

Universidad de Costa Rica

Facultad de Medicina

Escuela de Tecnologías en Salud

Métodos y técnicas de investigación I

Trabajo de investigación: *Co-simulación del Diseño  
Biomecánico para un Exoesqueleto Robótico del Miembro  
Inferior*

Integrantes:

María Cordero Alvarado (B42016)

Carolina Gutiérrez Brenes (B33161)

Lisethe Rojas Sánchez (B46144)

Marianne Ulrich Sáenz (B47092)

II Semestre – 2015

# Tabla de contenidos

RESUMEN EJECUTIVO .....	2
IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
JUSTIFICACIÓN .....	3
OBJETIVOS .....	4
ANTECEDENTES .....	4
DEFINICIONES CONCEPTUALES .....	5
POBLACIÓN Y UNIDAD DE ESTUDIO.....	7
ESPECIFICACIÓN DEL TIPO DE ESTUDIO .....	8
HERRAMIENTA DE RECOLECCIÓN .....	8
SELECCIÓN DE MUESTRA .....	9
RECOLECCIÓN DE LOS DATOS .....	9
TÉCNICA ESTADÍSTICA.....	14
RESULTADOS.....	15
CONCLUSIONES FINALES .....	16
BIBLIOGRAFÍA .....	19
ANEXOS.....	21

## Resumen Ejecutivo

La co-simulación es un proceso que permite a componentes individuales ser simulados con diferentes herramientas ejecutándose al mismo tiempo e intercambiando información de forma colaborativa.

Un exoesqueleto es un dispositivo que se encarga de sostener el cuerpo y mantener la funcionalidad de los músculos afectados por enfermedades, problemas de movilidad en miembro superior o inferior por accidentes (Lugo, Ponce, Molina & Castro, 2014).

Lo anterior deja entrever, que la co-simulación y el exoesqueleto se complementan debido a que por medio de la primera se puede diseñar virtualmente un modelo exoesqueleto ligero, personalizado y de costo accesible.

De manera que para llevar a cabo la elaboración de un exoesqueleto es indispensable contar con la co-simulación como herramienta fundamental. Sin embargo, el conocimiento de la biomecánica del cuerpo humano es requerido en este ámbito, tales como los grados de libertad, rango de movimiento, parámetros de la marcha, intervalos de movimiento, entre otros.

Por medio de la utilización del programa OpenSim se obtienen los análisis de la marcha y a partir de allí se podrá determinar el diseño mecánico del exoesqueleto.

Seguidamente el proceso pasa por una serie de programas que se encargan de describir las piezas mecánicas y la simulación del movimiento y por ultimo validar la funcionalidad del exoesqueleto.

Es importante mencionar, que un exoesqueleto debe ser elaborado a la medida de cada paciente, puesto que las lesiones de una persona a otra varían. Sin embargo, es indispensable que dicha persona cuente con cierto nivel de fuerza en miembros superiores.

El uso de una mayor cantidad de programas agiliza la actividad de co-simulación. Asimismo, con todos los procesos que involucra la elaboración de un exoesqueleto se puede indagar en el ámbito de la robótica permitiendo que

cualquier persona capaz de usar el exoesqueleto se pueda desplazar utilizando el menor gasto de energía.

El diseño virtual en conjunto con la co-simulación, es una herramienta que permite avanzar dentro del mundo de la elaboración de aparatos protésicos y que ayudan de forma indiscutible a mejorar la calidad de vida de los pacientes que son indicados para usar un exoesqueleto por ejemplo. Las ventajas son muchas y junto con los avances tecnológicos estas van en incremento.

### Identificación y definición del problema

La identificación y definición del problema es el primer punto que se debe de realizar a la hora de la confección de cualquier tipo de investigación. Este apartado es el que le da rumbo a la investigación, y siempre debe de contestar a las preguntas ¿qué? y ¿para qué?

De acuerdo con el artículo analizado, que lleva por nombre *Co-simulación del sistema biomecánico para un exoesqueleto robótico del miembro inferior*, se puede analizar el planteamiento del problema; que es la confección de un exoesqueleto por medio de la co-simulación para sostener el cuerpo y mantener la funcionalidad de los músculos afectados por enfermedades o problemas de movilidad.

