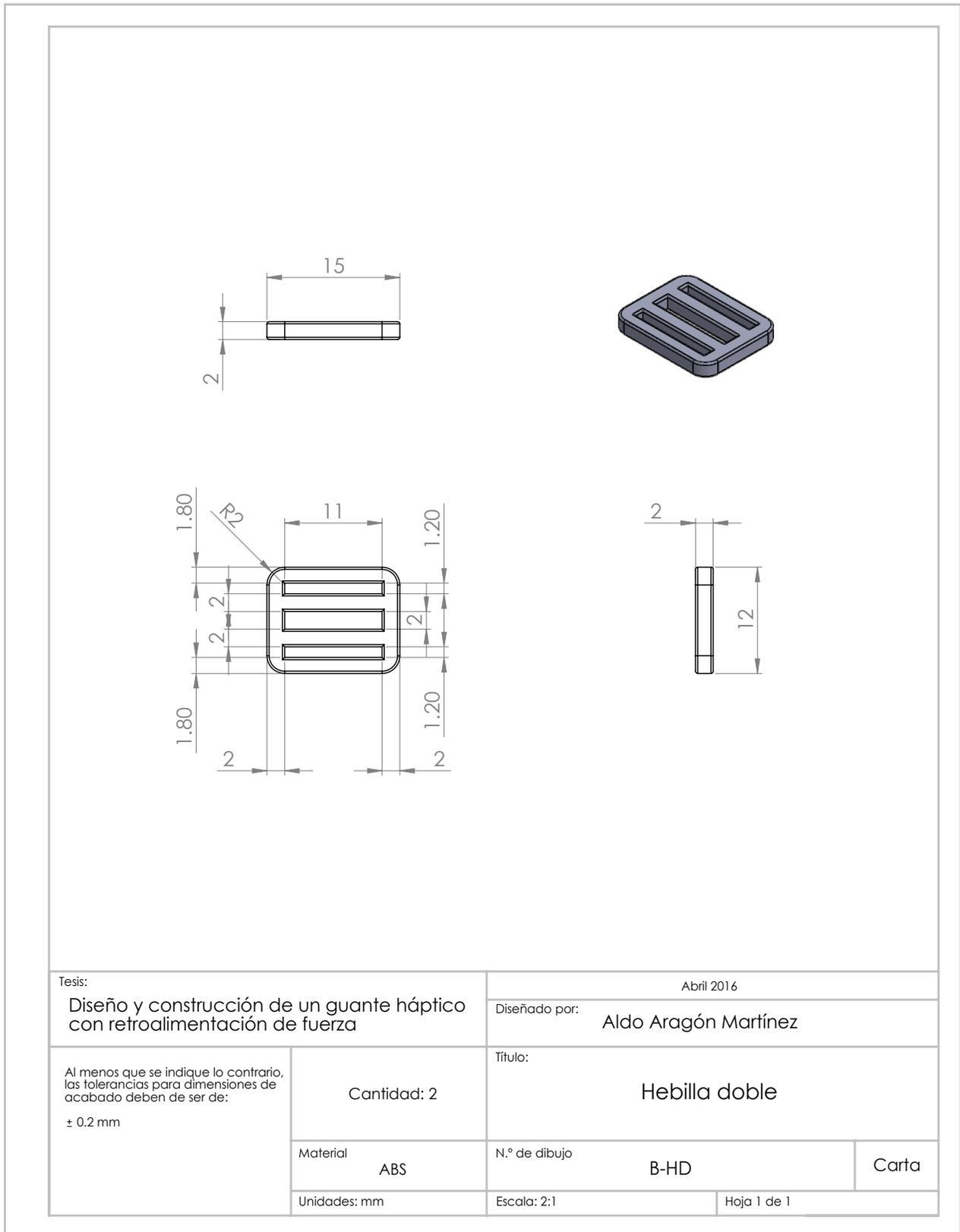


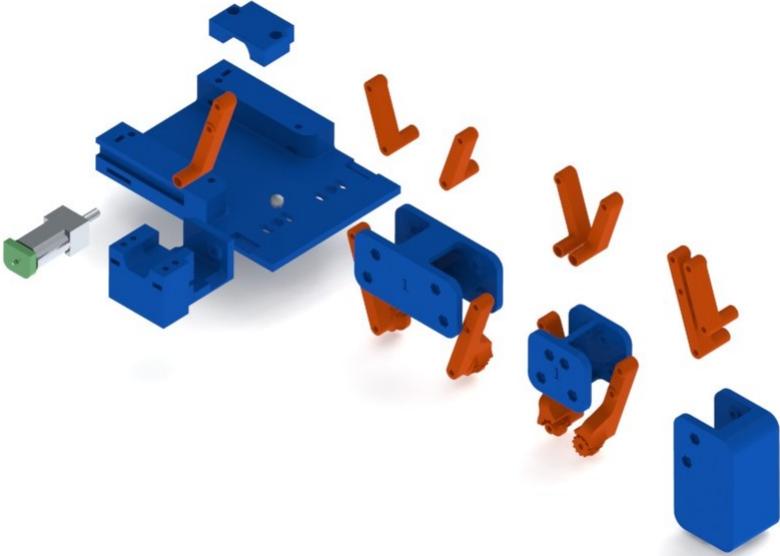
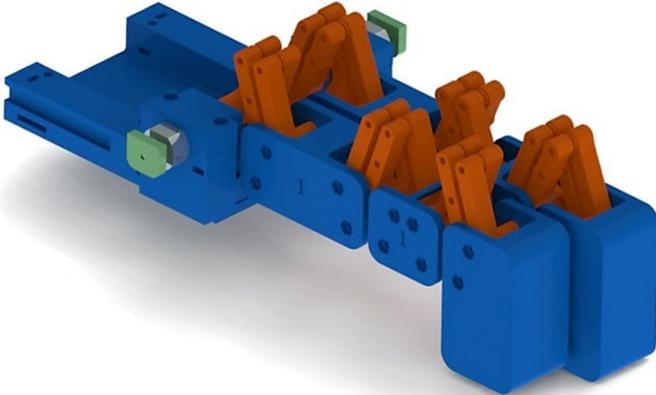
Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 1	Título: Base del dorso	
	Material: ABS	N.º de dibujo: B-D	Carta
	Unidades: mm	Escala: 1:2	Hoja 2 de 2





Tesis:		Abril 2016	
Diseño y construcción de un guante háptico con retroalimentación de fuerza		Diseñado por: Aldo Aragón Martínez	
Al menos que se indique lo contrario, las tolerancias para dimensiones de acabado deben de ser de: ± 0.2 mm	Cantidad: 2	Título: Hebilla simple	
	Material: ABS	N.º de dibujo: B-HS	Carta
	Unidades: mm	Escala: 2:1	Hoja 1 de 1





Apéndice B

Programas para el cálculo del par de torsión

El *notebook* realizado en *Mathematica*[®] que se utilizó para obtener las ecuaciones del par de torsión se muestra a continuación:

```
O001 =  $\begin{pmatrix} 11 * \text{Cos}[\phi[t]] \\ 11 * \text{Sin}[\phi[t]] \\ 1 \end{pmatrix};$   
O102 =  $\begin{pmatrix} 12 * \text{Cos}[K1 * \phi[t]] \\ 12 * \text{Sin}[K1 * \phi[t]] \\ 1 \end{pmatrix};$   
O203 =  $\begin{pmatrix} 13 * \text{Cos}[K2 * \phi[t]] \\ 13 * \text{Sin}[K2 * \phi[t]] \\ 1 \end{pmatrix};$   
T10 =  $\begin{pmatrix} \text{Cos}[\phi[t]] & -\text{Sin}[\phi[t]] & 11 * \text{Cos}[\phi[t]] \\ \text{Sin}[\phi[t]] & \text{Cos}[\phi[t]] & 11 * \text{Sin}[\phi[t]] \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$   
T21 =  $\begin{pmatrix} \text{Cos}[K1 * \phi[t]] & -\text{Sin}[K1 * \phi[t]] & 12 * \text{Cos}[K1 * \phi[t]] \\ \text{Sin}[K1 * \phi[t]] & \text{Cos}[K1 * \phi[t]] & 12 * \text{Sin}[K1 * \phi[t]] \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$   
T32 =  $\begin{pmatrix} \text{Cos}[K2 * \phi[t]] & -\text{Sin}[K2 * \phi[t]] & 13 * \text{Cos}[K2 * \phi[t]] \\ \text{Sin}[K2 * \phi[t]] & \text{Cos}[K2 * \phi[t]] & 13 * \text{Sin}[K2 * \phi[t]] \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$   
T20 = FullSimplify[T10 . T21]  
T30 = FullSimplify[T20 . T32]  
O300 = FullSimplify[T20 . O203]  
Ft = FullSimplify[ft {T30[[2, 1]], -T30[[1, 1]]}]  
O30 = FullSimplify[{O300[[1, 1]], O300[[2, 1]]}]  
Tft = FullSimplify[Ft . D[O30, t]]
```

$$O1G = \begin{pmatrix} -11/2 \\ h \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$O2H = \begin{pmatrix} -12/2 \\ h \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$O3I = \begin{pmatrix} -13/2 \\ h \\ 1 \end{pmatrix};$$

`O0G = T10.O1G`
`O0H = T20.O2H`
`O0I = T30.O3I`

`OH = FullSimplify[{O0H[[1, 1]], O0H[[2, 1]]}];`
`OI = FullSimplify[{O0I[[1, 1]], O0I[[2, 1]]}];`

`TMGg = FullSimplify[MG {0, -g}.D[OG, t]]`
`TMHg = FullSimplify[MH {0, -g}.D[OH, t]]`
`TMIg = FullSimplify[MI {0, -g}.D[OI, t]]`
`Tg = TMGg + TMHg + TMIg`
`Tg = FullSimplify[TMGg + TMHg + TMIg]`
`TMGi = FullSimplify[MG D[OG, {t, 2}].D[OG, t]]`
`TMHi = FullSimplify[MH D[OH, {t, 2}].D[OH, t]]`
`TMIi = FullSimplify[MI D[OI, {t, 2}].D[OI, t]]`
`TII = (IG + K1 * IH + K2 * II) * ϕ''[t] ϕ'[t]`
`TI = FullSimplify[TMGi + TMHi + TMIi + TII]`

Con las ecuaciones obtenidas se realizó un *script* en *MATLAB*[®] para simular el movimiento de extensión del dedo y calcular el par de torsión que requeriría el motor. El *script* utilizado se muestra a continuación:

```

1 close all
2 clear all
3
4
5 Ft = input('Fuerza\n')
6 Ft = Ft * 1000 * 1000;
7 %*1000 para convertir m a mm
8 %*1000 para convertir Kg a gr
9
10 velocidad = 50 % Velocidad para simulación
11
12 tiempo = 1/velocidad;
13
14 w = pi/2;
15 alfa = 0;

```

```

16
17 figure
18 hold on
19
20 for theta = -90:1:0
21     clf
22     xlim([-50 120])
23     ylim([-120 50])
24     thetaRad = theta * pi / 180; % Para convertir a radianes
25     Par = CalcularPar(thetaRad, w, alfa, Ft);
26     pause(tiempo)
27 end

```

La función utilizada para calcular el par en cada punto se muestra a continuación:

```

1 function [ Par ] = CalcularPar( theta, w, alfa, Ft)
2
3 % Longitud de las falanges del dedo en Milímetros
4 l1 = 52.4;
5 l2 = 33.5;
6 l3 = 21.3;
7
8 % Relación entre el ángulo de la articulación (MP) y (PIP)
9 K1 = 1;
10 % Relación entre el ángulo de la articulación (PIP) y (DIP)
11 K2 = 70/90;
12 % Constantes auxiliares
13 c1 = 1;
14 c2 = K1 + 1;
15 c3 = K2 + K1 + 1;
16
17 % Vectores extendidos de la posición de los sistemas de coordenadas
18 O0O1 = [l1 * cos(theta) ; l1 * sin(theta) ; 1]; % Respecto a O0
19 O1O2 = [l2 * cos(K1*theta); l2 * sin(K1*theta); 1]; % Respecto a O1
20 O2O3 = [l3 * cos(K2*theta); l3 * sin(K2*theta); 1]; % Respecto a O2
21
22 % Matrices de transformación Ollero robotica
23 T10 = [ cos(theta) , -sin(theta) , l1 * cos(theta);
24         sin(theta) , cos(theta) , l1 * sin(theta);
25         0 , 0 , 1 ];
26
27 T21 = [ cos(K1*theta) , -sin(K1*theta) , l2 * cos(K1*theta);
28         sin(K1*theta) , cos(K1*theta) , l2 * sin(K1*theta);
29         0 , 0 , 1 ];
30
31 T32 = [ cos(K2*theta) , -sin(K2*theta) , l3 * cos(K2*theta);
32         sin(K2*theta) , cos(K2*theta) , l3 * sin(K2*theta);

