

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

Proyecto Aplicado de Ingeniería

**Prototipo de Pierna de 3GDL para
Experimentación Cinemática**

Juan David Angarita Moreno
Ángel Esteban Díaz Sarmiento
Sergio Esteban Quintero Benavides
Juan Felipe Romero Sanabria
Duván Mateo Sandoval Camacho
Cristian Mateo Sotelo Sanabria

Presentado a:
Prof. Fernando José Rodriguez Mesa

23 de Marzo de 2021, Bogotá D.C.

Índice

	Página
1 Definición del problema	4
1.1 Planteamiento del problema y subproblemas de diseño	4
1.1.1 Planteamiento del problema	4
1.1.2 Subproblemas de diseño	4
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Cronograma	5
1.4 Marco Teórico	5
1.4.1 Historia de robots cuadrúpedos	5
1.4.2 Modelado dinámico	10
1.4.3 Jacobiano: Velocidad Cinemática	13
1.4.4 Actuadores	17
1.4.5 Algoritmos de control	19
1.4.6 Mecanismos usados en robots cuadrúpedos	22
1.5 Benchmarking	23
1.6 Desarrollo del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) y análisis de resultados obtenidos	26
1.7 Estudio preliminar de factibilidad	28
1.7.1 Estudio de mercado	28
1.7.2 Estudio técnico	28
1.7.3 Estudio legal	28
1.7.4 Estudio de impacto ambiental	29
1.8 Presupuesto inicial estimado	30
2 Diseño Conceptual	31
2.1 Análisis funcional	31
2.2 Mapeo Funcional	31
2.3 Aplicación de TRIZ	33
2.3.1 Técnicas de Creatividad	34
2.3.2 Generación de conceptos	35
2.4 Integración de conceptos	36
2.4.1 Árbol de clasificación	36
2.5 Generación de las alternativas de solución	37
2.6 Evaluación de Alternativas	42
2.7 Descripción del concepto global dominante general	43

3 Generación detallada del producto	43
3.1 Generación diseño mecánico	43
3.1.1 Procedimiento de diseño	43
3.1.2 Selección de componentes normalizados	44
3.1.3 Selección de materiales y técnicas de producción para componentes personalizados	46
3.1.4 Cálculos de ingeniería	49
3.2 Análisis Estructurales	51
3.3 Simulación	54
3.4 Generación diseño eléctrico	55
3.4.1 Procedimiento de diseño	55
3.4.2 Selección de componentes y especificaciones técnicas	56
3.5 Simulación sistema de control Base	60
3.6 Simulación general	63
3.6.1 Procedimiento de diseño	63
3.6.2 Modelo Mecánico y Control en Matlab	66

1. Definición del problema

1.1. Planteamiento del problema y subproblemas de diseño

1.1.1. Planteamiento del problema

La comunidad académica del departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, ha tenido desde hace algunos años la intención de diseñar y construir un robot cuadrúpedo el cual pueda ser utilizado para realizar experimentaciones enfocadas en aplicaciones de robótica móvil. Para alcanzar este objetivo, el Profesor Ricardo Ramírez del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica plantea que el diseño debe iniciar primero con una de las piernas del robot para ser posteriormente escalado a las 3 restantes.

Por lo anterior, el profesor Ricardo propuso el presente proyecto en el que se busca realizar el diseño y simulación de una pierna de un robot cuadrúpedo, la cual tenga 3 grados de libertad y que pueda ser utilizada para experimentación cinemática por parte de la comunidad universitaria. En particular, se busca que la articulación del eslabón superior tenga dos grados de libertad y que la articulación entre los eslabones superior e inferior (rodilla) sea de un sólo grado de libertad. Cabe recalcar que el alcance del presente proyecto se limitará a las fases de diseño, simulación y pre-implementación de la solución planteada.

1.1.2. Subproblemas de diseño

En acercamientos previos al desarrollo de una pierna de 3GDL para un robot cuadrúpedo en la Universidad Nacional de Colombia, se han presentado problemas con el diseño y la implementación, dado que los sistemas resultantes finalmente no terminan cumpliendo los requerimientos ni siendo estéticamente agradables, sin omitir su bajo desempeño al implementar motores sin control de torque lo que resulta en muchas vibraciones resultantes en el efecto final, imposibilitando seguir las trayectorias deseadas. Por otra parte, en diseños implementados por otras universidades colombianas han demostrado que las propiedades de la manufactura aditiva no son las más óptimas para la durabilidad del dispositivo planteado, lo que lleva a constantes reparaciones de piezas y gastos de impresión. Todo lo anteriormente mencionado se tendrá en cuenta en el diseño y simulación del prototipo de la pierna para que desde un principio se cumplan los requerimientos y especificaciones pactados y así a la hora de su fabricación tenga un desempeño óptimo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar y simular un prototipo de pierna de 3 grados de libertad de un robot cuadrúpedo para experimentación cinemática, el cual permita implementar estrategias de control

avanzadas enfocadas en la robótica móvil.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar en programas CAD un prototipo de pierna de un robot cuadrúpedo que cumpla con los requerimientos y especificaciones correspondientes.
- Elaborar un esquema de control que permita generar diferentes movimientos con el prototipo propuesto.
- Simular en softwares especializados en robótica (ROS, Matlab) el comportamiento esperado del prototipo de pierna para evaluar su desempeño bajo diferentes condiciones.

1.3. Cronograma

En el **Anexo 1** se encuentra de forma detallada el cronograma del presente proyecto el cual presenta las dependencias de las actividades, los logros a alcanzar y los encargados de cada tarea. Adicionalmente, en el siguiente enlace se encuentra una versión dinámica del cronograma en la cual se visualiza más fácilmente la información anteriormente mencionada.
<https://share.goodday.work/414320da-cb17-485a-a954-5e0b83fef9a7>

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Historia de robots cuadrúpedos

A partir de las ultimas 3 décadas los robots móviles han recibido una atención especial, debido a la posibilidades que brindan como por ejemplo: la exploración en entornos complejos, operaciones de rescate y la realización de una tarea sin esfuerzo humano, etc.

Los robots móviles puede clasificarse de manera general en tres categorías: [17]

1. Robot con ruedas
2. Robot Oruga
3. Robot con patas

El sistema de locomoción del robot es una característica esencial del diseño móvil. De este depende tanto del espacio donde podrá ser usado, su maniobrabilidad, condiciones del terreno, eficiencia, estabilidad y capacidad de control. Es por esto que cada sistema tiene sus propias ventajas y desventajas. En el caso del Robot con patas, estas dependen del número de piernas y la funcionalidad de las mismas, de manera general, la principal ventaja que ofrecen este tipo de robots es el trabajo en terrenos complejos teniendo mayor potencial para funcionar por casi todas las superficies de la tierra.

Los robots cuadrúpedos son la mejor opción entre todos los robots con patas si lo que se busca es movilidad y estabilidad de la locomoción. Las cuatro patas del robot permiten un

control, diseño y mantenimiento mas sencillo en comparación con robots de dos o seis patas, sin embargo, cabe destacar que para lograr una locomoción adecuada que pueda soportar una carga útil se requiere un sistema de control desarrollado y una generación dinámica de la marcha. [18]

Finales Siglo XIX- Principios del siglo XX:

A principios del siglo XX hubo un auge relacionado a la investigación de mecanismos similares a las patas de un robot cuadrúpedo. Pafnuti Chebyshov fue el precursor de este tipo de mecanismos [Figura 1] , al desarrollar el primero con capacidad de marcha en 1870 basándose en un mecanismo de 4 barras, este dispositivo seria diseñado para caminar en terreno plano y no posee movimientos independientes para cada una de las piernas. [19]

En 1893 Lewis A. Rygg patento un mecanismo denominado como "Mechanical Horse."° Caballo Mecánico.en español [Figura 2], la cual tenia por medio de eslabones y manivelas tenia el objetivo de proporcionar un caballo mecánico el cual pueda montar una persona y pueda ser operado transmitiendo la potencia mecánica a la máquina con ayuda de pedales. [20]

Mediados y finales del siglo XX:

En 1960 en la Universidad del Sur de California se construyó el primer robot cuadrúpedo autónomo el cual se nombro como "phony pony" o "pony falso.en español [Figura 3].

En este mecanismo cada pierna tenia dos articulaciones rotativas que se accionaban eléctricamente y eran capaces de producir patrones de marcha, su diseño destaco por su pie en forma de T invertida al proporcionar estabilidad en el plano frontal [21].En 1976 K. Kato y S. Hirose juntos con el Instituto de Tecnología de Tokio inspirados en el movimiento de las arañas dieron un cambio al desarrollo de robots cuadrúpedos desarro-

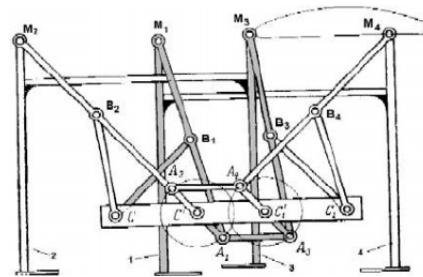


Figura 1: Cuadrúpedo Pafnuti Chebyshov. [19]

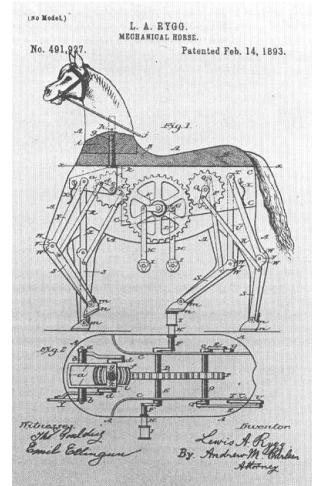


Figura 2: "Mechanical Horse". [20]

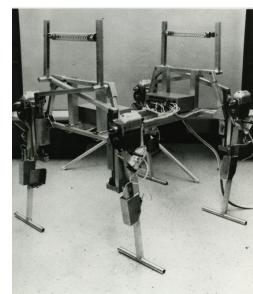


Figura 3: "Phony pony". [21]

llando el cuadrúpedo KUMO-1, en este diseño cada pierna contaba con un motor impulsor y un embrague para generar movimiento. En 1979 la compañía Hiroes desarrollo el vehículo Pre-Ambulado (PV-II) [Figura 4], un mecanismo con control de movimiento basado en sensores, el cual hizo historia al ser el primer robot cuadrúpedo en subir escaleras. [22]

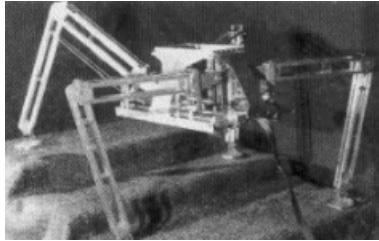


Figura 4: PV-II. [22]

además incorporaba un mecanismo de patas, siendo el primer robot trepador equipado con sensor táctil para el pie y programación inteligente. El TITAN-IV desarrollado en 1986 podía pasar de una marcha lenta a un trote a partir de una variación gradual de velocidad. La compañía continuo realizando diferentes mejoras en los modelos V, VI Y VII enfocándose en pruebas de peso y marcha dinámica. El TITAN VIII [Figura 5] contaba con un mecanismo de conducción que permitía tener en cuenta la actuación gravitacional [22].

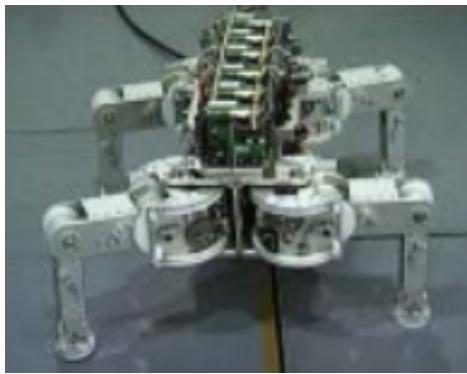


Figura 5: TITAN VIII. [22]

desarrollado una gran variedad de modelos de robots cuadrúpedos, a continuación se mencionaran algunos de los mas relevantes:

- **2000:** Un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Alemania, desarrollaron “BISAM” [Figura 6] una máquina que simulaba la caminata biológica de cuatro patas, En esta cada pata está dividida en cuatro segmentos, que consisten en uniones giratorias basadas en un actuador de husillo de bolas y un servomotor. La robustez de BISAM se incrementó debido a la combinación de neuro osciladores con reflejos adaptativos basados en sensores. [26]

- **2002:** Un programa de investigación interuniversitario apoyado por el ministerio de educación de Japón desarrolló JROB-1 y JROB-2 para la investigación científica en robótica inteligente. Se basaron en TITAN-VIII añadiendo visión de seguimiento de color, tablero de visión, tablero interespacial y RT-Linux. JROB se desarrolló para el experimento en una plataforma de investigación común. [27]
- **2003:** MRWALLSPECT-II [Figura 7] Diseñado por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sungkyunkwan es un Robot multifuncional para inspección de muros-III, enfocado en servicios industriales, se destaca por su capacidad de escalar paredes con esquinas convexas utilizando ventosas. [28]
- **2005:** Boston Dynamics Corporation desarrolló un cuadrúpedo autónomo avanzado "Big Dog 1st" [Figura 8], financiado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa de EE. UU. En este robot, cada pata tiene cuatro grados de libertad, y todos los accionados hidráulicamente se comportan como los elementos flexibles de un animal para absorber energía y liberar energía de un paso a otro. El robot funciona con un motor de gasolina y lleva una computadora a bordo con un sistema operativo móvil en tiempo real quenix (QNX), integra cincuenta sensores para la locomoción como posición de la articulación, contacto con el suelo, fuerza de la articulación, un giroscopio, carga del suelo, detección de luz y rango (LIDAR) etc. [29]

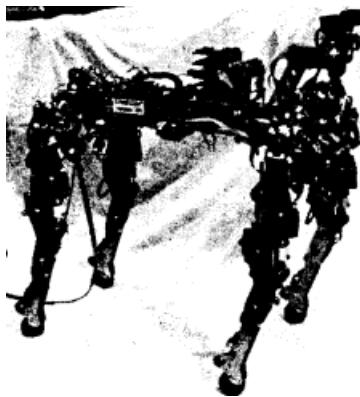


Figura 6: BISAM. [26]

Figura 7: Mrwallspect-II.

[28]



Figura 8: Big Dog 1st. [29]

- **2007:** Kamanbare [Figura 9], una plataforma robótica bioinspirada trepadora de árboles con el objetivo principal de la investigación ambiental desarrollada por el Departamento de Telecomunicaciones y Control de la Universidad de São Paulo, este robot posee un total de 16 grados de libertad y se basa en camaleones para su patrón de marcha. [30]

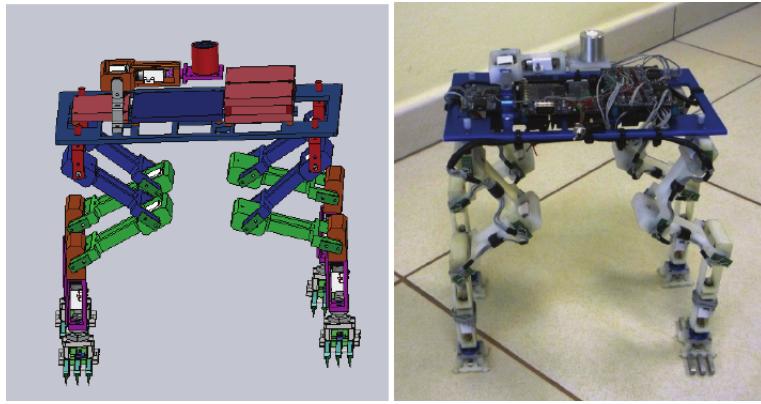


Figura 9: Kamanbare. [30]

- **2013-2015:** El Instituto de Tecnología de Massachusetts desarrolló un robot cuadrúpedo altamente eficiente llamado MIT Cheetah [Figura ??] del cual destaca los principios utilizados en el mecanismo para reducir la pérdida de energía en la locomoción. EN 2015 desarrollaron el Cheetah-2 el cual incorpora un algoritmo en el robot para lograr un funcionamiento sin ataduras con un amplio rango de velocidades. El robot puede correr en una cinta de correr, así como en terrenos irregulares. [31]
- **2014:** El Instituto de Tecnología de Harbin, Japón, desarrolló un robot cuadrúpedo llamado MBBOT, en este todos los actuadores son accionados por una bomba hidráulica externa. Cada pata del robot tiene cuatro articulaciones activas con un resorte prismático pasivo montado con un sensor de fuerza de 3 componentes en pies y una unidad de medición inercial (IMU). [32]
- **2016:** Spot, robot cuadrúpedo sin ataduras desarrollado por Boston Dynamics. Todas las articulaciones son de accionamiento eléctrico y funcionan con batería. El robot tiene pasos omnidireccionales para caminar y trotar. El Spot está integrado con un sistema de visión 3D con localización y mapeo simultáneos (SLAM), proporcionando información de profundidad, permitiendo al robot su entorno y evitando obstáculos. El robot está controlado de forma remota por operadores humanos al mismo tiempo que navega y realiza algunas tareas de forma autónoma. El robot tiene un control dinámico bioinspirado, que puede subir, bajar escaleras, equilibrarse y adaptarse a las perturbaciones físicas con facilidad. [33]
- **2019:** El robot mini cheetah del MIT es reconocido por ser el primer robot de cuatro patas en hacer una voltereta hacia atrás, tiene capacidad de doblar y balancear sus piernas ampliamente. Cada pata esta impulsada por tres motores, lo que le otorga tres grados de libertad y un amplio rango de movimiento; su diseño liviano y con alto torque le permite ejecutar maniobras rápidas y dinámicas y tener impactos de gran fuerza contra el suelo sin presentar daños. [34]

1.4.2. Modelado dinámico

El modelado dinámico de robots es una herramienta importante y muy necesaria para entender el funcionamiento y la respuesta de este en cuanto al movimiento, por esto, en esta sección desarrollaremos la cinemática y la cinética presentes en el desarrollo de cualquier actividad robótica.

Cinemática

La cinemática es la ciencia del movimiento que estudia este fenómeno sin considerar las fuerzas que lo ocasionan. La posición, velocidad y aceleración respecto al tiempo son propiedades estudiadas por esta ciencia. Es decir, para estudiar por completo la cinemática de un robot se deben estudiar cada una de las propiedades mencionadas anteriormente. Para entender la compleja geometría de un robot, utilizaremos eslabones unidos por diferentes tipos de juntas para luego describir las relaciones entre estos eslabones. Es decir, se tienen que entender las formas en que cambian las ubicaciones de estos eslabones a medida que se articula el mecanismo.

La posición es la primera propiedad que se define en el análisis cinemático, para ello es necesario aclarar que es un eslabón, un vínculo o junta y una trama. Un eslabón es un elemento que sirve de enlace en el desarrollo de una cadena. Un vínculo es el elemento que permite la unión de dos o más eslabones y la trama es el marco de referencia que está ubicado en cada junta el cuál nos ayudará a determinar la posición global de un eslabón respecto al anterior o al siguiente. En la siguiente figura se observan estos tres elementos:

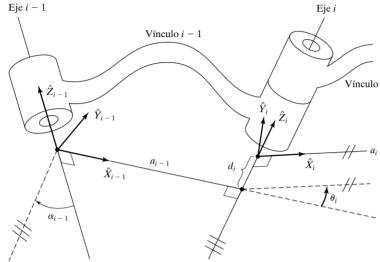


Figura 10: Eslabón, vínculo y trama. [46]

Si las tramas de los vínculos son asignadas de acuerdo con nuestra convención, son válidas las siguientes definiciones:

- a_i = la distancia de \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medida sobre \hat{X}_i
- α_i = el ángulo de \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medida sobre \hat{X}_i
- d_i = la distancia de \hat{X}_{i-1} a \hat{X}_i medida sobre \hat{Z}_i
- θ_i = el ángulo de \hat{X}_{i-1} a \hat{X}_i medida sobre \hat{Z}_i

Procedimiento para asignar tramas a vínculos

A continuación se presenta un resumen del procedimiento a seguir, cuando nos encontramos con un nuevo mecanismo, para asignar correctamente las tramas de los vínculos:

1. Identifique los ejes de articulación y dibuje líneas infinitas sobre ellos. Para los pasos del 2 al 5, considere dos de estas líneas adyacentes (en los ejes i e $i + 1$).
2. Identifique la perpendicular común entre ellos, o el punto de intersección. En el punto de intersección, o en el punto en el que la perpendicular común se encuentra con el i -ésimo eje, asigne el origen de la trama asociada al vínculo.
3. Asigne el eje \hat{Z}_i para que apunte sobre el i -ésimo eje de articulación.
4. Asigne el eje \hat{X}_i para que apunte sobre la perpendicular común o, si los ejes se intersecan, asigne \hat{X}_i para que sea normal al plano que contiene los dos ejes.
5. Asigne el eje \hat{Y}_i para completar un sistema de coordenadas de mano derecha.
6. Asigne 0 para que concuerde con 1 cuando la primera variable de articulación sea cero. Para N seleccione la ubicación del origen y la dirección de \hat{X}_N libremente, pero generalmente de manera que haga que la mayor parte de los parámetros de los vínculos sean cero.

Después de haber realizado la correcta asignación de las tramas a los vínculos es necesario analizar dos tipos de cinemática existentes, como son la cinemática directa donde a partir del movimiento de cada eslabón se quiere determinar la posición final del último eslabón, esto con la convención de DENAVIT-HARTENBERG y la cinemática inversa donde a partir de la posición del último eslabón se quiere determinar las posiciones del resto de eslabones en determinado momento. [48]

Cinemática Directa

El problema de la cinemática de avance se refiere a la relación entre las articulaciones individuales del robot manipulador y la posición y orientación de la herramienta o efecto final. Las variables de articulación son los ángulos entre los eslabones en el caso de juntas revolutas o rotacionales.

Sin embargo, el análisis cinemático de un manipulador de n -vínculos puede ser extremadamente complejo y las convenciones que se presentan a continuación simplifican considerablemente el análisis. Además, dan lugar a un lenguaje universal con el que los ingenieros mecánicos y mecatrónicos pueden comunicarse. Una convención comúnmente utilizada para seleccionar marcos de referencia en aplicaciones robóticas es la convención Denavit-Hartenberg o DH. En esta convención, cada transformación homogénea A_i se representa como un producto de cuatro transformaciones básicas.

$$\begin{aligned}
A_i &= \text{Rot}_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} \text{Rot}_{x,\alpha_i} \\
&= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
&\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
\end{aligned}$$

Donde las cuatro cantidades θ_i , a_i , d_i , α_i son parámetros asociados con el vinculo i y el eslabón i. Los cuatro parámetros a_i , α_i , d_i y θ_i generalmente se denominan longitud de enlace, torsión de enlace, desplazamiento de enlace y ángulo de unión, respectivamente.

