



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT BÍPEDO SEMI-PASIVO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

RODRIGO IGNACIO GALILEA KLEINSTEUBER

PROFESOR GUÍA:
JAVIER RUÍZ DEL SOLAR SAN MARTÍN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HECTOR AGUSTO ALEGRÍA
PAUL VALLEJOS SÁNCHEZ

Este trabajo fue parcialmente financiada por el proyecto FONDECYT 1130153.

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Eléctrico
POR: Rodrigo Ignacio Galilea Kleinsteuber
FECHA: 23 de marzo de 2016
PROFESOR GUÍA: Javier Ruíz del Solar San Martín

CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT BÍPEDO SEMI-PASIVO

Un desafío importante que debe ser superado por la robótica a corto plazo es la obtención de una caminata bípeda energéticamente eficiente. Existen dos enfoques para atacar el problema, los robots pasivos, muy eficientes y poco versátiles; y los robots tradicionales, versátiles y robustos, pero con un gasto de energía mucho mayor. Como solución a este problema, Vallejos en su tesis doctoral, propuso un diseño de robot que combina elementos de ambos enfoques.

El objetivo de este trabajo es completar la construcción de dicho robot. Para esto se deben construir diversas piezas y una placa de circuitos que distribuya la energía a todos los actuadores; se debe diseñar e implementar un esquema de control adecuado para las articulaciones; se debe programar un protocolo de comunicación para coordinar las articulaciones y una interfaz para permitir el manejo del robot a futuro. De esta manera se dispondrá de una plataforma con la cual realizar investigación en caminatas bípedas.

En primera instancia se implementó una articulación de prueba. Con esta se validó el modelo, el controlador y se analizó la dinámica de la articulación. Como resultado se obtuvo una frecuencia de corte de 1[Hz], lo que está dentro del rango de caminata humano. Sin embargo, se consideró necesario aumentar la frecuencia de operación de la articulación un poco más; para esto se engrosan las cuerdas y se aumentó desde 14 a 20 [V] el voltaje de alimentación de los motores.

Luego se procedió a implementar todo un lado del robot: un tobillo, una rodilla y una cadera. Para permitir el funcionamiento simultáneo de estas articulaciones se fabricó una tarjeta de distribución de energía y se programaron el protocolo de comunicaciones y la interfaz de usuario. Esta última se programó utilizando ROS, lo que facilitará considerablemente su posterior uso y extensión. Para finalizar el proceso de construcción se procedió a replicar los actuadores y completar el montaje del robot.

Se da por terminado el trabajo, dejando el robot completamente ensamblado y habiendo probado el funcionamiento de los sistemas implementados. Al finalizar este proyecto es claro que se habilita la posibilidad de experimentar e investigar acerca de la caminata bípeda sobre una plataforma real.

Tabla de contenido

Índice de ilustraciones	IV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	1
1.4. Metodología	2
1.5. Aportes del Trabajo	2
1.6. Organización del Contenido	2
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Antecedentes Generales	3
2.2. Estado del Arte en Robots Bípedos	5
2.3. Actuator por Torsión de Cuerdas (TSA)	6
2.3.1. Principio de Funcionamiento	6
2.3.2. Antecedentes Académicos	7
2.3.3. Modelamiento del actuator	8
2.4. Herramientas Utilizadas	12
2.4.1. Método de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID en base a la ganancia crítica	12
2.4.2. ROS: <i>Robot Operative System</i>	13
3. Diseño preliminar del Robot	15
3.1. Diseño Mecánico	15
3.1.1. Articulaciones	16
3.1.2. Montaje Completo	18
3.2. Elementos Eléctricos	19
3.2.1. Sensores	20
3.2.2. Actuación	22
3.2.3. Control y Comunicaciones	22
4. Implementación	24
4.1. Diseño y Fabricación	24
4.1.1. Piezas	24
4.1.2. Circuito de Distribución de Energía	28
4.2. Esquema de Control	29
4.3. Programación	31

4.3.1. Firmware	31
4.3.2. Protocolo de Comunicación	33
4.3.3. Interfaz de Usuario	34
5. Resultados	37
5.1. Articulación de Prueba	37
5.1.1. Características de la Articulación	38
5.1.2. Validación de Modelos	40
5.1.3. Comportamiento del Controlador	41
5.1.4. Respuesta Dinámica	42
5.1.5. Discusión de Resultados	44
6. Conclusión	48
7. Bibliografía	49

Índice de ilustraciones

2.1.	Diagrama explicativo del principio de los TSAs (Sonoda y Godler, 2010). . .	7
2.2.	Detalle de la cuerda torcida y las tres distintas zonas.	9
2.3.	Vista de las cuerdas en el plano transversal.	9
3.1.	Diseño de la transmisión del Motor a la Cuerda.	15
3.2.	Diseño de la articulación de las Rodillas.	16
3.3.	Actuación de la articulación del tobillo. (a) corresponde a una vista lateral que detalla el movimiento Pitch y (b) a una frontal para el Roll.	16
3.4.	Actuación de cadera y sus dos grados de libertad.	17
3.5.	Vista frontal del tronco del robot.	18
3.6.	Esquema del ensamble completo del robot.	19
3.7.	Circuito de medición de corriente.	20
3.8.	Divisor de Voltaje para sensores de Presión.	21
3.9.	Circuito Acondicionador de Señales para el Encoder. (a) corresponde a la señal de posición y (b) a la de velocidad.	21
3.10.	Circuito de activación de Motores.	22
4.1.	Vista explosionada de las piezas de trasmisión, motor y rodamiento axial. . .	25
4.2.	Piezas rediseñadas del muslo.	26
4.3.	Las dos piezas de destorcedores en (a) se combinan en una única pieza en (b). .	26
4.4.	Piezas de soporte para la cadera.	27
4.5.	Adaptación del tronco del robot mediante barras laterales.	27
4.6.	Capa superior del circuito de distribución de energía del robot.	28
4.7.	Diagrama del esquema de control completo	29
4.8.	Diagrama del esquema de control interno del controlador del Flexor o del Extensor.	30
4.9.	Diagrama de Comunicación entre Procesadores.	31
4.10.	Gráficos de las curvas características de los sensores de corriente.	33
4.11.	Estructura general del mensaje.	33
4.12.	Organización del contenido en los mensajes de lectura y escritura.	34
4.13.	Diagrama de Nodos, Servicios y Tópicos implementados.	35
5.1.	Articulación de Prueba.	37
5.2.	Diagrama detallado de la Rodilla.	38
5.3.	Modelos polinomiales de segundo orden utilizados en el controlador del Flexor (a) y del Extensor (b).	40

5.4. Gráfico de la relación entre el ángulo de articulación y la acción de los actuadores. Datos empíricos comparados a curvas teóricas.	41
5.5. Efecto de la elasticidad en los actuadores.	42
5.6. Gráfico comparativo del ajuste por radio variable.	43
5.7. Respuesta del sistema ante cambios en α_r	43
5.8. Prueba de comportamiento de la tensión.	44
5.9. Respuesta de la articulación a una señal sinusoidal de α_r a 1[Hz].	45
5.10. Reacción del sistema a una entrada α_r de forma sinusoidal de 1,5[Hz].	46
5.11. Ganancia y fase del sistema frente a una entrada sinusoidal de α_r desde 0,1[Hz] a 2[Hz].	46
5.12. Velocidad, corriente y potencia instantánea en los motores durante prueba de operación a 1,5[Hz].	47

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En su tesis doctoral, Paul Vallejos propuso un diseño de robot bípedo semi-pasivo (Vallejos, 2011). Este considera un sistema de actuación completo, caracterizado por la transmisión de torque mediante cuerdas. Permitiendo distribuir arbitrariamente la masa del sistema, para así satisfacer las condiciones impuestas por la dinámica pasiva.

La construcción del robot se llevó a cabo de manera simultánea al desarrollo de aquella tesis, al punto que se realizaron pruebas preliminares de los actuadores. Sin embargo, con la implementación surgieron nuevos problemas no considerados: como la necesidad de rediseñar algunas piezas, un esquema de control más adecuado, etc.

La construcción del robot no era un objetivo fundamental de aquella tesis; por lo que fue quedando al margen debido a la cantidad de horas que significaba la adaptación y puesta en marcha del sistema.

1.2. Motivación

Se decide trabajar en este proyecto debido a la posibilidad de construir una plataforma para la investigación en robótica. El proyecto presenta una variedad de tareas y problemas a abordar, desde la construcción de piezas, la implementación de controladores y programación.

1.3. Objetivos

El objetivo de este proyecto es finalizar la construcción de un robot bípedo semi-pasivo. Facilitando así la investigación en locomoción bípeda en la universidad.

Esto implica finalizar la construcción de los elementos mecánicos que componen el robot; implementar el sistema de actuación y control para todas las articulaciones; y generar una interfaz centralizada para coordinar todos los actuadores.

1.4. Metodología

Con objeto de evitar el rediseño en una etapa avanzada del trabajo, se propone la siguiente metodología para llevar a cabo la construcción del robot.

En primer lugar, se construye y prueba una articulación de rodilla. También se desarrollará el esquema de control a ser implementado en todos los actuadores. Con la articulación funcional se realizarán pruebas para validar el sistema e identificar mejoras necesarias.

Una vez definido el diseño, se procederá a implementar una mitad del robot. Lo que significa construir una rodilla, una cadera y un tobillo; implementar el circuito de distribución de energía y el protocolo de comunicaciones. Enseguida, se desarrollará la plataforma computacional que permita el manejo directo de cada actuador.

Finalmente, se procede a replicar las articulaciones, completando así la construcción del robot.

1.5. Aportes del Trabajo

Al finalizar este proyecto se dispone de una plataforma para la investigación de la caminata bípeda. Esta posee integrado en su diseño elementos de dinámica pasiva y una actuación completa; permitiendo la implementación de técnicas de caminata pasiva o activa.

La interfaz desarrollada permite probar de manera sencilla distintos métodos de caminata; permitiendo una comparación y evaluación adecuada entre ellos. Además, esto aísla al usuario de la programación de micro-controladores y manejo de comunicación serial.

1.6. Organización del Contenido

Esta memoria está dividida en 6 partes, siendo el presente capítulo una de ellas. El capítulo 2 presenta una revisión académica de la investigación en robots bípedos; luego se presenta el tipo de actuador; finalmente, por completitud se abordan algunas herramientas utilizadas en el proyecto. A continuación, en el capítulo 3 se presenta el diseño y estado del robot previo al desarrollo de este trabajo. La implementación, en el capítulo 4, aborda el proceso de diseño y construcción de piezas, tarjetas de circuitos, controladores y programas. En el capítulo 5 se presentan y discuten los resultados obtenidos en cada etapa de la metodología. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

El objetivo de este capítulo es posicionar al lector dentro del tema abordado. Para ello se presentan los conceptos necesarios para comprender los términos usados, las explicaciones y el desarrollo previo del tema. A continuación, se encuentra una reseña con respecto a la investigación sobre caminata bípeda robótica, con la explicación de lo que involucra el concepto de robot bípedo semi-pasivo. Luego se presenta el actuador por torsión de cuerdas, se explica su funcionamiento y se presenta el estado del arte de este. A continuación, se presentan trabajos actuales en el área de los robots bípedos enfocados a emular la caminata de bajo consumo energético. Finalmente, se introducen algunas herramientas técnicas utilizadas en el desarrollo de este proyecto.

2.1. Antecedentes Generales

La caminata, tanto de humanos como de animales, ha despertado un interés científico desde tiempos griegos. A esto se le suma la intención de controlar y/o emular las capacidades de la naturaleza mediante máquinas e ingenios. Si bien la mecánica de las distintas caminatas se conoce y comprende cabalmente, la replicación de la locomoción por medios artificiales no han tenido tan buenos resultados.

Actualmente, existe una multitud de robots con la capacidad de caminar; sin embargo, sus aptitudes están muy por debajo de las capacidades humanas. En particular, uno de los problemas más restrictivos que se busca resolver es el consumo energético de los caminantes artificiales. El robot ASIMO de Honda es uno de los robots bípedos más conocidos, capaz de caminar, subir escaleras e incluso trotar, pero no por más de una hora. Esta autonomía resulta insuficiente para apuntar a las tareas de apoyo en desastres, las que han surgido como objetivo para la robótica a raíz del accidente en la planta nuclear de Fukushima el año 2011.

Los robots bípedos bajo el paradigma tradicional, de preciso control del ángulo de cada articulación, como ASIMO, NAO, HRP-4, etc. presentan motores eléctricos montados directamente en las articulaciones; que además, necesitan grandes reducciones mecánicas para obtener los torques adecuados. Este método de construir articulaciones, si bien es simple

mecánicamente y robusto, hace que sean completamente rígidas y requieran mucha energía. Pues el método impone una trayectoria a cada articulación, sin tener mayores consideraciones respecto de la dinámica natural del robot.

Una solución al problema de la autonomía sería desarrollar mejores baterías, lo que ya es una fuerte área de estudio. Otra es reducir el gasto de energía, imitando la sumamente eficiente caminata humana.

En los años 90, McGeer propuso robots bípedos pasivos como solución al problema, dotados de una dinámica de péndulos acoplados, con cada pierna balanceándose hacia adelante en su turno y el tronco oscilando para mantener el balance. Llega a demostrar que con este método se puede lograr una eficiencia energética similar a la humana (McGeer, 1990, 1993). Su paradigma consiste en construir el robot apuntando a generar una dinámica pendular que resulte en un ciclo de caminata estable; con un plano inclinado unos pocos grados como única manera de contrarrestar la pérdida energética producto del roce e impacto en el pie.

Las ventajas energéticas del acercamiento pasivo a la caminata es cuantificado en (Collins, Ruina, Tedrake y Wisse, 2005), este tipo de robots presentan un consumo energético comparable al humano, el cual se estima un orden de magnitud menor al de los robots convencionales con control de trayectoria en las articulaciones.

Desde un principio, McGeer planteaba que para solucionar el problema de la caminata primero debía dominarse la dinámica; y luego, añadir la fuente de energía sería una modificación menor. Autores posteriores han experimentado añadiendo actuadores para eliminar la necesidad del plano inclinado, y con el objetivo de además poder influir sobre la caminata (Tedrake, Zhang, Fong y Seung, 2004; Wisse, 2005; Wisse, Feliksdal, Van Frankkenhuyzen y Moyer, 2007).

En (Tedrake, Zhang, Fong y Seung, 2004) se muestra un robot bípedo pasivo capaz de caminar establemente con libertad de movimiento en los 3 ejes. A este robot se le añaden actuadores solo en los tobillos, añadiendo movimiento de *pitch* y *roll* en ellos; la cadera se mantiene pasiva. Además, se muestra que la caminata continua siendo estable, incluso mejora la robustez al usar un controladores retroalimentados; y gracias a la entrada de energía provista por los actuadores el robot puede caminar en el plano e incluso llegar a subir pendientes.

De manera similar, en (Wisse, 2005; Wisse, Feliksdal, Van Frankkenhuyzen y Moyer, 2007) se muestran el desempeño de robots cada vez más complejos. Su primer diseño es un bípedo 2D, con actuadores en cadera y rodillas; luego muestran los efectos de añadir un tronco con su nuevo prototipo. Finalmente, presentan un prototipo de robot estable en los tres ejes, este incluye todas las características del anterior, pero además se le añaden brazos que se balancean en fase contraria a las piernas y actuación en los tobillos. Este último prototipo es capaz de caminar de manera estable, sin apoyos; además puede virar, detenerse e iniciar la caminata. Estos modelos utilizan como actuadores los músculos neumáticos McKibben, que cambian su rigidez dependiendo la presión de aire aplicada; apuntando hacia usar actuadores de rigidez variable para controlar la caminata.

Los robots con enfoque pasivo que poseen más grados de libertad que actuadores son

llamados sub-actuados (*underactuated*); es decir, poseen grados de libertad sobre los cuales no se tiene un control directo, como el uso de pies curvados. Los ejemplos anteriores corresponden todos a robots sub-actuados; pues todos ellos poseen al menos la planta del pie curvada. Por otro lado, la noción de semi-pasivos significa que el robot está completamente actuado y a la vez incorporan elementos de la dinámica pasiva; ejemplos de este enfoque son (Omer, Ghorbani, Lim y Takanishi, 2009; Ly, Lapeyre y Oudeyer, 2011). Aunque ambos posean una actuación tradicional y la parte pasiva sea añadida en el esquema de control, aún así están incorporando estas ideas, por lo que son considerados robots semi-pasivos. En (Omer, Ghorbani, Lim y Takanishi, 2009) se incluye el uso de resortes con rigidez controlada, para obtener un comportamiento más cercano al de los robots pasivos.

2.2. Estado del Arte en Robots Bípedos

Clara la existencia de dos vertientes principales en el desarrollo de robots bípedos; una que nace desde la teoría de control, apoyada fuertemente en la cinemática inversa, y la otra enfocada en la dinámica del robot, originada por los logros de McGeer con sus caminadores pasivos. A continuación se exponen trabajos recientes en el área, con el fin de hacerse una idea más clara de los problemas que se están abordando actualmente y los logros obtenidos con cada paradigma.

Los más reconocibles robots bípedos pertenecen a la corriente tradicional nacida del control mediante la cinemática inversa; como ASIMO de Honda o NAO de Aldebaran Robotics. La mayoría de los robots con este enfoque utilizan servomotores para las articulaciones y el método de *Zero Moment Point* (ZMP) para la caminata; esto resulta en la icónica imagen del robot caminando lentamente, con movimientos precisos y poco fluidos. En consecuencia, existe permanente investigación para mejorar el ZMP, por ejemplo mediante la aplicación de nuevos métodos de control (Oza, Orlov, Spurgeon, Aoustin y Chevallereau, 2014), o añadiendo consideraciones de la dinámica a este (Li, Su, Liu, Hu y Chen, 2012); reducir los efectos indeseados, como la vibración al aumentar la velocidad de caminata (Kajita, Asano, Morisawa, Miura, Kaneko, Kanehiro y Yokoi, 2013); o directamente buscar alternativas al ZMP, como el método de control propuesto en (Braun, Mitchell y Goldfarb, 2012).

Los robots pasivos constituyen un grupo mucho más heterogeneo, con distintos tipos de actuadores y esquemas de control. Como ejemplo: Pneumat-BB posee músculos artificiales neumáticos y pies articulados (Narioka, Homma y Hosoda, 2012); VERONICA utiliza un actuador con resortes llamado MACCEPA (Huang, Vanderborght, Van Ham, Wang, Van Damme, Xie y Lefeber, 2013); actuadores que combinan poleas y resortes son utilizados en el BiMASC (Hurst, Chestnutt y Rizzi, 2007); y ATRIAS desecha la idea de emular el caminar humano con un diseño que concentra casi todo su peso en el tronco y delgadas piernas de tijeras acabadas en pies puntuales (Renjewski, Sprowitz, Peekema, Jones y Hurst, 2015). Sin embargo, todos se encuentran en una etapa de confinamiento y pruebas de laboratorio, en proceso de desarrollar sistemas lo suficientemente robustos para pasar al siguiente estadio de desarrollo.