```

```

33         0           ,           0           ,           1           ] ;
34 T20 = T10 * T21 ;
35 T30 = T10 * T21 * T32 ;
36
37 % Vector de punto de aplicación de la fuerza a el origen
38 O0O3 = T20 * O2O3 ;
39 O0O2 = T10 * O1O2 ;
40
41
42 % Vector de fuerza perpendicular a x3
43 Vft = [T30(2,1); -T30(1,1); 1];
44 Ft0 = Ft * Vft ;
45 % Dibujar línea de fuerza
46 line ([O0O3(1) (O0O3(1)+Vft(1)*10)], [O0O3(2) (O0O3(2)+Vft(2)*10)] ,
47 'Color' , 'r')
48 % Trabajo virtual generado por la fuerza ft
49 Tf    = -Ft * ( c3*l3 + c2*l2*cos(K2*theta) + l1 * cos((K1+K2)*theta));
50
51
52
53
54 % Distancia entre falange del usuario y base de la falange mecánica (mm)
55 d = 15;
56 % Distancia entre base de la falange mecánica y centro de masa de
57 % la falange (mm)
58 hm = 11.5;
59 % Distancia entre la falange del usuario y el centro de masa de la
60 % falange mecánica
61 h = d + hm;
62
63 % Masa de las falanges mecánicas en gramos
64 MG = 10;           % 7.56 gr aprox
65 MH = 10;           % 3.67 gr aprox
66 MI = 10;           % 10.30 gr aprox
67
68 % Gravedad en m/s^2
69 g = 9.81;
70 g = g * 1000;           % *1000 para convertir m a mm, mm/s^2
71 % Vector extendido de la gravedad mm/s^2
72 gv = [0; -g; 1];
73
74 % Vectores extendidos de la posición de los centros de masa
75 G1 = [-l1 / 2; h ; 1];
76 H2 = [-l2 / 2; h ; 1];
77 I3 = [-l3 / 2; h ; 1];
78
79 % Vectores de centros de masa

```

```

80 O0G = T10 * G1;
81 O0H = T20 * H2;
82 O0I = T30 * I3;
83
84 % Dibujar falanges
85 line([ 0 O0O1(1)], [ 0 O0O1(2)]);
86 line([O0O1(1) O0O2(1)], [O0O1(2) O0O2(2)]);
87 line([O0O2(1) O0O3(1)], [O0O2(2) O0O3(2)]);
88 % Dibujar Centros de masa
89 line([ 0 O0G(1)], [ 0 O0G(2)], 'Color', 'r');
90 line([O0O1(1) O0H(1)], [O0O1(2) O0H(2)], 'Color', 'r');
91 line([O0O2(1) O0I(1)], [O0O2(2) O0I(2)], 'Color', 'r');
92
93 % Trabajo virtual generado por la fuerza de gravedad
94 TMGg = -g*MG*((1/2)*l1*cos(theta)-h*sin(theta));
95 TMHg = -(1/2)*g*MH*(2*l1*cos(theta) + c2*(l2*cos(c2*theta)
96 - 2*h*sin(c2*theta)));
97 TMIG = -(1/2)*g*MI*(2*l1*cos(theta) + 2*c2*l2*cos(c2*theta)
98 + c3*(l3*cos(c3*theta) - 2*h*sin(c3*theta)));
99 Tg = TMGg + TMHg + TMIG;
100
101 % Trabajo virtual generado por la fuerza de inercia
102 TMGa = (1/4) * ( 4*h*h + l1*l1)*MG*alfa;
103 TMHa = (1/4)*MH * (-2*K1*c2*l1 * ( 2*h*cos(K1*theta)
104 + l2*sin(K1*theta))*w*w + (4*h*h*c2*c2 + 4*l1*l1
105 + c2*c2*l2*l2 + 4*c2*l1*(l2*cos(K1*theta)
106 - 2*h*sin(K1*theta)))*alfa);
107 TMHa = (1/4)*MI * (2*(-2*h*(K1+K2)*c3*l1*cos((K1+K2)*theta)
108 + c2*l2*(-2*K1*l1*sin(K1*theta)-K2*c3*(2*h*cos(K2*theta)
109 + l3*sin(K2*theta))) - (K1+K2)*c3*l1*l3*sin((K1+K2)*theta))*w*w
110 + (4*(h*h*c3*c3 + l1*l1 + c2*c2*l2*l2) + c3*c3*l3*l3
111 + 8*c2*l1*l2*cos(K1*theta) + 4*c3*(l1*l3*cos((K1+K2)*theta)
112 + c2*l2*(l3*cos(K2*theta) - 2*h*sin(K2*theta))
113 - 2*h*l1*sin((K1+K2)*theta))*alfa);
114
115 % Inercia de las falanges mecánicas
116 IG = 939.28 * 2; % gramos*Milímetros*Milímetros
117 IH = 281.18 * 2; % gramos*Milímetros*Milímetros
118 II = 5441 ; % gramos*Milímetros*Milímetros
119
120 TFi = (IG + K1*IH + K2*II)*alfa;
121 Ti = TMGa + TMHa + TMHa + TFi;
122
123 T0 = Tf + Tg + Ti;
124
125 % Para convertir a Nm
126 T0 = T0 / 1000 / 1000 / 1000;

```

```
127 %/1000 / 1000 para convertir mm^2 a m^2
128 %/1000 para convertir gr a Kg
129 %Kg m^2 /s^2 = Nm
130
131 Par = T0;
132 title(sprintf('Par %0.5f Nm', Par) )
133 end
```

Apéndice C

Propiedades de las piezas impresas en 3D

A continuación se muestra la orientación y se listan las propiedades de las piezas impresas en 3D, tomando en cuenta que aquellas propiedades definidas en el cortador *Slic3r* que no se listan a continuación son las predefinidas por la configuración del *software* de la impresora 3D *Prusa i3* versión 1.6.1 [76]. Las propiedades predefinidas se muestran de la figura C.1 a la figura C.8.

Layer height

Layer height: mm

First layer height: mm or %

Vertical shells

Perimeters: (minimum)

Spiral vase:

Horizontal shells

Solid layers: Top: Bottom:

Quality (slower slicing)

Extra perimeters if needed:

Avoid crossing perimeters:

Detect thin walls:

Detect bridging perimeters:

Advanced

Seam position:

External perimeters first:

Figura C.1: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Layers and perimeters.*

Infill

Fill density: 22 %

Fill pattern: Honeycomb

Top/bottom fill pattern: Rectilinear

Reducing printing time

Combine infill every: 1 layers

Only infill where needed:

Advanced

Solid infill every: 0 layers

Fill angle: 45 °

Solid infill threshold area: 0 mm²

Only retract when crossing perimeters:

Infill before perimeters:

Figura C.2: Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Infill.

Skirt

Loops (minimum): 1

Distance from object: 2 mm

Skirt height: 1 layers

Minimum extrusion length: 4 mm

Brim

Brim width: 0 mm

Figura C.3: Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Skirt and brim.

Support material

Generate support material:

Overhang threshold: 40 layers

Enforce support for the first: 0 layers

Raft

Raft layers: 0 layers

Options for support material and raft

Contact Z distance: 0.05 mm

Pattern: rectilinear

Pattern spacing: 1 mm

Pattern angle: 0 layers

Interface layers: 3 layers

Interface pattern spacing: 0 mm

Don't support bridges:

Figura C.4: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Support material.*

Speed for print moves

Perimeters:	40	mm/s
Small perimeters:	40	mm/s or %
External perimeters:	40	mm/s or %
Infill:	40	mm/s
Solid infill:	40	mm/s or %
Top solid infill:	20	mm/s or %
Support material:	50	mm/s
Support material interface:	100%	mm/s or %
Bridges:	15	mm/s
Gap fill:	40	mm/s

Speed for non-print moves

Travel: 100 mm/s

Modifiers

First layer speed: 70% mm/s or %

Figura C.5: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Speed parte 1.*

Acceleration control (advanced)

Perimeters:	0	mm/s ²
Infill:	0	mm/s ²
Bridge:	0	mm/s ²
First layer:	0	mm/s ²
Default:	0	mm/s ²

Autospeed (advanced)

Max print speed:	50	mm/s
Max volumetric speed:	0	mm ³ /s

Figura C.6: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Speed parte 2.*

Extruders

Perimeter extruder:	1	▲ ▼
Infill extruder:	1	▲ ▼
Solid infill extruder:	1	▲ ▼
Support material/raft/skirt extruder:	1	▲ ▼
Support material/raft interface extruder:	1	▲ ▼

Ooze prevention

Enable:	<input type="checkbox"/>
Temperature variation:	-5 ▲ ▼ Δ°C

Advanced

Interface shells:	<input type="checkbox"/>
-------------------	--------------------------

Figura C.7: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Multiple Extruders.*

Extrusion width		
Default extrusion width:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for auto)
First layer:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
Perimeters:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
External perimeters:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
Infill:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
Solid infill:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
Top solid infill:	<input type="text" value="0.45"/>	mm or % (leave 0 for default)
Support material:	<input type="text" value="0.35"/>	mm or % (leave 0 for default)

Overlap		
Infill/perimeters overlap:	<input type="text" value="0"/>	mm or %

Flow		
Bridge flow ratio:	<input type="text" value="0.65"/>	

Other		
XY Size Compensation:	<input type="text" value="0"/>	mm
Threads:	<input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="▲"/> <input type="button" value="▼"/>
Resolution:	<input type="text" value="0"/>	mm

Figura C.8: *Propiedades predefinidas del cortador Slic3r, sección Advanced.*

Tabla C.1: *Propiedades de impresión para la falange proximal mecánica.*

Falange proximal mecánica	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	30 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	No
Perimeters speed	40
Small perimeters speed	40
External perimeters speed	40
75 % velocidad de impresora 3D	

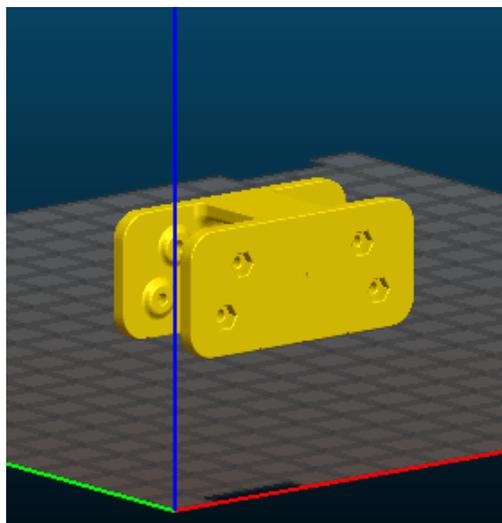
Figura C.9: *Orientación de impresión de la falange proximal mecánica.*

Tabla C.2: *Propiedades de impresión para la falange media mecánica.*

Falange media mecánica	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	30 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	40
Small perimeters speed	40
External perimeters speed	40
75 % velocidad de impresora 3D	

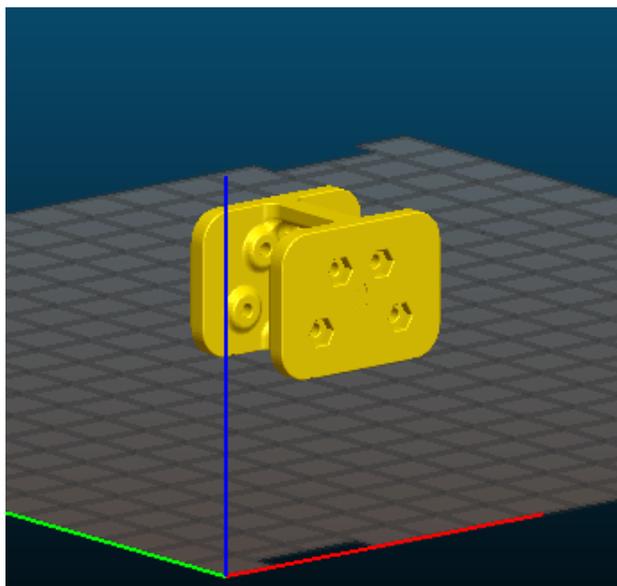
Figura C.10: *Orientación de impresión de la falange media mecánica.*

Tabla C.3: *Propiedades de impresión para la falange distal mecánica.*

Falange distal mecánica	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	30 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	40
Small perimeters speed	40
External perimeters speed	40
60 % velocidad de impresora 3D	

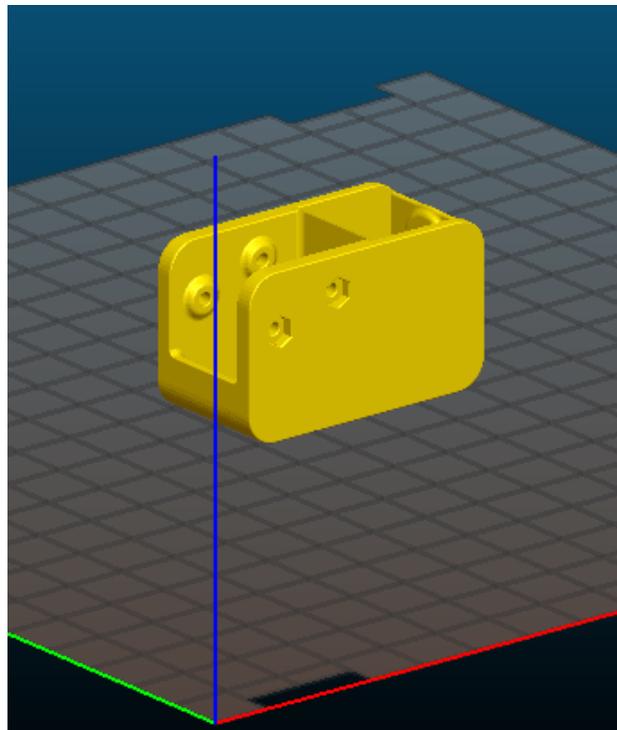
Figura C.11: *Orientación de impresión de la falange distal mecánica.*

