

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño e implementación de una pata robótica de un grado de libertad bio-inspirada en las extremidades posteriores de lepóridos

Trabajo de graduación presentado por Erick Fernando Bautista Muñoz para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



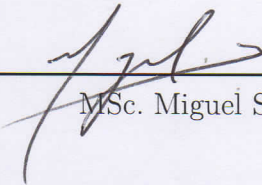
Diseño e implementación de una pata robótica de un grado de libertad bio-inspirada en las extremidades posteriores de lepóridos

Trabajo de graduación presentado por Erick Fernando Bautista Muñoz para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

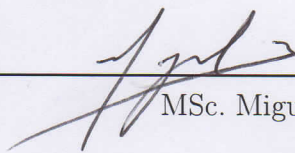
Guatemala,

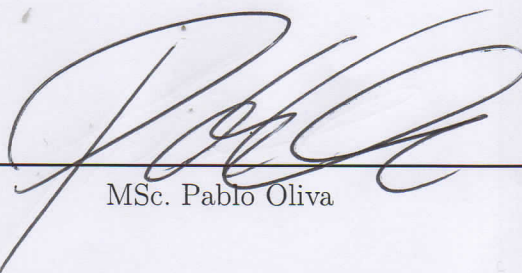
2019


Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Miguel Sea

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Miguel Sea

(f) 
MSc. Pablo Oliva

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de diciembre de 2019.

Le agradezco a mis padres por el apoyo que se me ha brindado para poder desempeñarme en tan prestigiosa casa de estudios en la cual me he formado de manera académica durante estos últimos 5 años.

Agradezco al maestro MSc. Miguel Zea por su colaboración y formación para completar este proyecto académico.

Finalmente agradezco al departamento de ayuda financiera pues gracias al apoyo del programa de becas, logre llegar hasta este punto en mi formación académica.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	9
6. Marco teórico	11
6.1. Robótica bio-inspirada	11
6.2. Teoría física	11
6.2.1. Energía cinética	11
6.2.2. Energía potencial gravitacional	12
6.2.3. Energía potencial elástica en resortes	12
6.3. La liebre europea	13
6.4. Conceptos mecánicos	13
6.4.1. Grados de libertad	13
6.4.2. Eslabón	13
6.4.3. Nodo	13
6.4.4. Junta	14

6.4.5. Cadena cinemática	14
6.4.6. Mecanismo	14
7. Primera fase de proyecto	15
8. Diseño de prototipos	17
8.1. Primeros prototipos	17
8.1.1. Prototipo número uno	17
8.1.2. Prototipo número dos	18
8.1.3. Prototipo número tres	20
8.1.4. Hardware utilizado	20
8.1.5. Experimentación con prototipo número tres	22
8.1.6. Prototipo número cuatro	22
8.1.7. Prototipo número cinco	23
8.1.8. Prototipo número seis	24
8.1.9. Reduciendo peso de prototipo seis	25
8.1.10. Eliminado peso del resto del mecanismo	25
9. Diseño de extremidad para impresión 3D	27
9.1. Rediseño para obtención de un modelo liviano	27
9.1.1. Ventajas del modelo 3D	29
9.1.2. Diseño de extremidad en 3D	30
9.1.3. Impresión de extremidad en 3D	30
10. Extremidad a partir de modelos 3D	31
10.1. Construcción de diseño 3D	31
10.1.1. Diseño y construcción de piezas de acople	32
11. Elemento potencial en diseño	35
11.1. Implementación de elemento con energía potencial elástica	35
12. Acoplando prototipo en bases de pruebas	39
12.1. Experimentación con primera base de pruebas	39
12.2. Diseño de nueva base de pruebas	39
12.2.1. Acople de extremidad a base de pruebas nueva	41
13. Experimentación con base de pruebas	45
13.1. Metodología de experimentación	45
13.2. Experimentación y resultados	46
13.3. Experimentación con diferentes cajas reductoras	47
14. Conclusiones	51
15. Recomendaciones	53
16. Bibliografía	55
17. Anexos	57
17.1. Código	57

Lista de figuras

1.	Proyecto primera fase	15
2.	Diseño mecánico primera fase	16
3.	Prototipo uno	18
4.	Prototipo dos	19
5.	Base de pruebas	19
6.	Prototipo tres	20
7.	Circuito para controlar extremidad	21
8.	Prototipo cuatro	22
9.	Prototipo cinco	23
10.	Solución al problema del eje	24
11.	Prototipo seis	24
12.	Prototipo seis simplificado	25
13.	Prototipo seis simplificado con menos peso en acople	26
14.	Extremidad realizando cuatro saltos previo a caer	26
15.	Peso de modelo final de primera fase	28
16.	Eslabón diseñado para impresión en 3D previo a rediseño	29
17.	Eslabón rediseñado para evitar el uso de más rodamientos	29
18.	Peso de modelo final de segunda fase	32
19.	Diseño de prototipo en 3D	33
20.	Ensamble de piezas de acoples	33
21.	Señalamiento de juntas en mecanismo	36
22.	Diseño de plataforma nueva	40
23.	Pieza para acoplar cojinetes a rieles de base de pruebas nueva	40
24.	Patín para acoplar cojinetes a rieles horizontales de base de pruebas funcional	41
25.	Primera versión de acople de extremidad a base de pruebas	41
26.	Segunda versión de acople de extremidad a base de pruebas	42
27.	Tercera versión de acople de extremidad a base de pruebas	42
28.	Ensamble de plataforma final	43
29.	Ensamble de plataforma final con acople	44

30.	Ensamble de plataforma final con extremidad	44
31.	Comparación resultados de desplazamiento vertical primera fase vs segunda fase	46
32.	Comparación resultados de desplazamiento vertical con contracción primera fase versus segunda fase	47
33.	Comparación de desplazamiento horizontal de extremidad con cajas reductoras de diferente relación entrada/salida y motor original	49
34.	Comparación de desplazamiento vertical de extremidad con cajas reductoras de diferente relación entrada/salida y motor original	49

Lista de cuadros

1. Pesos de elementos de mecanismo de segunda fase prototipo en MDF 27
2. Pesos de elementos de mecanismo de primera fase 28
3. Comparación de desplazamiento vertical entre primera y segunda fase 46

El siguiente documento detalla el proceso de diseñar e implementar una extremidad robótica bio-inspirada en las patas traseras de los lepóridos, con una capacidad de funcionamiento similar a la primera fase y con un menor número de motores, esto viene siendo la continuidad del trabajo de graduación concluido por el Ing. Christopher Chiroy el cual, logró realizar una extremidad que tiene la capacidad de desplazarse de manera vertical y horizontal así como producir un efecto de amortiguamiento, esto a partir de utilizar 2 motores DC con cajas reductoras y un sistema de control. La continuidad del proyecto que describe este documento se centró en poder utilizar un solo motor DC así como utilizar un elemento que logre almacenar energía potencial en el proceso de desplazamiento del mecanismo para producir el movimiento visto en la fase anterior. Además se analizó la base de pruebas del modelo de Chiroy de tal modo que se observaron diversos puntos para mejora dando como resultado, una nueva plataforma en la cual la extremidad realizada en esta segunda fase logra desplazarse con más libertad respecto a la primera al tener menor fricción en el proceso de desplazamiento, las mejoras a dicha plataforma son principalmente materiales utilizados así como algunos cambios principalmente en los rieles que mueven los perfiles a los cuales se acopla la extremidad. Finalmente se realizaron comparaciones en cuanto a distancias de desplazamiento vertical entre ambas versiones de la extremidad, también se realizaron pruebas con motores de mayor torque y diferentes cajas reductoras para analizar la capacidad del mecanismo diseñado. Las conclusiones de dichas comparaciones mostraron que el modelo de Chiroy tiene mayor capacidad de desplazamiento vertical aunque dicha ventaja está justificada dado su mayor consumo energético. Se detallan diversas razones de esto entre las cuales destacan el número de actuadores utilizados así como diferencias en cuanto a grados de libertad, adicional a esto, se aclaran ventajas y desventajas de ambos modelos las cuales se definen con base a lo que se esté buscando siendo las opciones más destacables el menor consumo energético o la mayor capacidad de desplazamiento, además se detallaron recomendaciones para futuros modelos entre las cuales destaca discretizar los parámetros medibles y/o variables del modelo para realizar efectos de movimiento específicos según dichos factores. [1].

The following document is intended to show the development of a bio-inspired mechanical limb in leporides taking into account an existing model, which is intended to obtain a more efficient mechanism in terms of the number of actuators used to produce results equal or approximate to the design current. The procedural order is explained which implies knowing the project of the first phase, based on this, new designs are created until they reach a functional one. In addition, there are several design iterations for the test base in order to improve the performance of the test, this is intended to avoid friction problems as well as eliminate unnecessary weight to the mechanism so that it is better than the current model. Finally, an element with potential energy is added such that it is possible to take advantage of energy that is not taken into consideration during the operating cycle of the mechanism.

CAPÍTULO 1

Introducción

En el área de la robótica se está indagando mucho en lo que es la inspiración de la naturaleza, y se le ha dado un grado de importancia al punto que se tiene denominada una rama para esta ciencia, a la cual se le denominada robótica bio-inspirada.

En lo que respecta diseños mecánicos, inspirarse en extremidades de especies animales no resulta una idea impráctica tomando en consideración principalmente que diversas especies se han logrado adaptar a distintos ecosistemas, a tal punto que sus cuerpos son parte importante para su supervivencia pues, gracias a estos logran desplazarse o convivir con dichos entornos.

Hablar de una especie animal específica resulta práctico para este trabajo, y poder introducir lo que es la capacidad de la "*Lepus europaeus*" o Liebre Europea para desplazarse a altas velocidades es una buena forma de aclarar la importancia de la naturaleza en la robótica en la actualidad, es posible que realizar mecanismos que tomen las ventajas de dicha especie para desplazarse sea de utilidad para diversas ramas de la ciencia en un futuro.

Especular que modelos mecánicos bio-inspirados sean de suma importancia en un futuro próximo parece poco realista sin embargo, al igual que paso con la informática, la robótica puede llegar a brindarnos herramientas que solo la sociedad misma sabrá aprovechar a futuro.

El siguiente documento tiene como finalidad poder mostrar el desarrollo de una extremidad mecánica bio-inspirada en los lepóridos tomando en consideración un modelo existente, con ello se pretende obtener un mecanismo más eficiente en cuanto número de actuadores como lo vienen siendo motores DC utilizados para producir resultados iguales o aproximados al primer diseño. Se explica el orden procedimental el cual implica conocer el proyecto de la primera fase, en base a este, se crean nuevos diseños hasta llegar a un modelo funcional. Uno de los puntos importantes del diseño es poder introducir al mecanismo un elemento que logre almacenar parte de la energía potencial que se produce en cada ciclo de desplazamiento.

Además, se producen diversas iteraciones de diseño para la base de prueba con el objetivo de mejorar el rendimiento de la misma, con esto se pretende evitar problemas de fricción así como eliminar peso innecesario al mecanismo para que este sea mejor que el primer modelo.

El presente documento muestra el proceso de diseño que se ha realizado según la fase de investigación número uno de este mismo proyecto; dicha fase estuvo a cargo del Ingeniero Mecatrónico Chirstopher Chiroy el cual en su tesis, profundiza sobre el conocimiento de extremidades bio-inspiradas en lepóridos. Según explica, no se ha indagado en el estudio de esta especie, sin embargo, se han realizado diseños basados en avestruces así como en lo que son animales cuadrúpedos como tal. Dichas investigaciones se han dado en universidades de prestigio tal como lo es Massachusetts Institute of Technology (MIT). Chiroy habla sobre el bípedo denominado FASTRunner el cual está inspirado en lo que son los avestruces. Este modelo replica el accionar de los músculos principales de los avestruces por medio de lo que son resortes. Además de ello habla de otra extremidad, esta se inspira en los felinos y funciona de tal forma que logra desenvolverse en una corredora para producir su movimiento. [1].