### Justificación

Ahora bien, la justificación se refiere al impulso que mueve la investigación a resolver cierto problema, es decir, qué es lo que se desea obtener a partir de la pesquisa y a qué se aspira con ella (Villa, s.f.). En el caso del artículo mencionado, se plantea que la motivación principal de los colaboradores consiste en la creación de un exoesqueleto que no sólo sostenga el cuerpo, sino que le devuelva la funcionalidad a los miembros dañados, en este caso los inferiores, amoldándolo anatómicamente al paciente y resultando menos costoso. El uso de la co-simulación se utilizará, entonces, para mejorar el diseño del aparato tomando en cuenta los patrones biomecánicos de la marcha. En conclusión, lo que se desea es optimizar el proceso de producción de un exoesqueleto de manera más óptima y personalizada mediante el proceso de co-simulación.

## Objetivos

### Objetivo general

- Diseñar por medio del proceso de co-simulación un exoesqueleto robótico para personas con dificultades motoras en miembro inferior.

### Objetivos específicos

- Determinar la biomecánica básica del cuerpo los movimientos de flexo-extensión durante la marcha así como el equilibrio en bipedestación.
- Confeccionar el diseño del exoesqueleto robótico, tomando en cuenta las características de peso y altura del paciente, igualmente sus dimensiones, ángulos de movimiento y los momentos de fuerza al realizar la marcha.
- Validar la funcionalidad del diseño del exoesqueleto realizado bajo la co-simulación.

## Antecedentes

Las personas que presentan algún tipo de discapacidad, en este caso de miembro inferior, poseen gran limitación en los movimientos como lo son caminar y moverse. Debido a estos impedimentos, la tecnología se dio la tarea de crear aparatos que les facilitaran la vida, por lo que se crearon las sillas de ruedas mecánicas y electrónicas, andaderas y bastones o muletas. No obstante, estos aparatos presentaban grandes problemas por su costo, y mantenimiento, ya que dependen de la cantidad de tecnología que posea, el uso, el tiempo de vida y el espacio donde se encuentra para realizar sus desplazamientos. Es debido a estos problemas que se pensó en la elaboración de los exoesqueletos (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

La realización de exoesqueletos se ha visto desde 1960. El primero fue llamado *Lokomat®*, el cuales tenían como objetivo la aplicación terapéutica. Sin embargo, es a partir de 1993 que la Universidad de Berkeley en California realizó un exoesqueleto de cuerpo completo con el fin de amplificar las capacidades humanas (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Desde ese momento, los exoesqueletos han ido revolucionando e innovándose para la satisfacción de sus usuarios. Pero, aun con sus mejoras a lo largo de los años, los exoesqueletos han presentado gran cantidad y variedad de problemas (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Se han demostrado varios problemas, como diseños muy específicos al genotipo del país de origen, lo que provoca que, al utilizarlo en una persona de un país distinto, no calce de la mejor manera. También que el usuario debía tener muy buena salud para la utilización del exoesqueleto porque era muy pesado y, sumándole a eso, presentan tanta tecnología que sus valores monetarios eran bastante elevados (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

De acuerdo con estos problemas es que se dio la iniciativa de la realización del exoesqueleto bajo la co-simulación, que es la ayuda de varios programas para la confección del exoesqueleto. Ésta ha supuesto varias ventajas, como lo es la confección de un prototipo mucho más rápido, diseño colaborativo y la disponibilidad inmediata del modelo. Además que el exoesqueleto se ha confeccionado para una mejora en el sostén del cuerpo y la funcionalidad de músculos afectados (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

## Definiciones conceptuales

- Exoesqueleto: Uno de los conceptos más importantes del artículo se refiere a exoesqueleto, ya que es el objeto de estudio, por lo que se debe conocer a fondo su naturaleza. En el artículo se definen como aparatos que funcionan mediante un sistema electromecánico cuyo fin es mejorar las capacidades físicas de la persona al ser el que transmite el peso del tronco superior sin que éste pase por las piernas, para que aumente su movilidad o fuerza de sus miembros. Esto se usa para disminuir las limitaciones de movimiento, en específico, de caminar. Esta armazón es una forma de sustituir a aparatos como la silla de ruedas que, a pesar de su funcionalidad, es difícil de utilizar, se necesita un mantenimiento adecuado, especialmente si cuenta con una tecnología avanzada, y es poco práctica ya que no se adecuaba tan fácilmente

a los distintos espacios que se desean recorrer (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

