

Control de Admitancia con Modulación de Impedancia para un Bastón Robotizado

Jeysson Tapia Mollo
Instituto de Automática
UNSJ - CONICET
San Juan - Argentina
jtapia@inaut.unsj.edu.ar

Alejandro Rodrigo
Instituto de Bioingeniería
UNSJ
San Juan - Argentina
arodrigo@inbio.unsj.edu.ar

Juan Carlos Iturrieta
Instituto de Bioingeniería
UNSJ
San Juan - Argentina
jciturrieta@inbio.unsj.edu.ar

Flavio Roberti
Instituto de Automática
UNSJ - CONICET
San Juan - Argentina
froberti@inaut.unsj.edu.ar

Fernando Tettamanti
Instituto de Bioingeniería
UNSJ
San Juan - Argentina
ftettamanti@inbio.unsj.edu.ar

Ricardo Carelli
Instituto de Automática
UNSJ - CONICET
San Juan - Argentina
rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

Resumen—Actualmente, la robótica se ha integrado en todos los ámbitos de la vida, siendo la salud uno de los principales, brindando soluciones prácticas, novedosas y seguras, que llevan a que las personas tengan un mejor estilo de vida. En el presente trabajo se presenta el desarrollo un controlador de admitancia con compensación dinámica y se analiza las ventajas de adicionar la modulación de impedancia al controlador. Las estrategias de control son aplicadas en el bastón robotizado desarrollado por el Instituto de Automática, con la finalidad de brindar asistencia a personas con alteraciones en la distribución del peso entre un miembro y el otro. Las respuestas se contrastan mediante un protocolo de pruebas, resaltando el efecto positivo causado por la modulación de impedancia, al obtener respuestas en velocidad tanto lineal y angular más uniformes a lo largo del trayecto. Este trabajo se encuadra en el área de la robótica ya que un bastón automático es un dispositivo robótico que está en interacción con personas mediante contacto.

Index Terms—Robótica de asistencia, bastón robotizado, control de admitancia, modulación de impedancia.

I. INTRODUCCIÓN

Para el 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece las personas con trastornos musculoesqueléticos que existen mundialmente son aproximadamente 1.71 mil millones [1]. Siendo estas patologías las principales causantes de discapacidad a nivel mundial, al limitar las destrezas y movilidad de las personas. La OMS también establece que la esperanza de vida pasó de 58.3 años en el 2000 a 63.7 años en el 2019 [2], por lo que se prevé que en un futuro exista un mayor porcentaje de personas adultas mayores.

Es así que a nivel mundial de un total de 7.76 mil millones de personas [3], existen por lo menos 1.71 mil millones de personas (22 %) que en algún punto de su vida podrían necesitar de un apoyo (bastón, andador o silla de ruedas) para llevar a cabo sus actividades diarias.

Como un mecanismo para mejorar el estilo de vida de las personas que requieren apoyo, surge el bastón, ya que es uno de los elementos más antiguos para estabilizar la marcha [4], lo que produce que actualmente sea socialmente más aceptado

que otros dispositivos. Además al no ser de gran envergadura y no necesitar mayor capacitación se busca utilizarlo frente a otros como sillas de ruedas o andadores [5], en múltiples padecimientos como accidentes cerebrovasculares, fracturas, trastornos musculoesqueléticos o postquirúrgicos, siempre que el estado del usuario requiera del bastón para mejorar su funcionalidad.

La concepción del bastón robotizado nace debido a que en los últimos años se ha venido desarrollando la robótica de asistencia y rehabilitación [6]–[8]. Logrando de esta forma distintos dispositivos automáticos enmarcados en el área de la robótica de interacción de contacto con seres humanos, que permiten a las personas desenvolverse de una forma más adecuada en su vida cotidiana, sin depender de otros, gracias a la tecnología implementada en estos dispositivos robóticos.

En la literatura se presenta varios desarrollos de bastones robotizados de los cuales se resaltan [9] donde se presenta el diseño y la validación de un bastón robótico para prevención de caídas. En [10] se desarrolla un sistema de análisis y evaluación de la marcha tomando como plataforma al bastón desarrollado en [11], cuya estrategia de control es mediante seguimiento del usuario. En [12] se desarrolló un sistema de asistencia a la marcha basado en un bastón haptico y ortesis activa de rodilla, el bastón se basa en un sistema de péndulo invertido de dos ruedas. En [13] se presenta un bastón basado en un modelo de péndulo invertido con un controlador de realimentación de estado completo.

