

**Desarrollo de una estrategia de control orientada al uso clínico para
caminadores inteligentes**

Rubén Darío Ferro Rugeles

Trabajo de Grado

Tutor

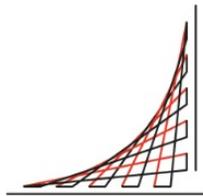
Prof. Dr. Carlos Andrés Cifuentes García

Cotutor

Prof. Dra. Marcela Cristina Múnera Ramírez



**Universidad del
Rosario**



**ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA
BOGOTÁ D.C
2021**

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres Rubén Darío Ferro, Ana Lucia Rugeles y mi hermana Viviana Lucia Ferro por todo su apoyo y amor, que me brindaron durante todo el desarrollo de mi carrera, donde cada día me motivaban a ser mejor, a cumplir mis metas, sueños y ser una mejor persona.

De igual manera, les quiero agradecer a todos los profesores de la Universidad del Rosario y la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por sus enseñanzas a lo largo de esta carrera. Especialmente a los profesores Dr. Carlos Andrés Cifuentes García, Dra. Marcela Cristina Múnera Cristina Ramírez y MSc Sergio David Sierra Marín, por su constante apoyo, consejos y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto de grado, al igual que durante algunas asignaturas me brindaron las herramientas y el conocimiento para afrontar este trabajo de grado. Finalmente, quiero agradecer a Juan Sebastián Moreno Escobar y Laura Alejandra Neira Lagos por su colaboración y apoyo durante el transcurso de toda la carrera.

Resumen

Actualmente la población está envejeciendo con mayor rapidez, lo que lleva a que más personas tengan dificultades para caminar, debido a los procesos degenerativos naturales de la vida. Por otro lado, existe un porcentaje importante de personas que padecen algún tipo de enfermedad o discapacidad que limita sus procesos de locomoción. Por ello, los avances tecnológicos, especialmente en robótica móvil, han apostado por dispositivos de asistencia para esta población. A partir de esto, han surgido caminadores inteligentes, dispositivos que involucran sensores, sistemas de control y diferentes componentes electrónicos en su estructura mecánica. En este trabajo, inicialmente se presenta los resultados de un estudio de evaluación de percepción con personal de salud y rehabilitación, con la finalidad de obtener su opinión acerca de los caminadores inteligentes, sus características y su impacto en terapias de rehabilitación y asistencia. La obtención de la percepción se realizó a través de un cuestionario basado en el cuestionario estándar *Quest (Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology, Version 2.0)*. De este estudio se encontraron distintas necesidades, orientadas a la seguridad principalmente e interacción del caminador con el usuario. Se evidenció que los parámetros de seguridad con un porcentaje de 58.62%, fueron más determinantes para los profesionales de la salud, contra otro tipo de parámetros como diseño, dimensiones, peso, entre otros que presentan los caminadores inteligentes.

Posteriormente, para el segundo estudio, se seleccionaron 4 preguntas del primer estudio enfocadas a parámetros de seguridad, modalidades y sistemas de monitoreo, seguridad y navegación, a las cuales se les aplicó un análisis estadístico y la prueba de Friedman, para obtener diferencias significativas con la finalidad de tener un criterio de diseño más exacto y profundo, para diseñar una estrategia de control orientada al uso clínico. Para las 4 preguntas, el valor p obtenido fue menor a el nivel de significancia α cuyo valor se fijó en 0.05, resultados que evidenciaban que existen diferencias significativas entre todas las categorías de las preguntas seleccionadas.

Con base a los resultados de las 4 preguntas seleccionadas y teniendo en cuenta la prueba de Friedman y el análisis estadístico descriptivo, se diseñó una estrategia de control, que se adaptaba a las necesidades encontradas en primer estudio del proyecto. La estrategia de control diseñada involucraba un sistema de detección de obstáculos, con un sistema de frenado de emergencia y dos tipos de realimentación para el usuario, que son realimentación auditiva, por medio de alarmas y comentarios audibles y realimentación visual por medio de alarmas visibles. Con la finalidad de validar la estrategia diseñada, se construyó un mundo virtual, donde se evaluaría la estrategia mediante la simulación de un caminador inteligente. El mundo virtual correspondía a una pista con diferentes tipos de obstáculos, con los cuales interactuaría el caminador inteligente.

Finalmente, el tercer estudio, buscaba analizar la usabilidad de la estrategia de control diseñada en usuarios sanos, los cuales manipulaban el caminador inteligente en el entorno virtual diseñado. En este estudio, se utilizó el cuestionario de usabilidad y aceptación *QUEAD (A Questionnaire for the Evaluation of Physical Assistive Devices, Version 1.0)*, del cual se obtuvo que usabilidad percibida, actitud y comodidad, categorías preguntadas frente a la estrategia de control utilizada por los participantes del estudio, fueron lo que más destacaron en los resultados del cuestionario relacionado a la prueba.

Lo expuesto anteriormente en los tres estudios realizados para este proyecto, permitieron concluir que para los profesionales de la salud y rehabilitación les parece que los caminadores

inteligentes deben principalmente enfocarse en parámetros de seguridad, apoyando y facilitando el proceso de movilidad de los usuarios con problemas de locomoción. De igual manera, se evidenció tanto en la literatura como en el estudio de percepción que los sistemas de detección de obstáculos son indispensables en los caminadores inteligentes. Igualmente, este tipo de sistemas deben ser integrados con otro tipo de ayudas y medidas de seguridad para lograr mantener la seguridad de los usuarios lo más alta posible. Esto se vio evidenciado en la estrategia de control diseñada para este proyecto, donde se incluían realimentaciones visibles y audibles para guiar a los usuarios y se incluía un sistema de frenado de emergencia para minimizar lo más posible, que el caminador presentara una colisión con un obstáculo, ya que esto presenta un escenario de bastante riesgo por la posibilidad de que se presente una caída.

Palabras clave: Asistencia, caminadores inteligentes, cuestionarios de percepción, estrategias de control, marcha humana, profesionales de la salud, usabilidad, rehabilitación, robots móviles.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Proyecto relacionado	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos	3
1.4. Contribución	4
1.5. Organización del documento	4
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Marcha humana	6
2.2. Marcha patológica	7
2.3. Dispositivos de asistencia a la movilidad	9
2.4. Caminadores inteligentes	10
2.4.1. Asistencia física	16
2.4.1.1. Soporte pasivo	17
2.4.1.2. Soporte activo	17
2.4.2. Asistencia sensorial	17
2.4.2.1. Sistema de detección de obstáculos (Seguridad)	17
2.4.2.2. Sistema de detección de caídas (Seguridad)	17
2.4.2.3. Sistema de detección de velocidad del caminador (Seguridad)	18
2.4.2.4. Sistema de detección de descensos y escaleras (Seguridad)	18
2.4.2.5. Sistema de monitoreo de marcha del usuario (Monitoreo biomecánico)	19
2.4.2.6. Sistema de monitoreo de salud del usuario (Monitoreo biomecánico)	19
2.4.2.7. Sistema de seguimiento de ruta (Navegación y guía)	20
2.5. Estrategias de control	20
2.5.1. Control basado en detección de intención de movimiento	21
2.5.2. Controlador de lógica difusa	21
2.5.3. Controlador cinemático	22
2.5.4. Controlador de admitancia	23
2.5.5. Controlador de impedancia	23

3. METODOLOGÍA	25
3.1. Identificación de características esenciales en caminadores inteligentes	25
3.1.1. Desarrollo de la página web y cuestionario de percepción	25
3.1.2. Desarrollo del protocolo	27
3.1.3. Participantes	27
3.1.4. Análisis de los datos	28
3.1.5. Definición de variables	28
3.1.5.1. Características físicas de los caminadores inteligentes	28
3.1.5.2. Características funcionales de los caminadores inteligentes	29
3.2. Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas	30
3.2.1. Obtención de las necesidades del cuestionario de percepción	30
3.2.2. Principios teóricos y descripción del diseño de la estrategia de control	31
3.2.3. Herramientas utilizadas para el diseño de la estrategia de control	35
3.3. Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en pacientes no patológicos	36
3.3.1. Desarrollo del protocolo experimental	36
3.3.2. Participantes	37
3.3.3. Análisis de datos del cuestionario de usabilidad	37
3.3.4. Definición de variables	37
3.3.4.1. Variables de realimentación de la estrategia de control	38
3.3.4.2. Variables del estudio de usabilidad y aceptación	38
4. RESULTADOS	40
4.1. Identificación de características esenciales en caminadores inteligentes	40
4.1.1. Respuestas de las preguntas para el diseño de la estrategia de control.	42
4.2. Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas	44
4.2.1. Hardware de la estrategia de control	46
4.2.2. Software de la estrategia de control	48
4.2.3. Simulación de la estrategia de control	50
4.3. Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en pacientes no patológicos	52
5. DISCUSIÓN	54
5.1. Identificación de las características esenciales en caminadores inteligentes	54
5.2. Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas	55
5.3. Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en usuarios no patológicos	57
6. CONCLUSIONES	59
7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	68

Índice de figuras

2.1. Fases del ciclo de la marcha [18].	7
2.2. Diagrama de bloques de la estrategia de control estimación del movimiento humano [41]	21
2.3. Diagrama de bloques de la estrategia de control basada en la lógica difusa [47]	22
2.4. Diagrama de bloques de la estrategia de control cinemático [74]	22
2.5. Diagrama de bloques de la estrategia de control de admitancia [75]	23
2.6. Diagrama de bloques de la estrategia de control de impedancia [79]	24
3.1. Descripción del caminador JARoW en la página web.	26
3.2. Diagrama sobre las principales necesidades encontradas en el cuestionario. . . .	31
3.3. Joysticks simulando los soportes de antebrazo del caminador.	32
3.4. Diagrama de bloques de la estrategia planteada.	34
3.5. Mundo diseñado en el entorno virtual.	35
3.6. Vista en primera persona del mundo virtual.	35
3.7. Arquitectura de la estrategia de control hardware (amarillo) y software (azul).	36
3.8. Configuración de la prueba de usabilidad.	37
4.1. Respuesta sobre características de caminadores inteligentes.	42
4.2. Respuesta sobre modalidades de caminadores inteligentes.	43
4.3. Respuesta sobre sistemas de sistemas de monitoreo, seguridad y navegación de caminadores inteligentes.	43
4.4. Respuesta sobre elementos de seguridad de caminadores inteligentes.	44
4.5. Diagrama de bloques de la estrategia de control diseñada.	46
4.6. Control con 2 joysticks para realizar el movimiento del caminador.	46
4.7. Alarmas visibles de la estrategia de control.	46
4.8. Hardware de la estrategia de control.	47
4.9. Participante en el entorno del experimento.	48
4.10. Diagrama de los nodos y tópicos de la estrategia de control en ROS.	48
4.11. Recorrido realizado por el caminador inteligente.	50
4.12. Trayectoria recorrida por el caminador.	51
4.13. Orientación del caminador.	51
4.14. Posición en el eje X del caminador.	51
4.15. Posición en el eje Y del caminador.	51
4.16. Velocidad lineal del caminador.	52
4.17. Velocidad angular del caminador.	52
4.18. Respuestas del cuestionario de usabilidad.	52

4.19. Escala de aceptación Likert. 53

Índice de tablas

2.1. Tipos de marchas patológicas con sus causas y consecuencias.	8
2.2. Dispositivos de asistencia a la movilidad con su propósito y características [29].	9
2.3. Caminadores inteligentes relevantes de la literatura.	16
3.1. Temas sobre el Cuestionario criterios de diseño de caminador robótico	27
3.2. Categorías evaluadas en el cuestionario de usabilidad	38
4.1. Distribución de respuestas por país	40
4.2. Datos demográficos de la población que participo en el estudio	41
5.1. Caminadores inteligentes con funcionalidades similares a las de la estrategia de control.	56

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Este primer capítulo presenta la motivación general, el proyecto relacionado y los objetivos del trabajo presentado en esta tesis. La motivación de este trabajo incluye las estadísticas mundiales de las patologías que afectan la marcha humana, las ventajas del uso de la robótica en terapias de rehabilitación y asistencia y la importancia de utilizar caminadores inteligentes para ayudar en estos procesos a los pacientes y profesionales de la salud. El proyecto se divide en tres estudios, uno de percepción de caminadores inteligentes por parte del personal de salud y rehabilitación, uno de diseño de la estrategia de control, y finalmente, uno de evaluación de usabilidad y aceptación de la estrategia diseñada en usuarios no patológicos. Es importante resaltar que la evaluación de usabilidad de la estrategia, se realizó por medio de una simulación de un caminador inteligente que se movilizaba en un mundo virtual. A partir de los tres estudios anteriores, se presentan los objetivos del proyecto, además de los aportes y la organización del documento.

1.1 Motivación

El proceso de movilidad humana está a cargo del sistema músculoesquelético, el sistema óseo y el sistema nervioso, los cuales se encargan de ejecutar y planificar los eventos de la marcha humana, sin embargo, esta puede verse afectada por una serie de discapacidades y limitaciones [1]. De acuerdo con la Organización mundial de la salud se estima que el 15 % de la población mundial actual sufre algún tipo de discapacidad, dichas limitaciones incrementan significativamente en la población de la tercera edad [2] y se estima que la población mundial, va a aumentar a mayores de 60 años entre un 12 % y 22 % para el año 2050 [3].

Existen diferentes patologías que pueden generar marchas patológicas donde, algunas de las principales causas son los accidentes cerebrovasculares (ACV), la parálisis cerebral (PC) y las lesiones de la médula espinal (LME) [4]. Estas condiciones y trastornos son la causa más frecuente de alteración de la locomoción en personas de 65 a 84 años [5].

Alrededor de 15 millones de personas sufren un ACV a nivel mundial, donde el 33 % de esta población queda con algún tipo de limitación que perjudica el desarrollo de sus actividades diarias, lo que lleva a una disminución de su calidad de vida [6]. En el caso de la LME, entre 250.000 y 500.000 personas en todo el mundo sufren de esta condición cada año [7] y el número de personas que sufren de parálisis cerebral en todo el mundo se encuentra alrededor de 1,5 a 4 de cada 1000 bebés nacidos, lo cual genera una condición significativa a lo largo de sus vidas [8].

La población que presenta estas patologías generalmente sufre secuelas como deterioro motor, daños en la postura, problemas cognitivos [9], falta de equilibrio, pérdida de la coordinación muscular (ataxia), marchas anchas o asimétricas y aumento del tono muscular (espasticidad) [10]. Estas patologías comprometen severamente el desarrollo de una marcha normal y afectan el desarrollo de las actividades diarias de las personas, generando una limitación. Alrededor del 29,3 % de personas con discapacidad presentan una limitación permanente relacionada a los patrones de la marcha [11]. Estos datos mencionados anteriormente, representan un desafío para los dispositivos de asistencia, ya que deben ser amigables y eficientes con el usuario. Debido a que los pacientes que padecen de estas patologías presentan diferentes condiciones, algunos de los dispositivos actuales no logran suplir satisfactoriamente las necesidades de estas personas.

Las ayudas para la movilidad, como muletas, sillas de ruedas y bastones, son sencillas y por lo general de fácil acceso para los pacientes; sin embargo, entre sus desventajas están la incapacidad de reducir el gasto energético y la posibilidad de sufrir caídas [4]. También existen otros dispositivos de asistencia, unos de ellos son los caminadores convencionales, los cuales utilizan la capacidad de locomoción de las personas para ayudar al movimiento y mejorar los eventos característicos de una marcha patológica, proporcionando una base de apoyo y mejorando el equilibrio [12].

No obstante, estos dispositivos han sido asociados con caídas y lesiones, ya que el acto de levantar y avanzar con el dispositivo puede resultar en la desestabilización de las fuerzas biomecánicas, lo que conduce a un desequilibrio, y por lo tanto, aumenta el riesgo que se presente una caída [12].

Las caídas se definen como acontecimientos involuntarios que hacen perder el equilibrio y dar con el cuerpo en tierra u otra superficie firme que lo detenga. Las lesiones relacionadas con las caídas pueden ser mortales [13]. El factor de la caída de la población es un problema grave, las caídas son la segunda causa mundial de muerte por lesiones accidentales o no intencionales. Se calcula que anualmente mueren en todo el mundo unas 646 000 personas debido a caídas, y más de un 80 % de esas muertes se registran en países de bajos y medianos ingresos [13]. Los mayores de 65 años son quienes sufren más caídas mortales [13]. Cada año se producen 37,3 millones de caídas cuya gravedad requiere atención médica [13]. Por estos motivos, las estrategias preventivas deben hacer hincapié en la educación, la capacitación, la creación de entornos más seguros, la priorización de la investigación relacionada con las caídas y el establecimiento de políticas eficaces para reducir los riesgos [13].

Sierra et al, ha demostrado que los caminadores inteligentes son una alternativa que promete tener excelentes resultados para estas problemáticas, ya que incluyen alta tecnología, sistemas de control y sensores, los cuales pueden brindar funcionalidades significativas para minimizar riesgos, potenciar terapias de rehabilitación, disminuir el gasto energético y brindar auto independencia monitorizada [4]. Estos dispositivos permiten detección y evasión de obstáculos, monitoreo de la salud del usuario, localización, análisis de marcha, identificación de intención de movimiento, una avanzada interfaz humano-robot, entre otros [12], [14].

Dichas características ayudan significativamente a mejorar a experiencia del usuario cuando utiliza el dispositivo, así como brindando mayor seguridad estabilidad y equilibrio [12]. Además de esto, los caminadores inteligentes, cuentan con herramientas de apoyo físico, las cuales se complementan con la asistencia sensorial para proporcionar una mejor estabilidad de la marcha y seguridad para el usuario [12].

En este contexto, este proyecto tiene como objetivo presentar una estrategia de control que

sea adaptable a un caminadores inteligente, basada en la opinión de los profesionales del área clínica y de la rehabilitación. De esta forma, se propone un estudio de percepción el cual pueda brindar bases sólidas en el diseño de caminadores inteligentes y estrategias de control adaptables a estos dispositivos, con la finalidad de lograr cumplir la demanda y la necesidad actual del personal que ayuda en los procesos de rehabilitación. Además, el presente trabajo tiene como objetivo realizar y reportar una primera evaluación de usabilidad de la estrategia diseñada a partir de una simulación de un caminador inteligente en usuarios sanos.

1.2 Proyecto relacionado

El grupo de investigación GiBiome de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la universidad del Rosario se tiene una línea en la cual se desarrollan diferentes proyectos con el fin de resolver problemas médicos en el campo de la rehabilitación. Uno de los objetivos de estas líneas es desarrollar soluciones que tengan un impacto real en el sector clínico, gracias a una interacción constante entre investigadores del área de la salud y la ingeniería para resolver problemas médicos. De igual manera, en este grupo se brindan soluciones que incluyen el procesamiento de señales, ingeniería de rehabilitación, mecánica y electrónica con el objetivo de brindar una solución más completa para los especialistas de salud. El grupo de investigación se encuentra clasificado A en Minciencias.

El proyecto de investigación "Desarrollo de una plataforma de robótica adaptable para asistencia y rehabilitación de marcha AGoRA"(MinCiencias grant 801-2017), tiene como finalidad desarrollar y estudiar en el sector médico, la implementación de una plataforma robótica ajustable, la cual es usada en procesos de rehabilitación, apoyo y asistencia de la marcha. Esta plataforma se compone por dos dispositivos: un caminador inteligente y un exoesqueleto activo. La plataforma está enfocada en la interacción entre el usuario y el dispositivo robótico de asistencia. Esta relación tiene un impacto muy significativo, debido a que agrupa la interacción cognitiva y física del paciente, obteniendo la información del ambiente en donde se encuentra el usuario con la finalidad de interactuar de manera natural con el dispositivo robótico, brindando una mayor seguridad, navegación en el entorno de rehabilitación, estabilidad y soporte durante la marcha asistida. Con el desarrollo de este proyecto se espera apoyar a los dispositivos de asistencia robótica en trastornos como la marcha patológica. De este modo la plataforma pretende potenciar e innovar las terapias de rehabilitación convencionales, logrando ayudar los procesos clínicos de rehabilitación.

1.3 Objetivos

1.3.1. General

Identificar las características más relevantes de los caminadores inteligentes para los profesionales de la salud del sector clínico y desarrollar un sistema de control orientado a las necesidades clínicas encontradas anteriormente.

1.3.2. Específicos

1. Realizar una revisión de literatura para entender las características más relevantes de los caminadores inteligentes en rehabilitación y asistencia junto con sus estrategias de control.

2. Diseñar un cuestionario de percepción de tecnología de asistencia e implementarlo con profesionales de la salud del sector clínico.
3. Diseñar y desarrollar un sistema de control orientado a las necesidades encontradas en el cuestionario de percepción.
4. Evaluar la usabilidad del sistema de control en usuarios no patológicos usando una simulación de un caminador inteligente.

1.4 Contribución

Con el desarrollo de este trabajo de investigación de pregrado se presentan las siguientes contribuciones en el campo de la rehabilitación robótica:

- Una sección en la página web del centro en investigación en biomecatrónica que describe a detalle los caminadores inteligentes más relevantes de la literatura, con sus principales características y funcionalidades.
- La percepción de los profesionales de la salud y rehabilitación con respecto a los caminadores inteligentes y cuáles de sus características resultan de mayor importancia desde su punto de vista.
- Una estrategia de control para caminadores inteligentes, basada en la percepción de los profesionales de la salud y la rehabilitación.
- La evaluación de usabilidad y aceptación de la estrategia de control diseñada con usuarios no patológicos, realizada en un entorno virtual, utilizando la simulación de un caminador inteligente.

1.5 Organización del documento

En esta sección se presenta como está organizado este trabajo de grado

- En el capítulo 2 se encuentra la revisión de literatura de diferentes estudios de investigación acerca de caminadores robóticos, sus características principales tanto físicas como sensoriales y los sistemas de control que estos utilizan en diferentes funcionalidades brindadas en rehabilitación y asistencia de la marcha humana.
- En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para la realización de los tres estudios principales de este proyecto. El primero con el objetivo de obtener la información necesaria sobre las necesidades clínicas usando caminadores inteligentes, el segundo con el objetivo de explicar cómo fue el proceso de diseño de la estrategia de control orientada a las necesidades encontradas en el primer estudio. Finalmente, el tercero describe como fue el proceso de evaluar la usabilidad de la estrategia utilizando la simulación de un caminador inteligente en un entorno virtual, con usuarios no patológicos.
- En el capítulo 4 se muestra la información organizada y procesada de los datos obtenidos, así como los análisis estadísticos utilizados para dar respuesta al problema de investigación planteado. De igual manera se presenta la estrategia de control diseñada e implementada y los resultados de las pruebas de usabilidad aplicadas a esta.

- En el capítulo 5 se presenta una discusión de los resultados comparando lo que se encuentra en la literatura con lo que se obtuvo del proyecto.
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados obtenidos de los tres estudios.
- En el capítulo 7 se ilustran los trabajos futuros que se recomiendan teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

Este capítulo presenta una perspectiva teórica sobre la marcha humana y la marcha patológica, presentando algunos de los tipos de marcha patológica más comunes. Posteriormente se introducen algunos dispositivos de asistencia a la movilidad con sus características y propósito. Finalmente, se presenta una revisión bastante profunda sobre caminadores inteligentes, con sus características en detalle, al igual que las diferentes funcionalidades tanto físicas como sensoriales que están presentes en estos dispositivos. De la misma manera, se presentan algunas estrategias de control utilizadas por los caminadores inteligentes. Igualmente, se introducen los caminadores inteligentes actuales más relevantes de la literatura con las funcionalidades que estos brindan y sus sensores.