- Co-simulación: Otro concepto que resulta prudente definir es el de co-simulación, ya que es lo que se aplicó al exoesqueleto en cuestión. En el texto, los autores hablan que a este concepto también se le suele llamar “modelo cooperativo”, “acoplamiento externo” y “simulación distribuida”. Éste consiste en el uso integral de varios programas computacionales que permitan diseñar y, consecuentemente, simular un producto previo a su construcción. En ella, cada uno de los elementos que lo forman pueden ser simulados mediante distintas herramientas que van a estar en un constante intercambio de información para complementar sus hallazgos. El proceso necesita que los datos ingresen desde dos entradas, es decir, a dos programas, los cuales van a interactuar para generar una información unificada de ambos. Este proceso se utiliza en computación de alto nivel, juegos de internet y mecatrónica, entre otros. En este caso, el procedimiento va a contar con el estudio de la biomecánica de la marcha, información que va a ser procesada por una herramienta que lo enviará a una segunda para poder aplicarlo a la simulación del exoesqueleto y, finalmente, irá a una tercera que evalúe su funcionalidad (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014). Con respecto a las características con las que debe contar el proceso de la co-simulación, se tienen las siguientes (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014):
  - Flexibilidad: Debe ser una herramienta que permita modificar el diseño.
  - Modularidad y escalabilidad: Debe ser capaz de validar los distintos ambientes de trabajo cuando se tengan nuevas piezas o funciones.
  - Precisión: Se puede elegir la precisión del diseño.
- Biomecánica: Generalmente, biomecánica se describe como el estudio del movimiento y equilibrio de los cuerpos de seres vivos, sin embargo, en el trabajo se utiliza para referirse a una parte específica, la marcha. En este caso se va a poner atención tanto al movimiento que se produce, como a las

posturas necesarias para realizar la flexión y extensión de los miembros inferiores del paciente (estirar y encoger la pierna) (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014). Entre los factores biomecánicos que se utilizarán para producir el exoesqueleto, están:

- Grados de libertad: Se va estudiar la cantidad de actuadores (según Vildosola, s.f., son elementos mecánicos que administran la fuerza para mover otro dispositivo, utilizando como fuente energética la presión neumática, la hidráulica y la fuerza motriz eléctrica) que se necesitan para que el exoesqueleto logre reproducir el ciclo de marcha del ser humano. En este caso, se van a tener actuadores a nivel de la cadera, rodilla y tobillo, componentes necesarios para una marcha normal.
- Rango de movimiento: En el caso de los exoesqueletos utilizados para caminar, los grados de movimiento son mayores que los que se encuentran estáticos y deben, por lo tanto ser de gran magnitud para no limitar el movimiento de los miembros (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).
- Momento de fuerza en las uniones: Para la marcha se necesitará que las uniones cuenten con un movimiento rotacional, o sea, torque que le permitirá el movimiento de las piernas. Estos momentos varían a través de la marcha, por lo que es preferible establecer valores máximos con respecto a su intensidad. Lo anterior es importante ya que afecta severamente la elección de actuadores adecuados (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

## Población y unidad de estudio

La población de estudio consiste en el conjunto de objetos que tienen el interés del investigador y a la cual se dirige el estudio (Quintana, 1996), mientras que la unidad de estudio es el objeto individual que compone a la población (Vargas, 1995). Del artículo se puede obtener como unidad de estudio el exoesqueleto que será simulado y evaluado. Con respecto a la población, se tiene que está formada por esa misma unidad de estudio, es decir, una sola.



## Especificación del tipo de estudio

El tipo de estudio de este artículo es una investigación experimental puesto que la base de la investigación son los experimentos. Este tipo de investigaciones consisten en identificar un fenómeno y, por medio de la observación e interacción, modificar y controlar una serie de variables del sistema (Serrano Gallego, 2003). El fenómeno identificado en el artículo es la co-simulación del diseño biomecánico del exoesqueleto robótico de miembro inferior. Y se realiza una observación de los movimientos del cuerpo humano y su biomecánica, luego se debe hacer la observación del diseño mecánico del exoesqueleto y también el control y la simulación del exoesqueleto (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Es importante tener en cuenta que el investigador en este tipo de investigación tiene la libertad de manipular las variables del estudio. De esta manera el investigador puede identificar las características en las que está interesado y ver su cambio al modificar las variables. Mediante la modificación de la variable independiente y observando los cambios en la variable dependiente. Todas las condiciones deben ser controladas con mucho cuidado para poder ver cómo y por qué se produce cierto cambio en lo que se observa (Alonso Serrano, García Gordo, García Sanz, Gil Álvaro, León Rodrigo, & Ríos Brea). Esto se logra identificar en el artículo, ya que se utilizaron una serie de programas que permitieron observar y modificar los movimientos de los exoesqueletos para simular los movimientos normales del ser humano durante la marcha.