Mediante una elección inteligente del origen y los ejes de coordenadas, es posible reducir el número de parámetros necesarios de seis a cuatro (o incluso menos en algunos casos).

A partir de rotaciones en los ejes o centros de coordenadas es posible disminuir el número de parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar el análisis cinemático directo. Con estas rotaciones el número de elementos de la matriz A_i disminuye y por tanto, el análisis cinemático se puede volver un poco más fácil.

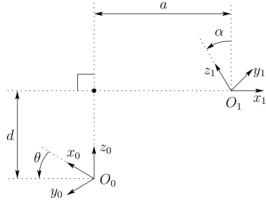


Figura 11: Tramas condiciones DH1 Y DH2. [46]

Bajo estas condiciones y cómo se ilustra en la figura 14, donde se cumplen las condiciones de perpendicularidad entre los ejes x y z, la matriz A se reduce a lo siguiente:

$$A_i = \text{Rot}_{z,\theta} \text{Trans}_{z,d} \text{Trans}_{x,a} \text{Rot}_{x,\alpha} \quad (2)$$

Por supuesto, dado que θ y α son ángulos, realmente queremos decir que son únicos dentro de un múltiplo de 2π .

Cinemática Inversa

En la sección anterior mostramos cómo determinar la posición y orientación del eslabón y vínculo final en términos de las variables conjuntas. Esta sección se ocupa del problema inverso

de encontrar las variables conjuntas en términos de la posición y orientación del efecto final. Este es el problema de la cinemática inversa y, en general, es más difícil que el problema de la cinemática directa.

Usando el desacoplamiento cinemático, podemos considerar los problemas de posición y orientación de forma independiente. Describimos un enfoque geométrico para resolver el problema de posicionamiento, mientras aprovechamos la parametrización del ángulo de Euler para resolver el problema de orientación.

Dentro de la clase de soluciones para la cinemática inversa, distinguimos dos métodos para obtener la solución: algebraico y geométrico. Estas distinciones son algo confusas:

cualquier método geométrico a considerar se aplica por medio de expresiones algebraicas, por lo que los dos métodos son similares. Los métodos tal vez difieren sólo en el enfoque.

Solución algebraica

Para enfocar nuestra discusión en la cinemática inversa, vamos a suponer que se han realizado las transformaciones necesarias, de manera que el punto de destino sea una especificación de la trama de eslabón relativa a la trama base. Después de definir cada uno de los estados final e inicial de un eslabón y llevarlos a una matriz, se deben parametrizar y sacar un sistema de ecuaciones cuya respuesta tiene que estar entre valores definidos que nos garantizará que la trayectoria que sigue el eslabón es correcta y adecuada de acuerdo a su longitud.

Solución Geométrica

En un método geométrico para encontrar la solución de un manipulador, tratamos de descomponer la geometría espacial del brazo en varios problemas de geometría plana. Para muchos manipuladores (especialmente cuando las $\alpha_i = 0$ o ± 90), esto puede hacerse con mucha facilidad. Los ángulos de articulación pueden así resolverse utilizando las herramientas de la geometría plana.

Hasta el momento solo hemos desarrollado algunos conceptos para el entendimiento de la posición de cada eslabón en un determinado instante, cómo a partir del movimiento de un eslabón, encontrar la posición final del final de la cadena y viceversa.

Examinaremos las nociones de velocidad lineal y angular de un cuerpo rígido y utilizaremos estos conceptos para analizar el movimiento de un robot. También consideraremos las fuerzas que actúan sobre un cuerpo rígido y después utilizaremos estas ideas para estudiar la aplicación de fuerzas estáticas con los manipuladores.

Ahora nos corresponde estudiar qué pasa con la velocidad, para esto se usa una herramienta que se llama el jacobiano que se presentará más adelante.

1.4.3. Jacobiano: Velocidad Cinemática

Velocidad Angular: Ahora presentaremos un vector de velocidad angular que utiliza el símbolo Ω . Mientras que la velocidad lineal describe un atributo de un punto, la velocidad

angular describe un atributo de un cuerpo. Siempre unimos una trama a los cuerpos que consideramos, por lo que también podemos pensar que la velocidad angular describe el movimiento giratorio de una trama.

En la figura 12, Ω de A hasta B describe la rotación de la trama B relativa a la trama A.

Físicamente, en cualquier instante la dirección del vector velocidad angular indica el eje instantáneo de rotación de B relativo a A, y la magnitud de este indica la velocidad de rotación.

Introduciremos una notación simplificada para un caso especial importante. Éste es simplemente el caso en el que hay una trama de referencia conocida, de manera que no necesita mencionarse en la notación:

$$w_A = {}^A \Omega_B \quad (3)$$

donde ${}^A \Omega_B$ es la velocidad angular de la trama B respecto a la trama A.

La velocidad angular también se puede definir así:

$$w_A = {}^A V_B \times r_{A/B} \quad (4)$$

Velocidad Lineal:

Considere una trama B unida a un cuerpo rígido. Deseamos describir el movimiento de ${}^B Q$ respecto a la trama A, como se muestra en la figura 13. Podemos considerar que A es fija.

La trama B se ubica de manera relativa a A como lo describe un vector de posición ${}^A P_{BORG}$ y una matriz de rotación ${}^A_B R$. De momento, supondremos que la orientación ${}^A_B R$ no cambia con el tiempo; esto es, el movimiento del punto Q respecto a A se debe a que ${}^A P_{BORG}$ o ${}^B Q$ cambian con el tiempo.

$${}^A V_Q = {}^A P_{BORG} + {}^A_B R {}^B V_Q \quad (5)$$

La anterior ecuación solo muestra la suma de las dos componentes de la velocidad para el caso donde la orientación de la trama B y la trama A son constantes.

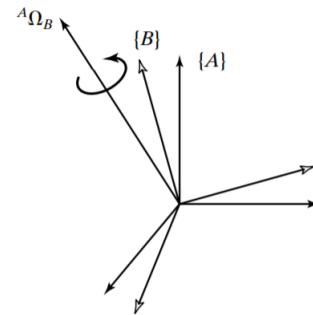


Figura 12: La trama B gira con velocidad angular Ω relativa a la trama A. [46]

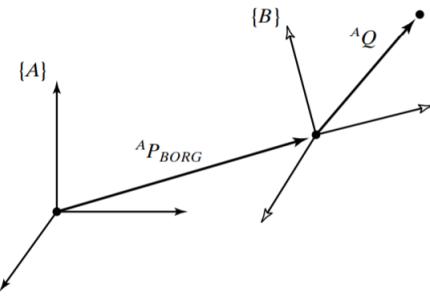


Figura 13: Velocidad lineal para orientación constante de las tramas, la trama A se trasladó con velocidad ${}^A V_{BORG}$ relativa a la trama B. [46]

Velocidad de rotación

Ahora consideremos dos tramas con orígenes coincidentes y velocidad relativa lineal cero; sus orígenes permanecerán coincidentes en todo momento. La orientación de la trama B con respecto a la trama A está cambiando en el tiempo. Como se indica en la figura siguiente, la velocidad de rotación de B relativa a A es descrita por un vector llamado ${}^A\Omega_B$. También hemos indicado un vector BQ que localiza un punto fijo en B. Como se muestra en la figura 14

Estas condiciones sobre magnitud y dirección sugieren inmediatamente el producto cruz de los vectores. Evidentemente, nuestras conclusiones sobre dirección y magnitud se satisfacen mediante la siguiente forma computacional:

$${}^AV_Q = {}^A\Omega_B \times {}^BQ \quad (6)$$

En el caso general, el vector Q también podría estar cambiando respecto a la trama B, por lo que si sumamos este componente tenemos que:

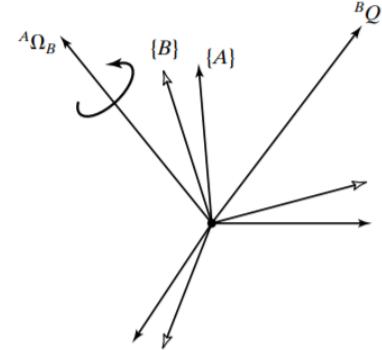


Figura 14: El vector BQ fijo en la trama B está girando respecto a la trama A con una velocidad angular ${}^A\Omega_B$. [46]

$${}^AV_Q = {}^A(BV_Q) + {}^A\Omega_B \times {}^BQ \quad (7)$$

Si utilizamos una matriz de rotación para eliminar el doble superíndice y, teniendo en cuenta que la descripción de AQ en cualquier instante es ${}^A\mathbf{R}{}^BQ$, terminamos con:

$${}^AV_Q = {}^A\mathbf{R}{}^BV_Q + {}^A\Omega_B \times {}^A\mathbf{R}{}^BQ \quad (8)$$

Velocidad de rotación y lineal juntas

Simplemente se suma el término de velocidad lineal a la ecuación anterior pues ahora los orígenes de las tramas no están en la misma posición.

$${}^AV_Q = {}^AV_{BORG} + {}^A(BV_Q) + {}^A\Omega_B \times {}^BQ \quad (9)$$

Uso del jacobiano para determinar velocidades

El jacobiano es una forma multidimensional de la derivada. En el campo de la robótica, generalmente se usan jacobianos que relacionan velocidades de articulaciones con velocidades cartesianas en la punta del brazo; por ejemplo:

$${}^0v = {}^0j(\Theta)\dot{\Theta} \quad (10)$$

En donde Θ es el vector de ángulos de articulación del manipulador y v es un vector de ve-

locidades cartesianas. En la ecuación hemos agregado un superíndice a la izquierda a nuestra notación jacobiana para indicar en qué trama se expresa la velocidad cartesiana resultante. Algunas veces el superíndice se omite cuando la trama es obvia o cuando no es importante para el desarrollo.

Cinemática

Hasta ahora, nuestro estudio de los manipuladores se ha enfocado solamente en las consideraciones cinemáticas. Hemos estudiado posiciones estáticas y velocidades; pero no hemos considerado las fuerzas requeridas para producir movimiento.

Ahora consideraremos las ecuaciones de movimiento para un manipulador: la manera en que se produce el movimiento del manipulador debido a los momentos de torsión aplicados por los actuadores, o a fuerzas externas aplicadas al manipulador.

Aceleración de un cuerpo rígido

Ahora extenderemos nuestro análisis del movimiento de cuerpos rígidos al caso de las aceleraciones. En cualquier instante, los vectores de velocidad lineal y angular tienen derivadas llamadas aceleraciones lineal y angular, respectivamente. Esto es:

$$\dot{V}_A = {}^B \dot{V}_{AORG} \quad \text{y} \quad \dot{\omega}_A = {}^B \dot{\Omega}_A \quad (11)$$

Aceleración lineal

El lado izquierdo de esta ecuación describe cómo cambia ${}^A Q$ en el tiempo. Debido a que los orígenes son coincidentes. Esta forma de la ecuación será útil para dar la forma definitiva de la ecuación de aceleración:

$${}^A_B R^B V_Q = \frac{\partial}{\partial t} ({}^A_B R^B V_Q + {}^A \Omega_B \times {}^A_B R^B Q) \quad (12)$$

Al diferenciar la ecuación anterior podemos derivar expresiones para la aceleración de ${}^B Q$ visto desde A cuando coinciden los orígenes de A y B:

$${}^A_B \dot{R}^B V_Q = \frac{\partial}{\partial t} ({}^A_B R^B V_Q) + {}^A \dot{\Omega}_B \times {}^A_B R^B Q + {}^A \Omega_B \times \frac{\partial}{\partial t} ({}^A_B R^B Q) \quad (13)$$

Ahora aplicamos la ecuación 13 dos veces; una al primer término y otra al último término. El lado derecho de la ecuación 14 sufrirá algunos cambios, y al combinar estas dos ecuaciones da como resultado:

$${}^A_B R^B \dot{V}_Q + 2 {}^A \Omega_B + {}^A_B R^B V_Q + {}^A \dot{\Omega}_B + {}^A_B R^B Q + {}^A \Omega_B \times ({}^A \Omega_B \times {}^A_B R^B Q) \quad (14)$$

Por último, para generalizar en el caso en que los orígenes no sean coincidentes, agregamos

un término que proporciona la aceleración lineal del origen de B, lo que produce la siguiente fórmula general para el lado derecho de la ecuación:

$${}^B\dot{V}_{AORG} + {}_B^A R^B \dot{V}_Q + 2{}^A\Omega_B + {}_B^A R^B V_Q + {}^A\dot{\Omega}_B + {}_B^A R^B Q + {}^A\Omega_B \times ({}^A\Omega_B \times {}_B^A R^B Q) \quad (15)$$

Aceleración angular

Consideré el caso en el que B está girando de manera relativa a A con $A\Omega_B$, y C está girando de manera relativa a B con ${}^B\Omega_C$. Para calcular ${}^A\Omega_C$ sumamos los vectores en la trama A:

$${}^A\Omega_C = {}^B\Omega_C + {}_B^A R^B \Omega_c \quad (16)$$

Al diferenciar obtenemos:

$${}^A\dot{\Omega}_C = {}^B\dot{\Omega}_C + \frac{\partial}{\partial t}({}_B^A R^B \Omega_c) \quad (17)$$

Ahora aplicando el mismo concepto que se aplicó para la obtención de la ecuación 16 se obtiene:

$${}^A\dot{\Omega}_C = {}^A\dot{\Omega}_B + {}_B^A R^B \dot{\Omega}_C + \frac{\partial}{\partial t}({}_B^A R^B \Omega_c) + {}^A\Omega_B \times {}_B^A R^B \Omega_c \quad (18)$$

Distribución de la masa

A menudo hablamos de la masa de un cuerpo rígido en sistemas con un solo grado de libertad; en el caso del movimiento giratorio sobre un solo eje es muy común el término momento de inercia. Para un cuerpo rígido que tiene la libertad de moverse en tres dimensiones, hay un número infinito de posibles ejes de rotación. En el caso de la rotación sobre un eje arbitrario necesitamos una forma completa de caracterizar la distribución de la masa de un cuerpo rígido. Aquí presentaremos el tensor de inercia que, para nuestros propósitos, puede definirse como una generalización del momento escalar de inercia de un objeto. [46]

Ahora definiremos el tensor de inercia que no va a ser más que una representación ampliada del tensor de inercia escalar de un objeto:

$$A_i = \begin{pmatrix} \frac{m}{3}(l^2 + h^2) & -\frac{m}{4}wl & -\frac{m}{4}hw \\ -\frac{m}{4}wl & \frac{m}{3}(w^2 + h^2) & -\frac{m}{4}wl \\ -\frac{m}{4}hw & -\frac{m}{4}hl & \frac{m}{3}(l^2 + w^2) \end{pmatrix} \quad (19)$$

1.4.4. Actuadores

Debido a los altos torques generados en las articulaciones de un robot cuadrúpedo, se busca la implementación de actuadores que cumplan con las especificaciones de fuerza determinados

en el análisis dinámico y que posean un sistema de autobloqueo, desviando el esfuerzo necesario para mantener la estabilidad estática sobre el sistema mecánico y no sobre el actuador eléctrico. Por otra parte, para plataformas móviles de bajo costo, se implementan actuadores comerciales con sistemas mecánicos de autobloqueo, que eviten los gastos económicos derivados de la construcción de sistemas mecánicos complejos. Además del sistema de autobloqueo, el actuador debe tener un sistema de reducción para aumentar el torque de salida y disminuir la velocidad.



Figura 15: Robot cuadrúpedo ANYMal, el cual implemta actuadores ANYDrive. [3]

ancho de banda del torque. [2]



Figura 16: Actuadores serie X de HEBI Robotics. [4]

re y la interfaz de programación de aplicaciones para controlar estos actuadores. Está bien documentado, es fácil de usar y tiene muchas funciones, lo que facilita su implementación. [4]

Una alternativa a los actuadores comerciales de alto costo fue desarrollada por el MIT en un intento de ofrecer un motor mucho más económico y así mismo de un tamaño reducido para ser implementado en una versión escalada de su robot cuadrúpedo Cheetah 3 denominada Mini Cheetah. Este actuador, mostrado en la Figura 17, utiliza un motor eléctrico de alta densidad de torque, acoplado a una transmisión de baja relación para lograr una alta densidad de torque, alta capacidad de retroceso y control de fuerza de ancho de banda alto a través de la propiocepción. El diseño que implementan se asemeja ala de motores sin escobillas de alto rendimiento para aviones no tripulados y aviones de control remoto, que se fabrican en el extranjero en grandes cantidades, a muy bajo costo. Estos motores se han integrado

Un caso particular es el ANYDrive, un actuador diseñado para su uso en robots con patas, como el mostrado en la Figura 15, que permite el control de torque y es resistente a los impactos. El ANYDrive es un actuador elástico en serie, que consta de un motor sin escobillas, un accionamiento armónico y un resorte en serie que se utiliza para medir y controlar el torque, produciendo una mayor precisión de par estático, gracias a su control de torque de lazo cerrado, pero a costa del

Otro actuador basado en actuadores elásticos en serie disponibles comercialmente son las series de actuadores HEBI X5 y X8, como los mostrados en la Figura 16. Estos suelen ser lentos y tienen una potencia limitada para máquinas muy dinámicas. Los actuadores X5 solo son capaces de una potencia de salida máxima de 20W. La característica más notable de los actuadores HEBI es el softwa-

estrechamente en un actuador que también incluye una reducción de engranajes planetarios de una sola etapa 6:1, controlador de motor con sensor de posición incorporado y capacidades de control de nivel de articulación, salida que puede manejar cargas de momento sustanciales para unir extremidades directamente a los actuadores y la alimentación y la comunicación conectadas en cadena para simplificar el cableado. [1]



Figura 17: Actuadores desarrollados por el MIT para su robot cuadrúpedo Mini Cheetah. [1]

1.4.5. Algoritmos de control

En sistemas robóticos como el que se plantea diseñar en el presente proyecto se suelen tener varios niveles de control para el correcto funcionamiento del dispositivo, a continuación se describirán los algoritmos de bajo nivel más utilizados internamente en los actuadores, y los de alto nivel los cuales se encargan del control cinemático del mecanismo serial.

Algoritmos de bajo nivel

Los actuadores que se manejan en este tipo de aplicaciones suelen tener la posibilidad de controlar torque, velocidad y posición angular. Cada uno de estas variables son controladas en lazos cerrados los cuales pueden tener anchos de banda diferentes entre sí según convenga en el algoritmo a implementar. El algoritmo de control más utilizado para controlar el torque en motores eléctricos como los propuestos por el MIT en [1] suele realizarse mediante estimaciones del control de corriente sobre el motor. En el actuador propuesto por el MIT se utiliza el algoritmo *Field Oriented Control (FOC)*, esta estrategia de control identifica las corrientes del estator y el campo magnético del rotor como vectores que rotan en el sistema coordenado del estator.

En la Figura 18 se ilustra de forma gráfica la relación entre las corrientes del estator (A, B, C) con el vector de campo del estator. Sin embargo, es importante aclarar que esta

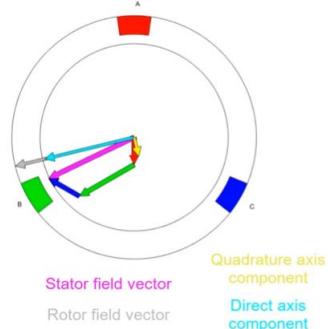


Figura 18: Representación vectorial de los campos presentes en el motor. [39]

relación no se establece por la suma de vectores sino con la transformación Clarke/Park, la cual transforma las variables de corriente expresadas en una base, en un esfuerzo expresado en otro sistema coordenado (Directa, Cuadratura y Cero) que corresponden a las componentes del vector de campo del estator. Esta transformación es expresada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 K_{CP} &= K_P \cdot K_C \\
 \rightarrow &\left[\begin{array}{ccc} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\begin{array}{ccc} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{array} \right] \\
 \rightarrow &\sqrt{\frac{2}{3}} \left[\begin{array}{ccc} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

En esta transformación θ representa el ángulo instantáneo de la frecuencia en la que se encuentran las fases. Para simplificar la explicación anterior lo que se busca hacer es transformar tres variables sinusoidales como lo son las corrientes AC del motor en dos variables variables DC donde una se regula con la corriente asociada al torque objetivo y la otra con una referencia cero para minimizar la energía requerida. Esta regulación se suele realizar con estrategias de control convencionales como un controlador PI. Posterior a esto se realiza una transformación inversa para así obtener los tres voltajes del motor que corresponden a las señales de control. Finalmente se obtiene el esquema de control ilustrado en la Figura 19.

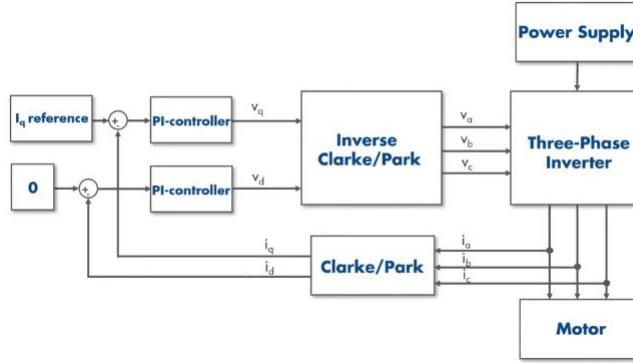


Figura 19: Esquema de control FOC. [39]

El control de posición y el control de velocidad se pueden realizar con estrategias de control convencionales como controladores PD, utilizando la información proporcionada por el encoder interno del motor.

Algoritmos de alto nivel

Para el control de este tipo de sistemas robóticos las técnicas de control de alto nivel más utilizadas actualmente son las que están basadas en *Convex Model-Predictive Control*. El acercamiento propuesto en [43] divide el control de la pierna en dos momentos principales, el primero es cuando el pie se encuentra en fase de vuelo despegado del suelo y la otra cuando el pie se encuentra en contacto con el mismo. En la Figura 20 se ilustra el esquema de control más general utilizado a este nivel.