2.1 Marcha humana

La marcha bípeda es una forma característica de desplazamiento del ser humano, la cual lo diferencia del resto de las especies animales [15]. Esta se describe como un conjunto de movimientos rítmicos y alternantes de las extremidades inferiores y del tronco, permitiendo el desplazamiento del cuerpo a través de la acción coordinada de cada uno de los componentes que conforman el sistema locomotor humano [16]. En el estudio de la marcha, un componente utilizado para su análisis es el ciclo de la marcha, el cual se define como el proceso que se analiza desde el primer contacto del talón de una pierna de referencia hasta el siguiente contacto del talón de la misma pierna [16].

El ciclo que se muestra en la figura 2.1, está compuesto por dos fases principales: La fase de apoyo la cual dura el 62 % del ciclo y la fase de balanceo que dura el 38 % restante [17]. De igual manera, las variables cinemáticas ayudan el estudio de la marcha, al describir el desplazamiento del cuerpo mediante el registro de los cambios angulares de las articulaciones y los movimientos rotativos de los segmentos corporales [16]. Estas variables de igual forma, se encargan en el registro de la longitud de paso y la velocidad del movimiento [16].

En el patrón de marcha normal siempre hay un pie apoyado en el suelo de manera estática y otro avanzando en el aire de manera dinámica, cuando un pie está apoyado el otro está en fase de despegue, de tal manera que cuando uno es estático el otro es dinámico y viceversa. Esto puede ser descrito y analizado mediante un conjunto de patrones dinámicos que se obtienen en un laboratorio de marcha [17]. Con la información obtenida en los laboratorios de marcha se permite el desarrollo de diferentes modelos que realizan una descripción más completa del movimiento [16]. Actualmente, existen diversos modelos que describen la marcha humana

incluyendo la dinámica del movimiento, inspirados en la morfofisiología del sistema locomotor [16].

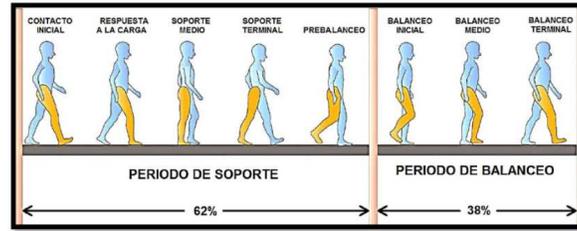


Figura 2.1: Fases del ciclo de la marcha [18].

2.2 Marcha patológica

La marcha humana puede verse afectada por un conjunto de traumatismos y patologías que modifican notablemente la dinámica natural de la marcha [16]. Estas afectaciones producen un deterioro de la marcha normal que se denomina marcha patológica [17]. Este tipo de marcha se define como una afectación en uno o más de los actores que intervienen en el movimiento humano [17]. En la mayoría de los casos este tipo de limitaciones se presenta cuando ocurre una falla en alguno o varios de los sistemas relacionados con el movimiento ya sea el sistema nervioso, el sistema muscular o el sistema óseo [17].

Las personas mayores generalmente sufren más trastornos de la movilidad, debido a que la edad provoca una serie de cambios en la movilidad [12]. Con el avance de la edad, la velocidad tiende a disminuir ligeramente, y se cree que esto aumenta la eficiencia del movimiento corporal, ya que se gasta menos energía por zancada [12]. De igual manera una disminución de la velocidad y la longitud también puede desempeñar un papel en la maximización del equilibrio y la estabilidad y ser una forma natural de ayudar a prevenir el riesgo de caída [19].

Sin embargo, los trastornos de la movilidad, definidos como una marcha lenta, asimétrica, con pérdida de fuerza y coordinación muscular, no son necesariamente una consecuencia inevitable del envejecimiento, sino que reflejan algunas consecuencias de enfermedades neurológicas y no neurológicas que generalmente son relacionadas con la edad [12].

El desarrollo de un trastorno de la marcha es un inconveniente significativo, que puede conducir a un importante factor de riesgo de caídas y lesiones [19], [20]. El peligro de caídas en las personas mayores se debe a la alta susceptibilidad hacia las lesiones causadas por enfermedades predominantes, como la osteoporosis o la reducción de los reflejos de protección [12]. De igual manera al riesgo directo de lesiones relacionadas con fracturas graves o traumatismos craneales [12]. Igualmente otra consecuencia de las caídas es la reducción de la movilidad y la pérdida de confianza en sí mismo de la persona [12].

Se estima que el 20 % de las personas mayores tienen algún tipo de dificultad para movilizarse o requieren de ayuda y asistencia externa para poder caminar y desplazarse [21]. Por lo cual, existen terapias para la rehabilitación de la marcha que implican la acción de caminar con dispositivos de ayuda como órtesis y otros soportes de asistencia según sea el necesario [22]. Sin embargo, el porcentaje de pacientes que logran procesos de rehabilitación significativos se sitúa entre el 40 % y el 50 % [23]. Generalmente, los individuos tienen procesos de rehabilitación diferentes, mientras que algunos no consiguen recuperar un patrón de marcha normal,

otros lo hacen tras años de terapia [22]. No obstante, en la mayoría de los casos, las personas que logran recuperarse de ciertas lesiones siguen necesitando la ayuda de dispositivos de asistencia para recorrer largas distancias y desplazarse de manera autónoma [24].

Como se mencionó con anterioridad, los problemas de locomoción no son solamente asociados a una patología, puesto que por lo general, su causa puede ser multivariable y progresiva, lo que conlleva y potencia patrones de marcha anormales [25]. Con base en las características distintivas de la marcha normal, es posible conocer y distinguir las distintas marchas patológicas que existen según las causas que las generan, estas se presentan en la tabla 2.1.

Tipo de marcha	Causas más comunes	Consecuencias
Marcha Atáxica	Problema en el sistema nervioso central (SNC) (ataque en el cerebelo)	Pérdida de coordinación de las extremidades Desplazamiento del centro de gravedad Desestabilización y pasos lentos e inestables [16], [22]
Marcha Hemiparética	Lesión de una vía piramidal del SNC	Marcha lenta, apoyada sobre un solo miembro Aumento de tono muscular y alteraciones posturales Desplazamiento del centro de gravedad [16], [26]
Marcha Parkinsoniana	Lesión del SNC	Marcha lenta con pasos arrastrados Desplazamiento del centro de gravedad Inestabilidad postural [16], [27]. [28]
Marcha Balanceante	Paresia en los músculos de la cintura pélvica	Balanceo lateral Sobrecarga de una sola pierna [26], [27]
Marcha Estepante	Lesión de un nervio periférico (ciático poplíteo externo)	Dificultad en la dorsiflexión En algunos casos pie caído Apoyo solo con la punta del pie [16], [27]
Marcha Paretica	Lesión de las 2 vías piramidales del SNC	Desplazamiento del tronco hacia adelante Inclinación de las rodillas hacia adentro Pérdida de control muscular Incapacidad de iniciar la fase de despegue [16]

Tabla 2.1: Tipos de marchas patológicas con sus causas y consecuencias.

Como se presentó en la tabla 2.1, existe una variedad de tipos de marchas patológicas, que pueden afectar significativamente los procesos de movilidad de las personas y generar condiciones de limitación que generalmente no se pueden rehabilitar en su totalidad. De igual manera existen otros tipos de alteraciones en la marcha natural, sin embargo estas no se consideran patológicas, sino parte del proceso degenerativo del cuerpo humano especialmente con la vejez de las personas [16].

2.3 Dispositivos de asistencia a la movilidad

Las Tecnologías de Asistencia de Marcha (TAM), son utilizadas para brindar asistencia, en procesos de rehabilitación de pacientes con alguna condición de discapacidad motora, por esta razón se busca brindar herramientas que otorguen seguridad, estabilidad, soporte y asistencia a los usuarios [12]. De esta manera, identificar las necesidades de los pacientes y del personal de salud ayuda a potenciar los procesos de rehabilitación. Por tal motivo, se han desarrollado diferentes estrategias y dispositivos para ayudar a las personas que necesitan apoyo en sus procesos de movilidad [29]. En la tabla 2.2 se muestran algunos dispositivos de ayuda a la movilidad, como muletas, sillas de ruedas y bastones, los cuales se consideran sencillos y suelen ser fácilmente accesibles para los pacientes. De igual manera se presentan los caminadores convencionales que utilizan la capacidad de locomoción de las personas para ayudar al movimiento y mejorar las características de la marcha patológica, proporcionando una base de apoyo y mejorando el equilibrio [24].

Dispositivos de asistencia a la movilidad	Propósito	Características
Sillas de ruedas	Transporte	Dos ruedas frontales Dos ruedas traseras Apoyapiés Apoyabrazos Manijas Asiento
Muletas	Soporte y movimiento	Almohadilla axilar Soporte Manijas Tapa de extremo Altura ajustable Tubo de estructura
Bastones	Soporte y movimiento	Manija Tubo de estructura Tapa de extremo
Caminadores convencionales	Soporte y movimiento	Tubos de estructura Manijas Altura ajustable Cuatro patas de soporte

Tabla 2.2: Dispositivos de asistencia a la movilidad con su propósito y características [29].

Existen dos tipos de clasificación de dispositivos de asistencia para ayudar a pacientes con limitaciones en la movilidad, los cuales son: Dispositivos para pérdida parcial del movimiento y dispositivos para pérdida total de la capacidad para movilizarse [29]. Dentro de la clasificación de pérdida parcial, se encuentran los dispositivos externos presentados con anterioridad, donde los principales son las muletas y los bastones, cuyas funciones principales buscan brindar balance y estabilidad [30]. Por otra parte, la clasificación de pérdida total abarca a los dispositivos los cuales son utilizados para brindar asistencia a las personas que han perdido la capacidad total de movilizarse [29]. En esta clasificación resaltan las sillas de ruedas, dispositivos multifuncionales que ayudan a las personas a desplazarse, participando en diferentes actividades de la vida diaria, aumentando su participación social y promoviendo la independencia [30].

Con respecto a los caminadores convencionales, son utilizados para ayudar a personas con pérdida parcial de la movilidad y de la misma forma que los dispositivos presentados en pérdida parcial. Su funcionamiento promueve y potencia la estabilidad y balance del usuario [31]. Esto se logra debido a que se amplía la base de apoyo y brinda soporte del peso de los usuarios [31]. Analizando los dispositivos anteriores presentados en pérdida parcial del movimiento, el caminador convencional es el que proporciona mayor estabilidad, sin embargo decrementa la velocidad de marcha de los usuarios y requiere un mayor esfuerzo físico [31].

No obstante, algunos de los dispositivos mencionados con anterioridad se han asociado con caídas y lesiones, ya que el acto de levantar y avanzar con el dispositivo puede provocar una desestabilización de las fuerzas biomecánicas, lo que conlleva a un desequilibrio y por lo tanto el riesgo de caída aumenta [12]. Actualmente, existen dispositivos como sillas de ruedas que incluyen sistemas electromecánicos para facilitar la función de desplazamiento, algunas de ellas incluyen sistemas sofisticados que diversifican sus funciones, éstas últimas son llamadas sillas de ruedas inteligentes. Una silla de ruedas inteligente, en adición a la capacidad motriz que comparte con las sillas de ruedas eléctricas, cuenta con mecanismos de medición de variables vitales, sistemas de comunicación y transmisión de información, mecanismos de monitoreo, adaptación a distintos comandos de control diferentes a la palanca de mando e incluso capacidades de navegación autónoma o semiautónoma [32]. De igual manera, se han integrado diferentes tecnologías robóticas, como los caminadores inteligentes los cuales dan solución a las problemáticas mencionadas anteriormente y además proporcionan asistencia, seguridad y estabilidad a la población que requiere asistencia para caminar [4].

2.4 Caminadores inteligentes

Los caminadores inteligentes son dispositivos que contienen sistemas electrónicos, de control y sensores integrados en su estructura mecánica convencional, lo que proporciona una mejor experiencia de conducción para los usuarios al controlar el dispositivo [12]. Una de las principales ventajas es la minimización de los riesgos de caída y la posibilidad de experimentar una marcha más suave y natural [33]. Algunos caminadores inteligentes ofrecen dos modalidades. La primera es automática, en la que el dispositivo se mueve de forma autónoma, pero dependiendo de las intenciones de la persona. La segunda es la manual en la que el usuario mueve el caminador libremente. De igual manera, algunos dispositivos, ofrecen modalidad compartida, en la que tanto el usuario como el caminador tienen el control del movimiento del dispositivo [34]. Estas modalidades dan la posibilidad al usuario que utiliza el dispositivo, de elegir una de ellas dependiendo de sus necesidades e intenciones [34].

Estos avances en la tecnología hacen posible la incorporación de sensores y actuadores en dichos dispositivos, lo cual da la posibilidad de incorporar nuevas características. Estas buscan mejorar las terapias basadas en los caminadores mediante la intervención de asistencia a la necesidad y mejora de la fiabilidad del dispositivo [35]. Los caminadores (robóticos, avanzados o inteligentes) suelen ser dispositivos de tres o cuatro ruedas en los que la locomoción está controlada por motores, ofreciendo, al mismo tiempo, patrones de marcha naturales, estabilidad lateral y la posibilidad de evitar caídas [35]. Los sensores destinados a extraer las condiciones del usuario o del entorno proporcionan un control seguro y eficaz [35]. En resumen, los caminadores inteligentes deben tener en cuenta cuestiones de usabilidad, como la seguridad, la comodidad y la sencillez de uso del dispositivo [12]. Por este motivo, el desarrollo y la evolución de las tecnologías permitieron integrar una serie de funciones útiles en los caminadores inteligentes, para que sean más fáciles de controlar y más cómodos para el usuario [12].

En este proyecto se realizó una revisión bibliográfica con respecto a la metodología utilizada para encontrar la literatura relacionada con el estudio, esta búsqueda se realizó a través de la estrategia PICO, donde la Población (P) fueron personas que padecían algún tipo de limitación motora, pero también se incluyeron a los profesionales clínicos que utilizan caminadores inteligentes en los procesos de rehabilitación de los usuarios. Por parte de la Intervención (I) estuvieron aquellos procesos en los que se brinda asistencia y rehabilitación de la marcha mediante caminadores inteligentes. A modo de Comparación (C), se analizó las pruebas realizadas y validadas en laboratorios o entornos clínicos, y se destacó qué características, sistemas de control, sistemas sensoriales e interfaces tenían los caminadores en su seguridad y/o funcionalidades relacionadas con la asistencia. Finalmente, los resultados y salidas (O) de la investigación buscaron estudiar el funcionamiento y desempeño de los caminadores robóticos en las terapias o pruebas que se les realizaron.

Para la búsqueda de la literatura se utilizó la siguiente ecuación basada en la lógica Booleana. (“*Smart Walker**” OR “*Robotic Walker**”) AND (“*Gait Assistance*” OR “*Assistive Gait*” OR “*Walker-assisted Gait*” OR “*Gait Rehabilitation*” OR “*Walker functionalities*” OR “*Walking Assistance*”) AND (“*Control systems*”).

Los criterios de inclusión tomaron en cuenta artículos que incluían información sobre cómo funcionaban los caminadores inteligentes, sus características y sistemas de control, así como artículos que iban dirigidos a personas con problemas de marcha y usaban caminadores inteligentes como asistencia. Para los criterios de exclusión se excluyeron los artículos que incluían robots de rehabilitación distintos de la marcha humana, dispositivos distintos a caminadores robóticos y dispositivos de asistencia no inteligentes. La búsqueda de literatura se implementó en las siguientes bases de datos: IEEE Xplore, PUBMED y Google scholar. Después de pasar por el proceso de revisión de la metodología y la literatura, se encontraron 407 artículos en Google Scholar, 48 en IEEE Xplore y 1 en PUBMED. Se seleccionaron un total de xx artículos basándose en los criterios de inclusión y exclusión.

Algunos ejemplos de los caminadores inteligentes más significativos en la literatura se exponen en la tabla 2.3.

Caminador inteligente	Sensores	Funcionalidades
 <p data-bbox="315 527 537 562">AGoRA [4], [36]</p>	<p data-bbox="634 317 938 491">Sensores de fuerza TL (Telémetro láser) Panel ultrasónico Cámara HD Codificadores rotatorios</p>	<p data-bbox="987 226 1321 579">Detección de fuerzas Detección de intención de movimiento Monitoreo de marcha Detección de obstáculos Detección de personas Navegación y orientación (localización, construcción de mapas y seguimiento de rutas)</p>
 <p data-bbox="337 932 514 968">GUIDO [34]</p>	<p data-bbox="634 688 938 863">Sensores de fuerza Codificadores rotatorios TL Sensor de sonda Codificadores ópticos</p>	<p data-bbox="987 674 1289 877">Detección de obstáculos Detección de objetos transparentes Evasión de obstáculos Comunicación auditiva con el usuario</p>
 <p data-bbox="315 1367 537 1402">PAMM [37], [38]</p>	<p data-bbox="634 1100 899 1274">Sensores de fuerza Sensores ultrasónicos TL Sensores de torsión Sensores acústicos</p>	<p data-bbox="987 1031 1321 1346">Monitoreo de salud del usuario Detección de obstáculos Detector de descensos y escaleras Comunicación inalámbrica Monitoreo de marcha Control automático de velocidad del caminador</p>
 <p data-bbox="277 1787 574 1822">MONIMAD [39], [40]</p>	<p data-bbox="634 1528 938 1703">Sensores de fuerza Codificadores rotatorios Sensores de torsión Sensores de posición magnética</p>	<p data-bbox="987 1493 1289 1738">Asistencia para pararse y sentarse Monitoreo de salud del usuario Respuesta a pérdidas de estabilidad Detección de obstáculos</p>



Sensores biomecánicos
Sensores inerciales
Sensores de fuerza
Sensores 3D
Sensores ultrasónicos

Monitoreo de marcha
Bloqueo del movimiento del caminador hacia atrás
Comunicación inalámbrica
Navegación basada en las intenciones del usuario

SIMBIOSIS [41], [42], [43]



Sensores de fuerza
Sensores IMUs
TL
Codificadores rotatorios

Detección de fuerzas
Detección de intención movimiento
Detección de obstáculos
Monitoreo de marcha
Detección de distancia del usuario con el caminador

UFES [44]



Modulo sensor de infrarrojos
Sensores rotativos
Sensores de proximidad
TL
Codificadores rotatorios

Detección de obstáculos
Evasión de obstáculos
Detección de intención de movimiento
Control automático de velocidad del caminador
Navegación basada en las intenciones del usuario

JARoW [45]



Sensores de fuerza
Sensores ultrasónicos
Inclinómetros
Sensores de posición angular
Codificadores rotativos
Push-pull unidimensional

Detección de intención de movimiento
Detección de fuerzas
Detección de obstáculos
Detección de distancia del usuario y el caminador
Monitoreo del rango circundante del caminador

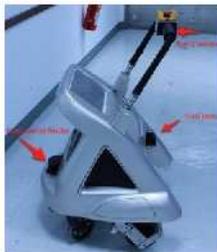
WCIWAR [46]



ODW [47]

Sensores táctiles
Sensores de fuerza
Sensores de presión
Sensores de torsión

Navegación omnidireccional
Control automático de
velocidad del caminador
Monitoreo de marcha
Detección de intención de
movimiento



CAIROW [48]

Sensores de fuerza
Codificadores rotatorios
Cámara HD
TL

Interfaz háptica
Detección de obstáculos
Monitoreo de salud del
usuario
Navegación automática
Emisión de alarmas audibles
Comunicación inalámbrica



I-WALKER [49]

Codificadores rotatorios
Sensores de fuerza
Inclinómetros
Brújula digital
Antenas
Sensores RIFD

Detección de caídas
Detección de riesgo de
vuelco del caminador
Detección de obstáculos
Monitoreo de salud del
usuario
Detección de intención de
movimiento
Navegación y orientación
(localización, construcción
de mapas y seguimiento
de rutas)



I-GO [50], [51]

Sensor de torsión
Sensor de fuerza
Codificadores rotatorios
Inclinómetros
TL

Detección de obstáculos
Detección de descensos y
escaleras
Detección de intención de
movimiento
Navegación y orientación
(localización, construcción
de mapas y seguimiento
de rutas)
Control automático de
velocidad del caminador
Evasión de obstáculos

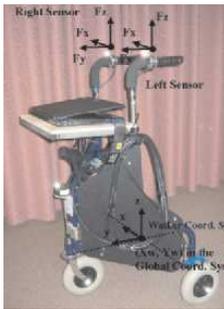
	<p>Codificadores rotatorios Sensores de fuerza Sensores IMUs Sensores infrarrojos TL Cámara HD</p>	<p>Detección de intención de movimiento Asistencia para pararse y sentarse Monitoreo de marcha Control automático de velocidad Detección de caídas Altura ajustable</p>
	<p>Sensores de fuerza Sensores de torsión TL Sensores visuales Sensor Kinect</p>	<p>Monitoreo de salud del usuario Detección de caídas Monitoreo de marcha Navegación y orientación (localización, construcción de mapas y seguimiento de rutas) Detección de obstáculos</p>
	<p>TL Codificadores rotatorios Modulo bluetooth Unidad de procesamiento</p>	<p>Emision de alarmas vibratorias Detección de obstáculos Navegación y orientación (localización, construcción de mapas y seguimiento de rutas) Bloqueo de las ruedas traseras del caminador evitando que deslicen</p>
	<p>TL Sensores ultrasónicos Sensores de fuerza Sensores de torsión</p>	<p>Detección de obstáculos Evasión de obstáculos Detección de intención de movimiento Comunicación auditiva con el usuario</p>



TL
 Sensores ultrasónicos
 Sensores táctiles
 Cámara HD
 Sensores de fuerza

Detección de obstáculos
 Navegación y orientación
 (localización, construcción
 de mapas y seguimiento
 de rutas)
 Detección de intención de
 movimiento
 Emisión de alarmas visuales

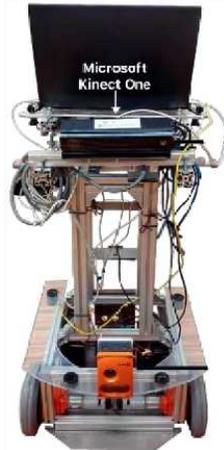
NOMAD XR4000 [58]



TL
 Sensores infrarrojos
 Codificadores rotatorios
 Sensores sonar
 Sensores de fuerza

Detección de obstáculos
 Seguimiento de ruta
 Frenado de seguridad
 Emisión de alarmas de
 advertencia

MARC [59], [60]



Sensor de movimiento
 de salto
 Sensores de fuerza
 Sensor Kinect
 Codificadores rotatorios
 Cámara RGB-D

Detección de intención de
 movimiento
 Monitoreo de marcha
 Navegación automática
 Reconocimiento de agarre

ISR-AIWalker [61], [62]

Tabla 2.3: Caminadores inteligentes relevantes de la literatura con sus sensores y funcionalidades.

2.4.1. Asistencia física

Generalmente los caminadores robóticos tienen entre sus características algún tipo de funcionalidad de soporte físico con la finalidad de generar asistencia, estabilidad y equilibrio durante la movilidad [41]. Existen principalmente dos tipos de asistencia física: pasiva y activa

[12].

2.4.1.1 Soporte pasivo

La funcionalidad de asistencia física pasiva introduce mejoras mecánicas o estructurales en el dispositivo, mejorando la estabilidad de la marcha, las mejoras realizadas consisten en la ampliación de la base del dispositivo, la distribución equilibrada proporcional de elementos de mayor peso en la parte baja de la estructura y/o la colocación equilibrada de elementos pesados como motores, baterías, electrónica, sensores, etc [12]. Una estrategia pasiva, es la sustitución de los manillares convencionales del caminador por plataformas de apoyo para los antebrazos [12].