## Herramienta de recolección

Para realizar estas observaciones mencionadas, fue necesario seleccionar las herramientas de recolección. Según el artículo las herramientas utilizadas fueron varios programas de co-simulación. El primero de estos fue el programa OpenSim®, el cual ayudó al investigador a establecer las posturas que deben adquirir los exoesqueletos para ayudarle al paciente a realizar los movimientos de flexión y extensión durante las variables de movimiento y la marcha. Luego se utilizó el programa de SolidWorks®, el cual utiliza los datos del programa de OpenSim®. para elaborar el diseño del mecanismo (describiendo las piezas mecánicas a utilizar y

utilizando una simulación del movimiento del exoesqueleto). Por último se aplicó el programa Matlab® que lo que hace es simular el movimiento del exoesqueleto después de haber realizado el diseño. Es un mecanismo que ayuda a comprobar que el trabajo realizado con los otros dos programas va a funcionar de forma correcta en físico (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

### Selección de muestra

Con respecto a la muestra, esta se puede definir como el subgrupo de la población elegido por el investigador que será examinado (Ross, 2007). El artículo no explica que se realice un muestreo ya que se investiga acerca del objeto de estudio que es el exoesqueleto robótico del miembro inferior. El artículo trata del diseño mecánico de este exosqueleto y este diseño se hace por los programas de co-simulación. Por esta razón no existe una población variada de la cual extraer una muestra, ya que la única población es la misma unidad de estudio. De esta manera se explica que no fue necesario crear ninguna herramienta de selección de la muestra (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

### Recolección de los datos

Para el estudio de la biomecánica del cuerpo humano se utilizaron datos ya existentes recogidos por I. Crowell en *“Human Engineering Design Guidelines for a Powered, Full Body Exoskeleton”* y por M. Cenciari y M. Dollar en *“Biomechanical Considerations in the Design of LowerLimb Exoskeletons”* al estudiar temas relacionados a este. La primera parte corresponde a los grados de libertad en los movimientos realizados por las articulaciones del miembro inferior. Los resultados muestran que la articulación de la cadera sólo permite tres grados de movimientos (flexión/extensión, abducción/aducción y rotaciones interna/externa). La articulación de la rodilla tiene dos grados de movimiento (flexión/extensión y rotaciones interna/externa). Por último la articulación del tobillo permite un grado de movilidad que es flexo-extensión con un ligero grado de rotación (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Para poder observar el rango de movimiento de la marcha normal, se utilizaron distintas mediciones que se muestran en las tablas 2 y 3 del artículo. Este menciona que los datos de la tabla 2 fueron obtenidos a partir de las de investigaciones de J. Perry y J. Burnfield "*Gait Analysis: Normal and Pathological Function*" y A. Kharb, V. Saini y otros, "*A review of gait cycle and its parameters*". En esta tabla se miden los parámetros de marcha, los datos se consiguieron de una muestra poblacional normal de hombres y mujeres en edades que se extendían entre los 18 y los 64 años. Para poder obtener los parámetros, fue necesario que estos autores utilizaran la estadística inferencial para poder hacer generalizaciones a partir de las muestras utilizadas y, de esta manera, obtienen el promedio de las características de cadencia, velocidad y longitud de zancada que son aplicadas a la población. Los datos muestran que el promedio de las cuatro fuentes para la cadencia es de 110,5 pasos por minuto en hombres y de 114,25 pasos por minutos en mujeres. La velocidad promedio en hombres es de 1,38 metros por segundo y en mujeres la velocidad promedio ronda los 1,24 metros por segundo. Y con respecto a la longitud de la zancada se encuentra que en promedio la zancada de los hombres es de 1,47 metros y en mujeres es de 1,28 metros. Estos datos son muy importantes para plantear el diseño del mecanismo del exoesqueleto (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