Cada una de estas dos ramas está desarrollando aquellas características que la otra posee;

pues mientras aquellos robots de enfoque pasivo avanzan hacia la robustez y confiabilidad que posee el enfoque más tradicional; este último se enfoca en desarrollar caminatas más humanas y energeticamente eficientes, características intrínsecas de los sistemas que integran la dinámica de caminata natural en su diseño.

Como pareciera que la solución es un punto medio entre cada enfoque, o bien, un balance en la combinación de ambos. En este sentido, existen trabajos que apuntan a incorporar la dinámica al sistema de control (Omer, Ghorbani, Lim y Takanishi, 2009), o añadir mecánicamente elementos pasivos (Abe, Suga y Fujimoto, 2012) para dotar de fluidez al movimiento. Un ejemplo sólido de esta hibridación es el robot PROXI de SRI robotics, presentado en el DARPA Robotics Challenge de 2015. Este robot posee tobillos con resortes para reducir la pérdidas de energía por el impactos entre pies y suelo, balancea su tronco de manera fluida en cada paso y esta completamente actuado con motores eléctricos provistos de reducciones.

2.3. Actuador por Torsión de Cuerdas (TSA)

El usar cuerdas para transmitir fuerzas no posee nada de nuevo, al contrario, la polea es una de las máquinas simples de Arquímedes. Sin embargo, otro modo menos común de transmitir fuerzas con cuerdas, pero igualmente antiguo, es el de torcerlas. Si se tuerce un par de fibras en un extremo estas comienzan a formar un espiral, transmitiendo la torsión hacia el otro extremo y a la vez reduciendo el largo del conjunto. Con este mecanismo se puede almacenar energía mecánica en la torsión, como en el caso de algunas catapultas antiguas; o generar una fuerza longitudinal, como en un torniquete.

2.3.1. Principio de Funcionamiento

Al aplicar torque a un haz de cuerdas se puede separar la fuerza ejercida en dos componentes resultantes, aquella que propaga la torsión y aquella que resulta en la contracción de la cuerda; es decir, una parte del torque ejercido se propaga a lo largo de la cuerda y la otra parte se transmite longitudinalmente, desde un extremo a otro. La Figura 2.1 muestra un diagrama explicativo de este principio.

El actuador utilizado considera: un motor eléctrico en un extremo, como fuente de torsión; un destorcedor para acotar la zona del espiral y absorber el torque; y una fijación para enlazar el otro extremo de la cuerda.

Este mecanismo posee una gran tasa de reducción, la que va disminuyendo con cada vuelta. De la misma forma, el paso con el que se acorta la cuerda se reduce. En consecuencia, este sistema es altamente no-lineal, lo que representa una de las mayores complicaciones para su uso.

Otra característica que puede ser considerada desventajosa es el hecho de que la fuerza longitudinal solo puede ejercerse en un sentido; es decir, estos actuadores pueden tirar, pero no empujar. Para contrarrestar esto, se requiere una acción de agonista-antagonista, esta

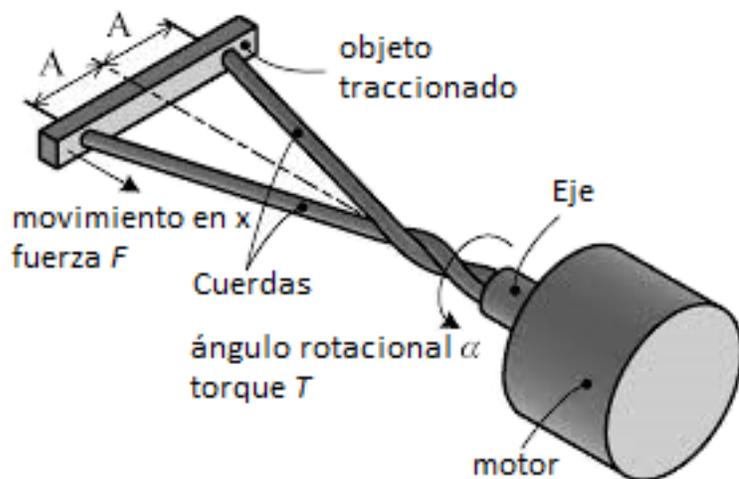


Figura 2.1: Diagrama explicativo del principio de los TSAs (Sonoda y Godler, 2010).

idea consiste en acoplar dos actuadores en sentido opuestos; también se puede reemplazar uno de estos por resorte u otro tipo de actuador. En este esquema, cuando se desea generar un torque sobre la articulación, solo uno de los actuadores contribuye, el agonista; mientras que la acción del otro se opone, el antagonista. Asimismo, para generar un esfuerzo en sentido contrario, los actuadores invierten roles.

Este tipo de comportamiento es propio del sistema musculo esquelético, donde se tienen grupos de músculos con esta relación; por ejemplo, la pareja del bíceps y tríceps. Por lo que se puede clasificar estos actuadores como basados en músculos o tendones. Y hace sentido complementar la dinámica de caminata pasiva con actuadores parecidos a los que se observan en la naturaleza.

2.3.2. Antecedentes Académicos

A los actuadores por torsión de cuerdas se los conoce como TSAs (por su sigla del inglés Twisted Strings Actuators); su uso en robótica es bastante reciente. Las principales aplicaciones en el último tiempo han sido en brazos y manos mecánicas; debido a su bajo peso, la posibilidad de localizar los motores arbitrariamente y su bajo costo. Permitiendo la construcción de dispositivos de tamaño similar a la mano y brazo de una persona adulta; a un costo relativamente bajo comparado con el uso de servomotores.

Una de las primeras aplicaciones con TSAs consiste en un hexápodo, que utiliza resortes como antagonista de los actuadores (Suzuki e Ichikawa, 2005). Para superar la no-linealidad del actuador utilizan una ley de control optimizada con técnicas de aprendizaje. A continuación, en (Suzuki, Mayahara e Ishizaka, 2007) se presenta un brazo robótico con mano, posee actuación en el hombro, codo y 4 dedos. Cabe destacar el creativo uso de los actuadores para generar una articulación esférica de 3 grados de libertad para el hombro. Nuevamente se evita trabajar directamente con la no-linealidad de los actuadores a través del uso de *vibrant PSO* en tiempo real para controlar y coordinar los actuadores.

De manera simultánea se desarrollan dos manos robóticas utilizando TSAs (Sonoda y Godler, 2010; Godler y Sonoda, 2011; Wurtz, May, Holz, Natale, Palli y Melchiorri, 2010; Palli, Natale, May, Melchiorri y Wurtz, 2013). En un trabajo se utilizan resortes a modo de antagonistas en los dedos; se realiza un modelamiento de los actuadores con dos cuerdas; se controla posición (Sonoda y Godler, 2010) o fuerza (Godler y Sonoda, 2011) utilizando un esquema de controladores P-PI en cascada. Además, validan sus modelos, experimentan con lubricar las cuerdas, realizan un estudio de la dinámica del control de fuerza, analizan como varía la rigidez de sus articulaciones y evalúan la eficiencia energética del sistema.

A diferencia del anterior, en el segundo trabajo se utilizan pares de TSAs en configuración agonista-antagonista y un control por *sliding-Manifold*. También realizan un modelo del actuador y una validación de este, pero considerando múltiples fibras en la cuerda y elasticidad (Wurtz, May, Holz, Natale, Palli y Melchiorri, 2010). Además, hacen pruebas de durabilidad utilizando distintos materiales y comparan su controlador a un PID (Palli, Natale, May, Melchiorri y Wurtz, 2013).

Ambos trabajos coinciden en las ventajas de tamaño y peso reducido, bajo costo y simpleza mecánica. Además, logran controlar satisfactoriamente los actuadores. Sin embargo, los buenos resultados en los modelos utilizados no son perfectos; y aún considerando la elasticidad no se hacen cargo de todas las no-linealidades del sistema; por lo que persiste un gran trabajo por ser desarrollado.

Recientemente, un equipo ha aplicado los TSAs a un exoesqueleto de codo (Popov, Gaponov y Ryu, 2013). Aquí utilizan una configuración agonista-antagonista y control prealimentado. Más significativo todavía es el completo estudio que realizan de los actuadores (Gaponov, Popov y Ryu, 2014). Agregan a los modelos anteriores la variación de radio del haz de cuerdas, el cual aumenta a medida que se tuerce la cuerda; lo validan comparativamente, obteniendo un mejor ajuste a los datos. Además, estudian la respuesta de distintos materiales para las cuerdas; el deterioro de estas y su efecto en el comportamiento; la eficiencia de los actuadores; y finalmente, desarrollan y prueban un método para preparar las cuerdas mediante un pre-tensado; obteniendo un comportamiento regular desde el comienzo de la vida útil de las cuerdas, sin este método el comportamiento se regulariza después de un cierto uso.

2.3.3. Modelamiento del actuador

En su tesis, Vallejos no solo propuso el uso de TSAs para las articulaciones, si no que además modeló su comportamiento (Vallejos, 2011). A continuación se hace un resumen del modelamiento expuesto en ese trabajo.

El actuador se modela a partir de la cinemática, se asumen cuerdas inextensibles y se descartan los efectos del roce entre ellas. Se considera el enrollado de dos cuerdas una sobre otra, formando una espiral de doble hélice regular; con el eje del motor a un extremo y al otro un destorcedor, separados una distancia fija s .

Por comportamiento, se distinguen tres zonas de las cuerdas: la parte adyacente al eje del motor, se le asigna el largo s_1 ; el enrollado en si, de largo s_2 ; y el extremo del destorcedor,

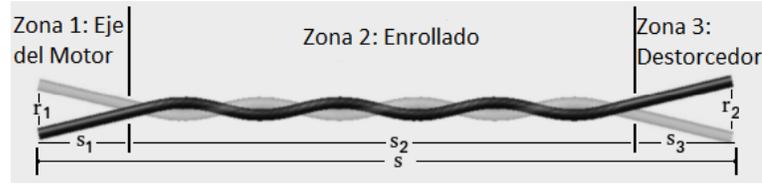


Figura 2.2: Detalle de la cuerda torcida y las tres distintas zonas.

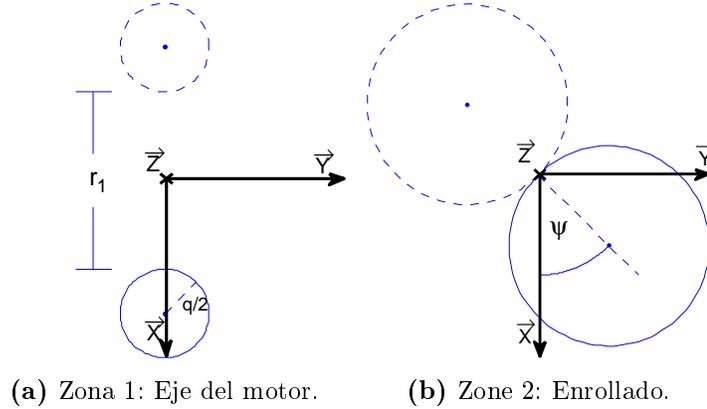


Figura 2.3: Vista de las cuerdas en el plano transversal.

largo s_3 . En las zonas de los extremos, cada cuerda describe una línea recta separándose desde el centro del enrollado o acercándose a este, según sea el caso; esto es consecuencia del ancho de la toma en el eje, denotada r_1 y el ancho de la barra del destorcedor, expresada como r_2 .

En la Figura 2.2 se puede observar un diagrama del par de cuerdas enrolladas, así como la distinción entre las zonas de la cuerda y los parámetros s, s_1, s_2, s_3, r_1 y r_2 . Por definición la suma de los largos de las tres zonas corresponden a s , esto se puede apreciar en la figura y se expresa en la ecuación (2.1).

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (2.1)$$

Las cuerdas presentan una simetría axial, por lo que basta describir una de ellas mediante ecuaciones. En adición se asume que el enrollado posee un diámetro constante q , medido entre los centros de las cuerdas. Es necesario definir el sistema de referencia para poder expresar las ecuaciones del modelo: el eje del espiral corresponde a \vec{z} ; \vec{x} está definido en la dirección que se separan las cuerdas en eje del motor; y el restante \vec{y} se define perpendicular a ambos. En la Figura 2.3 se presenta un diagrama de las cuerdas vistas en el plano transversal para aclarar la definición de los ejes. El ángulo ψ se utiliza para denotar la posición de la cuerda en el plano $x - y$ a lo largo del espiral.

Las Ecs. (2.2) y (2.3) expresan la disposición en la zona cercana al eje del motor; mientras que la zona del enrollado esta representada por las Ecs. (2.4), (2.5) y (2.6); finalmente, las Ecs. (2.7) y (2.8) describen la cuerda en la zona adyacente al destorcedor. Los valores de las

constantes a_1 , a_2 , b_1 y b_2 se obtienen de las condiciones de borde entra la zona lineal y la del enrollado; al imponer continuidad de las funciones y sus derivadas.

$$x_1(z) = \frac{a_1}{s_1} \cdot z + r_1 \quad (2.2)$$

$$y_1(z) = \frac{a_2}{s_1} \cdot z \quad (2.3)$$

$$\psi(z) = \frac{b_1}{s_2} \cdot (z - s_1) + b_2 \quad (2.4)$$

$$x_2(z) = \frac{q}{2} \cdot \cos(\psi(z)) \quad (2.5)$$

$$y_2(z) = \frac{q}{2} \cdot \sin(\psi(z)) \quad (2.6)$$

$$x_3(z) = \frac{c_1}{s_3} \cdot (z - s_1 - s_2) + x_2(s_1 + s_2) \quad (2.7)$$

$$y_3(z) = \frac{c_2}{s_3} \cdot (z - s_1 - s_2) + y_2(s_1 + s_2) \quad (2.8)$$

Es necesario traducir a ecuaciones dos situaciones más para completar el sistema de ecuaciones. La primera, consiste en que el giro del motor, θ , se distribuye a lo largo de la cuerda en s ; por lo que en el extremo opuesto al eje de coordenadas la rotación de las cuerdas debe ser igual a θ ; esto esta expresado en la Ec. (2.9). La segunda, es el hecho de que la cuerda al extremo del destorcedor describe una circunferencia de radio $r_2/2$, ver Ec. (2.10).

$$\psi(s_1 + s_2) + \arctan\left(\frac{y_3(s) - y_3(s_1 + s_2)}{x_3(s) - x_3(s_1 + s_2)}\right) = \theta \quad (2.9)$$

$$x_3(s)^2 + y_3(s)^2 = \left(\frac{r_2}{2}\right)^2 \quad (2.10)$$

Se busca obtener una expresión de la cantidad de cuerda entre el eje del motor y el destorcedor, l_r , en función de la cantidad de vueltas del motor; es decir, se busca $l_r(\theta) = f(\theta)$. Para calcular l_r basta con integrar la función del largo de la cuerda en todo el segmento de largo s ; separando la integral según (2.1) y reemplazando las constantes, la función se expresa en la Ec. (2.11).

$$\begin{aligned}
l_r &= \int_0^{s_1} \left(\sqrt{\left(\frac{dx_1(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy_1(z)}{dz}\right)^2 + 1} \right) dz \\
&+ \int_{s_1}^{s_1+s_2} \left(\sqrt{\left(\frac{dx_2(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy_2(z)}{dz}\right)^2 + 1} \right) dz \\
&+ \int_{s_1+s_2}^s \left(\sqrt{\left(\frac{dx_3(z)}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy_3(z)}{dz}\right)^2 + 1} \right) dz \\
&= \sqrt{\frac{q^2}{16} \cdot \theta^2 + \left(K_1 + \frac{q^2}{32}\right) \cdot \theta + K_2}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned}
\text{Donde: } K_1 &= \frac{q^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi}{8} + v_1 + \frac{2}{q}v_2\right) \\
K_2 &= r_1^2 + r_2^2 + s^2 + v_3 + \frac{K_1}{2} \\
\text{con } v_1 &= \operatorname{arcsec}\left(\frac{2r_1}{q}\right) \\
v_2 &= \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{q}{2}\right)^2} + \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{q}{2}\right)^2} \\
v_3 &= \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{q}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{q}{2}\right)^2}
\end{aligned}$$

Las cuerdas poseen un largo fijo que se denomina l_0 . Una parte de la cuerda va más allá del destorcedor, hasta una fijación, este largo se denota como l_{ef} . Entonces se puede utilizar la Ec. (2.12) para calcular el valor de l_{ef} .

$$l_{\text{ef}} = l_0 - l_r \tag{2.12}$$

El supuesto de s constante no siempre es válido, cuando no existe un destorcedor, s se extiende desde el eje del motor hasta las fijaciones en la articulación. Como resultado, la cantidad de cuerda en la espiral es igual al largo de la cuerda; es decir, $l_r = l_0$ y $l_{\text{ef}} = s$. Entonces, en caso de que no exista un destorcedor, la expresión para $l_{\text{ef}}(\theta)$ corresponde a la Ec. (2.13).

$$l_{\text{ef}} = \sqrt{l_0^2 - \frac{q^2}{16} \cdot \theta^2 - \left(K_1 + \frac{q^2}{32}\right) \cdot \theta - K_3} \tag{2.13}$$

$$\text{Donde: } K_3 = r_1^2 + r_2^2 + v_3 + \frac{K_1}{2}$$

La elasticidad se puede añadir en este punto al modelo siguiendo lo propuesto en (Palli, Natale, May, Melchiorri y Wurtz, 2013). El supuesto es que las cuerdas se comportan como

resortes lineales de constante elástica K solo capaces de estirarse, no comprimirse. En consecuencia, una fuerza F_z en \vec{z} provoca la elongación de la cuerda. Luego, basta con considerar el estiramiento de la cuerda ajustando su largo máximo; de esta manera se reemplaza la ec. (2.12) por (2.14), y para la cadera es la Ec. (2.15).

$$l_{\text{ef}} = l_0 \cdot \left(1 + \frac{F_z}{K}\right) - l_r \quad (2.14)$$

$$l_{\text{ef}} = \sqrt{l_0^2 \cdot \left(1 + \frac{F_z}{K}\right) - \frac{q^2}{16} \cdot \theta^2 - \left(K_1 + \frac{q^2}{32}\right) \cdot \theta - K_3} \quad (2.15)$$

Por otro lado, tomar en cuenta la variación en el diámetro del enrollado, q , es propuesto en (Gaponov, Popov y Ryu, 2014). La idea es tratar el enrollado como un cilindro de volumen constante, de manera que el radio debe compensar por cambios en l_{ef} . La Ec. (2.16) se obtiene de la razón entre la expresión de volumen en el instante i y el volumen inicial.

$$q_i = q \cdot \sqrt{1 + \frac{l_{\text{ef}}^i}{s}} \quad (2.16)$$

La expresión es levemente distinta a la presentada en el estudio, esto se debe a que el modelo que utiliza no involucra un destorcedor. Su supuesto era que el enrollado se extiende hasta el extremo de la cuerda fijo al punto donde se ejerce la acción; es decir, $l_0 = l_r$ y s variable, en contraste con el modelo con s fijo ya expuesto. Además, se debe tener en cuenta que utilizar la Ec. (2.16) requiere resolver una dependencia mutua entre l_{ef} y q_i ; tarea que necesita aplicar algún método de cálculo numérico iterativo.