Respecto al estudio de la extremidad bio-inspirada en lepóridos específicamente hablando, Christopher Chiroy realizó una extremidad capaz de producir un desplazamiento vertical, así como amortiguar su caída por medio de 2 motores DC trabajando en conjunto con un sistema de control. Ambos procesos fueron realizados a partir de utilizar 2 actuadores siendo estos los motores DC descritos anteriormente, esto nos muestra la eficiencia en cuanto el uso de elementos para realizar ambas actividades pues, de manera general, utilizar resortes como amortiguadores resultaría la idea más general para este caso, sin embargo, utilizar técnicas de control para ello resulta una idea novedosa y muy funcional. [1].

El estudio de las extremidades de los lepóridos puede brindar modelos mecánicos eficientes en cuanto a un desplazamiento horizontal y vertical, estudiar su capacidad y forma de desplazamiento resulta ser un estudio interesante del cual se puede obtener mecanismos para desenvolverse en terrenos irregulares , además, no se ha indagado a profundidad en la capacidad de desplazamiento en estos animales en la actualidad, esto nos muestra que el interés de esta investigación puede otorgar resultados útiles y novedosos. Estudiar la primera fase de este proyecto resulta importante para seguir una investigación pues, de esta forma se puede llegar a conocer los pro y contras de este. El hecho de tener un proyecto funcional y exitoso como lo fue la primera fase de este proyecto da como resultado, la dificultad de poder indagar en mejorar en algún área de manera significativa, sin embargo, es posible llegar a perfeccionar diversos puntos en los cuales el anterior autor no llegó a profundizar, dando como resultado una ventana para poder realizar un proyecto de mejor calidad. Indagar en el diseño mecánico propuesto en la primera fase resulta ser un punto de interés pues, se puede mejorar aún más la funcionalidad del proyecto el cual, inicialmente se considera eficiente por el uso de los actuadores trabajando un papel doble, siendo estos los medios para producir desplazamiento y amortiguamiento. Se debe tomar en consideración que el modelo actual tiene potencial para poder llegar a convertirlo en lo que es un bípedo, sin embargo, este tema se puede llegar a tomar en cuenta al momento de poder decir que se tiene un modelo mecánico optimizado lo cual es lo que se pretende hacer en esta segunda fase de diseño. Se debe agregar que la robótica bio-inspirada es una rama que se encuentra actualmente en desarrollo y poder indagar en esta área en la actualidad resulta ser un tema de vanguardia, agregando que además el estudio de la liebre europea es potencial para brindar modelos mecánicos eficientes en cuanto a desplazamiento, podemos decir que este trabajo de investigación tiene gran posibilidad de otorgar un resultado muy útil para el campo de la robótica.

4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar una extremidad robótica bio-inspirada en las patas traseras de los lepóridos con una eficiencia similar a la primera fase y con un menor número de motores.

4.2. Objetivos específicos

- Crear una plataforma modelo para pruebas de desplazamiento de la extremidad robot tal que logre mitigar mejor la pérdida de energía del modelo actual.
- Aplicar un elemento con energía potencial al funcionamiento del mecanismo tal que se logre aprovechar la energía potencial que se pueda generar en el ciclo de funcionamiento.
- Contrastar el rendimiento y la eficiencia del nuevo diseño del mecanismo con el de la primera fase del proyecto con el fin de determinar cuál solución es la mejor.

El poder obtener un modelo más eficiente en cuanto el diseño mecánico respecto a la primera fase de este proyecto, resulta ser una idea un tanto ambiciosa, esto debido a que el autor de la primera fase realizó un gran trabajo en todo aspecto. Sin embargo, se logran apreciar diversos puntos que se pueden mejorar de su diseño por lo cual, se puede decir que con base a los objetivos propuestos, se pretende tener un alcance tal que se logren los siguientes puntos: [1].

- Diseñar un modelo mecánico capaz de realizar el proceso de salto utilizando un solo actuador o efector a como lo vienen siendo motores DC similares a los utilizados en la primera fase.
- Utilizar un elemento que pueda almacenar energía potencial con el objetivo de poder aprovechar la misma para aplicar al efecto de salto del mecanismo.
- Utilizar diversos materiales para la realización del mecanismo, justificando su uso en beneficio de obtener un modelo mecánico funcional.
- Realizar iteraciones en el proceso de diseño de base de pruebas tal que, se obtenga un modelo con menos efectos de fricción que el modelo propuesto en la primera fase.

6.1. Robótica bio-inspirada

Los robots bio-inspirados son de manera general, robots basados en animales mientras la forma de comportarse se inspira en la naturaleza. En la actualidad son trabajos de laboratorios aun en fases experimentales. Ejemplo de ellos pueden ser un robot inspirado en serpientes el cual logra producir ciertos patrones o movimientos gracias a que está construido a partir de módulos conectados en serie los cuales trabajan en conjunto para realizar las acciones mencionadas, así como un robot el cual puede desenvolverse en terrenos arenosos, este esta bio-inspirado en lagartos del desierto.

Ejemplos de robots más representativos de esta rama pueden el famoso BigDog el cual es un cuadrúpedo construido por la empresa Boston Dynamics, su objetivo principal es poder transportar cargas a grupos de infantería para el ejército de los Estados Unidos. Este es capaz de moverse en cualquier tipo de terreno manteniendo su estabilidad.

[2] [3]

6.2. Teoría física

6.2.1. Energía cinética

Se refiere a la energía de una partícula equivalente al trabajo que se requiere para acelerar esta desde una posición de reposa hasta una rapidez denominada v , además es equivalente al trabajo que dicha partícula puede realizar cuando esta se detiene.

$$K = (1/2)mv^2 \tag{1}$$

Donde:

- m es la masa de la partícula.
- v es la rapidez de la partícula.

[4]

6.2.2. Energía potencial gravitacional

Se refiere a la energía de posición dada la altura a la cual se muestra un cuerpo respecto a un plano referencial.

[5]

La energía potencial gravitatoria está definida como :

$$U = mgh \quad (2)$$

Donde:

- m es la masa del objeto
- g es la gravedad.
- h es la altura.

[6]

6.2.3. Energía potencial elástica en resortes

A la energía potencial de un resorte se le denomina energía potencial elástica.

La energía potencial es de gran importancia en lo que son movimientos mecánicos. La energía potencial que se almacena en un resorte está definida como:

$$Pe = (1/2)kx^2 \quad (3)$$

Donde:

- k es una constante que generalmente se puede llamar como constante de fuerza del resorte.
- x es la deformación del elemento.

Para definir una fuerza que ejerce un resorte alargado o comprimido se puede utilizar lo que es la ley de Hooke: Esta nos brinda la siguiente ecuación:

$$Fr = Kx \quad (4)$$

[7]

6.3. La liebre europea

Las dimensiones de estas liebres pueden llegar a estar entre los 50 a 75 cm y su peso puede variar entre 2.5 a 8 kg. [8]

Logran desplazarse más que perros y caballos debido a sus extremidades inferiores las cuales son más largas que sus patas superiores, es más eficiente en desplazamientos cuesta arriba que cuesta abajo y su desplazamiento en zigzag ayuda a poder escapar de depredadores. [9]

6.4. Conceptos mecánicos

Este apartado define ciertos conceptos que ayudan a entender o comprender explicaciones relacionadas a mecanismos y funcionalidad.

6.4.1. Grados de libertad

En sistemas mecánicos se define como números de mediciones independientes que se necesitan para declarar de una forma específica la posición en el espacio de los mismos, en cualquier momento de tiempo. [10]

6.4.2. Eslabón

Se define eslabón como un cuerpo rígido que contiene como mínimo 2 nodos, eslabones con dos nodos se definen como eslabones binarios, eslabones con tres nodos se definen como eslabones ternarios y eslabones con cuatro nodos se definen como eslabones cuaternarios.[10]

6.4.3. Nodo

Se define como puntos de unión entre eslabones.[10]

6.4.4. Junta

Se refiere a la conexión entre por al menos dos eslabones por medio de sus nodos, esto da lugar a que exista movimiento o movimiento potencial en los eslabones relacionados. [10]

6.4.5. Cadena cinemática

Es la conexión entre juntas y eslabones que producen un movimiento controlado a partir de un movimiento ingresado. [10]

6.4.6. Mecanismo

Se refiere a una cadena cinemática la cual, al menos uno de sus eslabones está conectado al sistema de referencia que puede estar en movimiento. [10]

Primera fase de proyecto

Modelo anterior: El modelo final mostrado en la primera fase, mostró un sistema robusto que lograba ser eficiente puesto que, proponía realizar acciones de desplazamiento y amortiguamiento por medio de un mismo conjunto de actuadores que de manera general, fueron 2 motores DC; esto fue posible debido al sistema de control que se aplicó ya que, producir amortiguamiento con motores no es una función práctica o general para dichos elementos, sin embargo el método utilizado resultó ser bastante funcional.

[11]

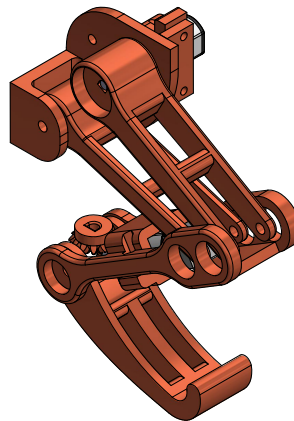


Figura 1: Proyecto primera fase

[1].

Profundizando en el diseño mecánico de dicha fase, se tienen piezas impresas en 3D, estas mostraron un diseño robusto y funcional, basado en un modelo de eslabones que toma

sus relaciones longitudinales a partir de valores promedios de los huesos de las extremidades de la liebre europea. El modelo final estuvo compuesto por el diseño mecánico acompañado con 2 motores DC los cuales, era los actuadores del sistema en sí, también se utilizaron rodamientos y ejes de madera para el movimiento en las juntas del modelo.

Los motores utilizados en la fase anterior contaban con las siguientes características:

- Motor DC de 6 voltios.
- Caja reductora 75:1.
- Encoder acoplado.

La posición de los motores eran tal que, uno de ellos aplicaba torque en la junta con ángulo q_1 (como se puede ver en la Figura # 2), mientras el segundo aplicaba toque por medio de un juego de engranes cónicos a la junta con ángulo q_3 . Su funcionamiento es tal, que logra producir saltos de manera constante, esto lo hace al accionar ambos motores de manera consecutiva, es decir primero se acciona el motor superior y este al rotar cierta cantidad de tiempo, el segundo motor debe ser accionado, dando como resultado el efecto del salto. El controlador del proyecto fue producido por medio de un dspic, el cual se encargaba de la fase de control del amortiguamiento y del accionar del efecto de salto (accionando ambos motores), este chip se lograba conectar a una computadora por medio de un módulo FTDI232, tal que transmite la información del comportamiento de los motores a el software labVIEW tal que, esta herramienta virtual lograba graficar las rotaciones de los motores, siendo estas variables, la referencias para determinar el buen comportamiento del controlador, analizando el amortiguamiento del sistema.[1].

El dspic utilizado producía el accionar de los motores por medio de un controlador, este convertía señales PWM a corriente para que el motor se lograra manipular a fin de producir el efecto deseado.