También, para poder observar el rango de movimiento, se midió el tiempo que tarda la rodilla en desplazarse una cierta distancia y cuánto significa esto en grados durante la marcha normal. Al analizar estos dos aspectos se facilita el cálculo de la velocidad angular, operación necesaria para el diseño del exoesqueleto. Los datos muestran que cuando se realiza una flexión de rodilla que llega hasta los 18° se tiene una velocidad angular de 1,83 radianes por segundo. Cuando la flexión alcanza los 65°, la velocidad angular es de 3,4 radianes por segundo. Durante la extensión de rodilla hasta los 5°, la velocidad angular es de 0,89 radianes por segundo. Pero cuando la extensión es de 2° la velocidad angular aumenta hasta los 3,97 radianes por segundo. Demostrando de esta forma la capacidad de movimiento que deben tener las articulaciones del exoesqueleto para ser funcional (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Con la utilización del programa de OpenSim® se buscó elaborar una simulación de la marcha humana y, de esta manera, poder conocer la cinemática del cuerpo humano y del sistema musculoesquelético. OpenSim® utiliza la información del peso y la altura para simular las fases de posición y oscilación en la marcha completa. Además brinda los ángulos de la flexión/extensión de las principales articulaciones del miembro inferior durante la marcha. Los resultados arrojaron que la flexión de cadera se extiende desde los  $-11^{\circ}$  hasta los  $95^{\circ}$  siendo el movimiento con la mayor amplitud en la cadera. La aducción de la cadera abarca desde los  $-50^{\circ}$  a los  $15^{\circ}$  y se completan los movimientos de la cadera con la rotación de los  $-20^{\circ}$  a los  $20^{\circ}$ . En cuanto a la rodilla, esta tiene un ángulo de  $-120^{\circ}$  hasta  $0^{\circ}$ . Por último la angulación del tobillo se extiende desde los  $-30^{\circ}$  a los  $30^{\circ}$ . Todos estos datos son calculados tomando en cuenta el equilibrio y estabilidad necesaria del cuerpo en cada fase. Los datos fueron obtenidos a partir de variables controladas, como son utilizar un paciente con una altura de 1,80 metros y un peso de 75 kilogramos. Además la medición se realizó durante la marcha normal sin ningún tipo de carga extra, sólo el peso del paciente. Para el modelo cinemático funcional no se toman en cuenta: las deformaciones y masas del miembro inferior, la fuerza de fricción de las articulaciones, la rotación e hiperextensión de la rodilla y el impacto del miembro superior que se mostró en el análisis. Se va a suponer que los movimientos de la marcha son simétricos para ambos lados del cuerpo ya que sólo se mide el lado derecho y que la marcha se realiza sobre una superficie plana sin inclinación (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Para desarrollar el diseño mecánico del exoesqueleto a través del programa SolidWorks®, se utilizaron los datos ya mencionados en el programa OpenSim® y los datos existentes de las investigaciones de de J. Perry y J. Burnfield "*Gait Analysis: Normal and Pathological Function*" y A. Kharb, V. Saini y otros, "*A review of gait cycle and its parameters*". A partir de esto se estipuló que el exoesqueleto se debe desarrollar como pseudo-antropomórfico porque cuenta con varias articulaciones (cadera, rodilla y tobillo), además que el diseño mecánico del exoesqueleto debe permitir una amplitud de cadera de  $90^{\circ}$ , de  $-90^{\circ}$  en la rodilla y de  $-15^{\circ}$  a  $25^{\circ}$  en la articulación del tobillo. Por otra parte, se debe alinear el centro

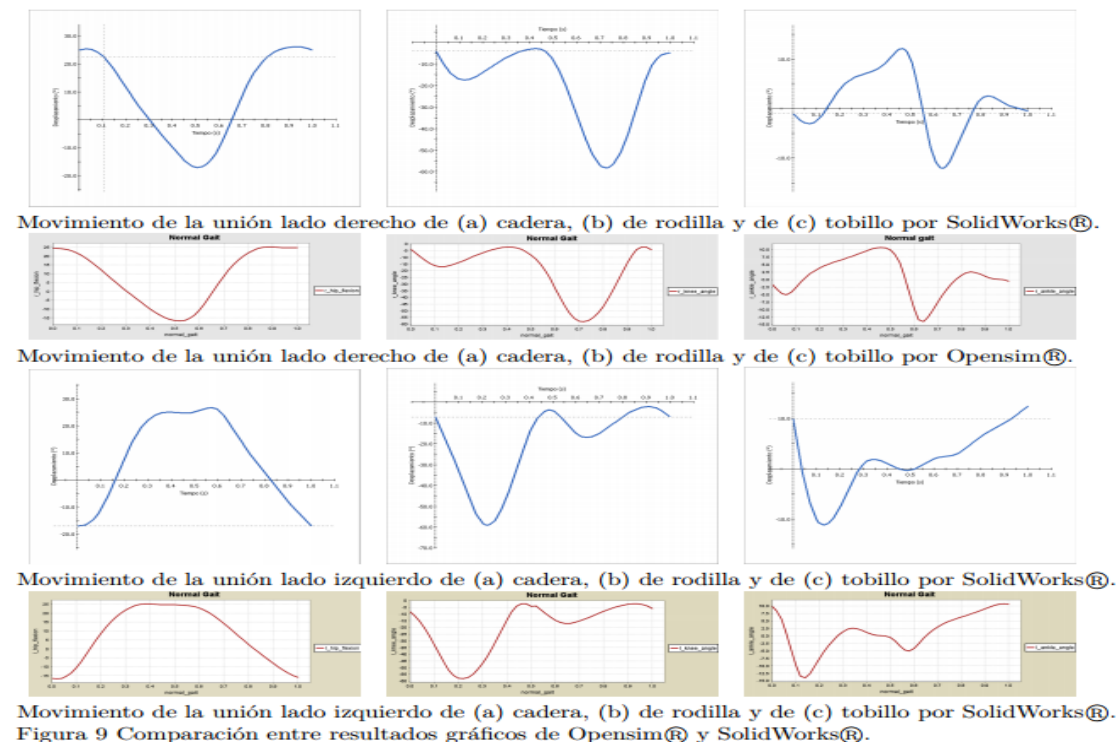
de masa y adecuar el centro de rotación y el peso de las partes mecánicas en posiciones donde no se afecte el eje de gravedad ni la anatomía del usuario. El exosqueleto debe diseñarse para poder realizar 7 grados de movimiento según el análisis de los datos previamente mencionados. Cada pierna deberá realizar 3 grados de movimiento y la cadera debe ser capaz de realizar rotación (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