2.4. Herramientas Utilizadas

En esta sección se abordan dos temas: el método de sintonización de controladores PID de Ziegler-Nichols; y el esquema de programación para robots ROS. Se utilizó el método de la ganancia crítica para sintonizar los controladores PID del esquema de control; una explicación del método se considera necesario por completitud. Por otra parte, ROS es utilizado en la programación de las interfaces con el robot, por lo que una idea clara de lo que son nodos, tópicos y servicios es necesaria para comprender el funcionamiento de los programas implementados.

2.4.1. Método de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID en base a la ganancia crítica

La siguiente explicación es un resumen del método presentado en el Capítulo 8 de (Ogata, 2003). Entonces, en caso de necesitar información más completa se recomienda consultar el

libro, que esta dedicado a abordar en profundidad las técnicas de control.

Para aplicar el método se requiere una planta con un lazo de control retroalimentado. La salida de este sistema debe poder hacerse oscilar de manera sostenida con un controlador proporcional. Se tiene el controlador de la Ec. (2.17) definido por los parámetros K_p , T_i y T_d .

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.17)$$

Se fijan los parámetros $T_i = \infty$ y $T_d = 0$; de manera que se tiene un controlador proporcional. Luego, se aumenta K_p desde 0 hasta un valor crítico denotado K_{cr} . El valor crítico se identifica por la presencia de oscilaciones sostenidas en la salida de la planta; es decir, el sistema no diverge, pero tampoco converge, sino que está en un punto medio.

Se debe medir el periodo de la señal de salida del sistema, P_{cr} . A continuación, con los valores de K_{cr} y P_{cr} se definen los parámetros del controlador según la Tabla 2.1

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 \cdot K_{cr}$	0	0
PI	$0,45 \cdot K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6 \cdot K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

Tabla 2.1: Sintonización de controladores en base a la ganancia K_{cr} y el periodo P_{cr} .

En caso de considerar que la respuesta no es satisfactoria, se recomienda ajustar manualmente las ganancias del controlador. Este método es una forma simple de obtener un controlador adecuado para una planta; no se debe olvidar que es una regla empírica por lo que más que una calibración final, constituye una buena forma de realizar un primer acercamiento.

2.4.2. ROS: *Robot Operative System*

ROS es un conjunto de librerías, herramientas y paradigmas de programación; enfocadas a simplificar la creación de plataformas robóticas robustas. Su paradigma facilita la versatilidad e integración del sistema; gracias a una manera de programación modular, donde todas las acciones se coordinan a través del núcleo ROS.

Los nodos, son programas individuales, con una tarea específica, por ejemplo: un nodo maneja el puerto serial para comunicarse con la electrónica, otro procesa la información de los sensores y un tercero planifica la trayectoria. De esta forma, si se desea cambiar el sensor utilizado en un robot, solo es necesario modificar el nodo correspondiente; mientras el resto de las funcionalidades permanece intacta. Si los nodos necesitan traspasarse información, ROS provee dos formas de hacerlo, el tópico o el servicio.

En un tópico hay nodos publicadores y otros subscriptores; la información fluye exclusivamente desde los publicadores a subscriptores. Cada tópico posee un nombre que lo identifica

y una estructura de mensaje. Si un nodo publica un mensaje en un tópico, todos los nodos que están suscritos a este reciben un paquete de información idéntico y con la estructura ya conocida. No hay confirmación de recepción del mensaje. El enfoque de los tópicos es un traspaso de información rápido y de flujo constante.

En cambio, un servicio significa un traspaso bidireccional de información. Existe un nodo que ofrece el servicio, con un nombre y una estructura; esta última tiene dos partes, la primera corresponde a la información requerida por el servicio y la segunda a los datos retornados. Cualquier nodo puede llamar al servicio, para ello debe suministrar el tipo de información requerida y esperar a recibir la respuesta. En consecuencia, este es un método de comunicación uno a uno, donde a demás se detiene el flujo del programa hasta recibir una respuesta. El nodo que oferta el servicio atiende a las llamadas de a una, por lo que la comunicación no es tan veloz como en el tópico.

Capítulo 3

Diseño preliminar del Robot

En este capítulo se presenta el diseño original del robot. Se expone la mecánica en su estado previo al desarrollo de este trabajo. De manera similar, se abordan los elementos electrónicos definidos con anterioridad. Las modificaciones y cambios hechos se encuentran en el capítulo 4; estos responden a hechos específicos y la implementación final no se alejan mucho de lo aquí expuesto.

3.1. Diseño Mecánico

Una característica de este robot es el uso TSAs, estos utilizan un motor eléctrico que tuerce una cuerda. Para el acople entre el eje del motor y la cuerda se utiliza una pieza fijada por un perno prisionero al eje del motor y a la cuerda mediante un pasador, ubicado en el extremo opuesto. Un rodamiento axial y otro radial hacen de interfaz entre esta pieza y la estructura que la soporta; la pieza posee un engrosamiento radial donde se apoya el rodamiento axial. En la Figura 3.1 se puede ver la vista explosionada del sistema descrito.

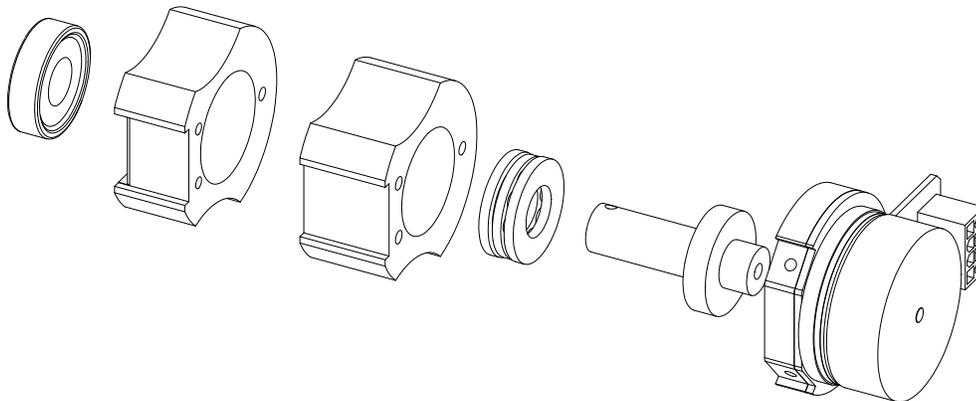


Figura 3.1: Diseño de la transmisión del Motor a la Cuerda.

3.1.1. Articulaciones

Como se espera de un bipedo, este robot posee dos piernas, cada una con tres articulaciones diferentes: rodilla, con un grado de libertad; tobillo y cadera, ambas últimas con dos grados de libertad. En total el robot posee diez grados de libertad, lo que se traduce en veinte motores y cuerdas, debido al esquema agonista-antagonista utilizado.

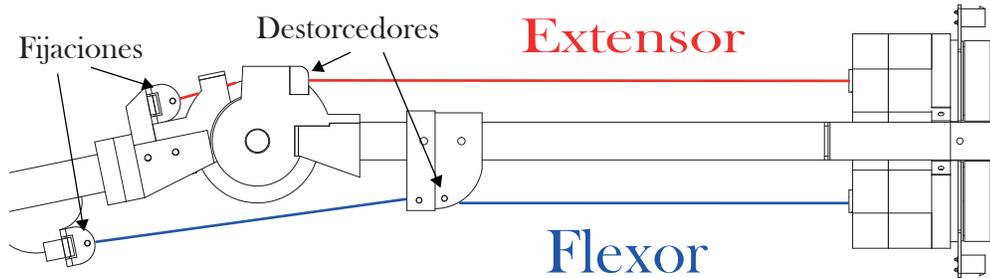


Figura 3.2: Diseño de la articulación de las Rodillas.

La rodilla es la más simple de las articulaciones, pues solo consiste en un grado de libertad. Por lo tanto, posee solo dos motores, los que están ubicados en la parte superior del muslo del robot; uno en la parte frontal y otro en la posterior. Las cuerdas se extienden desde un motor hasta una fijación en el segmento inferior de la pierna, pasando por un destorcedor; la espira en la cuerda se forma en este tramo desde el motor hasta el destorcedor.

Para diferenciar entre ambos actuadores, se los denota por el movimiento que ejecutan al recoger la cuerda. En consecuencia, se llama Extensor al actuador que está en la parte frontal de la pierna y Flexor al de la parte posterior. En la Figura 3.2 se ilustra la articulación y ambos actuadores.

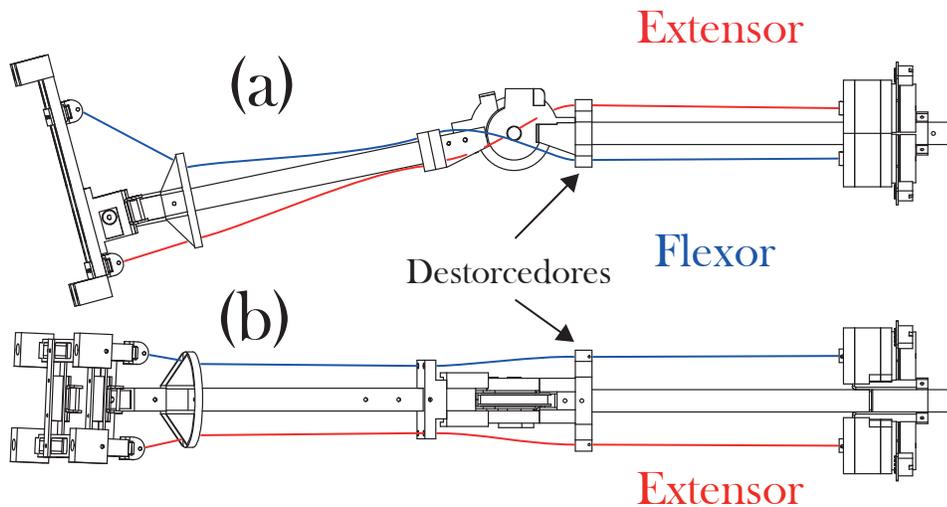
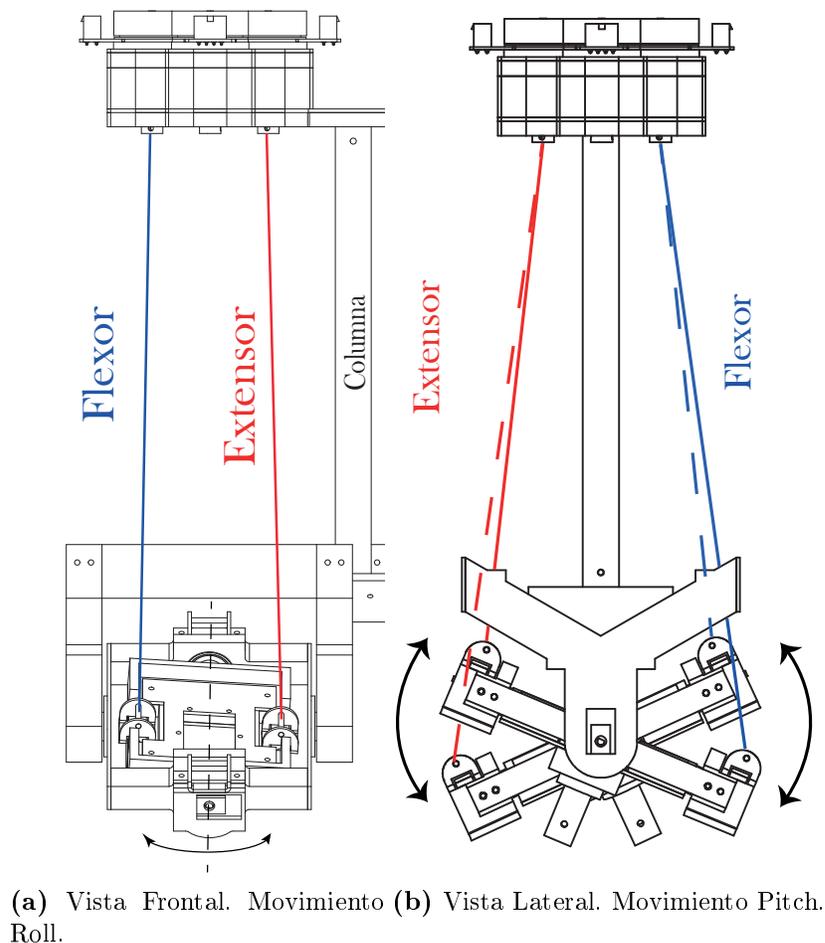


Figura 3.3: Actuación de la articulación del tobillo. (a) corresponde a una vista lateral que detalla el movimiento Pitch y (b) a una frontal para el Roll.

La articulación del tobillo está compuesta por dos grados de libertad, Pitch y Roll. Por esto, posee cuatro motores posicionados en la parte superior del muslo, dos en el lado interno y dos en el externo. Los destorcedores están situados justo sobre la rodilla, haciendo que tenga un segmento similar al de la rodilla para enrollar la cuerda. Desde los destorcedores hasta el tobillo las cuerdas van dentro de tubos, de manera similar al sistema de frenos de una bicicleta.

El movimiento Pitch es el que mueve hacia arriba y abajo la punta del pie y el talón; Roll en cambio mueve los costados del pie. Al ser simétricos ambos movimientos, los nombres de Extensor y Flexor se asignan arbitrariamente. En la Figura 3.3 se ilustran por separado los actuadores para cada grado de libertad; la vista lateral (a) se corresponde con Pitch y la vista frontal (b) con Roll. En ambos movimientos uno de los actuadores está a cada lado, como se aprecia claramente en (b).



(a) Vista Frontal. Movimiento Roll. (b) Vista Lateral. Movimiento Pitch.

Figura 3.4: Actuación de cadera y sus dos grados de libertad.

La articulación de la cadera, al igual que el tobillo posee dos grados de libertad simétricos. Sin embargo, a diferencia de ambas articulaciones anteriores, esta no posee destorcedores; por lo tanto, la cuerda se tuerce desde el acople al motor hasta su fijación. Los motores están localizados en los hombros del robot, aproximadamente cuarenta centímetros sobre los ejes de la cadera; y, están soportados por una columna rígida, que se una a la pieza central entre

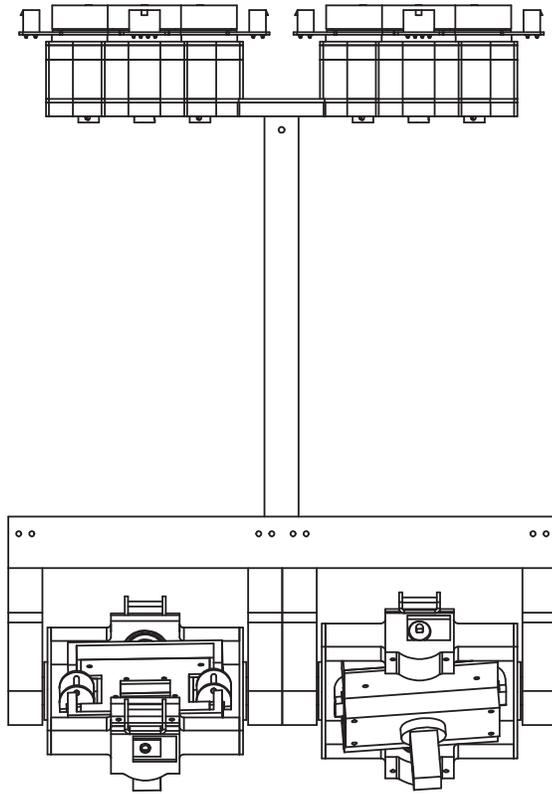


Figura 3.5: Vista frontal del tronco del robot.

ambas caderas.

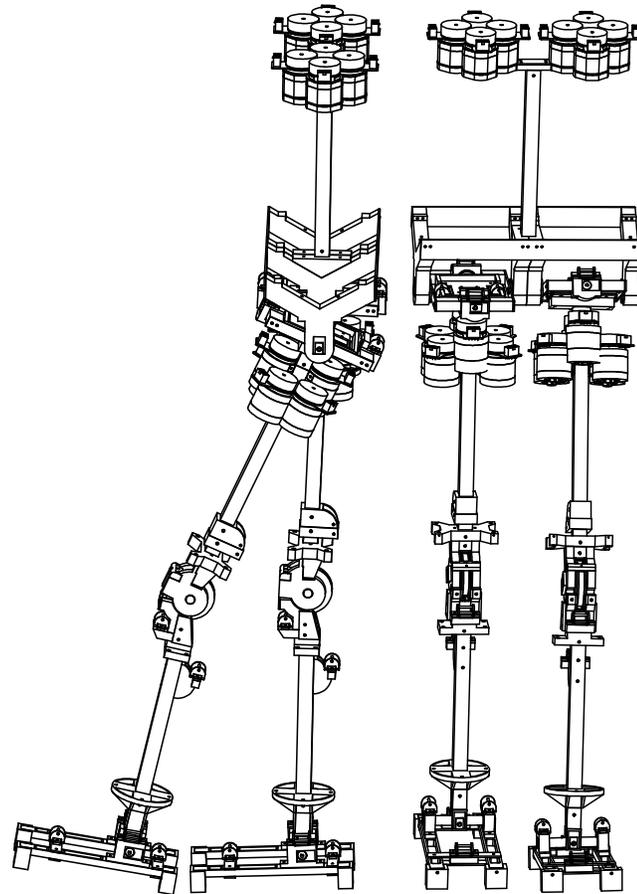
La cadera está compuesta por dos piezas: un anillo, que se acopla al tronco del robot; y una pieza central, que se une a través de un eje al anillo y se acopla rígidamente con el muslo. El movimiento de Pitch es realizado sobre el eje de movimiento del anillo; en cambio, para el Roll se mueve el bloque central que está sostenido al anillo a través de un eje.

En la Figura 3.4 se pueden ver diagramas de cada movimiento y la posición de las cuerdas. Debido a la simetría, en este caso la denominación de un actuador como Flexor o Extensor es arbitraria.

Una vista frontal del tronco del robot, donde se pueden ver ambas caderas se presenta en la Figura 3.5. La columna corresponde a la barra central que une la parte fija de las caderas con los bloques de motores de la parte superior.

3.1.2. Montaje Completo

De los resultados de (Vallejos, 2011) se desprenden dos importantes condiciones para el diseño del robot: (I)más de la mitad de la masa del robot debe estar en el tronco, y (II) el segmento superior de la pierna debe pesar entre tres y cuatro veces más que el segmento inferior. Basado en estos principios y aplicando los actuadores por torsión de cuerdas a las articulaciones ya expuestas, se obtuvo el diseño expuesto en la Figura 3.6. El robot



(a) Vista lateral del modelo méca-
nico del robot

(b) Vista frontal del
diseño completo

Figura 3.6: Esquema del ensamblaje completo del robot.

completamente ensamblado y erguido mide aproximadamente 1,25[m] de altura.