Los controladores desarrollados en el presente trabajo se basan en el requerimiento del usuario a desplazarse libremente, considerando necesitar de apoyo a lo largo del trayecto y manteniendo una uniformidad en la velocidad.

Con estas consideraciones se tiene como problemática que un usuario en todo el trayecto va a generar una curva oscilatoria de apoyo, medida por el sensor de fuerza vertical que dispone el dispositivo. En cambio, la velocidad a la que se desplace el dispositivo debe ser lo más uniforme posible,

siguiendo a la velocidad de desplazamiento del usuario, ya que de esta forma se tendrá una mayor percepción de seguridad al momento de asistir a la marcha.

Inicialmente se busca que el usuario pueda comandar el dispositivo de forma sencilla y sin tener que instrumentarlo, por lo cual se plantea como estrategia de control a un controlador de admitancia. Esta estrategia de control tiene como entrada la fuerza horizontal y el torque leídos por el sensor basado en celdas de carga que posee el bastón.

Adicionalmente se tiene que para ayudar a alguien que necesita un bastón para aumentar su autonomía, la velocidad de desplazamiento del bastón debe ser inmune al apoyo que requiere el usuario, por lo cual se establece implementar a la estrategia de control, la modulación de los coeficientes de fricción de la impedancia en función de la fuerza vertical, que por facilidad se denominará modulación de impedancia. El presente trabajo se enfoca en resaltar la ventaja de implementar la modulación de impedancia en la estrategia de control.

El presente documento se divide en cinco secciones, siendo la introducción la primera, en la segunda sección se presenta la metodología de diseño, donde se muestra el desarrollo de las estrategias de control implementadas. En la sección tres se describen los resultados experimentales enmarcados en un protocolo de pruebas. La cuarta sección consiste en la discusión del presente trabajo y en la quinta sección se tiene las conclusiones del mismo.

II. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En esta sección se presentan las estrategias de control desarrolladas e implementadas en el bastón robotizado del Instituto de Automática (INAUT), cuya fotografía se presenta en la Figura 1. El esquema general de la estrategia de control



Figura 1: Fotografía del bastón robotizado INAUT.

implementada en el dispositivo se presenta en la Figura 2, donde se puede notar que la estrategia de control a implementar consta de tres partes: la modulación de impedancia,

el compensador dinámico y el controlador de admitancia. La modulación de impedancia tiene como entrada la fuerza

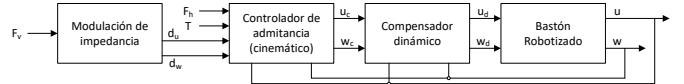


Figura 2: Diagrama de las estrategias de control implementadas

vertical F_v y se tiene como salidas el coeficiente de fricción lineal d_u y angular d_w de la impedancia en función de la fuerza vertical. Estos coeficientes, junto a la fuerza horizontal F_h y el torque T , ingresan al controlador de admittance, que entrega como salida la referencia cinemática de velocidad lineal u_c y velocidad angular w_c . Estas referencias ingresan al compensador dinámico que entrega como salida la referencia dinámica de velocidad lineal u_d y velocidad angular w_d . Las últimas referencias son enviadas al bastón robotizado, el cual las sigue y realimenta a la estrategia de control, la velocidad lineal y la velocidad angular leídas mediante los encoders que posee.

Inicialmente se parte con la premisa de que el bastón robotizado debe seguir al usuario, es decir debe responder a las acciones de control generadas por el usuario. Para esto se plantea el controlador de admittance, tanto para la velocidad lineal (1) y para la velocidad angular (2).

$$u_c = \frac{F_h + \frac{m}{t_s} u}{\frac{m}{t_s} + d_u} \quad (1)$$

$$w_c = \frac{T + \frac{I}{t_s} w}{\frac{I}{t_s} + d_w} \quad (2)$$

Donde: u_c es la referencia de velocidad lineal provista del controlador admitancia, w_c es la referencia de velocidad angular provista del controlador admitancia, u es la velocidad lineal medida desde el robot, w es la velocidad angular medida desde el robot, F_h es la fuerza horizontal, T es el torque, m es la masa ficticia deseada del sistema ($50kg$), I es la inercia ($1kgm^2$), d_u es el coeficiente de fricción de la velocidad lineal, d_w es el coeficiente de fricción de la velocidad angular, t_s es el tiempo de muestreo ($100ms$).