En el diseño exoesqueleto la cadera debe ser capaz de realizar de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  de amplitud y tener un momento de fuerza máxima de frenado de 150 N/m. Acerca de la rodilla, el rango de movimiento es de  $0^{\circ}$  a  $-65^{\circ}$  y el momento de fuerza máxima de frenado es de 120 N/m. Por lo que respecta al tobillo, el rango de movimiento es de los  $-25^{\circ}$  a los  $15^{\circ}$  y debe tener un momento de fuerza máxima de frenado de 200 N/m. Los movimientos mecánicos del exoesqueleto en el soporte de la cadera son la flexión/extensión y la abducción/aducción (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014). El grado de libertad el soporte de la rodilla es la flexión/extensión del  $0^{\circ}$  a los  $90^{\circ}$ . Por último el soporte del tobillo se realiza flexión/extensión que abarca de los  $-25^{\circ}$  a los  $15^{\circ}$ , esto último para poder realizar la fase de impulso de la marcha y para poder apoyar el tobillo en el suelo durante la etapa de apoyo de la marcha. A pesar de que el sistema tiene mucho análisis mecánico para facilitar la movilidad al usuario, su activación es completamente manual. Por lo tanto el usuario debe tener movilidad y fuerza en la parte superior de su cuerpo para poder controlarlo, esto se facilita si la persona utiliza materiales de apoyo como andaderas y bastones (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

El programa de Matlab® fue necesario para desarrollar el control y la simulación del exoesqueleto. Mediante este programa se logra el control constante durante el proceso dinámico de la marcha, ya que se van a utilizar sensores con actuadores que van a controlar el balance que existe entre las uniones de la cadera con la rodilla, la rodilla con el tobillo y el tobillo con el pie. Los sensores operados por este programa funcionan con señales que se aplican a la articulación en la que actúan pero también hay otras señales que conectan todos los sensores y forman una trayectoria. Lo que se busca con este programa es corregir las señales de error

emitidas por los distintos sensores para poder imitar de los movimientos del ciclo de la marcha humana. Se evalúa esto mediante la comparación de las trayectorias obtenidas con las trayectorias de los otros dos programas ya utilizados, las trayectorias deberían ser similares (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

Para la evaluación del diseño se realizó una simulación de los movimientos del cuerpo humano durante la marcha en ambos lados (derecho e izquierdo). La prueba fue hecha en condiciones normales, sin ningún peso extra. La primera parte de la evaluación consistió en que la simulación del ciclo de marcha en el programa SolidWorks® coincidiera con los movimientos descritos por el programa de Opensim® al presentar resultados similares. Esto es porque la simulación del exoesqueleto debe tratar de imitar la cinemática y la dinámica del cuerpo humano durante la marcha normal (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014). Esto se logra ver mediante la comparación de los gráficos elaborados con los datos que proporcionó cada programa al realizar los experimentos:



Obtenido de: Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014.

