



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE PROTOTIPO ROBÓTICO PARA EQUINOTERAPIA.

TESIS
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA
EDUARDO PICEN ACEVEDO

DIRECTOR Y ASESOR
DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AMECA

PUEBLA, PUE.

AGOSTO 2024

ÍNDICE

Dedicatoria	5
Agradecimiento	5
CAPÍTULO 1.....	6
INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Antecedentes	7
1.2 Descripción del problema	9
1.3 Objetivos generales y específicos	9
1.3.1 Objetivo General	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Hipótesis.....	10
1.5 Justificación	10
1.6 Organización de la tesis.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 La Equinoterapia	13
2.1.1 Beneficios físicos de la equinoterapia	13
2.1.2 Beneficios neurológicos de la equinoterapia	13
2.1.3 Patologías que se benefician de la equinoterapia	13
2.2 Robots en la equinoterapia	14
2.2.1 Robot Equino.....	15

2.2.1.1. Partes de un robot equino	15
2.3 Eslabones.....	17
2.4 Grados de libertad.....	18
2.5 Articulaciones.....	18
2.6 Cinemática directa	20
2.7 Cinemática inversa	20
2.8 Simulación en Geogebra	20
2.8.1 Pasos para simular.....	21
CAPÍTULO 3.....	22
DISEÑO DEL SISTEMA DE CAMINATA.....	22
3.1 Características ideales del sistema.....	23
3.2 Máquina de Estados Finitos del Sistema de Caminata del prototipo	23
3.3 Modelado matemático del prototipo	24
3.4 Modelado en Software.....	25
CAPÍTULO 4	29
IMPLEMENTACIÓN, EXPERIMENTACIÓN, RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	29
4.1 Construcción.....	30
4.2 Experimentación	35
Experimento 1	35
Experimento 2	35

Experimento 3	37
4.3 Recopilación y análisis de datos	39
CAPÍTULO 5.....	40
CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	40
5.1 Conclusiones.....	41
5.2 Trabajo a futuro.....	42
Referencias	43

Dedicatoria

A mi esposa, mis padres, mis hermanos, mis amigos y a todas las personas que quieran continuar o mejorar este proyecto.

Agradecimiento

Al ver el resultado logrado de este proyecto solo me queda dar las ¡Gracias! a:

Mis profesores por el tiempo y las enseñanzas que me brindaron a lo largo de mi carrera académica.

Mis amigos por el apoyo y compañía que me brindaron.

Mis padres por el apoyo, el ánimo y que me brindaron todo lo que necesite a lo largo de mis estudios.

Mis hermanos por la confianza que me pusieron en mí.

Mi esposa ya que me animo a terminar esta meta, y que estuvo a mi lado a lo largo del proyecto.

Y, por último, pero no menos importante quisiera agradecer a mi asesor, el Dr. José Luis Hernández Ameca, que con su guía constante y su fe inquebrantable en mis habilidades me motivo a alcanzar una de mis metas. Su comprensión, experiencia y paciencia contribuyeron a ampliar mi experiencia en la investigación. Estoy profundamente agradecido por su inmenso apoyo durante esta etapa de mi vida.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Torres y Gómez hablan sobre el método de observación directa que es utilizada para evaluar el movimiento de los caballos; sin embargo, este método es limitado dado que es totalmente subjetivo y muchos detalles de la funcionalidad del sistema músculo-esquelético no pueden ser detectados y evaluados, debido a que no son perceptibles a simple vista. El principal objetivo del estudio fue desarrollar un modelo matemático que permita calcular, graficar y simular el movimiento angular, en dos dimensiones, de algunas articulaciones de los caballos. El aparato locomotor del caballo fue modelado como un sistema mecánico de cuerpos rígidos articulados por 15 juntas simples. En este estudio se obtuvieron las curvas cinemáticas de las principales articulaciones, las trayectorias (altura) de los marcadores sobre las bandas coronarias trasera y delantera (cascos) y una simulación del sistema mecánico. Esta herramienta elimina la subjetividad permitiendo observar y evaluar (cualitativa y cuantitativamente) [1].

Anderson, Annett hablan sobre como miles de pacientes se han beneficiado de la integración de los caballos en los programas de rehabilitación. El uso de caballos en la terapia (Equine Assisted Therapy, o EAT) ha beneficiado a niños y adultos afectados por problemas o trastornos del lenguaje, como parálisis cerebral y autismo. Usando EAT, los pacientes de terapia han mejorado tanto física como psicológicamente (por ejemplo, demostrando una mayor atención, motivación y habilidades de comunicación). Todavía hay muchas preguntas abiertas con respecto a esta terapia y las razones de su éxito. Muchas de estas preguntas han quedado sin respuesta debido en gran parte a la naturaleza incontrolada de EAT. El Proyecto de Terapia Asistida Equina Virtual (VEAT) integra una plataforma robótica con tecnologías de realidad virtual para proporcionar un entorno seguro y controlado a través del cual se pueden aislar y estudiar varios aspectos de EAT. El sistema incorpora movimientos equinos

realistas con estímulos visuales, auditivos, olfativos y somatosensoriales para proporcionar experiencias altamente inmersivas a los pacientes [2].

Cho y Kim propusieron un nuevo método, inspirado en la marcha de los caballos, para regular la fuerza de reacción en el suelo de un robot caminante cuadrúpedo. El método utiliza el interruptor de rigidez mecánica con una estructura de doble resorte inspirada en una extremidad anterior distal equina. Esto incluye el uso de un resorte de baja rigidez activado en el momento del aterrizaje y un resorte de alta rigidez para la fase de soporte. Este método se ha aplicado a Jinpoong, un robot para caminar como cuadrúpedo hidráulico, y ha contribuido a la marcha estable del robot en terrenos irregulares [3].

Cuadrado Karina realizó un estudio sobre el mecanismo de Theo Jansen, para realizar su estudio hizo un prototipo cinemático y cinético del mecanismo, su análisis cinemático consistió en determinar las posiciones, velocidades y aceleraciones lineales de cada junta del mecanismo, lo cual se logró mediante el método de bucle cerrado. El análisis cinético del mecanismo consistió en determinar el valor del torque necesario para su movimiento, lo cual se logró mediante el trabajo virtual. La aplicación desarrollada fue un caballo de juguete, diseñado con el programa solidworks e impreso mediante la tecnología modelado por deposición fundida (FDM), con el material acrilonitrilo butadieno estireno conocido en inglés como ABS y El ácido poliláctico conocido en inglés como PLA [4].

Honda y Kajiwara describen un nuevo tipo de locomoción para un robot cuadrúpedo. Recientemente, muchos cuadrúpedos biomiméticos han sido desarrollados, la mayoría de estos usan muchos actuadores para correr por lo que hace que crezcan en tamaño.