2.4.1.2 Soporte activo

De igual manera que en el soporte pasivo, los caminadores ofrecen soporte físico activo [12]. Normalmente, se instalan motores en las ruedas de estos dispositivos para controlar los frenos [62], para compensar la gravedad en terrenos inclinados y para proporcionar la energía de empuje necesaria para mover el dispositivo [12]. Realizar funciones de soporte, requiere bastante esfuerzo físico y de coordinación debido a que incrementa la demanda de estas capacidades [57]. Por tal motivo es necesario el apoyo del soporte físico activo, debido a que genera apoyo adicional en energía de empuje con la finalidad de controlar el caminador y desplazar de una manera más eficiente y segura el dispositivo inteligente [57].

2.4.2. Asistencia sensorial

Los caminadores inteligentes también proporcionan asistencia sensorial al usuario, según criterios de navegación y guía, monitoreo biomecánico y estrategias de seguridad [13]. Estos dispositivos brindan asistencia al usuario en diferentes niveles, según sus necesidades [13]. En las siguientes secciones se presentará una clasificación y un breve estado del arte sobre las funciones sensoriales realizadas por los caminadores inteligentes expuestos en la tabla 2.3.

2.4.2.1 Sistema de detección de obstáculos (Seguridad)

El sistema de detección de obstáculos es importante para las personas que utilizan caminadores inteligentes [12]. Esto se debe a la alteración del equilibrio [63], a su vez que los cambios bruscos del terreno pueden presentar a veces serias dificultades para el equilibrio, incluso si se utiliza una ayuda para la deambulaci3n [12], [63]. Este sistema de detecci3n ayuda al usuario a evitar los obst3culos a trav3s de alertas sonoras, vibratorias, visibles o tomando acciones autom3ticas de evasi3n, por ello, la mayor3a de caminadores (79 % de dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentaci3n sensorial como estrategia de seguridad del usuario.

2.4.2.2 Sistema de detecci3n de ca3das (Seguridad)

El sistema de detecci3n de ca3das es una asistencia sensorial importante, ya que estima el riesgo de ca3da del usuario, en la mayor3a de los casos para estos sistemas es imperativo implementar c3maras que monitoreen la posici3n de la cabeza del usuario [64] y sensores que midan la distancia entre la rodilla y el caminador. En algunas ocasiones, estos sistemas pueden

incluir alarmas para avisar cuando el usuario está a punto de caer o modificar la posición del dispositivo para ayudar a estabilizar el usuario [65]. Estos sistemas son generalmente aceptados por la trascendencia que tienen para mejorar la vida de las personas, permitiendo que los usuarios dejen de tener una marcha cautelosa, brindando independencia y tranquilidad al usuario [64] (16 % de los dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de seguridad del usuario.

Por los motivos presentados con anterioridad, el uso de un telémetro láser (TL) es muy útil debido a la necesidad de los caminadores inteligentes de detectar obstáculos o cambios en el campo que están relacionados directamente con la posibilidad de presentar una caída [66].

2.4.2.3 Sistema de detección de velocidad del caminador (Seguridad)

El sistema de detección de velocidad incluido en los caminadores inteligentes, busca implementar una medida de seguridad que determine qué tan rápido se mueve el dispositivo, con la finalidad de tomar acciones cuando se encuentra en un rango de velocidad que no es seguro para los usuarios [45]. Para este tipo de sistemas los caminadores generalmente incluyen sensores infrarrojos, codificadores de ruedas, TL, acelerómetros, cámaras, entre otros. De igual manera este sistema cuenta con un controlador y un servomotor para controlar la velocidad de las ruedas. La ubicación de las extremidades inferiores en algunas ocasiones se estima con respecto al sistema de coordenadas del caminador, esto se puede hacer utilizando un TL [44]. Gracias a este sensor, el caminador puede calcular la velocidad, posición y orientación inferidas del humano a partir de la distancia a las piernas del usuario y así ajustar la velocidad a un rango seguro, ya que con la misma velocidad que se desplaza el usuario se desplaza el caminador [45]. El controlador se encarga de procesar los datos de la velocidad lineal y angular para enviar una señal al servomotor que incluye un controlador PID (proporcional-integral-derivativo) interno, que calcula la velocidad de rotación de cada rueda del robot y la ajusta a un rango seguro de velocidad [47], (26 % de los dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de seguridad del usuario.

2.4.2.4 Sistema de detección de descensos y escaleras (Seguridad)

Un sistema que puede incluir un caminador inteligente es la detección de pendientes y escaleras, esta función difiere de la detección de obstáculos porque cuando se produce un cambio de pendiente, un sensor convencional puede no detectar diferencias significativas [67], por otro lado, la presencia de escaleras también presenta un enfoque diferente, por esta razón, las tecnologías con programación y funciones específicas están diseñadas para detectar estos entornos cotidianos como medidas de seguridad [67]. Para ello, el uso inclinómetros que detectan un cambio de pendiente significativo, de la misma manera, los sensores angulares pueden determinar diferentes ángulos de proyección en un espacio reducido, lo que indica la presencia de escaleras, así mismo, se han implementado TL y sensores infrarrojos para detectar cambios en las superficies [40], (11 % de los dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de seguridad del usuario.

2.4.2.5 Sistema de monitoreo de marcha del usuario (Monitoreo biomecánico)

El sistema de monitoreo de la marcha humana, incluido en los caminadores inteligentes se utiliza para detectar y registrar los movimientos, características y eventos de la marcha humana [12], [63]. Estos parámetros son de gran importancia para detectar presencia de marcha patológica en pacientes con enfermedades neuromusculares [12], [63]. De igual manera este sistema se puede utilizar para brindar seguridad y asistencia al usuario, debido a que permite evaluar los desequilibrios de alineación y apoyo plantar que pueden desencadenar la aparición de sobrecargas y posibles lesiones de los pacientes [42]. Este sistema se basa generalmente en la detección de aterrizaje del talón, eventos de despegue del talón, elevación del talón y contacto del dedo del pie [68].

Los caminadores cuentan con algoritmos que proporcionan mecanismos de monitoreo biomecánico, así como varias estrategias de control de movimiento para conocer y registrar si la marcha tiene un patrón normal. Para cumplir esta finalidad generalmente se monitorean las extremidades inferiores para identificar una marcha patológica [63]. La gran ventaja de estos sistemas es que se conoce la posición del usuario con respecto al caminador y el seguimiento de las extremidades inferiores se realiza de forma sencilla [35], (37 % de los dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de monitoreo del usuario.

Algunos caminadores tienen este sistema integrado en sus funcionalidades para registrar la velocidad del usuario, calcular la variabilidad paso a paso, la longitud y frecuencia de la zancada del usuario, así como la asimetría de la marcha, que son variables relevantes para detectar la marcha patológica [57]. De igual manera se incluyen sistemas avanzados de análisis de la marcha, donde se usa un láser que permite detectar la presencia de las piernas del paciente, así como un algoritmo interno que permite realizar mediciones y cálculos para que el funcionamiento del dispositivo sea lo más seguro posible y sólo se produzca cuando el paciente realice movimientos voluntarios de la marcha [48]. En algunos casos, la detección de la marcha humana requiere un dispositivo adicional que se coloca en el cuerpo humano, lo que puede generar dificultades en entornos al aire libre [45]. Para superar estas limitaciones de las interfaces indirectas existentes, se desarrolló un nuevo sistema de interfaz natural que se incluyó en el caminador JARoW [45]. Este caminador detecta la ubicación de las extremidades inferiores del usuario mediante el uso de sensores infrarrojos giratorios y también contiene un algoritmo de control para ajustar el movimiento del dispositivo de acuerdo con la velocidad y la dirección con la que camina el usuario [45].

2.4.2.6 Sistema de monitoreo de salud del usuario (Monitoreo biomecánico)

La monitorización de la salud del usuario se refiere a la detección y el análisis de los parámetros fisiológicos relacionados con la salud del usuario, así como el apoyo al terapeuta en el seguimiento de las habilidades motoras y la supervisión de la ejecución de los ejercicios diarios de los pacientes [12], [69]. La información relacionada con el usuario es procesada y analizada por profesionales de la salud con posibles usos de rehabilitación [47]. En general a los terapeutas les resulta difícil atender continuamente a sus pacientes y las autoevaluaciones de estos suelen ser poco fiables, ya sea por falta de memoria o para evitar las intervenciones terapéuticas [12]. Por lo tanto, los caminadores inteligentes pueden ayudar a los terapeutas a obtener la condición de salud del usuario [47]. Para ello, el caminador debe tener la capacidad de recoger y reconocer la actividad del usuario [12], (21 % de los dispositivos presentes en la

tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de monitoreo del usuario. El caminador inteligente VA-PAMAID incluye una aplicación que recoge datos relevantes tomados a través de sensores fisiológicos que muestran los signos vitales. El caminador cuenta con dos sistemas; uno local y otro de control. El local se centra en obtener la posición de los obstáculos y da un aviso al usuario y el sistema de control recibe la señal de vídeo y la frecuencia cardíaca [57]. Por parte del caminador MONIMAD, este cuenta con la instalación de sensores de monitorización de la presión arterial y ECG, asociados con la medición del trabajo del paciente durante su actividad de marcha permitiendo a estos pacientes beneficiarse de una rehabilitación óptima, en las mismas condiciones que los pacientes más jóvenes que necesitan asistencia [40].

2.4.2.7 Sistema de seguimiento de ruta (Navegación y guía)

Este sistema incluido en los caminadores inteligentes, proporciona navegación y guía a los pacientes, para lo cual es necesario analizar la respuesta del movimiento de los usuarios, con el fin de obtener patrones de movimiento naturales y predecibles [12]. Estos sistemas son importantes para pacientes que presentan problemas visuales y cognitivos, debido a que no tienen la capacidad de guiar el dispositivo de forma independiente [63]. De la misma manera, es muy importante brindar esta asistencia desde el punto de vista de la rehabilitación, buscando que el paciente se concentre en su movilidad y patrón de marcha, ya que algunos no tienen la capacidad de concentrarse en la orientación al mismo tiempo que tienen que concentrarse en sus patrones de marcha [12]. Por estos motivos, algunos caminadores incluyen la capacidad de navegar de forma autónoma en entornos con obstáculos para asistir y orientar a sus pacientes durante la rehabilitación, cuando sea necesario, logrando reducir el esfuerzo físico del personal que brinda asistencia a los pacientes [63], (47 % de los dispositivos presentes en la tabla 2.3) ofrecen este sistema de retroalimentación sensorial como estrategia de navegación y guía del usuario.

2.5 Estrategias de control

Los sistemas de control incluidos en los caminadores inteligentes son considerados como el cerebro del dispositivo, ya que estos dan las órdenes para ejecutar las acciones del dispositivo, detectando los parámetros del sistema para realizar las acciones deseadas. Diferentes sistemas de control aplicables a caminadores inteligentes, se han desarrollado, los cuales determinan la orden para la realización de una acción específica [12]. Principalmente podemos encontrar diferentes controladores como lógica difusa, cinemática, admitancia e impedancia. Estos controladores permiten desarrollar fines específicos, como estimación de movimiento humano, detección de obstáculos, sistema de análisis de la marcha, seguimiento de ruta, entre otros. Por esta razón las estrategias de control son indispensables en los caminadores inteligentes, ya que son las encargadas de mantener una variable controlada, para operar dentro de rangos aceptables y cumplir las funciones deseadas de manera eficiente y segura para los usuarios. A continuación, se presentan algunos de los controladores presentes en los caminadores de la tabla 2.3.

2.5.1. Control basado en detección de intención de movimiento

Algunas de las ayudas sensoriales diseñadas para caminadores inteligentes, tienen como objetivo controlar y detectar el movimiento del usuario, estos algoritmos garantizan la seguridad de los pacientes que usan el caminador, además de ofrecer una interacción estable humano-robot. Sus acciones se basan en las mediciones de diferentes sensores principalmente de fuerza y presión que se activan cuando el usuario ejerce presión y/o fuerza sobre ellos [70]. Estas estrategias, busca interpretar el movimiento del usuario infiriendo sus intenciones al caminar, ya que normalmente cuando las personas tienen una condición de discapacidad motora o necesitan asistencia para caminar, tienen un ritmo de marcha constante y realizan los mismos movimientos [71].

Este tipo de estrategias buscan implementar la correlación entre las fuerzas y momentos ejercidos por el usuario sobre el dispositivo, teniendo en cuenta velocidades lineales y ángulos de curvatura involucrados en cada maniobra del caminador, como girar a la izquierda, caminar hacia adelante, girar hacia la derecha, entre otros. [60]. Posterior de analizar la correlación entre las fuerzas relevantes en cada maniobra y los desplazamientos de los mangos, la velocidad lineal y el ángulo de curvatura son calculados a partir de codificadores del motor, teniendo en cuenta que la plataforma es en realidad un robot diferencial [60]. En la figura 2.2, se muestra un diagrama de bloques utilizado para esta estrategia de control.

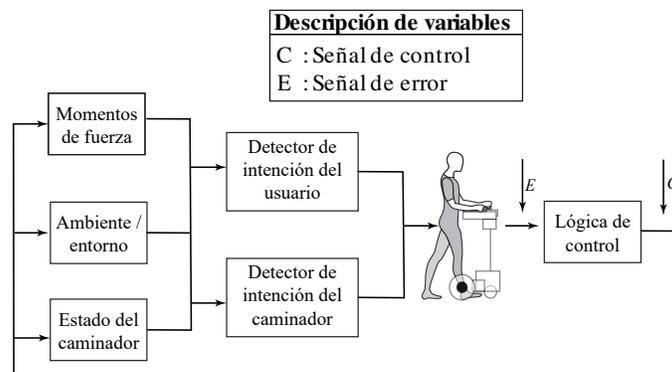


Figura 2.2: Diagrama de bloques de la estrategia de control estimación del movimiento humano [41]

2.5.2. Controlador de lógica difusa

La lógica difusa es un concepto que utiliza expresiones que no son ni verdaderas ni falsas, es decir, se aplica a conceptos que pueden tomar cualquier valor de verdad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre la verdad absoluta y la falsedad total [72]. Este término permite tratar información imprecisa, en términos de conjuntos difusos que se combinan para definir acciones, por ejemplo: "si un sistema tiene alta temperatura entonces enfríe" [72]. Muchos caminadores inteligentes usan controladores de lógica difusa (FLC), ya que este tipo de control es adecuado para controlar robots porque puede inferir con el uso de datos ambientales incluso bajo incertidumbres de movimiento adquiridas por sensores [40]. Estos reciben como entradas distancias obtenidas de sensores (generalmente ultrasónicos) y su salida son

velocidades diferenciales [40]. La idea de estos controladores es que se construyen a partir de información obtenida de situaciones experimentales. Por esta razón las nuevas formas de desarrollar sistemas controlados difusos incluyen el uso de sistemas neuro difusos que permiten al programador obtener más datos de la predicción [73]. En la figura 2.3, se muestra un diagrama de bloques utilizado para esta estrategia de control basado en la lógica difusa.

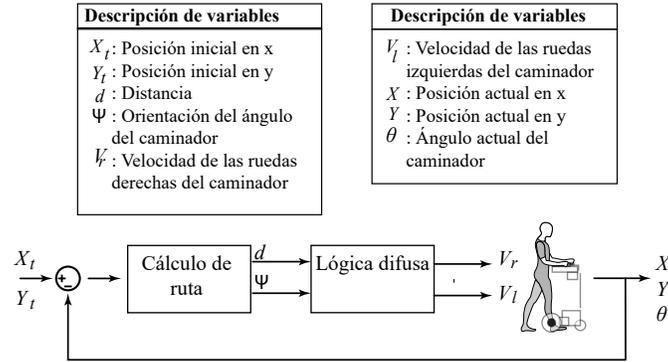


Figura 2.3: Diagrama de bloques de la estrategia de control basada en la lógica difusa [47]

2.5.3. Controlador cinemático

Los modelos cinemáticos de un robot móvil son usados dentro del diseño de controladores, cuando el robot desempeña tareas o misiones a baja velocidad y con poca carga en relación con su estructura [74]. Una utilidad de este controlador es el seguimiento de trayectoria, que se realiza mediante una ley de control donde el robot móvil sigue con error cero, estados deseados que varían en el tiempo [74]. Este control de trayectoria se basa en dos subsistemas en cascada: El control cinemático que se encarga de cumplir el objetivo de la tarea y el control de compensación dinámica que se encarga de compensar la dinámica del robot [74]. El diagrama que se muestra en la figura 2.4 muestra el esquema general de un controlador cinemático utilizado en una aplicación para caminador inteligente, el sistema indica ampliamente la interacción entre los sensores y los ángulos de movimiento de las rodillas del usuario, en esta interacción el controlador asegura movimientos correctos y armónicos [74].

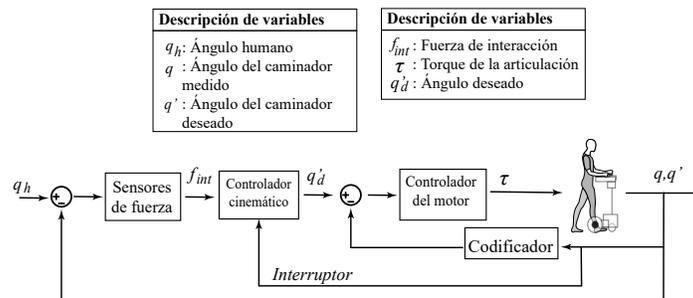


Figura 2.4: Diagrama de bloques de la estrategia de control cinemático [74]

2.5.4. Controlador de admitancia

El control de admitancia se utiliza principalmente para la interacción humano-robot. Este controlador transforma las fuerzas, los momentos de torsión, la posición y orientación deseadas del efector final. Cuando el control de admitancia está en el espacio de la tarea, necesita la matriz jacobiana, mientras que en el espacio articular, requiere la cinemática inversa [75]. Estos controladores se implementan en los caminadores, como herramientas para generar velocidades de referencia a partir de la intención de movimiento [75].

El controlador de admitancia permite el control del caminador a partir de las fuerzas y torsiones ejercidas sobre las manijas, regularmente los parámetros de los controladores se configuran de tal manera que brindan a los usuarios la sensación de facilidad y naturalidad durante la interacción física con el caminador [4]. En términos generales, los controladores de admitancia modelan los caminadores inteligentes como un sistema amortiguador de masa de primer orden, cuyas entradas son la fuerza (F) y el torque (τ) aplicados al dispositivo por el usuario, además las salidas de estos controladores son velocidades lineales (v) y angulares (ω) [76]. En la figura 2.5, se expone el diagrama de bloques de un controlador de admitancia.

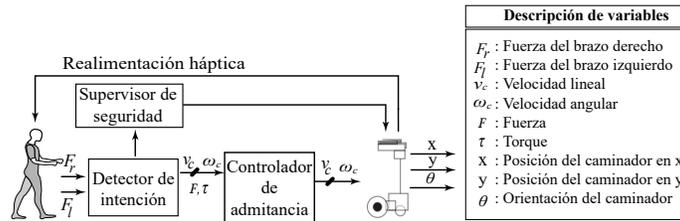


Figura 2.5: Diagrama de bloques de la estrategia de control de admitancia [75]

2.5.5. Controlador de impedancia

La interacción humano-robot ha jugado un papel importante en la rehabilitación robótica y el control de impedancia se ha utilizado en la regulación de las fuerzas de interacción entre el actuador del robot y las extremidades humanas [77]. El nivel de impedancia depende de la posición de las articulaciones de la cadera y la rodilla, por esta razón esta estrategia basada en desafíos se desarrolló para pacientes con discapacidades más leves [78].

Los controladores de impedancia están bien establecidos en el campo de la robótica y la interacción entre el humano y el sistema. La idea básica de la estrategia de control de impedancia aplicada al entrenamiento en cinta rodante asistida por robot es permitir una desviación variable de una pierna en determinada trayectoria en lugar de imponer un patrón de marcha rígido. La desviación depende del esfuerzo y el comportamiento del paciente. Se aplica un momento ajustable en cada articulación para mantener la pierna dentro de un rango definido a lo largo de la trayectoria. El momento se puede describir como una función de orden cero (rigidez) o de orden superior (generalmente de primer o segundo orden) de la posición angular y sus derivadas. Este momento se denomina generalmente impedancia mecánica [79]. La figura 2.6 muestra un diagrama de bloques del controlador de impedancia [79].

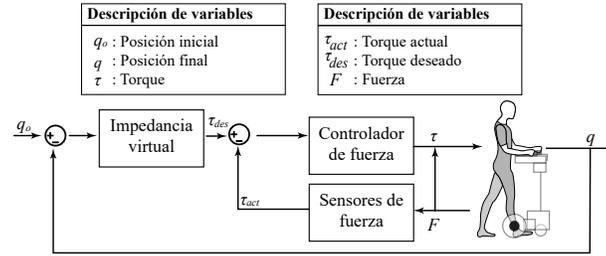


Figura 2.6: Diagrama de bloques de la estrategia de control de impedancia [79]

Capítulo 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología de este proyecto dividida en tres partes. El primer estudio busca la obtención de la percepción, de los profesionales de la salud y rehabilitación con respecto a los caminadores inteligentes y sus características. Esto se realiza a partir de un cuestionario implementado de manera virtual, donde se abordan temas acerca de criterios físicos y sensoriales que están presentes en estos dispositivos. Para la segunda parte se presenta el procedimiento de diseño de una estrategia de control aplicable a caminadores inteligentes, que se adapta a las necesidades encontradas en el estudio de percepción aplicado anteriormente. Finalmente, la tercera parte evidencia el proceso realizado para la evaluación de usabilidad, implementado a la estrategia de control. Esta evaluación se realizó en usuarios no patológicos, mediante una simulación de un caminador inteligente.

3.1 Identificación de características esenciales en caminadores inteligentes

Esta sección describe la metodología del estudio de percepción de caminadores inteligentes, enfocado a profesionales de la salud y rehabilitación. Se realizaron tres pasos para lograr la evaluación de la percepción y la aceptación: (i) el desarrollo de la página web y el cuestionario, (ii) el protocolo experimental ejecutado durante el estudio; y (iii) el análisis de los datos.

3.1.1. Desarrollo de la página web y cuestionario de percepción

Para facilitar la comprensión de todos los caminadores utilizados para este estudio con su detallada información, se diseñó una sección en la página web del centro de investigación en biomecatrónica¹ de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en la categoría de robots, llamada *SMART WALKERS* (Ver anexo A). Esta sección describe en detalle los caminadores inteligentes, detallando su estructura mecánica, funcionalidades, sensores, dimensiones, pesos, una ficha técnica y finalmente en algunos casos un vídeo mostrando el funcionamiento del dispositivo o un carrusel de fotos que describe el caminador inteligente. Un ejemplo de la descripción presente en la página web se muestra en la figura 3.1.

¹<https://sites.google.com/vie/biomtlab/home?authuser=0>

Caminador JARoW

Estructura Mecánica

Es un caminador activo, de tres ruedas. Este caminador cuenta con altura ajustable y su soporte del usuario es en forma circular permitiendo que el usuario se encuentra dentro del caminador reduciendo posibles colisiones con obstáculos o paredes, JARoW cuenta con altura ajustable y es ligero pero resistente. JARoW tiene tres partes estructurales principales: marco base, marco superior y conexión por varillas



Funcionalidades

- Detección y evasión de obstáculos.
- Detección del movimiento del usuario
- Navegación por parte del usuario
- Permite control automático de la velocidad
- Movimiento a posiciones deseadas por el usuario

Vídeo del caminador



Dimensiones

- Alto: 0.825 m - 1m.
- Ancho: 0.8 m
- Largo: 0.77 m.

Peso

- 20 kg

Sensores

- Sensores de fuerza
- Sensores rotativos
- Sensores de proximidad
- Sensores infrarrojos
- Telémetros laser
- Codificadores de rueda
- Modulo sensor

Ficha técnica



Enlace

www.jalist.ac.jp/robot/research/jarow.php

Figura 3.1: Descripción del caminador JARoW en la página web.