Este controlador de admittance permite generar referencias de velocidad lineal y angular, en función de la fuerza horizontal y torque que el usuario ejerce al interactuar con el dispositivo. Esto con el fin de que la persona pueda controlar el bastón a voluntad, considerando que dicha interacción es modulada mediante la masa ficticia, la inercia y los coeficientes de fricción de las velocidades, para tener una respuesta deseada.

Además se plantea el desarrollo e implementación de un compensador dinámico tanto para la velocidad lineal y angular del bastón robotizado. Para ello se parte de considerar que el modelo dinámico del bastón robótico es el de un robot móvil diferencial no holonómico (3) [14]. El gráfico representativo se muestra en la Figura 3.

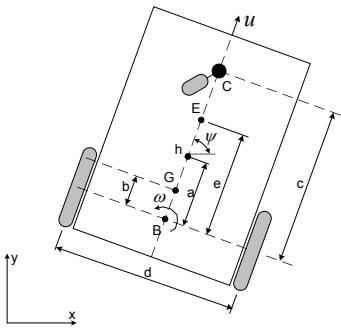


Figura 3: Esquema de un robot móvil diferencial no holonómico [14], [15]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos(\psi) - aw \sin(\psi) \\ u \sin(\psi) + aw \cos(\psi) \\ w \\ \frac{\chi_3}{\chi_1} w^2 - \frac{\chi_4}{\chi_1} u \\ -\frac{\chi_5}{\chi_2} uw - \frac{\chi_6}{\chi_2} w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\chi_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\chi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ w_{ref} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde: x es la posición del punto de interés del robot en el eje x , y es la posición del punto de interés del robot h en el eje y , ψ es la orientación del robot, χ_i son los parámetros del modelo, u_{ref} es la velocidad lineal de referencia, w_{ref} es la velocidad angular de referencia, a es la distancia del centro del eje de las ruedas al punto de interés.

La compensación dinámica se realiza mediante dinámica inversa (4), partiendo del modelo dinámico y sustituyendo las aceleraciones por sus valores deseados más un término que es función del error de velocidad y permite la saturación de dichos errores.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ w_d \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u_c + K_{u_1} \tanh(K_{u_2} u_e) \\ \dot{w}_c + K_{w_1} \tanh(K_{w_2} w_e) \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde:

- u_d : velocidad lineal de referencia, calculada por el compensador dinámico.
- w_d : velocidad angular de referencia, calculada por el compensador dinámico.
- $u_e = u_c - u$: error de velocidad lineal.
- $w_e = w_c - w$: error de velocidad angular.
- $M = \begin{bmatrix} \chi_1 & 0 \\ 0 & \chi_2 \end{bmatrix}$
- $C = \begin{bmatrix} \chi_4 & -\chi_3 w \\ \chi_5 w & \chi_6 \end{bmatrix}$

Para obtener una respuesta del sistema con el menor retardo y que además esta sea aceptable, se establece que las constantes del compensador dinámico tengan los siguientes valores: $K_{u_1} = 25$, $K_{w_1} = 10$, $K_{u_2} = 0,25$, $K_{w_2} = 0,2$.

Con el fin de que el usuario tenga un mayor confort, se desea que bastón robotizado no se desplace con una velocidad oscilatoria, es decir que mantenga una velocidad con poca variación en todo su trayecto. Para ello se plantea adaptar la interacción que se da entre el bastón y el usuario mediante la modulación de los coeficientes de fricción de la impedancia

del controlador de admitancia, tanto para la velocidad lineal y velocidad angular.

Es así que la modulación de impedancia está definida mediante curvas tipo sigmoida, que tiene como entrada la fuerza vertical F_v y como salidas el coeficiente de fricción de la velocidad lineal d_u y el coeficiente de fricción de la velocidad angular d_w , cuyas ecuaciones se presentan a continuación:

$$d_u = 15000 + \frac{5000}{1 + e^{-0,001(F_v - 10000)}} \quad (5)$$

$$d_w = 100 + \frac{400}{1 + e^{-0,001(F_v - 10000)}} \quad (6)$$

Con las estrategias de control implementadas y puestas en marcha, se procede a realizar pruebas de funcionamiento, cuyos resultados se presentan en la siguiente sección.