Estos autores han desarrollado un robot cuadrúpedo de tamaño mediano usando solo uno motor eléctrico como actuador para caminar y correr. También adaptaron al robot a un mecanismo que es similar al de Theo Jansen para hacer

su marcha biomimética. Por lo tanto, proponen "Marcha de galope modificada" que se deriva de la marcha de rebote y la marcha de galope [5].

Aan y Heinloo presentan resultados de los cálculos cinemáticos y dinámicos del enlace a pie de Theo Jansen en la hoja de trabajo de Mathcad. Para validar los cálculos cinematográficos, se compone un videoclip con simulación del movimiento del mecanismo de Theo Jansen. Se considera en detalle la síntesis de un volante para el enlace de entrada de enlace de Theo Jansen para disminuir la fluctuación en su rotación. La razón para realizar el siguiente trabajo fue que los humanos utilizan principalmente vehículos con ruedas para el transporte terrestre. Pero si miramos a nuestro alrededor en la naturaleza, no hay criatura biológica moviéndose sobre ruedas. Para moverse en el suelo, las criaturas vivientes usan piernas o se arrastran. En comparación con la locomoción de las ruedas, caminar tiene muchas ventajas: menor consumo de energía, sin necesidad de carreteras, mejor cruzar obstáculos, el contacto con el suelo está en un punto determinado, el suelo se daña menos, Por lo tanto, los científicos están tratando de diseñar vehículos que están utilizando piernas u otras formas de locomoción que se inspiran en la naturaleza [6].

1.2 Descripción del problema

El presente trabajo se enfoca en el problema de diseñar un sistema electrónico capaz de simular los movimientos de un equino, para lo cual se utilizarán conocimientos matemáticos que permitan calcular, graficar y simular el movimiento angular, en dos dimensiones, de algunas articulaciones de los equinos.

1.3 Objetivos generales y específicos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y simular un prototipo robótico para implementarse en la equinoterapia.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Buscar información.
- Diseñar el modelo cinemático del prototipo robótico.
- Simular el diseño propuesto.
- Realizar pruebas de funcionamiento.
- Recopilar y analizar los resultados.
- Redactar las conclusiones y el trabajo futuro.

1.4 Hipótesis

Aplicando la cinemática se puede diseñar un modelo de robot equino orientado a la equinoterapia.

1.5 Justificación

En base a lo aprendido en las distintas materias de hardware, software y animación por computadora, se propone modelar y simular un prototipo de robot equino que tiene el objetivo de ayudar al tratamiento de personas con problemas físicos o sensoriales.

Entre los beneficios físicos directos al usuario se destaca: el desarrollo del tono muscular, incremento de fuerza, resistencia, equilibrio, coordinación y mejora de la destreza motora. Un equino representa un costo elevado y grandes problemas de mantenimiento dentro de una ciudad, para cualquier usuario, por lo que se plantea contribuir a disminuir los problemas mencionados mediante el desarrollo de un prototipo robótico para las terapias de pacientes de equinoterapia [7].

1.6 Organización de la tesis

El presente trabajo está dividido en 4 capítulos. En el primer capítulo se presentan los antecedentes, la descripción del problema, los objetivos generales y específicos, la hipótesis, los alcances y limitaciones que se presentaron a lo largo de la

elaboración y la justificación para la elaboración del diseño y simulación de prototipo robótico para equinoterapia.

El segundo capítulo presenta el marco teórico del trabajo, es decir las definiciones y detalles que debemos de conocer para diseñar y simular el sistema de caminata, elementos que se trabajan desde el inicio y hasta el final de su desarrollo y sin los cuales no se entendería el sistema en su totalidad.

El tercer capítulo establece el diseño que se seguirá para la simulación, partiendo de las características ideales del sistema, la formulación del modelo y los elementos básicos de la simulación hasta llegar al modelaje de piezas y la experimentación con los elementos diseñados.

El cuarto capítulo se enfoca en recopilar y analizar los resultados obtenidos partiendo del sistema diseñado en el capítulo anterior.

Para terminar, contamos con el capítulo cinco, en donde se muestran los resultados, conclusiones y trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1 La Equinoterapia

Es una alternativa para la rehabilitación física y psicológica en donde, por medio de una práctica especializada, se monta a caballo con la finalidad de rehabilitar física, psíquica y socialmente a aquellas personas que presentan diversas discapacidades y padecimientos. El disfrute de esta actividad, aunada a la experiencia de terapeutas y educadores especializados, da como resultado sorprendentes mejoras y aprendizajes en el individuo.

2.1.1 Beneficios físicos de la equinoterapia

- Mejora el equilibrio, la movilidad y la postura.
- Regula el tono muscular y trabaja varios músculos simultáneamente.
- Hace más flexibles los músculos y articulaciones.

2.1.2 Beneficios neurológicos de la equinoterapia

- El jinete desarrolla una espina dorsal más eficiente y las instrucciones que manda al cerebro son de mejor calidad.
- El movimiento del paciente al estar montado mejora su coordinación y sus reflejos.
- El movimiento de la pelvis para acompañar la cadencia del caballo (alzarla, adelantarla y bajarla) es muy similar al que hacemos al caminar, lo que manda información importante al cerebro para adquirir un adecuado patrón de marcha [8].

2.1.3 Patologías que se benefician de la equinoterapia

- Parálisis cerebral
- Autismo

- Esclerosis múltiple
- Espina bífida
- Síndrome de Down
- Patologías neurodegenerativas
- Anorexia
- Enfermedades traumatológicas
- Enfermedades crónicas
- Trastornos de comportamiento
- Adicciones
- Depresión
- Estrés
- Fobias
- Ansiedad
- Trastornos del sueño
- Trastornos por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH)

La equinoterapia se entiende como un tratamiento complementario, dentro de un conjunto de terapias médicas y en coordinación con un equipo experto y multidisciplinar de cada especialidad. El equipo base suele estar conformado por psicólogos, psicopedagogos, expertos en caballos para terapia y terapeutas ocupacionales, entre otros.

La equinoterapia es un tratamiento no invasivo que complementa otros tratamientos, nunca los sustituye. No debe considerarse como una opción aislada, sino como parte de un conjunto de acciones terapéuticas dirigidas a neutralizar la discapacidad, aumentando el desarrollo de los potenciales residuales y generando nuevas capacidades [9].

2.2 Robots en la equinoterapia

En otoño 2016 Baños Bernardo y Bernal Christian crearon un robot equino que por medio de compresas eléctricas y vibradores lograron simular el lomo de un caballo.