Posteriormente para el desarrollo del cuestionario, se utilizaron 15 caminadores inteligentes que se encontraban en la página web. Se debe resaltar que todos los caminadores de la página web fueron obtenidos de la literatura, donde actualmente se utilizan o se buscan utilizar en terapias de rehabilitación y asistencia [12], [34], [43]. A partir de la revisión de cada caminador, se analizaron y extrajeron las características físicas y sensoriales de cada dispositivo, con la finalidad de determinar las más relevantes, qué tipo de población utiliza esa asistencia y cómo se proporciona la asistencia con estas características y funcionalidades. Con esta información se diseñó el cuestionario de percepción que se describirá más adelante.

Debido a la importancia actual de utilizar cuestionarios basados en estándares, el estándar *Quest (Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology, Version 2.0)* fue adaptado al cuestionario diseñado para este estudio, donde se utilizan preguntas estándar dirigidas a los caminadores, así como escalas cuantitativas de satisfacción con la tecnología, también adaptadas al cuestionario [80].

- **Características físicas:** La primera sección incluye las características físicas, aquellas que se refieren a la estructura del dispositivo, que son visibles y medibles.
- **Características funcionales:** La segunda sección incluye las características funcionales, las que se refieren a la asistencia sensorial, los sistemas de control, sistemas electrónicos, entre otros.

El cuestionario incluye 11 preguntas cuyos temas se muestran en la tabla 3.1, divididas en las dos secciones descritas anteriormente, 6 de ellas forman parte de la sección física que

incluye temas sobre dimensiones, peso, ajustabilidad, seguridad, diseño y facilidad de uso. Del mismo modo, la sección funcional incluye 5 preguntas que están relacionadas con modalidades como el modo automático, modo manual, modo compartido, modo estacionario y la asistencia para pararse y sentarse. Esta sección también incluye los sistemas de monitoreo, seguridad y navegación: monitoreo de marcha, detección de obstáculos, detección de caídas, monitoreo de salud del usuario, detección de intención de movimiento, detección de distancia y detección de velocidad.

Por último, el tema de navegación, propulsión activa y pasiva e interacción social finalizan el cuestionario. En el anexo B, se encuentra el enlace para acceder al cuestionario.

Categoría	Preguntas
Características físicas	Dimensiones
	Peso
	Ajustabilidad
	Seguridad
	Diseño
	Facilidad de uso
Características funcionales	Modalidades
	Sistemas de monitoreo, seguridad y navegación
	Propulsión
	Navegación
	Interacción social

Tabla 3.1: Temas sobre el Cuestionario criterios de diseño de caminador robótico

3.1.2. Desarrollo del protocolo

El cuestionario se aplicó al personal de la salud relacionado con el área de rehabilitación física. Se reclutó a un total de 29 participantes para completar el cuestionario vía online.

Para evaluar la percepción de los participantes hacia los caminadores, se realizó un paso principalmente compuesto por los siguientes procedimientos: Firma del consentimiento informado, explicación del estudio, acceso a la página web y aplicación del cuestionario.

La explicación del estudio se realizó para informar a los participantes como acceder a la sección de *SMART WALKERS* en la página web, como utilizarla e interpretar toda la información que ésta suministra. Con el fin de explicar de forma clara y sencilla este procedimiento, se realizó un vídeo en el que se explicaba detalladamente los pasos a seguir mencionados anteriormente.

Por último, la aplicación del cuestionario se realizó a través de la plataforma *Question pro* y se envió por Internet para que cada participante pudiera responderlo a través de su ordenador, dispositivo portátil o móvil. Para el desarrollo del cuestionario de percepción, se recomendó tener acceso a la página web durante todo el estudio para facilitar su correcto desarrollo. En el anexo C, se describe detalladamente el protocolo utilizado para la realización del estudio.

3.1.3. Participantes

El estudio está orientado a ser aplicado a profesionales clínicos o relacionados con el área de rehabilitación. Todos los sujetos fueron invitados formalmente a participar en el estudio.

Se utilizó una muestra de personas que se encuentren en el sector clínico y de rehabilitación, como fisiatras, fisioterapeutas, médicos, terapeutas ocupacionales, ingenieros biomédicos y personas que trabajan en el área de la rehabilitación.

3.1.4. Análisis de los datos

Para el análisis de los datos se utilizó un procedimiento de estadística descriptiva. Para el análisis descriptivo de los datos, se utilizaron las herramientas estadísticas proporcionadas por la plataforma, donde fue posible comparar todos los datos obtenidos de los cuestionarios y determinar las tendencias de las respuestas. Además, para medir las respuestas abiertas se realizó un análisis de datos textuales, teniendo en cuenta las palabras que más se repetían entre las respuestas de los participantes. Este análisis fue implementado utilizando *Microsoft Word*.

3.1.5. Definición de variables

Para evaluar los resultados de este estudio, se medirán las siguientes variables que se dividen en dos categorías principales: (1) Características físicas de los caminadores, y (2) características funcionales de los caminadores.

3.1.5.1 Características físicas de los caminadores inteligentes

1. **Dimensiones:** Corresponde al ancho, el largo y el alto del caminador. El ancho del caminador es el grosor de la base, el largo la profundidad de la base y el alto la altura del suelo a la parte más alta del caminador.
2. **Peso:** Corresponde al peso total del caminador incluyendo todas sus partes y accesorios.
3. **Ajustabilidad:** Corresponde a elementos ajustables del caminador, como manijas de apoyo, fijadores, estructuras de arnés, soportes de antebrazos ancho de la base y altura del caminador.
4. **Diseño:** Corresponde a los diseños de los caminadores presentados en la página web.
5. **Seguridad:** Corresponde a fijaciones por arnés, sujetadores, soportes para antebrazos, botón de emergencia, frenado de emergencia, alarmas vibratorias, manijas de agarre, alarmas táctiles y alarmas con retroalimentación por parte de comentarios auditivos [11].
6. **Respuesta háptica:** Respuesta del caminador mejorando la experiencia de comunicación, reaccionando ante el tacto del usuario [47].
7. **Facilidad de uso:** Corresponde a las herramientas que facilitan el uso del caminador por parte de los usuarios, como pantallas táctiles, comunicación del caminador con centros de asistencia, respuesta háptica e interfaces y consolas de control del caminador [11].

3.1.5.2 Características funcionales de los caminadores inteligentes

1. Modalidades:

- **Modalidad automática:** Movimiento del caminador de manera autónoma sin que el usuario lo realice [33].
- **Modalidad manual:** Movimiento del caminador controlado totalmente por el usuario [33].
- **Modalidad compartida:** El usuario y el caminador intervienen en el control y movimiento del caminador [33].
- **Modalidad estacionaria:** El caminador se parquea cuando el usuario lo desea y no realiza ningún movimiento [33].
- **Asistencia para pararse y sentarse:** El caminador ofrece ayuda en el movimiento de sentarse o pararse brindando una transición segura entre estos estados [39].

2. Sistemas de monitoreo, seguridad y navegación:

- **Sistema de monitoreo de marcha:** Detección y registro de los movimientos, características y eventos de la marcha humana [33].
- **Sistema de detección de obstáculos:** Detección de objetos que se encuentran a corta distancia del caminador [11].
- **Sistema de detección de personas:** Detección de personas que se encuentran a corta distancia del caminador [43].
- **Sistema de monitorio de salud del usuario:** Detección de parámetros fisiológicos relacionados con la salud del usuario [37].
- **Sistema de detección de descensos de escaleras:** Detección de pendientes y los escalones de las escaleras que representan un descenso [11].
- **Sistema de detección de tendencia de caídas:** Detección de la desestabilización de las fuerzas biomecánicas de la persona que conducen a un desequilibrio [48].
- **Sistema de intención de movimiento:** Detección de las fuerzas que ejerce el usuario hacia una dirección para determinar hacia donde se quiere dirigir [43].
- **Sistema de detección de distancia:** Detección de la distancia entre el usuario y el caminador como medida de seguridad [43].
- **Sistema de detección de velocidad:** Detección de la velocidad con la que se desplaza el caminador como medida de seguridad [44].

3. Propulsión:

- **Propulsión activa:** Uso de ruedas y componentes motorizados que realicen el desplazamiento [4].
- **Propulsión pasiva:** Uso de ruedas como desplazamiento, pero totalmente propulsado por el usuario [11].

4. **Navegación:** Es el proceso que permite guiar el curso del caminador inteligente a través de un entorno. En este estudio corresponde a construcción de rutas y mapas que facilitan el uso del usuario y su localización [4].
5. **Interacción social:** Capacidad que tiene el caminador de interactuar con las personas en entornos sociales sin interferir en estos procesos [4].

3.2 Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas

En esta sección, se encuentra el procedimiento para desarrollar una estrategia de control, basada en las necesidades identificadas en el cuestionario de percepción, orientada a un caminador inteligente por medio de una simulación. Para ello, se presenta la metodología para la obtención de las necesidades clínicas, los principios teóricos y descripción del funcionamiento de la estrategia. Finalmente se presentan las herramientas y materiales utilizadas para su desarrollo.

3.2.1. Obtención de las necesidades del cuestionario de percepción

Inicialmente se analizaron los resultados obtenidos en el cuestionario de percepción, con la finalidad de analizar cuáles son las características de los caminadores inteligentes, que son consideradas de mayor importancia para los profesionales de la salud y rehabilitación. Posteriormente se determinaron cuáles preguntas del cuestionario suministraban información aplicable para diseñar estrategias de control, para caminadores inteligentes. Finalmente, se aplicaron pruebas estadísticas avanzadas a las preguntas seleccionadas, con la finalidad de confirmar si los resultados presentaban diferencias significativas, para tener una mayor precisión y criterio de diseño más exacto. Las preguntas utilizadas para diseñar la estrategia de control fueron las siguientes:

1. Enumere de 1 a 6 cuáles son las características más relevantes para usted a la hora de que los pacientes usen un caminador robótico.
2. Califique de 1 a 5, las modalidades que le parezcan más importantes para un caminador inteligente.
3. Enumere de 1 a 5 en orden de importancia, 5 sistemas de control que le parezcan más importantes para un caminador inteligente.
4. Califique de 1 a 9 los elementos de seguridad que le parezcan más esenciales dentro de un caminador robótico.

Los resultados de las 4 preguntas anteriores se analizaron mediante la prueba estadística, *Test de Friedman* (Diferencia entre todas las características), para analizar diferencias significativas de los resultados de las preguntas. Esta prueba plantea la hipótesis nula, que indica que las medias de población son todas iguales. Por tal motivo, para determinar si cualquiera de las diferencias entre las medianas es estadísticamente significativa, se compara el valor p con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula.

Si el valor p es menor o igual al nivel de significancia, las diferencias entre algunas de las medianas son estadísticamente significativas. Para esta prueba, se utiliza un nivel de significancia

denotado como alfa de 0.05, ya que este funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5 % de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real [81].

Siendo este el nivel de significancia deseado para la prueba post-hoc. Si la prueba de Friedman da como resultado un valor P menor que este nivel de significancia, el software realiza una prueba para la comparación por pares de variables de acuerdo con [82]. Este procedimiento estadístico se realizó en el software Medcal, un paquete estadístico para investigación biomédica.

Con base a los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo y la prueba de Friedman en las preguntas seleccionadas, se obtuvo información significativa, que permitió identificar las necesidades que se tuvieron en cuenta, para diseñar la estrategia de control. Con respecto a los resultados de las pruebas estadísticas avanzadas, el criterio de diseño de la estrategia de control se hizo con base a las respuestas que se obtuvieron de la encuesta. Como se expuso en el capítulo 3, se utilizó la prueba de Friedman para encontrar diferencias significativas para las respuestas de cada pregunta, teniendo en cuenta que era una misma población de muestra. De igual manera, se tuvo en cuenta el análisis descriptivo, debido a que nos da directamente las características que tienen más importancia.

Como se observa en la figura 3.2, se evidenció una necesidad de una estrategia de control, que esté orientada a la seguridad del usuario, suministre tanto al usuario como al caminador la posibilidad de tomar acciones de control del dispositivo (modalidad compartida), ofrezca un sistema de control, relacionado directamente con la detección de objetos y obstáculos, presente un sistema de frenado como medida de seguridad y finalmente que incluya dos tipos de realimentación, realimentación auditiva que incluye comentarios audibles y realimentación visual que incluye alarmas visibles respectivamente.

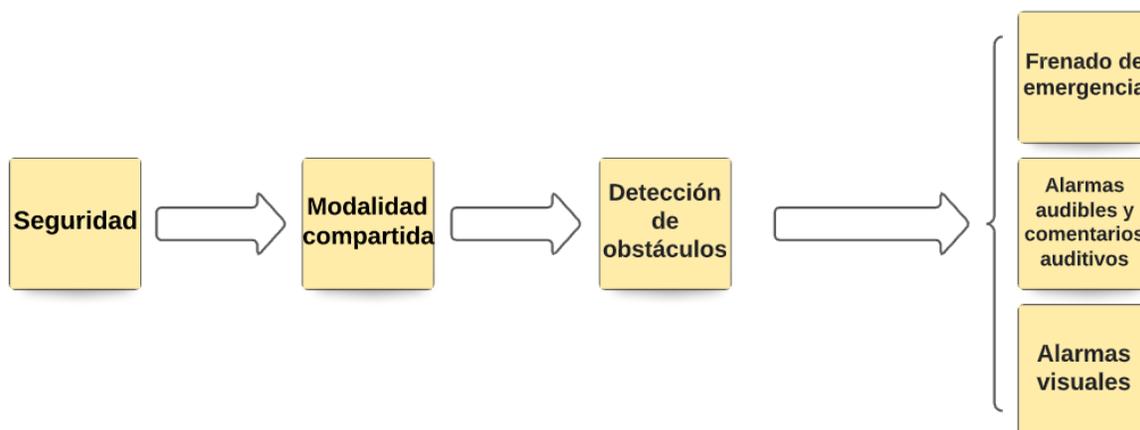


Figura 3.2: Diagrama sobre las principales necesidades encontradas en el cuestionario.

3.2.2. Principios teóricos y descripción del diseño de la estrategia de control

Como se evidenció anteriormente la estrategia tiene como finalidad implementar un sistema de detección de obstáculos con diferentes tipos de realimentación para el usuario y una

medida de seguridad. Para cumplir este objetivo, la estrategia se validó a través de una simulación para poder analizar su funcionamiento, sin embargo, tiene un componente de hardware conectado con la simulación, con la finalidad de mostrar un entorno más real (Ver sección 3.2.3.).

Inicialmente para realizar el movimiento del caminador en la simulación, se utilizó un control con 2 joysticks, simulando los soportes para antebrazos del caminador, este procedimiento se expone y aclara en la figura 3.3. Las fuerzas y torques ejercidas por el usuario en los soportes de antebrazo (simulación realizada con los joysticks del control) son las entradas al sistema, las ecuaciones 3.1 y 3.2, exponen el procedimiento de cómo se traduce la fuerza total ejercida, es decir la fuerza y el torque ejercidos en el soporte de antebrazo izquierdo y derecho (simulada por el joystick derecho e izquierdo del control.) La variable F_{izq} , es la señal de fuerza a lo largo del eje y desde el sensor izquierdo, la variable F_{der} , es la señal de fuerza a lo largo del eje y desde el sensor derecho y la variable d es la distancia entre los sensores de fuerza. Sin embargo, se debe aclarar que realmente no se tienen fuerzas ni torques, sino posiciones del joystick, debido a que el joystick no entrega fuerzas ni torques. Sin embargo, como se busca modelar de la manera más aproximada a la realidad, se exponen las ecuaciones que se utilizarían en un caminador inteligente real.

Posteriormente, el controlador utilizado para esta estrategia fue un controlador de admitancia, debido a que este permite una interacción más eficiente del usuario con el caminador [74]. De esta manera, este tipo de controladores reciben fuerzas y torques, los cuales son suministrados por los soportes para antebrazos del caminador cuando los usuarios tratan de mover el dispositivo. En términos generales, los controladores de admitancia modelan los caminadores inteligentes como un sistema de masa amortiguado de primer orden, cuyas entradas son la fuerza F y el torque τ aplicados al caminador por el usuario. Las salidas, del controlador son velocidades lineales v y angulares ω [36]. Se debe destacar que el controlador de admitancia no fue diseñado para el proyecto, sino se utilizó el controlador de admitancia del caminador AGoRA como herramienta para realizar el movimiento del caminador y frenado de emergencia para la estrategia de control de este proyecto [36], [83].

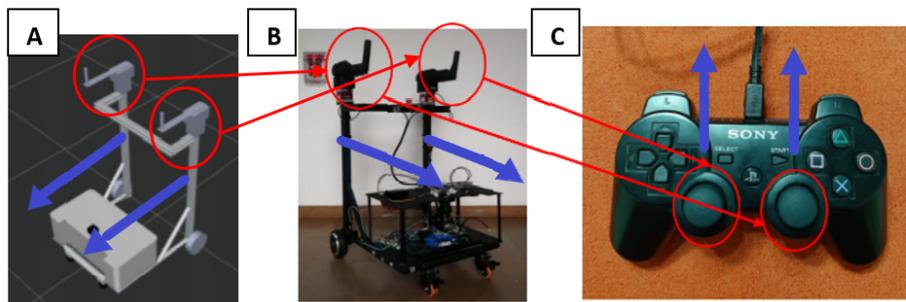


Figura 3.3: En la figura **A**, se muestra la simulación del caminador inteligente en el entorno virtual, en la figura **B**, se muestra la estructura del caminador inteligente *Black* con sus soportes para antebrazo y en la figura **C**, se muestran los Joysticks del control simulando los soportes para antebrazos del caminador descrito en las figuras **A** y **B**. Las líneas de color rojo ilustran la simulación de los soportes de antebrazo por medio de los joysticks del control y las líneas de color azul, ilustran la dirección de las fuerzas ejercidas al caminador.

$$F_{Total} = -\left(\frac{F_{izq} + F_{der}}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$\tau_{Total} = -\left(\frac{F_{izq} - F_{der}}{2}\right).d \quad (3.2)$$

Las salidas del controlador son velocidades angulares y lineales, expuestas en las ecuaciones 3.3 y 3.4, que van al efector que en este caso es el caminador inteligente. Las ecuaciones del controlador de admitancia expuestas en 3.5 y 3.6, describen la respuesta en el tiempo, donde $L(t)$ significa Sistema lineal y $A(t)$ significa Sistema angular. Las variables descritas son, m la masa virtual del caminador, J es el momento virtual de inercia del caminador y b_l y b_a son constantes de amortiguación.

$$V_c(t) = \frac{F(t) - m_v \dot{v}(t)}{b_v} \quad (3.3)$$

$$\omega_c(t) = \frac{\tau(t) - m_\omega \dot{\omega}(t)}{b_\omega} \quad (3.4)$$

$$L(t) = \frac{V_c(t)}{F(t)} = \frac{e^{-(b_l.t)/m}}{m} \quad (3.5)$$

$$A(t) = \frac{\omega_c(t)}{\tau(t)} = \frac{e^{-(b_a.t)/J}}{J} \quad (3.6)$$

Luego, el dispositivo interactúa con el entorno donde se encuentran diferentes tipos de obstáculos y objetos, los cuales son detectados por el caminador mediante el uso de un telémetro láser (TL). Esta información obtenida por el sensor láser del caminador está conectada con un módulo de detección de obstáculos, el cual a su vez va a dos actuadores que son los parlantes del computador y las alarmas visuales. Los parlantes se encargan de ejecutar alarmas y comentarios audibles, mientras que las alarmas visuales muestran flechas de luz con una dirección definida y un símbolo de peligro.

El proceso de detección de obstáculos se realiza mediante un algoritmo de *clustering*, el cual tiene como objetivo la agrupación de elementos de datos en subconjuntos que sean homogéneos según una noción determinada de similitud. Un clúster en una región densa de puntos, separada por regiones poco densas de otras regiones [84]. Para la detección de obstáculos, específicamente se utiliza el algoritmo DBSCAN, un algoritmo de agrupamiento espacial basado en densidad de puntos, es decir el número de puntos en un radio específico [85]. Hay dos parámetros clave de DBSCAN:

- **Epsilon:** La distancia que especifica los vecindarios. Dos puntos se consideran vecinos si la distancia entre ellos es menor o igual a epsilon (eps).
- **MinPts:** Número mínimo de puntos para definir un clúster.

El algoritmo DBSCAN tiene en cuenta tres tipos de puntos:

1. **Core:** Puntos interiores de un clúster, cuando tienen, al menos, un número mínimo de puntos MinPts en su vecindario de radio Epsilon.
2. **Border:** Puntos frontera: Tienen menos de MinPts puntos en su vecindario de radio Epsilon, estando en el vecindario de algún punto “core”.

3. **Noise:** Cualquier punto que no forma parte de un clúster (“core”) ni está en su frontera (“border”) [85].

Los dos actuadores descritos se activan cuando el caminador se aproxima a una distancia de 2.0 m de un obstáculo, y a su vez suministran dos tipos de realimentación para el usuario que son realimentación auditiva y realimentación visual por medio de las alarmas visuales. Para realizar este procedimiento, posterior a la detección del obstáculo, mediante el algoritmo de *clustering*, se calcula la distancia que hay entre el robot y el obstáculo, usando la ecuación 3.7. Posteriormente, se encuentra el valor del ángulo entre el caminador y el obstáculo, utilizando la función arco tangente, procedimiento expuesto en la ecuación 3.8. Finalmente, se tiene en cuenta el valor del ángulo encontrado, para determinar cuál es la orientación adecuada para guiar al usuario con respecto a que dirección debe tomar, teniendo en cuenta la ubicación y orientación del obstáculo. De igual manera se debe aclarar que el algoritmo de clustering no fue diseñado para el proyecto, sino se utilizó uno ya existente el cual se adaptó a la estrategia de control de este proyecto, el algoritmo de clustering fue tomado como de [86].

$$D_{obst} = \sqrt{(x_{rob} - x_{obs})^2 + (y_{rob} - y_{obs})^2} \quad (3.7)$$

$$\theta = \arctan(D_{obst}) \quad (3.8)$$

De igual manera el módulo de detección de obstáculos está conectado con el controlador de admitancia, para hacer la velocidad lineal del caminador cero, en caso de que se aproxime a una distancia de seguridad de 1.0 metros con un obstáculo, lo que implicaría un frenado de emergencia del dispositivo. Este supervisor de seguridad suministra una provisión de seguridad para los usuarios. La ecuación 3.7, muestra cómo se calculó la distancia de seguridad con un obstáculo y si esta era menor a la distancia de seguridad se frenaba el caminador. La figura 3.4, expone el diagrama de bloques a nivel general de la estrategia de control diseñada.

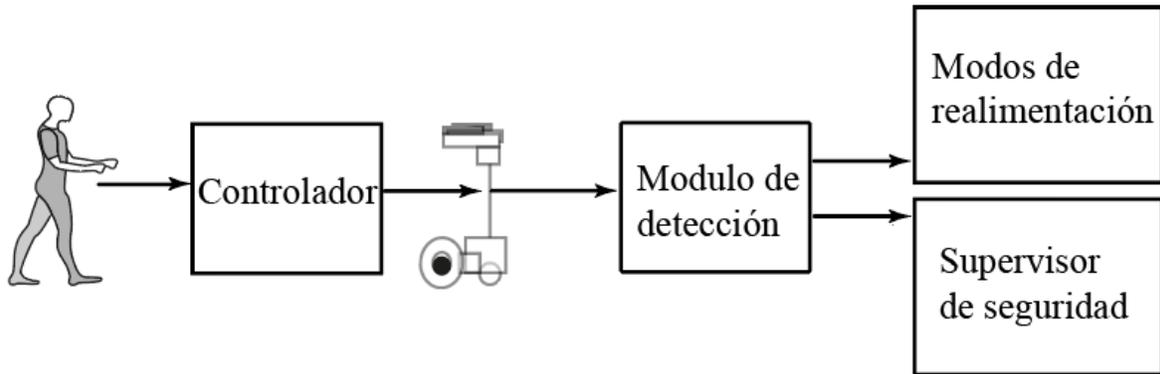


Figura 3.4: Diagrama de bloques de la estrategia planteada.