De manera general, se puede decir que el proyecto logró un alcance significativo y mejorar su eficiencia mecánica es buen punto para realizar en esta segunda fase.

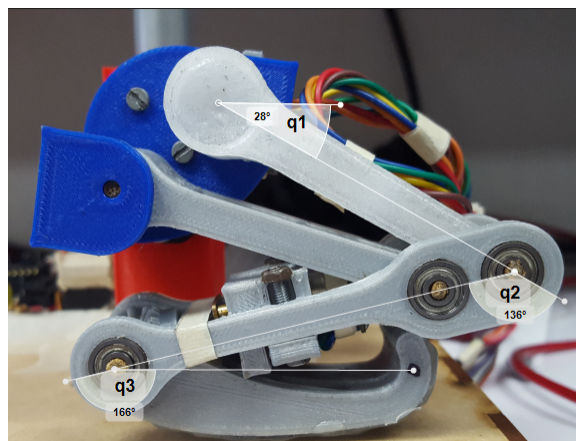


Figura 2: Diseño mecánico primera fase

8.1. Primeros prototipos

8.1.1. Prototipo número uno

El proceso de diseño requiere de ciertas pautas para que este, de manera ordenada, logre el resultado objetivo; para este caso se utilizó un proceso iterativo produciendo un aproximado de 8 modelos en los cuales, se modificaba el diseño en base a los errores o defectos que se producían en las anteriores versiones, concluyendo con una potencialmente funcional.

Hablar del primer modelo implica indagar en como se diseñó, se dio prioridad a lo que es tal vez la parte más importante en diseño de este mecanismo, a esto nos referimos con lo que es sistema de eslabones, se pensó en iniciar desde cero con este punto sin embargo, se conocía el alcance que obtuvo el resultado del modelo concluido en la primera fase, razón por la cual, se analizó el mismo, para ello nos dirigimos a la documentación realizada en la tesis respectiva, en la cual, logramos observar que se logró obtener documentación sobre las longitudes promedio de las extremidades de la liebre europea. Tener documentación sobre dimensiones físicas de la especie de la cual se esta estudiando resulta ventajoso para replicar un sistema de eslabones acorde a lo que se pretende realizar.

Las dimensiones del modelo final de la primera fase presentaron una variación en sus dimensiones, es decir, la relación de estas respecto a las de una liebre promedio se ven reducidas, razón por la que se investigó la razón del porqué el autor de dicho fase trabajó con un modelo reducido, concluyendo que, los motores obtenidos y utilizados no son de alto torque y no cuentan con la capacidad de mover un modelo con relación 1:1, tal que se redujo el sistema para así poder tener un modelo funcional con los actuadores que se tenían a disposición.

Siguiendo con el sistema de eslabones, se analizaron las dimensiones del modelo actual y se concluyó que para fines prácticos se continuaría utilizando las mismas de la primera fase, aunque se procedería a realizar cambios diversos en las dimensiones de algunos eslabones para determinar si estas, pueden mejorar la eficiencia del modelo en sí. Tomando el modelo de eslabones de la primera fase, se diseñó un modelo mecánico sencillo tal que, se utilizara con un actuador potencial, es decir, un resorte o un componente tal que colabore para producir el efecto de salto (y así poder eliminar uno de los dos actuadores).

Dadas las dimensiones del mecanismo, resulta complicado obtener resortes de tal dimensión, por lo que de manera práctica, se utilizaron polímeros elásticos, a lo que viene siendo comúnmente hablando un hule, el modelo se diseñó para ser cortado en MDF de 3.2 mm de espesor por medio de una cortadora láser. El proceso de construcción requirió de aproximadamente 1 hora, aquí se enfatiza que la razón por la cual se trabaja con MDF es la rapidez con la que se pueden manufacturar piezas sin embargo, a futuro esto resulta ser impráctico si el ensamble de los modelos se complica a tal punto de requerir más tiempo.

El resultado del primer prototipo diseñado con MDF resultó ser bastante interesante pues, aplicarle una fuerza vertical en la parte superior del mismo, producía que el modelo lograra dar un salto fácilmente observable. Se debe aclarar que en este punto, el modelo no contaba con un motor y tan solo tenía agregado el polímero elástico a dos puntos clave del modelo tal que, ayudara a producir el comportamiento deseado.

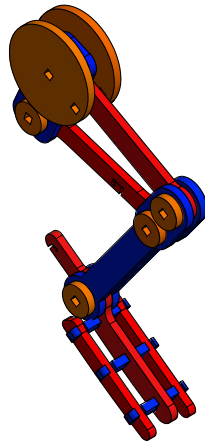


Figura 3: Prototipo uno

8.1.2. Prototipo número dos

El prototipo número uno se estuvo probando en el transcurso de un día, tras concluir el mismo, se logró observar que el modelo falló a flexión en el último eslabón, también surgió que uno de los eslabones que sostienen nuestro polímero elástico no soportó la fuerza que aplicaba dicho elemento sobre tal pieza, arruinando por completo el funcionamiento del modelo. Sin embargo, estas observaciones dieron lugar a realizar una segunda iteración en la cual, no solo se repararon los errores descritos sino que además, se diseñó para montar el modelo a la base de pruebas que se dejó en la primera fase de este proyecto, la misma era el resultado de diversas iteraciones realizadas.

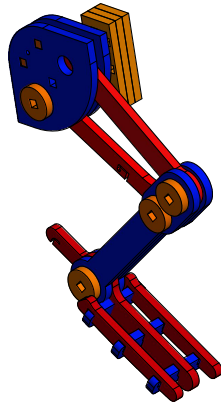


Figura 4: Prototipo dos

Cabe destacar que desde un inicio, el diseño de esta segunda fase fue pensado para que se lograra desenvolver con tan solo un motor y un actuador de energía potencial, la razón principal a ello, radica a que se busca obtener un modelo mecánico más eficiente en cuanto a consumo energético que la primera fase de este proyecto, por ello es que se pretende eliminar un actuador por fines de simplicidad y eficiencia, y de forma potencial, solventar la funcionalidad de este actuador con un elemento más sencillo.

Además, se debe destacar que un motor menos implica menos variables a encontrar al momento de querer aplicar un sistemas de control a dicho diseño. Sabemos que aplicar un sistema de control no es parte de nuestros objetivos pero, las características de esta versión facilitan aplicar control en versiones futuras.

No se lograron obtener resultados positivos tras poner en funcionalidad nuestra segunda iteración, problemas de estancamiento e incompatibilidad con la base de pruebas fueron parte las observaciones de nuestra experimentación .

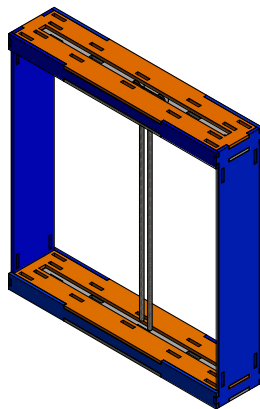


Figura 5: Base de pruebas

8.1.3. Prototipo número tres

Continuando con la descripción de las iteraciones, se modificó la primera extremidad tal que se solventaran los errores descritos y se logrará acoplar a la plataforma, así como poder tener lugar para acoplar un motor tal que este logre producir el efecto de salto en el diseño, para ello se propuso utilizar la misma ubicación para el motor que en la fase uno de este proyecto. El resultado de esta nueva iteración, mostró un modelo más robusto, sin embargo, el acople a la plataforma de pruebas no era del todo funcional, pues tendió mucho a desprenderse con facilidad por lo cual se tuvo que realizar una tercera iteración en la cual se aprovechó para realizar una modificación en el último eslabón del sistema, esta modificación consistió en extender un eslabón extra, esta idea surge de observar que efectivamente la liebre europea cuenta con esta anatomía, es decir, cuenta con lo que es un grado más de libertad, esto se extiende a lo que son sus dedos o el relativo a los huesos descritos como falanges en el ser humano.

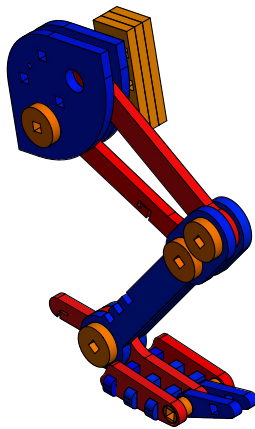


Figura 6: Prototipo tres

El resultado de esta iteración dio como resultado un modelo que visualmente presenta ser mucho más robusto que la segunda versión, en cuanto a funcionalidad se logró montar en la base de pruebas, pero aun mostraba dificultades para acoplarse correctamente. Tras esto se puede decir que la realización de pruebas de salto de la extremidad era posible, sin embargo, no se contaba con hardware para realizar las mismas, tan solo se contaba con el circuito de la primera fase.

8.1.4. Hardware utilizado

El inconveniente que mostraba la circuitería de la primera fase para acoplar al sistema actual era que estaba diseñada para un sistema que involucra dos motores para producir el movimiento deseado, agregando que funcionaba con un sistema de control (el cual es incompatible con nuestro modelo).

Se buscó una forma factible y práctica para poder mover los prototipos diseñados, razón por la cual, se pensó en utilizar un circuito sencillo, este consistió en utilizar lo que son dos relés los cuales serían activados por un Arduino UNO, tal que se lograra manipular lo que

son tiempos de accionamiento y sentido de giro del motor lo cual producía en resumen, el proceso de estiramiento y contracción del modelo . La lógica del circuito fue conectar la entrada y salida del motor a los puntos comunes de dos de los relés descritos, los relés tienen una conexión a la cual, normalmente se mantiene conectada la entrada de estos, y al ser activado estos componentes, esta conexión se desacopla mientras la otra salida ahora es la que se encuentra conectada a la entrada, lo que se realizó fue alternar las conexiones del motor por medio de los relés tal que se cambió su sentido de giro, este elemento rotatorio fue alimentado con 8.5 voltios a pesar que de manera práctica, este opera con 6 voltios, pero dado que el autor de la fase anterior trabajó con voltajes por arriba del normal para producir su desplazamiento vertical sin llegar a dañar los motores, resultó práctico aplicar dicho voltaje.

Existió un inconveniente, este era que de manera predeterminada un estado del relé siempre estaría accionado, la solución fue agregar un tercer relé tal que desacople la tierra del motor y solamente cuando dicho relé se activara, el motor podría funcionar sin importar el estado en el cual se encuentra, la lógica se logró hacer por medio de un programa sencillo en Arduino (ver anexos). El modo en como se accionaba el circuito era simplemente mandando una letra o símbolo cualquiera en la terminal de la consola de programación, al ser enviado el símbolo, producía un pequeño ciclo, este consistía en extender la extremidad y posteriormente, tras un corto tiempo, contraerla; para ello se utilizaron tiempos de accionamiento de 350 ms y 200 ms respectivamente, la diferencia de tiempos es debido a que la contracción de la extremidad no requiere de tanto tiempo ya que su mismo peso colabora para que este efecto se realice inclusive de forma natural. Los relés fueron accionados por medio de tres salidas digitales del Arduino utilizado, para producir el cambio de estado de cada uno de los relés se utilizó un circuito sencillo, este estaba compuesto por lo que es un transistor 2n3904, una resistencia de 10 kiloohmios conectado a la base de mismo, el colector de este transistor habilitaba la tierra o retorno del inductor interno del relé por medio del emisor de dicho componente el cual, esta conectado a tierra, además de ello se agrega un diodo de silicio 1n4001 paralelo al inductor de los relés utilizados, esto para cuidar al Arduino de los defectos de retorno de corriente de los inductores al ser desconectados; todo esto se puede apreciar mejor en el circuito de la Figura # 7 .