Tabla C.4: *Propiedades de impresión para el eslabón corto.*

Eslabón corto	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	22%
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
50 % velocidad de impresora 3D	

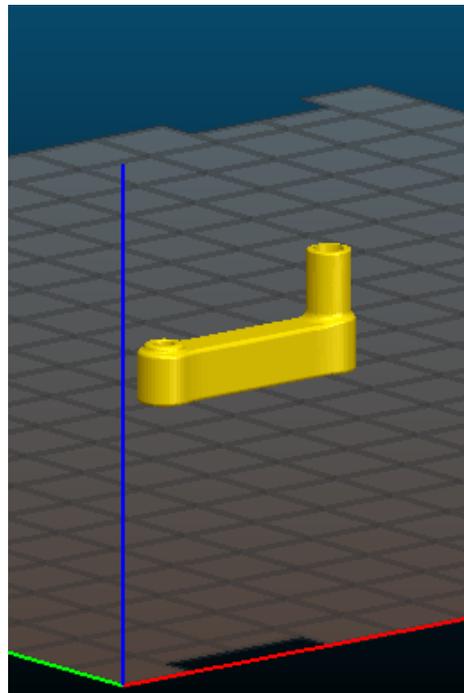
Figura C.12: *Orientación de impresión del eslabón corto.*

Tabla C.5: *Propiedades de impresión para el eslabón largo simple.*

Eslabón largo	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	22%
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
50 % velocidad de impresora 3D	

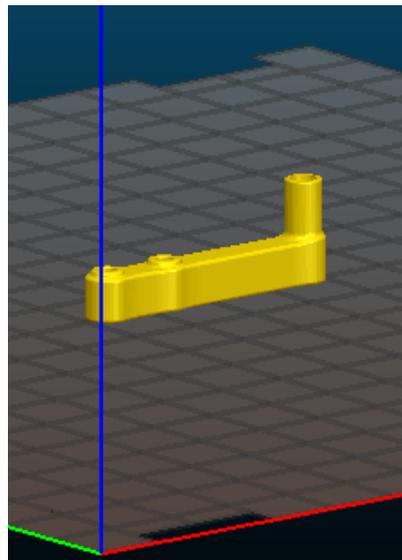
Figura C.13: *Orientación de impresión del eslabón largo simple.*

Tabla C.6: *Propiedades de impresión para los eslabones largos conductores y conducidos.*

Eslabones largos conductores y conducidos	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	4
Fill density	50 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>Yes</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
50 % velocidad de impresora 3D	

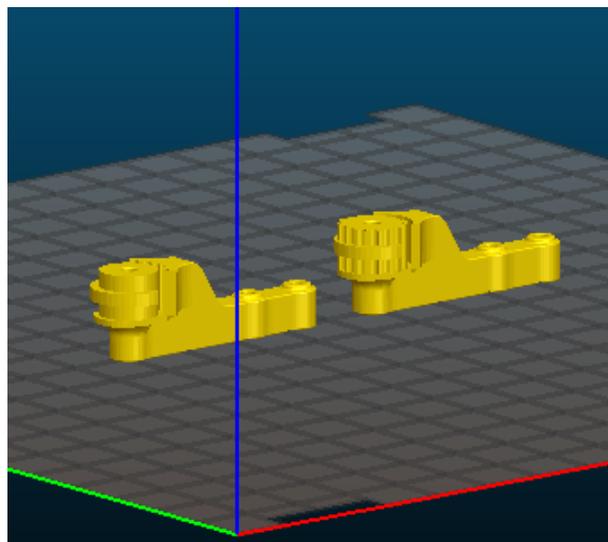
Figura C.14: *Orientación de impresión de los eslabones largos conductores y conducidos.*

Tabla C.7: *Propiedades de impresión para la base del exoesqueleto del dedo.*

Base del exoesqueleto del dedo	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	50 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
60 % velocidad de impresora 3D	

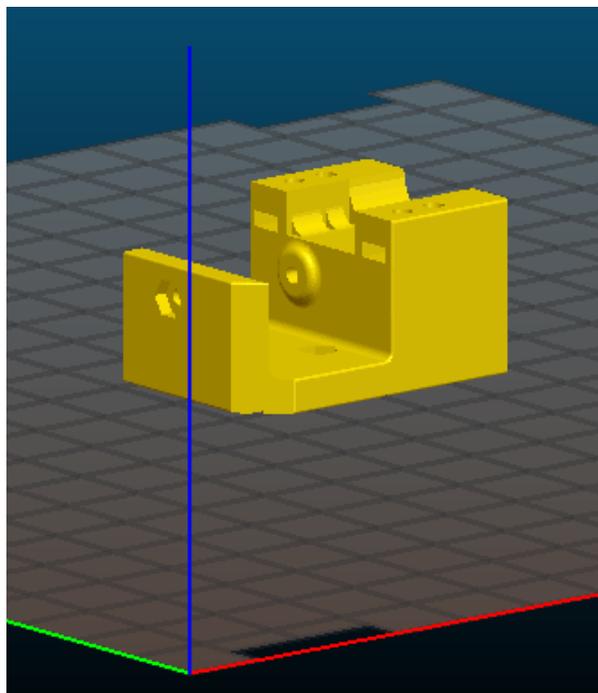
Figura C.15: *Orientación de impresión de la base del exoesqueleto del dedo.*

Tabla C.8: *Propiedades de impresión para el montaje del motor.*

Montaje de motor	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	50 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
60 % velocidad de impresora 3D	

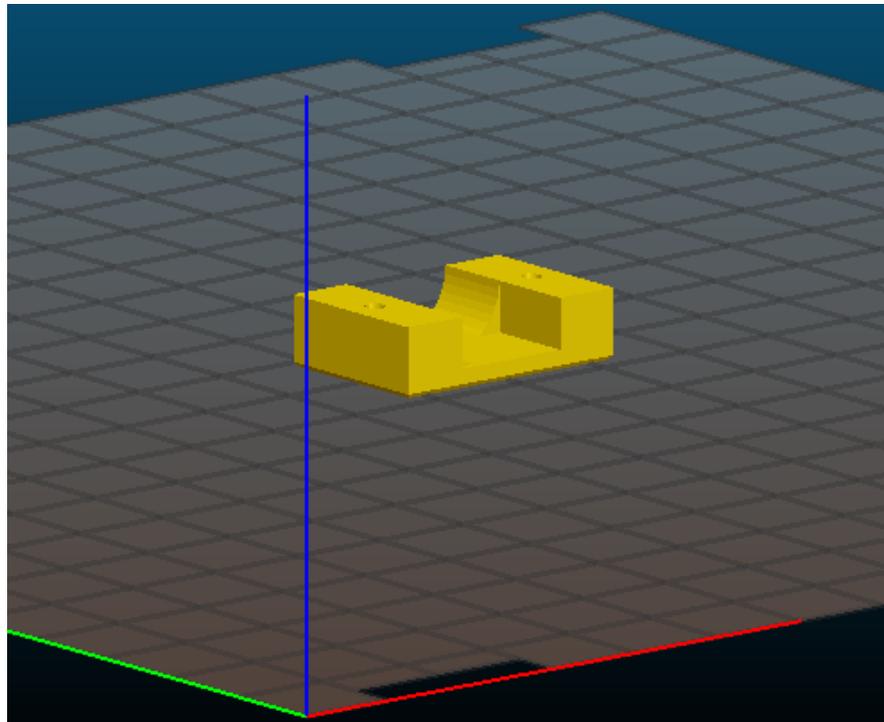
Figura C.16: *Orientación de impresión del montaje del motor.*

Tabla C.9: *Propiedades de impresión para la base del dorso.*

Base del dorso	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	50 %
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
70 % velocidad de impresora 3D	

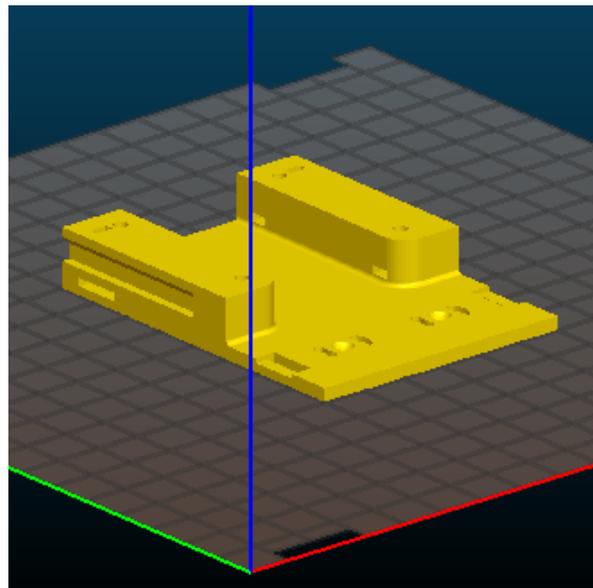
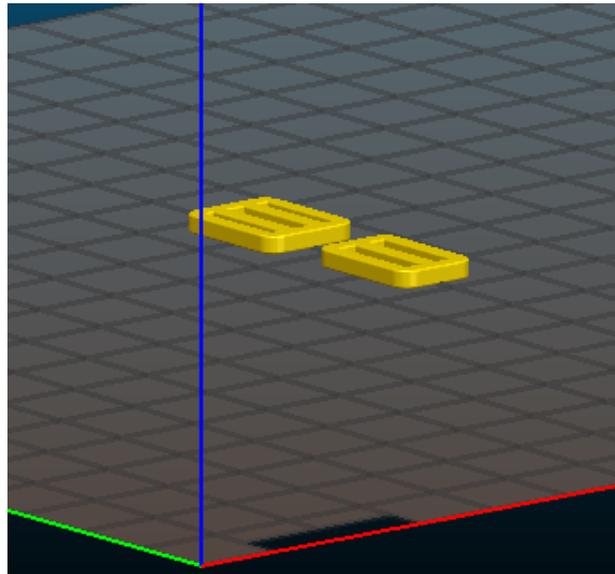
Figura C.17: *Orientación de impresión de la base del dorso.*

Tabla C.10: *Propiedades de impresión para las hebillas.*

Hebillas	
Layer height	0.2 mm
Perimeters	3
Fill density	22%
Fill pattern	<i>Honeycomb</i>
Brim	3 mm
Generate support material	<i>No</i>
Perimeters speed	30
Small perimeters speed	10
External perimeters speed	30
50 % velocidad de impresora 3D	

Figura C.18: *Orientación de impresión de las hebillas.*

Apéndice D

Herramientas para la adquisición de datos

D.1. Especificaciones de tarjeta

Descripción de la tarjeta de adquisición de datos NI-6024e

- ✓ 16 canales de entrada analógica (8 diferenciales).
- ✓ 2 canales de salida analógica.
- ✓ 8 líneas de entrada/salida digital.
- ✓ Conector de 86 pines.
- ✓ Sistema de control de tiempo propio (DAQ-STC). Consta de tres grupos para el control de entradas y salidas analógicas, y para funciones de contador para propósitos generales. Estos grupos incluyen un total de siete contadores de 24 bits y tres de 16 bits con una resolución máxima de tiempo de 50 ns.
- ✓ Sistema específico que permite la sincronización de varias funciones de medida a un mismo disparo o evento de reloj, y lo hacen mediante los sistemas de bus de integración en tiempo real (Real-Time System Integration, RTSI).
- ✓ Conexión a bus de PC mediante ranura PCI.

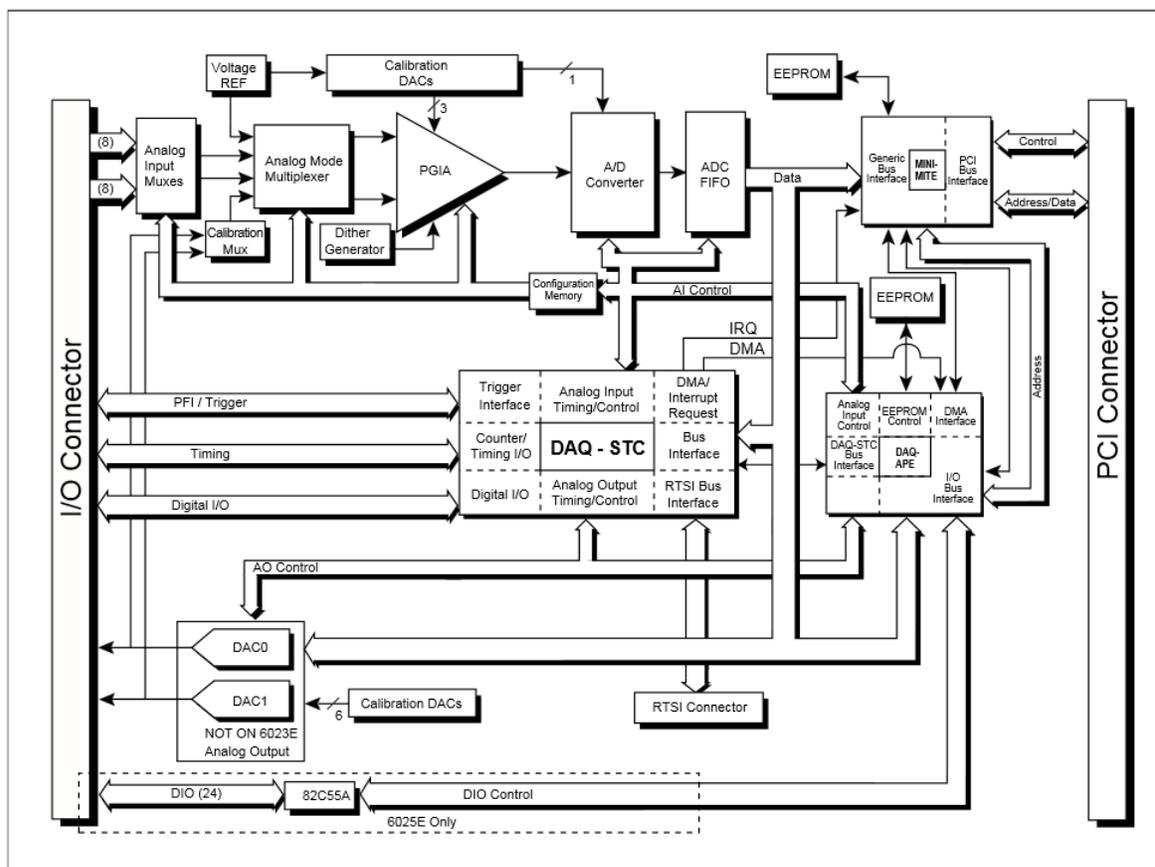


Figura D.1: Diagrama a bloques de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024e[47].