En marzo del 2010 Fraser Anderson y Michelle Annett construyeron una silla que simula el galope de un caballo y mediante lentes de realidad virtual el usuario puede ver y sentir que está montando un equino de verdad [2].

2.2.1 Robot Equino

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables programados para desempeñar tareas relacionada con la equinoterapia.

2.2.1.1. Partes de un robot equino

El funcionamiento del robot-equino se define mediante una máquina de estados que se encarga de definir los movimientos de actuadores y secuencias de funcionamiento. Las cuales se programan en la memoria del programa del sistema empotrado, el cual utilizando la unidad central de procesamiento envía a los periféricos de salida las señales hacia los actuadores del robot generando se así las rutinas de movimiento (al paso, al trote y al galope), como se muestra en la figura 2.1.



Fig. 2.1 Diagrama a bloque de robot equino.

Programación de Rutinas: Es la máquina de estados finitos que se encarga de manipular el movimiento de los actuadores y su secuencia de funcionamiento. Se implementa en un lenguaje de programación específico (Ensamblador, C, Python, etc.) de acuerdo al sistema empotrado o computadora a utilizar.

Sistema empotrado: Se trata de un dispositivo computacional que realiza los cálculos para que el robot desarrolle las tareas para las cuales fue diseñado. Normalmente recibe información de la Programación de Rutinas.

Robot: Es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables programados para desempeñar tareas relacionadas con la equinoterapia.

Sistema de potencia: Es fuente de alimentación de energía (neumática, hidráulica, eléctrica, etc.) del sistema y amplificadores que permiten generar las señales requeridas por los actuadores.

A continuación, se muestra como ejemplo de robot equino el prototipo realizado por Escuela Nacional de Carabineros [11]. Se muestra la base al piso, cuello y cabeza, base para el lomo, lomo y prototipo final en la figura 2.2.

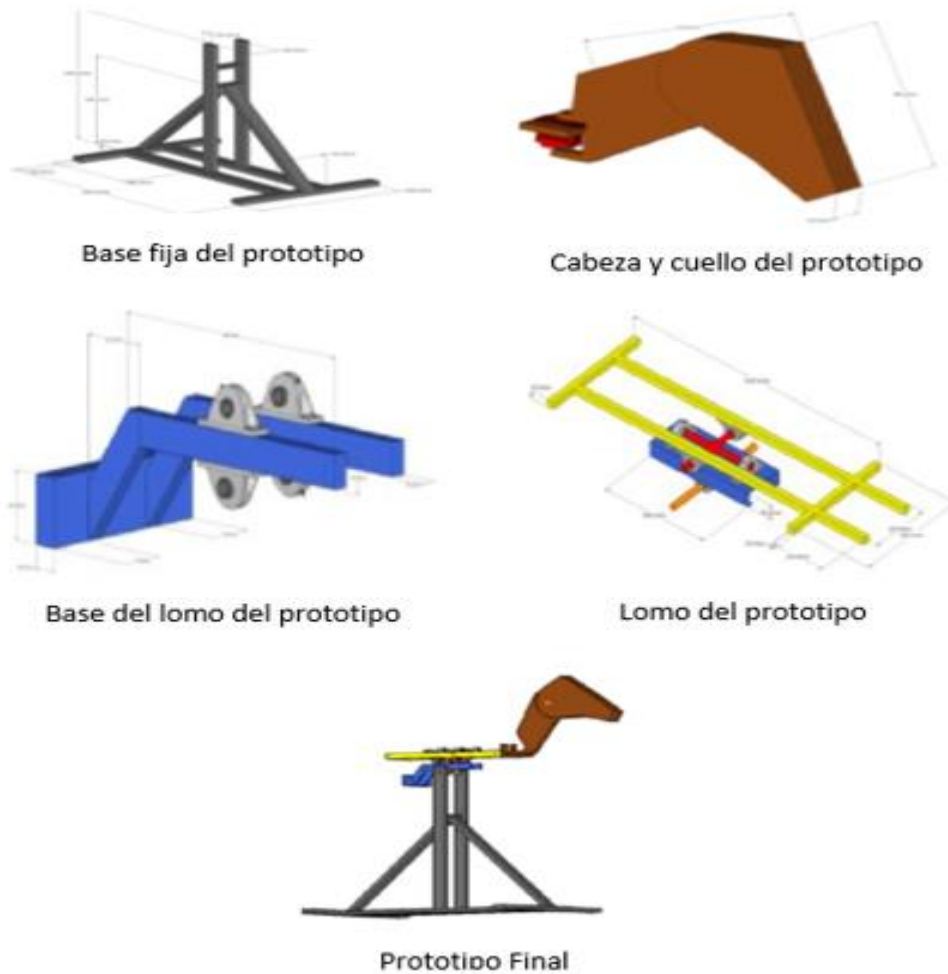


Fig. 2.2 Prototipo equino [11]

2.3 Eslabones

Definición: Se define a un eslabón como un elemento estructural rígido. Los eslabones son los elementos mecánicos que constituyen la estructura del robot. Por medio de las articulaciones o uniones, los eslabones pueden enlazarse entre sí para constituir la denominada cadena cinemática del robot. Dicha cadena cinemática puede ser de dos formas abiertas o cerradas. Cuando el dispositivo robótico cuenta con un conjunto determinado de articulaciones y eslabones y se llega a un punto en el cual el último eslabón no se encuentra conectado a ningún otro elemento, se dice que dicho robot es de cadena cinemática abierta, en caso contrario el manipulador será de cadena cinemática cerrada.

2.4 Grados de libertad

Es la capacidad de moverse hacia delante/atrás, arriba/abajo, izquierda/derecha (traslación en tres ejes perpendiculares), combinados con la rotación sobre tres ejes perpendiculares. [12]

2.5 Articulaciones

Las articulaciones permiten el movimiento relativo de dos eslabones consecutivos. Las articulaciones pueden ser de varios tipos, aunque las más comunes son las: rotacionales (rotativas) o traslacionales (prismáticas). Se conocen cinco tipos de articulaciones básicas:

- Rotacional con un grado de libertad
 - Las articulaciones rotacionales permiten un movimiento relativo de tipo rotacional entre dos eslabones.

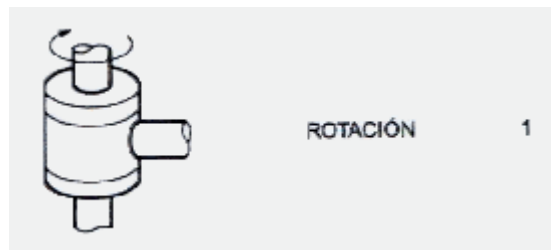


Fig. 2.3 Articulación Rotacional [12]

- Prismática con un grado de libertad
 - Las prismáticas permiten un movimiento relativo lineal.