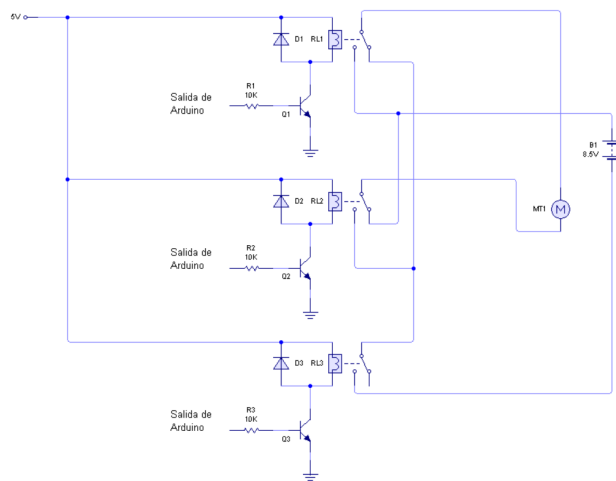


Figura 7: Circuito para controlar extremidad

El circuito logró ser efectivo para el propósito que se tenía en ese momento, pues efectivamente pudo accionar el motor utilizado en ambos sentidos.

A este punto, fue la primera vez que se pudo realizar una prueba de la nueva extremidad utilizando un hardware sencillo, pero funcional.

8.1.5. Experimentación con prototipo número tres

El resultado de la prueba con el prototipo número tres, fue que el modelo no era funcional, principalmente por que la posición natural de la extremidad con el polímero elástico no era correcta, pues se sostenía sobre el suelo con el último eslabón utilizado (relativo a sostenerse con las puntas de los dedos y no con el pie) lo cual es impráctico. Al accionar el modelo no logró estirarse ni contraerse.

Otro defecto observado fue que diversas piezas que componen el tercer eslabón del sistema no lograron acoplarse correctamente por errores de aproximadamente 3 mm.

Todo lo anterior, indica que se debía modificar varios puntos del diseño.

8.1.6. Prototipo número cuatro

Los defectos del tercer prototipo dieron lugar a realizar uno nuevo para evitar dichos problemas, para ello se agregó una pieza cerca de la junta que conecta el segundo eslabón con el tercero (equivalente al pie), con ello se pretendía limitar el giro del tercer eslabón tal que el prototipo se mantuviera en una posición más natural similar a una extremidad de liebre. También se realizó una pequeña modificación en las piezas superiores, con este cambio finalmente se pudo acoplar correctamente el modelo a la base de pruebas.

También, se modificaron las piezas que componían el último eslabón del sistema limitado su movimiento de ta forma, que nunca se posicione con el tercer eslabón de forma lineal y así, evitar uno de los problemas descritos en el prototipo tres.

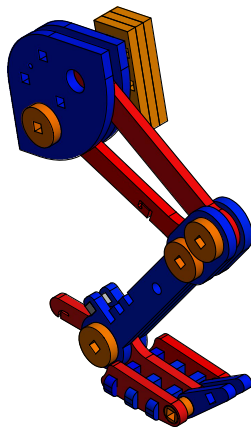


Figura 8: Prototipo cuatro

Realizar pruebas con este modelo mostró grandes avances en comparación a las versiones anteriores, puesto que ya fue práctico poner la extremidad en la base de pruebas de forma correcta, además de ello, ya se lograba accionar el motor tal que producía un movimiento en el modelo mecánico, sin embargo, esto era solamente posible al momento que este no se encontrara acoplado con el polímero elástico, ya que dicho elemento producía mucha resistencia al movimiento del mecanismo y el motor utilizado no contaba con el torque necesario.

Tras realizar diversas pruebas, se logró observar un gran inconveniente, la pieza que conecta el motor con el sistema se desgastaba fácilmente dando lugar a que el motor gire sin poder aportar torque al sistema pues, este giraba libremente dentro de la pieza dañada.

8.1.7. Prototipo número cinco

Todo lo anterior dio lugar a realizar un quinto prototipo, este se realizó con el objetivo de solventar el error del acople del motor con el mecanismo, y de igual forma tratar de aplicar la energía potencial de nuestro polímero elástico superando la anterior versión; para ello se intentó cambiar de posición el acople del mismo, esto se realizó creando una pequeña pieza que no solo cumple con el papel de limitar el giro del tercer eslabón dado el error visto en el prototipo tres, sino que también nos sirve para acoplar nuestro componente de energía potencial de modo que deje funcionar al motor sin que este último logre estancarse por falta de torque.

Con esta pequeña modificación el eslabón número tres podría aportar energía para producir el salto deseado, sin embargo, tras realizar pruebas, sucedió que el modelo tenía una funcionalidad en cuanto al movimiento de estiramiento y contracción bastante correcta, pero persistía el defecto de falta de torque. A este punto resulta más que obvio que el actuador de 6 voltios es un obstáculo para continuar con el proceso iterativo; sin embargo, el propósito de realizar estas iteraciones es mejorar el diseño mecánico, y está de más decir que el motor debía persistir para que de esta forma se logre ver si hay una mejora mecánica al llegar a obtener el objetivo de mover nuestra extremidad en los siguientes diseños.

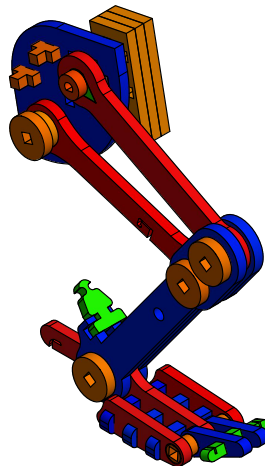


Figura 9: Prototipo cinco

La solución para el problema del eje gastado fue realizar piezas de PLA en forma de "gota de agua", que sean las encargadas de recibir el torque del motor y acoplarlo al eslabón principal el cual se modificó para este fin, esto se puede ver en la Figura # 10.

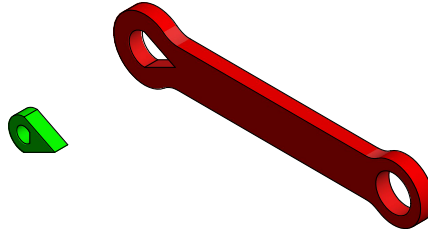


Figura 10: Solución al problema del eje

8.1.8. Prototipo número seis

Tras observar los errores del prototipo anterior, se cuestionó si el motor era capaz de producir el desplazamiento de la extremidad desde el suelo, para analizar esto se procedió a eliminar el elemento potencial de la extremidad para no tener una precarga que afecte al motor directamente, y luego de ello se modificó el modelo para que el mecanismo fuese de un solo grado de libertad relativo al accionar del actuador. Para la conversión del modelo a un mecanismo de un solo grado de libertad bastó con agregar un eslabón extra, esta modificación se puede apreciar más en la Figura # 11. Todo lo anterior se realizó con el objetivo de verificar si el actuador es capaz de accionar el mecanismo desde el suelo.

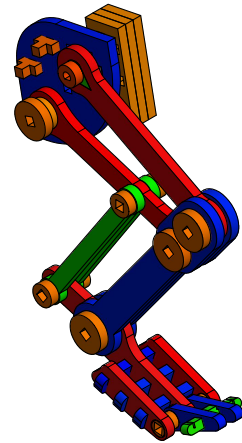


Figura 11: Prototipo seis

Tras terminar la construcción del reciente modelo, se procedió a realizar pruebas, los resultados mostraron un modelo que se logra extender y contraer fácilmente; sin embargo,

al ponerlo a prueba desde un estado contraído (es decir sobre el suelo), no se logró levantar debido a la inercia que se debe romper para salir de ese estado.

Este modelo nos enseñó, que efectivamente el motor utilizado no nos da suficiente torque para mover el prototipo número seis de manera eficiente.

8.1.9. Reduciendo peso de prototipo seis

Lógicamente un factor de suma importancia para que el sistema logre realizar el movimiento deseado es el peso en sí del sistema, poder volver el modelo del prototipo número seis más liviano resultó relativamente sencillo eliminando piezas que no son completamente necesarias, y para el objetivo actual, se eliminaron un total de 7 piezas tal que el modelo resultó poco estable, pero lo suficientemente funcional para realizar pruebas, el resultado obtenido fue similar al caso anterior por lo cual se procedió a pensar en una forma de eliminar más peso del sistema.

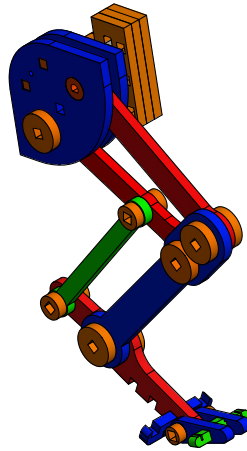


Figura 12: Prototipo seis simplificado

8.1.10. Eliminado peso del resto del mecanismo

Dado que aún no se logró que el mecanismo logre el objetivo de despegar desde su posición inicial, se procedió a seguir eliminando peso, esto se hizo reduciendo el volumen de diversas piezas que componen el acople del mecanismo a la base de pruebas.

Se lograron simplificar diversas piezas, y al finalizar el proceso de construcción se realizaron diversas pruebas, los resultados fueron poco funcionales en un inicio, sin embargo se realizó algo diferente a lo que se había intentado hasta el momento, se accionó el mecanismo desde cierta altura tal que la extremidad al no tener que romper la inercia del mecanismo en el suelo, esta pudiera desplazarse con más facilidad, el resultado terminó siendo muy satisfactorio pues, se logró dar 4 saltos o ciclos consecutivos previo a que el modelo se mantuviera casi inerte en el suelo.

El resultado de la experimentación nos indica que el modelo pudo ser funcional al estar este en movimiento constante, y esto se logró con un solo motor y sin el polímero elástico.

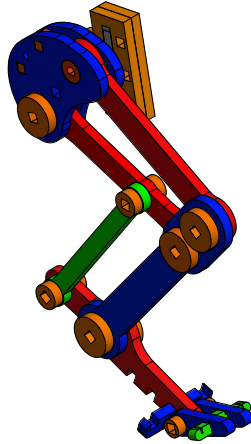


Figura 13: Prototipo seis simplificado con menos peso en acople



Figura 14: Extremidad realizando cuatro saltos previo a caer

Aplicar de manera inteligente el elemento de energía potencial podría ayudar a que el movimiento no termine en solamente cuatro saltos, continuar el proceso de reducir peso resulta lógico para que el motor logre hacer salir del estado estacionario a la extremidad cuando esta se encuentra en el suelo. Los anteriores procesos son de gran interés para seguir iterando con modelos más ideales hasta obtener uno funcional.

9.1. Rediseño para obtención de un modelo liviano

Sabiendo que el modelo 6.2 mostró resultados bastante potenciales, realizar más prototipos que se basen en este parece ser una idea lógica, se sabe que el peso de este modelo fuera de la base de pruebas y sin el motor acoplado es de 18 ± 1 gramos y que el peso del motor con la caja reductora es de 9 ± 1 gramos, la suma de ambos es de 27 ± 2 gramos, realizar un modelo robusto que pueda pesar menos que esto parece ser difícil más no imposible.