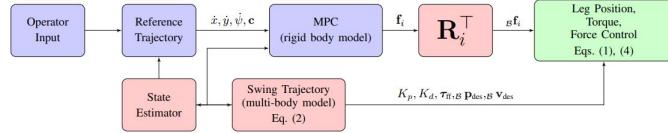


Figura 20: Esquema de control cMPC. [39]

La ley de control, utilizada para la fase de vuelo o balanceo del pie está expresada de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^\top [\mathbf{K}_p (B\mathbf{p}_{i,\text{ref}} - B\mathbf{p}_i) + \mathbf{K}_d (B\mathbf{v}_{i,\text{ref}} - B\mathbf{v}_i)] + \boldsymbol{\tau}_{i,\text{ff}} \quad (20)$$

Donde τ representa los torques de las articulaciones de las piernas, \mathbf{J}_i es la matriz Jacobiana del pie, \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d son matrices de ganancias proporcional y derivativa diagonales positivas, $B\mathbf{p}_i$, $B\mathbf{v}_i$ son la posición y velocidad del pie, $B\mathbf{p}_{i,\text{ref}}$, $B\mathbf{v}_{i,\text{ref}}$ son las correspondientes referencias de posición y velocidad de la trayectoria de la pierna durante el balanceo y $\boldsymbol{\tau}_{i,\text{ff}}$ representa el torque *feedforward* expresado por:

$$\boldsymbol{\tau}_{i,\text{ff}} = \mathbf{J}^\top \boldsymbol{\Lambda}_i (B\mathbf{a}_{i,\text{ref}} - \dot{\mathbf{J}}_i \dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{G}_i \quad (21)$$

Donde $\boldsymbol{\Lambda}_i$ es la matriz de inercia del espacio operacional, $\mathbf{a}_{i,\text{ref}}$ es la referencia de aceleración en el margen de referencia del cuerpo del robot, \mathbf{q}_i es el vector de posiciones de las articulaciones y $\mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{G}_i$ son los torques debidos a la gravedad y a las fuerzas de Coriolis de la pierna.

Justo cuando un contacto entre el pie y el suelo es detectado se pasa a utilizar el control de fuerza con el suelo en el cual los torques en las articulaciones son expresados por la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^\top \mathbf{R}_i^\top \mathbf{f}_i \quad (22)$$

Donde \mathbf{R} es la matriz de rotación que transforma de las coordenadas del cuerpo a las coordenadas del mundo, \mathbf{J} representa la matriz Jacobiana del pies y el vector \mathbf{f} son las fuerzas calculadas por otro controlador de modelo predictivo enfocada únicamente en esta tarea de cálculo.

1.4.6. Mecanismos usados en robots cuadrúpedos

Con el paso del tiempo se han venido desarrollando diferentes mecanismos utilizados para el diseño de piernas de robots cuadrúpedos, las cuales poseen diferentes ventajas y desventajas dependiendo de la configuración que se utilice.

Mecanismo del KITtyBot

En diseño utilizado en las extremidades de este robot consta de un mecanismo de 2 barras, lo cual permite un diseño simple y funcional. Cada pierna tiene 3 grados de libertad y su configuración es $R \perp R \parallel R$. Este robot posee en total 12 grados de libertad, lo cual permite su caminata hacia adelante y atrás. La ventaja de este mecanismo y diseño es que este gira sobre si mismo [44]. Como se muestra en la figura 21.

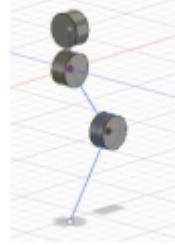


Figura 21: Mecanismo Robot KITtyBot. [44]

Mecanismo del Tekken

En la figura 22 se muestra el mecanismo usado en este robot, el cual consta de 3 grados de libertad por extremidad, la diferencia con el mecanismo del KITtyBot es su configuración. El mecanismo del tekken es un mecanismo de 4 barras que posee 3 actuadores rotacionales, su configuración es $R \parallel R \parallel R$. [45]

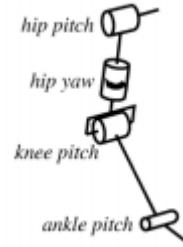


Figura 22: Mecanismo Robot tekken. [45]

Mecanismo del Cheetah-Cub

Este mecanismo consiste en un pantógrafo, el cual aligera las extremidades debido a que sus actuadores se ubican en el cuerpo y mediante comunicación indirecta se mueve el segundo eslabón. En la siguiente figura se muestra la configuración de los componentes.

El primer grado de libertad se genera entre el eslabón A y el servomotor unidos directamente.

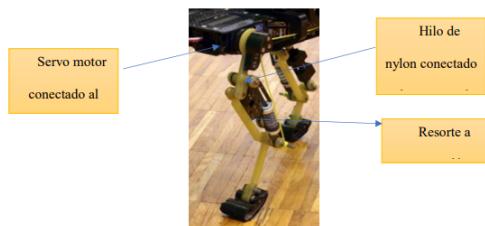


Figura 23: Mecanismo Robot Cheetah. [47]

El segundo grado de libertad es producido por un resorte, este movimiento es accionado con un hilo de nylon a tensión. Al moverse el servomotor desplazará el hilo haciendo que el resorte se comprima produciendo el movimiento del eslabón B. [47]

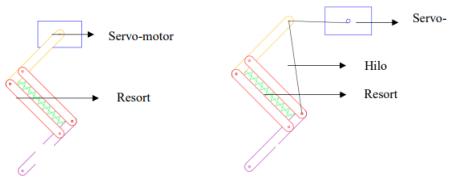


Figura 24: Movimiento del Eslabones [47]

1.5. Benchmarking

En la actualidad existen varias variantes de robots cuadrúpedos, la mayoría de ellos son desarrollos académicos pensados para experimentación dentro de las instituciones y muy pocos son desarrollados a nivel comercial. A continuación se presentan algunos de los robots cuadrúpedos más sobresalientes.

1. **MIT: Mini Cheetah:** "Sus desarrolladores lo comparan con un pequeño campeón de gimnasia o luchador de Kung Fu. Este guepardo robótico puede balancear sus patas y doblarlas en todas direcciones sobre distintos tipos de superficies irregulares, pudiendo hacerlo al doble de la velocidad que una persona promedio." [16]

Se puede observar en la figura 26. Pesa cerca de 9 kilogramos, es ligero pero robusto y ágil; se trata del nuevo invento de el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT). Se llama Mini Cheetah, por su similaridades con el animal africano. Sus desarrolladores lo comparan con un pequeño campeón de gimnasia o luchador de Kung Fu. Este guepardo robótico puede balancear sus patas y doblarlas en todas direcciones sobre distintos tipos de superficies irregulares, pudiendo hacerlo al doble de la velocidad que una persona promedio. También es capaz de levantarse en caso de caer al suelo como si nada hubiera pasado, con una agilidad nunca antes vista en cualquier otro robot. Aún así, su capacidad más impresionante es la de poder realizar un backflip de 360° sobre sus cuatro patas. [16]

En el caso de que una extremidad o un motor se rompa, el mini cheetah está diseñado teniendo en cuenta la modularidad: cada una de las patas del robot está impulsada por tres motores eléctricos idénticos y de bajo costo que los investigadores diseñaron utilizando piezas listas para usar. Cada motor se puede cambiar fácilmente por uno nuevo. "Podrías juntar estas piezas, casi como Legos", dice el desarrollador principal Benjamin Katz, asociado técnico del Departamento de Ingeniería Mecánica del MIT. [34]

2. **MIT: Cheetah 3:** es un robot cuadrúpedo que imita los movimientos de un animal. Normalmente este tipo de robots están equipados con toda clase de sensores y de cámaras para saber dónde están. Pero no Cheetah 3. Este robot ya no requiere cámaras ni inteligencia artificial para interpretar lo que ven las cámaras, se vale con sensores. Según sus desarrolladores este robot sin cámaras se mueve en lo que describen como «locomoción ciega», de la misma forma que tú te podrías mover en una habitación a ciegas. Es decir, el robot sin cámaras sabe que debe corregir ciertos movimientos cuando

se encuentra con obstáculos, de la misma forma que lo haría un animal. [14]

En lugar de sensores de visión, Cheetah 3 utiliza dos algoritmos desarrollados por los ingenieros del MIT. Uno de estos le permite determinar mediante el contacto el mejor comportamiento que puede adoptar para sus cuatro patas a la hora de llevar a cabo un paso, por ejemplo retirándose en caso de pisar una superficie que no sea sólida y pueda comprometer su equilibrio. El segundo algoritmo es uno “de control predictivo del modelo”, que decide la cantidad de fuerza que se debe aplicar en cada pata. En caso de no determinarse de forma correcta, el robot no se moverá en la dirección que debería, pudiendo provocar que se resbale o caiga. Trabaja realizando cálculos de múltiples posiciones para las patas y el cuerpo para el próximo medio segundo, determinando así la fuerza a ejercer para mantener el correcto movimiento del robot. [15]



Figura 25: Cheetah 3, MIT. [14]



Figura 26: MIT: Mini Cheetah. [34]

3. **Boston Dynamics: Spot:** "Spot Explorer está diseñado para desarrolladores entusiastas por explorar cuán flexibles pueden ser los robots móviles para adaptarse a tareas que van desde una inspección industrial hasta el entretenimiento", dice Boston Dynamics [11]

Spot, el robot más popular de Boston Dynamics, está a la venta para cualquier empresa. Tras años de desarrollo y venta exclusiva para empresas elegidas por la propia Boston Dynamics, ahora el perro-robot puede ser adquirido por cualquier empresa de Estados Unidos. Eso sí, no va a salir barato, a 74.500 dólares la unidad. Boston Dynamics comenta que Spot es ideal para tareas de patrulla y revisión. El robot está pensado para trabajar moviéndose por lugares donde un humano no puede (por ejemplo un médico trabajando a distancia) o no quiere ir por ser peligroso o demasiado rutinario. En otras palabras, patrullar o realizar misiones de inspección. [12]

Este año se revelaron algunas novedades sobre este robot, luego de que se le añadiera un brazo robot que le permite realizar más acciones de las que ya se había visto para este robot.

La compañía anunció hace ya unos meses que su famoso perro robótico recibiría un brazo que le permitiría hacer nuevas cosas, entre ellas abrir puertas de forma autónoma. De esa forma, el robot pasaría de ser un "mero dispositivo" de monitorización y control,

entre comillas, a ser un dispositivo proactivo. Más allá de lo curioso que es verlo en funcionamiento, el brazo accesorio da muchas posibilidades a Spot. Podemos pensar en una "manada" de perros que recojan la basura de un parque o en "perros policía" que puedan investigar una escena sin que los policías humanos tengan que correr riesgos. Es más, podría tener implicaciones en la exploración espacial, ya que incluso la NASA estudia usar perros robots para explorar los rincones más escondidos de Marte. [13]



Figura 27: Robot Spot 2020, Boston Dynamics.
[12]



Figura 28: Robot Spot 2021, Boston Dynamics.
[13]

4. ***Stanford: Doggo:*** Dando su propio toque a los robots que deambulan por paisajes complicados, el equipo de Movilidad Extrema del club de Robótica Estudiantil de Stanford ha desarrollado un robot de cuatro patas que no solo es capaz de realizar trucos acrobáticos y atravesar terrenos desafiantes, sino que también está diseñado teniendo en cuenta la reproducibilidad. Cualquiera que quiera su propia versión del robot, apodado Stanford Doggo , puede consultar planes completos, código y una lista de materiales que los estudiantes han puesto a disposición gratuitamente en línea . [35]

Doggo sigue diseños similares a otros pequeños robots cuadrúpedos, pero lo que lo hace único es su bajo costo y accesibilidad. Si bien robots comparables pueden costar decenas de miles de dólares, los creadores de Doggo, el laboratorio de Movilidad Extrema de Stanford, estiman que su costo total es de menos de \$3,000. Además, el diseño es completamente de código abierto, lo que significa que cualquiera puede imprimir los planos y armar un Doggo propio. Aunque Doggo es barato de producir, en realidad funciona mejor que los robots más caros, gracias a las mejoras en el diseño de su mecanismo de patas y al uso de motores más eficientes. Tiene un torque mayor que el robot Minitaur de tamaño y forma similar de Ghost Robotics (que cuesta más de \$11,500) y una mayor capacidad de salto vertical que el robot Cheetah 3 del MIT. [37]

5. ***USTA: Robot Cuadrúpedo k3lso:*** El robot cuadrúpedo de la Universidad Santo Tomás en Bogotá, Colombia fue construido por iniciativa del ingeniero Edgar Camilo Camacho en conjunto con Robin Fröjd quien desarrolla también en paralelo el robot cuadrúpedo k3lso. Este robot utiliza motores DYNAMIXEL MX-106R para el movimiento de las piernas las cuales fueron realizadas en impresión 3D, el cuerpo de este

robot esta construido con perfiles de aluminio para dar soporte a la electrónica colocada en su interior.

Para el control de este robot se implementan algoritmos de marcha en el software ROS los cuales son testeados OFFLINE en simulación para ser posteriormente implementados en el robot. El diseño mecánico del robot sigue un diseño similar a muchos robots cuadrupedos, en este robot en particular se tienen los 3 motores de las piernas agrupados y se utiliza un sistema de transmisión por correa y engranaje para la articulación de la rodilla. [49]



Figura 29: Doggo, Stanford. [36]



Figura 30: Robot USTA. [49]

En la tabla a continuación se presenta una comparación entre los datos técnicos relevantes para el proyecto de cada robot seleccionado en el benchmarking.

Requerimientos	1. Mini cheetah	2. Cheetah 3	3. BD Spot	4. Stanford Doggo	5. Robot Cuadrúpedo k3Iso-USTA
Material de las piernas	Aluminio 6061	Aluminio	Desconocido	Aluminio	PLA con policarbonato
Sistema de transmisión rodilla	Correa	Cadena	Cilindro neumático	N.A.	Cadena
Grados de libertad en sus piernas	3	3	3	2	3
Diseño de sus piernas (Serie/Paralelo)	Serie	Serie	Serie	Paralelo	Serie
Inercia de las piernas comparadas con el cuerpo	Baja	Baja	Media	Baja	Baja
Ciclo de vida estimado	2 años	2 años	1 Año(Garantía)	2 años	N.A Diseño prototipo
Sistema de amortiguamiento	Control	Control	Control	Control	N.A
Peso estimado de cada pierna	1600g	2670g	3000g	1100 g	820 g
Motores utilizados	Motor personalizado	Motor personalizado	Cilindro neumático/Motor	T-motor 5212 KV340	T-motor AK 10-9
Consumo energético aproximado	24V-40Amp	24V-40Amp	35-58.6 VDC/7.2A	24V-40Amp	5000mA- 40 min
Plataformas de programación conocidas	Matlab	ROS	ROS	Teensy	ROS

1.6. Desarrollo del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) y análisis de resultados obtenidos

El desarrollo del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) se presenta en el **Anexo 2**, en este se puede evidenciar la relación entre los requerimientos y las especificaciones de ingeniería, así como la prioridad de cada requerimiento y la correlación entre cada una de las especificaciones de ingeniería presentadas.

Al observar la información relacionada con la dificultad, se observa que los valores mas difíciles de obtener respecto a los deseados son los relacionados con el control, específicamente el rechazo a ruido en el lazo de control y el error de posición del efecto final.

Respecto al valor máximo de relación en fila, el cual es un indicador de si un requerimiento esta siendo cumplido con las especificaciones de ingeniería dadas, nos muestra en su mayoría el valor máximo (9).

Con relación al análisis contra los competidores, se puede observar que el competidor que mas destaca es el Mini Cheetah, ya que de manera general se encuentra en las posiciones más altas, adicionalmente, se observa que la competencia otorgada por el Stanford Doggo es la mas baja acorde a los requerimientos analizados, presentando en mas de una ocasión posiciones en 0. Adicionalmente, la solución propuesta se encuentra en un nivel medio respecto a la competencia pues se cuenta con limitación de recursos económicos para su desarrollo. Sin embargo, con el conocimiento aportado por los miembros del equipo se espera un aumento en las capacidades técnicas del dispositivo pese a las limitaciones anteriormente mencionadas.

A continuación se presenta un resumen de los valores principales obtenidos del QFD, en donde resalta que todos los requerimientos de ingeniería poseen una máxima relación (9) con algún requerimiento, por lo tanto se considera que ninguno es irrelevante o innecesario. Respecto al peso relativo y la ponderación de las especificaciones de ingeniería, se puede ver que el error de posición es la especificación más importante seguida del tiempo de respuesta del sistema y la frecuencia de rechazo al ruido.

Quality Characteristics	Requirement Weight	Relative Weight	Difficulty	Minimize (▼) Maximize (▲) Target (x)	Target or Limit Value
Peso	1.87	8.10 %	4	▼	10 kg
Volumen	1.59	6.89 %	3	▼	35*35*35 cm
Vida útil	1.75	7.56 %	7	▲	2 años
Frecuencia de resonancia correa dentada	0.70	3.04 %	5	▲	30Hz
Cantidad de tensores roscados	0.54	2.34 %	0	x	2
Factor de seguridad del diseño mecánico	0.76	3.27 %	7	▲	1.7
Realización de mantenimiento preventivo del sistema	1.15	4.97 %	1	x	2 meses
CF estático y dinámico entre la estructura y el suelo	0.89	3.87 %	6	▲	0.6
Torque nominal constante de los motores	1.17	5.06 %	3	x	5Nm - 8Nm
Tiempo de respuesta del sistema de control	2.14	9.22 %	8	x	400ms - 500ms
Frecuencia compatibilidad inalámbrica	0.60	2.61 %	1	x	2,4GHz
Corriente de consumo por motor	1.19	5.14 %	3	x	3A - 6A
Compatibilidad con plataformas de programación	1.07	4.63 %	8	x	2 plataformas
Error de posición del efector final	3.32	14.36 %	10	▼	1cm
Voltaje de funcionamiento	1.03	4.44 %	2	x	24V
Voltaje a nivel lógico	1.03	4.44 %	1	x	5V
Ruido del mecanismo	0.31	1.32 %	5	▼	90dB(a)
Rechazo a ruido en los lazos de control	2.03	8.76 %	10	▼	2kHz

Para realizar el análisis de la competencia junto utilizamos como base la tabla expuesta en la sección Benchmarking. Es importante tener en cuenta que no se evaluaron algunos requerimientos debido a que son muy particulares del proyecto que vamos a implementar el cual consiste de una plataforma de experimentación para evaluar el desempeño de un de las piernas y no el robot cuadrúpedo completo.

1.7. Estudio preliminar de factibilidad

1.7.1. Estudio de mercado

El desarrollo de la robótica en Colombia tiene una corta trayectoria, universidades como la Santo Tomás [5], y la Universidad de los Andes [6] han tenido avances en diversos campos de la robótica. Sin embargo, en la Universidad Nacional, no se ha tenido un avance significativo en materia de robots actuados por piernas, específicamente los cuadrúpedos. La futura fabricación no sólo de una pierna, sino de un robot cuadrúpedo en su totalidad, pretende abrir un campo de desarrollo e investigación en torno al control de movimiento y locomoción que permite explorar plataformas como los robots cuadrúpedos. Asimismo, es una oportunidad para futuros grupos de investigación y demás miembros de la comunidad universitaria que pretendan investigar en el campo de la robótica y puedan tomar este proyecto como referencia y base para su potencial escalamiento y demás actividades.

1.7.2. Estudio técnico

El desarrollo de los robots cuadrúpedos a nivel nacional al ser aún muy prematuro no se cuenta con muchos recursos bibliográficos ni físicos. Sin embargo, otras instituciones fuera del país han abordado este campo con suficiencia y han abierto el camino para que otras personas puedan tener un acercamiento con esta aplicación de la robótica.

Haciendo uso de las herramientas disponibles, y de las investigaciones desarrolladas por instituciones tanto nacionales como internacionales, se puede contar con suficientes recursos tanto técnicos como bibliográficos, para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, además de contar con un equipo interdisciplinario, el respaldo del cliente y los recursos brindados por la universidad, se evidencia una viabilidad positiva para la ejecución del proyecto que además satisface los requerimientos y especificaciones correspondientes junto con los objetivos del proyecto.

1.7.3. Estudio legal

Se destacan ciertas normas relacionadas con la elaboración del proyecto:

- **ANSI RIA R15.06: Robot and Robot System Safety:** La cual es una norma que incluye apartados que definen los riesgos y probabilidades de ocurrencia de un accidente aplicables en los requisitos para el diseño de seguridad y medidas de seguridad para el uso de un robot. [7]
- **CEN 310 – Advanced Automation Technologies and Their Applications:** En esta norma, se normalizan los campos relacionados a los sistemas de automatización, además de su aplicación e integración. Busca asegurar estándares requeridos para el diseño, aprovisionamiento, fabricación y entrega de productos y servicios aplicables en

el área de control de equipo. [8]

- **ISO 10218:1992: Manipulating Industrial Robots – Safety:** Contiene información relacionada al diseño y fabricación de sistemas robotizados, el cual tiene en cuenta aspectos mecánicos, ergonómicos y de control. De igual manera contiene análisis de seguridad, identificación y definición de riesgos relacionados a la manipulación de robots. [9]
- **AEN/CTN 116 - Sistemas Industriales Automatizados:** Abarca tanto la automatización industrial y la induración de componentes de múltiples tecnologías, además de dar para metros para ensayos y criterios de calidad. [10]

1.7.4. Estudio de impacto ambiental

En relación al estudio ambiental se tiene en cuenta el requerimiento principal respecto a la manufactura del prototipo de pierna de 3GDL para experimentación cinemática, el cual es la manufactura de la pierna en impresión 3D o manufactura aditiva, y se evalúa el impacto ambiental de este proceso de manufactura.

Acorde a un estudio realizado por Cuboyo en 2013 [40] en el cual se comparaba la producción convencional respecto a la impresión 3D enfrentando 3 diferentes impresoras con costes de producción distintos y la inyección por moldes, se concluyó que la manufactura tradicional no es apropiada para bajos volúmenes de producción respecto al impacto ambiental o la huella de carbón ocasionada, contrario a producciones mayores a 300 replicas donde posee un menor impacto.