Las capacidades pasivas de este modelo están probadas mediante simulaciones en (Vallejos, 2011). Estas simulaciones desprecian los movimientos laterales del robot; esto hace que el sistema de control sea una necesidad para obtener la estabilidad completa en la caminata del robot.

3.2. Elementos Eléctricos

Para implementar un control sobre este robot son necesarios sensores, controladores y actuadores. Cada una de estas funciones existe una tarjeta de circuitos diseñada para desempeñar la función, tarjeta de sensores, de motores y *mini-brain*; en esta última se realiza el procesamiento, las comunicaciones y se coordina la articulación. Debido a que el robot completo agrupa diez grados de libertad la electrónica está diseñada de manera modular, por grado de libertad, o bien, agrupando dos grados en una articulación. Consecuentemente, el robot contempla cinco tarjetas de sensores, cinco *mini-brain* y diez tarjetas de motores; ambas

rodillas se agrupan como una sola articulación, ya que solo poseen un grado de libertad.

La tarjeta de sensores posee un micro-controlador PIC18LF4550 que recoge la información de los sensores de presión y los encoders de la articulación, las digitaliza y se las comunica al *mini-brain* a través de un puerto serial. La tarjeta de motores incluye los sensores de corriente y la electrónica necesaria para manejar los motores; esta se conecta al *mini-brain* a través de un cable plano. El *mini-brain* se encarga de leer constantemente el puerto serial con los datos de los sensores, digitaliza las señales de los sensores de corriente, realiza el procesamiento de los controladores y considera un puerto serial para comunicación a nivel de *mini-brain*.

3.2.1. Sensores

El diseño del robot considera sensores en cada articulación para medir las variables de: corriente en cada motor, tensión en cada cuerda, posición de la articulación y velocidad de esta. Independiente de que se este monitoreando el principio es el mismo. Se utiliza un elemento resistivo como transductor, se acondiciona la señal y finalmente es digitalizada por el ADC de uno de los microprocesadores de la articulación.

Para medir la corriente se utiliza un resistencia en esquema Shunt sobre la línea de alimentación del motor. Esta resistencia posee un valor de $0.001 \text{ } [\Omega]$; la diferencia de voltaje entre ambos extremos es amplificada 50 veces mediante un amplificador operacional y a continuación se le aplica un filtro con una frecuencia de corte de 100 [Hz] aproximadamente; finalmente, el procesador de la articulación digitaliza la señal. Este circuito se encuentra integrado en la tarjeta de control de motores.

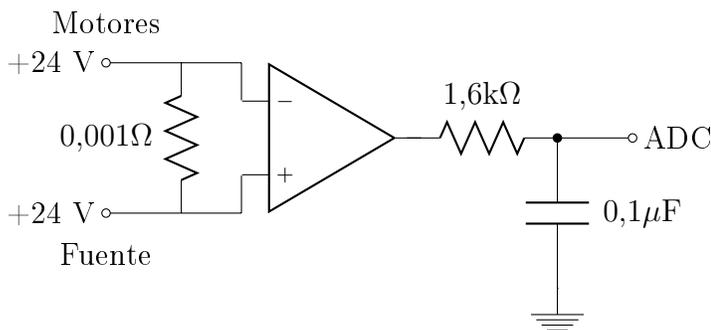


Figura 3.7: Circuito de medición de corriente.

En la Figura 3.7 se muestra un esquema del circuito del sensor. Se elije una resistencia de valor pequeño en la línea de alimentación para minimizar la variación de voltaje en la alimentación del motor. Debido al valor de la resistencia, una variación de corriente de 1 [A] genera una diferencia de $0,1 \text{ [mV]}$, lo cual está por debajo de la resolución del procesador; al añadir el amplificador operacional la señal varía 5 [mV] por 1 [A] , magnitud registrada por el procesador. Por último, el filtro pasivo se añade para eliminar el ruido que se presenta al utilizar señales PWM como acción de control en los motores.

La tensión de la cuerda se mide a través sensores de presión resistivos en cada fijación. Además, se pide la presión en las esquinas de los pies del robot. El divisor de tensión utilizado

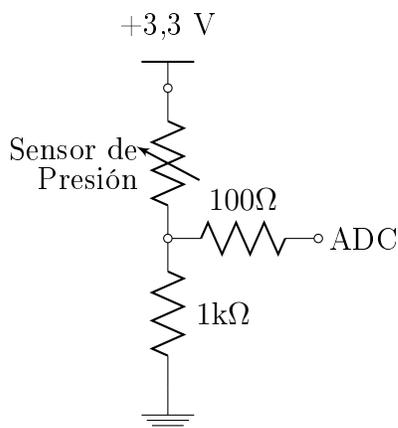


Figura 3.8: Divisor de Voltaje para sensores de Presión.

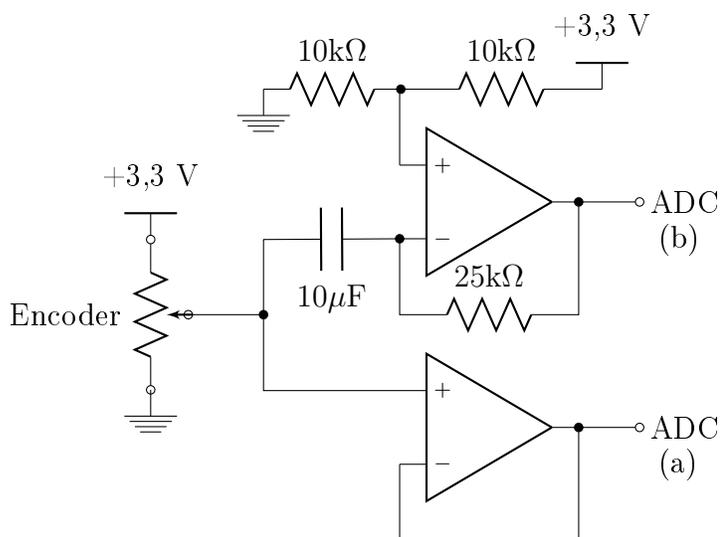


Figura 3.9: Circuito Acondicionador de Señales para el Encoder. (a) corresponde a la señal de posición y (b) a la de velocidad.

para escalar la señal se encuentra implementado en la tarjeta de sensores, por lo que se tienen ocho copias de este en cada tarjeta; pues en el tobillo se deben sentir las cuatro cuerdas y el pie. En la Figura 3.8 se muestra un diagrama del circuito y los valores de sus componentes.

La posición de la articulación y la velocidad a la que esta se mueve son variables relacionadas a través de una derivada; en consecuencia, se utiliza el mismo potenciómetro encoder para ambas. Este elemento se encuentra fijado mecánicamente al eje de la articulación; de esta manera, se tiene una señal eléctrica que representa la posición de la articulación. Para obtener la velocidad se aplica un circuito derivador a la señal del encoder; finalmente, ambas señales son digitalizadas en el correspondiente puerto del ADC.

Un diagrama del circuito se presenta en la Figura 3.9. Este circuito se encuentra implementado en duplicado en la tarjeta de sensores, para manejar de manera simultánea el Pitch y Roll de una articulación.

3.2.2. Actuación

Como elemento activo de los actuadores por torsión de cuerdas el diseño incorpora motores MAXON[®] 251601. Estos son de corriente continua sin escobillas; además, poseen sensores de efecto hall para determinar su posición. En la Tabla 3.1 se presentan las características de estos motores.

Tabla 3.1: Características técnicas de los Motores.

P_N	50[W]	$E_{f_{max}}$	83%
V_N	24[V]	ω_N	5260[rpm]
I_N	2,46[A]	T_N	84.3[mNm]
ω_c	285 $\frac{rpm}{V}$	T_c	33,5 $\frac{mNm}{A}$
n_{polos}	8	n_{fases}	3

Para alimentar estos motores se utiliza el driver NJM2624A. Este elemento conecta a tierra o Vcc cada una de las fases del motor, según el sentido deseado y la posición dada por los sensores hall. El circuito de alimentación de una fase se detalla en la Figura 3.10.

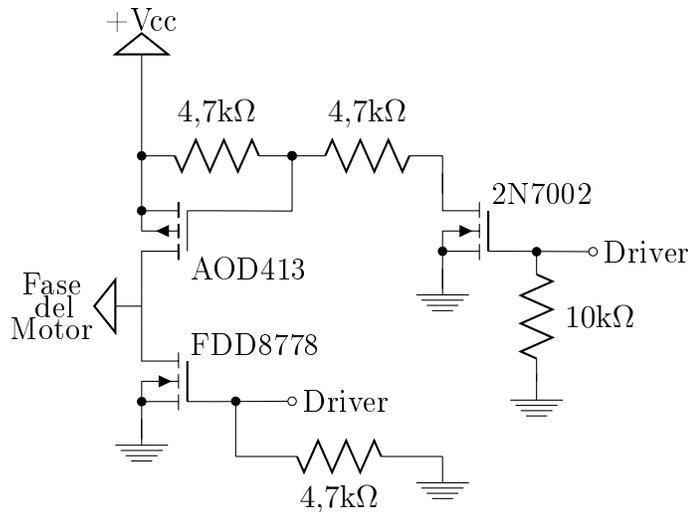


Figura 3.10: Circuito de activación de Motores.

Este circuito está construido en la tarjeta de control de motores, la que maneja dos motores simultáneamente; es decir, un grado de libertad. Consecuentemente, en la tarjeta hay seis circuitos como el de la Figura 3.10 y dos drivers, uno por cada motor.

3.2.3. Control y Comunicaciones

El control de cada articulación está contenido completamente dentro del *mini-brain*, el cual posee un procesador PIC24HJ256GP206. Aquí es donde se maneja la comunicación por puerto serial con la tarjeta de sensores, se procesan los datos y se emite la señal PWM de control a los motores. Además, posee un segundo puerto serial para comunicarse a mayor nivel y coordinar el funcionamiento de las distintas articulaciones, o bien transmitir datos.

Uno de estos *mini-brain* maneja hasta cuatro motores; al driver de cada motor va una señal PWM como enable y una señal lógica que denota el sentido de giro deseado. Además, dos sensores de efecto hall son monitoreadas desde el *mini-brain*; el objetivo de esto es tener información sobre el movimiento del motor y poder seguir la torsión de la cuerda.

Capítulo 4

Implementación

4.1. Diseño y Fabricación

Para la puesta en marcha del robot es necesario el re-diseño de algunas piezas, la adición de otras y el diseño de una placa de circuito impreso. Las piezas apuntan a mejorar dos aspectos específicos del robot, el montaje de las cuerdas y aumentar el soporte para los motores de la cadera. El circuito diseñado y luego fabricado como placa impresa tiene como función distribuir la energía desde una fuente central hacia los circuitos de cada articulación.

4.1.1. Piezas

Para aumentar la vida útil del motor se debe evitar que la cuerda ejerza tracción al eje del motor, por lo que se debe brindar un soporte a la pieza que sostenga la cuerda. En el diseño original, ver Figura 3.1, la transmisión de torque se hace mediante una única pieza. Esto tiene dos inconvenientes, una parte de la tracción de la cuerda se transmite al eje; y no pueden existir desalineamiento entre la cuerda y el motor, lo que requiere una gran precisión en la construcción de las piezas. Por esto, se decide cambiar el diseño del acople por un sistema con dos piezas que no estén unidas de forma rígida.

En la Figura 4.1 se pueden ver las dos piezas diseñadas para conectar el motor con la cuerda correspondiente. La pieza (a) se fija al eje del motor mediante un perno prisionero, esta pieza transmite el torque a la pieza (b), dejando libertad suficiente para mitigar problemas de alineamiento entre el eje del motor y de la cuerda. A su vez, la pieza (b) permite un enlace firme y simple con la cuerda a través del pasador en su extremo inferior; además transmite la tensión de la cuerda a las piezas de soporte. Se utiliza un rodamiento axial para mitigar el roce de esta pieza.

Ambas piezas son de aluminio con pasadores de acero. Se fabrican utilizando las máquinas y herramientas disponibles en el taller mecánico del departamento de ingeniería eléctrica.

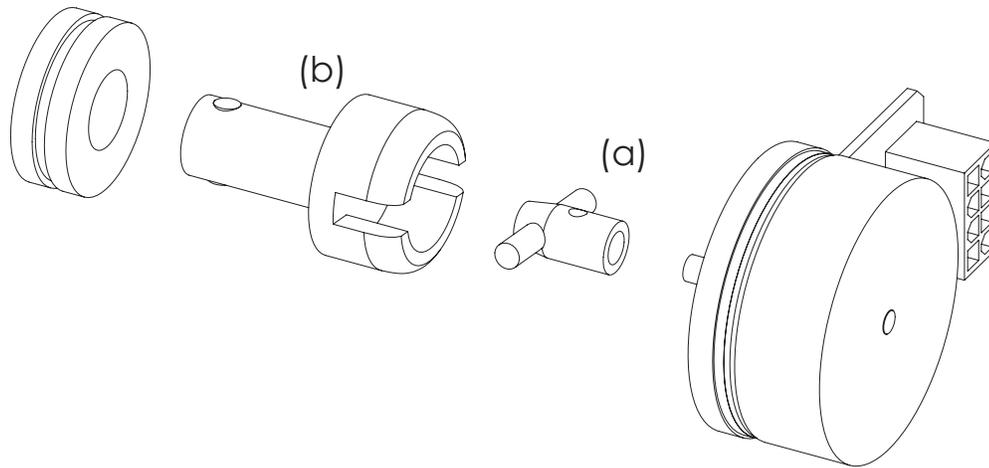


Figura 4.1: Vista explosionada de las piezas de transmisión, motor y rodamiento axial.

Las piezas de la nueva transmisión motor a cuerda son más grandes que el diseño original, por lo que es necesario adaptar las piezas que soportan las cuerdas y los motores en las articulaciones de la rodilla y tobillo. En el caso de la cadera, un reordenamiento de las piezas originales permite disponer del espacio requerido. Los soportes de los tendones de las piernas están completamente fijas en el muslo y no requieren soportar el mismo esfuerzo que la transmisión. Por lo que se fabrican en Technyl[®] debido a su resistencia y facilidad en el maquinado. A causa de la complejidad en la forma de las piezas y la precisión requerida se opta por técnicas de fabricación automatizada, por lo que utiliza la fresadora CNC disponible en el edificio de electrotecnologías del departamento de ingeniería eléctrica.

En la Figura 4.2a se puede ver un diagrama de las piezas correspondientes a la articulación de la rodilla. A la derecha en la Figura 4.2b se aprecian aquellas que dan soporte a las cuerdas del tobillo. Cada pierna necesita dos de cada pieza para montar los seis motores localizados en el muslo.

Como ya se vio, el parámetro s corresponde al largo de la sección de cuerda que se tuerce, y se mide desde el destorcedor hasta la toma de la cuerda al extremo del motor. Este parámetro se relaciona directamente con la contracción máxima que puede ejercer el actuador. La pieza de los destorcedores también se fabrica en Technyl[®] utilizando la fresadora CNC y barras de acero para separar las cuerdas. En la Figura 4.3 se presenta el cambio en efectuado en la estructura de la rodilla.

Al poner en marcha la articulación de la cadera se hace evidente la falta de rigidez en la estructura que soporta los actuadores. Por esto se añaden soportes laterales entre la estructura de la cadera y cada bloque de motores.

Para montar estas barras de apoyo lateral se requieren uniones con estructura del robot. En el extremo inferior, para unirla a la cadera, se usa una adaptación del empalme de la columna; en la Figura 4.4a se puede ver el diseño de esta pieza. Para la unión a la estructura de los motores se modifica una de las piezas que encapsulan el eje del motor y soportan la transmisión de la cuerda. Un modelo de la pieza que provee el apoyo de los motores puede observarse en la Figura 4.4b.

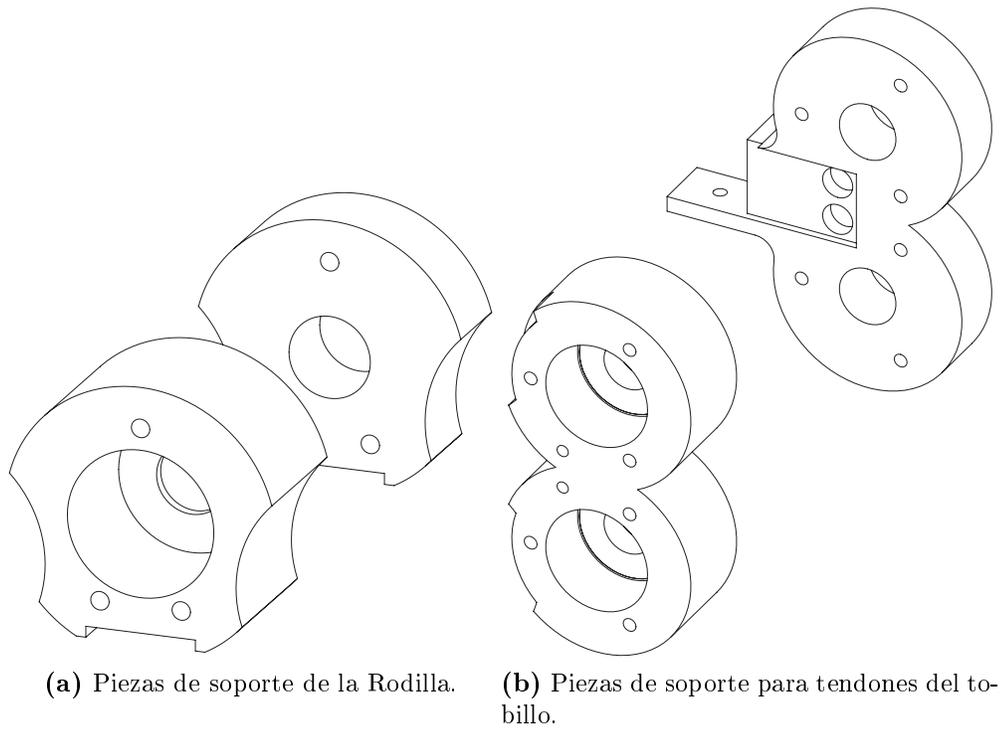


Figura 4.2: Piezas rediseñadas del muslo.