## Técnica estadística

En este artículo se usa principalmente lo que es la estadística descriptiva. Según lo visto en el curso, esta parte de la estadística es una forma de presentar los datos, y contiene análisis de datos como el promedio, la media, desviación estándar, entre otros. La estadística descriptiva tiene como finalidad presentar y resumir los datos observados mediante herramientas como los cuadros y gráficos (son los más conocidos) (Cordero, Córdoba, & Fernández, 2002). En el artículo con el que se trabaja, se puede ver que la mayoría de los datos son expuestos mediante estas dos formas y esto resume los resultados a los análisis obtenidos de una forma más eficiente. Son utilizadas 6 tablas en las cuales resumen los datos obtenidos que se extienden desde los grados y rangos de movimiento de la marcha normal de una muestra de la población hasta las características que debe tener el exoesqueleto y las condiciones del paciente para que el exoesqueleto sea funcional. También se utilizan 12 gráficos que ilustran los resultados obtenidos en el movimiento de las tres principales articulaciones del miembro inferior al utilizar los programas SolidWorks® y Opensim® (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

En cuanto al promedio o la media aritmética, es una de las medidas más utilizadas. Como fue visto en el curso, es una medida de posición porque resume un grupo de valores en un solo número, de manera que se brinda información acerca de la localización de número dentro de la distribución de todos los valores. Existen dos tipos de promedio, el promedio simple y el ponderado, en el artículo se utilizó el simple que es definido como la suma de todos los valores obtenidos divididos entre el número total de datos. La abreviatura del promedio depende si el cálculo es realizado a la población ( $\mu$ ) o a la muestra ( $\bar{x}$ ). Es una medida muy útil porque incluye a todos los valores dentro del cálculo y permite realizar comparaciones de poblaciones de forma sencilla. En cuanto a las desventajas, esta que se ve muy afectada por la presencia de los valores extremos, ya sean valores muy grandes o muy pequeños (Universidad de Chile, 2008).

En el artículo el cálculo del promedio se hace visible para el análisis del rango de movimiento en la biomecánica del cuerpo humano. Específicamente se utilizó

para resumir la información de los parámetros de marcha de individuos sin ninguna limitación física. Estos datos fueron obtenidos de las investigaciones de J. Perry y J. Burnfield "*Gait Analysis: Normal and Pathological Function*" y A. Kharb, V. Saini y otros, "*A review of gait cycle and its parameters*". Ellos explican que usaron una muestra de hombres y mujeres entre los 18 y 64 años para medir los parámetros de la marcha de cada individuo. A partir de los resultados de estas mediciones es que se obtiene el promedio de estos parámetros. El promedio utilizado es el promedio simple, ya que se le da a todos los datos el mismo "valor" (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).

En la introducción del artículo, para describir la población que sufre de algún tipo de discapacidad se utilizaron porcentajes. Por el conocimiento adquirido en el curso, los porcentajes son proporciones multiplicadas por 100. Una proporción se pueden considerar como una razón (relación entre dos números positivos) excepto que las proporciones relacionan dos números de un mismo universo y relacionan una parte con el todo. Esto último se explica con la fórmula utilizada, ya que se va a dividir un elemento entre la suma total de todos los elementos:  $\frac{B}{A+B+C}$

Es importante que se conozca que las proporciones siempre deben dar un resultado entre 0 y 1, pero que al multiplicar este valor por 100 obtenemos el porcentaje. En el artículo eso fue lo que se hizo para exponer el gran número de personas de México en el 2010 que tenían algún tipo de discapacidad (51%). Además se agrega que del número total de personas con discapacidad, el 58.3% es una discapacidad para moverse y caminar. Utilizando de nuevo el recurso del porcentaje o proporción para resumir los datos y ser simples de entender.

## Resultados

La investigación explica cómo los exoesqueletos representan para los pacientes una oportunidad para moverse de manera independiente y sin hacer grandes gastos de energía. Además de demostrar, que estos dispositivos pueden ser utilizados por casi cualquier paciente, tomando en consideración sus condiciones físicas y financieras.



Al mismo tiempo, el exoesqueleto brinda la oportunidad de realizar de manera adecuada los movimientos de la marcha completa cubriendo cualquier tipo de restricción o limitación del usuario al momento de caminar o realizar sus actividades de vida diaria.

Por otro lado, se destaca al exoesqueleto propuesto, ya que tiene las ventajas de ser personalizado, ajustado y adecuado a las necesidades del paciente. El material con el que es elaborado el dispositivo se puede cambiar de acuerdo con lo que el paciente requiera.

Uno de los puntos más importantes que se destacó, fue la capacidad de hacer modificaciones y evaluaciones sin la necesidad de tener que construir el exoesqueleto e incluirlas dentro del prototipo final. Es decir, rediseñar la pieza sin tener que incurrir en costos adicionales y llevándolas a cabo en periodos cortos de tiempo.