Peso de elementos de mecanismo de segunda fase prototipo en MDF	
Elemento	Peso<g>
Modelo en mdf	18 ± 1
Motor	9 ± 1
Total	27 ± 2

Cuadro 1: Pesos de elementos de mecanismo de segunda fase prototipo en MDF

Es interesante ver como el modelo de la primera fase resultó funcional a pesar de su gran peso, este utilizó rodamientos de 10 milímetros de diámetro externo con un peso unitario de 1.54 ± 0.01 gramos, esto multiplicado por la cantidad de cojinetes (5) utilizados da un peso de 7.70 ± 0.05 gramos. Agreguemos que utilizó 2 motores de 9 ± 1 gramos, finalmente incluyamos el peso del modelo impreso en 3D así como elementos extras que la componen, en total nos da un peso (medido) de 74.22 ± 0.01 gramos, un peso considerable para los resultados obtenidos en la primera fase versus lo que se ha logrado en la fase actual.

Se habla más sobre el peso del modelo final en la primera sección del Capítulo # 10, tomando la referencia de la Figura # 18 de este documento.

Peso de elementos de modelo primera fase	
Elemento	Peso<g>
Cojinetes	7.7+/- 0.05
Motor 1	9+/-1
Motor 2	9+/-1
Mecanismos y extras	48+/-1
Total (Medido)	74.22 +/-0.01

Cuadro 2: Pesos de elementos de mecanismo de primera fase



Figura 15: Peso de modelo final de primera fase

Para mitigar la falta de torque por parte del segundo motor que se excluye del diseño original del autor de la fase 1, se procedió a utilizar primero que nada cojinetes de menor diámetro, esto con el objetivo de obtener elementos más livianos. Se lograron obtener rodamientos de 8 milímetros de diámetro externo que tienen un peso unitario de 0.81 ± 0.01 gramos. Se puede agregar que a pesar de que se tiene menos torque para el nuevo modelo, también se tiene menos peso en el mecanismo al descontar el del actuador removido.

Empezar a rediseñar un prototipo como lo es la versión 6.2 parece ser relativamente fácil si vemos la evolución desde modelos anteriores, sin embargo, se desea crear un diseño que no tenga las imperfecciones que se observaron en el mismo, ejemplo de ellos es que existía mucho juego en las juntas del mecanismo lo que producía que este no funcionara con total libertad dada la resistencia al movimiento que causaba este defecto. Para mitigar esto, se empezó a diseñar piezas que en las juntas del mecanismo se acoplen tal que, se tengan dos puntos de contacto entre en las juntas, y no solamente uno como se tenían en la versión 6.2, de esta forma las juntas serían más estables eliminando el defecto mencionado.

Las primeras piezas creadas se fueron diseñando acorde a un diseño similar al prototipo 6 sin embargo, se pensó en último momento que tener el diseño de esa forma producía tener una cantidad de cojinetes similar a la que se utilizó en el modelo anterior de la fase 1, lo cual no aporta mejora en el diseño destacando el peso de dichos elementos, por ello se rediseño el modelo tal que se utilicen poco más de la mitad de rodamientos que los vistos en la primera fase, además se pensó como reducir mas el peso modificando otros aspectos, ejemplo de este rediseño se puede ver en la Figura # 16 y Figura # 17, ambas piezas cumplen el mismo

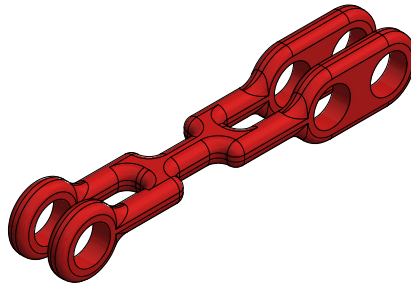


Figura 16: Eslabón diseñado para impresión en 3D previo a rediseño



Figura 17: Eslabón rediseñado para evitar el uso de más rodamientos

papel dentro del nuevo modelo en 3D, pero la ultima tiene menor volumen y usa menos cojinetes.

9.1.1. Ventajas del modelo 3D

Según los resultados vistos en la versión 6.2, se logró obtener un modelo potencialmente funcional siendo el factor del peso parte de aquello que impide llegar a uno de nuestros objetivos. Dado que piezas impresas en PLA pueden llegar a ser más livianas que piezas con MDF, se procedió a crear un diseño que sea lo más parecido al modelo descrito tal que, este tenga ciertas variaciones que sean ventajosas e imposibles de realizar con piezas bidimensionales de 3mm de grosor como se ha trabajado hasta el momento. Dichas ventajas van desde lo que son piezas más complejas al punto de suplir el trabajo de dos en modelos anteriores, hasta poder crear curvaturas en diversas secciones que resultan más funcionales como lo puede ser la pieza inferior de nuestro modelo la cual, choca con el suelo; tener este tipo de geometrías hace que el desplazamiento y amortiguamiento del modelo sea más funcional que los prototipos anteriores.

9.1.2. Diseño de extremidad en 3D

Tomando en consideración los diversos puntos vistos anteriormente, se procedió a diseñar un modelo con los objetivos principales de utilizar piezas construidas a partir de impresión en 3D. Se logró una nueva versión utilizando un polímero como lo es el PLA así como aplicar elementos mecánicos como lo son rodamientos en las juntas, esto último para tener menos fricción que los modelos realizados con MDF.

Al poder diseñar en tres dimensiones, era posible llegar a pensar diseños más complicados de tal forma que fueran más fácil de ensamblar respecto a los modelos anteriores, esto se puede observar fácilmente al comparar la cantidad de piezas utilizadas para la construcción de los modelos, el prototipo en 3D en conjunto con otras piezas como lo son ejes y rodamientos llegaba a tener una cantidad de hasta 30 piezas mientras el prototipo seis llegaba a tener hasta más de 60.

9.1.3. Impresión de extremidad en 3D

El proceso de creación de la extremidad diseñada en 3D se hizo por medio de una impresora Ultimaker 3, la impresión de las piezas se realizó con una altura de capa de 0.06 mm y con un infill de 20%. la altura de capa seleccionada se debe a que diversas piezas requerían de un gran detalle pues de otro modo, se obtenían resultados poco exitosos, un ejemplo de ello es el eslabón que hace el papel del pie de la extremidad, este tiene una forma muy irregular y por ello es necesario tener ese ajuste en la impresora para así obtener resultados más apegados al modelo diseñado, otro ejemplo de la necesidad de altura de capa fina es que otros eslabones requerían trabajar con material de soporte y al desprender este de las piezas, las mismas llegaban a romperse o quedar flexibles dado el poco detalle de la impresión, en pocas palabras inservibles. Se realizaron un aproximado de 5 procesos de impresión para por primera vez tener la extremidad terminada en impresión 3D, cada tanda duró entre 4 y 7 horas dado el gran detalle de las piezas.

10.1. Construcción de diseño 3D

El proceso de construcción de la extremidad impresa no requirió de mayor tiempo o trabajo en comparación a la construcción de los modelos cortados con MDF.

El proceso consistió en insertar a presión los cojinetes de 8 milímetros de diámetro y ensamblar los diversos eslabones por medio de ejes, que de manera práctica, se utilizaron tornillos de rosca fina de 3 mm de diámetro con su respectiva tuerca. Al terminar de ensamblar el diseño se mostraron algunos errores como lo son la pieza que acopla el motor al diseño pues, el motor quedaba con mucho juego mientras el eslabón que se acopla al motor tenía el defecto que no se insertaba correctamente al eje de la caja reductora. Tras mitigar los errores descritos a partir del rediseño y reimpresión de las piezas defectuosas, se obtuvo por primera vez el primer modelo impreso en 3D ensamblado de la extremidad.

Este diseño al tener desacoplado el motor, se notaba con gran facilidad que contenía menos fricción que los modelos de MDF; sin embargo, este también al extenderse tendía mucho a tambalear o perder firmeza en el movimiento debido a la existencia de cierto juego en las juntas; sin embargo se agregaron pequeñas roldanas impresas en 3D en ambas caras de los rodamientos que mitigaron este defecto casi por completo, lo suficiente para sentir más suave y libre el estiramiento y contracción del modelo.

La siguiente imagen muestra el peso total del modelo impreso en 3D, en conjunto con el motor y elementos extras que lo componen, esto con el objetivo de comparar pesos con el prototipo 6.2. El peso que se muestra es de 34.69 ± 0.01 gramos, esto nos dice que superamos el peso del prototipo 6.2; sin embargo la forma como se diseñó este modelo 3D así como utilizar rodamientos y roldanas nos dan cierta ventaja respecto al modelo en MDF. En comparación con el peso del modelo de Chiroy en la Figura # 15 de la primera sección del

capítulo 9, podemos ver que se redujo el peso en más del 50 % lo cual debía ser indirectamente un objetivo mínimo tomando en consideración, que se tiene solamente la mitad de torque respecto a la primera fase para realizar el actuar del modelo mecánico.



Figura 18: Peso de modelo final de segunda fase

10.1.1. Diseño y construcción de piezas de acople

Tras tener terminada la construcción de la extremidad se procedió a adaptar la misma a la base de pruebas que se tenía de la primera fase de este proyecto, para ello se diseñó 2 piezas en 3D que pudieran acoplarse al prototipo y que de igual forma utilizaran 2 rodamientos de 8 milímetros de diámetro, esto con el objetivo que la extremidad se desplace libremente sobre los ejes de la base.

Tras terminar el proceso de manufactura se procedió acoplar las piezas en conjunto con los rodamientos al prototipo terminado. Este acople se puede ver más a detalle en la Figura # 20.



Figura 19: Diseño de prototipo en 3D

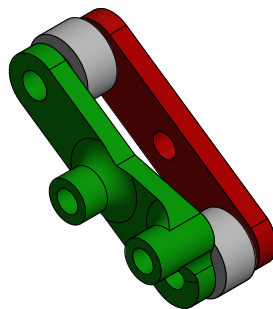


Figura 20: Ensamble de piezas de acoples

11.1. Implementación de elemento con energía potencial elástica

Tras tener concluida la construcción del modelo 3D de la extremidad, se procedió a pensar como acoplar un elemento potencial al modelo, de tal forma que se aprovechara la energía potencial principalmente del peso del motor el cual, es el que se encontraría cambiando de posición vertical constantemente, se enfatiza que es uno de los elementos más pesados del sistema pues solo el motor con la caja reductora llega a pesar aproximadamente 9 gramos, lo cual es relativamente pesado respecto a los eslabones los cuales no superan el peso de 4 gramos cada uno, respecto a los cojinetes, cada uno de ellos tiene un peso de 0.81 gramos y los tornillos con tuerca llegan a pesar aproximadamente 1.8 gramos cada uno. Se conocía de manera general que los intentos anteriores con modelos de MDF resultaron imposibles de levantar del suelo al accionar su respectivo actuador, sin embargo se debe aclarar que en esos casos el elemento potencial actuaba de manera indirecta como un eslabón extra y no como un actuador indirecto para el movimiento del mecanismo, esto nos indicaba que claramente se estaba agregando de manera incorrecta dicho elemento. El funcionamiento del primer prototipo (versión 1) mostraba producir saltos al comprimir el mecanismo con una fuerza mucho mayor a la que seguramente la energía potencial del sistema podría llegar a producir, por lo cual ese modelo así como futuras versiones del mismo no son buenos prototipos para tomar en consideración la posición de un elemento potencial. Tras dejar lo anterior claro, se sabe que la razón principal por la cual se construyó el prototipo 6 fue con el objetivo de determinar si el modelo mecánico era capaz de moverse con el torque del motor utilizado, el resultado indirecto de ello así como las pruebas con las versiones 6.1 y 6.2 fue darse cuenta que el factor peso era uno de los problemas a resolver, a pesar que no se logró salir de la posición inercial se logró observar ciertos factores así como ventajas de dichos modelos.