III. RESULTADOS

Los resultados que se presentan en esta sección se basan en el protocolo de pruebas desarrollado dentro del equipo de investigación en el cual existen ingenieros, bioingenieros y kinesiólogos pertenecientes al INAUT y al Instituto de Bioingeniería (INBIO) de la UNSJ.

Las pruebas experimentales preliminares se realizan en un sujeto sano ya que, al tratarse de un dispositivo del tipo experimental, estas pruebas que se ejecutan tienen varios niveles de dificultad para evaluar la operatividad mecatrónica del dispositivo. Los ensayos clínicos quedarán pendiente para futuros trabajos.

Estas pruebas fueron realizadas en los pasillos de INAUT (camino recto), en donde participó un usuario de sexo masculino de 1.69m de altura, 63kg de peso y 28 años de edad.

III-A. Bastón Robotizado

A continuación se presenta una breve descripción del bastón robotizado que se utiliza en los experimentos, desarrollado en el Instituto de Automática. En la Figura 1 se presenta una fotografía del dispositivo actual, donde se puede notar la empuñadura ergonómica, la cámara web, la reorganización de cables y el recubrimiento en las ruedas para mejorar la tracción. El bastón actualmente es capaz de:

- Capturar y transmitir vídeo a 20FPS con una resolución de 176x144, cuya detección es mediante una webcam AONI.
- Leer y transmitir la lectura de la fuerza vertical a 10Hz (puede aumentar), cuya detección es mediante el sensor de fuerza miniatura HT SENSOR TAS606.
- Leer y transmitir la lectura de la fuerza horizontal y torque a 10Hz (puede aumentar), cuya detección es mediante las celdas de carga HT SENSOR TAL220.
- Leer y transmitir la variación del estado de la marcha a un frecuencia de 10Hz, cuya detección es mediante el láser HOKUYO URG-04LX-UG01.
- Leer y transmitir la velocidad de los motores a un frecuencia de 10Hz (puede aumentar), cuya detección es mediante los encoders Autonics E40S6-1024-6-L-5.

- Controlar la velocidad de los motores reductores IGNIS MR10 B-024056-103, mediante un driver MD22.

Se aprovechó la comunicación mediante ROS para comunicarse con otros dispositivos y así utilizar al máximo la capacidad de procesamiento de cada dispositivo, en este caso se utiliza un computador personal, el mismo que guarda todos los datos obtenidos de las pruebas.

III-B. Protocolo de pruebas

En el protocolo de pruebas se plantearon distintos escenarios, que varían tanto en la dificultad de los mismos, como en la complejidad de la estrategia de control. Es así que se tiene tres escenarios, el primer escenario denominado libre es cuando la persona camina libremente con el bastón (no utiliza la férula y tampoco tiene el camino obstaculizado). El segundo escenario se lo denomina restringido, ya que el usuario utiliza una férula que le restringe el movimiento natural de la pierna obligándolo a apoyarse en el bastón. Finalmente el tercer escenario se denomina obstaculizado, que al igual que en el escenario anterior, el usuario utiliza la férula que restringe el movimiento, pero adicionalmente se colocan obstáculos en el suelo, los mismos que deben ser superados al pisarlos.

El presente trabajo se concentra en las pruebas realizadas en el escenario restringido, ya que es el que más se acerca a la realidad de operación profesional del dispositivo. En base a este escenario se compara la estrategia de control basada en el controlador de admitancia con compensador dinámico y la estrategia de control basada en el controlador de admitancia con compensador dinámico y modulación de impedancia.

III-C. Pruebas experimentales

En esta sección se presentan los gráficos de las señales obtenidas desde el bastón en un tiempo de experimentación de un minuto, para las dos diferentes estrategias de control.

Las gráficas presentadas en la Figura 4 corresponden la estrategia de control basada en el controlador de admitancia con compensación dinámica, en donde se puede notar un patrón de oscilaciones en la fuerza horizontal y vertical debido a que el usuario no siempre requiere el mismo apoyo en todo el trayecto. El torque con esta estrategia de control presenta irregularidades, sin embargo estas variaciones no se ven mayoritariamente reflejadas en la trayectoria del robot. Para el caso de la velocidad lineal, ésta presenta una fuerte irregularidad, pero mantiene su media, se debe resaltar que la velocidad real del robot concuerda (en fase) con la referencia de la misma. De forma similar, la velocidad angular se presenta con múltiples oscilaciones, pero la media se encuentra en cero, debido a que se trata de un movimiento lineal. Mediante esta estrategia de control, la sensación de apoyo hacia el usuario fue mermada ya que el sistema aceleraba un momento después del apoyo (sistema brusco).