Para poder realizar la simulación de la estrategia descrita anteriormente, se diseñó un mundo en GAZEBO, donde se delimitó un camino con conos donde se desplazaría el caminador y se incluyeron distintos tipos de obstáculos con la finalidad de evaluar el funcionamiento de la estrategia. En la figura 3.5, se muestra el mundo diseñado con vista en perspectiva y superior. Sin embargo, para la realización de las pruebas se utilizó una vista en primera persona del

mundo. Esto debido a que de esta manera se suministraba una experiencia mucho más real para el usuario y los dos tipos de realimentación de la estrategia de control tenían un rol mucho más determinante, ya que el participante no podía ver la ubicación de los obstáculos y su distribución en la pista era desconocida. En la figura 3.6, se expone la vista en primera persona que experimentaron los usuarios al realizar las pruebas.

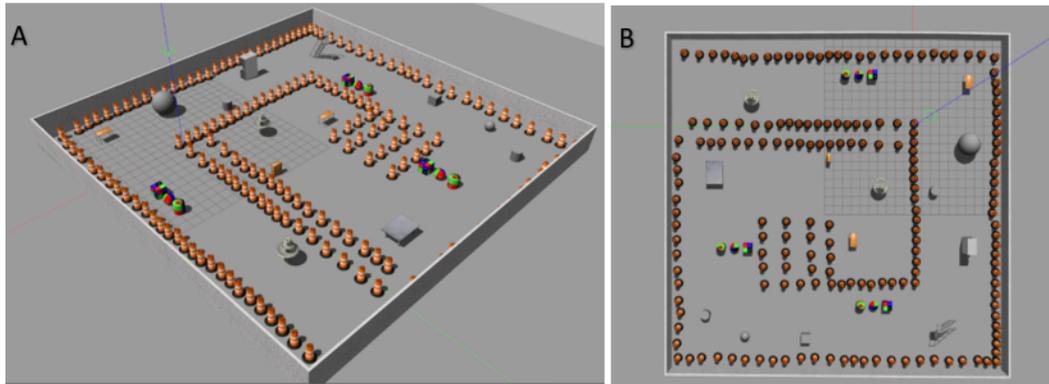


Figura 3.5: Mundo diseñado en el simulador 3D GAZEBO con vista en perspectiva y superior, mostrados en la figura **A** y **B** respectivamente.

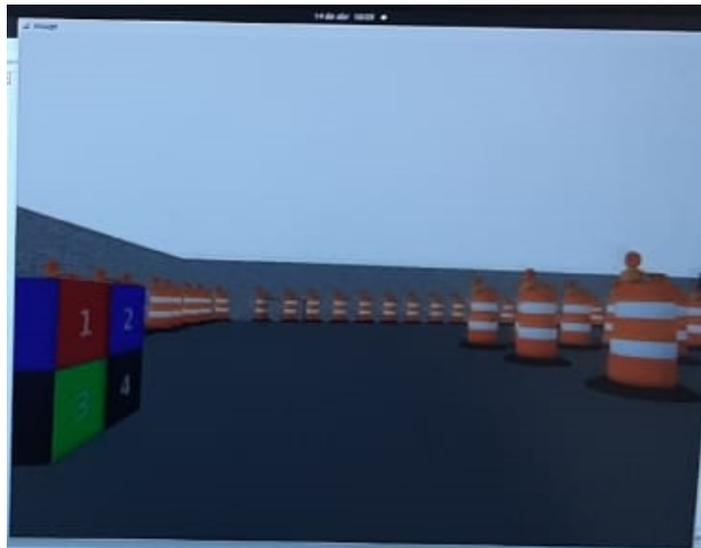


Figura 3.6: Vista en primera persona de la pista de obstáculos utilizada para las pruebas de la estrategia de control.

3.2.3. Herramientas utilizadas para el diseño de la estrategia de control

Para el desarrollo de la estrategia de control se utilizó el sistema operativo *robótico Robot operating system* (ROS), donde se ejecutaban los nodos necesarios para el funcionamiento del sistema de control. De igual manera se utilizó el lenguaje de programación Python donde se diseñaban los nodos que componen la estrategia para que fueran ejecutables e implementarlos

en ROS.

Igualmente se utilizó el simulador 3D GAZEBO, en el cual se implementó la construcción de un mundo que permitía el movimiento del caminador e incluía una pista de obstáculos donde se realizaron las pruebas de la estrategia. Finalmente se utilizó Arduino para integrar el hardware donde se muestra la realimentación visual de las alarmas visibles con el software donde se realiza el desplazamiento del caminador, la detección de obstáculos y el frenado de emergencia. Los componentes descritos anteriormente muestran en su totalidad la estrategia de control diseñada. En la figura 3.7, se expone la arquitectura de la estrategia mostrando su hardware y software.

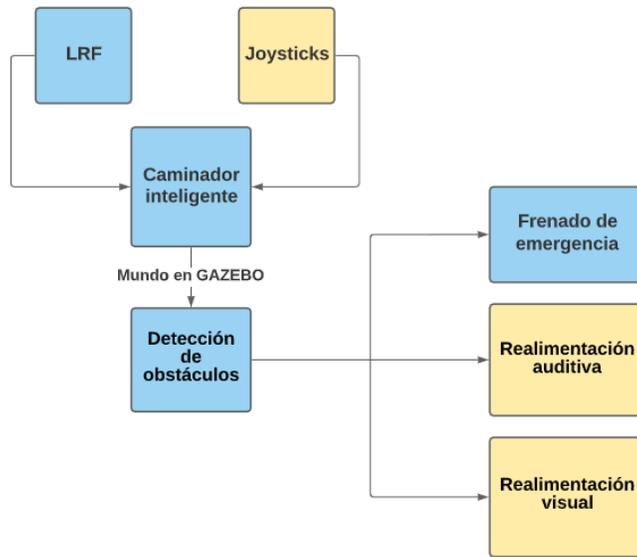


Figura 3.7: Arquitectura de la estrategia de control hardware (amarillo) y software (azul).

3.3 Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en pacientes no patológicos

Esta sección describe la metodología realizada para evaluar la usabilidad de la estrategia a través de una simulación de un caminador inteligente, en pacientes no patológicos. Se realizaron tres pasos para lograr la evaluación de la usabilidad: (i) el protocolo experimental ejecutado durante el estudio; (ii) la aplicación del cuestionario de usabilidad y (iii) el análisis de los datos del cuestionario de usabilidad.

3.3.1. Desarrollo del protocolo experimental

La usabilidad de la estrategia de control se evaluó con pacientes no patológicos. Se reclutó a un total de 5 participantes para evaluar la usabilidad de la estrategia de manera presencial. Para evaluar la usabilidad se realizó un paso compuesto por los siguientes procedimientos: Firma del consentimiento informado de manera virtual, explicación del estudio, realización de las pruebas y desarrollo del cuestionario de usabilidad de manera virtual. En el anexo D,

se encuentra detalladamente el protocolo utilizado para la realización de este estudio. En la figura 3.8, se expone como fue la configuración utilizada en las pruebas de usabilidad de la estrategia de control.

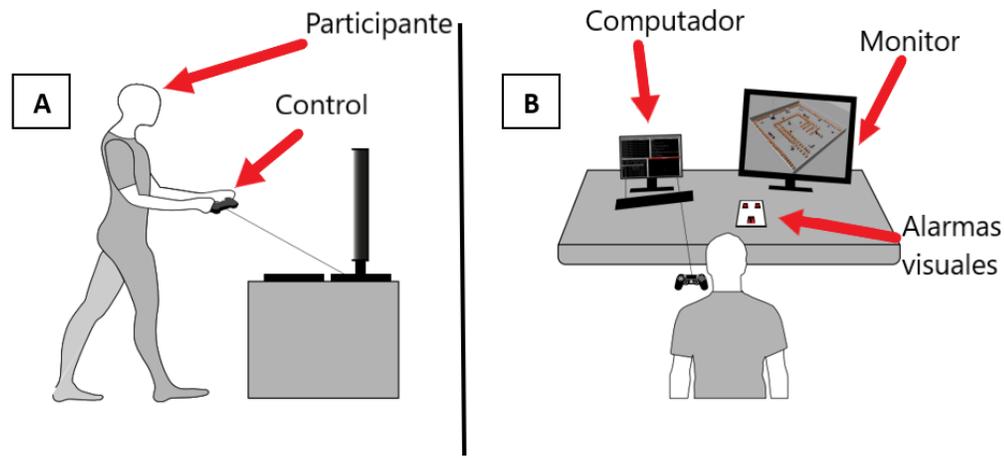


Figura 3.8: Configuración de la prueba de usabilidad de la estrategia de control realizada por usuarios no patológicos. En la figura **A**, muestra la vista lateral del participante y la figura **B**, muestra la vista posterior del participante.

3.3.2. Participantes

El estudio está orientado a ser aplicado a usuarios no patológicos. Todos los sujetos fueron invitados formalmente a participar en el estudio. Se incluyeron sujetos, que tenían la capacidad de leer y entender para diligenciar el consentimiento informado. De igual manera, que tenían un leve conocimiento de cómo manipular un control con joysticks. Se excluyeron, sujetos con deficiencias cognitivas o limitaciones físicas en algún miembro superior dominante. Individuos bajo la influencia de bebidas alcohólicas, sustancias alucinógenas o medicamentos sedantes. De igual manera sujetos que no cumplieron con las medidas de bioseguridad.

3.3.3. Análisis de datos del cuestionario de usabilidad

Para analizar los datos del cuestionario de usabilidad, se utilizó un procedimiento de análisis, basado en estadística descriptiva. Para el análisis descriptivo de los datos se utilizaron las herramientas estadísticas proporcionadas por la plataforma, donde fue posible comparar todos los datos obtenidos de los cuestionarios y determinar las tendencias de las respuestas. Además, para medir las respuestas abiertas se usó Microsoft Word.

3.3.4. Definición de variables

Para evaluar los resultados de este estudio, se medirán algunas variables. Estas variables se dividen en dos categorías principales: (1) variables de realimentación de la estrategia de control, y (2) variables del estudio de expectativas.

3.3.4.1 Variables de realimentación de la estrategia de control

- Realimentación visual: Corresponde a la presencia de alarmas visuales, que guían al usuario durante el recorrido de la pista de obstáculos y lo alertan de la presencia de un obstáculo como un escenario de peligro. Para cada prueba se registrará cuantas veces se activaron las alarmas visuales durante todo el recorrido.
- Realimentación auditiva: Corresponde a la presencia de comentarios audibles, que proporcionan una guía al usuario durante el recorrido de la pista de obstáculos y brindan una alerta sobre la presencia de un obstáculo como un escenario de peligro. Para cada prueba se registrará cuantas veces se activaron las alarmas y comentarios auditivos en todo el recorrido.
- Frenado de emergencia: Corresponde al frenado del caminador cuando se encuentra en un rango cercano a un obstáculo, que no es seguro para el usuario. Para cada prueba se registrarán cuantas veces se activó el frenado de emergencia del caminador, si sucede.
- Hora de inicio y hora de finalización de la prueba: Para cada prueba, se almacenará la duración, la hora de inicio y la hora de finalización.
- Numero de colisiones: Para cada prueba se registran cuantas veces el usuario se estrelló con un obstáculo, si sucede.

3.3.4.2 Variables del estudio de usabilidad y aceptación

Estas variables se recogerán al finalizar el estudio, se pedirá a los sujetos que completen el cuestionario de usabilidad para la obtención de estos datos, (Ver anexo E). El cuestionario de usabilidad utilizado para este estudio fue el *QUEAD (A Questionnaire for the Evaluation of Physical Assistive Devices, Version 1.0)*, una prueba de usabilidad y aceptación en la interacción física humano robot [83]. Las preguntas del cuestionario fueron adaptadas a la estrategia de control y en la tabla 4.18, se expone los temas preguntados en el cuestionario de usabilidad y posteriormente, se presentan las preguntas del cuestionario.

Usabilidad percibida	PU
Facilidad de uso percibido	PEU
Emociones	E
Actitud	A
Comodidad	C

Tabla 3.2: Categorías evaluadas en el cuestionario de usabilidad

- **PU**
 1. La estrategia de control fue útil
 2. La estrategia de control mejoro mi rendimiento durante la prueba
 3. Logré realizar la tarea rápidamente
 4. Pude completar la tarea de manera eficiente usando esta estrategia de control
 5. Pude realizar movimientos precisos con esta estrategia de control

- **PEU**

1. La estrategia de control fue fácil de usar
2. Fue fácil obtener el resultado deseado con esta estrategia de control
3. La estrategia de control fue rígida e inflexible
4. La estrategia de control se sintió incómoda
5. No necesite concentración para usar esta estrategia de control
6. No necesite fuerza física para operar esta estrategia de control
7. Usar esta estrategia de control fue intuitivo
8. Fue fácil aprender a usar esta estrategia de control
9. Esta estrategia me sería útil en caso de tener algún tipo de limitación

- **E**

1. Me gusto utilizar esta estrategia de control
2. Me sentí cómodo utilizando esta estrategia de control
3. Me sentí ansioso utilizando esta estrategia de control
4. Me sentí intimidado utilizando esta estrategia de control

- **A**

1. Creo que usar esta estrategia de control es una buena idea
2. Me gusto colaborar usando esta estrategia de control
3. Creo que usaría esta estrategia de control en tareas futuras, en caso de necesitarla

- **C**

1. Me sentí físicamente incómodo al usar esta estrategia de control
2. Me sentí tenso utilizando esta estrategia de control
3. Sentí dolor al utilizar esta estrategia de control

Capítulo 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados relacionados con los 3 estudios realizados para este proyecto. En la primera sección se presentan los resultados del estudio de percepción clínico, donde se analizaron los resultados obtenidos por la encuesta mediante estadística descriptiva, igualmente se muestran los resultados de la prueba de Friedman, realizada a las 4 preguntas que se seleccionaron para el diseño de la estrategia de control. Con respecto a la segunda sección se presentan los resultados del segundo estudio relacionado con el diseño de la estrategia de control, donde se muestra el diagrama de bloques, junto con los resultados obtenidos de hardware, software y una simulación de una prueba de la estrategia. Finalmente se presentan los resultados de la encuesta utilizada para la evaluación de usabilidad de la estrategia de control. Para obtener estos resultados se utilizó una población de usuarios no patológicos, a los cuales se les aplicó el cuestionario de usabilidad y aceptación.

4.1 Identificación de características esenciales en caminadores inteligentes

En esta sección se presentan los resultados de 29 encuestas. Es importante destacar que el desarrollo del estudio se llevó a cabo principalmente en Colombia, pero también se reportaron respuestas de otros países (Argentina, Chile, España y México), la tabla 4.1 muestra la distribución de respuestas por país.

Países	Respuestas
Colombia	86.2%
Otros países	13,8%

Tabla 4.1: Distribución de respuestas por país

No se descartó ninguna encuesta y los comentarios de los participantes informaron que el proyecto fue una buena iniciativa y apoyará el proceso de rehabilitación de las personas que utilizan caminadores inteligentes. Esta sección describe e ilustra los resultados principales de este estudio. La tabla 4.2 muestra los detalles de los participantes y sus datos demográficos.

Participantes	29	
Genero	Femenino 21	Masculino 8
Edad		
20 – 30 años	20.69 %	
30 – 40 años	31.03 %	
40 – 50 años	27.59 %	
50 – 60 años	20.69 %	
Profesión		
- Fisioterapeutas	51.72 %	
- Terapeutas ocupacionales	6.90 %	
- Médico fisiatra	6.90 %	
- Ingeniero biomédico	13.79 %	
- Médico	13.79 %	
- Kinesiólogo	3.45 %	
- Médico rehabilitador	3.45 %	
Área de trabajo en salud		
- Si (Personal clínico)	79.31 %	
- No (Personal de investigación)	20.69 %	
Área de trabajo con caminadores inteligentes		
- Si	13.79 %	
- No	86.21 %	

Tabla 4.2: Datos demográficos de la población que participo en el estudio

Se debe resaltar que, debido al diferente estilo de las preguntas diseñadas para el cuestionario, existen tres tipos de tendencias en los resultados. Para facilitar el entendimiento de estos dos tipos de resultados y las preguntas que se les aplicó la prueba de Friedman, se explica cada resultado a detalle y se le asignó a cada gráfica una leyenda en la parte inferior izquierda para especificar a qué tipo de tendencia corresponden.

- Resultados expresados por mediana mayor: Estos resultados se presentan de esta manera, debido a que el tipo de pregunta que arrojaba estas respuestas solicitaba a los participantes calificar en una escala ordinal donde el mayor valor representaba la mayor importancia de las opciones posibles. Por este motivo, calculando la mediana, se obtiene cuál opción resultaba de mayor importancia para los participantes. Debido a esto, los resultados que presenten una mayor mediana son consideradas de mayor relevancia en el estudio para este tipo de preguntas. La leyenda utilizada para identificar este tipo de resultados es la siguiente: **(M+)**.
- Resultados expresados por mediana menor: Estos resultados se presentan de esta manera, debido a que el tipo de pregunta que arrojaba estas respuestas solicitaba a los participantes ordenar en una escala ordinal donde el menor valor representaba la mayor importancia de las opciones posibles. Por este motivo, calculando la mediana, se obtiene cuál opción resultaba de mayor importancia para los participantes. Debido a esto, los resultados que presenten una mayor mediana son consideradas de mayor relevancia en el estudio para este tipo de preguntas. La leyenda utilizada para identificar este tipo de

resultados es la siguiente: (M-).

- Resultados expresados con el símbolo +, * y O: Estos resultados corresponden a las preguntas que fueron seleccionadas para el diseño. A estas preguntas se les aplicó la prueba de Friedman. El símbolo (+), corresponde a las características que presentaron una diferencia con el valor $p < \text{nivel de significancia (0.05)}$, con respecto a las demás características. Mientras que el símbolo (*), representa diferencias entre cada característica respectivamente. El símbolo (O), representa que no existen diferencias significativas entre las categorías.

4.1.1. Respuestas de las preguntas para el diseño de la estrategia de control.

En esta subsección, se presentan las respuestas de las 4 preguntas seleccionadas para el diseño de la estrategia de control. Se presentan las preguntas en la figura 4.1, la figura 4.4, la figura 4.2 y la figura 4.3.

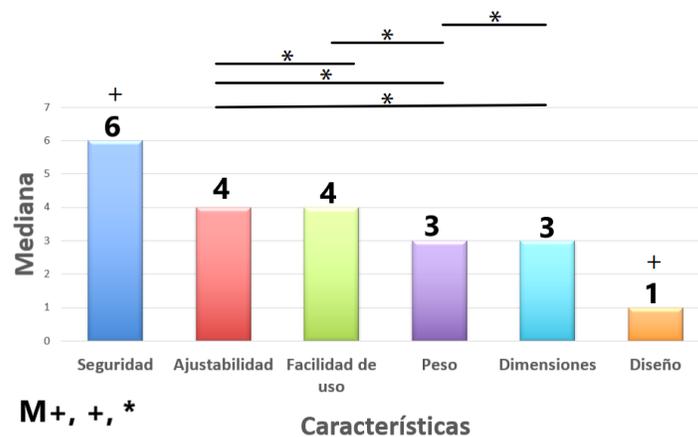


Figura 4.1: Tendencia de respuesta de pregunta sobre las características de los caminadores inteligentes consideradas de mayor importancia para los profesionales de la salud y rehabilitación. La leyenda M+, representa que las características con mayor mediana son las más importantes. La leyenda +, significa diferencias significativas con el resto de las características y la leyenda * significa diferencias significativas entre las características.

La figura 4.1, expone los resultados de las características de los caminadores inteligentes consideradas más importantes para la población de este estudio. Esta figura incluye la leyenda M+ explicada en la sección 4.1 y se evidencia que seguridad es la que presenta mayor importancia, mientras que diseño, presenta menor importancia. El valor p para esta pregunta fue < 0.00001 , es decir menor al nivel de significancia 0.05, por lo cual existen diferencias significativas entre las características. Se observa que seguridad y diseño presentaban mayormente diferencias significativas con el resto de las características.

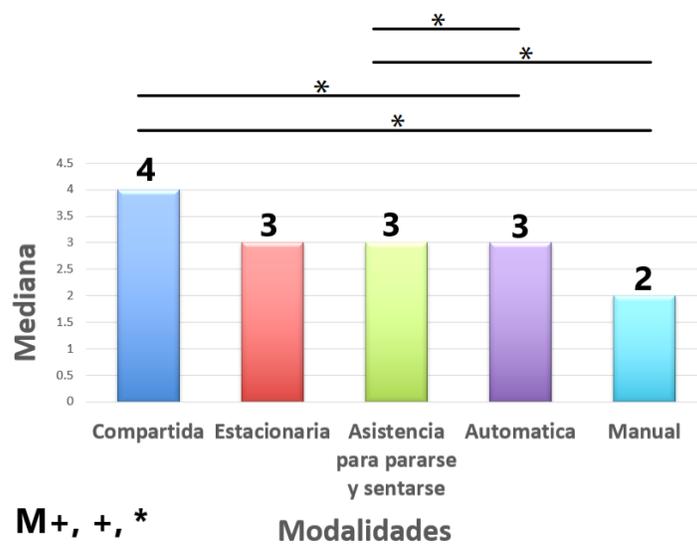


Figura 4.2: Tendencia de respuesta de pregunta sobre modalidades que ofrecen los caminadores inteligentes, considerados de mayor importancia para los participantes del estudio de percepción clínica. La leyenda M+, significa que las modalidades con mayor mediana son las más importantes. La leyenda +, significa diferencias significativas con el resto de las modalidades y la leyenda * significa diferencias significativas entre las modalidades.

La figura 4.2, expone los resultados de las modalidades de los caminadores inteligentes consideradas de mayor importancia para la población de este estudio. Se observa que modalidad compartida es la más importante para los participantes del estudio, mientras que modalidad estacionaria es la menos importante. El valor p, para esta pregunta fue <0.00001 , es decir menor al nivel de significancia 0.05, por lo cual se observa que existen diferencias significativas en las preguntas. De igual manera modalidad estacionaria presenta diferencias significativas con todas las demás categorías.

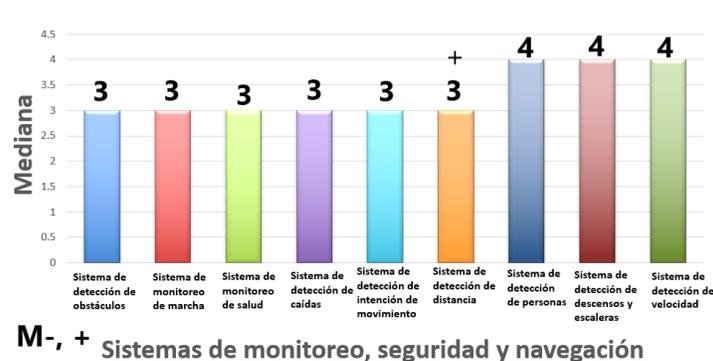


Figura 4.3: Tendencia de respuesta de pregunta sobre sistemas de control que incluyen los caminadores inteligentes, considerados de mayor importancia para los profesionales de la salud y rehabilitación. La leyenda M-, representa que los sistemas de control con menor mediana son las más importantes. La leyenda +, significa diferencias significativas con el resto de los sistemas.