D.2. Especificaciones de la computadora

Las características de la computadora utilizada para realizar la conexión con la tarjeta de adquisición de datos son las mostradas en la figura D.3.

AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7
AO 0	22	56	AI GND
AO 1	21	55	AO GND
NC	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

NC = No Connect

Figura D.2: Lista de pines de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024e[46].

Ver información básica acerca del equipo

Edición de Windows

Windows 7 Professional

Copyright © 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

Service Pack 1

[Obtener más características con una nueva edición de Windows 7](#)



Sistema

Fabricante:	Dell
Modelo:	Precision T1700
Evaluación:	 Evaluación de la experiencia en Windows
Procesador:	Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz 3.60 GHz
Memoria instalada (RAM):	4.00 GB
Tipo de sistema:	Sistema operativo de 64 bits
Lápiz y entrada táctil:	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla



Figura D.3: Características de la computadora utilizada para las pruebas.

Apéndice E

Instalación del complemento del kit *LEGO Mindstorms NXT*[®] para *Simulink*[®]

A continuación se muestra la serie de pasos para la instalación del paquete *support hardware for lego mindstorms NXT* para *Simulink*[®].

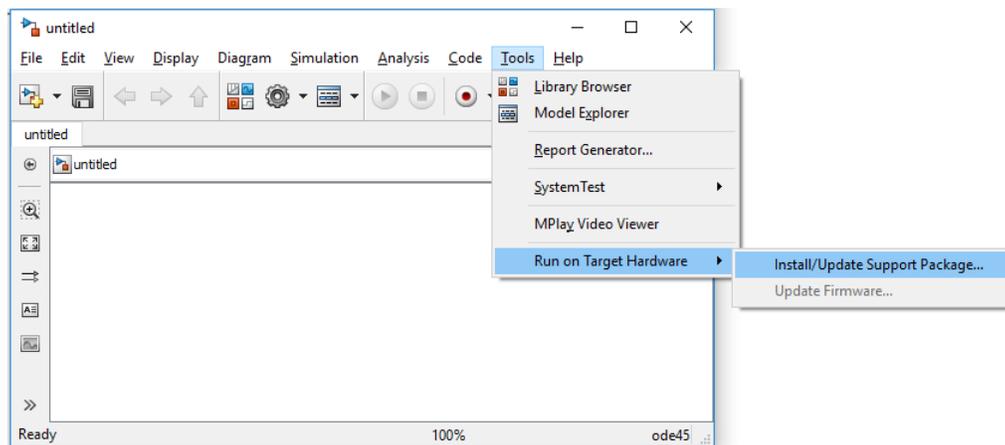


Figura E.1: *Instalación de complemento NXT paso 1.*

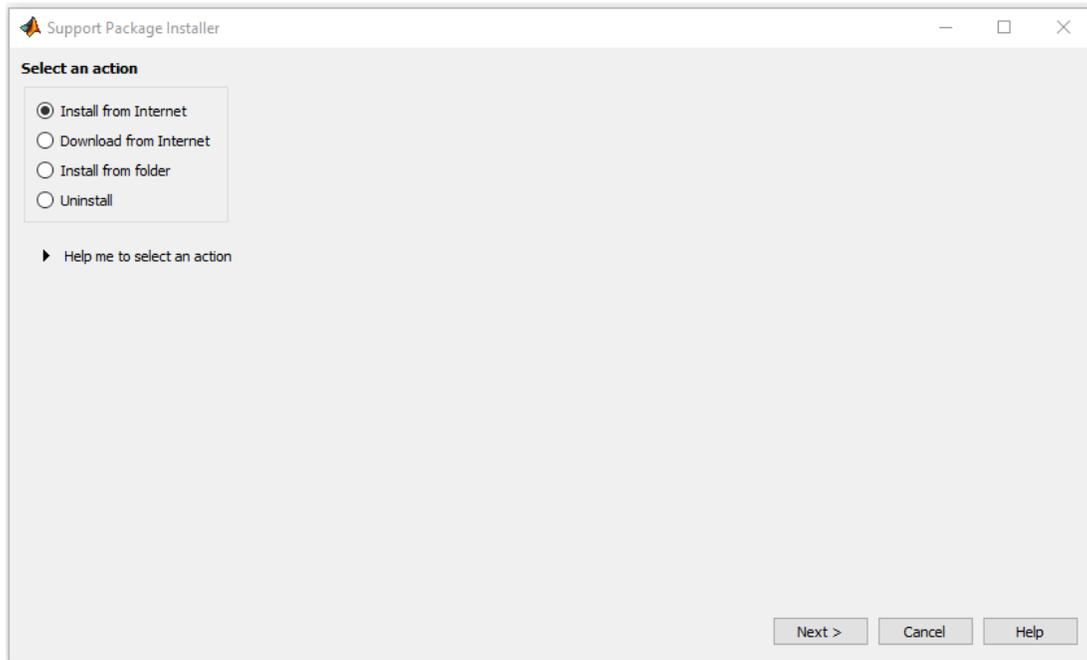


Figura E.2: Instalación de complemento NXT paso 2.

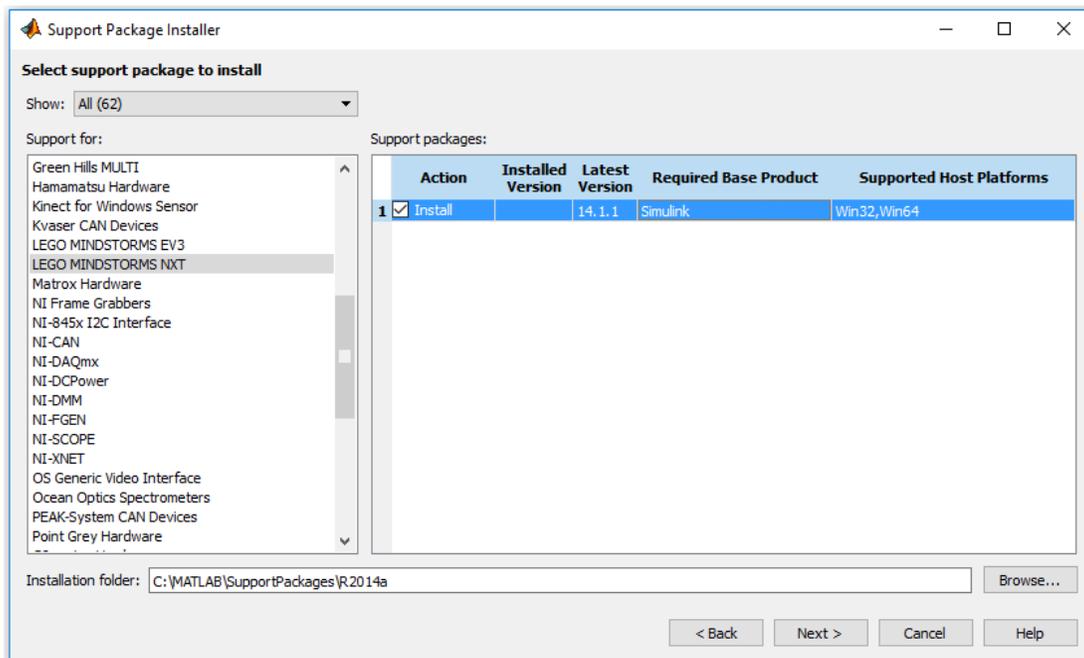


Figura E.3: Instalación de complemento NXT paso 3.

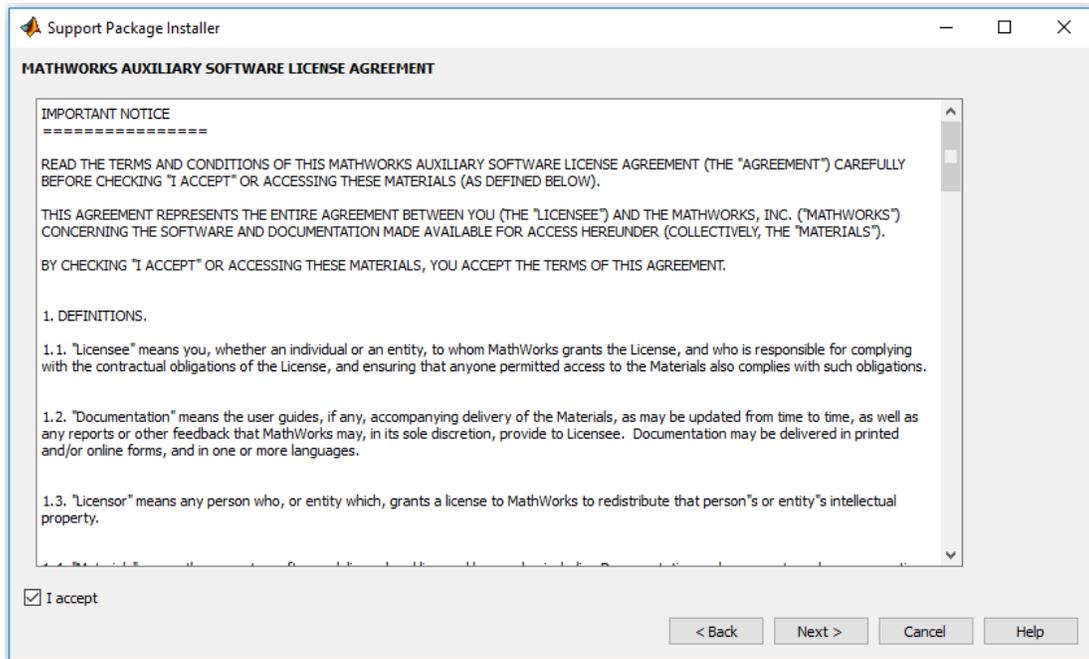


Figura E.4: Instalación de complemento *NXT* paso 4.

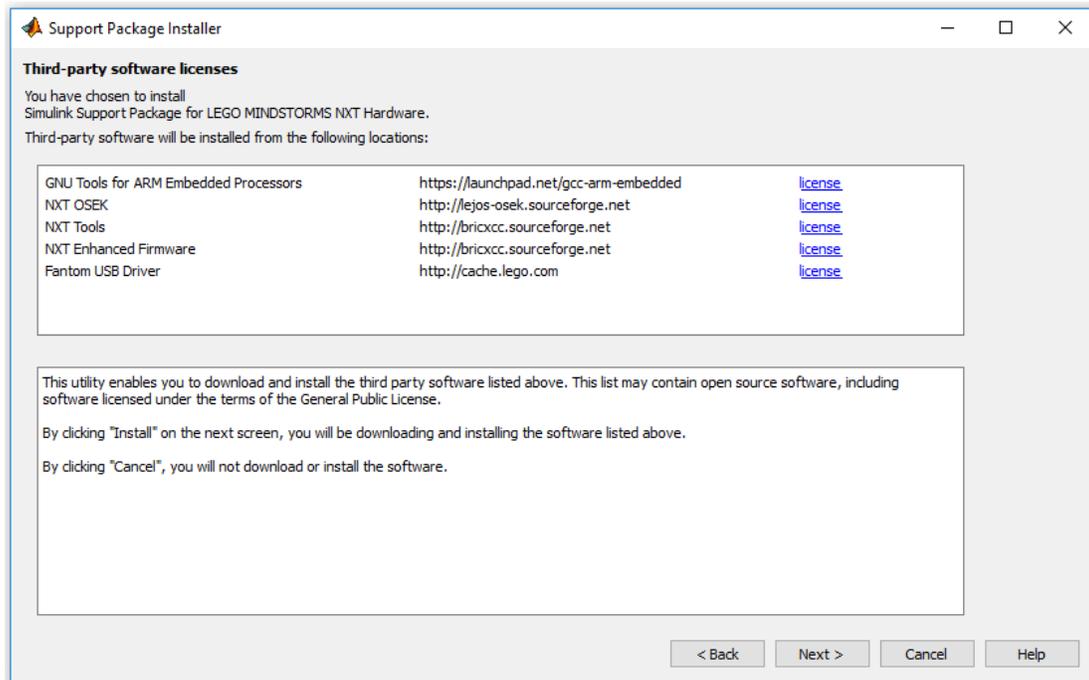


Figura E.5: Instalación de complemento *NXT* paso 5.