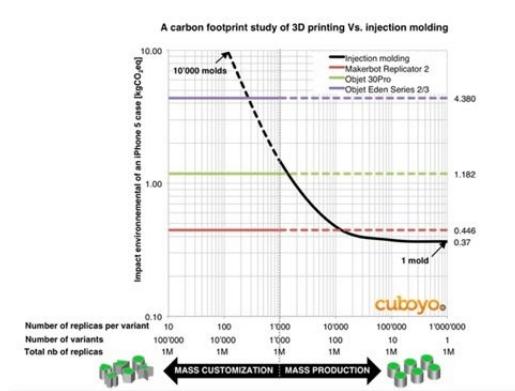


Figura 31: Huella de carbono producida por la fabricación de carcasa de iPhone 5, utilizando impresión 3D e inyección en moldes.

Acorde al proyecto ATKINS [41] el cual tiene como objetivo analizar el impacto ambiental de la impresión 3D con la producción tradicional y diferentes investigaciones [42] desde el punto de vista ambiental, la impresión 3D puede llegar a ser favorable principalmente en dos aspectos: la composición de los materiales en sí mismos y la cantidad de material usado para la producción. Tanto el gasto de material como el residuo generado son menores en la

manufactura por impresión 3D en comparación con la tradicional. Sin embargo, respecto al requerimiento energético la impresión 3D presenta una desventaja. ATKINS expresa que las impresoras 3D que usan calor o una fuente de energía (láser, UV) para derretir el plástico llegan a consumir hasta 100 veces más energía eléctrica que la fabricación tradicional. Este punto en contra se puede llegar a contrarrestar al buscar alternativas para la generación de energía mas amigables como el uso de celdas fotovoltaicas o el uso de sustancias químicas que faciliten el proceso.

Finalmente, con respecto al ciclo de vida del producto, teniendo en cuenta el requerimiento buscado de 2 años de uso, en cuanto mayor sea este menor será el impacto ambiental derivado de la fabricación. Cabe destacar que los productos fabricados por medio de la impresión 3D pueden resultar ventajosos al permitir fabricar piezas aisladas, lo cual amplía el ciclo de vida de ese producto en caso de falla o añadidura, incluso para la actualización por piezas con mejores prestaciones

1.8. Presupuesto inicial estimado

Para dar un presupuesto inicial estimado para el proyecto se tuvo en cuenta los requerimientos y especificaciones de ingeniería, con estos se busco elementos que en un principio los cumplan y permitan el desarrollo del proyecto.

Se busco los elementos básicos relacionados con la contracción de la plataforma cinematográfica, como lo son los perfiles de aluminio y gastos varios relacionados a la correa, polea y tornillería. Adicionalmente se considero un material de impresión para el mecanismo y un tiempo de impresión aproximado con estructuras de tamaño similar; Se considero la compra de 3 actuadores, en este caso Motores RoboMaster y diferentes elementos relacionados con el sistema de control como es la Raspberry PI 4 y un microcontrolador. Finalmente se tuvo en cuenta el sistema de alimentación y las licencias necesarias para su diseño.

Recurso	Uso en el proyecto	Cantidad	Valor unitario	Valor total
RoboMaster GM6020 Brushless DC Motor	Motores para prototipo pierna 3GDL	3	\$966,600	\$ 2'899,800
Fuente de voltaje 24vdc 20Amp	Fuente de Poder	1	\$155,000	\$155,000
Raspberry Pi 4 Modelo B versión 8GB	Ejecución de lazos de control de alto nivel	1	\$362,950	\$362,950
KSA-15E-051300	Fuente oficial de alimentación Raspberry PI 4	1	\$34,100	\$34,100
HCPL-2211	Aislamiento interno de alta inmunidad	6	\$6,100	\$ 36,600
CBL MICROHDMI	Cable con terminales de salida micro HDMI a HDMI para Raspberry	1	\$14,000	\$14,000
Tarjeta XL4015	Fuente Variable de 1.25-32 VDC para acomple de elementos	3	\$12,800	\$ 38,400
TPU 1.75mm Negro 0.8kg	Material para amortiguamiento	1	\$ 126,000	\$ 126,000
Modulo ESP32 IOT y WiFi	Microcontrolador para el control de los motores	2	\$ 31,640	\$ 63,280
PETG	Filamento para impresión 3D	3	\$125,000	\$375,000
Perfil de aluminio	Construcción de la base para experimentación	1	\$94,472	\$94,472
Impresión 3D	Impresión 3D de los dos eslabones de la pierna	1	\$100,000	\$100,000
Gastos varios	Correa, polea, tornillería, cable	1	\$50,000	\$50,000
Total				\$4'331,602

Cabe aclarar que este presupuesto tiene en cuenta la construcción del prototipo, sin embargo, en la asignatura "Proyecto Aplicado de Ingeniería" solo se llegara a la etapa de diseño.

2. Diseño Conceptual

2.1. Análisis funcional

En esta fase se hace necesario conocer las funciones que la solución debe cumplir, para tal fin se recurre al análisis funcional por medio del modelo de caja negra y caja gris al permitir entender mejor la función general del dispositivo.

Se realizo un diagrama que permite ver tanto la caja negra (Prototipo de Pierna de 3GDL para Experimentación Cinemática) como las cajas grises correspondientes al sistema mecánico y sistema de control, en estos se tomo el color azul para representar el flujo información, verde para energía y morado para el material.

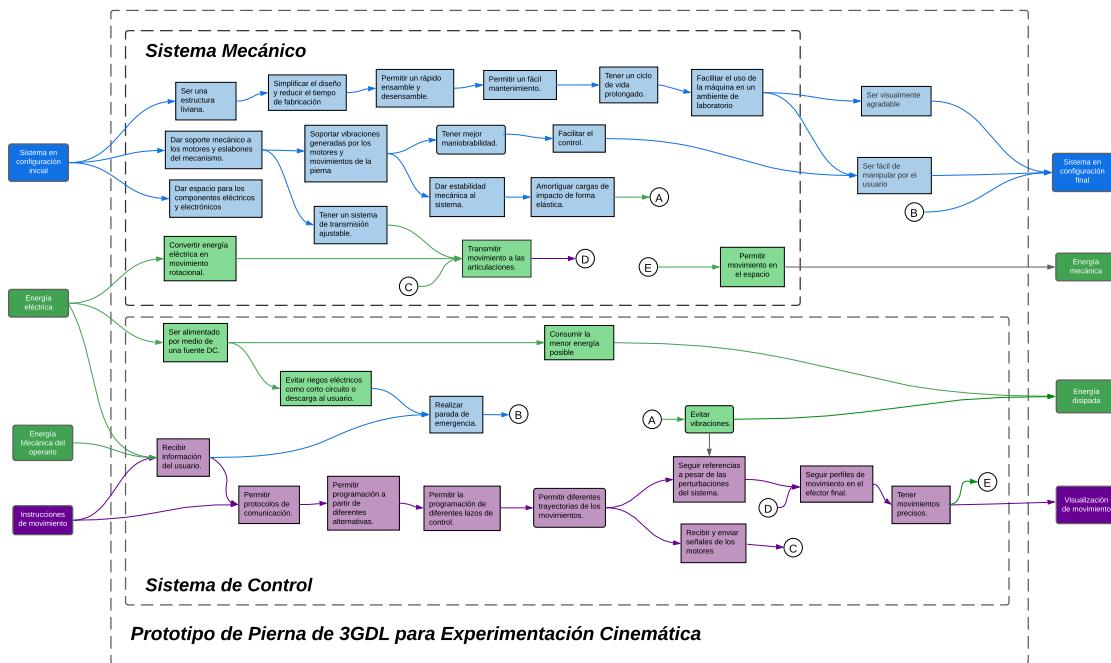


Figura 32: Análisis funcional Diagramas Caja negra y Gis

Adicionalmente teniendo las funciones principales del diagrama mostrado en la figura 32 se relacionaron con los requerimientos ya planteados, y se realizo una tabla 33.

2.2. Mapeo Funcional

Mediante el uso de mapeo de procesos se realiza un análisis esquemático de las funciones y flujo operacional que se manejan dentro del diseño propuesto y se organiza un mapa que muestra según su importancia la interrelación de diferentes aspecto de trabajo.

Requerimiento	Función	
Fabricación de los eslabones mediante impresión 3D	Permitir un fácil mantenimiento.	Mecánica
Fácil limpieza de los elementos usados en las uniones	Transmitir movimiento a las articulaciones.	Control
Sistema de transmisión de potencia mecánica en la rodilla	Tener un sistema de transmisión ajustable.	General
Ajuste del sistema de transmisión de potencia mecánica	Convertir energía eléctrica en movimiento rotacional.	
Convertir energía eléctrica en movimiento	Permitir movimiento en el espacio	
Sistema de 3 grados de libertad	Facilitar el control.	
Mecanismo de eslabones serials	Baja inercia en cada uno de los eslabones	
Baja inercia en cada uno de los eslabones	Tener mejor manejabilidad.	
Fácil ensamblaje y desensamblaje	Permitir un rápido ensamblaje y desensamblaje.	
Ciclo de vida prolongado	Tener un ciclo de vida prolongado.	
Implementación resorte para amortiguación	Amortiguar cargas de impacto de forma elástica.	
Resistencia a impactos	Permitir movimiento en el espacio	
Peso reducido	Ser una estructura liviana.	
Implementación de topes de goma	Dar estabilidad mecánica al sistema.	
Alta fricción entre la estructura y el suelo	Permitir vibraciones generadas por los motores y movimiento de la pierna.	
Suficiente espacio para componentes eléctricos y electrónicos	Dar espacio para los componentes eléctricos y electrónicos.	
Niveles de ruido auditivo tolerables	Facilitar el uso de la máquina en un ambiente de laboratorio.	
Implementación de piezas normalizadas	Simplificar el diseño y reducir el tiempo de fabricación.	
Estructura de tamaño reducido y resistente	Dar soporte mecánico a los motores y eslabones del mecanismo.	
Estructura de soporte metálica	Soporar vibraciones generadas por los motores y movimiento de la pierna.	
Control de torque de los motores	Brindar estabilidad y asequibilidad.	
Variables de movimiento configurables	Evitar vibraciones.	
Obtener y enviar información de los motores.	Permitir diferentes trayectorias de los movimientos.	
Control por medio de tarjetas electrónicas programables	Recibir y enviar señales de los motores.	
Possibilidad de programar lazos de control de alto y bajo nivel	Permitir la programación de diferentes lazos de control.	
Control de posición del efecto final	Seguir perfiles de movimiento en el efecto final.	
Control de trayectorias	Tener movimientos precisos.	
Precisión de los movimientos	Seguir referencias a pesar de las perturbaciones del sistema.	
Funcionamiento por medio de fuente externa DC	Permitir programación a partir de diferentes alternativas.	
Sistema de control robusto	Permitir la simulación, análisis y programación del sistema.	
Compatibilidad con diferentes plataformas de programación	Recibir información del usuario.	
Uso de MATLAB como plataforma de programación	Permitir protocolos de comunicación.	
Interfaz de usuario por medio de computador	Evitar riesgos eléctricos como corto circuito o descarga al usuario.	
Implementación de protocolos de comunicación	Realizar parada de emergencia.	
Aislamiento básico de los elementos eléctricos	Consumir la menor energía posible.	
Implementación sistema de seguridad	Ser fácil de manipular para el usuario.	
Bajo Consumo de energía	Ser visualmente agradable.	
Diseño ergonómico		
Fácil de transportar		
Visualmente agradable		

Figura 33: Relación Requerimientos-Funciones

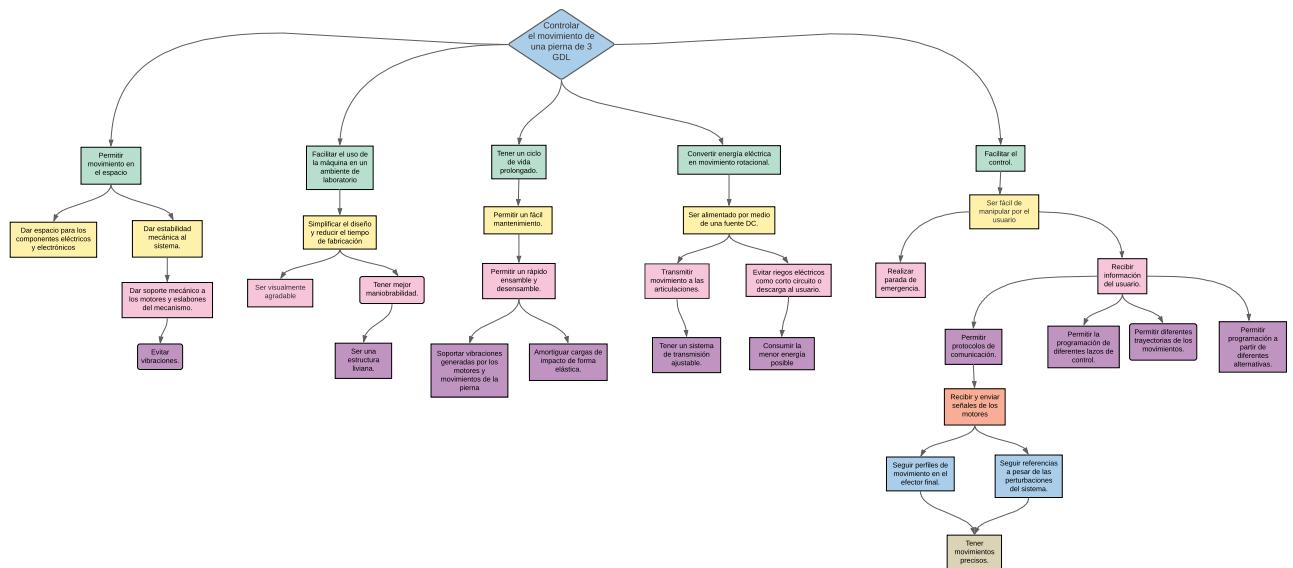


Figura 34: Mapeo Funcional según su importancia.

2.3. Aplicación de TRIZ

1. Se busca que la estructura de soporte sea lo más estable posible pero que a la vez ocupe un volumen reducido para su implementación en un laboratorio.

Contradicción 1	Parámetros generalizados	Principio de inventiva
Parámetro a mejorar	13. Estabilidad de un objeto	28. Reemplazo de sistemas mecánicos 34. Restauración y regeneración de partes 35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto
Parámetro que se deteriora	8. Volumen de un objeto sin movimiento	40. Materiales compuestos

Principio de inventiva	40. Material compuesto
Descripción de la solución	Se busca que la estructura esté construida con diferentes materiales como aluminio y acero para así obtener la mayor estabilidad posible ocupando el menor volumen.

2. La pierna debe tener una durabilidad alta, pero a la vez debe ser fácil de fabricar para realizar de manera más ágil las tareas de reparación y mantenimiento.

Contradicción 2	Parámetros generalizados	Principio de inventiva
Parámetro a mejorar	15. Durabilidad de un objeto en movimiento	1. Segmentación 4. Asimetría
Parámetro que se deteriora	32. Manufacturabilidad	27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable

Principio de inventiva	27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable
Descripción de la solución	Se implementarán piezas impresas en 3D las cuales sean fácil de manufacturar y reemplazar sin comprometer la vida de otras piezas más caras o más difíciles de elaborar.

3. El tiempo de establecimiento de la pierna para seguir las referencias deseadas se busca que sea lo más corto posible. Sin embargo, también se deben tener en cuenta los límites de energía impuestos por la fuente a utilizar.

Contradicción 3	Parámetros generalizados	Principio de inventiva
Parámetro a mejorar	9. Velocidad	8. Contrapeso 15. Dinamicidad
Parámetro que se deteriora	19. Energía gastada por un objeto en movimiento	35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto 38. Uso de oxidantes fuertes

Principio de inventiva	35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto
Descripción de la solución	Disminuir la densidad de las piezas a utilizar con diferentes métodos de manufactura como la impresión 3D manejando diferentes porcentajes de densidad de relleno.

4. Se busca que el control de la pierna sea lo más simplificado posible para así implementar algoritmos de alto nivel un poco más complejos. Por otra parte, una simplificación en el control constituye un aumento en la complejidad del sistema mecánico, sobre todo para satisfacer el amortiguamiento deseado.

Contradicción 4	Parámetros generalizados	Principio de inventiva
Parámetro a mejorar	37. Complejidad de control	10. Acción previa 15. Dinamicidad
Parámetro que se deteriora	36. Complejidad de un mecanismo	28. Reemplazo de sistemas mecánicos 37. Expansión térmica

Principio de inventiva	10. Acción previa
Descripción de la solución	Colocar elementos elásticos en los eslabones que soportarán mayor carga mecánica luego de un impacto para así obtener el comportamiento deseado de amortiguamiento.

5. La estructura que soporta la pierna debe ser liviana para así poder manipularla con facilidad, pero no se puede olvidar la resistencia y rigidez necesaria de la estructura para mantener un adecuado funcionamiento.

Contradicción 5	Parámetros generalizados	Principio de inventiva
Parámetro a mejorar	38. Nivel de automatización	25. Autoservicio 27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable 34. Restauración y regeneración de partes
Parámetro que se deteriora	37. Complejidad de control	

Principio de inventiva	25. Autoservicio
Descripción de la solución	Se implementa una red entre los motores para así enviar las instrucciones en conjunto y no individualmente a cada motor.

2.3.1. Técnicas de Creatividad

En las diferentes sesiones en las que se utilizaron técnicas de creatividad en la búsqueda de ideas variadas, se utilizaron métodos como lluvia de ideas, palabra aleatoria y creatividad por analogía.

Para la lluvia de ideas o *brainstorming*, en un primer lugar se buscaba mas cantidad que calidad, es decir, obtener todas las ideas posibles sin mayores expectativas en cuanto a la eficiencia respecto al cumplimiento de requerimientos de diseño, simplemente se plantea un tema a desarrollar, por ejemplo, el sistema de control, cada miembro escribía la mayor cantidad de ideas al respecto, al finalizar un tiempo establecido el integrante del equipo exponía sus ideas para una evaluación posterior. Al finalizar la lluvia de ideas de todos los temas a tratar, se realizaba una revisión por todo el grupo donde los demás miembros evaluaban la viabilidad de estas ideas y su cumplimiento respecto a los requisitos. Este método fue de gran utilidad al brindar una amplia gama de ideas en un tiempo reducido y obtención de diversas soluciones.

Realizada una sesión de lluvia de ideas, se realizó una sesión enfocada en las palabras aleatorias o Random Input, para esta sesión uno de los integrantes decía una palabra aleatoria y los demás integrantes debían encontrar una manera de integrarlo a los conceptos, ya sea de manera directa o con un atributo asociado con la palabra, así hasta completar todos los integrantes; al finalizar se hacia una evaluación conjunta de las diferentes ideas.

Para finalizar, teniendo en cuenta las técnicas ya utilizadas se realizó una sesión enfocada en analogía en donde se buscaba la asociación de elementos y extraer un conocimiento similar que pueda llegar a ser aplicado en los diferentes conceptos. Esta sesión buscaba involucrar una búsqueda externa que permitiese empaparse de ideas externas al equipo de trabajo. En primer lugar, se plantea una temática central a la cual se buscarían diferentes soluciones utilizadas para resolver un problema similar en otros contextos, por ejemplo, en la robótica industrial, inspirarse en la naturaleza ya sea en arácnidos o mamíferos, o inclusive juguetes. Esta se realizó de manera grupal donde todo el equipo participaba en la generación de la idea por asociación.

Con diferentes conceptos y teniendo en cuenta el método TRIZ, se muestre el resultado en la sección 2.3.2 en donde se buscó seleccionar de manera general los conceptos que mejor cumplan con los requerimientos y especificaciones, adicionalmente en la sección 2.4 donde se integran diferentes conceptos en 4 alternativas.