Fig. 2.4 Articulación Prismática [12].

- Cilíndrica con dos de libertad
 - Tiene 2 grados de libertad una es traslación y la otra es rotación.



Fig. 2.5 Articulación Cilíndrica [12]

- Planar con dos de libertad
 - Se caracteriza por su tipo de movimiento en un plano, por lo tanto, tiene de dos grados de libertad.



Fig. 2.6 Articulación Planar [12]

- Esférica (rótula) con tres grados de libertad
 - combina giros en tres direcciones perpendiculares del espacio.



Fig. 2.7 Articulación Esférica [12].

2.6 Cinemática directa

La cinemática de los manipuladores es la ciencia que estudia el movimiento de los componentes físicos del robot sin considerar las fuerzas que los causan. Dentro de la cinemática se estudia la posición, velocidad, aceleración, y todas las derivadas de grado mayor de las variables de posición, con respecto al tiempo o cualquier otra variable. Por consiguiente, el estudio de la cinemática de los manipuladores se refiere a todas las propiedades geométricas y temporales del movimiento [13].

Es una función vectorial que relaciona las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas del robot, así como la orientación de la herramienta colocada en el extremo final, tomando en cuenta las propiedades geométricas del sistema mecánico del robot [12].

2.7 Cinemática inversa

La cinemática inversa es un problema fundamental en el uso práctico de los manipuladores, que contempla el cálculo de todas las posibles combinaciones de ángulos de juntas que podrían ser usadas para lograr una determinada posición y orientación del efector terminal del manipulador [13].

Es un problema no lineal que relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas. Dada la posición cartesiana y la orientación de la herramienta colocada en el extremo final del robot [12].

2.8 Simulación en Geogebra

Es un software de matemáticas para todo nivel educativo. Reúne dinámicamente geometría, álgebra, estadística y cálculo en registros gráficos, de análisis y de

organización en hojas de cálculo. Este software de acceso libre, congrega a una comunidad vital y en crecimiento. En todo el mundo, millones de entusiastas lo adoptan y comparten diseños y aplicaciones. Dinamiza el estudio, armonizando lo experimental y lo conceptual para brindar una organización didáctica y disciplinar que relaciona matemática, ciencias, ingeniería y tecnología.

Está formado por la organización sin fines de lucro International GeoGebra Institute y GeoGebra con oficinas en Linz, Austria. Tiene el propósito de reunir gráfica y dinámicamente álgebra y geometría, análisis y hojas de cálculo. Potentes herramientas en armonía con una interfaz intuitiva y ágil. Herramienta de autoría para crear recursos de aprendizaje interactivos como páginas web[13].

2.8.1 Pasos para simular

1. Ejecutar el software
2. Seleccionar el tipo de gráfica a implementar
3. Dar los puntos de la gráfica
4. Unir los puntos deseados
5. Finalizar

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE CAMINATA

3.1 Características ideales del sistema

Se requiere que el robot simule los movimientos de caminata y trote de un caballo, con la finalidad de transferirlos a los pacientes, de esta manera el paciente tendrá la sensación de encontrarse a lomos de un caballo real, los movimientos no deben ser bruscos dado que podrían llegar a lastimar física y psicológicamente al paciente por las razones antes mencionadas, para manipular los movimientos del robot se a diseñado la máquina de estados finitos que se muestra a continuación.

3.2 Máquina de Estados Finitos del Sistema de Caminata del prototipo

La máquina de estados finitos que se ha propuesto para controlar los movimientos del prototipo de simulador equino, se muestra en la figura 3.1. Cada nodo representa una función o estado que realiza el robot en un tiempo determinado, donde las transiciones de un estado a otros, se darán cuando se cumplan las condiciones de tiempo.

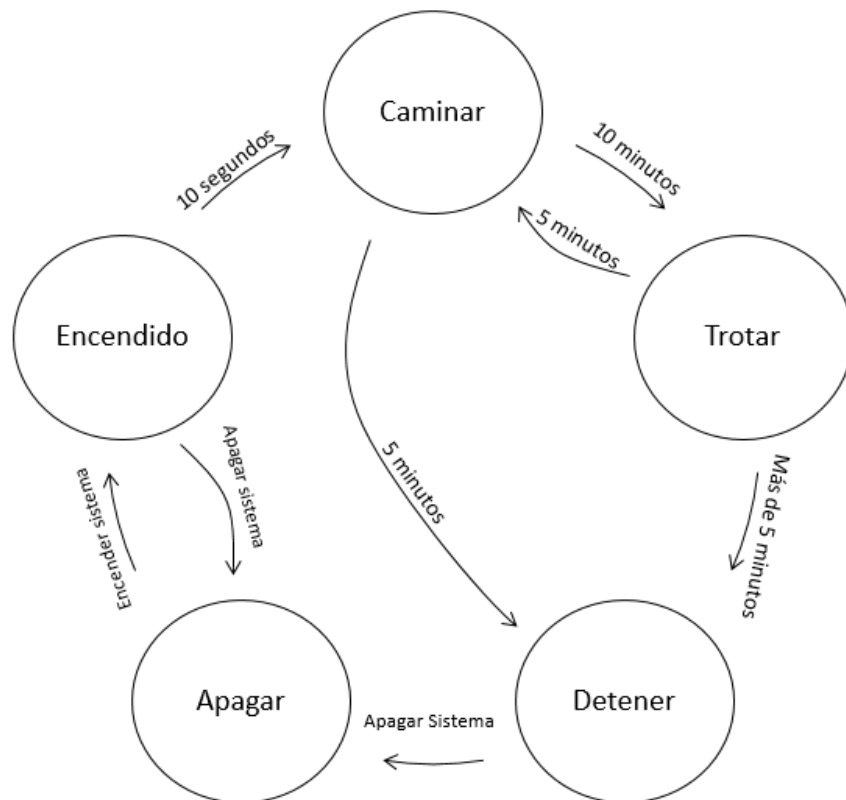


Fig.3.1. Máquina de estados que describe el funcionamiento del robot.