Considerando en la estrategia de control a la modulación de impedancia en función de la fuerza vertical se tiene las señales presentadas en la Figura 5. En la misma se puede notar que para el caso de la fuerza vertical, si bien el patrón oscilatorio no se cumple a cabalidad, la media aumenta, esto

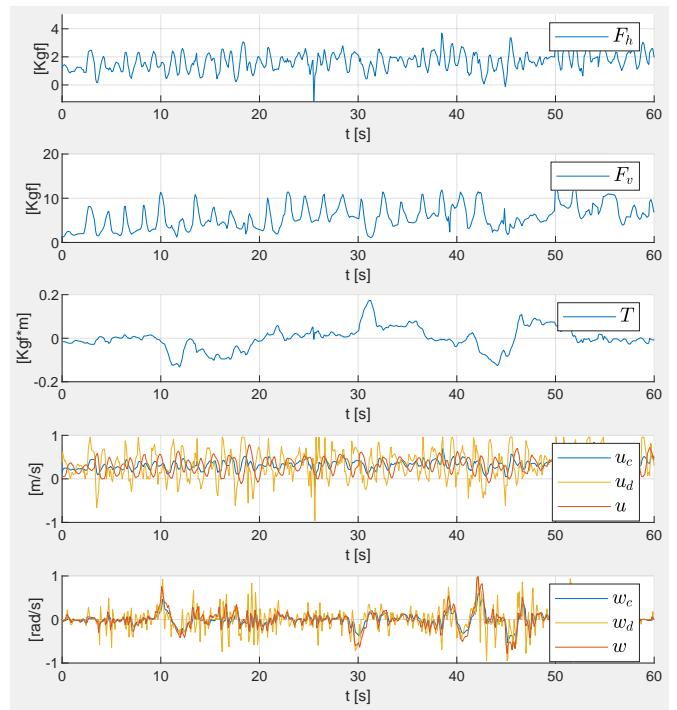


Figura 4: Datos obtenidos en escenario restringido con controlador de admitancia y compensador dinámico.

debido a que la modulación de impedancia produce que el sistema se vuelva más uniforme, generando que el usuario tenga un apoyo constante y firme, es así que no se presentan oscilaciones negativas a la media, que sean muy finas, sino que tiene un corte a forma de un valle. Análogamente la fuerza horizontal, presenta el patrón oscilatorio y también sube su media, esto debido a las mismas causas de percibir que se tiene un mayor apoyo por parte del bastón. En el caso del torque se puede notar que se encuentra muy cercano a cero y no presenta ninguna variación fuerte, esto debido a estabilidad que genera la modulación de impedancia. En este escenario se puede notar que la velocidad lineal se vuelve uniforme, aunque su media haya disminuido. Considerando la velocidad angular, ésta también se mantiene uniforme y cercana a cero. Con esta estrategia de control, se consiguió lo que se esperaba, es decir que se apoye completamente en el bastón, además que este se mueva a una velocidad adecuada y uniforme, asemejándose a un pasamanos infinito.

Al realizar un análisis frecuencial de este escenario, se puede notar que el usuario sigue un patrón de apoyo oscilatorio, en el cual se apoya más cuando el pie que necesita apoyo entra en contacto con el suelo, ya que existe un pico de frecuencia en la fuerza vertical se presenta en ambas estrategias de control (Figura 6). En contraste con esto, el pico que presenta la velocidad lineal prácticamente desaparece cuando se aplica la estrategia de control más completa, esto debido a que con ella se logró que el bastón se desplace con una velocidad lineal uniforme (Figura 7).