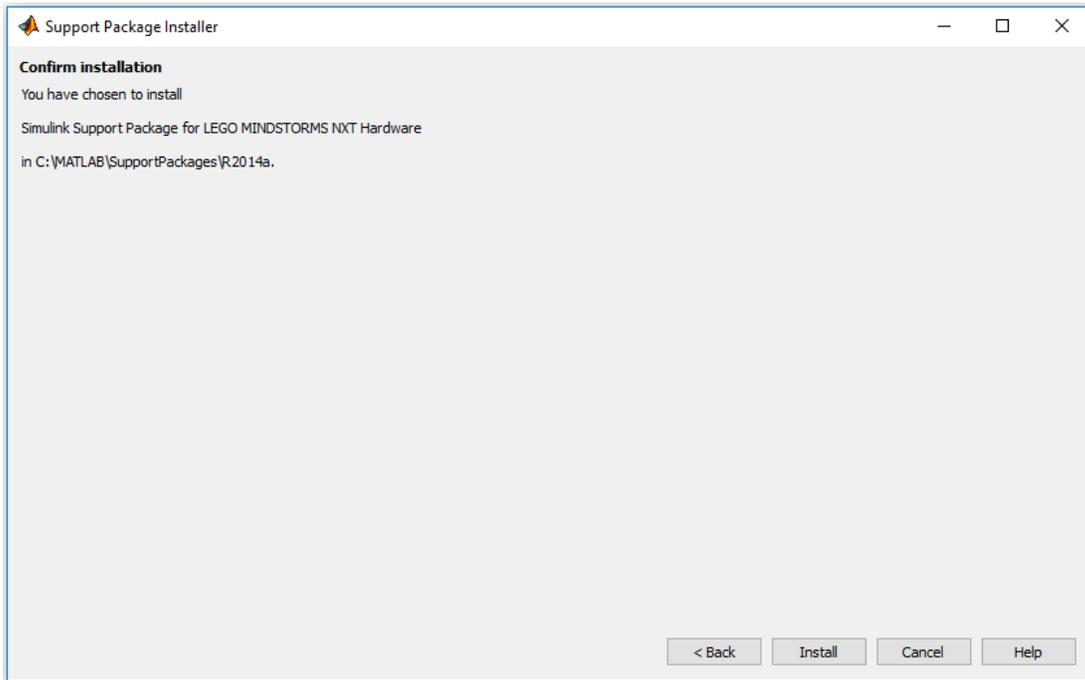


Figura E.6: *Instalación de complemento NXT paso 6.*

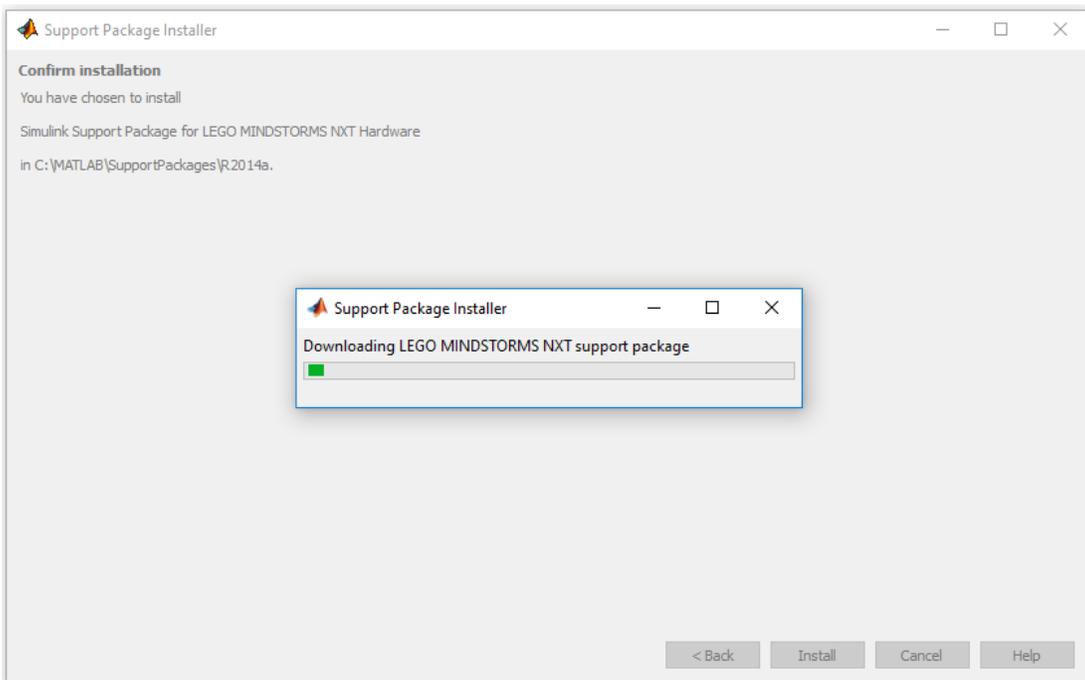


Figura E.7: *Instalación de complemento NXT paso 7.*

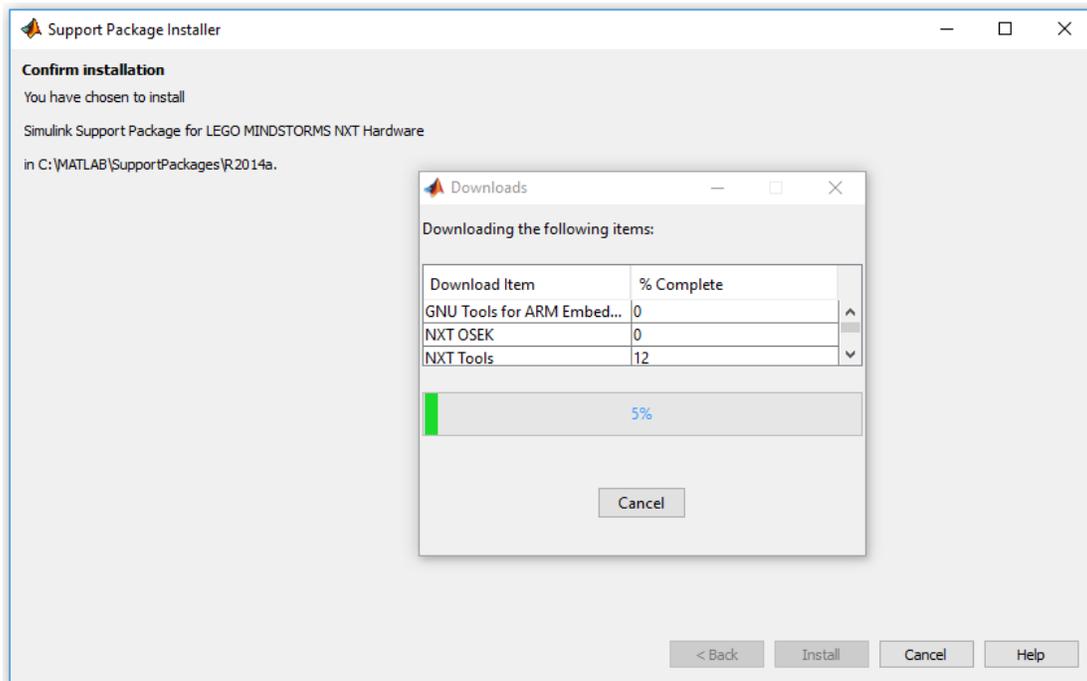


Figura E.8: *Instalación de complemento NXT paso 8.*

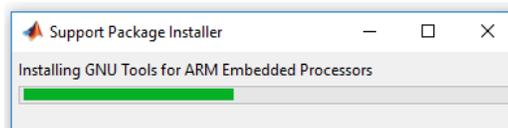


Figura E.9: *Instalación de complemento NXT paso 9.*

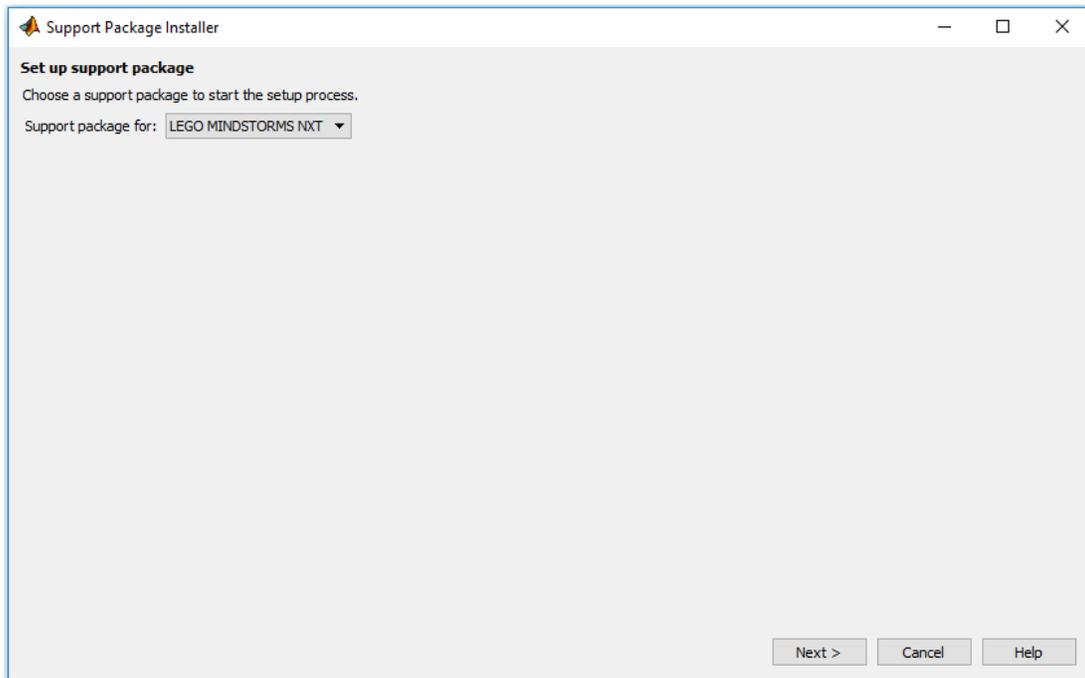


Figura E.10: *Instalación de complemento NXT paso 10.*

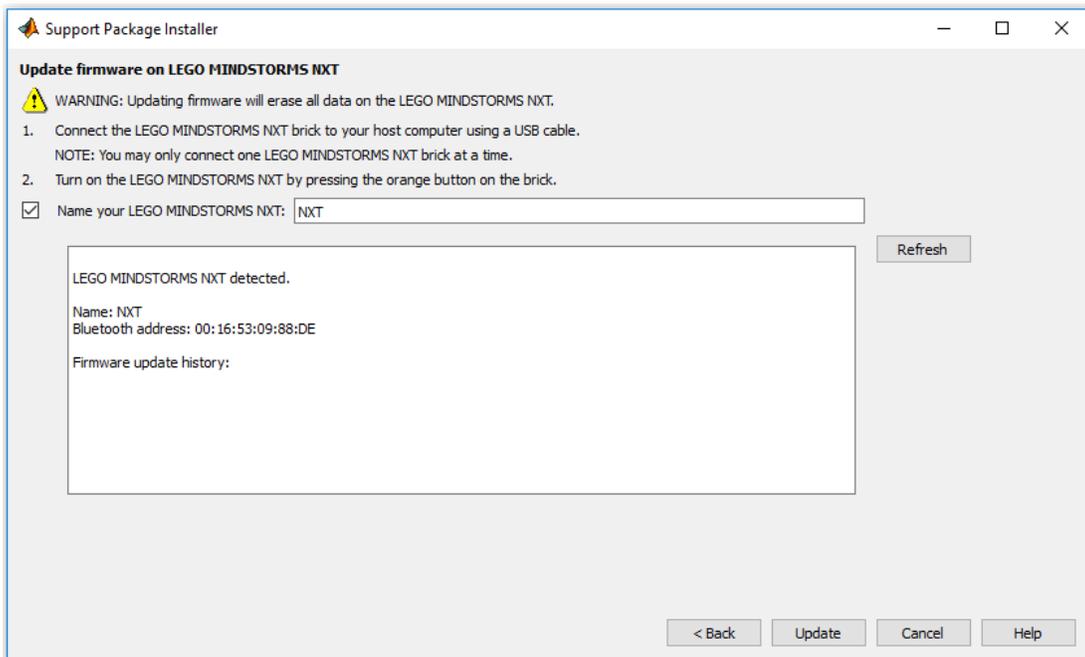


Figura E.11: *Instalación de complemento NXT paso 11.*

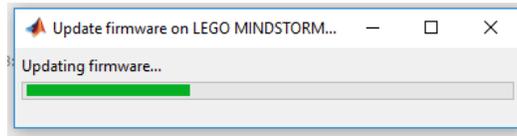


Figura E.12: *Instalación de complemento NXT paso 12.*

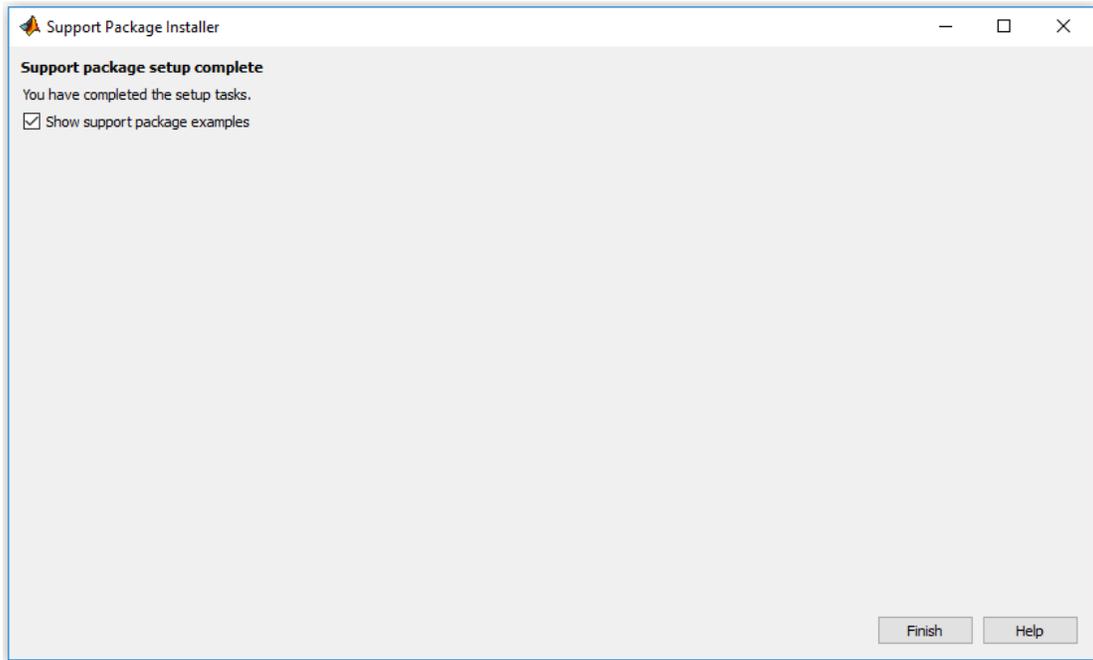


Figura E.13: *Instalación de complemento NXT paso 13.*

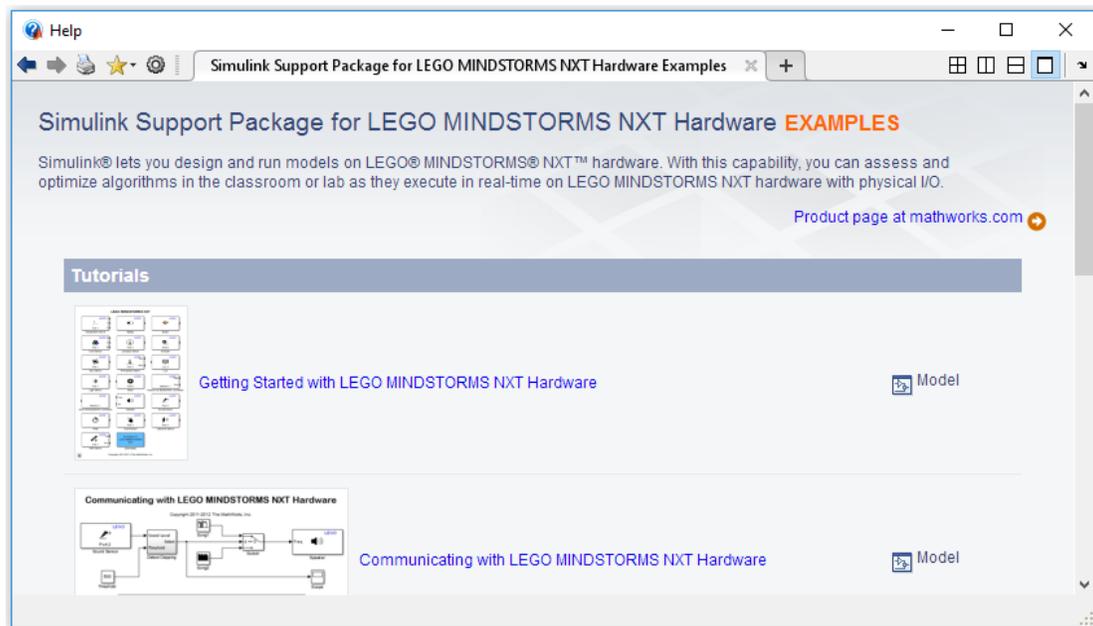


Figura E.14: *Instalación de complemento NXT paso 14.*

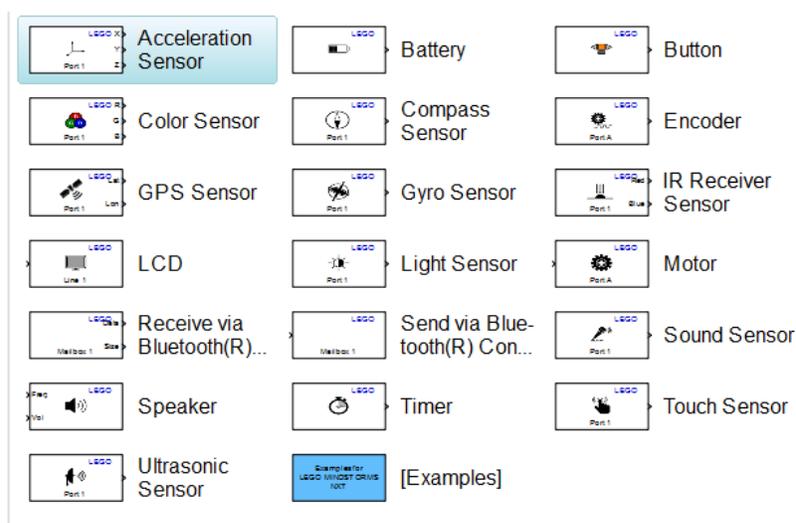


Figura E.15: Bloques instalados con el complemento para LEGO mindstorms NXT[®].

E.1. Configuración de la comunicación *bluetooth* entre el ladrillo NXT y la computadora

A continuación se describe como realizar el emparejamiento de la comunicación *bluetooth* entre el ladrillo *NXT* y la computadora donde se programa la lógica para el robot móvil implementada en *Simulink*[®]. Para realizar el emparejamiento, en el ladrillo *NXT*, se accede al menú *bluetooth*, se selecciona la opción *on* para encender el *bluetooth* y posteriormente se activa el modo visible en el mismo menú del *bluetooth*.