2.3.2. Generación de conceptos

Subfunciones	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4	Concepto 5
F1: Transmitir movimiento a las articulaciones	Transmisión por correa	Transmisión por cadena	Tren de engranajes	Mixto Correa - Engranajes	Transmisión directa del motor en la articulación
F2: Convertir energía eléctrica en movimiento rotacional.	Servomotores	Motores DC	Motores Paso a Paso		
F3: Amortiguar cargas de impacto de forma elástica	Implementación de elementos elásticos distribuidos en la pierna	Implementación de amortiguadores en la parte inferior de la pierna	Implementación de amortiguadores para el movimiento rotacional entre los dos eslabones de la rodilla	Implementación de suspensión neumática en la parte inferior de la pierna	Comportamiento dinámico amortiguado utilizando control
F4: Soportar vibraciones generadas por los motores y movimientos de la pierna	Generar anclajes al suelo para mantener rígida la estructura	Poner contrapesos para evitar frecuencias de resonancia debidas a las vibraciones	Fijar parte de la estructura a una superficie sin restringirla por completo	Añadir a la parte inferior de la estructura anclajes y recubrimientos de caucho	Elaborar la estructura de un material denso y rígido
F5: Dar soporte mecánico a los motores y eslabones del mecanismo	Utilizar perfiles de aluminio atornillados	Utilizar perfiles de aluminio soldados	Utilizar perfiles de acero atornillados	Utilizar perfiles de acero soldados	Utilizar perfiles de madera
F6: Dar espacio para los componentes eléctricos y electrónicos	Seleccionar perfilería para fácil montaje y desmontaje de cableado	Disposición de un espacio adecuado como panel de control	Utilizar una lámina no conductora para situar los componentes a un costado del montaje de la pierna		
F7: Recibir y enviar señales de los motores	Implementar protocolos de comunicación serial	Enviar las señales directamente a los motores por PWM			
F8: Permitir diferentes trayectorias de los movimientos	Crear perfiles de movimiento	Obtener gráficos de error de posición			
F9: Permitir protocolos de comunicación	Utilizar elementos electrónicos adicionales que permitan la implementación de comunicaciones	Utilizar tarjetas electrónicas y motores con los que se pueda realizar comunicación directamente			
F10: Recibir información del usuario	Implementación de una interfaz de usuario	Enviar los datos directamente desde la consola			
F11: Realizar parada de emergencia	Cortar el flujo de corriente a los motores	Desde una interfaz cancelar los comandos enviados al sistema			
F12: Ser alimentado por una fuente DC	Fuente DC convencional	Batería de litio			
F13: Ser visualmente agradable	Formas redondeadas con acabado de pintura	Formas rectas con acabado superficial pulido	Formas redondeadas con acabado superficial pulido	Formas rectas con acabado de pintura	

2.4. Integración de conceptos

2.4.1. Árbol de clasificación

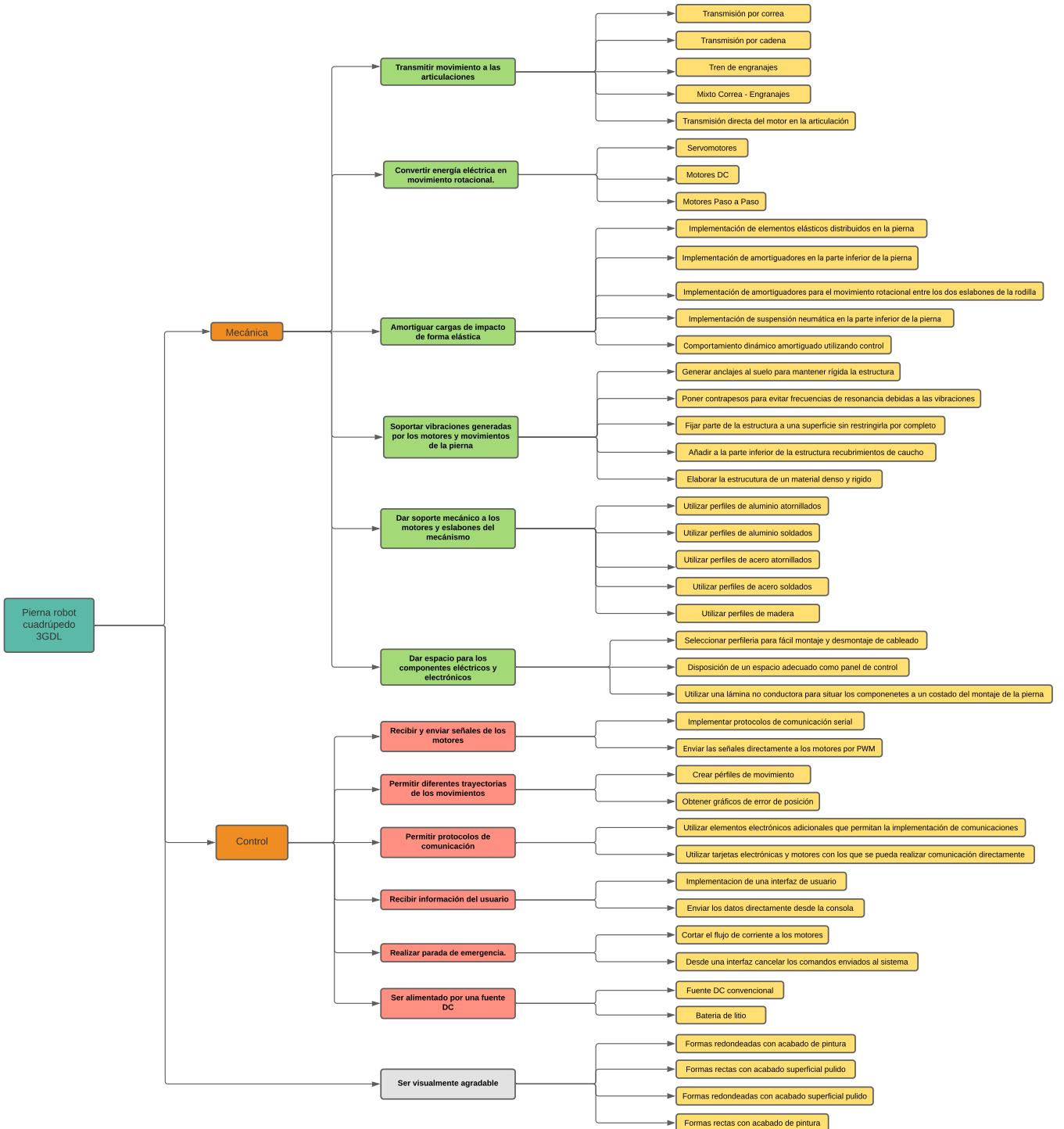


Figura 35: Árbol de clasificación de conceptos.

A continuación se presenta la tabla de combinación correspondiente:

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
F1: Transmitir movimiento a las articulaciones	Transmisión directa del motor en la articulación	Transmisión por cadena	Transmisión por correa	Mixto Correa - Engranajes
F2: Convertir energía eléctrica en movimiento rotacional.	Servomotores	Motores DC	Servomotores	Servomotores
F3: Amortiguar cargas de impacto de forma elástica	Comportamiento dinámico amortiguado utilizando control	Implementación de amortiguadores para el movimiento rotacional entre los dos eslabones de la rodilla	Implementación de elementos elásticos distribuidos en la pierna	Implementación de amortiguadores en la parte inferior de la pierna
F4: Soportar vibraciones generadas por los motores y movimientos de la pierna	Añadir a la parte inferior de la estructura recubrimientos de caucho	Fijar parte de la estructura a una superficie sin restringirla por completo	Añadir a la parte inferior de la estructura anclajes y recubrimientos de caucho	Poner contrapesos para evitar frecuencias de resonancia debidas a las vibraciones
F5: Dar soporte mecánico a los motores y eslabones del mecanismo	Utilizar perfiles de acero atornillados	Utilizar perfiles de acero atornillados	Utilizar perfiles de aluminio atornillados	Utilizar perfiles de aluminio atornillados
F6: Dar espacio para los componentes eléctricos y electrónicos	Seleccionar perfilería para fácil montaje y desmontaje de cableado	Utilizar una lámina no conductora para situar los componentes a un costado del montaje de la pierna	Utilizar una lámina no conductora para situar los componentes a un costado del montaje de la pierna	Colocar los componentes sobre la estructura
F7: Recibir y enviar señales de los motores	Implementar protocolos de comunicación serial	Enviar las señales directamente a los motores por PWM	Implementar protocolos de comunicación serial	Implementar protocolos de comunicación serial
F8: Permitir diferentes trayectorias de los movimientos	Crear perfiles de movimiento	Crear perfiles de movimiento	Obtener gráficos de error de posición	Crear perfiles de movimiento
F9: Permitir protocolos de comunicación	Utilizar elementos electrónicos adicionales que permitan la implementación de comunicaciones	Utilizar tarjetas electrónicas y motores con los que se pueda realizar comunicación directamente	Utilizar tarjetas electrónicas y motores con los que se pueda realizar comunicación directamente	Utilizar elementos electrónicos adicionales que permitan la implementación de comunicaciones
F10: Recibir información del usuario	Enviar los datos directamente desde la consola	Implementación de una interfaz de usuario	Implementación de una interfaz de usuario	Enviar los datos directamente desde la consola
F11: Realizar parada de emergencia	Desde una interfaz cancelar los comandos enviados al sistema	Desde una interfaz cancelar los comandos enviados al sistema	Cortar el flujo de corriente a los motores	Cortar el flujo de corriente a los motores
F12: Ser alimentado por una fuente DC	Fuente DC convencional	Fuente DC convencional	Fuente DC convencional	Batería de litio
F13: Ser visualmente agradable	Formas redondeadas con acabado superficial pulido	Formas redondeadas con acabado superficial pulido	Formas rectas con acabado superficial pulido	Formas rectas con acabado superficial pulido

2.5. Generación de las alternativas de solución

Alternativa 1:

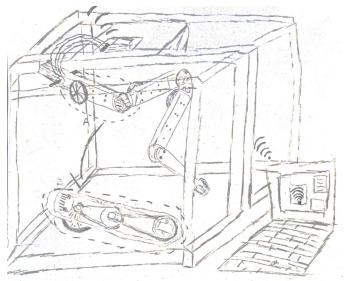


Figura 36: Boceto de Alternativa 1.

Esta alternativa implementa servomotores que permiten establecer redes de comunicación. Uno de los tres servomotores está ubicado directamente sobre la articulación lo que evita el

uso de un sistema de transmisión del movimiento. En el extremo de la pierna cuenta con un recubrimiento de caucho que mejora la fricción entre la pieza y el suelo. Se hará uso de perfilería de acero para realizar un cubo que limite el espacio de trabajo y asimismo se facilite el montaje y desmontaje del cableado. Para el amortiguamiento de cargas de impacto se pretende el uso de algoritmos de control que brinden un comportamiento dinámico amortiguado. Se hará uso de comunicación serial que garantice la transmisión y recepción de señales a los motores, para los motores la conversión de señales lógicas a señales de potencial se realizará por medio de un puente H; es necesario que los motores a implementar permitan establecer redes de comunicación con ayuda de elementos electrónicos adicionales.

Esta alternativa propone que desde la consola se pueda recibir la información ingresada por el usuario y que esta pueda ser transmitida de manera inalámbrica mediante red WiFi utilizando el protocolo IEEE 802.11, dicha comunicación de señales lógicas pretende ser convertida a señales de potencia mediante la implementación de un puente H..

Se propone ubicar el sistema eléctrico en la parte superior de la caja desarrollada con los perfiles, para contener todo el prototipo de manera compacta, además de intentar aprovechar la superficie suministrada por la estructura.

Ventajas:

- Fácil construcción al no necesitar de un sistema de transmisión largo para las articulaciones.
- Comunicación inalámbrica sencilla al estar fundamentada en un protocolo conocido.
- Estructura grande y robusta que permite una resistencia a cargas lineales.

Desventajas:

- Al ubicar un motor en la articulación de la rodilla aumenta el momento de inercia de los eslabones lo que impide que sean despreciables, complicando el modelamiento matemático de la estructura y posteriormente su control.
- Control para el prototipo mas complejo, al hacerse necesario simular los elementos elásticos en el mismo.
- El diseño de la estructura de soporte puede presentar vibraciones o pandeos debido a la disposición de los perfiles y cargas rotacionales.
- La ubicación de los motores genera una mayor carga sobre los mismos lo cual implica un mayor consumo de energía.

Alternativa 2:

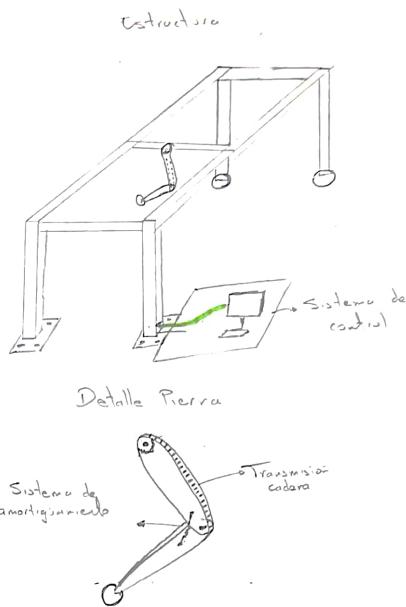


Figura 37: Boceto de Alternativa 2.

Esta alternativa sugiere un diseño el cual implementa 3 motores DC ubicados en serie, por lo cual requiere un sistema de transmisión por cadena para el movimiento de la articulación de la rodilla. Asimismo, se pretende implementar elementos elásticos en la articulación mencionada para amortiguar el movimiento rotacional entre los dos eslabones implicados. Para disminuir la inercia de los eslabones se sugiere utilizar materiales de baja densidad en la fabricación de los eslabones. Para la estructura de soporte se piensa fijar parte de esta a una superficie sin restringirla por completo, así como incluir una lámina de material no conductor para agrupar los componentes electrónicos cerca al montaje de la pierna. Para permitir el libre movimiento de la pierna dicha estructura es de mayor altura a la de la pierna estirada. En cuanto a la comunicación con los motores se propone hacerlo mediante señales PWM y utilizar tarjetas electrónicas y motores con los que se pueda realizar esta comunicación directamente o inalámbriamente vía Bluetooth, todo esto controlado por el usuario mediante una interfaz gráfica.

Ventajas:

- El sistema de transmisión por cadena es un sistema de transmisión de movimiento bastante óptimo.
- Permite un amplio espacio de trabajo para la pierna
- Facilidad para el montaje y desmontaje de elementos electrónicos y mecánicos.

Desventajas:

- Baja estabilidad debido a que no está totalmente anclado al suelo.

- Los motores DC no ofrecen un movimiento exacto, por lo cual, puede presentar errores de control de torque y posición.
- Los elementos elásticos propuestos pueden generar fallas en el movimiento de la pierna debido a su ubicación.

Alternativa 3:

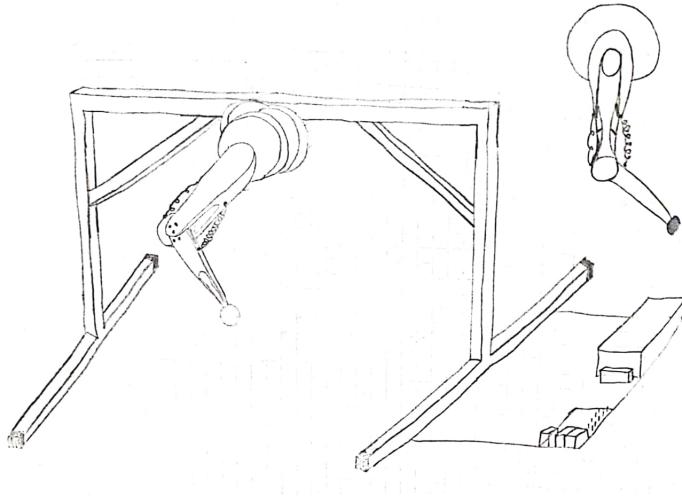


Figura 38: Boceto de Alternativa 3.

Esta alternativa propone el diseño de una pierna robótica con eslabones impresos en 3D la cual utiliza servomotores con control de torque y con la capacidad de ser implementados en una red CAN. Esta alternativa coloca todos los motores agrupados en un mismo espacio conectados serialmente, el motor más externo es el que realiza el movimiento de la rodilla haciendo uso de un sistema de transmisión por correa. Por otra parte se propone colocar dos resortes entre los dos eslabones de la pierna para así amortiguar cualquier carga de impacto mecánico que se pueda presentar.

Se propone que la estructura de base utilizada sea hecha de perfiles de aluminio con algunos refuerzos estructurales para mejorar la rigidez del sistema. Adicionalmente se propone que a un costado de la estructura se ubique una lámina de un material no conductor para ubicar todos los componentes electrónicos. Esta lámina puede ser fijada a la estructura y así puede ser usada como contrapeso tomando en cuenta el aporte del peso de los componentes ubicados en ella.

Se propone la utilización de tarjetas como la RaspberryPi que permiten la implementación de protocolos de comunicación serial e inalámbrica útiles para la conexión con plataformas de programación.

Ventajas:

- Permite un amplio espacio de trabajo para la pierna.
- Ocupa un volumen compacto cuando no está en funcionamiento.
- Permite disminuir la inercia de los eslabones

Desventajas:

- Los componentes a utilizar son de alto costo.
- El ensamble de la pierna se puede complicar un poco por los elementos elásticos propuestos.
- La implementación de redes de comunicación aumenta el consumo de energía del sistema.

Alternativa 4:

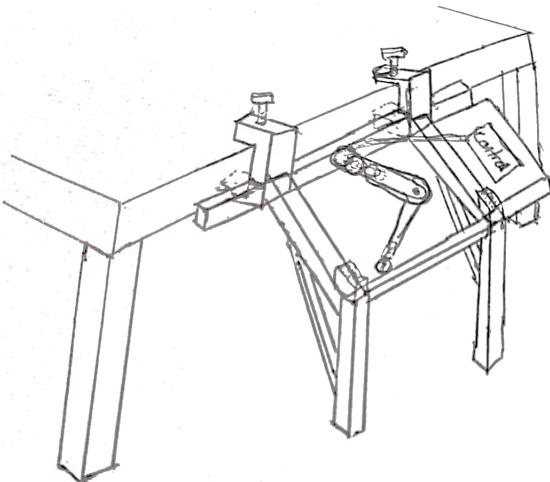


Figura 39: Boceto de Alternativa 4.

Esta alternativa implementa tres servomotores dispuestos serialmente con un sistema de transmisión por correa y engranajes para el movimiento de la articulación de la rodilla. Para la amortiguación de cargas de impacto, esta alternativa propone implementar amortiguadores en la parte inferior de la pierna. Asimismo, propone disminuir los momentos de inercia del mecanismo variando las longitudes de los eslabones, para llegar a la óptima que permita despreciar la masa de dichos elementos. Para soportar vibraciones debido a los motores y movimientos de la pierna esta alternativa propone incluir contrapesos en la estructura para evitar frecuencias de resonancia, así como asegurar con pernos la pierna a la estructura de soporte y que ésta esté anclada a una mesa para garantizar el libre movimiento de la pierna.

Ventajas:

- Estructura con una geometría sencilla y fácil de transportar o almacenar cuando no está en uso.

- El panel de control está a una altura adecuada para su manipulación.
- Amplio espacio para el movimiento de la pierna

Desventajas:

- Se requiere siempre tener una mesa para poder implementarla.
- La transmisión mixta correa-engranes implica un mayor número de piezas y mayor costo, además de un montaje que se puede complicar por lo mismo.
- Por la forma de la estructura, esta misma es susceptible a deformaciones.

En la siguiente tabla se hace un resumen de las características de cada alternativa más determinantes para su selección.

Requerimientos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Material de la pierna	PLA	PLA	PLA	PLA
Material de la estructura	Acero	Aluminio	Aluminio	Acero
Tipo de apoyo de la estructura	Superficial alta fricción	Empotrado	Superficial alta fricción	Empotrado
Sistema de transmisión rodilla	Actuador sobre la articulación	Cadena	Correa	Correa
Grados de libertad en sus piernas	3	3	3	3
Inercia de las piernas comparadas con el cuerpo	Alta	Media	Baja	Baja
Sistema de amortiguamiento	Algoritmo de Control	Resorte de compresión	Resorte de torsion	Amortiguadores
Peso estimado del sistema	10kg	7kg	6kg	7 g
Motores utilizados	Servomotor	Motor DC	Servomotor	Servomotor
Consumo energético aproximado	24V-40Amp	24V-40Amp	24V-40Amp	24V-40Amp
Plataformas de programación conocidas	Matlab	Matlab	Matlab	Matlab

2.6. Evaluación de Alternativas

Requerimiento	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Fácil limpieza de los elementos usados en las uniones	2	4	1	3	2
Baja inercia en cada uno de los eslabones	8	1	2	3	4
Fácil ensamblaje y desensamblaje	6	3	1	4	2
Resistencia a impactos	8	4	2	3	1
Peso reducido	5	1	2	4	3
Alta fricción entre la estructura y el suelo	7	2	4	1	3
Suficiente espacio para componentes eléctricos y electrónicos.	10	1	4	3	2
Estructura de tamaño reducido y resistente	10	1	2	3	4
Fácil de transportar	3	2	1	3	4
Visualmente agradable	8	4	2	3	1
Diseño ergonómico	8	4	2	3	1
Total		27	23	33	27
Peso ponderado		175	173	222	180

La evaluación anterior se realizó asignándole a cada alternativa puntajes de 1 a 4 en cada uno de los criterios a evaluar, en donde 4 representa el mejor cumplimiento del criterio y 1 el cumplimiento no tan deseado del criterio.

Además de esto, a cada criterio se le asignó un peso de acuerdo a su importancia para el sistema. Con estos pesos y las posiciones asignados anteriormente se realiza un puntaje total ponderado para ver que alternativa es la más recomendable.

Se escoge la alternativa que obtuvo el mayor puntaje, y a partir de esta se realiza la definición del concepto global dominante que se presentará más adelante, en este caso, la alternativa 3 fue la alternativa más adecuada.

2.7. Descripción del concepto global dominante general

A partir de la alternativa 3 se tuvo una reunión con el profesor Ricardo Emiro Ramírez quien realizó comentarios que se tuvieron en cuenta para la selección del concepto global dominante general y una elaboración de un nuevo boceto.

El concepto global dominante propone el diseño de una pierna robótica con eslabones impresos en 3D la cual utiliza servomotores con control de torque y con la capacidad de ser implementados en una red CAN. Esta alternativa coloca todos los motores agrupados en un mismo espacio conectados serialmente, el motor más externo es el que realiza el movimiento de la rodilla haciendo uso de un sistema de transmisión por correa. Los demás motores transmiten el movimiento directamente utilizando acoplos rígidos. Por otra parte se propone colocar dos resortes entre los dos eslabones de la pierna para así amortiguar cualquier carga de impacto mecánico que se pueda presentar.

Se propone que la estructura de base utilizada sea hecha de perfiles de aluminio con algunos refuerzos estructurales para mejorar la rigidez del sistema. Adicionalmente se propone que a un costado de la estructura se ubique una lámina de un material no conductor para ubicar todos los componentes electrónicos. Esta lámina puede ser fijada a la estructura y así puede ser usada como contrapeso tomando en cuenta el aporte del peso de los componentes ubicados en ella.

Se propone la utilización de tarjetas como la RaspberryPi que permiten la implementación de protocolos de comunicación serial e inalámbrica útiles para la conexión con plataformas de programación.

3. Generación detallada del producto

3.1. Generación diseño mecánico

3.1.1. Procedimiento de diseño

Para iniciar con el proceso de diseño mecánico para el prototipo deseado se realizó un análisis de los requerimientos del cliente y a partir de este punto se propusieron diferentes bocetos considerando los conceptos que cada integrante del grupo tenía en ese momento, y a partir de este punto se realizó una secuencia de pasos que se describirán a continuación:

- Diseño físico: El cliente nos expuso las necesidades del diseño y diseños de los cuales se

podrían sacar características importantes para proponer el prototipo.

- Especificación de diseño: Se propusieron valores para ciertas condiciones que se consideraron importantes dentro del diseño, se comentaron con el cliente y a partir de esto se llegaron a valores finales y de referencia para la realización del diseño.
- Descomposición conceptual: Se realizó el análisis de la función de cada uno de los componentes que se tenían en el diseño, se plantearon la interacción entre estos y como se acoplaban para cumplir con la función final.
- Selección de materiales y procesos: Para cada componente del diseño se plantearon materiales que pudieran soportar las cargas y esfuerzos generados por el funcionamiento del sistema, se buscaron componentes normalizados y comerciales, para las piezas con diseño personalizado se buscó un diseño que permitiera la fabricación mediante manufactura aditiva.
- Determinación de características especiales y conectividades y funcionalidad: Luego de tener los materiales y el modelado final, se procedió a identificar las características individuales de cada pieza, esto se consignó en los planos de las piezas donde se indican tolerancias y especialidades de cada componente.