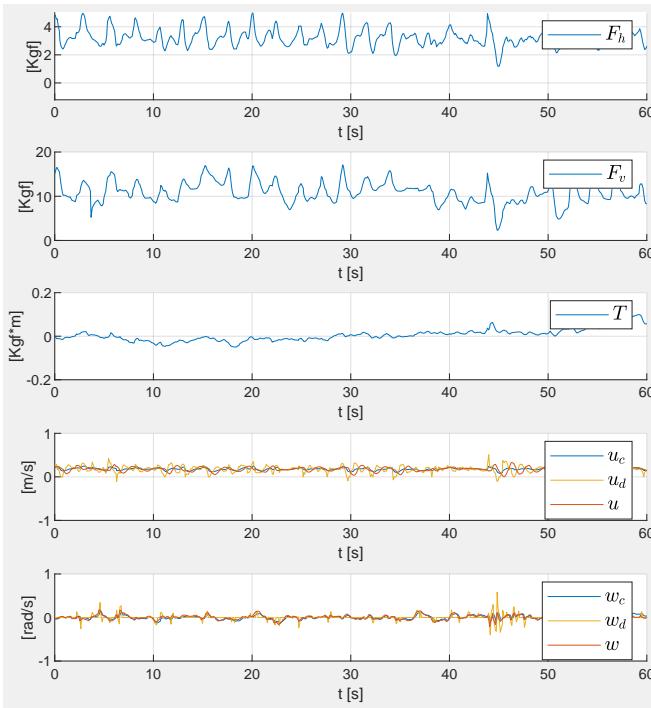


Figura 5: Datos obtenidos en escenario restringido con controlador de admitancia, compensador dinámico y modulación de impedancia.

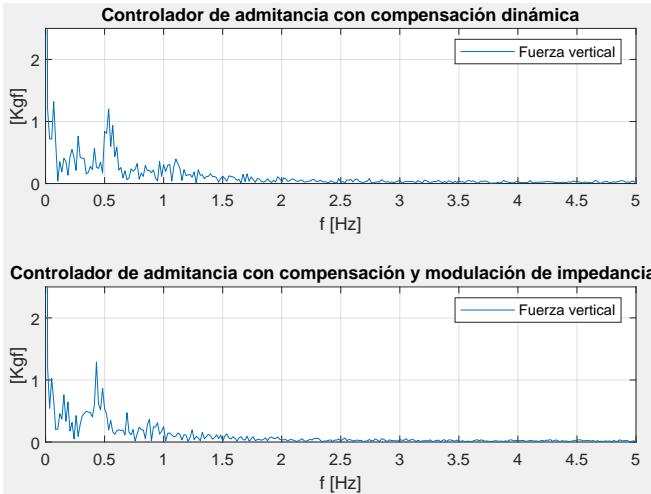


Figura 6: Comparación del análisis frecuencial de las fuerzas verticales obtenidas en escenario restringido.

IV. DISCUSIÓN

Si se compara de forma gráfica las dos diferentes estrategias de control, se tiene la Figura 8, donde se puede notar claramente lo que se expresó anteriormente, pero se resalta que en el caso de la fuerza vertical con el controlador más completo (CA-CD-MI: controlador de admittance con compensación dinámica y modulación de impedancia), ésta sube su media y no desciende completamente en forma de pico, debido a que el usuario tiene un apoyo más parejo. Además, se observa

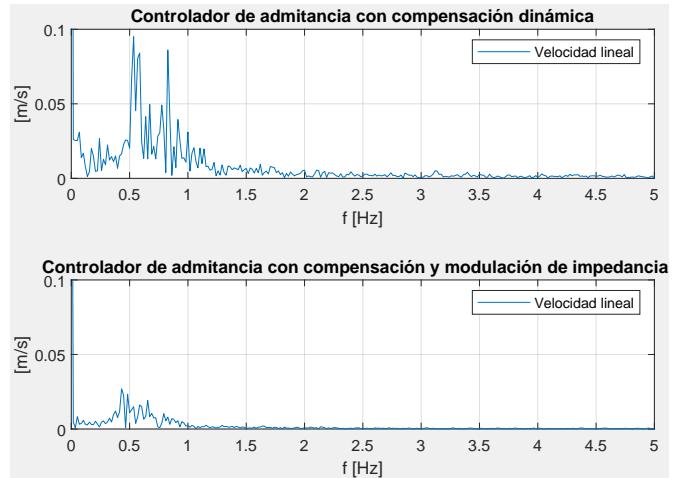


Figura 7: Comparación del análisis frecuencial de las velocidades lineales obtenidas en escenario restringido.

que la velocidad lineal presenta menos oscilaciones en todo el trayecto. Al analizar detalladamente la velocidad lineal en las dos diferentes estrategias de control se tiene la Figura 9, donde se muestra que al incluir la modulación de impedancia, la velocidad lineal presenta menos oscilaciones y está en fase con la referencia, que es lo que se buscaba. Como se mencionó anteriormente, éste es el escenario más cercano a la realidad y al aplicar el controlador de admittance con el compensador dinámico y la modulación de impedancia, se puede notar que el usuario tiene apoyo uniforme, además de ser un dispositivo que lo sigue a cabalidad en sus intenciones de movimiento. En el futuro con los ensayos clínicos se evaluará el dispositivo con usuario reales, esperando obtener como resultado de que el usuario tenga una sensación de mayor confianza en el dispositivo al momento de utilizarlo.