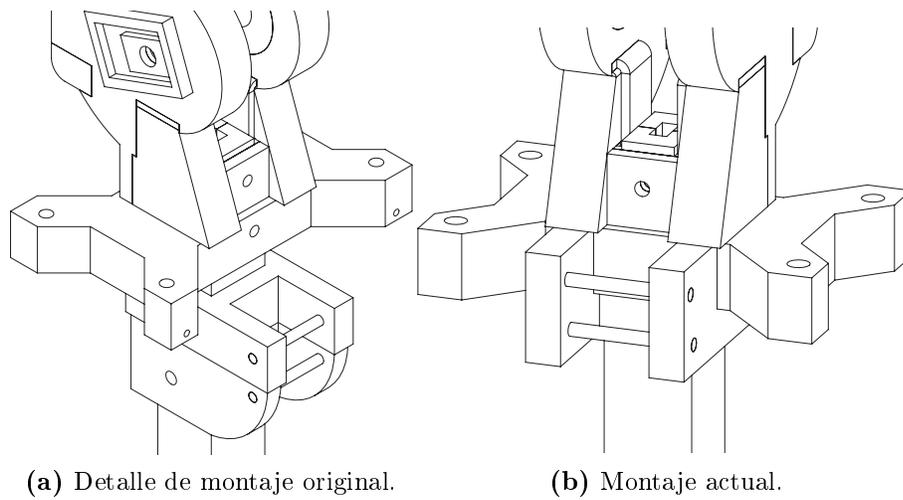


Figura 4.3: Las dos piezas de destorcedores en (a) se combinan en una única pieza en (b).

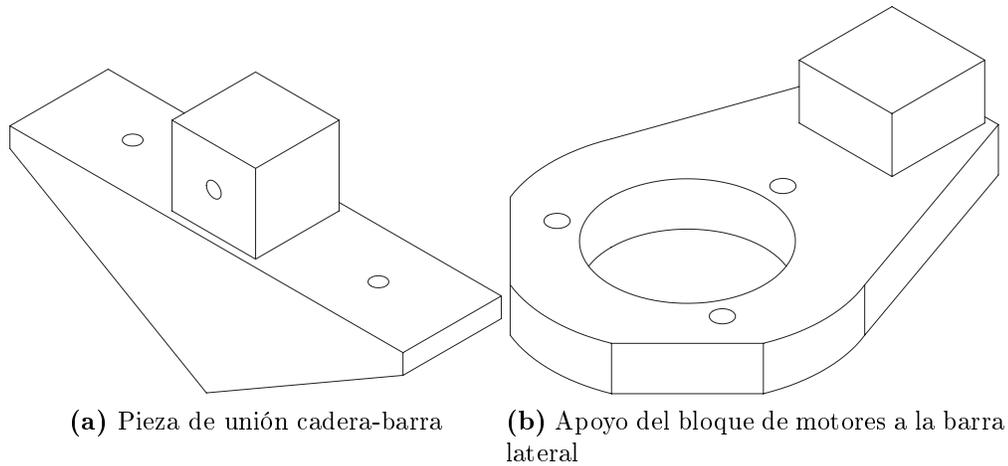


Figura 4.4: Piezas de soporte para la cadera.

En las Figura 4.5 se puede ver una comparación entre el diseño original del tronco, en (a), y la posterior adición de las barras laterales, ver (b). Es claro que esta solución además de proveer soporte extra, disminuye considerablemente el torque sobre la columna central. De igual manera a las anteriores, estas piezas son maquinadas con CNC y fabricadas en Technyl[®]. Mientras que las barras corresponden a un tubo cuadrado de aluminio de 20x20 [mm].

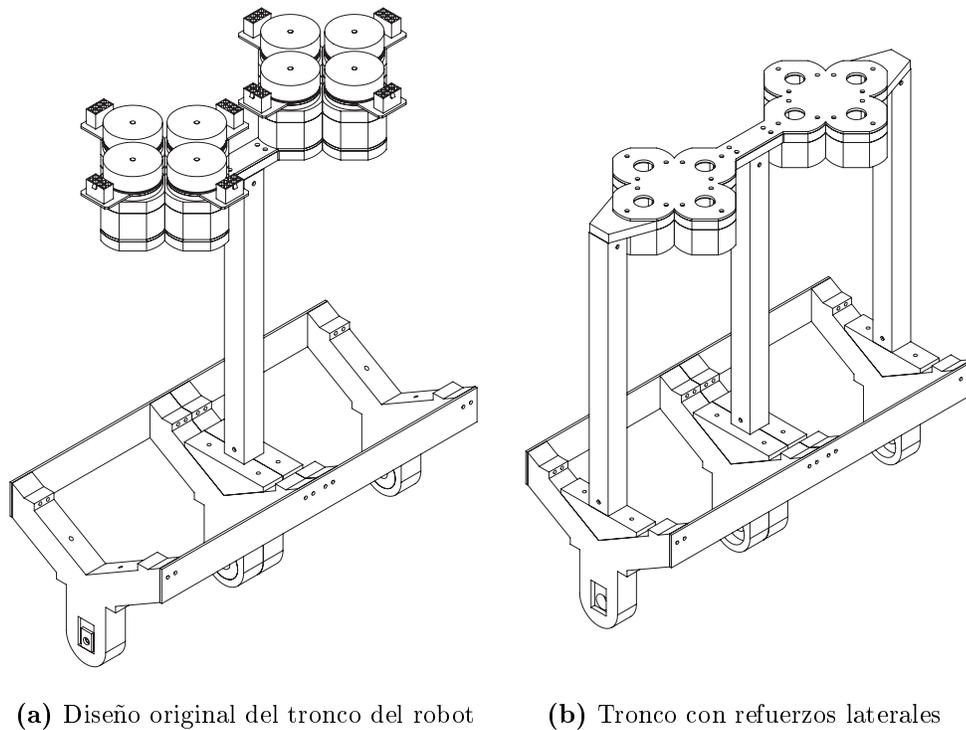


Figura 4.5: Adaptación del tronco del robot mediante barras laterales.

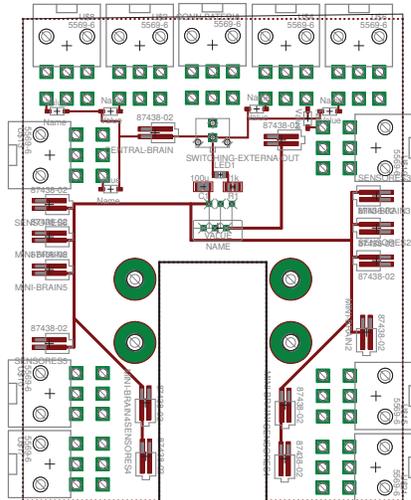


Figura 4.6: Capa superior del circuito de distribución de energía del robot.

4.1.2. Circuito de Distribución de Energía

El robot bípedo tiene tres líneas diferentes de alimentación, 20[V] para los motores, 5[V] para la electrónica de los motores y 3,3[V] para el micro-controlador y los demás sensores. Por simplicidad se desea tener una fuente de alimentación centralizada, en este caso una batería de litio de 5 celdas, 5[Ah] y un voltaje nominal de 18.5[V]. La línea llamada de 20[V] es alimentada directamente desde la batería, sin embargo, para las otras líneas es necesario reducir el voltaje, para esto se usa una fuente switching, que entrega 5[V] y un convertor DC/DC que provee 3.3[V].

Además, la PCB de Energía contiene los conectores para alimentar 5 *mini-brain*, 10 tarjetas de motores y 5 placas de sensores. De esta manera, tiene un conector de entrada para la batería, uno para la switching y una multitud de conectores de salida, necesarios para alimentar las 10 placas de motores, los 5 micro-controladores y las tarjetas de lectura de sensores.

El circuito impreso es diseñado utilizando la versión académica del software Eagle[®]. Diseño que luego es fabricado en las instalaciones del laboratorio de electrónica del departamento de ingeniería eléctrica. Luego, los componentes son soldados manualmente y se prueba que cada línea presentara la tensión adecuada, primero con una fuente de poder regulada y luego con la batería a utilizar. Finalmente, se aplica laca aislante para proteger las líneas de un corto circuito. En la Figura 4.6 se puede observar un diagrama de la parte superior de la tarjeta diseñada.

En la línea de 5[V] se tienen diodos de protección, para aislar una posible falla por sobrevoltaje en una placa de motores. De esta forma, se previene la falla de todo el sistema ante un cortocircuito local entre las líneas de 20[V] y 5[V].

4.2. Esquema de Control

El controlador implementado consiste en una arquitectura de cascada, con tres componentes principales; denotados como control de la articulación, control de cuerdas y control de motores. El primero está compuesto por un controlador proporcional para el ángulo de la articulación, α , y un controlador PID para la velocidad de la articulación, $\dot{\alpha}$. El segundo componente, el control de cuerdas, esta compuesto por dos controladores en paralelo, uno para el flexor y otro para el extensor. A su vez cada uno de estos esta compuesto por un controlador proporcional para la tensión y otro para el ángulo de torsión θ . El tercer bloque, el control de motores, consiste en un par de controladores PID que finalmente definen las señales PWM que se transmiten a los motores.

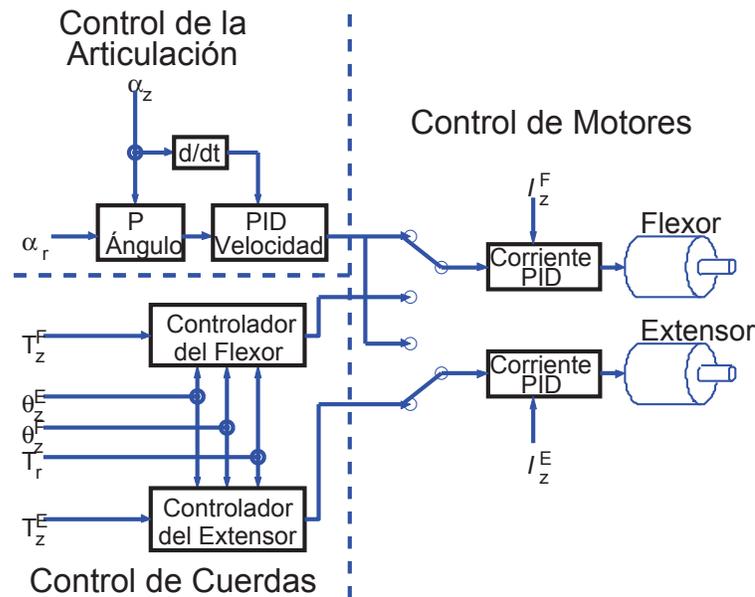


Figura 4.7: Diagrama del esquema de control completo

En la Figura 4.7 se presenta un diagrama del controlador. Donde I corresponde a la corriente, T a la tensión, los super-índices denotan a que lado corresponde la variable, E para el Extensor y F para el Flexor; además, los sub-índices r indican las referencias y z las mediciones. Como es característico de un esquema de controladores en cascada, los bloques operan a distintas frecuencias. En este caso, el control de la articulación y el control de cuerdas corren a la misma velocidad, $50[\text{ms}]$, mientras el control de motores opera con un periodo de $5[\text{ms}]$.

El control de la articulación tiene como objetivo regular la contracción del actuador que lidera el movimiento, el agonista; Su salida consiste en una referencia de corriente. De manera paralela, el control de cuerdas apunta a mantener una cierta tensión en el actuador antagonista, a la vez que libera cuerda para facilitar el movimiento; su salida es de manera análoga una referencia de corriente.

El control de motores debe tomar estas referencias y transmitir la acción de control en forma de señales PWM a los motores. Para poder cumplir esta tarea es necesario discriminar cuál de las dos referencias de corriente para cada motor es la adecuada; esta decisión depende

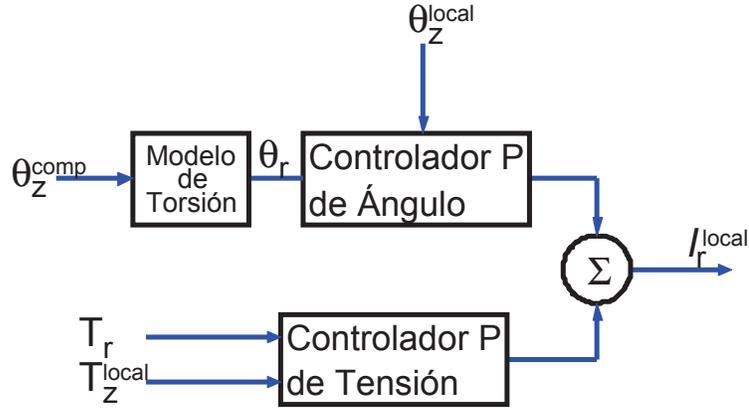


Figura 4.8: Diagrama del esquema de control interno del controlador del Flexor o del Extensor.

del modo en que este operando la articulación en cada instante, habiendo dos posibilidades. La primera consiste en que la articulación debe moverse desde su ángulo actual hasta un α arbitrario; en este caso, el actuador relacionado con el lado agonista sigue la referencia del control de la articulación, mientras que el actuador antagonista opera con la referencia del control de cuerdas. La segunda sucede cuando la articulación se encuentra en la posición deseada, en este caso, ambos actuadores operan utilizando la referencia del control de cuerdas.

Cuando se desenrollan las cuerdas es posible pasar el punto donde la cuerda esta completamente estirada y comenzar a torcerla en el sentido inverso. Para prevenir esto, el control de motores pone en 0 el PWM en la dirección de desenrollado si θ está bajo un umbral determinado; permitiendo solo que se enrolle la cuerda mientras esta condición sea cierta.

El control de cuerdas, como se mencionó, está compuesto por un controlador del Extensor y un controlador del Flexor, donde cada uno de ellos está compuesto por un controlador de tensión y un controlador angular. La salida de los controladores del Extensor o Flexor se obtienen sumando las salidas de sus controladores internos de tensión y ángulo. El controlador de tensión es un simple controlador proporcional. En cambio el controlador del ángulo utiliza un modelo de la relación entre θ^E y θ^F para obtener una referencia de ángulo del motor, θ_r . Luego, se utiliza un controlador proporcional para obtener una referencia de corriente.

Un diagrama interno de uno de los componentes del control de cuerdas puede observarse en la Figura 4.8. El superíndice “local” denota que la variable pertenece al mismo actuador que el controlador, mientras que “comp” señala que corresponde al actuador complementario.

Se utiliza un polinomio de segundo orden para modelar la relación entre θ^E y θ^F , con el fin de reducir la carga computacional. Los parámetros de estos modelos se ajustan a datos del comportamiento de la articulación. De manera que para cada actuador se posee una relación como la presentada en la Ec. (4.1).

$$\theta_r^{local} = (a \cdot \theta^{comp} + b) \cdot \theta^{comp} + c \quad (4.1)$$

Considerando a , b y c constantes reales arbitrarias.

Finalmente, cabe mencionar que todos los controladores PID se calibran utilizando el

método de Ziegler-Nichols de la ganancia crítica y luego se realiza un pequeño ajuste manual. En cambio, los controladores proporcionales se calibran manualmente.

4.3. Programación

En la Figura 4.9 se presenta un diagrama completo de los procesadores involucrados en el robot y las líneas de comunicaciones entre ellos. En la CPU se maneja ROS y los nodos correspondientes, como la interfaz para el usuario.

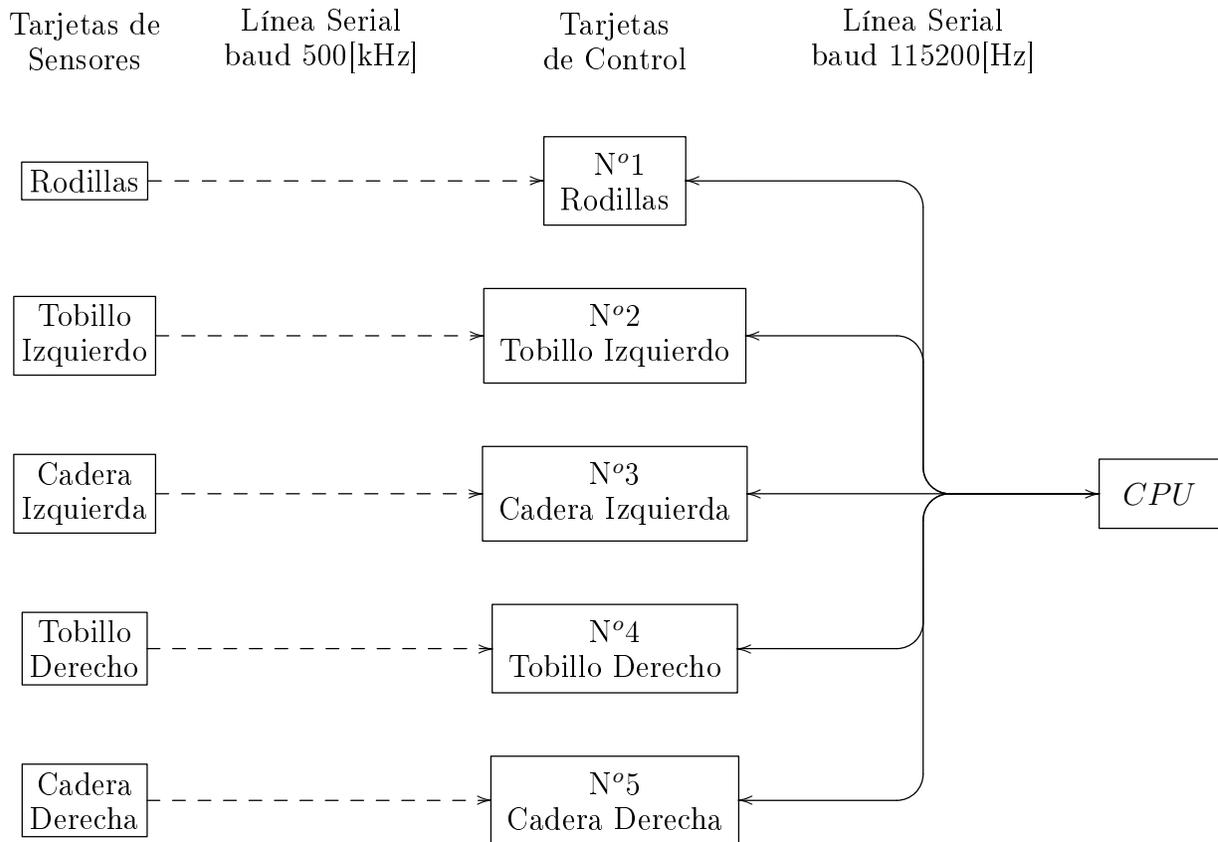


Figura 4.9: Diagrama de Comunicación entre Procesadores.

4.3.1. Firmware

Tarjeta de Sensores

En el diseño original del robot se plantea el uso de una placa de circuitos, con su propio micro-controlador, dedicada exclusivamente a adquirir los datos presión, posición y velocidad de una articulación. De esta manera se permite el manejo de una mayor cantidad de sensores sin tanta carga en el micro-controlador de la articulación.