3.3 Modelado matemático del prototipo

En esta sección se muestra cómo se calcula la potencia requerida por el sistema mecánico. Luego, se muestran 2 elementos principales de potencia, a saber, motores y reducción. El estudio de motores se extiende a dos tipos, estos son: motores eléctricos (varios tipos) y motores de combustión interna (2 tipos). El estudio de la dinámica del vehículo se puede realizar usando el método de Trabajo Virtuales [1] o haciendo el cálculo computacionalmente en softwares como SolidWorks y su módulo de Análisis de Movimiento. Por un lado, el método de Trabajos Virtuales permite saber, dada una velocidad angular determinada, cuál es el torque necesario para mover el vehículo. Como se muestra en la ecuación.

$$\sum Pot = 0$$
$$\sum \langle \vec{F}_i, \vec{v}_i \rangle + \langle \vec{M}_i, \vec{\omega}_i \rangle = 0$$

Donde:

$Pot = Potencia [W]$

$\vec{F}_i = Fuerza de cada elemento i [N]$

$\vec{v}_i = velocidad lineal de cada elemento i \left[\frac{m}{s} \right]$

$\vec{M}_i = momento de cada elemento i [Nm]$

$\vec{\omega}_i = velocidad angular de cada elemento i \left[\frac{1}{s} \right]$

Ecuación para la potencia.

Cada eslabón, de cada extremidad se encuentra girando a una velocidad ω_i , movido por el eslabón de entrada que gira a una velocidad ω_e . Además, cada eslabón opone un momento en contra del movimiento igual a

$$M_i = I_i * \alpha_i,$$

Donde I_i es la inercia del eslabón y α_i es la aceleración angular del eslabón que depende de la geometría y de la velocidad angular de entrada ω_e .

Además, los elementos no giratorios, ejercen una fuerza en contra del movimiento que se calcula como se muestra en la ecuación.

$$F_{x_i} = m_i * g$$
$$F_{y_i} = m_i * a_i$$

Donde:

F_{x_i} = Fuerza en el eje x, del elemento i [N]

F_{y_i} = Fuerza en el eje y, del elemento i [N]

m_i = Masa del elemento i [kg]

a_i = Aceleración en el eje y, del elemento i $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

Ecuación para la Fuerza contra movimiento.

Donde la masa depende del objeto a considerar y la aceleración depende de la velocidad angular de entrada, a su vez cada uno de esos elementos no rotativos lleva una velocidad lineal, vertical y longitudinal, la cual es función de la velocidad angular de entrada. Teniendo el modelo se puede definir la velocidad angular máxima de operación, con eso se tendrán todas las variables para calcular el torque requerido para mover el vehículo, finalmente se tendrá la potencia, ya que:

$$P = T * \omega_e.$$

Por otro lado, la potencia necesaria para mover el vehículo puede ser estimada computacionalmente usando softwares de diseño y análisis. En particular, este análisis puede realizarse con SolidWorks y su módulo de análisis de movimiento. Esta herramienta permite insertar cualquier tipo de motor virtual en cualquier elemento del ensamblaje, dándole características de velocidad, ya sea lineal o angular, luego se pueden extraer muchos resultados de la cinemática y dinámica del ensamblaje y sus elementos, entre ellos: desplazamientos, velocidades y aceleraciones, lineales o angulares, fuerzas y torques, entre otros.

3.4 Modelado en Software

Se empieza con un modelado de la caminata mediante el software GeoGebra que brinda las herramientas necesarias para plantear y visualizar el desplazamiento del

prototipo, como se muestra en la figura 3.6. Del lado izquierdo de la figura 3.6 tenemos los segmentos que representan cada una de los ligamentos que tendrá el pie y pierna del caballo, y en la parte derecha de la figura tenemos la representación gráfica de cada uno de esos segmentos las medidas son establecidas por Theo Jansen.

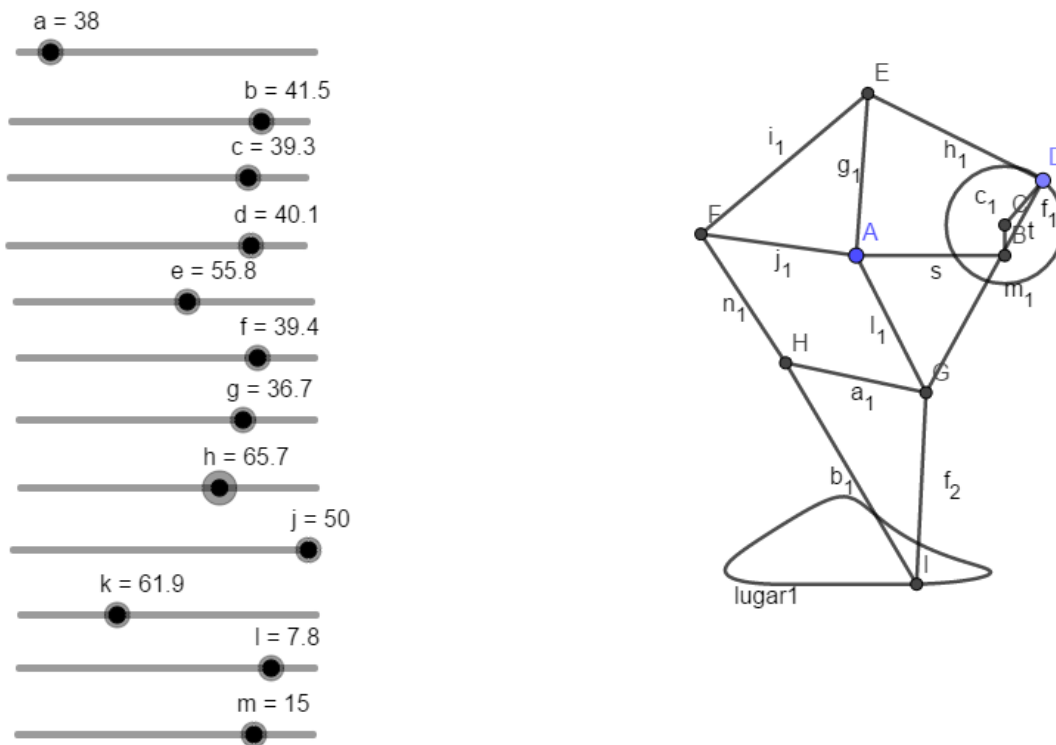


Fig. 3.6 Diseño en GeoGebra.

Una vez completado y verificado el correcto funcionamiento matemático del diseño en GeoGebra se ha decidido utilizar el software de diseño asistido por computadora SOLIDWORKS, con la finalidad de generar cada una de las piezas mecánicas que constituyen la estructura física del robot, dimensionar longitudes y espesores que garanticen el correcto funcionamiento del prototipo. En caso de ser requerido este software permitirá la impresión de las piezas en una impresora 3D, también permite realizar un análisis de colisiones para evitar que las piezas no choquen entre sí, antes de implementar el prototipo físicamente. SOLIDWORKS permite manejar diversas perspectivas, que ayudan al usuario final a conceptualizar el modelo físico del prototipo.