Otros programas especializados como Autocad®, Inventor®, Ansys® entre otros no brindan resultados tan rápidos y eficientes como SolidWorks®, y representa el programa ideal para el manejo de estudiantes ya que es de libre acceso.

En general, con la co-simulación se ahorra tiempo, costos y pruebas de prototipo y además representa grandes avances en la industria robótica y médica, sin obviar el hecho de que mejora la calidad de vida de la personas con necesidades diferentes.

## Conclusiones Finales

Se obtuvo que tanto la simulación del ciclo de marcha en SolidWorks® como en OpenSim® presentan resultados similares, donde la cinemática y dinámica del cuerpo humano son imitadas por el exoesqueleto.

El sistema OpenSim fue ideal para realizar la visualización de la marcha en la fase normal en comparación con otros programas como por ejemplo SimTK®, Anybody®, LifeModeler®, entre otros; ya que suele ser más intuitivo y libre de

acceso, además de manipular los programas predefinidos y contar con toda la información necesaria disponible.

Sin embargo, se presenta la desventaja que para poder generar movimientos en el exoesqueleto es necesario que el paciente aun tenga movilidad y fuerza en sus extremidades superiores y necesita reforzar la inferiores con otros implementos.

Siguiendo con lo anterior, en el documento se resaltan una serie de condiciones que debe poseer el paciente para utilizar el exoesqueleto producido en este proceso experimental, entre ellas se destacan las siguientes (Castro, Lugo, Molina, & Ponce, 2014).:

1. Altura entre 170m-180m
2. Peso entre 70kg-100kg
3. Balance y equilibrio con el uso de bastón, andadera o caminadora
4. Debe tener fuerza para soportar su propio peso y el del exoesqueleto

El uso de exoesqueletos permite escatimar en costos, que en la elaboración de otros aparatos sería imposible, por ejemplo en el uso de sillas de ruedas de alta tecnología, ya sean electrónicas o mecánicas.

Además, permiten facilidad de uso y de mantenimiento, espacio e infraestructura para desplazarse por cualquier lugar tema que con el uso de sillas de ruedas representa un dolor de cabeza para el usuario.

Sin embargo, este diseño concreto no puede ser usado por cualquier paciente y debe recomendarse bajo especificaciones médicas, no obstante, es posible aplicarla misma metodología, cambiando los valores propuestos, para adecuarlo a la persona.

Otra desventaja que se puede mencionar es que, a pesar de que el exoesqueleto permite el desplazamiento del paciente de forma erguida, este siempre va a tener que invertir dinero extra en la compra de un bastón o una andadera, ya que son implementos necesarios a la hora de usar el exoesqueleto.

A pesar de todo, la mayor ventaja que se puede encontrar es el ahorro de dinero, la obtención de un producto personalizado, fácil de ajustar y al que se le puede dar mantenimiento de manera sencilla, pero, principalmente permite que las personas puedan involucrarse de manera más activa a la sociedad.

## Bibliografía

- Alonso, A., García, E., García, L., Gil, B., León, I., & Ríos, L. (s.f.) *Métodos de Investigación de Enfoque Experimental*. [Recurso electrónico]. Recuperado de: [https://www.uam.es/personal\\_pdi/stmaria/jmurillo/InvestigacionEE/Presentaciones/Curso\\_10/Experimental\\_Trabajo.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/stmaria/jmurillo/InvestigacionEE/Presentaciones/Curso_10/Experimental_Trabajo.pdf)
- Castro, S., Lugo, E., Molina, A., & Ponce, P. (2014). Co-simulación del Diseño Biomecánico para un Exoesqueleto Robótico del Miembro Inferior. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 35 (2).
- Cordero, J. M., Córdoba, A., & Fernández, S. (2002). *Estadística Descriptiva*. Madrid, España: ESIC Editorial.
- Quintana, C. (1996). *Elementos de Inferencia Estadística*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Ross, S. (2007). *Introducción a la estadística*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Serrano Gallego, R. (2003). *Introducción al análisis de datos experimentales: tratamiento de datos en bioensayos*. Castellón de la plana, España: Publicacions de la Universitat Jaume.
- Vargas, A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Murcia, España: Compobell, S.L.
- Vildósola, E. (s.f.). *Actuadores*. [Recurso electrónico] Recuperado de: <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/actuadores.pdf>
- Villa, J. (s.f.). *Guía para la redacción de una propuesta de investigación*. [Recurso electrónico] Recuperado de: <http://ponce.inter.edu/cai/manuales/Guia-redaccion-propuesta-investigacion.pdf>
- Universidad de Chile. (2008). *Nociones Básicas de Estadística Utilizadas en Educación*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.