Se procedió con agregar lo que es un elemento de energía potencial como lo puede ser un resorte de tal forma que el mecanismo al contraerse comprima dicho elemento y al extender la extremidad, liberar la energía almacenada y apoye al mecanismo para extenderse y desplazarse de manera vertical. Se ideó la posibilidad de agregar dicho elemento potencial entre el eslabón que se conecta con el eje del motor y la base que acopla dicho eslabón con el actuador. La idea resulta un poco confusa y poco entendible principalmente porque ello requería que el proceso de compresión del resorte fuera en una dirección con ángulo o en otras palabras, en un desplazamiento angular.

Debido al factor mencionado se procedido a pensar en otra idea puesto que realizar un sistema que ayude a posicionar el resorte en tales condiciones resultaría complicado además, la energía del resorte no iría a favor del movimiento en su totalidad.

Finalmente se pensó en agregar un elemento con energía potencial en compresión entre dos juntas características, tal que el desplazamiento del resorte sea más lineal.

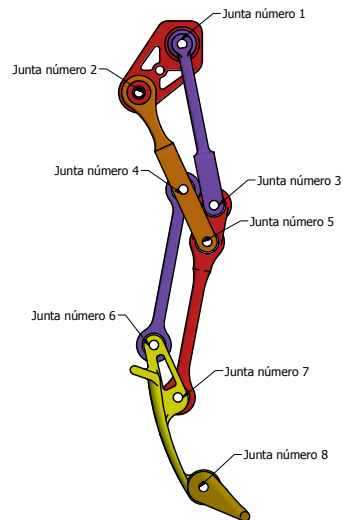


Figura 21: Señalamiento de juntas en mecanismo

Como se puede ver en la Figura # 21 de vista lateral de la extremidad, se tenía pensado utilizar dicho elemento potencial entre la junta número 4 y número 7, al analizar rápidamente esta idea resulta bastante ideal puesto que el fin de ello era producir que se lograra llegar a estirar la extremidad y si se posiciona el elemento potencial entre estas juntas, se produciría que el resorte ayudaría a extender la extremidad durante su movimiento.

La idea planteada resultaba ideal hasta el momento de verificar que esto llevaba consigo la necesidad de tener que realizar un eje que guíe el resorte según la posición relativa entre ambas juntas pues, se puede observar que el estirar o comprimir el prototipo produce que las juntas seleccionadas se desplazaran una de otra de manera lineal, pero con un ángulo variable entre estas durante el movimiento, razón por la cual se requería de alguna clase de eje telescópico para esta aplicación. Rápidamente se llegó a pensar en realizar un eje para tal necesidad sin embargo, se concluyó en eliminar dicha idea pues, ya que producir un

mecanismo con esas necesidades era muy complicado debido a posibles defectos de fricción o estancamiento ya sea por el desplazamiento angular o lineal, dado lo anterior se procedió a pensar en otras ideas. Se logró observar que trabajar con las juntas número 5 y número 6 era igualmente funcional que trabajar con las juntas mencionadas anteriormente, con la diferencia que su forma de trabajar ahora sería con elementos potenciales a tensión y no más en compresión; se llegó a pensar de igual forma en resortes. Esta última idea resultó ser la más acertada para las necesidades de nuestro modelo y la que finalmente se aplicó.

Acoplado prototipo en bases de pruebas

12.1. Experimentación con primera base de pruebas

Tras tener un modelo estable y con un elemento potencial acoplado, se procedió a realizar pruebas en la base de la primera fase, bastó con posicionar la extremidad con sus respectivas piezas de acople a los ejes de la base mencionada. Se llegó a utilizar el mismo método de las versiones en MDF de aplicación de potencia al motor para nuestro modelo 3D.

El resultado mostró que el desplazamiento del mecanismo producía una fuerza par entre los las barras paralelas de la base de pruebas, produciendo que estas se juntaran entre si dando como resultado el estancamiento del mecanismo con las mismas y de esta forma, desperdiciar toda fuerza que lograba realizar el elemento potencial y el motor para estirar la extremidad y producir el efecto de salto que se estaba buscando, esto dio como resultado descartar en totalidad el uso de la base de pruebas de la primera fase ya que, los perfiles circulares de los ejes paralelos con su poca rigidez no eran prácticos para realizar pruebas.

12.2. Diseño de nueva base de pruebas

La base de pruebas actual consiste técnicamente en dos rieles horizontales en los que se desplazan dos patines (cada uno con 4 cojinetes que funcionan como ruedas) que sostienen nuestros ejes verticales con sección circular hueca, en los cuales actúa nuestro mecanismo.

Debido a la poca funcionalidad de la base de pruebas de la primera fase con nuestro modelo mecánico, se procedió a diseñar uno nuevo. Para eliminar el problema de los ejes verticales, se sustituyeron estos con un solo perfil de aluminio tipo " U" de 1/2 pulgada, este perfil es mucho más rígido que los perfiles de la primera fase.

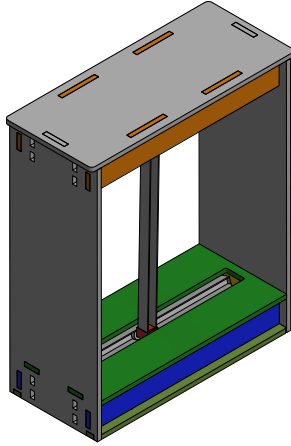


Figura 22: Diseño de plataforma nueva

También se pensó en mitigar efectos de fricción en el desplazamiento horizontal de los ejes de la plataforma, para ello se sustituyeron los rieles de MDF con rieles de aluminio, y se diseñaron y manufacturaron nuevos patines de PLA de tal manera que se lograran ajustar a 4 cojinetes de modo que, los ejes verticales se desplacen solo de manera horizontal(sin que exista juego en su desplazamiento), esto requirió de ajustar los cojinetes con cierto ángulo de inclinación para que de esta forma, el desplazamiento no produzca roce con otras piezas. El nuevo diseño de patín se puede apreciar en la Figura # 23.

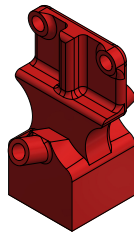


Figura 23: Pieza para acoplar cojinetes a rieles de base de pruebas nueva

Al completar dicha base de pruebas, esta se puso en funcionamiento, los resultados no fueron funcionales, esto debido a que los nuevos patines no encajaba correctamente en los perfiles de aluminio, llegaba a existir muchas posiciones de atascamiento por lo cual se descartó esta idea. Además el acople de la extremidad al eje vertical tampoco mostró funcionalidad ya que existía juego entre ambos elementos (ver Figura # 20).

Debido a las fallas encontrada, se procedió a plantear nuevas ideas sin modificar radicalmente la estructura o forma de las base de pruebas original pues, a pesar de sus defectos tiene gran funcionalidad. El defecto principal encontrado es la selección de materiales, por esto se tomó la idea de reutilizar la idea de los ejes paralelos pero ahora utilizado dos barras de material sólido y no huecos, en cuanto al diseño de los rieles horizontales, se sustituyó el uso de barras de MDF por perfiles de aluminio replicando el mismo diseño, lo cual elimina fricción en el sistema y nos asegura su funcionamiento.

Ensamblar la base de pruebas con las modificaciones mostró gran funcionalidad, se pro-

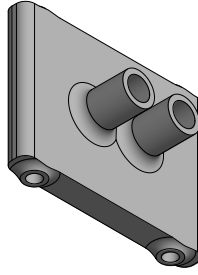


Figura 24: Patín para acoplar cojinetes a rieles horizontales de base de pruebas funcional

dujo poca fricción en el desplazamiento horizontal de los ejes paralelos, y de manera general, la comparación del modelo de la primera fase con el actual, muestra que los cambios realizados efectivamente eliminan defectos de fricción.

12.2.1. Acople de extremidad a base de pruebas nueva

Tras tener una base de pruebas funcional, se procedió a diseñar piezas que acoplen la extremidad a dicha base debido a que la última iteración no fue funcional y además no se puede acoplar a los ejes paralelos ya que, se tenía pensada para el perfil que ya no se utilizó.

Se llegó a pensar en utilizar el acople de la primera fase, sin embargo este tenía peso innecesario comenzando por tener 4 cojinetes de 10 mm de diámetro externo, lo cual se podría remover con un diseño más sencillo. Se debe recalcar que se buscaba mitigar problemas de peso en el sistema razón por la cual, buscar eliminar los rodamientos en dichas piezas es un cambio favorable.

Se procedió a realizar nuevos diseños para los acoples a la base de pruebas, estos se muestran a continuación:

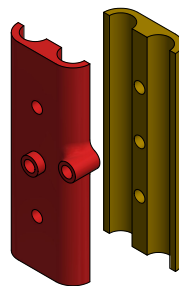


Figura 25: Primera versión de acople de extremidad a base de pruebas

Se realizaron tres iteraciones de nuevos acoples, estas mostraron un gran avance respecto a las versiones anteriores, esto debido principalmente a la reducción de peso en estos nuevos modelos así como la geometría de los mismos.

La primera versión (ver Figura # 25) se acopló a la base de prueba en conjunto con la extremidad, al realizar pruebas de salto, el resultado mostró diversas posiciones de estancamiento descartando así, dicho modelo.

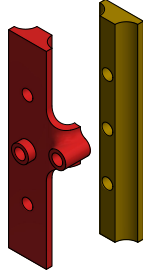


Figura 26: Segunda versión de acople de extremidad a base de pruebas

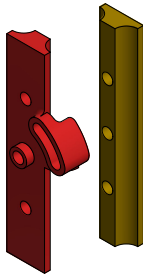


Figura 27: Tercera versión de acople de extremidad a base de pruebas

Se modificó este diseño de modo que no se abrace todo el perfil circular, dando como resultado la segunda versión (ver Figura # 26). Las pruebas con este nuevo modelo mostraron un gran avance dando gran libertad en el desplazamiento de la extremidad, algo que colaboró mucho para esto es que se tienen 3 orificios en ambas piezas los cuales sirven para calibrar la distancia entre ambas a partir de ingresar 3 tornillos de rosca fina.

Dada la funcionalidad de esta versión, se observó que es de gran importancia modificar el ángulo de posición de la extremidad respecto a las piezas descritas, por esto, se procedió a realizar una tercera versión (ver Figura # 27) la cual, toma como base la segunda versión descrita pero se agregó un agujero extendido y prolongado en un ángulo de interés para que se ajuste el ángulo de la extremidad respecto a dicha pieza a partir de un tornillo que se ingresa a presión.

Los resultados de la experimentación de salto con este modelo mostraron gran funcionalidad pues, se lograron observar desplazamientos tanto de forma vertical como horizontal.

En cuanto al elemento con energía potencial elástica, resulta ser importante en el desarrollo y funcionalidad de este proyecto, su importancia radica en que gracias a la energía que almacena, es posible lograr que la extremidad logre desplazarse acorde a los objetivos de este proyecto, profundizando en la razón de ello, podemos plantear la ecuación que define la fuerza que se produce a partir de un elemento con energía potencial elástica estando bajo esfuerzos de tensión, siendo este el caso que nos interesa:

$$F = (1/2)kx^2 \quad (5)$$

Aplicar esto de manera teórica radica de un proceso de experimentación el cual consiste

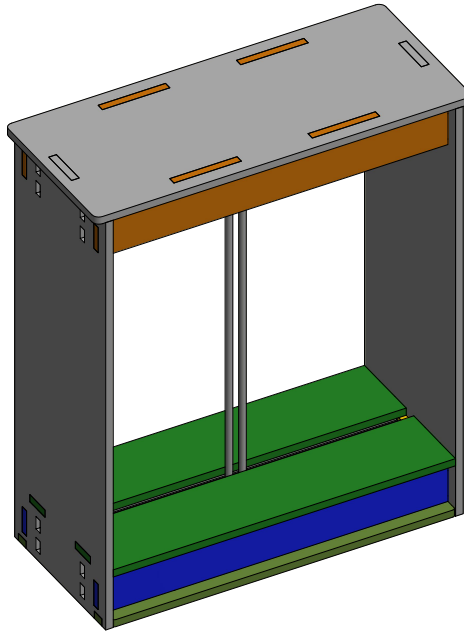


Figura 28: Ensamble de plataforma final

en poder ver que tanto se deforma nuestro elemento potencial al estar este sometido a diferentes magnitudes de fuerza reconocibles, de esta forma se puede medir la deformación de nuestro elemento y tras hacer varias pruebas, conocer un valor de K y así tener cuantificado el efecto de dicho elemento sobre nuestro modelo mecánico experimental.