Esta placa está diseñada considerando una relación uno a uno con el micro-controlador de la articulación; lo que significa que debe poder manejar los sensores de dos grados de libertad. Consecuentemente, debe digitalizar hasta 12 señales y luego transmitir los datos. Los sensores corresponden a dos potenciómetros encoders, la derivada analógica de sus señales, cuatro sensores de presión, uno para cada cuerda, y otros cuatro que se utilizan en los pies del robot para determinar el punto de apoyo. El programa es simple, corre de manera secuencial las dos tareas principales, digitalizar la información de los sensores con su ADC y terminado un ciclo de lectura completo, las doce señales, transmite hacia el mini-brain los datos recogidos.

mini-brain

En comparación con la simpleza de la placa de sensores, los *mini-brain* presentan una complejidad mucho mayor en su programación. En principio este módulo debe manejar las comunicaciones con su correspondiente tarjeta de sensores y con la CPU. Además, debe adquirir a través de su ADC las señales de consumo de corriente y actualizar el ángulo de cada motor; esto último se realiza monitoreando las señales de los sensores de efecto hall de cada fase del motor. Simultáneamente, se mantienen en funcionamiento dos controladores, pues cada *mini-brain* maneja dos grados de libertad.

El conjunto de funciones a desempeñar implica que por cada DoF se deban manejar hasta diez sensores y su respectiva calibración, a la vez que el controlador completo posee 108 valores a manejar. Se desea que estos datos estén disponibles al usuario, ya sea para registrar o modificar su valor; accesibles al controlador; y en el caso de los sensores, actualizarse. Debido a esto se decide manejarlos en tablas, haciendo distinción entre la tabla de los sensores y la tabla de los controladores; con el fin de tener simultáneamente un manejo centralizado y un acceso fácil.

Ambos protocolos de comunicación se mapean directamente a las tablas. La tarjeta de sensores envía un carácter que identifica al sensor, su ID y un entero que corresponde al valor registrado en su ADC. Esto es manejado en una interrupción en el mini-brain, la cual almacena en la tabla este valor crudo y además calcula el valor real en base a la calibración del sensor, el cual también se almacena en la tabla.

Un ajuste al método de transformación de los sensores debe realizarse en los sensores de corriente. Se fija el valor 0 como equivalente en ambos espacios, ADC y corriente, y utilizando una recta desplazada. Esta decisión responde de mejor manera al comportamiento de estos sensores.

En la Figura 4.10 se puede observar la curva característica de los sensores de corriente en una de las placas de motores; estos datos se obtienen empíricamente y el comportamiento es consistente en los 20 sensores. Es claro ver que existe un intervalo en torno a cero donde el sensor no es capaz de obtener una lectura de corriente y luego se observa un comportamiento lineal. En las pruebas realizadas se aprecia que la corriente a partir de la cual se tiene el comportamiento lineal varía de un sensor a otro; en consecuencia, se decide calibrar cada uno con parámetros individuales obtenidos a partir de su curva características.

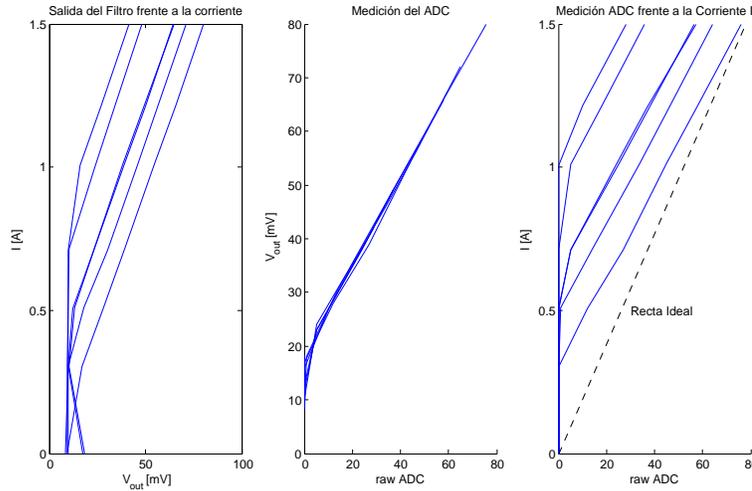


Figura 4.10: Gráficos de las curvas características de los sensores de corriente.

4.3.2. Protocolo de Comunicación

La comunicación con el computador consiste en mensajes que contienen un número que identifica al mini-brain, el largo del mensaje, una instrucción, datos adicionales, en caso de ser necesarios, y finalmente un valor para asegurar la integridad del mensaje. En la Figura 4.11 se muestra un diagrama donde se representa el orden y significado generales de cada byte en los mensajes del protocolo.

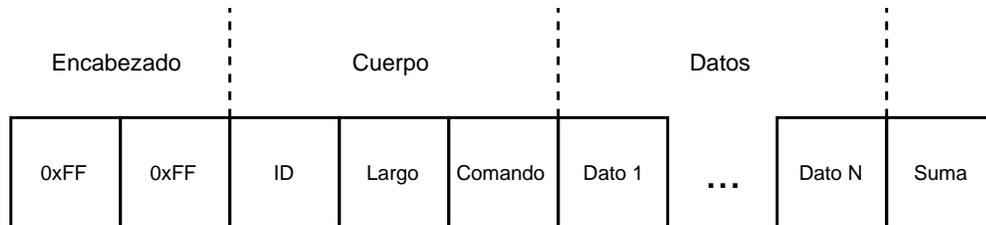


Figura 4.11: Estructura general del mensaje.

Se utiliza un paradigma de maestro-esclavo, con los mini-brain como esclavos del computador, cada uno con un número de identificación propio; de esta manera se evita que dos dispositivos intenten enviar mensajes simultáneamente por el canal. El maestro envía un mensaje para comunicarse y posteriormente recibe una respuesta. Las instrucciones implementadas son ping, leer dato y escribir dato; mientras que ping no requiere información adicional las instrucciones de lectura y escritura necesitan identificar el dato correspondiente y comunicar un valor, ya sea el leído o bien aquel a escribir.

En la Figura 4.12 se puede observar un diagrama con la información que requieren los comandos de lectura y escritura. Cada cuadro se relaciona con un byte del mensaje. Se hace diferencia entre los datos contenidos en un mensaje enviado por el maestro y uno retornado por un esclavo. El caracter Tabla identifica si el dato a leer o escribir es parte de los sensores, de las variables de control o de las funciones activas. Consecuentemente, Dirección corresponde al número asociado al sensor o la variable específica, es idéntico al índice que posee en la tabla correspondiente. El último carácter de cada mensaje corresponde a un valor de suma,

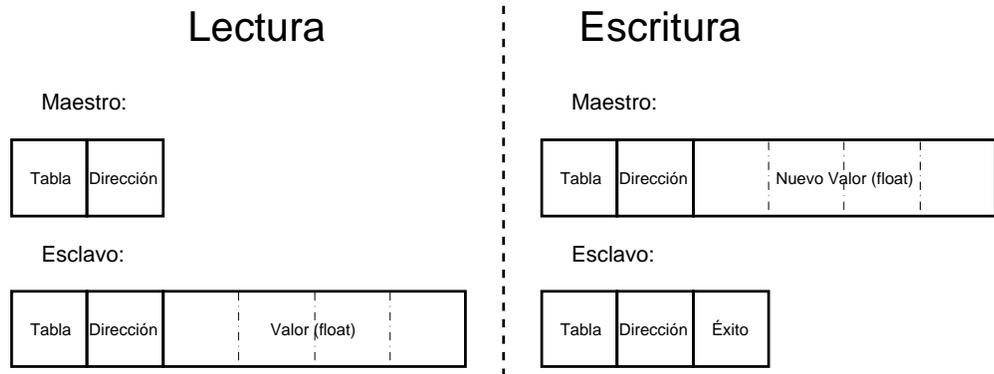


Figura 4.12: Organización del contenido en los mensajes de lectura y escritura.

para comprobar que no se haya corrompido un bit del mensaje en la transmisión. Este valor corresponde a la suma de todos los caracteres anteriores en módulo 128.

En un mismo mensaje, con un comando de lectura o escritura, se pueden solicitar hasta 3 variables simultáneamente; este número se debe a que los mensajes poseen un largo máximo de 24 caracteres, descontando los 2 del encabezado, los 3 del cuerpo y el carácter de suma se tienen hasta 18 caracteres disponibles para datos. Considerando que el maestro al usar el comando escribir o el esclavo al responder una lectura necesitan 6 caracteres, entonces se obtienen las 3 variables por mensaje ya señaladas.

4.3.3. Interfaz de Usuario

El nodo ROS que encapsula el manejo de las comunicaciones es definitivamente la herramienta que permitirá el futuro manejo del robot. Sin embargo, por si solo es de poca utilidad, le hacen falta programas que utilicen sus servicios para manipular al robot. Por esto se implementan otros nodos con el fin de permitir un manejo básico del robot, estos programas son: Window, una interfaz gráfica básica; Scribe, interfaz gráfica para adquirir datos; y Quill, programa que realmente se encarga de la adquisición y almacenamiento de los datos.

En la Figura 4.13 se presenta un diagrama de las comunicaciones entre los distintos nodos. Aquellos con pared doble presentan una interfaz gráfica para el usuario. Los Servicios están representados por flechas continuas, el tópico con una línea punteada y aquellas flechas dobles representan comunicaciones desde aquellos nodos hacia afuera del ambiente ROS.

El nodo que realiza la comunicación con los controladores del robot es **biped_server**. Por ello, el implementa el protocolo de comunicación, el manejo del puerto serial y los comandos básicos como servicios. Estos comandos son **/ping_dev**, **readData** y **writeData**. Además publica otros 3 servicios **dismiss**, **dataAcqInit** y **dataAcqStop** y un tópico **bipedDATA**. Este tópico es iniciado o detenido por **dataAcqInit** y **dataAcqStop** respectivamente; la información que transmite puede variar dependiendo con que parámetros se llame a **dataAcqInit**.

Los servicios **ping_dev**, **readData** y **writeData** son muy similares a los comandos descritos en 4.3.2. El servicio **ping_dev** solo requiere la ID del dispositivo a consultar y retorna un

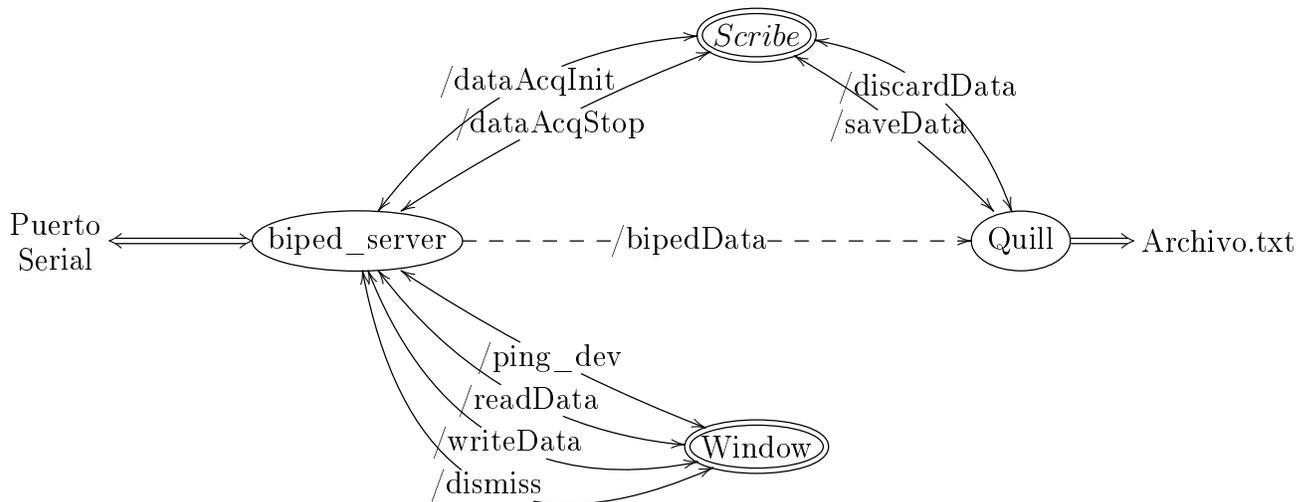


Figura 4.13: Diagrama de Nodos, Servicios y Tópicos implementados.

entero con valor 1 en caso de que se reciba respuesta, 0 en caso que no y -1 en caso de falla al enviar la orden por el puerto serie.

ReadData necesita además de la ID del controlador, un entero que identifica la tabla y otro para la dirección del dato. Como se pueden consultar varios datos simultáneamente, estos campos son vectores de números enteros, llamado “subgroupId”, para las tablas y “specificId” para la dirección de los datos. Además, se añade un cuarto campo “n_data”, que es un entero indicando cuantos datos se consultan en esta instrucción. Los valores retornados por la tarjeta del controlador se transmiten en un arreglo de puntos flotantes llamado “data”.

De manera similar, writeData requiere los campos anteriores, el campo “data” forma parte del argumento de la petición, este lleva los valores a escribir en cada dirección. Mientras que de retorno se recibe un vector de enteros 0 ó 1 que señalan si la escritura del dato es exitosa o no.

El servicio dismiss lleva al nodo a cerrarse de manera adecuada; se combina con el comando respawn=“true” al momento de lanzar los nodos. Con esto se puede reiniciar el nodo y su conexión al puerto serial. El servicio es llamado por el nodo Window, así el usuario puede resetear el servidor a través de un botón en la interfaz gráfica. Posee un campo de petición, “dismiss” y uno de retorno “goodBye”; el primero debe contener un entero con valor 0 para que el nodo se cierre, el segundo, es un un mensaje de confirmación con valor 0 ó 1.

Los cuatro servicios descritos recientemente son llamados por el nodo Window; lo que significa que están a disposición del usuario a través de la interfaz gráfica. Los comandos de read y write toman la información necesaria de los campos, con etiquetas para las tablas y las direcciones de los datos; de esta manera se sabe que se está leyendo la referencia de posición del PITCH sin tener que memorizar o consultar que significa el dato 0x00 de la tabla 1.

Por otro lado los servicios dataAcqInit y dataAcqStop se utilizan para controlar el tópico bipedData. Estos servicios son llamados por el usuario a través de la interfaz de Scribe, rellenando los campos correspondientes para obtener los datos de su interés. Así se inicia una consulta periódica en biped_server, los datos recibidos se publican en el tópico bipedDATA.

Para configurar e iniciar el t3pico dataAcqInit posee 2 campos el periodo entre consultas en milisegundos, como un punto flotante y un vector de lecturas llamado “data_ids”. este a su vez contiene una Id para identificar el dispositivo, y los vectores que pueden contener hasta tres direcciones y sus tablas correspondientes.

En cambio, dataAcqStop es simple, detiene la consulta peri3dica, que en caso de haber retorna un entero 1 en su campo “attended”, 0 en caso contrario. Cabe mencionar que una adquisici3n configurada se detiene y toda su configuraci3n es sobrescrita al llamarse nuevamente el servicio dataAcqInit, reinici3ndose a continuaci3n con los nuevos par3metros.

El contenido del t3pico bipedDATA depende de los par3metros con que se llama a dataAcqInit. Los mensajes contienen tres campos, un header, una estructura “data_id” y un vector de valores en punto flotante “values”. El header contiene un entero “seq”, que corresponde al orden correlativo del mensaje desde que se inicia el t3pico; y un segundo campo tipo “time”, que se3ala el momento en el que se consultan los datos. La estructura de “data_ids” contiene a la ID del controlador en un entero, “devId”; un vector de hasta tres enteros, llamado “subgroupId” que contiene la id de tabla; y un vector “specificId” que contiene hasta tres direcciones de datos.

Los paquetes publicados en bipedData son almacenados por Quill, hasta que recibe una llamada de los servicios saveData o discardData. En ambos casos se libera la memoria que almacenaba los datos, la diferencia es que de recibir un saveData, la informaci3n se guarda en un archivo de texto con nombre igual al campo “filename” del servicio. En cambio, al recibir una llamada a discardData, se eliminan los datos almacenados hasta ese instante. Ambos servicios retornan un campo de confirmaci3n.

Los datos se almacenan separando las columnas con comas, cada fila corresponde a un mensaje, con la primera fila siendo el encabezado. Este es id3ntico en todos los archivos guardados y denota el contenido de cada columna. A continuaci3n se puede apreciar un ejemplo en la tabla 4.1:

sec	nsec	devId	sg1	sp1	val1	sg2	sp2	val2	sg3	sp3	val3
1449257117	198746446	3	1	128	0.000000	2	9	0.007984	1	227	-0.120776
1449257117	203731968	3	1	134	-0.001198	2	8	-0.065450	1	182	0.375876
1449257117	247780323	3	1	128	0.000000	2	9	0.009581	1	227	-0.120776
1449257117	252740225	3	1	134	-0.001677	2	8	-0.065450	1	182	0.373073

Tabla 4.1: Ejemplo de archivo de datos una vez importado como “.csv”.

En este ejemplo se puede ver que las l3neas pares e impares poseen diferentes valores en las direcciones “sp”, por lo que se est3n consultando 6 variables distintas. Los datos se agrupan de a 3 por paquete debido al l3mite de tama3o de los mensajes impuesto por el protocolo. Las dos primeras columnas corresponden al momento de realizar la consulta, estando el primer valor en segundos y el segundo en milisegundos; luego, corresponde la columna del Id de la tarjeta, o bien de la articulaci3n; luego van los 3 datos y su direcci3n completa, en el orden tabla, direcci3n en la tabla y valor. Esta forma de almacenar los datos permite importarlos f3cilmente a Excel, MATLAB o alg3n otro programa para manejar datos.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Articulación de Prueba

Antes de abordar la construcción del robot completo, se fabrica una articulación para realizar pruebas. Se elige una rodilla por las siguientes razones: posee el mayor ángulo de movilidad entre las articulaciones; alta asimetría; un único grado de libertad; y, está expuesta a mayores esfuerzos que la cadera o el tobillo en una caminata.

En la Figura 5.1 se presenta una fotografía de la articulación construida. Para realizar las pruebas se monta en orientación vertical, con el muslo en la parte superior y soportada por el eje de la rodilla. El muslo es el segmento donde se encuentran montados los motores, por esto el más pesado. Se logra que el montaje utilizado forzara que la horizontal bisecara el ángulo de apertura interno, semejante a la acción de acuclillarse; esta situación es comparable al mayor esfuerzo que se espera afronte la rodilla en una situación normal. Se agrega que el actuador extensor esta bajo una exigencia constante, soportando el peso del muslo.

Luego de esta etapa, se procede con la construcción del robot, agregando las consideraciones al diseño que hayan surgido de las pruebas. Además, se adapta a las demás articulaciones el esquema de control probado en la rodilla; lo que conlleva sintonizar los controladores y adquirir datos para ajustar las curvas de los modelos de torsión.

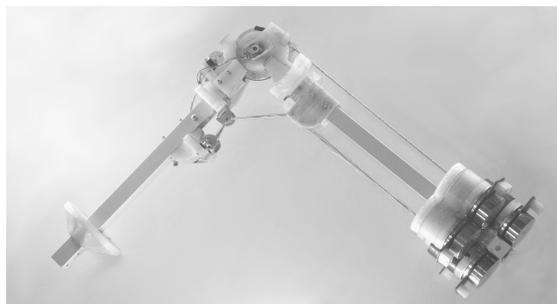


Figura 5.1: Articulación de Prueba.