En la computadora, se accede al *panel de control*, se busca y ejecuta la opción *agregar un dispositivo bluetooth* con lo cual la computadora comenzará a buscar los dispositivos cercanos que se encuentren en modo visible. Al detectar el ladrillo *NXT* se agrega el dispositivo para lo cual se pide una clave de emparejamiento, se establece una clave por ejemplo 1234 y se escribe en la computadora y en el ladrillo *NXT*. Al realizar el emparejamiento se instalarán los controladores del ladrillo *NXT* y se crearán dos puertos serie para realizar la comunicación *bluetooth*.

Para comprobar la correcta instalación de los puertos serie, se accede la configuración de *bluetooth*, en la pestaña *Puertos COM* se observan los puertos serie creados para la comunicación *bluetooth*, como se muestra en la figura E.16. El puerto *COM* entrante sirve para que el ladrillo *NXT* establezca la comunicación con la computadora cuando el ladrillo se encuentra en modo maestro. El puerto *COM* saliente sirve para que la computadora establezca la comunicación con el ladrillo *NXT*.

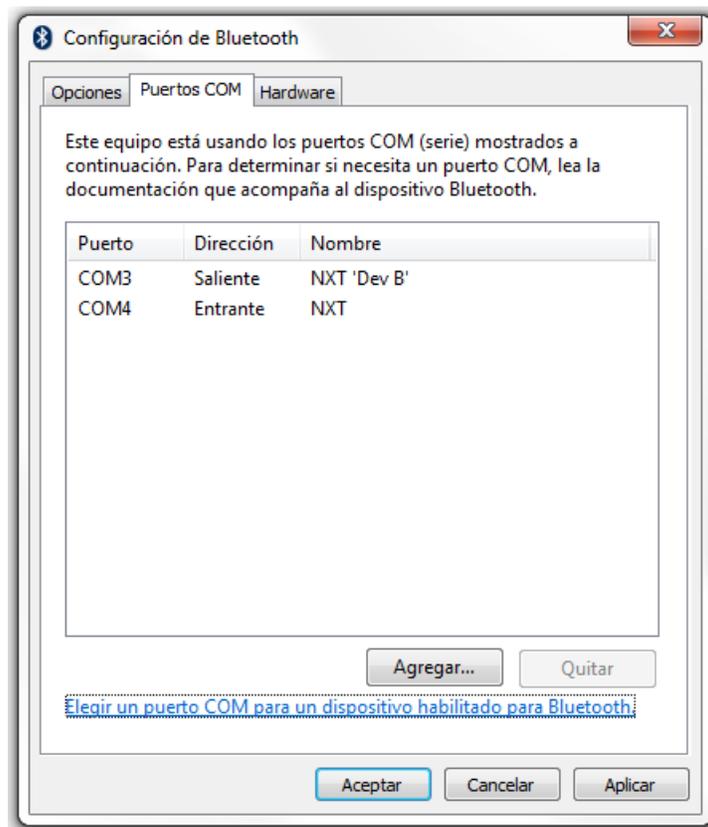


Figura E.16: *Puertos COM asociados al módulo de bluetooth.*

Apéndice F

Subsistemas del modelo en *Simulink*[®] del robot móvil

A continuación se muestran los subsistemas del modelo en *Simulink*[®] para controlar el comportamiento del robot móvil.

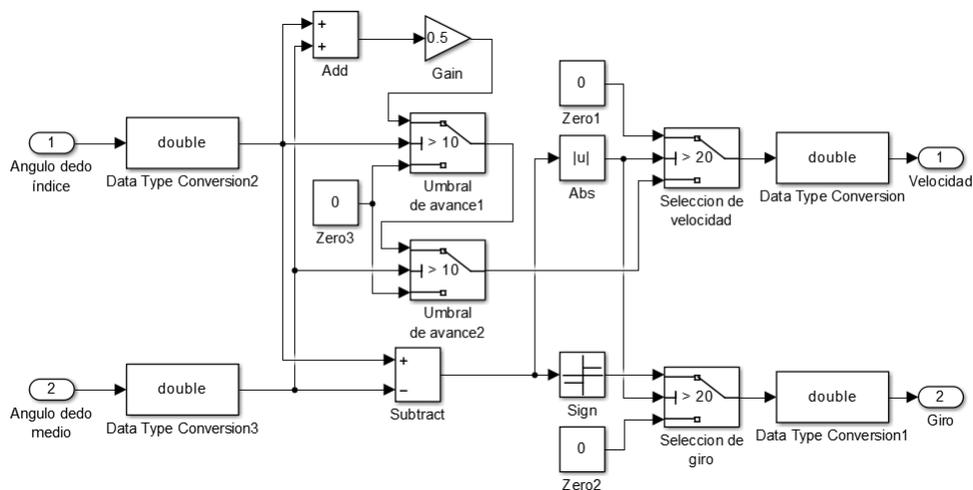


Figura F.1: Subsistema para detectar los comandos y calcular la velocidad y el sentido de giro de los motores del robot móvil.

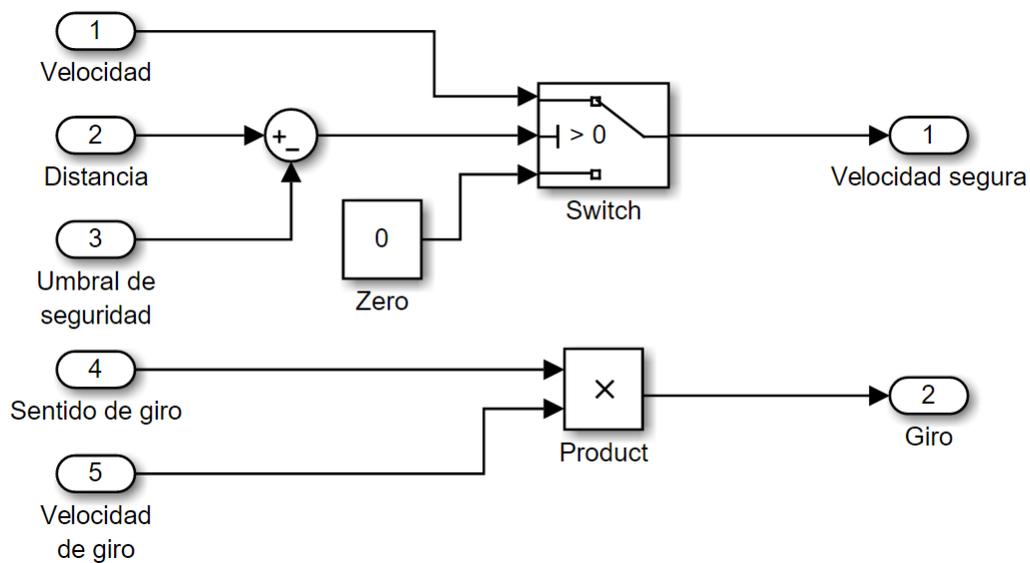


Figura F.2: Subsistema que rige el comportamiento del robot móvil.