Con los datos obtenidos de estas pruebas se establece que estrategia de control más completa se acomoda más a la forma natural de operación.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo se presentan dos estrategias de control, una basada en un controlador de admittance con compensación dinámica y otra basada en un controlador de admittance con compensación dinámica y modulación de impedancia, siendo esta última la que mejor respuesta tiene frente al protocolo de pruebas.

La dinámica del bastón produce que su respuesta tenga un atraso a la referencia, lo cual es indeseable, es así que en el presente proyecto se planteó un compensador dinámico.

La modulación de impedancia permite tener respuestas rápidas y menos agresivas, aunque la media de velocidad disminuya. Sin embargo esta situación está acorde a un dispositivo de estas características.

En los resultados se muestra cómo las fuerzas y velocidad lineal siguen patrones oscilatorios, ya que se apoyan o dejan de apoyarse dependiendo el estado de la marcha, pero cuando

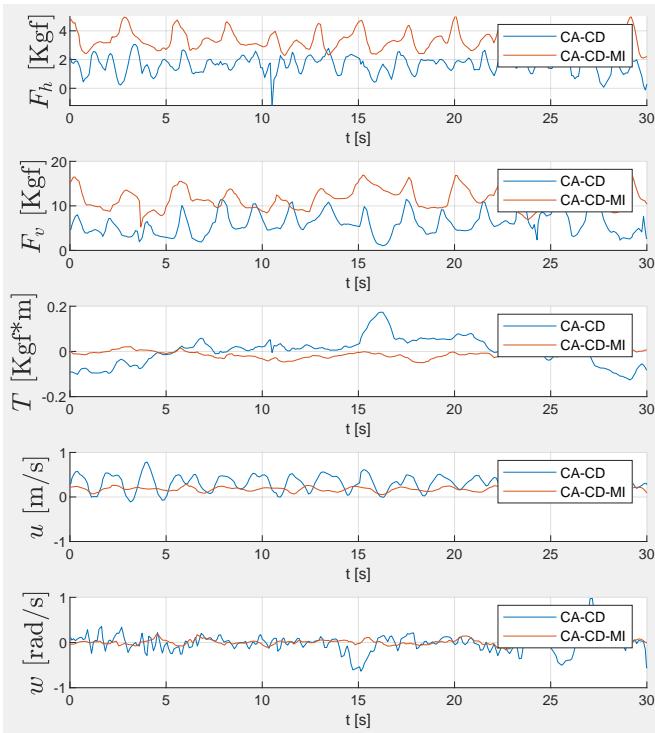


Figura 8: Comparación de los datos obtenidos en escenario restringido.

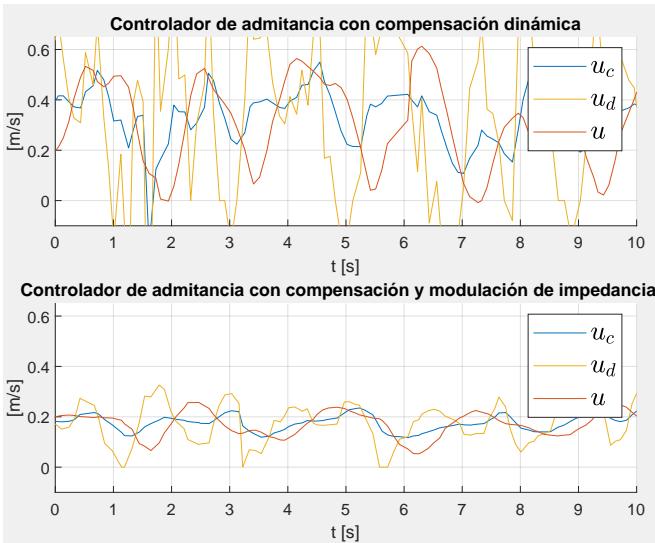


Figura 9: Comparación de las velocidades lineales obtenidas en escenario restringido.

se tiene el controlador más completo, la velocidad lineal se comporta de manera más uniforme.