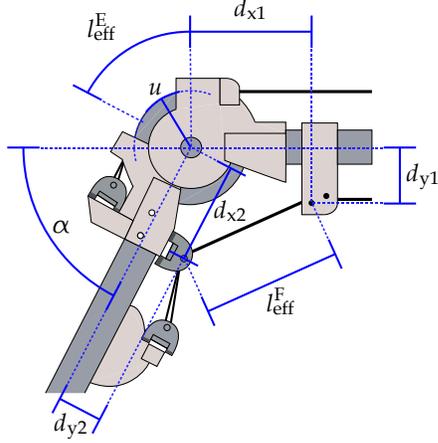


Figura 5.2: Diagrama detallado de la Rodilla.

5.1.1. Características de la Articulación

Si bien los actuadores son iguales, cada tendón de la rodilla tiene una relación geométrica diferente respecto al ángulo de esta. Para relacionar geoméricamente el largo de la cuerda con la apertura de la rodilla primero es necesario definir: el ángulo de la articulación, denotado como α , se mide desde la recta proyectada a continuación del muslo, hasta el centro del segmento de la pierna; l_{eff}^E se define como el segmento de cuerda del extensor que está en contacto con el disco de la articulación; el radio de dicho disco es denotado por la letra u ; a continuación, se define l_{eff}^F como el segmento que va en línea recta desde el destorcedor del flexor hasta el pivote en la pierna; los largos d_{x1} y d_{y1} denotan las distancias del destorcedor del flexor al centro de la rodilla; de manera similar, d_{x2} y d_{y2} corresponden a la distancia desde el centro de la rodilla hasta el pivote del flexor. En la Figura 5.2 se muestra gráficamente cada una de estas definiciones.

Es claro ver que α se relaciona con el largo l_{eff}^E a través de la Ec. (5.1). Mediante el triángulo formado por el destorcedor del Flexor, el eje de la rodilla y el pivote la pierna se obtiene la Ec. (5.2); que relaciona α con el Flexor.

$$l_{\text{eff}}^E = u \cdot \alpha \quad (5.1)$$

$$(l_{\text{eff}}^F)^2 = d_{x1}^2 + d_{y1}^2 + d_{x2}^2 + d_{y2}^2 - 2 \cdot \sqrt{d_{x1}^2 + d_{y1}^2} \cdot \sqrt{d_{x2}^2 + d_{y2}^2} \cdot \cos(\pi - \alpha - \phi) \quad (5.2)$$

$$\text{Donde: } \phi = \arctan\left(\frac{d_{x1}}{d_{y1}}\right) + \arctan\left(\frac{d_{x2}}{d_{y2}}\right)$$

Para completar el modelo de la articulación se desea encontrar la relación entre α y el ángulo de los motores, θ^E y θ^F . El modelo del actuador expuesto en 2.3.3 relaciona θ del motor con el largo de la cuerda más allá del destorcedor, l_{ef} . Por lo tanto, para empalmar ambas ecuaciones basta con relacionar l_{ef} de cada actuador con los respectivos l_{eff}^E y l_{eff}^F , descontando

los segmentos de cuerda definidos por construcción, ejemplo: el tramo de tendón del extensor que va desde el disco de la rodilla hasta la fijación. Dichas relaciones están expresadas en las Ecs. (5.3) y (5.4) para Extensor y Flexor respectivamente. Donde l_{\min} es el mínimo largo de cuerda permitido por el otro actuador, medido entre el destorcedor y la fijación; y l_{const} es el segmento entre la fijación del Flexor y el pivote de la cuerda.

$$l_{\text{eff}}^E = l_{\text{ef}}^E - l_{\min}^E \quad (5.3)$$

$$l_{\text{eff}}^F = l_{\text{ef}}^F - l_{\text{const}} \quad (5.4)$$

El valor de los parámetros de la cuerda pueden variar con el cambio de una de las cuerdas del par de actuadores. La Tabla 5.1 contiene las mediciones de los parámetros de la articulación al momento de realizar las pruebas. Los motores se alimentaron con 14[V] desde una fuente regulada.

Tabla 5.1: Valores de los parámetros para la Articulación de Prueba.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
d_{x1}	86.60[mm]	d_{y1}	33.50[mm]
d_{x2}	82.00[mm]	d_{y2}	31.00[mm]
u	31.80[mm]	r_1	4.60[mm]
r_2^E	4.60[mm]	r_2^F	4.00[mm]
l_0^E	0.43[m]	l_0^F	0.367[m]
s^E	0.30[m]	s^F	0.22[m]
l_{ext}^E	0.46[m]	l_{const}	51.00[mm]
q	2.50[mm]		

Con respecto al controlador de la articulación, sus parámetros fueron calibrados con el método de Ziegler-Nichols expuesto en 2.4.1; luego se ajustaron manualmente. En cambio, los modelos que relacionan el número de vueltas en cada motor se ajustan a partir de datos de movimiento de la articulación; el proceso y los valores utilizados se describe a continuación.

Para adquirir los datos de la relación entre el θ de cada motor se realiza una prueba donde: se reduce a 0 la ganancia del controlador de ángulo θ dentro del control de cuerdas, pues se necesitan los modelos para que operen; y se reduce la ganancia del controlador de α a 0. Con estas medidas, la articulación solo responde al controlador de tensión de cada actuador.

A continuación, se adquieren los datos de θ^E y θ^F mientras se realiza un lento barrido con la articulación. El movimiento se ejecuta manualmente; se recomienda hacerlo lento para reducir el ruido en los datos. En la Figura 5.3 se presenta los datos obtenidos con la articulación de prueba y los modelos elaborados a partir de estos.

Estos modelos se obtuvieron mediante el ajuste de un polinomio de segundo orden a los datos; luego, este se desplaza hasta los puntos más bajos de la nube. La razón detrás del desplazamiento es llevar la curva a la zona de menor tensión de la cuerda; pues el objetivo

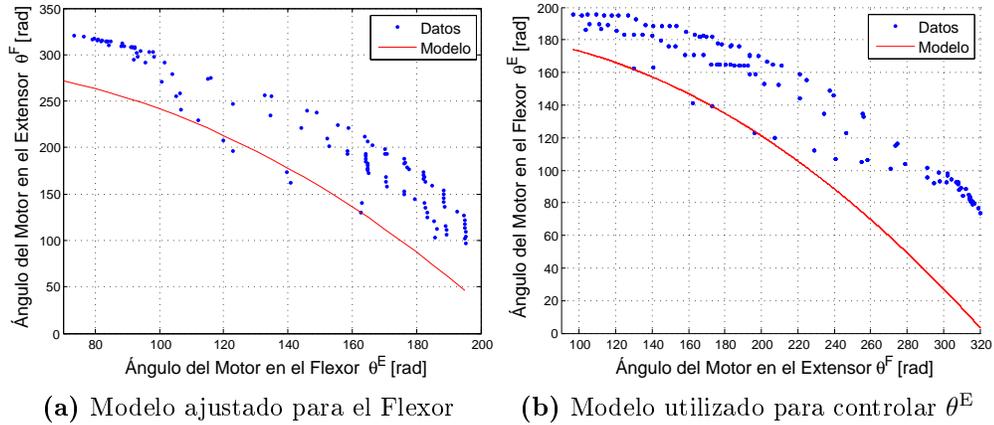


Figura 5.3: Modelos polinomiales de segundo orden utilizados en el controlador del Flexor (a) y del Extensor (b).

de este controlador es liberar cuerda en el antagonista antes de que se acumule tensión, reduciendo el esfuerzo de los motores; y por otro lado, existe un controlador dedicado a la tensión de las cuerdas.

5.1.2. Validación de Modelos

Para validar el modelo teórico, se recogen datos de un barrido lento en su apertura. Al igual que para obtener los modelos de segundo orden para los controladores, se configura el esquema de control para que reaccione solo ante la tensión, con una referencia baja. Luego manualmente se realiza el movimiento, al tiempo que se recogen los datos.

En la Figura 5.4 se pueden observar las curvas procedentes de los modelos para ambos actuadores y los correspondientes datos obtenidos. El comportamiento predicho por el modelo es mucho más preciso en el Extensor que en el Flexor; esta diferencia se cree esta causada por la presencia de una tensión más alta de lo esperada en el Flexor.

Para observar el real efecto de la elasticidad de las cuerdas, la articulación debe estar sometida a esfuerzo. Por esa razón, una prueba de funcionamiento de la articulación, con una referencia sinusoidal de α a 1[Hz] se presenta en la Figura 5.5; en el mismo gráfico se pueden ver los resultados teóricos al descartar o considerar la elasticidad de las cuerdas. Es fácil apreciar el significativo efecto producido por la elasticidad de las cuerdas y la buena representación de este realizado por el modelo.

Se evalúa la mejora en la precisión del modelo al considerar el radio de la cuerda variable con la prueba del barrido; utilizando los datos del Extensor. En la Figura 5.6 puede verse: la curva predicha por el modelo simple, la curva obtenida ajustando el radio y los datos obtenidos de la articulación. Con esta información se concluye que existe una mejora comparativa; sin embargo, dependiendo la aplicación, el aumento en la complejidad del cálculo puede ser más perjudicial que la mejora percibida.

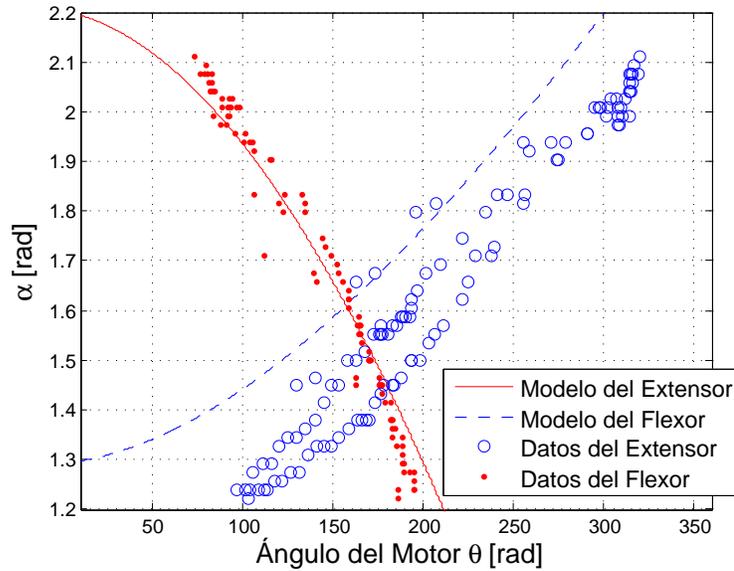


Figura 5.4: Gráfico de la relación entre el ángulo de articulación y la acción de los actuadores. Datos empíricos comparados a curvas teóricas.

5.1.3. Comportamiento del Controlador

Se realizaron tres pruebas para analizar el desempeño del controlador: la primera, para la transiente; la segunda, con el objetivo de evaluar cambios continuos en la referencia; y una tercera, enfocada a observar el comportamiento de la tensión. En cada prueba se alimenta el controlador con una señal de referencia de ángulo, α_r , la cual varía desde 1,4 a 2 [rad]. En las primeras dos, la señal posee una frecuencia de 0,25[Hz]; siendo de forma cuadrada en la caso de la transiente y una senoide en el otro. Para la prueba de la tensión se excita el sistema con una señal de tren de pulsos a 0,5[Hz], con un ciclo de trabajo del 50 %.

En las Figuras 5.7 a y b se presentan las respuestas del ángulo de la articulación, α_z ; la velocidad de la articulación, $\dot{\alpha}_z$; y las corrientes de los actuadores, I^E y I^F . De estas pruebas se puede señalar: (i) los cambios en α_z no son muy fluidos; (ii) el sistema acelera a una tasa fija en respuesta a un cambio en $\dot{\alpha}_r$, esto se ve claramente en la prueba de la transiente, mientras que en la otra se aprecia como un retraso en la respuesta; y (iii) las corrientes presentan un buen comportamiento, pero en la prueba de la transiente se ve que la magnitud aumenta y disminuye muy bruscamente mientras la articulación acelera, esto señala que el motor se mueve rápido con poca oposición del sistema; este último efecto es especialmente notorio en la respuesta de I^E .

Resultados de la prueba enfocada al comportamiento de la tensión se presentan en la Figura 5.8. En estos gráficos, el Extensor actúa como agonista en los segundos impares y como antagonista en los pares. Se puede ver que la tensión permanece bastante constante, aún cuando la articulación se desplaza por efecto de este actuador; solo se ve una caída cuando se facilita el actuar del Flexor como agonista. Este es un efecto esperable del controlador de θ implementado. Al comparar las señales de corriente y tensión es claro que no existe una relación directa, como puede pensarse a priori; el comportamiento observado es que

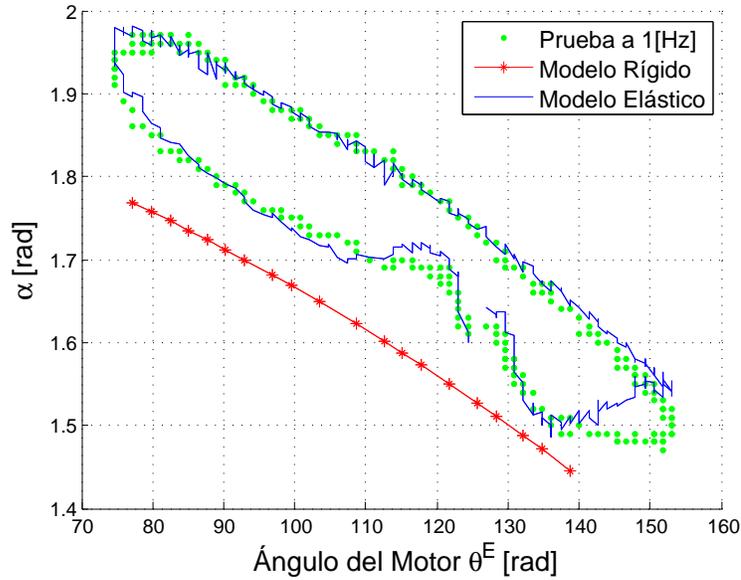


Figura 5.5: Efecto de la elasticidad en los actuadores.

las cuerdas acumulan tensión, requiriendo poco torque para sostenerla o disminuirla y un esfuerzo mucho mayor para aumentarla.

5.1.4. Respuesta Dinámica

Para evaluar los cambios en la respuesta del sistema a distintas velocidades se realizan pruebas con una entrada α_r sinusoidal, variando su frecuencia desde 0,1 a 2[Hz]. Las Figuras 5.9 y 5.10 permiten observar α_z , $\dot{\alpha}_z$, I_z^E y I_z^F en la operación a 1 y 1,5[Hz], respectivamente.

Comparando estas respuestas a mayor velocidad contra la operación a 0,25[Hz] de la Figura 5.7b; se puede ver la atenuación de α_z y la mayor suavidad de esta señal. También se observa una mayor magnitud en las señales de velocidad y corriente; señalando un esfuerzo en los actuadores para mantener el ritmo exigido y un empeoramiento en la respuesta.

En la Figura 5.11 se resumen los cambios en α_z a las diferentes frecuencias probadas. Los valores de ganancia y fase se calcularon entre una senoide ajustada a α_z y la señal de entrada α_r ; el término ganancia se utiliza para hacer un símil a la teoría de filtros. Para empezar, se puede ver la caída en la ganancia a medida que aumenta la frecuencia, como en un filtro pasa bajos. Extendiendo esta noción, se puede estimar gruesamente que a 1[Hz] se alcanza la frecuencia de corte del sistema; el punto donde amplitud de la respuesta es un 70 % de la señal de entrada.

Esta frecuencia de corte, o bien el empeoramiento de desempeño que señala, debe ser causado por que los actuadores están operando en el límite de sus capacidades. El comportamiento de los motores, bajo la exigencia de α_r a 1,5[Hz] puede observarse en la Figura 5.12; allí se pueden observar gráficos de la velocidad, corriente y potencia de los motores.

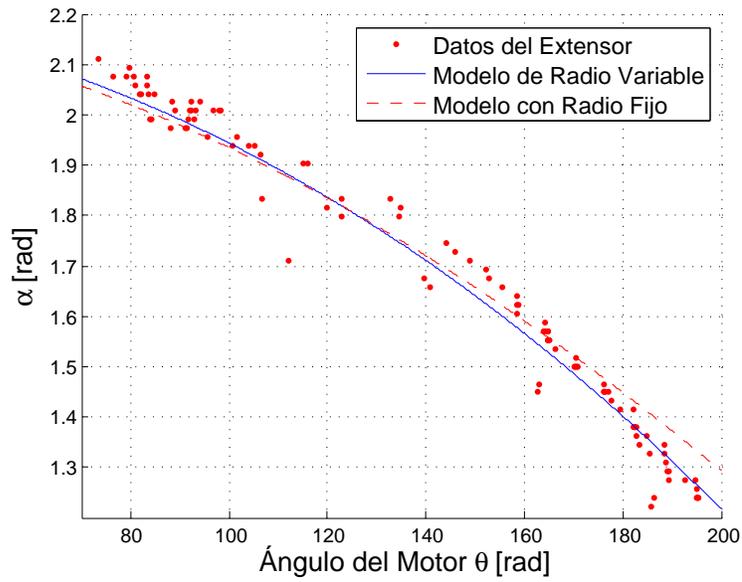
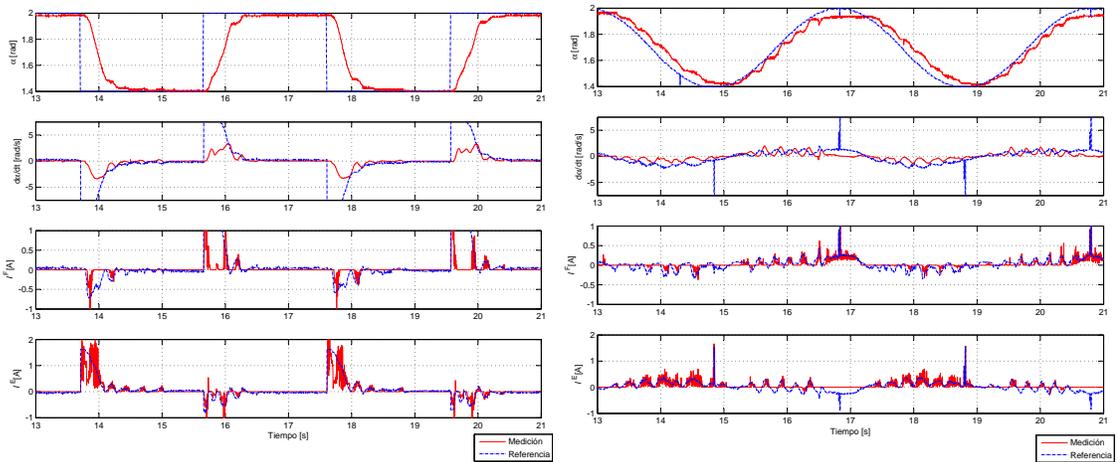


Figura 5.6: Gráfico comparativo del ajuste por radio variable.