Durante el diseño del proyecto sucedió que la cantidad de pruebas realizadas para poder llegar a priorizar el reconocimiento de un valor K , resultó pasar a segundo plano desde el momento en el que no se lograba observar ningún resultado de manera empírica de dicho elemento sobre el modelo mecánico, por lo anterior, no se le dio prioridad a cuantificar su efecto sino más bien a reconocer si era o no viable aplicar este elemento a nuestro diseño, tema que se vera más adelante aclarando que dicho conocimiento teórico se plantea más con fines prácticos mas no son directamente parte de los objetivos de dicho proyecto aunque, no se descarta su importancia en el entendimiento o justificación del proyecto.

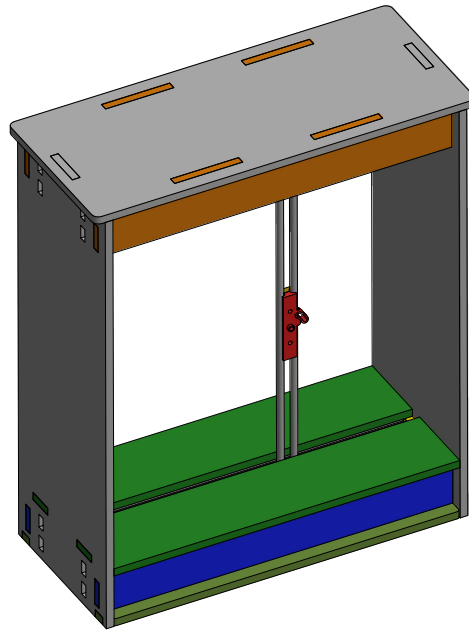


Figura 29: Ensamble de plataforma final con acople

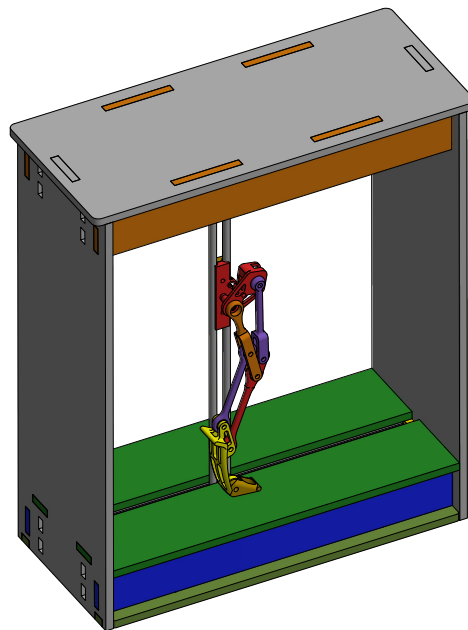


Figura 30: Ensamble de plataforma final con extremidad

13.1. Metodología de experimentación

Empezar a experimentar con el prototipo en una base de pruebas funcional por primera vez, resultó complicado al darse cuenta que parámetros como son los tiempos de accionamiento del motor en ambas direcciones así como el ángulo con el cual está acoplado el prototipo a la base de pruebas, producen resultados con grandes diferencias.

Al iniciar con las pruebas, se debe enfatizar que el eslabón que compone los dedos del diseño mecánico fue finalmente removido ya que no cumplía con el funcionamiento esperado de acoplarse al suelo de manera correcta, dado ello, se procedió a realizar el mismo procedimiento que se realizó en la primera fase de este proyecto, esto implica lo que es aplicar silicona al final de la extremidad, con ello se lograba obtener fricción entre el suelo y el mecanismo, caso contrario la extremidad resbalaba y no producía ningún efecto de salto.

La forma como se realizaron pruebas fue a partir de tomar videos en los cuales, se pondrían a prueba el desplazamiento vertical del prototipo tal y como se hizo en la primera fase, posterior a eso, se tomaron medidas del desplazamiento con la herramienta virtual TRACKER y finalmente se compararían resultados.

Las pruebas que se realizaron fueron las siguientes:

- Producir una contracción de la extremidad para luego extenderla y así producir el efecto de salto deseado, posterior a eso analizar su desplazamiento vertical máximo tomando como referencia la junta número 8. Finalmente comparar resultados con los obtenidos en la primera fase.
- Producir una contracción de la extremidad para luego extenderla y así producir el

efecto de salto deseado a la vez que se contrae nuevamente estando despegada del suelo, posterior a eso analizar su desplazamiento vertical máximo tomando como referencia la junta número 8. Finalmente comparar resultados con los obtenidos en la primera fase.

13.2. Experimentación y resultados

Posicionar la extremidad en un ángulo tal que se produzca un salto lo más vertical posible mostró que se podía desplazar tan solo 5 milímetros del suelo, esto en comparación a las pruebas de la primera fase muestran un alcance porcentual de desplazamiento de 50.46 %. Por otro lado, se obtuvo un 26.84 % del desplazamiento con compresión en el aire.

Lo anterior es debido a la forma en como trabaja la extremidad a partir de energía potencial como sustituto del actuador extra que fue removido.

Podemos ver más detalles de los resultados en el Cuadro # 3, Figura # 31 y Figura # 32 .



Figura 31: Comparación resultados de desplazamiento vertical primera fase vs segunda fase

Respecto al movimiento con desplazamiento horizontal se obtuvo un fenómeno que afecta el análisis del sistema en lo que es la base de pruebas, resulta que esta nueva versión tiene tan poca fricción que sucedieron efectos de desplazamiento debido al momento lineal que resulta del peso de los ejes verticales y la velocidad que le produce la misma extremidad al desplazarse, técnicamente los ejes paralelos desplazan la extremidad más de lo que realmente el prototipo es capaz de realizar por su propia cuenta.

Prototipo	Desplazamiento sin compresión	Desplazamiento con compresión
Primera fase	1.09 cm	9.35 cm
Segunda fase	0.55 cm	2.51 cm
Comparación porcentual	50.46 %	26.84 %

Cuadro 3: Comparación de desplazamiento vertical entre primera y segunda fase

Regresando al análisis vertical, en el Cuadro 3 podemos ver la comparación de ambas fases, se logra apreciar que el modelo de Chiroy produjo números mayores para ambos experimentos; sin embargo ya se habló que en su caso se contaba con el doble de torque

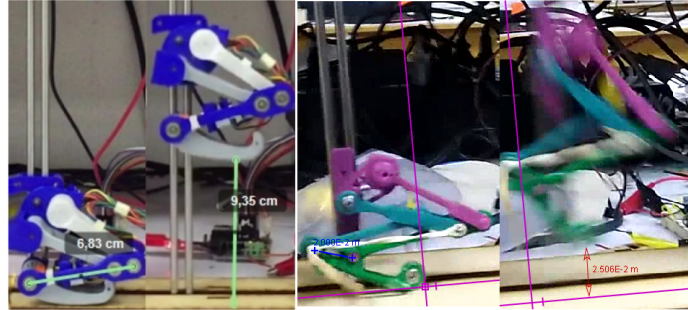


Figura 32: Comparación resultados de desplazamiento vertical con contracción primera fase versus segunda fase

para realizar las pruebas, también se debe aclarar que utilizar un encoder en la segunda fase puede llegar a ayudar a producir mejores resultados ya que se puede tener un mejor control del movimiento del sistema y hacerlo reaccionar respecto a sus rotaciones y de este modo, poder saber en que momento extender o contraer el sistema para producir mejores resultados respecto a la longitud de desplazamiento.

Algo interesante a destacar del funcionamiento del mecanismo en conjunto con el resorte ideal, es que se puede ver claramente en el ciclo de funcionamiento la transformación de energía potencial gravitacional a energía potencial elástica y de esta a energía cinética refiriéndonos al desplazamiento de la extremidad.

Podemos decir que el modelo de Chiroy tuvo mayor longitud de desplazamiento vertical, sin embargo se debe aclarar que tenía más capacidad de torque a la nueva versión, por otro lado podemos decir que el modelo actual es un sistema bastante eficiente pues utiliza energía potencial para producir su desplazamiento, es decir absorbe y reutiliza parte de la energía que se produce al comprimir la extremidad para producir nuevamente el desplazamiento del mecanismo. De manera general podemos decir que ambos modelos tienen sus ventajas y desventajas, todo dependiendo de que es lo que se está buscando, capacidad de desplazamiento o menor consumo energético.

Otro punto a favor del modelo de la primera fase para su desplazamiento vertical, es que el mismo cuenta con dos grados de libertad y con esto, es posible realizar diversas formas de desplazamiento dado que, se pueden tomar efectos de momento a favor del movimiento y con ello, poder salir de estados inerciales de manera más favorable en comparación al modelo nuevo el cual solo tiene un grado de libertad.

Finalmente podemos decir que, si se realizan pruebas con un encoder y un sistema de control así como variaciones de tiempo y ángulo de inclinación con esta última versión, podríamos realizar pruebas con resultados más discretizados según dichos parámetros y mucho más eficientes.

13.3. Experimentación con diferentes cajas reductoras

Tras terminar de analizar las diferencias entre los modelos previamente vistos, se procedió a analizar el diseño en funcionamiento (salto con contracción en el aire) con diferentes cajas

reductoras (y motores de mayor torque que la versión original), lo cual implica diferente fuerza de torque aplicado para el actuar de nuestra extremidad, el proceso previamente mencionado ayuda a poder ver los alcances del modelo mecánico en desplazamiento vertical y horizontal.

Se hicieron pruebas de cinco saltos consecutivos con los siguientes motores:

- Motor con caja 50:1 (mayor torque)
- Motor con caja 75:1 (mayor torque)
- Motor con caja 75:1 (original)
- Motor con caja 100:1(mayor torque)

Se analizó el recorrido de la extremidad con cada uno de los motores descritos así como con el motor original (menor torque caja 75:1) en una tanda de 5 saltos, todos ellos con un voltaje de 8V, esto ultimó no se recomienda en futuros experimentos pues, al final de todas las pruebas el motor original dejó de aportar un torque significativo para el funcionamiento de la extremidad, además mostraba efectos de calentamiento excesivo en su estructura.

Tras analizar los desplazamientos vertical y horizontal de la extremidad a partir de la junta 8 de nuestro mecanismo como punto de control, logramos observar que en el desplazamiento horizontal influye enormemente la caja reductora, siendo la caja 100:1 la que mostró mayor avance por salto, mientras el motor original con caja 75:1 fue el cual mostró menor desplazamiento en las tandas realizadas.

La Figura # 33 muestra datos significativos del desplazamiento horizontal hasta aproximadamente el segundo 2, posterior a este tiempo, la gráfica se comporta como arcos invertidos para la mayoría de los motores analizados, esto se observa así pues, al saltar y topar con el limite de la base de pruebas, la extremidad rebotaba de manera horizontal dando como resultado el efecto observado.