La figura 4.3, expone los resultados de los sistemas de control de los caminadores inteligentes más importantes para la población de este estudio. Se observa que el sistema de detección de obstáculos es considerado de mayor importancia, mientras que el sistema de detección de personas de menor importancia. El valor p, para esta pregunta fue <0.00001 , es decir menor al nivel de significancia 0.05, por lo cual se observa que existen diferencias significativas entre las categorías de esta pregunta. Igualmente, el sistema de detección de distancia presenta diferencias significativas con todos los demás sistemas de control.

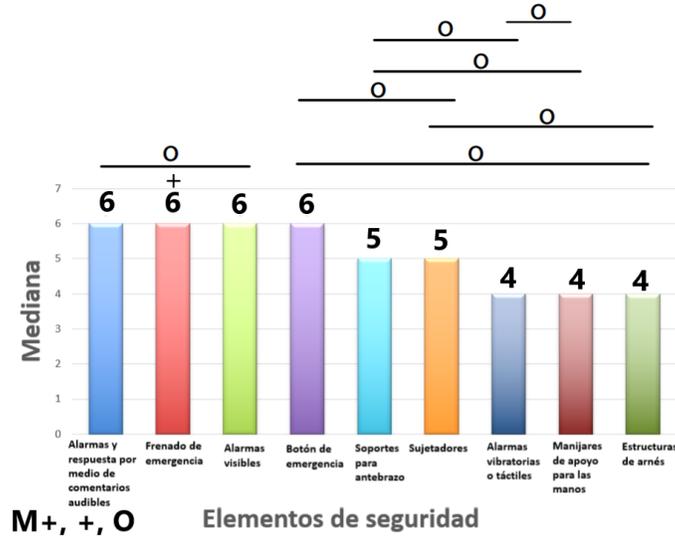


Figura 4.4: Tendencia de respuesta de pregunta sobre elementos de seguridad en caminadores inteligentes, considerados de mayor importancia para el personal de salud y rehabilitación. La leyenda M+, significa que los elementos de seguridad con mayor mediana son los más importantes. La leyenda +, significa diferencias significativas con el resto de los elementos de seguridad y la leyenda O significa que no existen diferencias significativas entre los elementos de seguridad.

La figura 4.4, expone los resultados de los elementos de seguridad de los caminadores inteligentes consideradas de mayor importancia para la población de este estudio. Se observa, que sistemas de frenado, alarmas y comentarios audibles del caminador y alarmas visuales son las más importantes, mientras que manijares de apoyo para las manos, son considerados de menor importancia. El valor p para esta pregunta fue <0.00001 , es decir menor al nivel de significancia 0.05, por lo cual se observa que existen diferencias significativas entre los elementos de seguridad. Frenado de emergencia presenta diferencias significativas con las demás características, igualmente alarmas y respuestas del caminador por medio de comentarios auditivos y alarmas visuales presentan mayormente diferencias significativas con las demás categorías distintas ha frenado de emergencia.

4.2 Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas

En esta sección se exponen los resultados de la estrategia de control diseñada, basada en los resultados que se presentaron en la sección anterior. De igual manera, la estrategia está

dividida en hardware y software, por tal motivo se presentarán los resultados obtenidos para cada uno.

La primera pregunta sobre características principales de caminadores inteligentes, presentaba 6 opciones de respuesta, con un valor mínimo de 1.0 y un valor máximo de 6.0. Los resultados de la prueba de Friedman evidenciaron un valor p mucho menor que el nivel de significancia, por tal motivo se determinó que si existen diferencias significativas entre las características. De igual manera, la diferencia mínima del rango medio permite determinar que la opción de seguridad presentaba diferencias significativas frente a las demás preguntas. No obstante, esta prueba no nos determina cuál es la de mayor importancia para la población del estudio. Sin embargo, el análisis estadístico descriptivo si, por tal razón se analiza que, para esta pregunta, la que tuviese una mayor mediana era la más importante. Con base en el análisis anterior, se tuvo en cuenta la seguridad por encima de las demás opciones, para el diseño de la estrategia. La segunda pregunta sobre modalidades de los caminadores inteligentes, presentaba 5 opciones de respuesta, con un valor mínimo de 1.0 y un valor máximo de 5.0. Al igual que con la pregunta anterior, el valor p fue menor al valor de significancia, determinando que existen diferencias significativas en las respuestas sobre modalidades. Sin embargo, el rango medio, evidencio que dos opciones no diferían entre sí, pero diferían contra el resto. Estas dos opciones fueron, modalidad compartida y asistencia para pararse y sentarse. Aunque no presentaran diferencias significativas, se seleccionó la modalidad compartida, debido a que en el análisis estadístico descriptivo fue la que tuvo mayor mediana, de la misma manera que era más adaptable para diseñar la estrategia de control.

Con respecto a la pregunta 3 relacionada con sistemas de monitoreo, seguridad y navegación en caminadores inteligentes, el comportamiento de los resultados fue totalmente distinto a las dos opciones anteriores. Por parte del valor p, fue menor que el nivel de significancia, sin embargo, solo se encontraron diferencias significativas con el sistema de detección de distancia, igualmente analizando el rango medio. Estos resultados se dieron, debido a que este tipo de pregunta solo permitía seleccionar 5 opciones de 9 posibles, por lo cual algunas opciones tenían más respuestas que otras, no obstante, no significaba que fuera de mayor importancia que los demás. Con base en lo anterior, el criterio para seleccionar el sistema de detección de obstáculos fue obtenido del análisis de estadística descriptiva, donde esta opción fue superior con algunas de las demás, aunque los datos no difirieran significativamente con el resto de los sistemas. Por este motivo, el sistema de detección de obstáculos fue escogido. De igual manera, tenía un alto grado de adaptabilidad a las respuestas de las dos preguntas anteriores. Finalmente, la pregunta 4 sobre elementos de seguridad de caminadores inteligentes, contaba con 9 opciones de respuesta cuyo rango de respuesta estaba entre 1.0 y 9.0, al igual que con las 3 preguntas anteriores, el valor p de esta pregunta fue menor al nivel de significancia, implicando que existían diferencias significativas entras las respuestas. Igualmente, el rango medio evidencio que existían diferencias significativas, por tal motivo se seleccionaron las tres opciones que, en el análisis de estadística descriptiva, mostraban una mayor mediana. La razón para seleccionar estas tres opciones fue porque se adaptaban a las preguntas anteriores y brindaban una estrategia de control más elaborada y robusta. La figura 4.5, ilustra el diagrama de bloques de la estrategia diseñada. La figura 4.5 el diagrama de bloques obtenido del diseño de la estrategia de control.

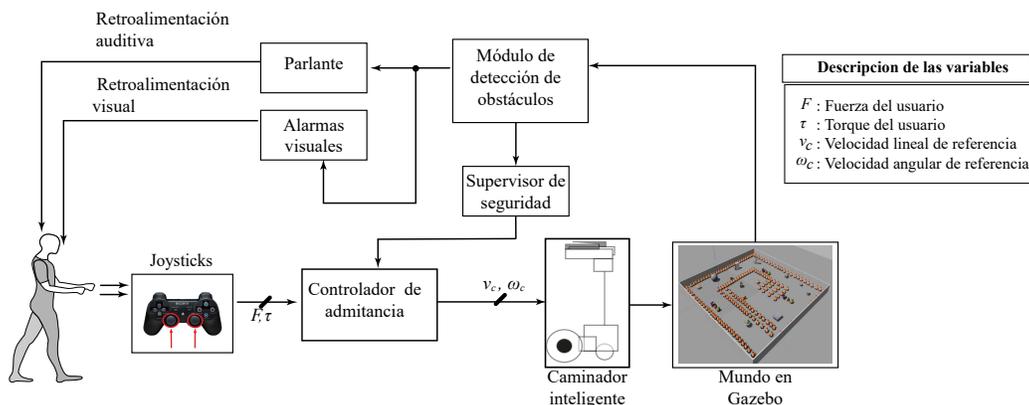


Figura 4.5: Diagrama de bloques de la estrategia de control diseñada.

4.2.1. Hardware de la estrategia de control

El hardware de la estrategia de control diseñada está compuesto por un control con 2 joysticks, tres alarmas visibles y los parlantes del computador. El control con 2 joysticks, expuesto en la figura 4.6, está presente en la estrategia debido a que es la representación de las manijas de un caminador inteligente y permite el movimiento durante toda la simulación. Las tres alarmas visuales expuestas en la figura 4.7, que están presentes en el hardware de la estrategia son:



Figura 4.6: Control con 2 joysticks para realizar el movimiento del caminador.

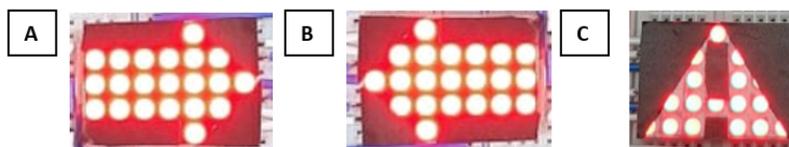


Figura 4.7: Alarma de flecha derecha, alarma de flecha izquierda y alarma de símbolo de peligro en las figuras A, B, C respectivamente.

- Flecha hacia la derecha: Esta alarma está presente en la estrategia con la finalidad de guiar al usuario a dirigirse a la derecha del obstáculo, siendo la decisión más apropiada debido a la ubicación del usuario con respecto al obstáculo.
- Flecha hacia la izquierda: Esta alarma está presente en la estrategia con la finalidad de guiar al usuario a dirigirse a la izquierda del obstáculo, siendo la decisión más apropiada debido a la ubicación del usuario con respecto al obstáculo.
- Símbolo de peligro: Esta alarma está presente en la estrategia con la finalidad de alertar al usuario que en la situación que se encuentra es un escenario de riesgo, debido a la presencia de un obstáculo, esta alarma esta interconectada con una u otra alarma de flecha descrita anteriormente.

Los parlantes del computador están presentes en la estrategia con la finalidad de brindar al usuario retroalimentación auditiva, este tipo de realimentación tiene la finalidad de guiar al usuario mediante comentarios auditivos acerca de cuál dirección se debe tomar, dependiendo de la orientación del obstáculo con respecto al usuario. Los dos comentarios presentes en la realimentación auditiva son: "Presencia de un obstáculo, gire a la derecha " y "Presencia de un obstáculo, gire a la izquierda". En la figura 4.8, se expone el hardware completo de la estrategia de control. De igual manera, se presenta en la figura 4.9, el entorno del experimento y un participante interactuando en este.

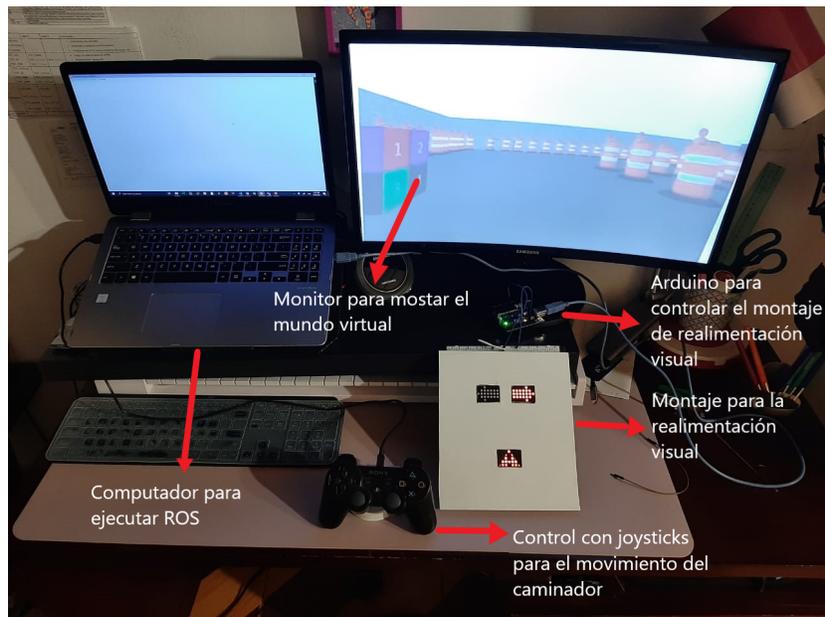


Figura 4.8: Elementos que componen el Hardware de la estrategia de control en su totalidad.

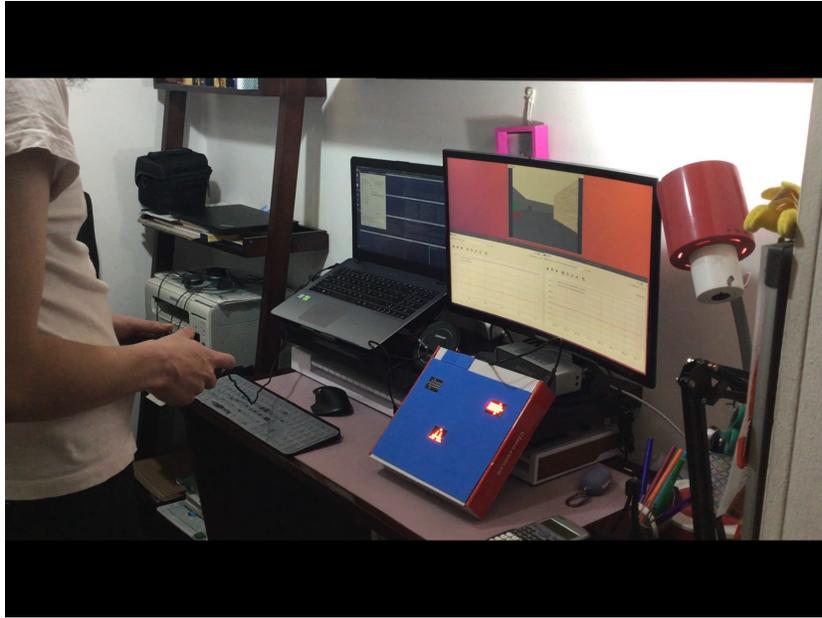


Figura 4.9: Participante en el entorno del experimento.

4.2.2. Software de la estrategia de control

El software de la estrategia de control diseñada está compuesto por el movimiento del caminador inteligente el cual incluye un telémetro láser (LRF), el sistema de detección de obstáculos y el sistema de frenado de emergencia. Para presentar los resultados del software de la estrategia de control, se utilizará de base la figura 4.10, donde se muestra el diagrama gráfico dinámico de lo que sucede en el sistema de control.

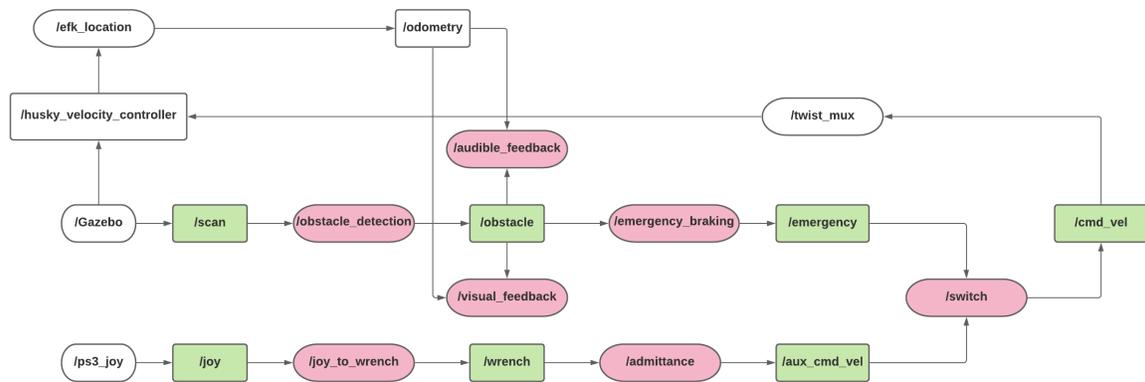


Figura 4.10: Diagrama gráfico donde se exponen los nodos y tópicos más relevantes de la estrategia de control diseñada.

El software de la estrategia está compuesto por 11 nodos y 9 tópicos. Sin embargo, solo se presentarán los más relevantes para la estrategia, en la figura 4.10 se presentan los nodos (rosa) y tópicos (verde) más relevantes:

Nodos:

- `/joy_to_wrench`: Este nodo permite la interacción del control de la figura 4.6, con el caminador inteligente de la simulación mostrado en la figura 3.3, el nodo se suscribe al tópico `/joy` y publica en el tópico `/wrench`.
- `/obstacle_detection`: Este nodo es el encargado de detectar los obstáculos presentes en el mundo de GAZEBO, utilizando el sensor LRF del caminador, el nodo se suscribe al tópico `/scan` y publica en el tópico `/obstacle`.
- `/visual_feedback`: Este nodo se encarga de enviar la señal por el puerto serial del computador al circuito de la alarma visual (hardware), con la final de brindar realimentación visual al usuario por medio de alarmas visuales, este nodo se suscribe al tópico `/obstacle` y `/odometry`.
- `/audible_feedback`: Este nodo se encarga de emitir los comentarios y alarmas audibles, con el fin de brindar realimentación auditiva al usuario, este nodo se suscribe al tópico `/obstacle` y `/odometry`.
- `/emergency_braking`: Este nodo se encarga de detectar si el rango de distancia en la cual se encuentra el obstáculo con respecto al caminador es 1m. El nodo se suscribe al tópico `/obstacle` y publica en el tópico `/emergency`.
- `/admittance`: Este nodo se encarga de implementar el controlador de admitancia en la estrategia de control. El nodo se suscribe al tópico `/wrench` y publica en el tópico `/aux_cmd_vel`.
- `/switch`: Este nodo se encarga de hacer 0 la velocidad lineal del caminador con la finalidad de frenar el caminador, o por el contrario permitir que la velocidad lineal se mantenga, dependiendo de cuál tópico a los cuales está suscrito se active. El nodo se suscribe en el tópico `/emergency` y `/aux_cmd_vel` y publica en `/cmd_vel`.

Tópicos

- `/joy`: Este tópico es el canal de información entre los nodos `/ps3` y `/joy_to_wrench`, el tópico transmite la información del estado de los ejes y botones del joystick.
- `/wrench`: Este tópico es el canal de información entre los nodos `/joy_to_wrench` y `/admittance`. Este tópico transmite la fuerza representada en el espacio libre, que está separada en sus partes lineales y angulares.
- `/scan`: Este tópico es el canal de información entre el nodo `/gazebo` y el nodo `/obstacle_detection`, el tópico transmite la información de la detección de un obstáculo presente en el mundo mediante el LRF.
- `/obstacle`: Este tópico es el canal de información de los nodos `/obstacle_detection`, `/audible_feedback`, `/visual_feedback` y `/emergency_braking`. Este tópico transmite la información de la presencia de un obstáculo en un rango de 2.0 m del caminador, para que los nodos a los cuales se suscribe mencionados anteriormente ejecuten sus respectivas funciones.

- /emergency: Este t3pico es el canal de informaci3n de los nodos /emergency_braking y /switch. El t3pico transmite la informaci3n de la presencia de un obst3culo en un rango de 1 m del caminador y la velocidad lineal en cero, para que el nodo switch ejecute su funci3n.
- /aux_cmd_vel: Este t3pico es el canal de informaci3n entre los nodos /admittance y /switch. El topico transmite la informaci3n de la velocidad que tena el caminador durante el desplazamiento, para que el nodo switch ejecute su funci3n.
- /cmd_vel: Este t3pico es el canal de informaci3n entre los nodos /switch y /twist_mux. El t3pico transmite la informaci3n de la velocidad si es cero, o la que tena el caminador durante el desplazamiento.

4.2.3. Simulaci3n de la estrategia de control

En esta subsecci3n se presentan las se1ales del controlador relacionadas con la posici3n del robot, la velocidad del robot, la orientaci3n del robot y trayectoria del robot. En la figura 4.11, se muestra el fragmento del recorrido del caminador en la pista de obst3culos con una lnea punteada de color rojo.

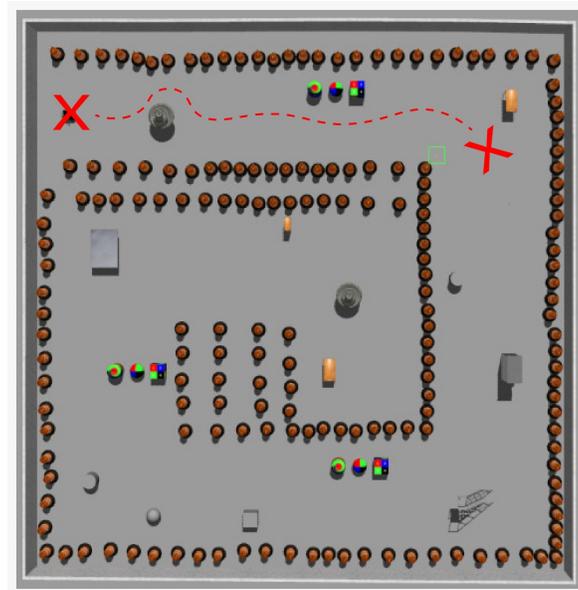


Figura 4.11: Recorrido realizado por el caminador inteligente en la pista de obst3culos. La X ubicada en la posici3n izquierda, representa el lugar donde inicio el recorrido mientras que la X ubicada en la posici3n derecha representa el lugar donde finaliz3 el fragmento del recorrido.

En la figura 4.12, se expone la trayectoria del caminador. Se puede observar, que la trayectoria cambia entre los 5 y 20 segundos. En la figura 4.13, se expone el 3ngulo de orientaci3n del caminador con respecto al eje x. Se puede observar, que el 3ngulo aumenta y disminuye, entre los 3 y 15 segundos aproximadamente. En la figura 4.14, se expone la posici3n del caminador con respecto al eje x, la cual fue aumentando progresivamente a trav3s del tiempo. En la figura 4.15, se expone la posici3n del caminador con respecto al eje y, la cual fue aumentando

hasta los 7.5 segundos aproximadamente y luego disminuyo. En la figura 4.16, se expone la velocidad lineal del caminador, la cual varía a través del tiempo. En la figura 4.17, se expone la velocidad angular del caminador, donde se generan cambios abruptos través del tiempo.

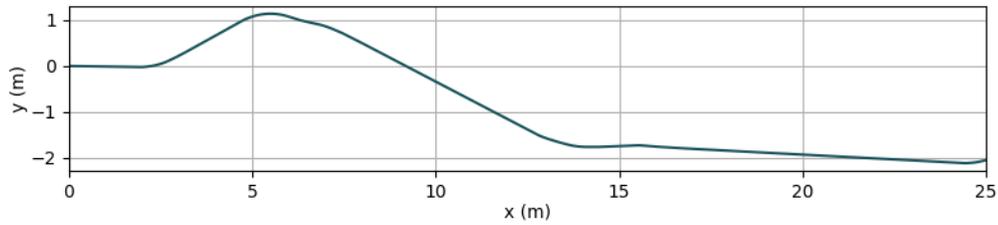


Figura 4.12: Gráfica del fragmento de la trayectoria recorrida por el caminador en la pista de obstáculos.

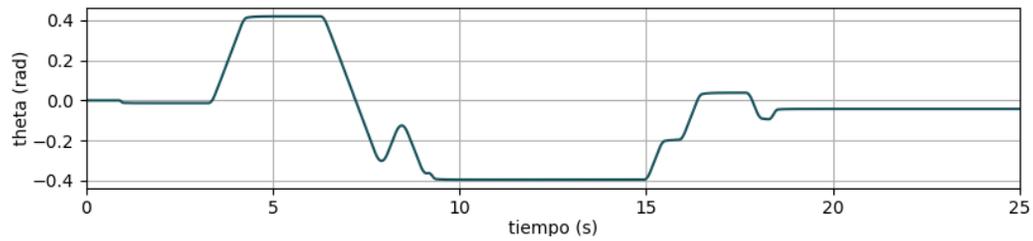


Figura 4.13: Gráfica del ángulo de orientación del caminador en función del tiempo.