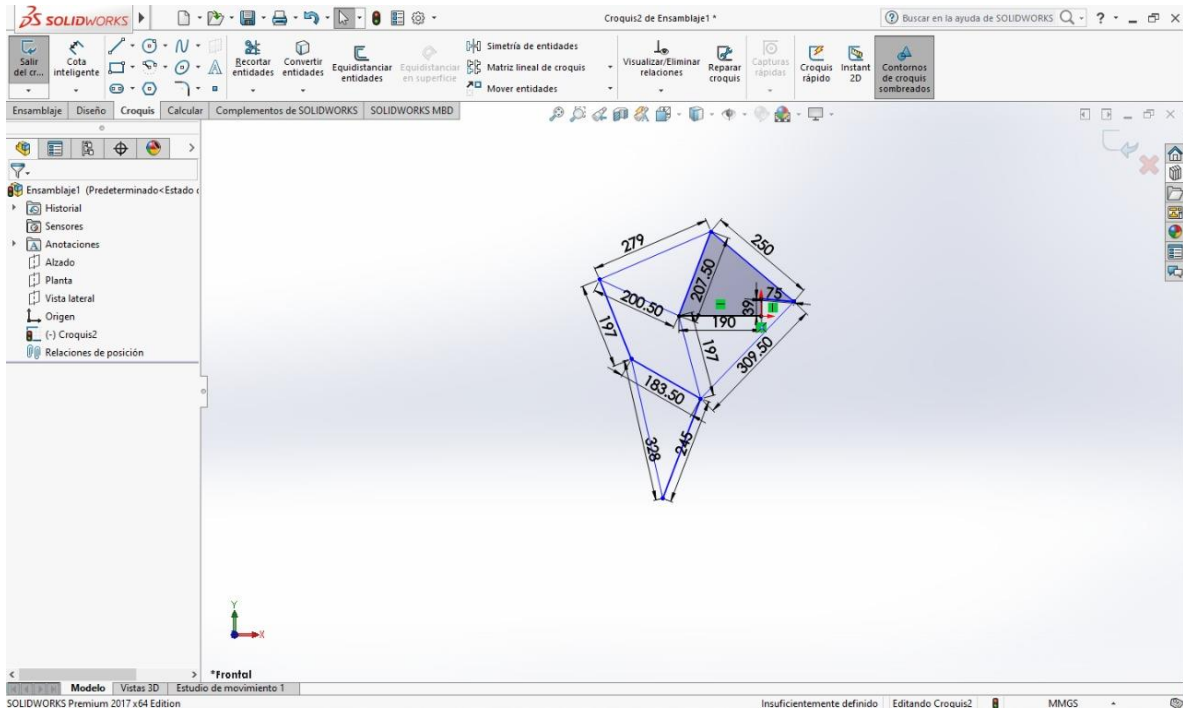


Fig. 3.7 diseño en SOLIDWORKS.

Una vez creado el diseño base en SOLIDWORKS se procede a hacer cada una de las piezas o vectores en 3d para así poder crear la pierna y el pie de caballo.

Para poder crear cada una de las piezas se utilizará la herramienta insertar componente, con esta herramienta se creará cada uno de los ligamentos que conforman el pie y pierna del prototipo. Una vez creado el componente y así empezar a modelar cada una de las piezas se ocupará la herramienta ranura recta para hacer los ligamentos, para marcar donde irán cada uno de los orificios que servirán para la unión de las piezas se ocupa la herramienta círculo. ya terminado el modelado de la pieza se extruye para poder así tener la pieza en 3d. como se muestra en la figura 3.8 Y la figura 3.9.