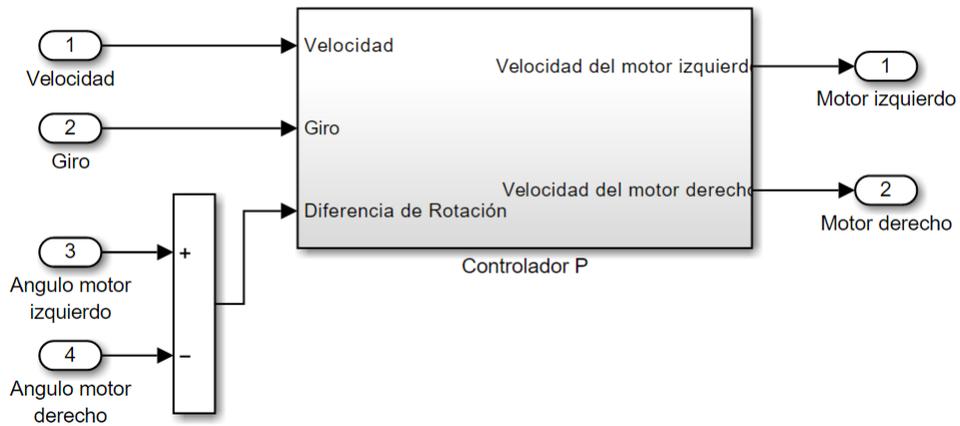


Figura F.3: *Subsistema para controlar los motores del robot móvil.*

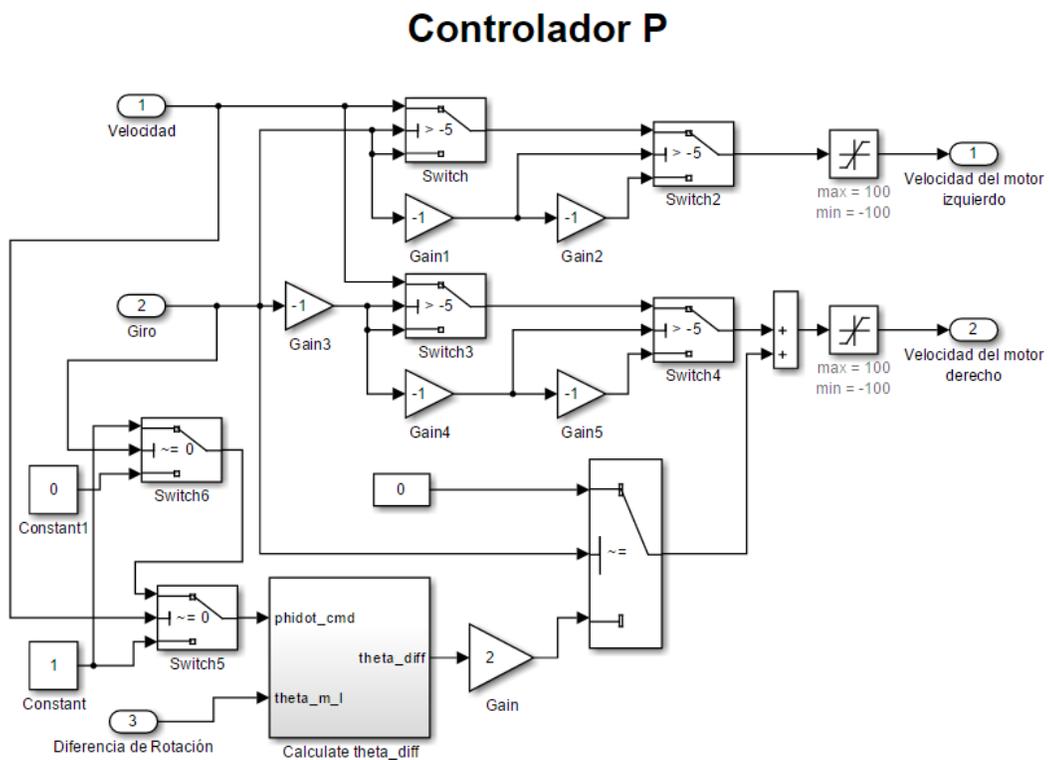


Figura F.4: *Controlador tipo P para controlar los motores del robot móvil.*

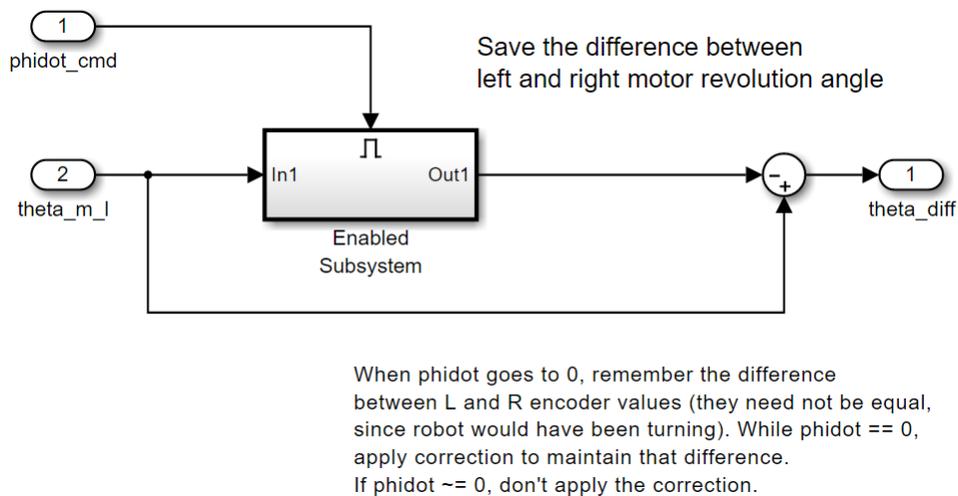


Figura F.5: Cálculo de la diferencia de giro de los motores del robot móvil.

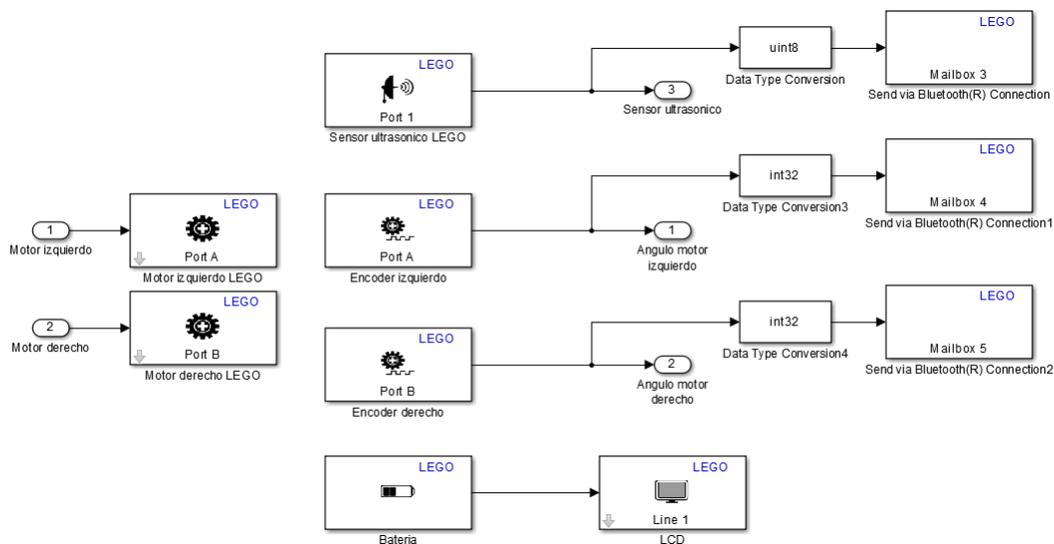


Figura F.6: Subsistema para la comunicación con el hardware del robot móvil.

Bibliografía

- [1] ACHIBET, M., MARCHAL, M., ARGELAGUET, F. y LECUYER, A. The Virtual Mitten: A novel interaction paradigm for visuo-haptic manipulation of objects using grip force. En *Proceedings of 2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, páginas 59–66. 2014.
- [2] ALBRAIKAN, A., BADAWI, H., HAMAM, A. y EL SADDIK, A. Haptibasic: Learning basic concepts of a haptic technology through edutainment games. En *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW)*, páginas 1–4. 2013.
- [3] BEN-TZVI, P. y ZHOU, M. Sensing and force-feedback exoskeleton (SAFE) glove. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 23(6), páginas 992–1002, 2015.
- [4] BI, Q. y YANG, C.-J. Human-machine interaction force control: using a model-referenced adaptive impedance device to control an index finger exoskeleton. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, vol. 15(4), páginas 275–283, 2014.
- [5] BORDEGONI, M. y CUGINI, U. Haptic modeling in the conceptual phases of product design. *Virtual Reality*, vol. 9(2-3), páginas 192–202, 2006.
- [6] BOUZIT, M., BURBEA, G., POPESCU, G. y BOIAN, R. The Rutgers Master II - new design force feedback glove. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7(2), páginas 256–263, 2002.
- [7] BROEREN, J., BJORKDAHL, A., CLAESSON, L., GOUDE, D., LUNDGREN-NILSSON, A., SAMUELSSON, H., BLOMSTRAND, C., SUNNERHAGEN, K. y RYDMARK, M. Virtual rehabilitation after stroke. *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 136, páginas 77–82, 2008.
- [8] BROKAW, E., BLACK, I., HOLLEY, R. y LUM, P. Hand spring operated movement enhancer (HandSOME): A portable, passive hand exoskeleton for stroke rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 19(4), páginas 391–399, 2011.
- [9] CHANG, L. Y. y MATSUOKA, Y. A kinematic thumb model for the ACT hand. En *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, páginas 1000–1005. 2006.

- [10] CHEN, Z., FAN, S. y ZHANG, D. An exoskeleton system for hand rehabilitation based on master-slave control. En *Intelligent Robotics and Applications: 7th International Conference* (editado por X. Zhang, H. Liu, Z. Chen y N. Wang), vol. 8917, páginas 242–253. Springer International Publishing, 2014.
- [11] COLES, T. R., MEGLAN, D. y JOHN, N. W. The role of haptics in medical training simulators: A survey of the state of the art. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 4(1), páginas 51–66, 2011.
- [12] COLOMA, C. http://profesorcoloma.blogspot.mx/2011_09_01_archive.html. Marzo, 2016.
- [13] COMAI, S., MAZZA, D. y MUREDDU, L. A haptic-based framework for chemistry education. En *Sustaining TEL: From Innovation to Learning and Practice* (editado por M. Wolpers, P. Kirschner, M. Scheffel, S. Lindstaedt y V. Dimitrova), vol. 6383 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 614–619. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [14] CORTESE, M., CEMPINI, M., DE ALMEIDA RIBEIRO, P. R., SOEKADAR, S. R., CARROZZA, M. C. y VITIELLO, N. A mechatronic system for robot-mediated hand tele-rehabilitation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20(4), páginas 1753–1764, 2015.
- [15] CUSTOMPART. <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>. Marzo, 2016.
- [16] CYBERGLOVE. <http://www.cyberglovesystems.com/products/cyberglove-III/overview>. *Cyber Glove Systems*, Agosto, 2015.
- [17] CYBERGRASP. <http://www.cyberglovesystems.com/products/cybergrasp/overview>. *Cyber Glove Systems*, Agosto, 2015.
- [18] DE PAOLIS, L. Serious game for laparoscopic suturing training. En *Proceedings of 2012 Sixth International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)*, páginas 481–485. 2012.
- [19] DEXMO. <http://www.dextarobotics.com/products/Dexmo>. *Dexta Robotics*, Agosto, 2015.
- [20] DIPRIETO, L., SABATINI, A. M. y DARIO, P. A survey of glove-based systems and their applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 38(4), páginas 461–482, 2008.
- [21] EID, M. A., MANSOUR, M., EL SADDIK, A. H. y IGLESIAS, R. A haptic multimedia handwriting learning system. En *Proceedings of the International Workshop on Educational Multimedia and Multimedia Education*, Emme '07, páginas 103–108. 2007.