Realizar un protocolo de pruebas de dispositivos médicos, es un trabajo interdisciplinario, pues este debe cumplir con criterios biomecánicos, como también se debe poder llegar a conclusiones del lado de la ingeniería.

Como trabajo futuro se plantea, mediante los datos obtenidos del láser y el vídeo de la cámara, establecer las fases de

la marcha al momento de utilizar el bastón.

Detectar una caída, antes de que esta suceda, con el objetivo de prevenirla, hasta el momento resulta difícil, pero se plantea aprovechar las múltiples capacidades del dispositivo, para encontrar un algoritmo que ayude en esta tarea y así evitar eventuales episodios de accidente.

Además se plantea como trabajo futuro realizar ensayos clínicos con pacientes, y obtener resultados con validación cuantitativa y basada en encuestas.

REFERENCIAS

- [1] A. Cieza, K. Causey, K. Kamenov, S. W. Hanson, S. Chatterji, and T. Vos, "Global estimates of the need for rehabilitation based on the global burden of disease study 2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019," *The Lancet*, vol. 396, no. 10267, pp. 2006–2017, 2020.
- [2] (2022) GHE: Life expectancy and healthy life expectancy. [Online]. Available: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates/ghe-life-expectancy-and-healthy-life-expectancy>
- [3] (2022) World population clock: 8 billion people (LIVE, 2022) - worldometer. [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/world-population/>
- [4] P. R. Avelino, L. R. Nascimento, K. K. Menezes, A. A. Scianni, L. Ada, and L. F. Teixeira-Salmela, "Effect of the provision of a cane on walking and social participation in individuals with stroke: protocol for a randomized trial," *Brazilian Journal of Physical Therapy*, vol. 22, no. 2, pp. 168–173, 2018.
- [5] S. M. Bradley and C. R. Hernandez, "Geriatric assistive devices," *American family physician*, vol. 84, no. 4, pp. 405–411, 2011.
- [6] R. S. Calabro, G. Sorrentino, A. Cassio, D. Mazzoli, E. Andrenelly, E. Bizzarini, I. Campanini, S. M. Carmignano, S. Cerulli, C. Chisari *et al.*, "Robotic-assisted gait rehabilitation following stroke: a systematic review of current guidelines and practical clinical recommendations," *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, vol. 57, no. 3, pp. 460–471, 2021.
- [7] Ö. Özén, K. A. Buetler, and L. Marchal-Crespo, "Promoting motor variability during robotic assistance enhances motor learning of dynamic tasks," *Frontiers in neuroscience*, vol. 14, p. 600059, 2021.
- [8] D. Pool, J. Valentine, N. F. Taylor, N. Bear, and C. Elliott, "Locomotor and robotic assistive gait training for children with cerebral palsy," *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 63, no. 3, pp. 328–335, 2021.
- [9] R. Cerqueira, J. Pereira, N. F. Ribeiro, and C. P. Santos, "Engineering a safer future: Electronic design and validation of a cane-type robot for fall prevention," in *2023 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*. IEEE, 2023, pp. 193–198.
- [10] Q. Yan, J. Huang, D. Wu, Z. Yang, Y. Wang, Y. Hasegawa, and T. Fukuda, "Intelligent gait analysis and evaluation system based on cane robot," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 30, pp. 2916–2926, 2022.
- [11] Q. Yan, J. Huang, Z. Yang, Y. Hasegawa, and T. Fukuda, "Human-following control of cane-type walking-aid robot within fixed relative posture," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 1, pp. 537–548, 2021.
- [12] H. Lee, A. Eizad, J. Lee, and J. Yoon, "Development and evaluation of a gait assistance system based on haptic cane and active knee orthosis," in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2022, pp. 5419–5425.
- [13] G. Neves, J. S. Sequeira, and C. Santos, "Development of a robotic cane for mild locomotion assistance," in *International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications*. Springer, 2021, pp. 157–168.
- [14] C. De La Cruz and R. Carelli, "Dynamic modeling and centralized formation control of mobile robots," in *IECON 2006-32nd annual conference on IEEE industrial electronics*. IEEE, 2006, pp. 3880–3885.
- [15] M. Monllor, F. Roberti, J. M. Toibero, R. Carelli, and A. F. Neto, "Design of a robotic cane to assist people with disabilities," in *2015 XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*. IEEE, 2015, pp. 1–6.