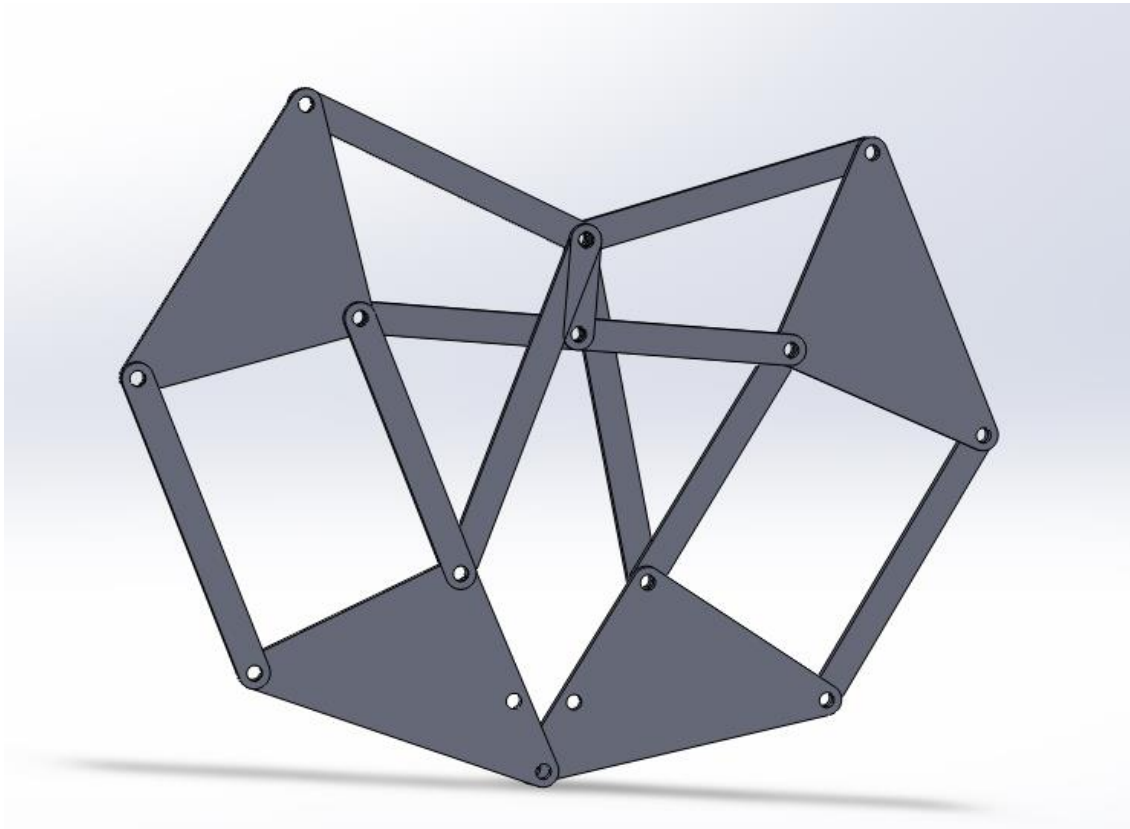


Fig. 3.8 Pies del caballo

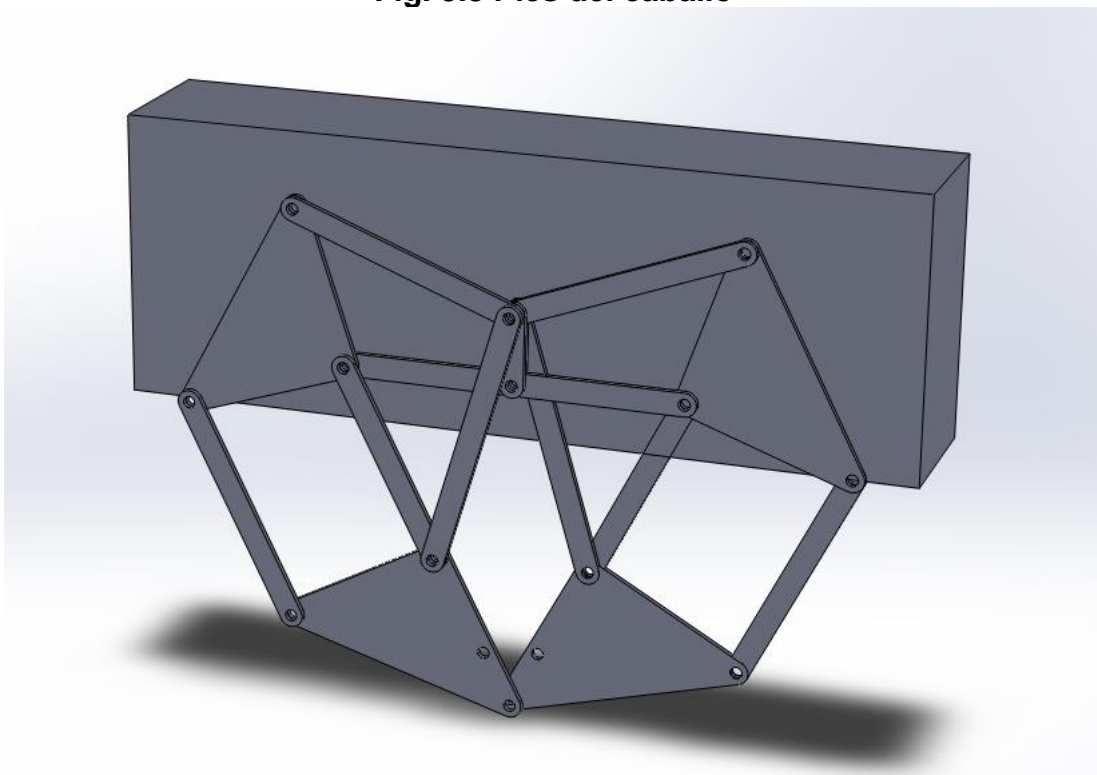


Fig. 3.9 cuerpo

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN,
EXPERIMENTACIÓN,
RECOPILOACIÓN Y ANÁLISIS
DE DATOS

4.1 Construcción

Una vez terminado el diseño en el software SOLIDWORKS, el cual sirvió como referencia para dimensionar las piezas y verificar posibles colisiones, se procedió a la implementación física del prototipo, utilizando los materiales que se presentan en la tabla 4.1.

Material	Especificaciones
Tabla de pino	espesor de 2cm, largo de 2 m y ancho de 15cm.
Soportes laterales	espesor de 2cm, largo de 1 m y ancho de 15 cm.
Soporte inferior (lámina galvanizada)	acero galvanizado calibre 22
Soporte superior (lámina galvanizada)	acero galvanizado calibre 22
Manivela circular (lámina galvanizada)	acero galvanizado calibre 22

Bote de pintura negra	1 litro
Tornillos cabeza de gota	1.5" de largo y 0.11" de diámetro.
Tornillos redondos	5.66" de largo y 0.27" de diámetro.
taladro Makita	710 Vatios de potencia, 3200 RPM
pulidora Bosch	2200 W de potencia, Velocidad máxima de rotación de 6500 rpm
mesa cuadrada	1.5 m de ancho por 1.5 m de largo.
masa de velocidades SHIMANO	8 velocidades.
motor magnético monofásico	120v ac, 60Hz a 2700 RPM

Tabla 4.1. Materiales para construcción del Prototipo Equino.

La construcción se realizó en el domicilio particular ubicado en Calle Defensores de la República No.43 San Nicolás San Pablo del Monte Tlaxcala, debido a la contingencia médica provocada por la COVID-19, en la figura 4.1 y figura 4.2 se muestran fotografías del espacio de trabajo y de los soportes de lámina galvanizada junto con los eslabones móviles de madera.



Fig. 4.1 Corte de piezas



Fig. 4.2 Ensamble de las piezas.

Como parte del proceso de construcción se cortaron las partes metálicas, se pulieron para garantizar que no tenga óxido en algún punto y por último se pintaron

para prolongar el tiempo de vida útil y contar con todas las piezas necesarias para ensamblar el prototipo como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4. Se muestra la fotografía donde el alumno Eduardo Pícen Acevedo corta una pieza de lámina galvanizada con una sierra tipo pulidora y se muestra una versión del prototipo que trabaja con un motor magnético monofásico respectivamente.



Fig. 4.3 Pulido de las piezas.



Fig. 4.4 Rearmado del prototipo.



Fig. 4.5 Prototipo armado.

4.2 Experimentación

Experimento 1

Se colocó el motor magnético de 24 Voltios y 2700 RPM en el centro de masa como eje central del mecanismo, y se corroboró que los movimientos del prototipo se realizaron sin colisiones, lo cual corrobora el trabajo diseñado en software (geogebra, solidworks). En la figura 4.6 se muestra la medición de las revoluciones utilizando un tacómetro digital.



Fig. 4.6 Fotografía de medición de velocidad.

Experimento 2

Se programó la máquina de estados en conjunto con la tesis del alumno Ricardo Tezmoz Pízen titulada Desarrollo de simulador equino como herramienta para la equinoterapia y se corroboró que los movimientos de galope, se realizaron correctamente en el prototipo, en la figura 4.7 y 4.8 se muestra captura de pantalla del entorno de desarrollo del software utilizado.

Experimento 3

De acuerdo a las características y el estudio del software se determinó que el peso máximo que puede soportar el prototipo es de 10 kg, como se muestra en la figura 4.9. donde se muestra al niño (nombre del niño) con un peso de 8kg el cual nos permitió ser fotografiado para el presente trabajo. También se colocaron pesos de 11 a 15 kilogramos pero el funcionamiento del motor ya no era el óptimo y para prevenir fallos irreversibles, se desconectó, mediante un botón de paro.