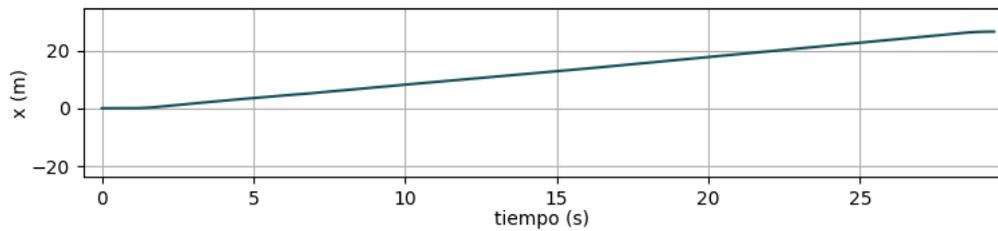


Figura 4.14: Gráfica de la posición del caminador en el eje X en función del tiempo.

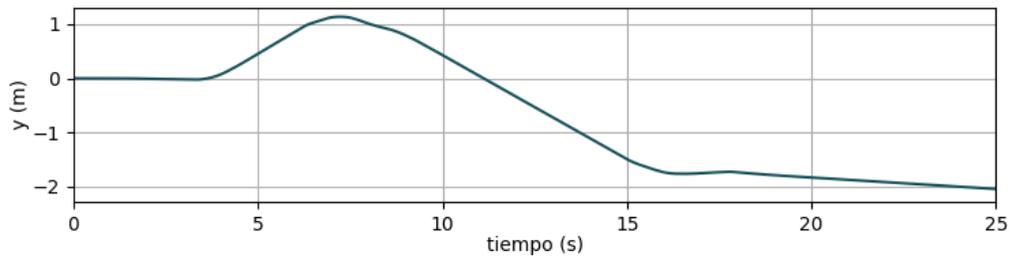


Figura 4.15: Gráfica de la posición del caminador en el eje Y en función del tiempo.

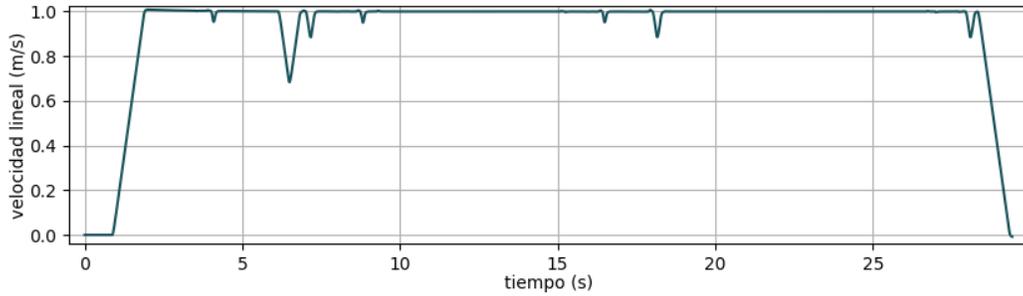


Figura 4.16: Gráfica de la velocidad lineal del caminador en función del tiempo.

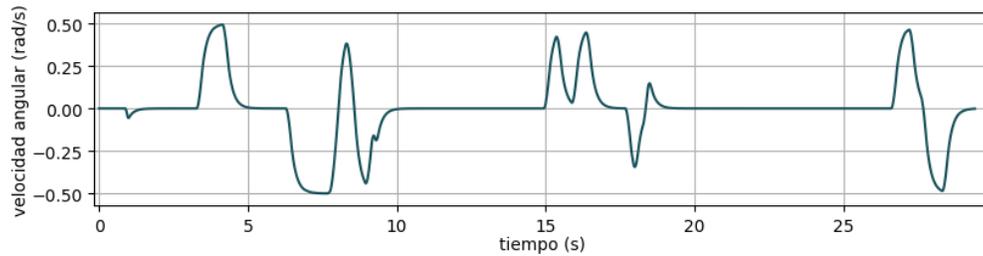


Figura 4.17: Gráfica de la velocidad angular del caminador en función del tiempo.

4.3 Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en pacientes no patológicos

Esta sección presenta los resultados de la evaluación de usabilidad de la estrategia de control, aplicada a pacientes no patológicos. Se presentan el resultado de 5 cuestionarios de usabilidad de los participantes que realizaron las pruebas.

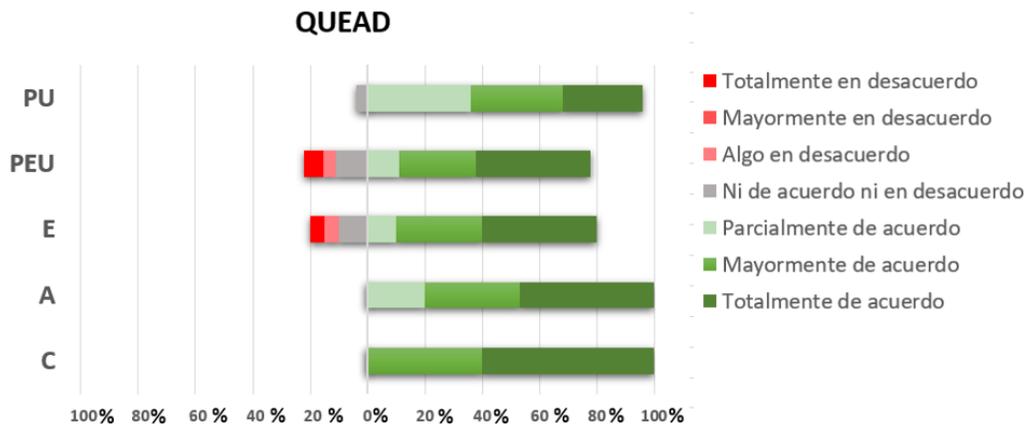


Figura 4.18: Respuestas del cuestionario de usabilidad. PU: Usabilidad percibida, PEU: Facilidad de uso percibido, E: Emociones, A: Actitud y C: Comodidad.

La figura 4.18, ilustra la gráfica que representa el porcentaje de aceptación para cada una

de las categorías del cuestionario de usabilidad. En el capítulo 3, se expusieron las preguntas para cada categoría. El porcentaje de aceptabilidad se representa con la escala de colores, donde verde es totalmente de acuerdo y rojo totalmente en desacuerdo. En la parte izquierda, se presentan las categorías evaluadas en el cuestionario de usabilidad. Se puede observar, que los valores de aceptación se encuentran hacia el lado derecho del eje, mientras que los valores de no aceptación se encuentran hacia el lado izquierdo del eje y el valor neutral, se encuentra en el centro del eje.

Totalmente en desacuerdo	Mayormente en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	Parcialmente de acuerdo	Mayormente de acuerdo	Totalmente de acuerdo
1	2	3	4	5	6	7

Figura 4.19: Escala de aceptación Likert, esta escala permite determinar el nivel de acuerdo o desacuerdo de los encuestados. Los valores están entre 1 y 7, donde 1 es totalmente en desacuerdo y 7 es totalmente de acuerdo.

La figura 4.19, muestra la escala de medición utilizada para este cuestionario. En la figura 4.18, se exponen las respuestas para la categoría del cuestionario. Para el caso de PU, se observa que la población estaba parcialmente de acuerdo y mayormente de acuerdo con que la usabilidad de la estrategia de control era buena. Con respecto a PEU, en términos generales se puede observar que la facilidad de uso de la estrategia de control es buena, debido a que la mayoría de la población puntuó entre totalmente de acuerdo y mayormente de acuerdo, sin embargo, se reportan algunos valores bajos de aceptación. Para el caso de la categoría E, el comportamiento fue muy similar a la categoría anterior, lo que refleja que en términos de las emociones generadas por los participantes de la prueba fueron positivas. Finalmente, la actitud y la comodidad tuvieron puntuaciones de aceptación altas de aceptación para ambas categorías.

Capítulo 5

DISCUSIÓN

En este capítulo, se presenta la discusión de los resultados más relevantes obtenidos en el capítulo 4. Inicialmente se presenta la discusión del primer estudio, es decir el de percepción clínica sobre caminadores inteligentes. Esta discusión, se realiza comparando los resultados de las preguntas utilizadas para el diseño de la estrategia de control, con la literatura. Posteriormente, se realiza una discusión de la estrategia de control diseñada, comparada con estrategias de control similares que involucran algunos de los caminadores presentados en la tabla 2.3. Finalmente se realiza una discusión sobre los resultados obtenidos en el cuestionario de usabilidad, con el que se evaluó la usabilidad y aceptación en usuarios no patológicos de la estrategia de control diseñada en el segundo estudio.

5.1 Identificación de las características esenciales en caminadores inteligentes

Todos los sujetos completaron satisfactoriamente el cuestionario de manera virtual y no se informaron casos de malentendidos y confusiones. La pregunta, sobre características fue diseñada para determinar cuáles son las características más relevantes para los profesionales de la salud, cuando los pacientes utilizan un caminador robótico. Los resultados evidencian que lo más relevante fue la seguridad. Este es un resultado esperado, debido a que en la literatura se ha evidenciado que los caminadores inteligentes están diseñados para promover parámetros de seguridad en las personas que utilizan estos dispositivos como ayuda a sus procesos de movilidad. En resumen, los caminadores inteligentes, tienen en cuenta aspectos de usabilidad, como la seguridad, la comodidad y la sencillez de uso del dispositivo [12].

La siguiente pregunta sobre elementos de seguridad, se diseñó para determinar los elementos de seguridad más esenciales dentro de un caminador robótico. Los resultados muestran que los sistemas de frenado de emergencia, alarmas sonoras con realimentación auditiva y alarmas visibles fueron los más importantes para la población de este estudio. Ese es un resultado esperado, debido a que en la literatura muchos caminadores incluyen frenado de emergencia, de diferentes maneras y generalmente se complementa con algún tipo de retroalimentación a través de alarmas, para que el usuario sea consciente de lo que está sucediendo en su entorno. Algunos dispositivos, como I-walker, incluyen frenos de emergencia en los que los frenos manuales han sido reemplazados por un sistema de frenado automático para promover patrones de seguridad [49]. Otros caminadores como CAIROW, ofrecen un botón de emergencia que emite una alarma para advertir a las personas cercanas al usuario que ha ocurrido una emergencia [48]. Por parte de las alarmas visuales, el caminador NOMAD XR400, cuenta

con un panel de pantalla LCD visual, encargada de informar al usuario sobre la dirección de movimiento deseada por el sistema de control. La pantalla es similar a los sistemas de guía existentes en los vehículos automatizados, que son utilizados en la industria automotriz [58]. La siguiente pregunta acerca de modalidades, fue diseñada con el fin de determinar las modalidades que parecen ser más importantes en un caminador inteligente, los resultados muestran que la modalidad compartida y la asistencia para pararse y sentarse fueron las más relevantes para los participantes del estudio. En el caso de la modalidad compartida, fue un resultado esperado, debido a que los caminadores inteligentes utilizados para este estudio, la mayoría incluía una interacción combinada entre el usuario y el dispositivo, sin embargo, en el caso de la asistencia para sentarse y pararse, se incluyó solo en algunos dispositivos. Algunos de estos dispositivos son el caminador ASBgo, que incluye dos barras con asas para ayudar en la transición de sentado a de pie y MONIMAD que incluyen una posición de estacionamiento, que bloquea las dos ruedas delanteras en una posición perpendicular a las dos ruedas traseras, por lo que el usuario tiene un punto fijo y estable para sentarse de forma segura. De igual forma, el peso del robot es una ventaja para ello [52]. En el caso del caminador inteligente GUIDO, ofrece 2 modos de control, donde el segundo modo, se comparte entre el usuario y el caminador, a menos que el usuario se encuentre con un obstáculo, en esta situación GUIDO tendrá el control total [34].

La última pregunta, presentada en la discusión se diseñó para identificar los sistemas de monitoreo, que la población clínica de este estudio consideraba más importante en un caminador inteligente. Los resultados evidencian que la detección de obstáculos y el monitoreo de la salud de los usuarios, fueron los más relevantes para ellos. Ese resultado era algo esperado porque la mayoría de los caminadores de este estudio incluyeron estos sistemas para ayudar al usuario y mejorar los parámetros de seguridad. Como se evidenció en el capítulo 2, la mayoría de los caminadores, incluyen estos sistemas de monitoreo y algunos ejemplos son AGoRA [4], GUIDO [34], PAMM [37], WACHAJA [56], MONIMAD [39], I-GO [50], JAROW [45], MOBOT [54], entre otros. Un ejemplo específico de detección de obstáculos se incluye en WACHAJA, este caminador informa al usuario a través de las asas de vibración o el cinturón de vibración sobre todos los obstáculos en su vecindad, en este caso cada motor de vibración se asigna al obstáculo más cercano dentro de su región angular [56]. Por otro lado, el monitoreo de la salud del usuario fue el segundo sistema de monitoreo en orden de importancia. Este se incluye en el caminador PAMM, el cual incluye sensores de monitoreo de salud, que son efectivos porque pueden detectar cambios a corto plazo, así como tendencias de salud a largo plazo. Este dispositivo también puede registrar el nivel de actividad del usuario (velocidad y fuerzas aplicadas), lo que con el tiempo puede ayudar a los terapeutas físicos a controlar mejor la salud del usuario [37].

5.2 Desarrollo de la estrategia de control adaptable a las necesidades clínicas

En esta sección, se presenta la discusión de la estrategia de control diseñada, con algunas ya existentes en los caminadores relevantes de la literatura. Para realizar la comparación, inicialmente se presentan algunos caminadores inteligentes, que tienen las mismas funcionalidades que se tuvieron en cuenta para el diseño de la estrategia. La tabla 5.1, expone los caminadores a los que se hizo énfasis anteriormente.

Caminador inteligente	Frenado de emergencia	Realimentación auditiva	Realimentación visual	Detección de obstáculos
Simulación (Este estudio)	Si	Si	Si	Si
Guido	Si	Si	No	Si
Va - Pamaid	No	Si	No	Si
NOMAD XR4000	No	No	Si	Si
WCIWAR	Si	No	No	Si

Tabla 5.1: Caminadores inteligentes con funcionalidades similares a las de la estrategia de control.

Como se pudo analizar en la tabla 5.1, existen varios caminadores, que tienen en común algunas de las características y funcionalidades presentes en el diseño de la estrategia de control para este proyecto. En el caso del caminador GUIDO, presentado en el capítulo 2, cuenta con una arquitectura de control, que incluye un sistema de modalidad compartida, el cual utiliza una red bayesiana para inferir los objetivos del usuario. En este enfoque de control compartido, el usuario tiene el mayor control posible, y el sistema de control interviene solo por motivos de seguridad [87]. De la misma manera, la estrategia de control diseñada cuenta con el supervisor de seguridad orientada a frenar el caminador, que solo está presente en situaciones de alto riesgo para los participantes. Por otra parte, es extremadamente importante para Guido maniobrar en espacios reducidos; Por tal motivo, cuenta con una metodología de evasión de obstáculo. Para esto, el caminador cuenta con un mapa local basado en trayectorias en este espacio. Este algoritmo es llamado CleanSweep, el cual evita obstáculos de forma segura, pero permite al usuario controlar la dirección a través de una manija de dirección [87]. Por su parte, la estrategia de control de este proyecto involucra el sistema de detección de obstáculos basado en un algoritmo de clustering. Sin embargo, no presenta evasión de obstáculos, sino que suministra al usuario estrategias de realimentación para facilitar este proceso, manteniendo una modalidad compartida en donde el usuario toma el control de la evasión con ayuda de las estrategias de realimentación y el supervisor de seguridad descrito anteriormente siempre está presente [87].

El caminador VA-PAMAID expuesto en el capítulo 2, presenta tres modos de control: manual, automático y estacionario. En modo manual, el usuario tiene el control del dispositivo y la información detectada por los sensores se emite como mensajes de voz que describen puntos de referencia y obstáculos. En modo automático, el usuario y el dispositivo comparten el control del caminador, utilizando motores conectados a las ruedas delanteras para alejar el dispositivo de los obstáculos. En este caso, el controlador anulará la entrada del usuario cuando intente evadir obstáculos, pero también emite y transmite mensajes de voz [57]. De manera muy similar, la estrategia diseñada, transmite mensajes auditivos, cuando el sensor LRF, detecta un obstáculo en el rango cercano al caminador. Estos mensajes orientan a los usuarios a tomar una dirección definida y se repiten cada 6 segundos, dependiendo la orientación y ubicación del obstáculo. Sin embargo, dejan de reproducirse cuando el caminador, se encuentra a un rango lejano de cualquier obstáculo.

El caminador NOMAD XR4000 mostrado en el capítulo 2, incluye un software de control que combina datos de fuerza con navegación robótica, para producir el movimiento del camina-

dor. Para cumplir esta finalidad, la coordinación del sistema móvil requiere una comprensión completa de las intenciones de los usuarios y las acciones deseadas. El dispositivo, cuenta modos de operación los cuales definen el sistema de control compartido: El modo activo, donde se ignora la trayectoria prevista del caminador, con la finalidad de brindar libertad al usuario para moverse por el entorno. La función principal en este modo es evitar colisiones con obstáculos y monitorear la posición del usuario. En el segundo modo, denominado activo, la trayectoria prevista del caminador se utiliza como la trayectoria deseada del sistema. La trayectoria estimada del usuario se compara activamente con la trayectoria deseada y si se detecta una desviación mayor que un ángulo de referencia dado, el movimiento del caminador se ralentiza, a menos que el usuario se vuelva a alinear con la ruta, en este caso el dispositivo se detendrá. Este modo de operación se acompaña de una interfaz gráfica para ayudar al usuario a mantenerse en el camino [58]. Con respecto a la estrategia de control de este proyecto, involucra el movimiento del usuario por medio de un controlador de admitancia, y al igual que NOMAD, se permite el movimiento libre del caminador permitiendo libertad de movimiento del usuario en la mayoría del tiempo. De igual manera que en el modo activo de NOMAD, se incluyen interfases gráficas por medio de alarmas visuales, que en este caso están determinadas para guiar a los usuarios al momento de detectar un obstáculo, funcionalidad presente en la asistencia sensorial de NOMAD.

Por parte de la simulación de la estrategia de control, con respecto a las señales presentadas en el capítulo 4, se encontró, que la trayectoria del caminador, expuesta en 4.12, cambiaba debido a la presencia de obstáculos en la pista. De igual manera, la orientación del caminador, expuesta en 4.13, variaba, ya que el participante trataba de esquivar los objetos con la finalidad de no estrellarse. La posición en el eje X, expuesta en 4.14, aumentaba uniformemente, debido a que el desplazamiento del caminador se realizaba en esa dirección. La posición en Y, expuesta en 4.15, se observa que aumenta y disminuye, debido a que el recorrido se hacía en el eje X, pero para evadir los obstáculos se hacía en el eje Y. La velocidad angular fluctúa, expuesta en 4.17, debido a que el control del caminador no se realizó de manera uniforme, por parte del participante, sino que realizaba cambios bruscos desde los joysticks. Con respecto a los cambios de la velocidad lineal, expuesta en 4.16, se evidenciaron debido a que el participante frenaba ligeramente para evadir los obstáculos y no siempre se mantuvo constante en el desplazamiento lineal.

5.3 Evaluación de usabilidad de la estrategia de control en usuarios no patológicos

En esta sección, se presenta la discusión con base en los resultados obtenidos en el cuestionario de usabilidad y aceptación. Se pudo observar, que la categoría de usabilidad percibida, más del 80 % población reporto valores de alta aceptación según la figura, 4.18, lo cual es un resultado esperado, debido a que la estrategia de control fue diseñada a partir de un cuestionario de percepción empleado con otro tipo de población, por lo cual su propósito principal era satisfacer varias necesidades. Para la segunda categoría, facilidad de uso percibido, con respecto a las preguntas positivas y negativas, se evidenció una tendencia de buena facilidad de uso, debido a que el diseño permite una interacción sencilla del usuario con el caminador, ya que solo se debe realizar el movimiento del dispositivo y los dos tipos de realimentación son bastante sencillos de interpretar y son suministrados de manera automática, por lo cual no

requiere que el participante los active de manera manual. Con respecto a la tercera categoría, acerca de emociones, se evidenció que la población reportó valores mayormente buenos de aceptación, lo cual es posible debido a que la población utilizada fueron usuarios no patológicos, por lo cual no se sentían tan identificados con las ayudas que ofrece este tipo de estrategias enfocadas a la población con algún tipo de discapacidad. La cuarta categoría, relacionada con la actitud, los participantes reportaron respuestas buenas para todas las preguntas, esto debido a que los participantes siempre están abiertos a participar en el estudio y consideran que pueden aportar de manera positiva para el proceso de investigación del estudio. Finalmente, para la sección de comodidad, todos los participantes reportaron respuestas con un grado muy alto de aceptación, debido a que en ningún momento la estrategia ni la interacción con ella afectaba físicamente su desempeño ni visualmente presentaba algún escenario o situación que incomodara a los participantes.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

En el primer estudio se logró diseñar un cuestionario de percepción y una sección de una página web, que involucraba características tanto físicas como sensoriales de caminadores inteligentes, como se pudo observar en la revisión de la literatura ambas se tomaron en cuenta como ayudas importantes en estos dispositivos. Igualmente, se involucró una muestra entre profesionales del área de la salud como fisioterapeutas, terapeutas ocupacionales, médicos e ingenieros biomédicos, de los cuales se obtuvo su percepción frente a los caminadores inteligentes y sus características más importantes desde su punto de vista.

Se evidenció en la literatura, que casi todos los caminadores inteligentes, cuentan con un sistema asistido de detección de obstáculos con sensores, así como un diseño práctico que ha sido estudiado para proporcionar y mejorar una marcha estable. De igual manera, para los profesionales de la salud y rehabilitación, la seguridad y la ajustabilidad fueron parámetros fundamentales que deberían considerarse como características principales de los caminadores inteligentes. De la misma forma la retroalimentación audible, visual y los sistemas de frenado son muy importantes para ellos y deben tenerse en cuenta en el momento de diseñar estrategias de control orientadas a la seguridad para caminadores robóticos. Otras características han sido analizadas y la propulsión activa, la respuesta háptica y el peso ligero se consideran con un rango de alta importancia para ser incluidas estos dispositivos, para mejorar los parámetros de facilidad de uso, control y manipulación del dispositivo.

En el segundo estudio, se logró diseñar una estrategia de control, basada en la opinión de los profesionales de la salud del primer estudio. La estrategia incluía detección de obstáculos, frenado de emergencia como medida de seguridad y dos tipos de realimentación para los usuarios, auditiva y visual respectivamente. De esta manera, la estrategia incluía componentes tanto en hardware como en software, donde en el software se encontraba el movimiento del caminador, el sistema de detección de obstáculos y el frenado de emergencia. Mientras que, en el hardware, estaba el control con joysticks con el que se controlaba el caminador, un circuito de realimentación visual, donde se mostraban las alarmas visuales y los parlantes del computador donde se emitían los comentarios y alarmas auditivas.

De la literatura se pudo evidenciar, que diferentes caminadores ofrecen estrategias similares donde incluían varias de estas características, sin embargo, ningún caminador incluía las cuatro características mencionadas anteriormente, sino por lo general 2 o 3 de ellas. Donde en todos los casos ofrecían detección de obstáculos, y principalmente realimentación auditiva, frenado de emergencia y realimentación visual se veían con menor frecuencia, en estas estrategias de control.