3.1.2. Selección de componentes normalizados

- **Remaches:** Para unir los perfiles de la estructura se utilizan chapas y remaches. Estos remaches son de referencia DIN 124 - A 10 x 18, que tienen 10 mm de diámetro, y la distancia que unen es de 6 mm (chapa de 3 mm y perfil de 3 mm). Se requieren 45 remaches idénticos para las uniones dispuestas.

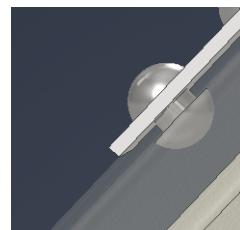


Figura 40: Remache.

- **Profiles:** Se eligen dos perfiles rectangulares huecos de aluminio para la estructura: ISO 100x40x3 y otro ISO 60x40x3. Con el primero se requiere una longitud de 560 mm y hacer unos cortes angulares para unirlo al resto de la estructura, este corresponde al perfil horizontal al que se acopla la pierna. Los demás perfiles se cortarán con la segunda referencia, ISO 60x40x3 y se tomarán las secciones y cortes correspondientes.

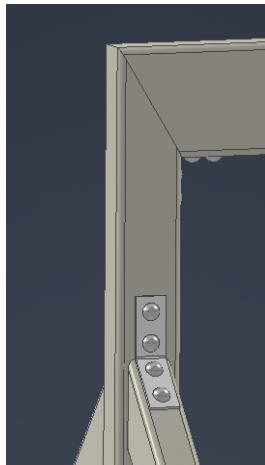


Figura 41: Perfiles.

- **Tornillos:** En toda la pierna hay diferentes uniones que requieren tornillos: la unión de la pierna con la estructura, los acoplos con los motores, los componentes de los eslabones de la pierna, la polea superior con su motor, entre otras. Para cada unión se evalúa tanto la disposición geométrica como el tipo de montaje para cada tornillo, obteniendo así que se requieran los siguientes tornillos:

Referencia Tornillo	Cantidad
PN-85/M-82105 M4 x 60	7
DIN 963 M4 x 14	3
DIN 916 M4 x 8	8
DIN 963 M4 x 16	3
DIN 912 M4 x 12	7
DIN 7985 (H) M4x12-H	8
DIN 7985 (H) M4x10-H	4
DIN 7985 (H) M4x25-H	3

- **Arandelas:** Debido a que se busca que todas las uniones estén perfectamente acopladas, se elige la longitud exacta de los tornillos que se encuentran por catálogo para que no sobre espacio y queden bien atornillados. En los tornillos que unen la polea superior con su motor, la longitud requerida es 24 mm, pero el tornillo más cercano por encima de esta medida es de 25 mm, por lo tanto se utilizan 3 arandelas de 1 mm de grosor para cubrir este espacio y que el ajuste sea perfecto. La referencia de ellas es DIN 125-1 A A 5,3

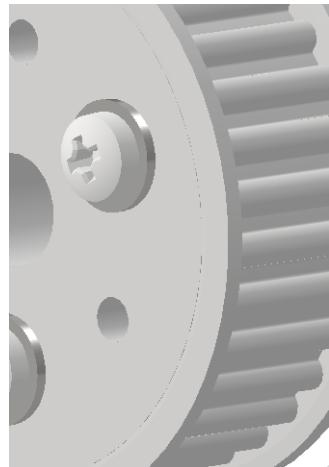


Figura 42: Arandelas.

- **Rodamientos:** Con los cálculos de los apoyos en el eje de la rodilla, y las dimensiones requeridas, se eligieron los rodamientos, los cuales son dos rodamientos iguales cuya referencia es SKF 61801-2RS1

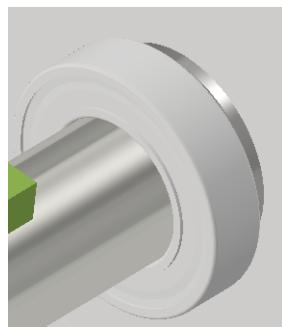


Figura 43: Rodamiento.

3.1.3. Selección de materiales y técnicas de producción para componentes personalizados

- **Chapas:** Para unir los perfiles de la estructura se utilizarán chapas con agujeros, los cuales se ajustan a agujeros hechos en los perfiles, y se unen con remaches. Estas chapas son de aluminio y se fabricarán de 3 tipos diferentes:

1. Con ángulo de 90° , 2 chapas para unir el perfil horizontal superior con los dos perfiles verticales.



Figura 44: Chapa 1.

2. Con ángulo de $136,97^\circ$, 4 chapas para unir los dos perfiles verticales con los perfiles angulares que les corresponden.

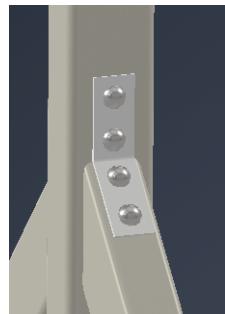


Figura 45: Chapa 2.

3. Con ángulo de $133,03^\circ$, 4 chapas para unir los perfiles angulares con los perfiles horizontales de la parte inferior de la estructura.



Figura 46: Chapa 3.

- **Lámina para el panel de Control** Para ubicar los elementos de control se dispondrá de un espacio fabricado con una lámina de aluminio doblada con agujeros para unir a la estructura mediante remaches como se muestra en la figura 47.



Figura 47: Lámina para el panel de control.

- **Estuches de Caucho:** En la punta de los perfiles horizontales de la parte inferior de la estructura, se pondrán 4 estuches de caucho como los que se ven en la figura 50 con el fin de servir de apoyo y evitar el deslizamiento del montaje sobre la superficie donde se trabaje.

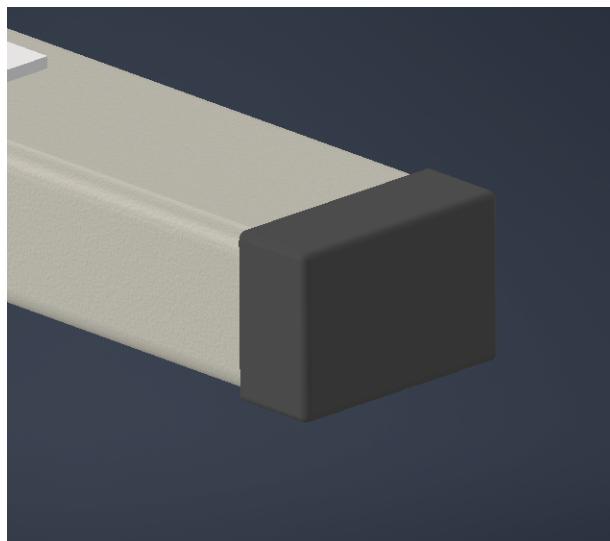


Figura 48: Estuche Caucho.

- **Base Pata:** En la punta de la pata se busca que la superficie sea antideslizante, por lo tanto se elige una bola de caucho para este fin.

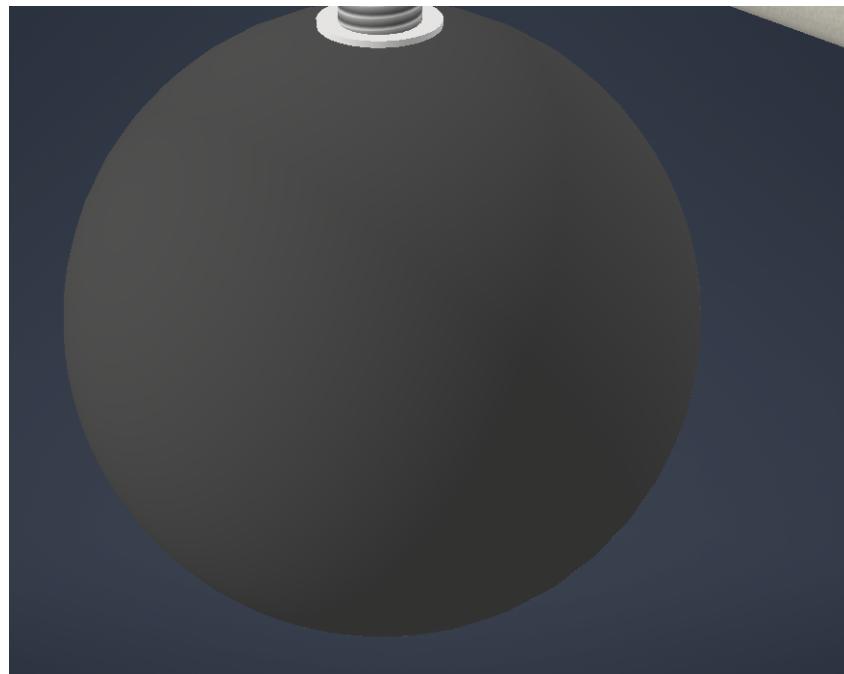


Figura 49: Base Pata.

- **Cilindro Pata:** Para unir la bola de caucho que se tiene como base de la pata al resto de la pierna, se decidió usar un cilindro de aluminio, el cual se va a adherir por fuera a la bola de caucho, y que por dentro será roscada para su fácil instalación y cambio en caso de ser requerido.

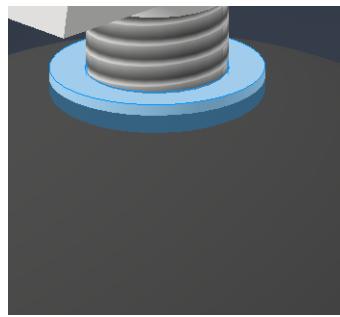


Figura 50: Cilindro Pata.

3.1.4. Cálculos de ingeniería

- **Correa** Para los cálculos de las dimensiones de la pierna, y en especial de la correa; se toman como base las dimensiones máximas permitidas del montaje. Con esto se parte de una longitud inicial estimada de 125 mm de distancia entre centros. Del catálogo de los motores se sabe que tienen un torque máximo de 17 Nm y una velocidad máxima de 40 rad/s. Con estos valores nos remitimos al catálogo SKF para elegir la correa más adecuada, siendo de tipo 5M (síncrona) A continuación se muestran los cálculos

correspondientes a la selección de la correa con base en los valores dados:

w max (rad/s)	w max (rpm)	T max (Nm)	Distancia aproximada entre centros (mm)	Relación de transmisión	Tiempo de servicio (h/día)	Factor de servicio
40	381.9718634	17	125	1	8	1,3
Potencia del motor (kW)	Potencia de diseño (kW)		Diámetro de paso de la polea (mm)	Correa 5M	# dientes (Z)	Se elige la polea PHP-32-5M-15RSB
0,68	0,884		50,93		32	
Largo de la correa (mm)			Distancia entre centros nominal (mm) - Catálogo			
449,92			145			
Largo de la correa más cercano del catálogo (mm)						
450	Se elige la correa PHG-450-5M-15					
a						
	580,00					
Distancia entre centros de diseño (mm)						
	145,00					

Figura 51: Cálculos Selección correa.

De aquí se puede concluir que se eligió la correa **PHG-450-5M-15** y la polea **PHP-32-5M-15RSB** con una distancia entre centros nueva de 145 mm.

Además para otros cálculos, se hallan las fuerzas en el lado tenso y flojo de la correa:

FUERZAS	
Velocidad lineal de la correa (m/s)	
1,018631637	
Fuerza de tracción de la correa (N)	
667,562223	
Fuerza centrífuga de la correa (N)	M (kg/m) - Catálogo
0,06370927929	0,0614
T1 (N) - Lado tenso	Acr - Catálogo
714,3552879	1,07
T2 (N) - Lado flojo	
46,79306489	

Figura 52: Fuerzas en la correa.

Ya con la polea definida se procede al diseño del eje transmisor, el cual soportará el peso de la polea, rodamientos, anillos de retención y transmitirá el movimiento al la parte inferior de las piernas mediante 4 chavetas. Con esta idea se plantea la geometría del eje, teniendo en cuenta la distribución de los elementos y las restricciones necesarias para el funcionamiento. Se determina la geometría del eje transmisor y se muestra en la siguiente imagen. Posteriormente se determinan las cargas que soporta el mismo y con esto se realiza la selección del material. Para este eje se elige **Acero AISI 1040**.

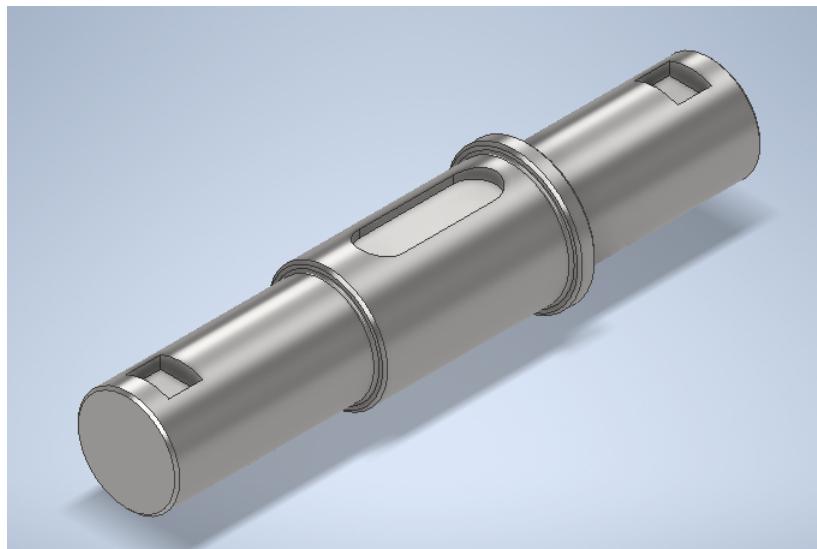


Figura 53: Geometría eje transmisor

Con los análisis y cálculos en el eje transmisor se determinar las cargas de los soportes del mismo. Estas cargas van a ser soportadas por 2 rodamientos de bolas de referencia **SKF 61801-2RS1**, los cuales tienen dimensiones que encajan correctamente con las dimensiones del diseño propuesto.

3.2. Análisis Estructurales

Para el análisis estructural se toma como base el modelado CAD en Autodesk Inventor. Se asignan como apoyos las bases de caucho sobre los perfiles inferiores, que son los puntos en los que se apoya toda la estructura, se asigna materiales a todas las piezas que no lo tengan (piezas fuera del centro de contenido de Inventor), se asigna en vector gravedad y los torques en los motores. Así se considera el peso aproximado de todos los elementos del ensamblaje y las cargas y apoyos en todo el sistema para obtener la siguiente simulación por elementos finitos:

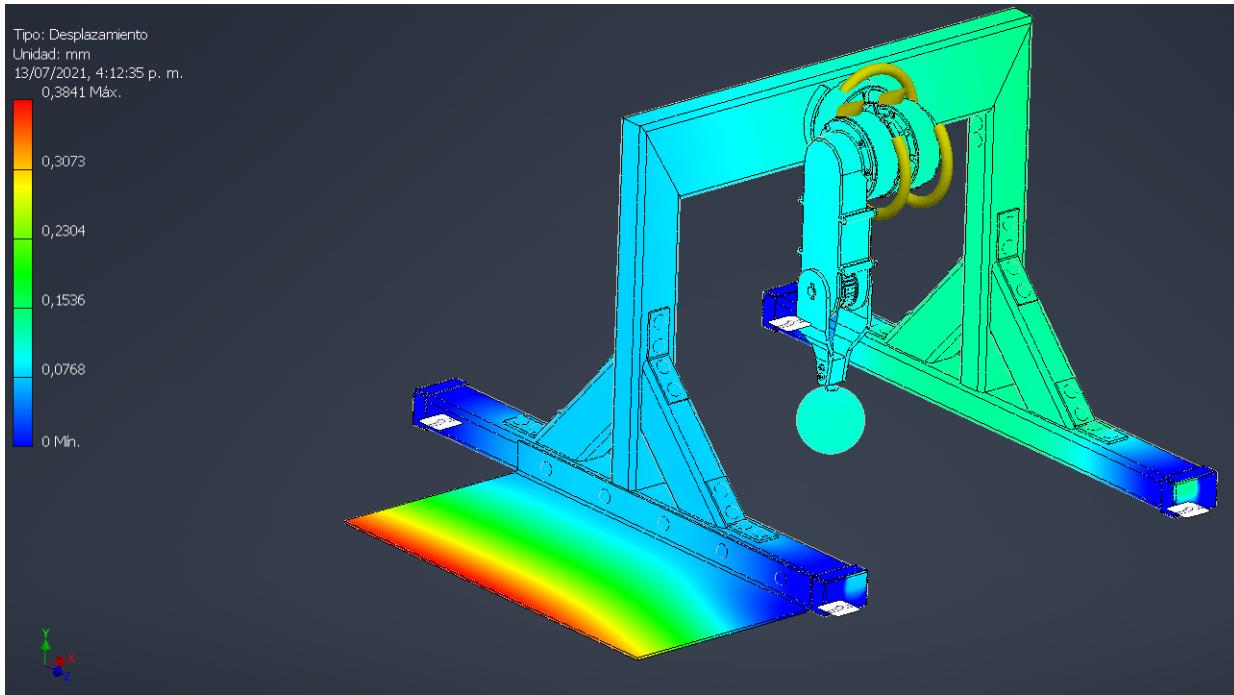


Figura 54: Desplazamiento real estructura.

Aquí se observa que la estructura se deforma muy poco, obteniendo un desplazamiento máximo de 0,3841 mm en el extremo de la lámina en voladizo donde se ubicarán los elementos de control, mientras que en el resto de la estructura los desplazamientos son de alrededor de 0,20 mm o menos, lo que dice que la estructura tiene una rigidez adecuada. A continuación se muestra la misma simulación anterior, pero con un aumento en los desplazamientos para ver mejor las zonas que más se desplazan.

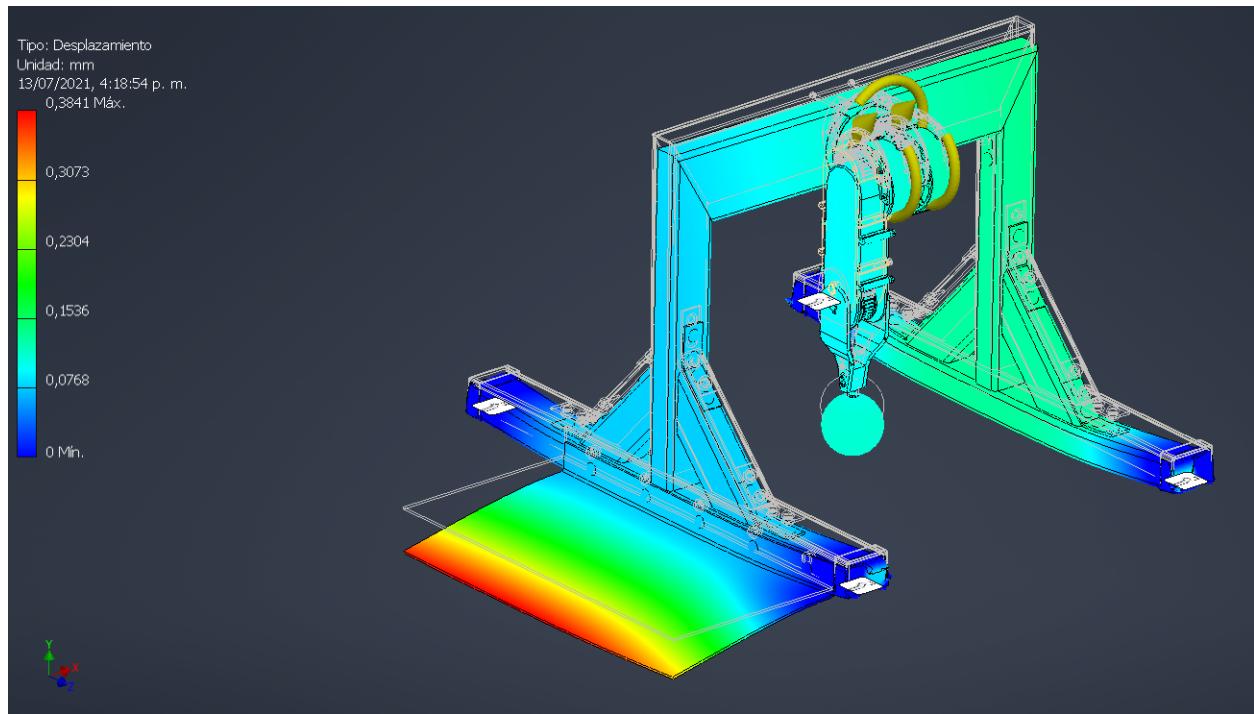


Figura 55: Desplazamiento aumentado estructura.

Ahora para realizar una verificación de resistencia y puntos críticos se realiza una gráfica de factores de seguridad así:

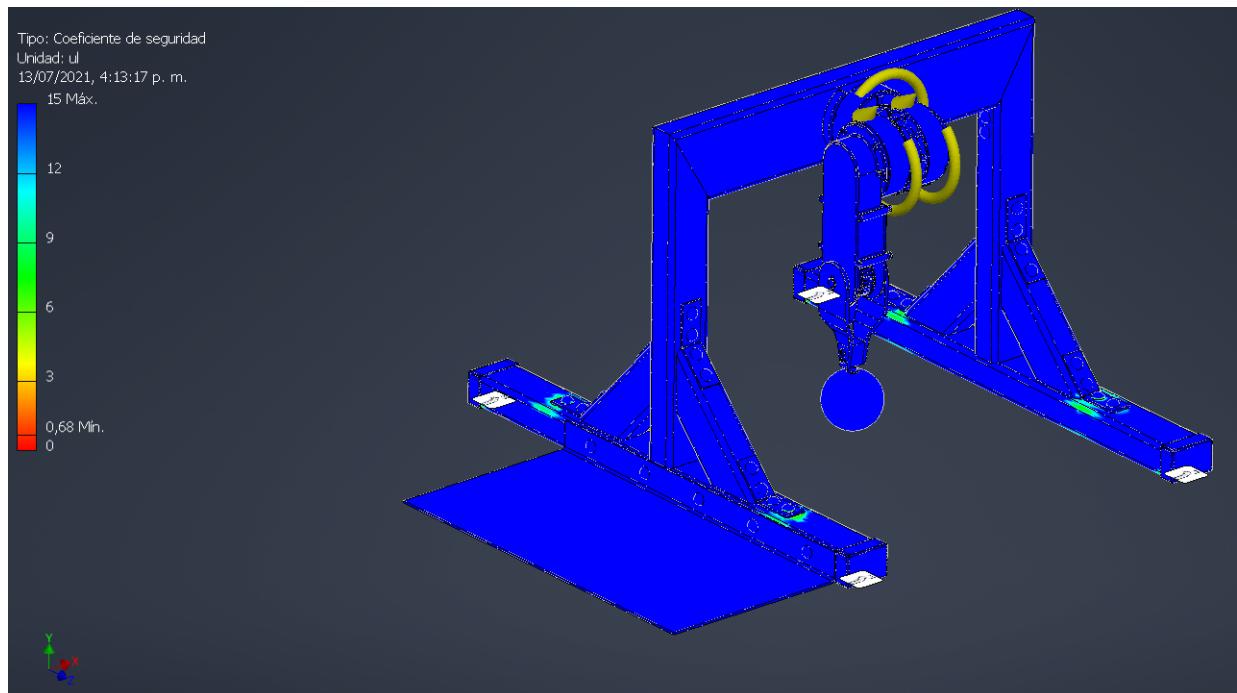


Figura 56: Factores de seguridad estructura.