Fig. 4.9 Fotografía del prototipo donde se muestra al niño Evan García el cual nos permitió ser fotografiado para el presente trabajo.

4.3 Recopilación y análisis de datos

Para la recopilación de los datos que se muestran en la tabla 4.2 se utilizaron las siguientes herramientas:

Báscula tipo romana para medir el peso del prototipo y las cargas colocadas

Los datos obtenidos durante los experimentos anteriormente mencionados se vaciaron en la tabla 4.2

Parámetro	Valor ideal	Valor registrado
velocidad	100 RPM	89 RPM
número de colisiones	0	1
Peso máximo	10kg	8kg
Peso mínimo	0	1kg
Número de estados programados	5	5

Tabla 4.2 Registro de medición de parámetros.

Con estos datos corroboramos que el prototipo cumple con las funciones requeridas y que el diseño ha servido para evitar pérdidas de tiempo, retrabajos y gastos económicos no esperados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO

A FUTURO

5.1 Conclusiones

La Ingeniería en Ciencias de la Computación permite desarrollar, prototipos de tecnología software/hardware que son un reto para áreas de control, programación, electrónica, matemáticas, mecánica, etc. En particular se concluye que actualmente existen diversos prototipos de simulador equino (basados en tecnologías neumáticas, hidráulicas, eléctricas, etc.), algoritmos de implementación y simulación.

Después de utilizar softwares como GeoGebra y SolidWorks, se comprobó que fueron los ideales para la construcción, visualización y simulación de piezas, así como del sistema completo.

La simulación es una herramienta que permite evitar errores, antes de que sucedan físicamente, se pueden especificar el tamaño y comportamiento de las piezas y visualizar el sistema como un conjunto que trabaja de manera coordinada, verificando que la propuesta de diseño sea viable a realizar.

Este trabajo representó un reto personal ya que se investigó la información necesaria para aplicar y recordar conceptos lógicos-matemáticos.

Se aprendió el uso de GeoGebra y SolidWorks, que son los softwares que se utilizaron para realizar procedimientos matemáticos y diseño de piezas mecánicas. Para lograr la simulación del prototipo equino, se abordaron problemas como el diseño y estudio profundo de cada pieza y a veces se replantearon los diseños originales.

La experiencia ha sido enriquecedora, ya que se logró cada uno de los objetivos específicos, lo que permitió asimilar conocimientos y adquirir nuevos, así como nuevas destrezas en investigación y autoestudio, en general la experiencia sobre simulación de sistemas hardware/software, actualmente es un área con oportunidades de desarrollo y comunicación con diferentes dispositivos que en un futuro podrán interpretar, procesar y diagnosticar tendencias de uso y control de mejoras en un paciente real.

Debido a la pandemia causada por la COVID-19 a principios del 2020, este trabajo ya no se logró perfeccionar y realizar pruebas con pacientes reales.

5.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se plantea la idea de llevar seguir realizando pruebas de funcionamiento, buscar nuevo y mejores materiales tanto mecánicos como electrónicos.

Y por último realizar un rediseño de este prototipo en base a los datos obtenidos con pacientes reales.

Referencias.

1. Torres-Pérez, Y., Gómez-Pachón, EY, & Miró-Rodríguez, F. (2017). *Cinemática bidimensional de caballos al trote mediante videomatría y modelación matemática*. Revista facultad de ingeniería, 26 (45), 83–96. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413954888007>
2. Fraser Anderson. Michelle Annett. Walter F. Bischof. Pierre Boulanger. (Marzo 2010). *Virtual Equine Assisted Therapy*. [Drive] https://www.researchgate.net/publication/221402247_Virtual_equine_assisted_therapy
3. Jungsan Cho. Sangdeok Park. Kabil Kim. (08 de Enero del 2015). *Design of mechanical stiffness switch for hydraulic quadruped robot legs inspired by equine distal forelimb*. [Drive] https://docs.Zgoogle.com/document/d/14Hd7Ajt8jK_utW57r3tDc5y9vn_7vzYk/edit
4. Karina Cecilia Cuadrado Mazón. (Mayo 2018). *Análisis Cinemático y Cinético del Mecanismo Theo Jansen. Diseño y Construcción de Juguete Prototipo*. [PDF] <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19785/1/CD-9194.pdf>
5. Kyuhei Honda. Yugo Kajiwara. Shu Karube. Kenichi Takahashi. (Octubre 2014). *Walking Mechanism for a Lion-type Robot*. [Drive] https://drive.google.com/drive/folders/1vBS-fHGhH5GjLryb9Oj9S_3FsnKAU5I0?hl=es
6. A. Aan. M. Heinloo. (2014). *Analysis and synthesis of the walking linkage of Theo Jansen with a flywheel*. [Drive] https://drive.google.com/drive/folders/1vBS-fHGhH5GjLryb9Oj9S_3FsnKAU5I0?hl=es
7. SUNRISE MEDICAL. (Marzo 2016). *Equinoterapia: fundamentos médicos de la terapia con caballos*. SUNRISE MEDICAL <https://www.sunrisemedical.es/blog/equinoterapia>

8. Omar Fuksman. (2014). Los beneficios de la equinoterapia. Uruguay Sociedad de la Información. <https://www.usi.org.uy/blog/espacio-salud/los-beneficios-de-la-equinoterapia-1887>
9. Pérez Álvarez, L., Rodríguez Meso, J., & Rodríguez Castellano, N. (2008). La equinoterapia en el tratamiento de la discapacidad infantil. Archivo médico Camagüey, 12(1), 0–0. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552008000100016&lng=es&nrm=iso
10. Rojas Ángel, J., Romero Roa, J. R., Pardo Morales, J., & Andrade Ramírez, J. E. (2018). Análisis cinemático del prototipo de robot equino desarrollado para el simulador de prácticas de tiro montado en la Escuela Nacional de Carabineros. Revista logos ciencia & tecnología, 10(4), 196–206. <https://www.redalyc.org/journal/5177/517764491010/517764491010.pdf>
11. JavierRaúl Romero Roa, Jairo Rojas Ángel, Jhonson Pardo Morales, Jaime Eduardo Andrade Ramírez. (Octubre 2019). Análisis cinemático del prototipo de robot equino desarrollado para el simulador de prácticas de tiro montado en la Escuela Nacional de Carabineros “Alfonso López Pumarejo”. <https://revistalogos.policia.edu.co:8443/index.php/rlct/article/view/679/pdf>
12. Fernando Reyes Cortés. (Marzo de 2011). Robótica: Control de robots manipuladores. https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1vBS-fHGhH5GjLryb9Oj9S_3FsnKAU5l0
13. UdeSantiago Virtual. (S/F). Herramientas Matemáticas <https://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24916#ch282>