- [22] ENZAKI, Y., YANO, H., OSHIRO, Y., KIM, J., KIM, S., IWATA, H. y OHKOHCHI, N. Development of the haptic device for a hepatectomy simulator. En *Haptic Interaction* (editado por H. Kajimoto, H. Ando y K.-U. Kyung), vol. 277 de *Lecture Notes in Electrical Engineering*, páginas 231–235. Springer Japan, 2015.
- [23] FANG, H., XIE, Z., LIU, H., LAN, T. y XIA, J. An exoskeleton force feedback master finger distinguishing contact and non-contact mode. *2009 IEEE/ASME International conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, páginas 1059–1064, 2009.
- [24] FAROQUE, S., HORAN, B., ADAM, H., PANGESTU, M. y THOMAS, S. Haptic virtual reality training environment for micro-robotic cell injection. En *Haptic Interaction* (editado por H. Kajimoto, H. Ando y K.-U. Kyung), vol. 277 de *Lecture Notes in Electrical Engineering*, páginas 245–249. Springer Japan, 2015.
- [25] FESTO. https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/156734/Brosch_FC_ExoHando_EN_lo_L.pdf. Marzo, 2014.
- [26] FJELD, M. y VOEGTLI, B. Augmented chemistry: an interactive educational workbench. En *Proceedings of 2002 International Symposium on Mixed and Augmented Reality. ISMAR 2002.*, páginas 259–321. 2002.
- [27] FORCEDIMENSION. <http://www.forcedimension.com/products>. *Force Dimension*, Agosto, 2015.
- [28] GALIANA, I. y FERRE, M., editores. *Multi-finger Haptic Interaction*. Springer Series on Touch and Haptic Systems. Springer-Verlag London, 2013.
- [29] GEOMAGIC. <http://www.geomagic.com/en/products-landing-pages/haptic>. *Geomagic*, Agosto, 2015.
- [30] GLOVEONE. <http://www.gloveonevr.com/>. *Neuro Digital Technologies*, Agosto, 2015.
- [31] HATZFELD, C. Haptics as an interaction modality. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 2, páginas 29–100. Springer, segunda edición, 2014.
- [32] HATZFELD, C. y KERN, T. A. Development of haptic systems. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 4, páginas 125–141. Springer, segunda edición, 2014.
- [33] HATZFELD, C. y KERN, T. A. Motivation and application of haptic systems. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 1, páginas 3–28. Springer, segunda edición, 2014.
- [34] HAYWARD, V., ASTLEY, O. R., CRUZ-HERNANDEZ, M., GRANT, D. y ROBLES-DE-LA-TORRE, G. Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, vol. 24(1), páginas 16–29, 2004.

- [35] HEO, P., GU, G., LEE, S.-J., RHEE, K. y KIM, J. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13(5), páginas 807–824, 2012.
- [36] HIRCHE, S. y BUSS, M. Human-oriented control for haptic teleoperation. *Proceedings of the IEEE*, vol. 100(3), páginas 623–647, 2012.
- [37] HORAN, B., CREIGHTON, D., NAHAVANDI, S. y JAMSHIDI, M. Bilateral haptic teleoperation of an articulated track mobile robot. En *IEEE International Conference on Systems Engineering 2007*, páginas 1–8. 2007.
- [38] HORAN, B., NAJDOVSKI, Z. y NAHAVANDI, S. Multi-point multi-hand haptic teleoperation of a mobile robot. En *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication 2009*, páginas 1112–1118. 2009.
- [39] HOU, X., SOURINA, O. y KLIMENKO, S. Haptic-based serious games. En *Proceedings of 2014 International Conference on Cyberworlds (CW)*, páginas 39–46. 2014.
- [40] HUBER, M., RABIN, B., DOCAN, C., BURDEA, G., NWOSU, M., ABDELBAKY, M. y GOLOMB, M. Playstation 3-based tele-rehabilitation for children with hemiplegia. En *Proceedings of 2008 Virtual Rehabilitation*, páginas 105–112. 2008.
- [41] HURBAIN, P. <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm>. Marzo, 2016.
- [42] IMMERSION. <http://www.immersion.com/markets/medical/products/index.html>. *Immersion Corporation*, Agosto, 2015.
- [43] IMMERSION. <http://www.immersion.fr/en/category/products/>. *Immersion Francia*, Agosto, 2015.
- [44] IN, H. y CHO, K. Evaluation of the antagonistic tendon driven system for SNU Exo-Glove. En *Proceedings of 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intell*, páginas 507–509. 2012.
- [45] INSTRUMENTS, N. <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. abril, 2016.
- [46] INSTRUMENTS, N. <http://www.ni.com/pdf/manuals/370719c.pdf>. Marzo, 2016.
- [47] INSTRUMENTS, N. <http://www.ni.com/pdf/manuals/341079b.pdf>. Marzo, 2016.
- [48] IQBAL, J., KHAN, H., TSAGARAKIS, N. G. y CALDWELL, D. G. A novel exoskeleton robotic system for hand rehabilitation – conceptualization to prototyping. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 34(2), páginas 79 – 89, 2014.
- [49] ITO, S., KAWASAKI, H., ISHIGURE, Y., NATSUME, M., MOURI, T. y NISHIMOTO, Y. A design of fine motion assist equipment for disabled hand in robotic rehabilitation system. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 348(1), páginas 79 – 89, 2011. *Mechatronics and its Applications*.

- [50] JOHN, N. W. Design and implementation of medical training simulators. *Virtual Reality*, vol. 12(4), páginas 269–279, 2008.
- [51] KASSNER, S. Kinematic design. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 8, páginas 227–252. Springer, segunda edición, 2014.
- [52] KERN, T. A. General system structures. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 6, páginas 169–179. Springer, segunda edición, 2014.
- [53] LEIJENSE, J., QUESADA, P. y SPOOR, C. Kinematic evaluation of the finger's interphalangeal joints coupling mechanism-variability, flexion-extension differences, triggers, locking swanneck deformities, anthropometric correlations. *Journal of Biomechanics*, vol. 43, páginas 2381–2393, 2010.
- [54] LI, J., WANG, S., WANG, J., ZHENG, R., ZHANG, Y. y CHEN, Z. Development of a hand exoskeleton system for index finger rehabilitation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 25(2), páginas 223–233, 2012.
- [55] MATHWORKS. <http://www.mathworks.com/help/supportpkg/legomindstormsnext/examples.html>. *Simulink Support Package for LEGO*, Marzo, 2016.
- [56] MEISS, T., BUDELMANN, C., KERN, T., SINDLINGER, S., MINAMISAVA, C. y WERTHSCHUTZKY, R. Intravascular palpation and haptic feedback during angioplasty. En *Proceedings of 2009 EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, páginas 380–381. 2009.
- [57] MINAMIZAWA, K., FUKAMACHI, S., KAJIMOTO, H., KAWAKAMI, N. y TACHI, S. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. En *Proceedings of 2007 SIGGRAPH*, 8. 2007.
- [58] MOOG. <http://www.moog.com/products/haptics-robotics/>. *Moog Inc.*, Agosto, 2015.
- [59] MOUSAVI, M. y AZIZ, F. State of the art of haptic feedback in virtual reality in manufacturing. En *Proceedings of 2008 International Symposium on Information Technology. ITSIm 2008.*, vol. 4, páginas 1–7. 2008.
- [60] NAIDU, D., STOPFORTH, R., BRIGHT, G. y DAVRAJH, S. A portable passive physiotherapeutic exoskeleton. *International Journal of Advanced Robot Systems*, vol. 9(137), páginas 1–12, 2012.
- [61] NORTON, R. L. *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Mc Graw Hill, cuarta edición, 2009.
- [62] NOVINT. <http://www.novint.com/index.php/products>. *Novint Technologies Inc.*, Agosto, 2015.

- [63] NXT, L. M. shop.lego.com/en-ca/nxt-intelligent-brick-9841. *LEGO*, Marzo, 2016.
- [64] OPITZ, T. y MECKEL, O. Control of haptic systems. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 7, páginas 181–225. Springer, segunda edición, 2014.
- [65] OROZCO, M., SILVA, J., SADDIK, A. E. y PETRIU, E. The role of haptics in games. En *Haptics Rendering and Applications* (editado por A. E. Saddik), capítulo 14, páginas 215–232. InTech, 2012.
- [66] OZKAYA, N., NORDIN, M., GOLDSHEYDER, D. y LEGER, D. *Fundamentals of Biomechanics*. Springer, tercera edición, 2012.
- [67] P. HURBAIN, M. G. *Extreme NXT: Extending the LEGO® Mindstorms® NXT to the Next Level*. Technology in action series. Apress, 2007.
- [68] PALLUEL-GERMAIN, R., BARA, F., DE BOISFERON, A., HENNION, B., GOUAGOUR, P. y GENTAZ, E. A visuo-haptic device - telemaque - increases kindergarten children's handwriting acquisition. En *Proceedings of 2007 EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, páginas 72–77. 2007.
- [69] PARKER, D. http://www.nxtprograms.com/castor_bot/. Diciembre, 2015.
- [70] POLOLU. <https://www.pololu.com/product/989>. Abril, 2016.
- [71] POLOLU. <https://www.pololu.com/product/1213>. Marzo, 2016.
- [72] POLOLU. <https://www.pololu.com/product/2598>. Marzo, 2016.
- [73] PRATTICHIZZO, D., CHINELLO, F., PACCHIEROTTI, C. y MALVEZZI, M. Towards wearability in fingertip haptics: A 3-dof wearable device for cutaneous force feedback. *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6(4), páginas 506–516, 2013.
- [74] PREUSCHE, C. y HIRZINGER, G. Haptics in telerobotics. *The Visual Computer*, vol. 23(4), páginas 273–284, 2007.
- [75] PRUSA, J. www.prusa3d.com/. Marzo, 2016.
- [76] PRUSA, J. www.prusa3d.com/drivers. Marzo, 2016.
- [77] RAUSCH, J., KERN, T. A. y HATZFELD, C. Sensor design. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 10, páginas 373–442. Springer, segunda edición, 2014.
- [78] ROSATI, G., ROSSI, A., BOSCHETTI, G. y TREVISANI, A. First experimental results of an integrated robotic system for haptic teleoperation. En *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2007*, páginas 3138–3143. 2007.

- [79] SATO, M., LIU, X., MURAYAMA, J., AKAHANE, K. y ISSHIKI, M. A haptic virtual environment for molecular chemistry education. En *Transactions on Edutainment I* (editado por Z. Pan, A. Cheok, W. Müller y A. El Rhalibi), vol. 5080 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 28–39. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [80] SCIENCE, S. <http://www.surgical-science.com/products/>. *Surgical Science*, Agosto, 2015.
- [81] SETH, A., VANCE, J. y OLIVER, J. Virtual reality for assembly methods prototyping: a review. *Virtual Reality*, vol. 15(1), páginas 5–20, 2011.
- [82] SIMBIONIX. <http://symbionix.com/simulators/>. *Symbionix*, Agosto, 2015.
- [83] SIMENDO. <http://www.simendo.eu/>. *Simendo*, Agosto, 2015.
- [84] SIMSURGERY. <http://www.simsurgery.com/>. *SimSurgery*, Agosto, 2015.
- [85] SIMULINK. <http://www.mathworks.com/products/simulink/>. *MATLAB*, Marzo, 2016.
- [86] SIVAK, M., UNLUHISARCIKLI, O., WEINBERG, B., MIRELMAN-HARARI, A., BONATO, P. y MAVROIDIS, C. Haptic system for hand rehabilitation integrating an interactive game with an advanced robotic device. En *Proceedings of 2010 IEEE Haptics Symposium*, páginas 475–481. 2010.
- [87] SPARKFUN. <https://www.sparkfun.com/datasheets/sensors/pressure/fsrguide.pdf>. marzo, 2016.
- [88] SRINIVASAN, M. A. What is haptics? *Laboratory for Human and Machine Haptics. Massachusetts Institute of Technology*, 2004.
- [89] STRATASYS. <http://www.dedutel.com/pdf/stratasys.pdf>. Marzo, 2016.
- [90] TADAYON, R., PANCHANATHAN, S., MCDANIEL, T., FAKHRI, B. y LAFF, M. A toolkit for motion authoring and motor skill learning in serious games. En *Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, páginas 59–64. 2014.
- [91] TSETSERUKOU, D., HOSOKAWA, S. y TERASHIMA, K. Linktouch: A wearable haptic device with five-bar linkage mechanism for presentation of two-dof force feedback at the fingerpad. En *Proceedings of 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, páginas 307–312. 2014.
- [92] ULRICH, K. T. y EPPINGER, S. D. *Diseño y desarrollo de productos*. Mc Graw Hill, 2009.
- [93] VIRTAMED. <http://www.virtamed.com/en/medical-training-simulators/overview/>. *VirtaMed*, Agosto, 2015.

- [94] WINTER, S. y BOUZIT, M. Use of magnetherheological fluid in a force feedback glove. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15(1), páginas 2–8, 2007.
- [95] XU, Z., YU, H. y YAN, S. Motor rehabilitation training after stroke using haptic handwriting and games. En *Proceedings of the 4th International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology*, iCREATE '10, páginas 31:1–31:4. 2010.
- [96] ZENG, L., WEBER, G., ZOLLER, I., LOTZ, P., KERN, T. A., REISINGER, J., MEISS, T., OPITZ, T., ROSSNER, T. y STEFANOVA, N. Examples of haptic system development. En *Engineering Haptic Devices* (editado por C. Hatzfeld y T. A. Kern), Touch and Haptic Systems, capítulo 14, páginas 525–554. Springer, segunda edición, 2014.
- [97] ZHANG, F., HUA, L., FU, Y., CHEN, H. y WANG, S. Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 73, páginas 103 – 116, 2014.
- [98] ZHOU, M. y BEN-TZVI, P. Tendon transmission efficiency of a two-finger haptic glove. En *Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Robotiic and Sensors Enviroments (ROSE)*, páginas 13–18. 2013.
- [99] ZHOU, M. y BEN-TZVI, P. RML Glove - an exoskeleton glove mechanism with haptics feedback. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20(2), páginas 641–652, 2015.
- [100] ZONG, G., PEI, X., YU, J. y BI, S. Classification and type synthesis of 1-DOF remote center of motion mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43(12), páginas 1585–1595, 2008.