Se pudo observar en la simulación de la estrategia de control que la señal relacionada con la trayectoria del caminador era muy parecida al fragmento de la trayectoria que realizó el caminador inteligente en la pista de obstáculos. Por parte de las otras señales como la velocidad angular o lineal, y la posición en X y Y, mostraban variaciones debido al desarrollo y la forma de controlar el caminador con los joysticks por parte del participante que realizó la prueba. Por otra parte, se pudo evidenciar que, en el recorrido de la pista de obstáculos, las señales presentan cambios importantes, debido a la presencia de obstáculos y objetos en el entorno, los cuales alteran el recorrido normal por parte de los participantes.

Finalmente se pudo evaluar la usabilidad de la estrategia de control diseñada en usuarios no patológicos, donde las categorías de comodidad, usabilidad percibida y actitud obtuvieron mayores calificaciones que la categoría de emociones y facilidad de uso. Resultados esperados, debido a las características de la estrategia de control y a la población de muestra, con los cuales se hizo la evaluación de usabilidad. Principalmente estos resultados se dieron por el contexto de los participantes del estudio, ya que al ser pacientes no patológicos no tienen las mismas necesidades ni perspectiva que pacientes que sí presenten algún tipo de limitación en su movilidad.

Capítulo 7

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo expone las recomendaciones y trabajos futuros que complementarían el presente trabajo en el corto, mediano y largo plazo. Como trabajos futuros de corto plazo, se espera implementar los modos de realimentación de la estrategia de control, relacionados con los comentarios audibles y las alarmas visuales en un caminador inteligente real. De tal forma que, junto con los supervisores de seguridad suministrados por el frenado de emergencia, mejoren la interacción presente entre el caminador y el usuario, potenciando parámetros de seguridad en las terapias de rehabilitación y asistencia. De igual manera, por parte de la obtención de las necesidades, tener en cuenta la opinión de los pacientes y la población con problemas de movilidad y complementarla con la de los profesionales de la salud.

Como trabajos de medio plazo, se espera implementar sistemas de control relacionados con la evasión de obstáculos, utilizando campos de fuerzas de repulsión y atracción al momento de detectar los objetos en el entorno. Este tipo de sistemas guían a los pacientes lejos de los obstáculos, debido a que los obstáculos generan fuerzas repulsivas hacia el caminador, mientras que una localización objetivo genera fuerzas atractivas frente al dispositivo, por lo cual lo conducen de manera segura hacia el destino que se dirige.

Finalmente, como trabajos de largo plazo, se espera lograr relacionar el sistema diseñado en esta tesis con el sistema presentado anteriormente de evasión de obstáculos. De esta manera, lograr implementar diferentes modalidades de interacción del usuario con el caminador, es decir la posibilidad de que con un switch el dispositivo actúe de manera compartida como en la estrategia diseñada o de manera automática, dependiendo de lo que el usuario desee. De esta manera, se mantiene la posibilidad de incluir diferentes estrategias de control, mediante las cuales el usuario pueda tomar acciones de control o por el contrario el dispositivo tome el control absoluto de la situación.

Bibliografía

- [1] A. S. Buchman, P. A. Boyle, S. E. Leurgans, L. L. Barnes y D. A. Bennett, «Cognitive function is associated with the development of mobility impairments in community-dwelling elders,» *American Journal of Geriatric Psychiatry*, vol. 19, n.º 6, págs. 571-580, 2011, ISSN: 15457214. DOI: 10.1097/JGP.0b013e3181ef7a2e.
- [2] S. World Health Organization. Geneva, *Ageing and Health*, 2018.
- [3] T. world bank, *Disability inclusion*, 2018. dirección: <https://www.worldbank.org/en/topic/%7B%5C%7D0A disability> (visitado 29-09-2020).
- [4] S. D. Sierra M., M. Garzón, M. Múnera y C. A. Cifuentes, «Human–Robot–environment interaction interface for smart walker assisted gait: AGoRA walker,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, n.º 13, págs. 1-29, 2019, ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s19132897.
- [5] K. H. Seo y J. J. Lee, «The development of two mobile gait rehabilitation systems,» *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 17, n.º 2, págs. 156-166, 2009, ISSN: 15344320. DOI: 10.1109/TNSRE.2009.2015179.
- [6] «WHO | The Atlas of Heart Disease and Stroke,» *WHO*, 2010.
- [7] *Spinal Cord Injuries*, 2013. dirección: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/spinal-cord-injury>.
- [8] *¿Cuántas personas son afectadas por la parálisis cerebral?* 2015. dirección: <https://espanol.nichd.nih.gov/salud/temas/cerebral-palsy/informacion/personas>.
- [9] A. Navarro y A. Restrepo, «Consecuencias Neuropsicológicas,» *Univ. Psychol. Bogotá (Colombia)*, vol. 4, n.º 1, págs. 107-115, 2005, ISSN: 1657-9267.
- [10] National Institute of Neurological disorders and stroke, *Cerebral Palsy: Hope Through Research*, 2020. dirección: <https://www.ninds.nih.gov/Disorders/Patient-Caregiver-Education/Hope-Through-Research/Cerebral-Palsy-Hope-Through-Research>.
- [11] (DANE/Gobierno de Colombia), «Censo general 2005 DISCAPACIDAD - COLOMBIA,» *Perfil Manta–Cundinamarca*, págs. 5-7, 2005.
- [12] M. M. Martins, C. P. Santos, A. Frizzera-neto y R. Ceres, «Assistive mobility devices focusing on Smart Walkers : Classification and review,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, n.º 4, págs. 548-562, 2012, ISSN: 0921-8890. DOI: 10.1016/j.robot.2011.11.015.
- [13] W. H. Organization, *Caídas*. dirección: <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/falls>.

- [14] E. K. Rossen y K. A. Knafl, «Older women's response to residential relocation: Description of transition styles,» *Qualitative Health Research*, vol. 13, n.º 1, págs. 20-36, 2003, ISSN: 10497323. DOI: 10.1177/1049732302239409.
- [15] D. Mariana Haro, «Laboratorio de análisis de marcha y movimiento,» *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 25, n.º 2, págs. 237-247, 2014, ISSN: 07168640. DOI: 10.1016/s0716-8640(14)70034-3.
- [16] C. Cifuentes, F. Martínez y E. Romero, «Análisis teórico y computacional de la marcha normal y patológica: una revisión,» *Revista Med*, vol. 18, n.º 2, pág. 182, 2010, ISSN: 0121-5256. DOI: 10.18359/rmed.1311.
- [17] S. paola rodriguez, «Marcha patologica,» 2020.
- [18] L. Vargas, P. Caicedo, S. Salinas, W. Sierra y L. Rodriguez, «Protocolo de Evaluación de un Sistema para Medición de Parámetros de Tiempo de la Marcha Humana,» en *Congreso Iberdiscap*, vol. 22, 2017, págs. 23-24.
- [19] W. Pirker y R. Katzenschlager, «Gait disorders in adults and the elderly: A clinical guide,» *Wiener Klinische Wochenschrift*, vol. 129, n.º 3-4, págs. 81-95, 2017, ISSN: 16137671. DOI: 10.1007/s00508-016-1096-4.
- [20] A. S. Duxbury, «Gait disorders and fall risk: Detection and prevention,» *Comprehensive Therapy*, vol. 26, n.º 4, págs. 238-245, 2000, ISSN: 00988243. DOI: 10.1007/s12019-000-0024-7.
- [21] G. Lacey y K. Dawson-Howe, «Evaluation of robot mobility aid for the elderly blind,» en *Proceedings of the Fifth International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, Citeseer, vol. 8, 1997.
- [22] L. VanHiel, BME, MSPT y CCRC, «Lesión de la médula espinal y rehabilitación de la marcha,» *Model Systems Knowledge Translation Center (MSKTC)*, págs. 1-7, 2011.
- [23] P. Müller, A. J. Del Ama, J. C. Moreno y T. Schauer, «Adaptive multichannel FES neuroprosthesis with learning control and automatic gait assessment,» *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 17, n.º 1, págs. 1-20, 2020.
- [24] X. Wan e Y. Yamada, «Changes in the determinism of the gait dynamics with the intervention of a robotic walker,» *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, n.º 14, 2020, ISSN: 20763417. DOI: 10.3390/app10144939.
- [25] N. B. Alexander y A. Goldberg, «Gait disorders: Search for multiple causes,» *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, vol. 72, n.º 7, 2005, ISSN: 08911150. DOI: 10.3949/ccjm.72.7.586.
- [26] R. Cartier et al., «Caidas y alteraciones de la marcha en los adultos mayores,» *Revista médica de Chile*, vol. 130, n.º 3, págs. 332-337, 2002.
- [27] J. M. L.-T. Covisa, «Alteraciones de la marcha,» *Jmunozy. Org*, págs. 154-158,
- [28] M. Morris, R. Iansek, T. Matyas y J. Summers, «Abnormalities in the stride length-cadence relation in parkinsonian gait,» *Movement Disorders*, vol. 13, n.º 1, págs. 61-69, 1998, ISSN: 08853185. DOI: 10.1002/mds.870130115.
- [29] J. Gorgues, «Ayudas técnicas para la marcha,» *Offarm*, vol. 25, n.º 11, págs. 97-101, 2006.

- [30] H. Bateni y B. E. Maki, «Assistive devices for balance and mobility: Benefits, demands, and adverse consequences,» *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 86, n.º 1, págs. 134-145, 2005, ISSN: 00039993. DOI: 10.1016/j.apmr.2004.04.023.
- [31] H. Robinson, B. MacDonald y E. Broadbent, «The Role of Healthcare Robots for Older People at Home: A Review,» *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, n.º 4, págs. 575-591, 2014, ISSN: 18754805. DOI: 10.1007/s12369-014-0242-2.
- [32] A. Cifuentes, M. Plaza y S. Rondón, «Diseño de un módulo de transformación para sillas de ruedas eléctricas en silla de ruedas inteligente,» *Ciencia y poder aéreo*, vol. 11, n.º 1, 2016.
- [33] C. Valadão, E. Caldeira, T. Bastos-Filho, A. Frizzera-Neto y R. Carelli, «A new controller for a smart walker based on human-robot formation,» *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, n.º 7, págs. 1-26, 2016, ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s16071116.
- [34] A. J. Rentschler, R. Simpson, R. A. Cooper y M. L. Boninger, *Clinical evaluation of Guido robotic walker*, 2008. DOI: 10.1682/JRRD.2007.10.0160.
- [35] A. F. Neto, J. A. Gallego, E. Rocon, J. L. Pons y R. Ceres, «Extraction of user 's navigation commands from upper body force interaction in walker assisted gait,» págs. 1-16, 2010.
- [36] S. Sierra, M. Munera, T. Provot, M. Bourgain y C. Cifuentes, «Evaluation of Physical Interaction during Walker-Assisted Gait with the AGoRA Walker: Strategies based on Virtual Mechanical Stiffness.,» *Sensors.*,
- [37] J. S. Henry y V. Aharonson, «Gait monitoring for the elderly using a robotic walking aid,» en *2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, IEEE, 2010, págs. 000 392-000 394.
- [38] M. Spenko, H. Yu y S. Dubowsky, «Robotic personal aids for mobility and monitoring for the elderly,» *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 14, n.º 3, págs. 344-351, 2006.
- [39] V. Pasqui, L. Saint-Bauzel y O. Sigaud, «Characterization of a least effort user-centered trajectory for sit-to-stand assistance,» en *IUTAM Symposium on Dynamics Modeling and Interaction Control in Virtual and Real Environments*, Springer, 2011, págs. 197-204.
- [40] P. Rumeau, V. Pasqui-Boutard, M. Schaff, S. Moulias, P. Mederic, F. Steenkeste, F. Piette, B. Vellas, N. Noury y V. Dupourquet, «Techniques de la robotique : application au développement de déambulateurs adaptés au handicap à la marche des personnes âgées,» *NPG Neurologie - Psychiatrie - Geriatrie*, vol. 5, n.º 25, págs. 31-37, 2005, ISSN: 16274830. DOI: 10.1016/S1627-4830(05)82550-4.
- [41] A. Frizzera-Neto, R. Ceres, E. Rocon y J. L. Pons, «Empowering and assisting natural human mobility: The symbiosis walker,» *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, n.º 3, pág. 29, 2011.
- [42] A. F. Neto, J. A. Gallego, E. Rocon, J. L. Pons y R. Ceres, «Extraction of user 's navigation commands from upper body force interaction in walker assisted gait,» págs. 1-16, 2010.

- [43] A. Frizera, R. Raya, J. Pons, A. Abellanas y R. Ceres, «The smart walkers as geriatric assistive device,» *6th International Conference of the International Society for Gerontechnology*, 2008.
- [44] C. A. Cifuentes, C. Rodriguez, A. Frizera y T. Bastos, «Sensor fusion to control a robotic walker based on upper-limbs reaction forces and gait kinematics,» *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, n.º February 2016, págs. 1098-1103, 2014, ISSN: 21551774. DOI: 10.1109/biorob.2014.6913927.
- [45] G. Lee, T. Ohnuma y N. Y. Chong, «Design and control of JAIST active robotic walker,» *Intelligent Service Robotics*, vol. 3, n.º 3, págs. 125-135, 2010.
- [46] J. Ye, J. Huang, J. He, C. Tao y X. Wang, «Development of a width-changeable intelligent walking-aid robot,» en *2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*, IEEE, 2012, págs. 358-363.
- [47] Y. Jiang y S. Wang, «Adapting directional intention identification in running control of a walker to individual difference with fuzzy learning,» *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2010*, n.º c, págs. 693-698, 2010. DOI: 10.1109/ICMA.2010.5589091.
- [48] M. F. Chang, W. H. Mou, C. K. Liao y L. C. Fu, «Design and implementation of an active robotic walker for Parkinson's patients,» *Proceedings of the SICE Annual Conference*, n.º June 2015, págs. 2068-2073, 2012.
- [49] U. Cortés, A. Martínez-Velasco, C. Barrué, E. Martín, F. Campana, R. Annicchiarico y C. Caltagirone, «Towards an Intelligent Service to Elders Mobility Using the i-Walker.,» en *AAAI Fall Symposium: AI in Eldercare: New Solutions to Old Problems*, 2008, págs. 32-38.
- [50] C.-K. Lu, Y.-C. Huang y C.-J. Lee, «Adaptive guidance system design for the assistive robotic walker,» *Neurocomputing*, vol. 170, págs. 152-160, 2015.
- [51] Y.-C. Huang, H.-P. Yang, C.-H. Ko y K.-Y. Young, «Human intention recognition for robot walking helper using ANFIS,» en *2011 8th Asian Control Conference (ASCC)*, IEEE, 2011, págs. 311-316.
- [52] J. Alves, C. P. Santos, E. Seabra y L. F. Silva, «ASBGO*: A MECHATRONIC IMPROVED SMART WALKER,»
- [53] J. Alves, I. Caetano, E. Seabra y C. Santos, «Design considerations of ASBGo++ (Plus Plus) Smart Walker,» 2017.
- [54] Y. Koumpouros, A. Karavasili, E. Efthimiou, S.-E. Fotinea, T. Goulas y A. Vacalopoulou, «User Evaluation of the MOBOT rollator type robotic mobility assistive device,» *Technologies*, vol. 5, n.º 4, págs. 73, 2017.
- [55] I. Call, «Intelligent Active MOBility Assistance RoBOT integrating Multimodal Sensory Processing, Proactive Autonomy and Adaptive Interaction,»
- [56] A. Wachaja, P. Agarwal, M. Zink, M. R. Adame, K. Möller y W. Burgard, «Navigating blind people with walking impairments using a smart walker,» *Autonomous Robots*, vol. 41, n.º 3, págs. 555-573, 2017.

- [57] A. J. Rentschler, R. A. Cooper, B. Blasch y M. L. Boninger, «Intelligent walkers for the elderly: Performance and safety testing of VA-PAMAID robotic walker,» *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 40, n.º 5, págs. 423-432, 2003.
- [58] A. Morris, R. Donamukkala, A. Kapuria, A. Steinfeld, J. T. Matthews, J. Dunbar-Jacob y S. Thrun, «A robotic walker that provides guidance,» en *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, IEEE, vol. 1, 2003, págs. 25-30.
- [59] G. S. Wasson, J. P. Gunderson, S. Graves y R. A. Felder, «Effective Shared Control in Cooperative Mobility Aids.,» en *FLAIRS Conference*, 2001, págs. 509-513.
- [60] G. Wasson, J. Gunderson, S. Graves y R. Felder, «An assistive robotic agent for pedestrian mobility,» en *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, 2001, págs. 169-173.
- [61] J. Paulo, P. Peixoto y U. J. Nunes, «ISR-AIWALKER: Robotic walker for intuitive and safe mobility assistance and gait analysis,» *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 47, n.º 6, págs. 1110-1122, 2017.
- [62] L. Garrote, J. Paulo, J. Perdiz, P. Peixoto y U. J. Nunes, «Robot-assisted navigation for a robotic walker with aided user intent,» en *2018 27th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN)*, IEEE, 2018, págs. 348-355.
- [63] G. Lacey, S. M. Namara y K. M. Dawson-Howe, «Personal adaptive mobility aid for the infirm and elderly blind,» *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 1458, págs. 211-220, 1998, ISSN: 16113349. DOI: 10.1007/bfb0055980.
- [64] J. Huang, P. Di, K. Wakita, T. Fukuda y K. Sekiyama, «Study of fall detection using intelligent cane based on sensor fusion,» en *2008 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, IEEE, 2008, págs. 495-500.
- [65] S. T. Londei, J. Rousseau, F. Ducharme, A. St-Arnaud, J. Meunier, J. Saint-Arnaud y F. Giroux, «An intelligent videomonitoring system for fall detection at home: perceptions of elderly people,» *Journal of telemedicine and telecare*, vol. 15, n.º 8, págs. 383-390, 2009.
- [66] N. Toufan y A. Niknafs, «Robot path planning based on laser range finder and novel objective functions in grey wolf optimizer,» *SN Applied Sciences*, vol. 2, n.º 8, págs. 1-19, 2020.
- [67] S. Cloix, G. Bologna, V. Weiss, T. Pun y D. Hasler, «Low-power depth-based descending stair detection for smart assistive devices,» *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2016, n.º 1, págs. 1-15, 2016.
- [68] S. Ghousayni, C. Stevens, S. Durham y D. Ewins, «Assessment and validation of a simple automated method for the detection of gait events and intervals,» *Gait & Posture*, vol. 20, n.º 3, págs. 266-272, 2004.
- [69] F. F. S. Divan, C. Guerrero, F. Zenatti, R. Guidolin, L. Palopoli y D. Fontanelli, «Human-Robot Interaction Analysis for a Smart Walker for Elderly: The ACANTO Interactive Guidance System,» *International Journal of Social Robotics*, vol. 12, 2 mayo de 2020, ISSN: 1875-4791. DOI: 10.1007/s12369-019-00572-5.

- [70] I.-S. Weon y S.-G. Lee, «Intelligent robotic walker with actively controlled human interaction,» *ETRI Journal*, vol. 40, n.º 4, págs. 522-530, 2018.
- [71] Y. Hirata, T. Baba y K. Kosuge, «Motion control of omni-directional type walking support system "Walking Helper",» en *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.*, IEEE, 2003, págs. 85-90.
- [72] S. X. staff, *A smart walker that guides its users*, dic. de 2013. dirección: <https://phys.org/news/2013-12-smart-walker-users.html>.
- [73] P. Rusu, E. M. Petriu, T. E. Whalen, A. Cornell y H. J. Spoelder, «Behavior-based neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation,» *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 52, n.º 4, págs. 1335-1340, 2003.
- [74] G. Andaluz, V. Andaluz y A. Rosales, «Modelación, Identificación y Control de Robots Móviles,» *Escuela Politécnica Nacional*, pág. 9, 2013.
- [75] W. Yu y A. Perrusquía, «Simplified Stable Admittance Control Using End-Effector Orientations,» *International Journal of Social Robotics*, vol. 12, n.º 5, págs. 1061-1073, 2020, ISSN: 18754805. DOI: 10.1007/s12369-019-00579-y.
- [76] M. F. Jiménez, M. Monllor, A. Frizera, T. Bastos, F. Roberti y R. Carelli, «Admittance Controller with Spatial Modulation for Assisted Locomotion using a Smart Walker,» *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 94, n.º 3-4, págs. 621-637, 2019, ISSN: 15730409. DOI: 10.1007/s10846-018-0854-0.
- [77] P. Li, Y. Yamada, X. Wan, Y. Uchiyama, W. Sato, K. Yamada y M. Yokoya, «Gait-phase-dependent control using a smart walker for physical training,» en *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, IEEE, 2019, págs. 843-848.
- [78] A. L. Jutinico, J. C. Jaimes, F. M. Escalante, J. C. Perez-Ibarra, M. H. Terra y A. A. Siqueira, «Impedance control for robotic rehabilitation: a robust Markovian approach,» *Frontiers in neurorobotics*, vol. 11, pág. 43, 2017.
- [79] R. Riener, M. Frey, M. Bernhardt, T. Nef y G. Colombo, «Human-centered rehabilitation robotics,» en *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005.*, IEEE, 2005, págs. 319-322.
- [80] S. B. Demers L, Weiss-Lambrou R, L. Demers, R. Weiss-Lambrou y B. Ska, «Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology versione 2.0 ©,» *Assist Technol*, vol. 8, n.º 1, págs. 1-11, 2000.
- [81] *Interpretar los resultados clave para Prueba de Friedman.* dirección: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/friedman-test/interpret-the-results/key-results/>.
- [82] W. J. Conover, *Practical nonparametric statistics*. John Wiley & Sons, 1998, vol. 350.
- [83] S. D. Sierra M, M. Garzón, M. Munera, C. A. Cifuentes et al., «Human-robot-environment interaction Interface for smart Walker assisted gait: AGoRA Walker,» *Sensors*, vol. 19, n.º 13, pág. 2897, 2019.
- [84] D. Arlia y M. Coppola, «Experiments in parallel clustering with DBSCAN,» en *European Conference on Parallel Processing*, Springer, 2001, págs. 326-331.

- [85] F. Berzal, «Clustering basado en densidad.»
- [86] W. M. Scheidegger, R. C. de Mello, M. F. Jimenez, M. C. Múnera, C. A. Cifuentes, A. Frizera-Neto et al., «A novel multimodal cognitive interaction for walker-assisted rehabilitation therapies,» en *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, IEEE, 2019, págs. 905-910.
- [87] G. J. Lacey y D. Rodriguez-Losada, «The evolution of guido,» *IEEE robotics & automation magazine*, vol. 15, n.º 4, págs. 75-83, 2008.

ANEXOS

- Anexo A: El sitio web de Smart Walkers disponible en el siguiente enlace: <https://sites.google.com/view/biomtlab/robots/smart-walkers>
- Anexo B: Cuestionario de Criterios de Diseño de caminadores robóticos disponible en el siguiente enlace: <https://www.questionpro.com/t/ARkm7Zj1Ci>
- Anexo C: Protocolo experimental y consentimiento informado (Estudio de percepción clínica) disponible en el siguiente enlace: <https://1drv.ms/b/s!ArGNGKXljX6AhE656uZCd3gohB49?e=awEGZ7>
- Anexo D: Protocolo experimental y consentimiento informado (Estudio de usabilidad de la estrategia de control) disponible en el siguiente enlace: https://pruebacorreoescuelaingeduco-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/ruben_ferro_mail_escuelaing_edu_co/ETcKc-8N1SdFiyInuRdY768BiIZXA3qufpr4gNj9Cm-ZVQ?e=x0eqJT
- Anexo E: Cuestionario de evaluación de usabilidad y aceptación, disponible en el siguiente enlace: <https://www.questionpro.com/t/ARkm7ZmAOU>
- Anexo F: Codigos de programación, disponibles en el siguiente enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/12gxOPV-N4rS8ZmyneB9bp8CCQX59-Ap8U?usp=sharing>