(a) Respuesta Transiente

(b) Prueba de Referencia Variable

Figura 5.7: Respuesta del sistema ante cambios en α_r .

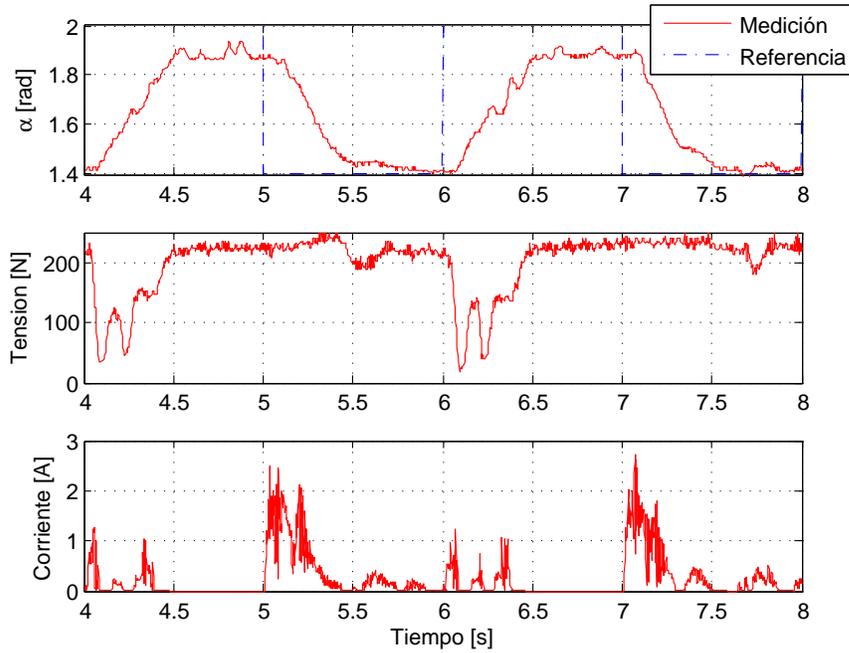


Figura 5.8: Prueba de comportamiento de la tensión.

En el gráfico de velocidad se aprecia que el Flexor opera por buena parte de su ciclo de agonista a 4000[rpm]. Este valor corresponde al límite de velocidad de los motores en el montaje de las pruebas; pues, los motores se alimentan a 14[V] y poseen una constante de velocidad $\omega_N = 285 \frac{\text{rpm}}{\text{V}}$ (ver Tabla 3.1).

5.1.5. Discusión de Resultados

El comportamiento del esquema de control se considera adecuado en las pruebas realizadas. Además, se comprueba que el deterioro en el desempeño del sistema guarda relación con las capacidades de los actuadores, no con los controladores.

Con respecto a los actuadores, en la prueba de tensión se pudo observar que poseen un comportamiento particular. Los motores requieren ejercer poco torque para mantener o disminuir la tensión en las cuerdas; sin embargo, una cantidad considerable de esfuerzo se observa al aumentar la tensión. Este comportamiento es considerado ventajoso comparado a los servomotores comunes; ya que permite mantener una posición fija con un mínimo consumo energético. Sin embargo, existe el lado negativo de consumir energía incluso para destensar las cuerdas; afortunadamente la magnitud de este consumo es baja.

Como resultado de la caracterización dinámica de la articulación se obtuvo una frecuencia de corte estimada en 1[Hz]. Este valor se encuentra dentro de las frecuencias de caminata y corrida observadas en humanos; que van de 0,41 a 3,57[Hz] al caminar y desde 0,83 a 1,95[Hz] al correr (Nilsson y Thorstensson, 1987).

En los resultados se expuso que la velocidad máxima de los motores limitaba el trabajo de

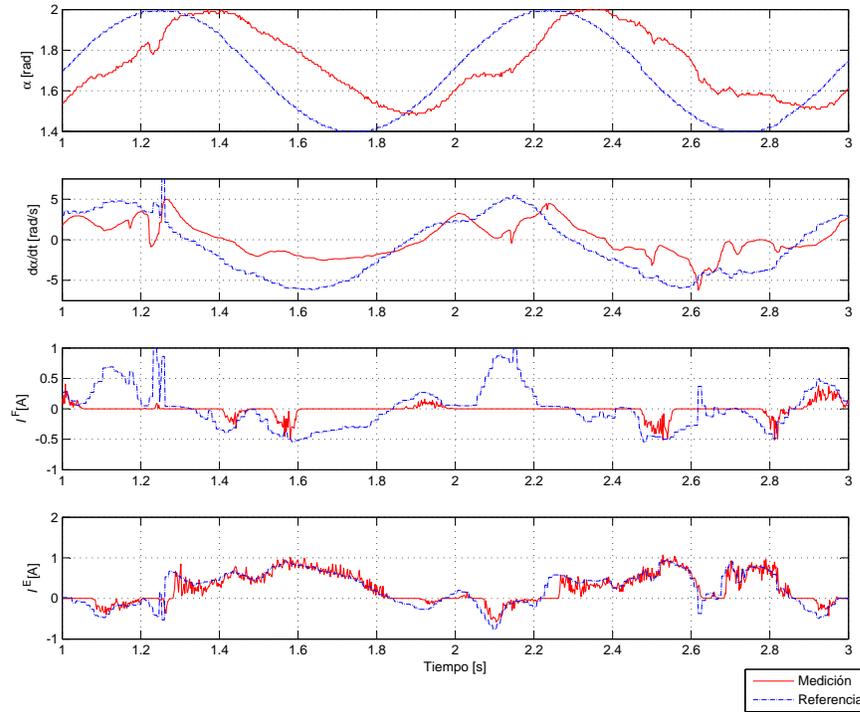


Figura 5.9: Respuesta de la articulación a una señal sinusoidal de α_r a 1[Hz].

la articulación a mayores frecuencias. Se espera aumentar el rango dinámico a través de dos medidas: (i) Alimentar los motores con 20[V], aumentando su velocidad máxima a 5700[rpm]; y engrosando los haces de cuerda en los actuadores, lo que tiene como consecuencia disminuir la razón de reducción de los actuadores; es decir, menos vueltas del motor serán necesarias para el mismo efecto sobre α .

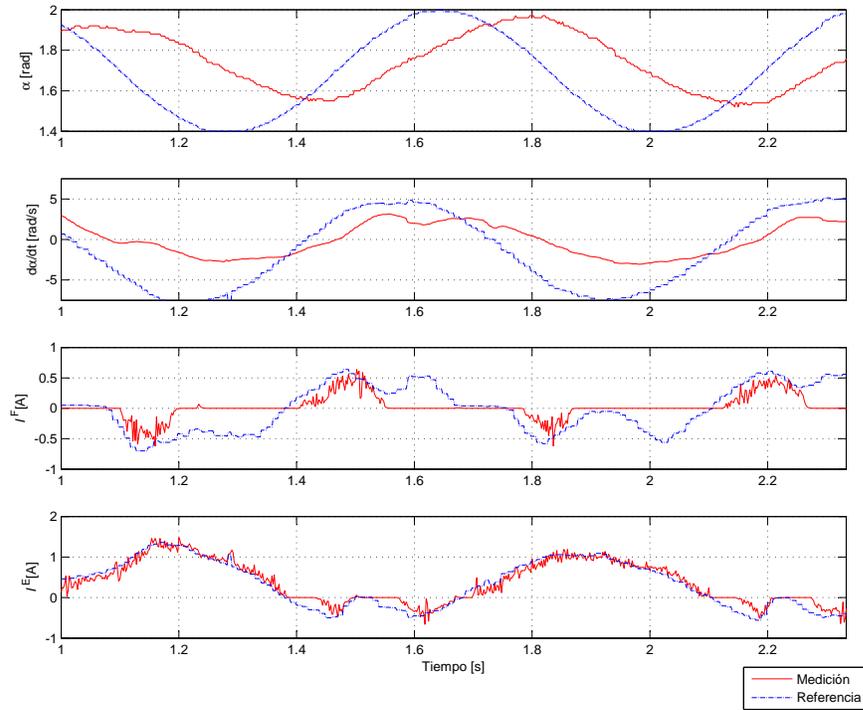


Figura 5.10: Reacción del sistema a una entrada α_r de forma sinusoidal de 1,5[Hz].

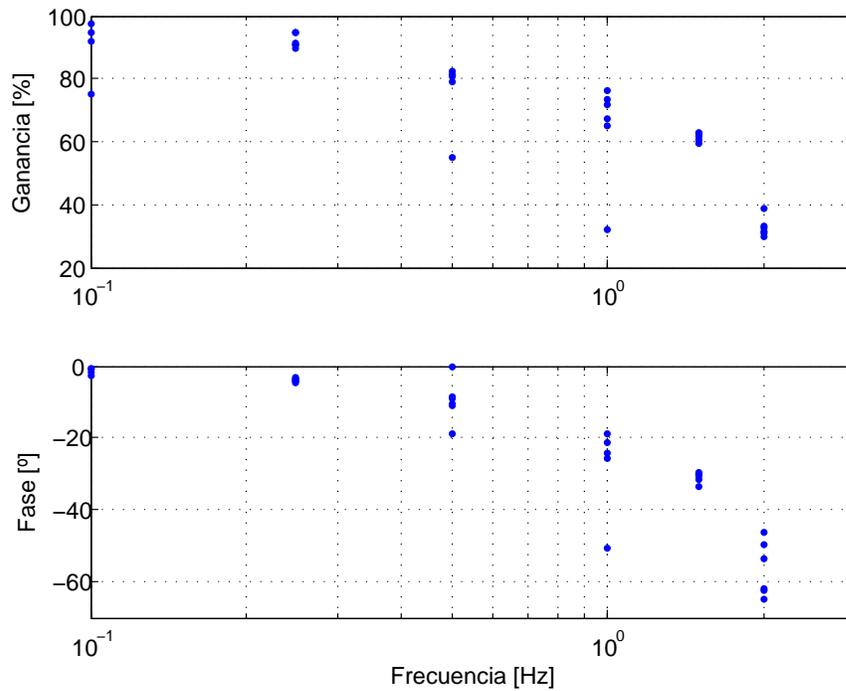


Figura 5.11: Ganancia y fase del sistema frente a una entrada sinusoidal de α_r desde 0,1[Hz] a 2[Hz].

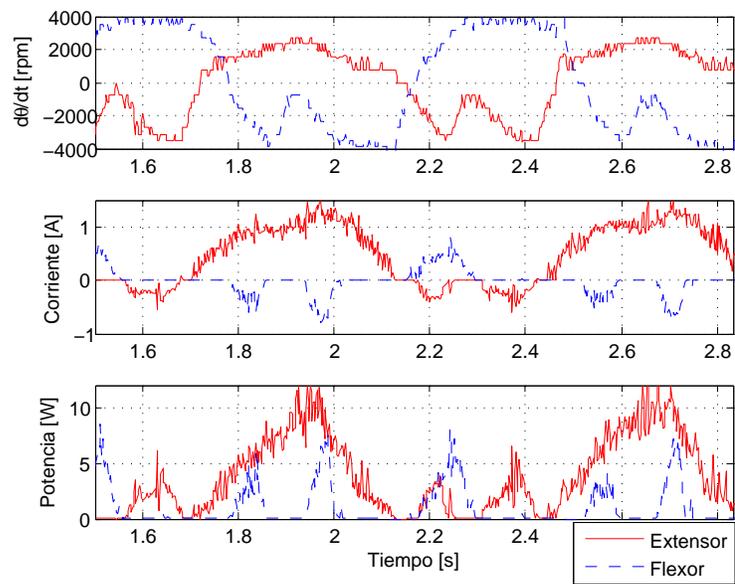


Figura 5.12: Velocidad, corriente y potencia instantánea en los motores durante prueba de operación a 1,5[Hz].

Capítulo 6

Conclusión

Actualmente el robot se encuentra ensamblado; implicando que se fabricaron y montaron todas las piezas necesarias. Así mismo, se han fabricado y construido los elementos electrónicos del robot; permitiendo la alimentación de los componentes y el funcionamiento de sensores, motores y controladores. Además, se implementó el esquema de control propuesto para la articulación y se ha probado su funcionamiento. Mediante experimentos se determinó el comportamiento dinámico de los actuadores. Estos resultados señalan que los actuadores son capaces de operar a frecuencias dentro del intervalo de caminata humano.

Se generó una interfaz en ROS para manejar el robot. Además, se programaron nodos que permiten: manipular completamente los parámetros del robot; adquirir y almacenar los datos de sensores y controladores; y, una fácil extensión del sistema mediante nodos ROS.

El trabajo futuro se puede dividir en tres áreas: aumentar la robustez del sistema; facilitar la operación; e, investigación de caminatas bípedas. En el estado actual el mayor problema de robustez del robot es la falla por temperatura de los transistores que alimentan los motores; esto es superable mediante una cuidadosa operación de los actuadores. Sin embargo, es deseable sobrepasar esta limitación mediante el aumento de la capacidad de disipación de calor o el uso de transistores con aún menor resistencia.

Actualmente, la calibración del cero de los motores es un proceso tedioso; puesto que, cada vez que se enciende el robot es necesario calibrarlos cuidadosamente y de a uno. Debido a esto, se propone la programación de una rutina de calibración automática enfocada en: un bajo esfuerzo de los actuadores al calibrar; trabajo simultáneo en articulaciones; y repetibilidad, es decir, que en distintas calibraciones las mediciones y comportamientos de θ sean lo más similares posible.

Finalmente, la plataforma actual permite mover las articulaciones y obtener lecturas de las variables internas del robot; con estas capacidades se pueden implementar rutinas básicas para mantener una pose erguida o de caminata. Consecuentemente, la puerta esta abierta para que se comience a experimentar con caminata bípeda en un robot semi-pasivo.

Capítulo 7

Bibliografía

- McGeer, T. (1990, May). Passive walking with knees. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on* (pp. 1640-1645). IEEE.
- McGeer, T. (1993). Dynamics and control of bipedal locomotion. *Journal of Theoretical Biology*, 163(3), 277-314.
- Vallejos, P. (2011). "Metodología de Diseño de Robots Semi-Pasivos", Ph.D. thesis, Universidad de Chile.
- Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R. y Wisse, M. (2005). Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712), 1082-1085.
- Tedrake, R., Zhang, T. W., Fong, M. F. y Seung, H. S. (2004, April). Actuating a simple 3D passive dynamic walker. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 5, pp. 4656-4661). IEEE.
- Wisse, M. (2005). Three additions to passive dynamic walking: actuation, an upper body, and 3D stability. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2(04), 459-478.
- Wisse, M., Feliksdal, G., Van Frankenhuyzen, J. y Moyer, B. (2007). Passive-based walking robot. *Robotics and Automation Magazine, IEEE*, 14(2), 52-62.
- Omer, A. M. M., Ghorbani, R., Lim, H. O., y Takanishi, A. (2009, July). Semi-passive dynamic walking for biped walking robot using controllable joint stiffness based on dynamic simulation. In *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on* (pp. 1600-1605). IEEE.
- Ly, O., Lapeyre, M., y Oudeyer, P. Y. (2011, September). Bio-inspired vertebral column, compliance and semi-passive dynamics in a lightweight humanoid robot. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 1465-1472). IEEE.
- Abe, K., Suga, T. y Fujimoto, Y. (2012, March). Control of a biped robot driven by elastomer-based series elastic actuator. In *Advanced Motion Control (AMC), 2012 12th IEEE Inter-*

- national Workshop on (pp. 1-6). IEEE.
- Suzuki, M. e Ichikawa, A. (2005). Toward springy robot walk using Strand-muscle actuators. In *Climbing and Walking Robots* (pp. 479-486). Springer Berlin Heidelberg.
- Suzuki, M., Mayahara, T. e Ishizaka, A. (2007, September). Redundant muscle coordination of a multi-DoF robot joint by online optimization. In *Advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Sonoda, T. y Godler, I. (2010, October). Multi-fingered robotic hand employing strings transmission named" Twist Drive". In *IROS* (pp. 2733-2738).
- Godler, I., y Sonoda, T. (2011, November). Performance evaluation of twisted strings driven robotic finger. In *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2011 8th International Conference on* (pp. 542-547). IEEE.
- Wurtz, T., May, C., Holz, B., Natale, C., Palli, G. y Melchiorri, C. (2010, July). The twisted string actuation system: Modeling and control. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on* (pp. 1215-1220). IEEE.
- Palli, G., Natale, C., May, C., Melchiorri, C. y Wurtz, T. (2013). Modeling and control of the twisted string actuation system. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 18(2), 664-673.
- Gaponov, I., Popov, D. y Ryu, J. H. (2014). Twisted string actuation systems: A study of the mathematical model and a comparison of twisted strings. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 19(4), 1331-1342.
- Popov, D., Gaponov, I. y Ryu, J. H. (2013, November). Bidirectional elbow exoskeleton based on twisted-string actuators. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 5853-5858). IEEE.
- Oza, H. B., Orlov, Y. V., Spurgeon, S. K., Aoustin, Y., y Chevallereau, C. (2014, June). Continuous second order sliding mode based robust finite time tracking of a fully actuated biped robot. In *Control Conference (ECC), 2014 European* (pp. 2600-2605). IEEE.
- Li, T. H. S., Su, Y. T., Liu, S. H., Hu, J. J., y Chen, C. C. (2012). Dynamic balance control for biped robot walking using sensor fusion, Kalman filter, and fuzzy logic. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 59(11), 4394-4408.
- Kajita, S., Asano, F., Morisawa, M., Miura, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., y Yokoi, K. (2013, May). Vertical vibration suppression for a position controlled biped robot. In *ICRA* (pp. 1637-1642).
- Braun, D. J., Mitchell, J. E., y Goldfarb, M. (2012). Actuated dynamic walking in a seven-link biped robot. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 17(1), 147-156.
- Narioka, K., Homma, T., y Hosoda, K. (2012, November). Humanlike ankle-foot complex for a biped robot. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International*

Conference on (pp. 15-20). IEEE.

Huang, Y., Vanderborght, B., Van Ham, R., Wang, Q., Van Damme, M., Xie, G., y Lefeber, D. (2013). Step length and velocity control of a dynamic bipedal walking robot with adaptable compliant joints. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 18(2), 598-611.

Hurst, J. W., Chestnutt, J. E., y Rizzi, A. (2007, April). Design and philosophy of the bimasc, a highly dynamic biped. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 1863-1868). IEEE.

Renjewski, D., Sprowitz, A., Peekema, A., Jones, M., y Hurst, J. (2015). Exciting Engineered Passive Dynamics in a Bipedal Robot. *Robotics, IEEE Transactions on*, 31(5), 1244-1251.

Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

Nilsson, J. y Thorstensson, A. (1987). Adaptability in frequency and amplitude of leg movements during human locomotion at different speeds. *Acta Physiologica Scandinavica*, 129(1), 107-114.