Por otro lado, si analizamos el comportamiento vertical en la Figura # 34, existe cierto pico máximo de desplazamiento en común, aunque curiosamente hay máximos atípicos, como el primero con caja reductora 50:1, estas diferencias las podemos atribuir a que algunos fotogramas de los vídeos analizados no mostraban con claridad la posición de nuestra extremidad debido a la velocidad de desplazamiento de la misma, produciendo complejidades en la toma de algunos datos. Se recomienda contar una cámara con una capacidad de toma de fotogramas por segundo lo suficientemente rápida, para que así no se obtengan estos factores de error.

Siguiendo con el análisis de datos, el patrón muestra que se llega a los 7 cm como mínimo en los motores de alto torque mientras en el motor original tan solo se llega a un máximo de 4 cm. Esto nos indica que el tipo de caja reductora aporta avance de desplazamiento vertical.

Concluyendo con el análisis del desplazamiento horizontal, podemos decir que la fuerza de toque del motor aporta una ventaja significativa pues, el motor original con caja 75:1 no logra superar a ninguno de los otros 3.

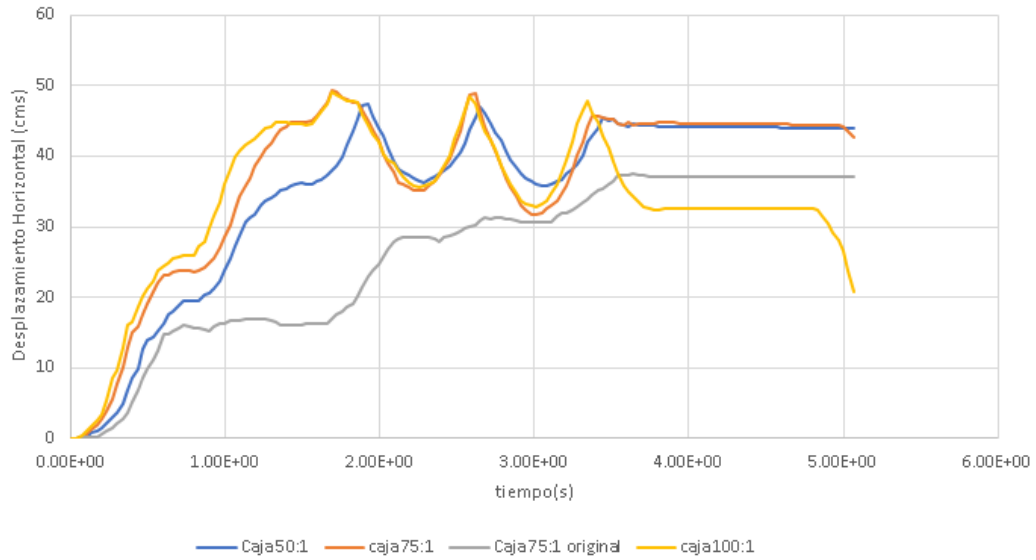


Figura 33: Comparación de desplazamiento horizontal de extremidad con cajas reductoras de diferente relación entrada/salida y motor original

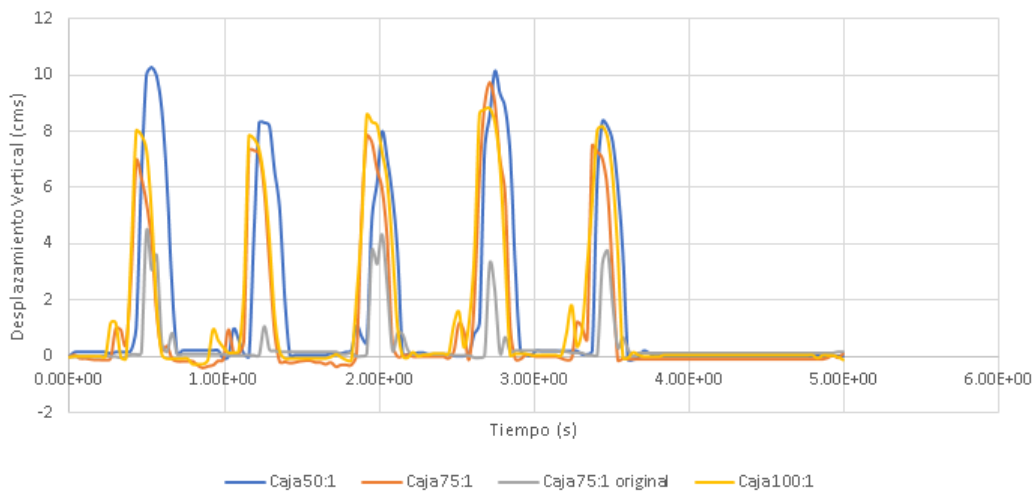


Figura 34: Comparación de desplazamiento vertical de extremidad con cajas reductoras de diferente relación entrada/salida y motor original

Como conclusiones según las diversas pruebas podemos decir lo siguiente:

- Sustituir actuadores por elementos con energía potencial puede llegar a ser una idea factible siempre y cuando se tenga en consideración calibrar dicho componente especialmente con lo que es la longitud del mismo y relacionarlo con el concepto de energía potencial elástica.
- La comparación de desplazamiento vertical de la fase respectiva a este documento respecto a la primera fase, muestran que se logró llegar a el 50.46 % de desplazamiento vertical sin compresión en el aire y a 26.84 % con compresión en el aire, mostrando que el modelo de Chiroy logró mayor desplazamiento vertical.
- El diseño mecánico diseñado en conjunto con el componente de energía potencial es un modelo práctico para poder demostrar la transformación y conservación de energía en las diversas fases de funcionamiento de la extremidad en el momento de realizar un salto o un ciclo de desplazamiento.
- Indagar en reducir factores como peso, fricción y diseño del prototipo de la primera fase resultó funcional para obtener resultados similares en cuanto a comportamiento de desplazamiento a pesar de eliminar un actuador y mitigar su carencia a partir de un elemento que pueda almacenar energía potencial.
- Sustituir materiales como lo es MDF por aluminio en la base de pruebas de la primera fase resultó funcional para mitigar defectos de funcionamiento por efectos de fricción.

Recomendaciones

Como recomendaciones para futuros fases de este proyecto, podemos decir lo siguiente:

- Uno de los defectos más imprevistos en el proyecto fue ver el efecto del momento de los perfiles paralelos sobre la extremidad mecánica. Como punto a tomar en consideración, se sugiere buscar un perfil rígido pero con un peso que en conjunto con los patines que los sujetan no sea mayor al peso de la extremidad, poder utilizar elementos como lo fueron los perfiles que utilizó el ingeniero Chiroy en su primera fase podría llegar a ser útil media vez estos no se llegaran a pandear o sufrir deformaciones ante el accionar de la extremidad.
- Discretizar los parámetros medibles que varían el comportamiento de desplazamiento de la extremidad, para así poder realizar efectos de movimiento específico según dichos factores como lo pueden ser el ángulo de inclinación del mecanismo respecto a la base de pruebas así como, el tiempo de retardo entre compresión y estiramiento.
- Indagar en diseñar el último eslabón de la extremidad (obviando los errores vistos en esta versión) que cumple el papel de los dedos de una liebre pues, puede llegar a mostrar resultados importantes en cuanto al desplazamiento del mecanismo puesto que, se apegaría más a la realidad.
- Tomar en consideración fabricar el elemento de energía potencial tal que se logre tener un modelo más robusto y formal del modelo actual, tal que el comportamiento de la extremidad siempre sea el mismo, caso contrario a utilizar un polímero elástico el cual tiende a variar en longitud así como en la fuerza de tensión debido a diversos factores del ambiente.
- Resultaría funcional agregar al diseño del proyecto algún calibrador de tensión al polímero elástico para que sea de algún modo más controlable el tema de la tensión en dicho elemento, al menos que se proceda a utilizar un resorte como se mencionó anteriormente.

- Finalmente, podemos recomendar no utilizar voltajes por arriba de lo solicitado por los actuadores o motores puesto que, finalizando los experimentos de dicho proyecto, uno de ellos llegó a fallar en cuanto a su funcionamiento, no se llegó a determinar la razón pero el calentamiento debido a este sobre-voltaje puede ser una de las razones principales.

-
- [1] C. Chiroy, «Desarrollo de una extremidad bio-inspirada en las extremidades posteriores de lepóridos con manejo eficiente de energía», Departamento de Ingeniería Mecatrónica y electrónica . Universidad del Valle de Guatemala, 2019.
- [2] A. S. V. Fernández-Pacheco, *Robótica educativa*. RA-MA, 2015.
- [3] C. Natural, *PROCEDIMIENTO: Descripción de LIEBRES (Lepus Europeans)*, http://algebra.com.uy/caltes/pdf/02-Caracteristicas_Liebre.pdf. (visitado 02-08-2019).
- [4] R. A. YOUNG HUGH D. y FREEMAN, *FÍSICA UNIVERSITARIA*, 13.^a ed. México: PEARSON, 2013.
- [5] A. V. José, *Apuntes de Física General*. UNAM, 2005, pág. 381.
- [6] A. T. Paul, *Física preuniversitaria*, 1. Reverté, 1991, vol. 1, pág. 520.
- [7] A. S. Raymond y F. Jerry, *Física*. Pearson Educación, 2001, pág. 936.
- [8] E. E. Mamíferos, *Lepus europaeus: liebre europea*, <https://mamiferos.paradai-sphynx.com/lagomorfos/conejos/lepus-europaeus-liebre-europea.htm>, 2015. (visitado 01-06-2019).
- [9] F. Salomone, *La liebre europea en valles y altiplano de Bolivia*. Bolivia: CIPCA, 2006.
- [10] R. L. Norton, *DISEÑO DE MAQUINARIA Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Mc Graw Hill Education, 2012.
- [11] E. Nahum, P. Carbo, A. Constantin, J. López, E. Martínez, E. Rocha y J. Amparo, *Ingeniería Bioinspirada*. Tamaulipas: OmniaScience, 2014.

17.1. Código

```
//variables
int botonUnoEstado=0;
int incomingByte = 0;

const int releUno=2;
const int releDos=3;
const int releTres=4;

const int tiempoN=10;
const int tiempoExtra=50;
const int tiempoUno=300;
const int tiempoDos=300;

const int botonUno=8;

//inicio de setup
void setup() {
// put your setup code here, to run once:

Serial.begin(9600);

pinMode(releUno,OUTPUT);
pinMode(releDos,OUTPUT);
pinMode(releTres,OUTPUT);
pinMode(botonUno,INPUT);
```

```

}

//inicio de loop
void loop()
{
incomingByte = Serial.read();
botonUnoEstado=digitalRead(botonUno);

//inicio de ciclo
if (Serial.available() > 0)
{
// if(botonUnoEstado==HIGH)
if(incomingByte<=1)
{
for(int x=0;x<3a ;x++)
{
//verificacion de numero de salto
Serial.print(x);

//proceso 1
digitalWrite(releUno,HIGH);
digitalWrite(releDos,HIGH);
digitalWrite(releTres,HIGH);

//proceso 2
delay(tiempoUno);
digitalWrite(releUno,LOW);
delay(tiempoExtra);

//proceso 3
digitalWrite(releDos,LOW);
digitalWrite(releTres,LOW);
digitalWrite(releUno,HIGH);
delay(tiempoDos);
digitalWrite(releUno,LOW);
delay(tiempoN);
}
}
}
}

```