Allí se observa que en general los factores de seguridad son bastante altos, de alrededor de 15 en la mayoría de la estructura, y que hay algunos puntos críticos donde baja a alrededor de 10 en los puntos de unión de los perfiles angulares con los horizontales de la parte inferior de la estructura; pero aún así siguen siendo bastante altos, por lo cual se puede decir que según esto la estructura soportará las cargas dadas bastante bien.

3.3. Simulación

Se realiza simulación para las piezas fabricadas mediante impresión 3D considerando un volumen de relleno 100 % ya que estas van a ser piezas funcionales, para las simulaciones se trabaja con las propiedades del PETG. Para las piezas se colocaron las restricciones de contacto con los demás elementos, ya con esto se propusieron las cargas sobre cada elementos y se obtuvieron los resultados.

- Eslabón inferior cara externa

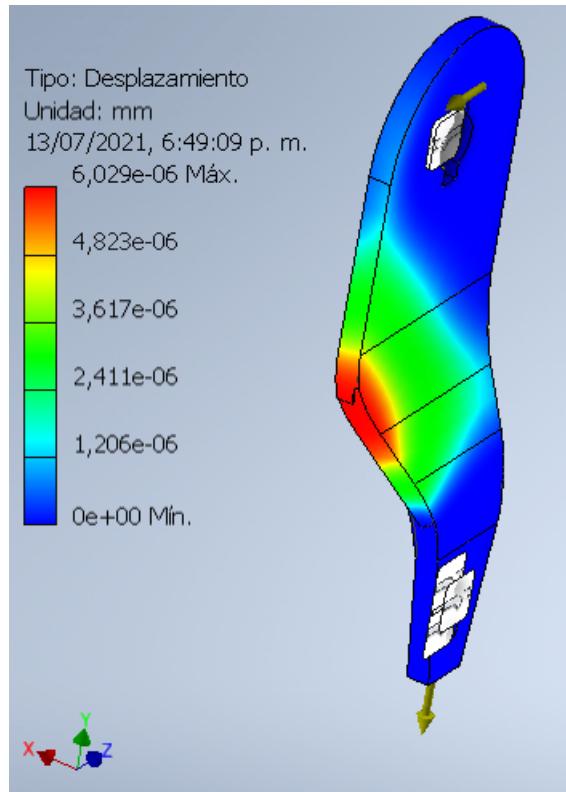


Figura 57: Desplazamiento real eslabón inferior

Se observa que las deformaciones obtenidas para esta pieza son mínimas con respecto a las dimensiones iniciales de las mismas. Por lo tanto se puede concluir soportan las cargas a las cuales esta sometida sin problema alguno.

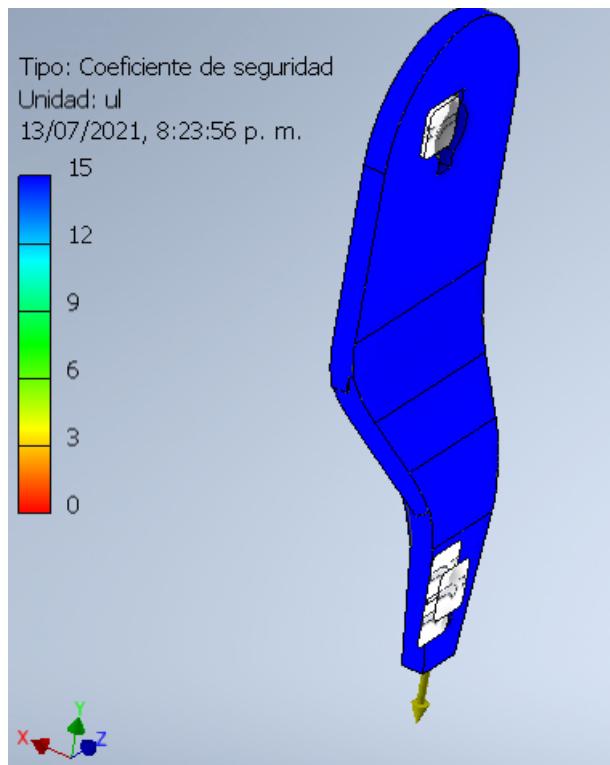


Figura 58: Factor de seguridad a lo largo de la pieza

Como se observa en la imagen anterior el factor de seguridad a lo largo de toda la pieza esta por el orden de 15, con lo cual se cumple con los requerimientos de diseño y funcionalidad de la pieza .

A todos los componentes diseñados por impresión 3D y manejando los mismos parámetros de impresión se les realizaron análisis por medio de elementos finitos con las cargas soportadas por cada una de las piezas y se concluye que el comportamiento de todas es indicado para la fabricación.

3.4. Generación diseño eléctrico

3.4.1. Procedimiento de diseño

En la Figura 59 se muestra un diagrama que representa a grandes rasgos las conexiones necesarias que se deben realizar para poder establecer un circuito eléctrico que garantice la comunicación efectiva entre la fuente de control, es decir el computador, y los motores.

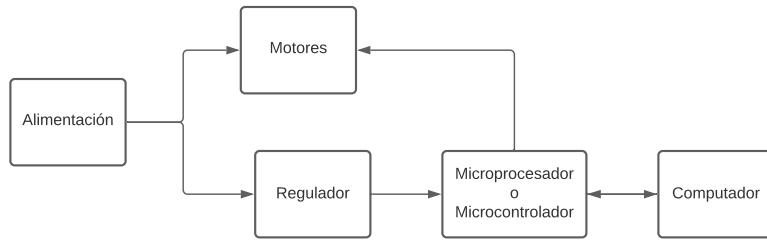


Figura 59: Diagrama conceptual para el diseño eléctrico.

3.4.2. Selección de componentes y especificaciones técnicas

Basados en los requerimientos de diseño se procede a hacer una selección de componentes que satisfaga el diseño de la Figura 59. De este modo se llega a los siguientes componentes:

a. **Motores:** Acorde a requerimientos, se necesitaba un motor que permitiese control de torque, y que fuera de un tamaño reducido reduciendo de manera considerable las opciones. Desde la introducción del MIT Mini Cheetah y su actuador modular, se han lanzado al mercado varios actuadores comerciales con un principio de diseño similar. Todos comparten un estator de diámetro relativamente grande para una salida de alto par, un engranaje de reducción planetario de una sola etapa en la cavidad central y un codificador y placa de controlador integrados. Los actuadores disponibles comercialmente que se consideraron para el proyecto y sus propiedades se muestran en la siguiente tabla. Todos comparten varias similitudes con el actuador MIT Cheetah, que incluyen aproximadamente la misma dimensión, interfaz de bus encadenable con 1 Mbps de velocidad en baudios, y posición y capacidad de control del par mediante codificador y controlador de motor integrados. [50]

	HT-03-MIT	GIM8008	AK80-9	RMD-X8	A1 Actuator
Peso (gramos)	480	600	485	620	605
Relación de transmisión	6:1	6:1	9:1	6:1	Desconocido
Par nominal (Nm)	6.9	7.6	9	9	Desconocido
Par máximo (Nm)	17	15	18	21	33.5
Velocidad junta(rad / s)	40	34	25.6	25.1	21
Interfaz Comunicación	CAN	CAN	CAN	CAN/RS485	RS485
Precio de mercado (USD)	\$300	\$359	\$579	\$359	\$999

Finalmente, se optó por los motores implementados en el Mini Cheetah desarrollados por el MIT **HT-03-MIT**. Estos actuadores cuentan con un driver integrado, un motor brushless y un sistema de transmisión planetaria con un ratio de reducción de 6:1. Además de los puertos de alimentación cuenta con puertos de comunicación CAN, este protocolo permite controlar varios dispositivos con una sola linea del bus CAN, lo cual facilita la comunicación y el cableado para el control individual de los motores, de igual forma presentan buenas

características al menor precio encontrado en el mercado, y aunque su par nominal es el menor de todos, teniendo en cuenta el diseño y materiales de la estructura, es suficiente para el uso que se le dará a los actuadores. Asimismo, son de un tamaño y peso reducidos. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de los actuadores.

Masa	480g
Dimensiones	96 mm diámetro, 40mm longitud axial
Torque máximo	17Nm
Torque continuo	6.9Nm
Velocidad máxima de salida	40rad/s a 24V
Potencia máxima de salida	+250/ -680watts
Ancho de banda de control	4.5kHz a 4.5Nm, 1.5kHz a 17Nm
Inercia de salida	0.0023kgm ²

b. **Microprocesador o Microcontrolador:** En un primer lugar se decidió si se utilizaría un microprocesador o un microcontrolador, teniendo en cuenta que su principal diferencia son la capacidad de entrada y salida, así como el rendimiento de la CPU. Para el caso de este proyecto se optó por un microprocesador el cual cuenta con distintas ventajas sobre los microcontroladores para esta aplicación. El microprocesador tiene más potencia de cálculo, por lo cual hace más eficiente su implementación y mejora la velocidad de operación.

Por lo anterior, se recurre a la implementación de una Raspberry Pi, una computadora pequeña, potente, eficiente y económica. Esta puede actuar como plataforma de programación, por ejemplo con Matlab o ROS, y admite varios lenguajes, permitiendo al usuario instalar el compilador respectivo para la ejecución del código. Adicionalmente, permite conectar dispositivos como cámaras, kits de componentes modulares, placas Gertboard y placas HAT, lo que amplia sus aplicaciones y facilita el uso de hardware. [51]

Para realizar la comunicación eficiente desde la Raspberry Pi a los motores es necesario implementar uno de los dispositivos anteriormente mencionados. Para este caso se hace uso de la placa HAT RS485, cuyo esquemático se muestra en el **Anexo 3**. Ésta permite la comunicación estable a larga distancia desde una Raspberry a través de las funciones RS485/CAN. Cuenta con un controlador CAN integrado MCP2515 y un transceptor integrado SN65HVD230. El MCP2515 interactúa con microcontroladores (MCU) a través de una interfaz periférica en serie (SPI) estándar de la industria que permite que Raspberry Pi se comunique sin la necesidad de un controlador externo. El SN65HVD230 es un transceptor de bus CAN que admite comunicación de bus CAN de alta frecuencia, antiinterferencias y alta confiabilidad. El SN65HVD230 proporciona tres modos de funcionamiento diferentes: modo de alta velocidad, control de pendiente y modo de bajo consumo. [52]

La conexión del módulo RS485 a la Raspberry y a los terminales, que para este caso específico serían los tres motores, se muestra en la Figura 60.

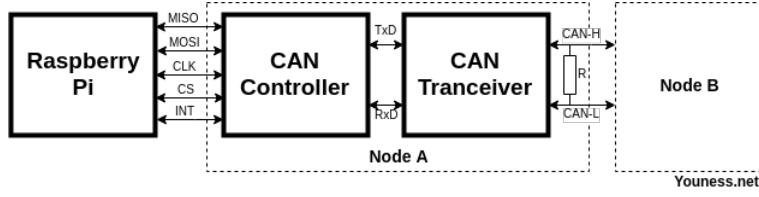


Figura 60: Esquemático para la comunicación CAN.

Este protocolo CAN proporciona diferentes beneficios para el proyecto, como ofrecer una alta inmunidad a las interferencias, habilidad para el autodiagnóstico y la reparación de errores de datos. Es un protocolo de comunicaciones normalizado, con lo que se simplifica y economiza la tarea de comunicar subsistemas de diferentes fabricantes sobre una red común o bus. El procesador anfitrión o host delega la carga de comunicaciones a un periférico inteligente, por lo tanto el procesador anfitrión dispone de mayor tiempo para ejecutar sus propias tareas. Asimismo, al ser una red multiplexada, reduce considerablemente el cableado y elimina las conexiones punto a punto, excepto en los enganches. [53]

- c. **Alimentación:** Para la alimentación de los motores y de los componentes eléctricos se decidió la implementación de una fuente de 24V 25A capaz de alimentar los tres actuadores cada uno a 24v 7A y un módulo regulador XL4015 50W 5A encargado de alimentar la Raspberry Pi escogida anteriormente. El regulador Step-Down XL4015 tiene como función entregar un voltaje de salida constante inferior al voltaje de entrada frente a variaciones del voltaje. Soporta corrientes de salida de hasta 5A, con un voltaje de entrada entre los 4 a 36V y un voltaje de salida entre 1.25V a 38V. El voltaje de salida es ajustable mediante el potenciómetro multivuelta que tiene integrado este regulador [59] para así alimentar la Raspberry Pi a través del puerto USB-C a 5V 3A y que esta asimismo pueda alimentar la placa HAT RS485 a 5V.

En la Figura 61 se puede apreciar el esquema de la conexión esperada de los componentes seleccionados anteriormente.

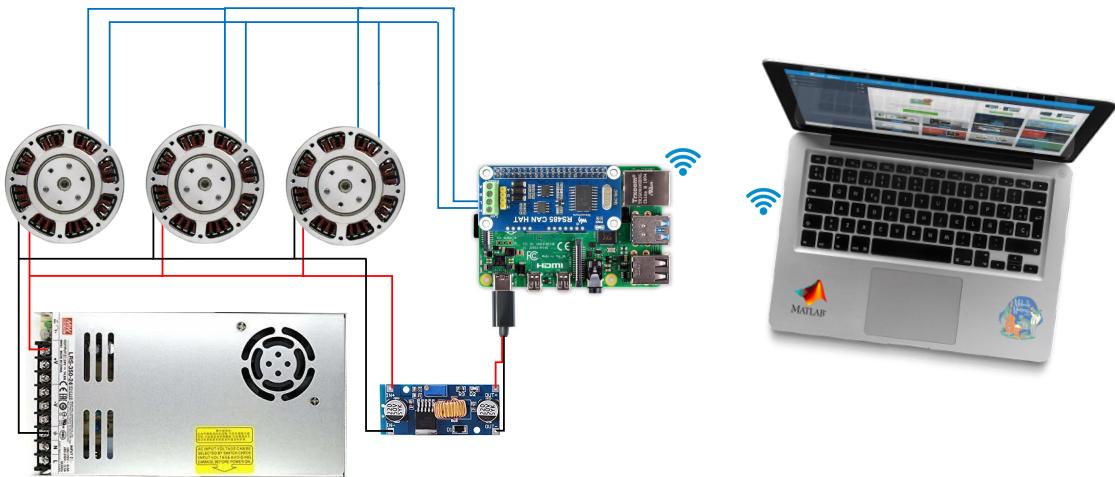


Figura 61: Circuito de conexiones eléctricas.

Finalmente, se hace el modelado de los componentes eléctricos en Inventor junto con el modelado mecánico del sistema haciendo sus respectivas conexiones, como se muestra en la Figura 62.

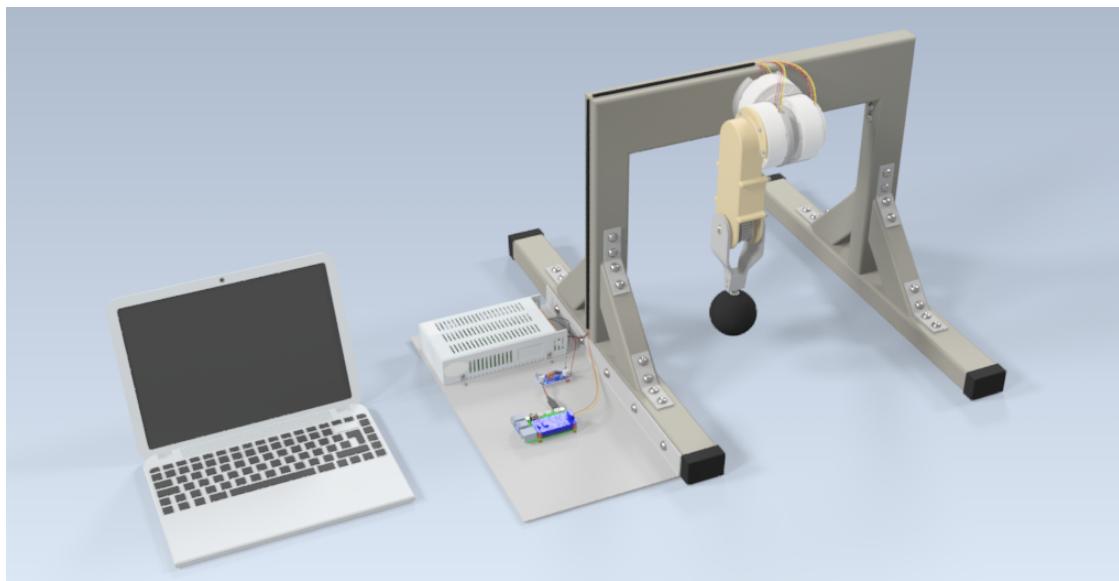


Figura 62: Modelado del montaje final.

3.5. Simulación sistema de control Base

En sistemas robóticos como el que se diseña en el presente proyecto se suelen tener varios niveles de control para el correcto funcionamiento del dispositivo. En un primer lugar se habla de control de bajo nivel, los cuales son algoritmos implementados internamente en los actuadores. Los actuadores seleccionados en este caso implementan un control de la corriente del motor con control orientado al campo (FOC). En el que usando las corrientes de estator del motor brushless DC se transforma en un sistema de coordenadas que gira con el rotor mediante la transformada DQ0. Esta estrategia de control identifica las corrientes del estator y el campo magnético del rotor como vectores que rotan en el sistema coordinado del estator. El comportamiento del motor es aproximadamente lineal en el marco de referencia del rotor, por lo que se puede lograr fácilmente un control de corriente de alto ancho de banda utilizando técnicas de control lineal de tiempo discreto, para información más detallada de este control, se sugiere revisar la sección *1.4.5 Algoritmos de Control*

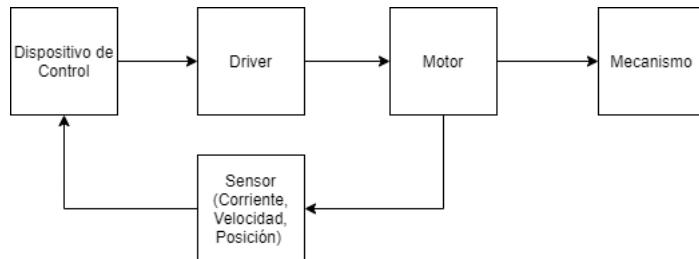


Figura 63: Componentes modelo básico

Por lo que se procedió a desarrollar un esquema en **Matlab Simulink** para simular la respuesta al control y verificar la eficiencia de este tipo de implementación, al ser el control ejercido directamente por los actuadores . Este se realizó haciendo uso de las herramientas Simscape, y Simscape Power Systems teniendo en cuenta diferentes modelos base ([54], [55], [56], [57], [58]), a la cual se le agregó un bloque de evaluación para verificar si la referencia es seguida de manera apropiada. Para esto, se realizará al comprobar el seguimiento de velocidad durante 1 [seg], la referencia es una señal de paso con objetivo de 1000 rpm en 0.1 segundos, al cual se le dará una carga de 0.1 [Nm] en $t = 0,5$ [seg], estos valores con el objetivo de ver que tan rápido se adapta la salida medida por el sensor a la referencia.

En un primer lugar teniendo en cuenta que no se puede realizar una caracterización del motor, al no disponer del mismo de manera física; se hace necesario tomar unos valores relacionados al motor para poder realizar una simulación de manera adecuada, estos corresponden a:

- Enlace de flujo de imán permanente [Wb]
- Inductancia del eje d del estator [H]

- Inductancia del eje q del estator [H]
- Resistencia del estator por fase [Ω]
- Número de pares de polos
- Inercia del rotor [$kg \cdot m^2$]
- Amortiguación del rotor [$N \cdot m / (rad/s)$]

De los cuales el fabricante informa únicamente la amortiguación otorgada por el rotor, por lo cual se procedió a tomar valores comunes para un motor BLDC de imán permanente con 2 pares de polos:

```

1 Phi = 0,1; % Enlace de flujo de imán permanente [Wb]
2 Ld = 0,01; % Inductancia del eje d del estator [H]
3 Lq = 0,01; % Inductancia del eje q del estator [H]
4 Rs = 0,38; % De resistencia del estator por fase [ ]
5 p = 2; % Número de pares de polos
6 Jm = 0,0023; % De inercia del rotor [kg * m ^ 2]
7 Dm = 1e-3; % Amortiguación del rotor [N * m / (rad / s)]

```

Adicionalmente con los datos anteriores, se estableció el control para corriente, teniendo como frecuencia de respuesta objetivo 1000[rad/s]

```

1 wc_c = 1e3; % De frecuencia de respuesta objetivo [rad / s]
2 Kp_id = wc_c * Ld; % Ganancia proporcional del eje d
3 Ki_id = wc_c * Rs; % Ganancia integral del eje d
4 Kp_iq = wc_c * Lq; % Ganancia proporcional del eje q
5 Ki_iq = wc_c * Rs; % Ganancia integral del eje q

```

Con esta información, en un primer lugar se plantea el modelo básico en Matlab y a partir de este se profundizo en cada uno de los bloques:

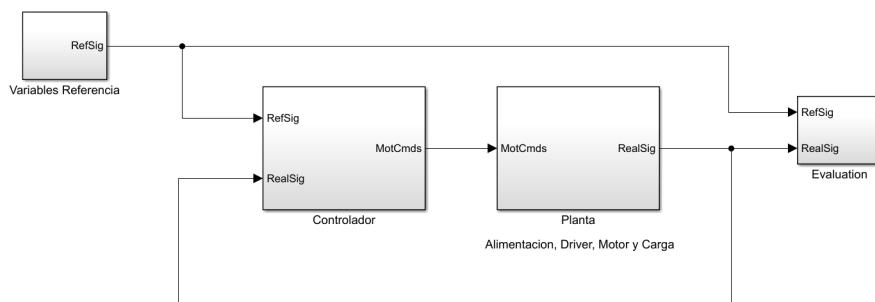


Figura 64: Componentes modelo básico en Matlab.

a. Bloque Controlador:

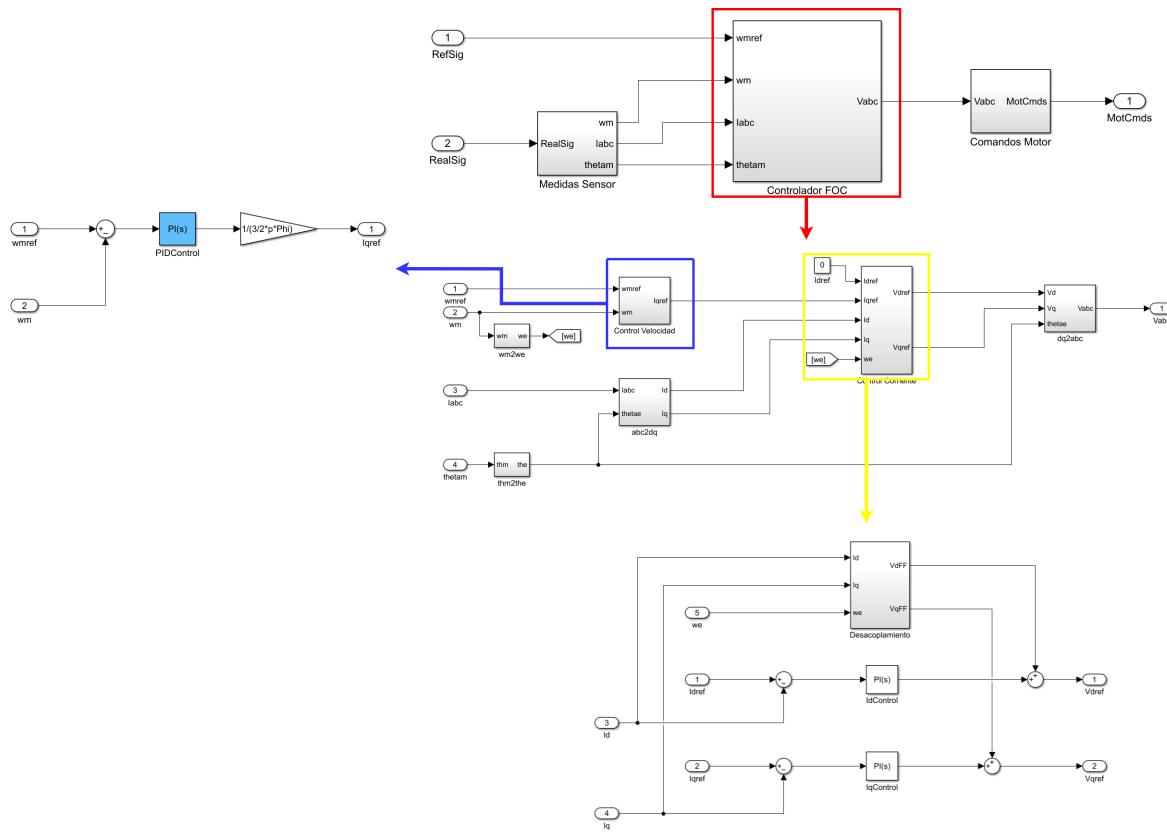


Figura 65: Bloque Control en Matlab.

b. Bloque Planta:

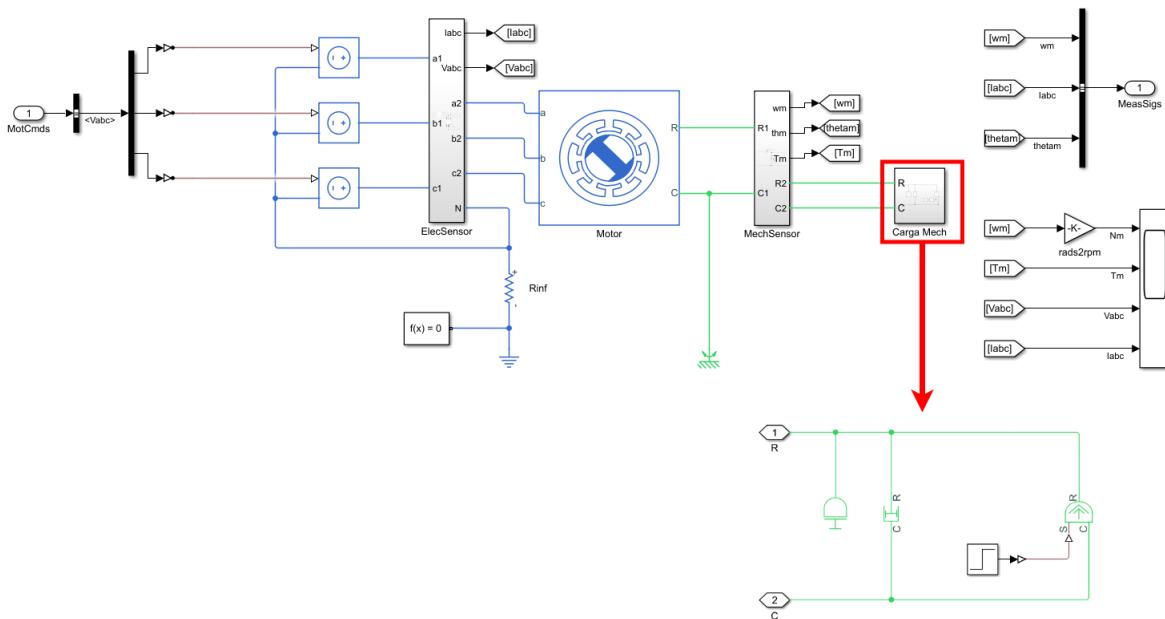


Figura 66: Bloque Planta en Matlab.

Finalmente con el diseño realizado, se procedió a dar valores para el controlador de velocidad PI, haciendo uso de la herramienta **TUNE** de Matlab en un modelo de Simulink, la cual permite estimar una planta a partir de datos medidos o simulados y diseñar un controlador para la planta estimada. Obteniendo como resultado las gráficas de la figura ?? en la que se observa el buen desempeño del controlador FOC y su funcionamiento.

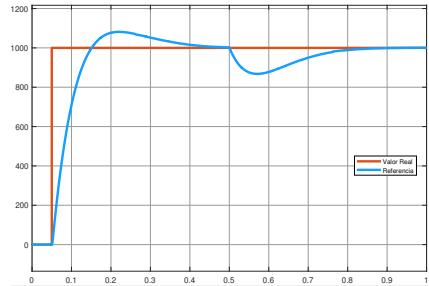


Figura 67: Referencia y Salida Real

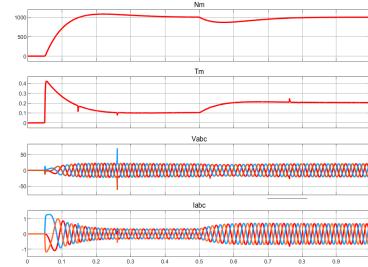


Figura 68: Gráfica Datos Simulación

3.6. Simulación general

3.6.1. Procedimiento de diseño

Para proceder con el control del mecanismo es indispensable conocer detalladamente cómo es su funcionamiento y para esto se recurre a la teoría de la robótica y al toolbox de Peter Corke de Matlab para hacer una sencilla simulación del mecanismo, para así entender la relación entre los eslabones y como se mueve el sistema en el espacio.

a. Definición del sistema

Para el correcto análisis del mecanismo se parte por estudiar la configuración serial de un robot RRR a partir del método de Denavit Hartenberg modificado el cual representa la configuración de la cadena cinemática a partir de la i -ésima articulación y el eslabón anterior.

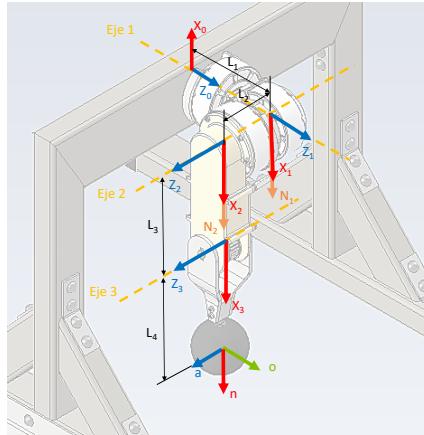


Figura 69: Sistemas coordinados del sistema RRR.

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	L_1	π
2	0	$\pi/2$	L_2	0
3	L_3	0	0	0

- b. **Cinemática directa** Una vez obtenidos los parámetros de acuerdo con la convención *DH-mod*, se obtienen las matrices de transformación homogénea para cada eslabón y finalmente se obtiene la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación del efecto final respecto a la base.

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^1T_2 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L_2 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & L_3 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & {}^3T_{Tool} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 {}^0T_{Tool} &= \begin{pmatrix} \sigma_2 & \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_3)\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_1) & L_4\sigma_2 - L_2\sin(\theta_1) - L_3\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) \\ \sigma_1 & \cos(\theta_2)\sin(\theta_1)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) & \cos(\theta_1) & L_4\sigma_1 + L_2\cos(\theta_1) - L_3\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) \\ \sigma_3 & \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) & 0 & L_1 + L_4\sigma_3 + L_3\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \sin(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)\sin(\theta_1) \\
 \sigma_2 &= \cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) \\
 \sigma_3 &= \cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)
 \end{aligned} \tag{23}$$

- c. **Cinemática inversa** Para el caso de la cinemática inversa se parte de que se conoce la posición y orientación del efecto final, por lo cual se procede a hallar los valores de las configuraciones con las que se obtiene dicha posición y orientación. Inicialmente se analiza el sistema desde el plano x-y, de donde se obtiene la definición de la primer variable articular θ_1 , y posteriormente se analiza desde el plano x-z donde se definen las variables θ_2 y θ_3 a partir de la posición final del efecto para cada una de las dos soluciones posibles: configuración con codo arriba o codo abajo respectivamente, como se puede evidenciar en la Figura 73.

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) \tag{24}$$

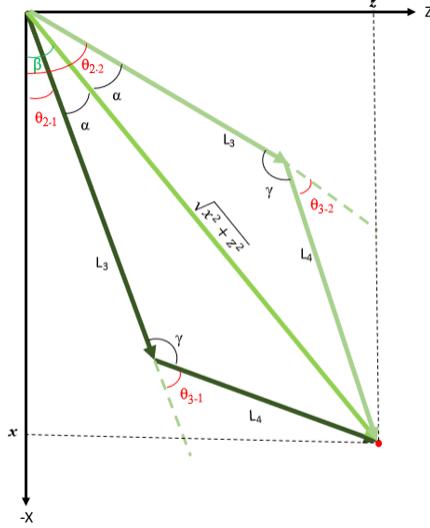


Figura 70

$$L_4^2 = L_3^2 + (x^2 + z^2) - 2 \cdot L_3 \cdot \sqrt{x^2 + z^2} \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{L_3^2 - L_4^2 + (x^2 + z^2)}{2 \cdot L_3 \cdot \sqrt{x^2 + z^2}} \right) \quad \tan(\beta) = \frac{z}{x}$$

$$\beta = \text{atan2}(z, x)$$

$$\theta_{2-1} = \beta - \alpha \quad \theta_{2-2} = \beta + \alpha \quad (25)$$

$$(x^2 + z^2) = L_3^2 + L_4^2 - 2 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot \cos(\gamma)$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - (x^2 + z^2)}{2 \cdot L_3 \cdot L_4} \right)$$

$$\theta_{3-1} = \pi - \gamma \quad \theta_{3-2} = -\pi + \gamma \quad (26)$$

Este procedimiento de diseño define un modelo cinemático para el posterior control del sistema. En la figura 71 se evidencia el robot creado a partir del toolbox de Peter Corke, en donde el piso de color verde representa la base que en nuestro caso sería el perfil al que está sujeto el motor de la primera articulación, es decir, donde está ubicado el sistema coordenado 0. Asimismo, se puede ver que la correspondencia de las orientaciones de los sistemas coordinados es correcta.

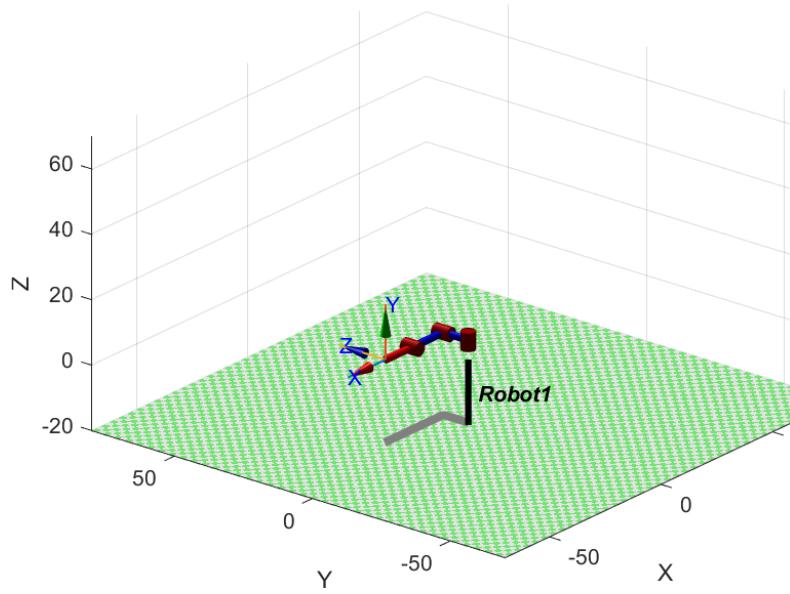


Figura 71

3.6.2. Modelo Mecánico y Control en Matlab

Adicionalmente, se planteo el uso de SimMechanics de Matlab, la cual permite hacer un diseño mas real teniendo en cuenta la geometría de la estructura, su peso e inercia, en un modelo de Simulink.

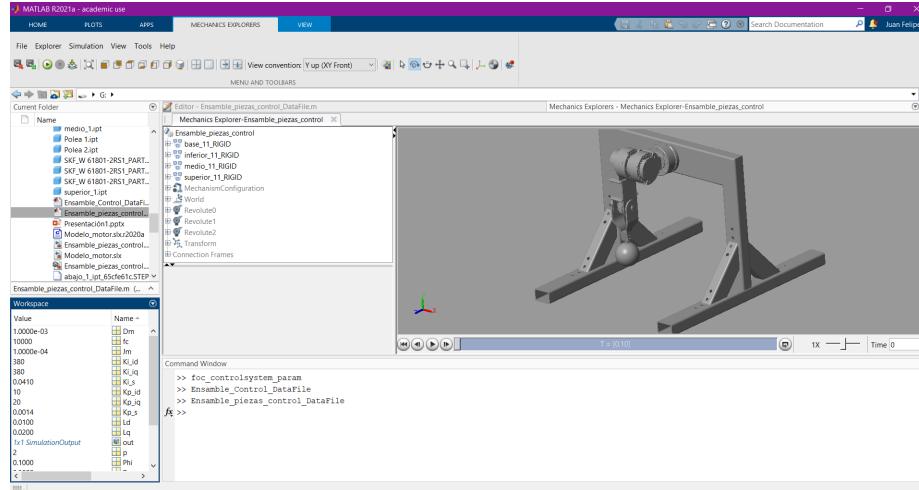


Figura 72

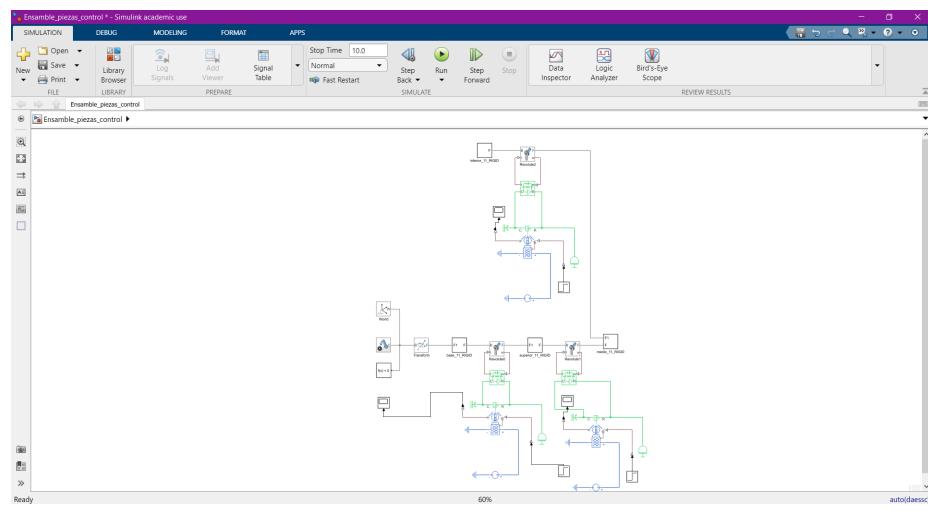


Figura 73

Referencias

- [1] B. Katz, .^A Low Cost Modular Actuator for Dynamic Robots", M.S. thesis, Dept. Mechanic. Eng., MIT, Massachusetts, USA, 2018.
- [2] M. Hutter et al., ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot, 2016. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, 2016, pp. 38-44.
- [3] ANYmal robot takes a field trip in Zurich sewers | The Burn-In. The Burn-In. (2019). Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.theburnin.com/technology/anymal-zurich-video/>.
- [4] X-Series Actuators® — HEBI Robotics. HEBI Robotics. Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.hebirobotics.com/x-series-smart-actuators>.
- [5] La robótica al servicio de la comunidad. Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. (2020). Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/especiales-regionales/articulo/la-robotica-a-l-servicio-de-la-comunidad/202001/>.
- [6] J. Robles, "Diseño y Prototipado del Mecanismo de Locomoción para un Robot Cuadrúpedo", Tesis, Universidad de los Andes, 2020.
- [7] ANSI RIA R15.06 . (s.f.). - Robot and Robot System Safety
- [8] CEN 310. (s.f.). – Advanced Automation Technologies and Their Applications.
- [9] ISO 10218:1992 . (s.f.). – Manipulating Industrial Robots – Safety.
- [10] AEN/CTN 116. (s.f.). -Sistemas Industriales Automatizados.
- [11] Kooser, A., 2020. Spot, el perro robot de Boston Dynamics. Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.cnet.com/es/noticias/boston-dynamics-spot-perro-robot-precio/>.
- [12] Rus, C., 2020. Boston Dynamics ya vende el robot Spot a cualquier empresa, cualquiera que pague 74.500 dólares. Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/boston-dynamics-vende-robot-spot-a-cualquier-empresa-que-pague-74-500-dolares>
- [13] García, J., 2021. Spot, el perro robot de Boston Dynamics, ahora tiene un brazo con el que recoge la ropa, ayuda en el jardín y salta a la comba. Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/spot-perro-robot-boston-dynamics-ahora-tiene-brazo-que-recoge-ropa-ayuda-jardin-salta-a-comba>

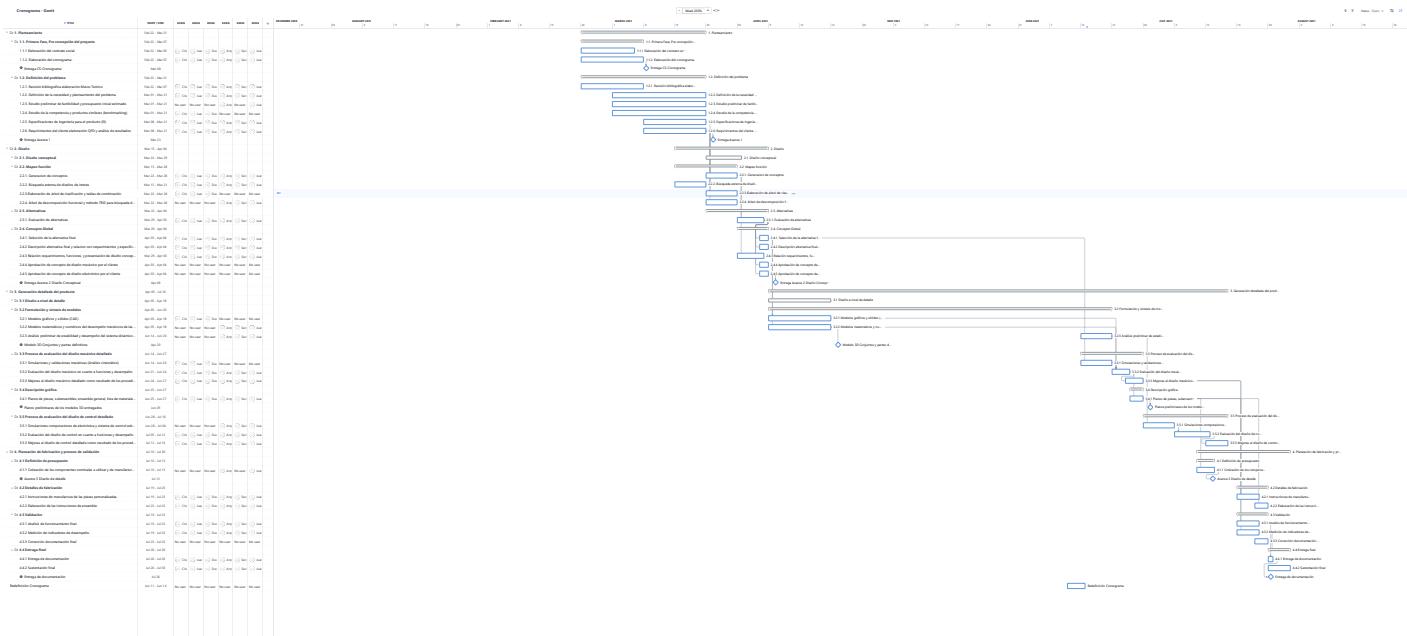
- [14] Contreras, M., 2018. Cheetah 3, el robot del MIT ya no necesita cámaras para correr o saltar. Accedido: Marzo. 22, 2021. [Online]. Disponible en: <https://clipset.com/cheetah-3-robot-mit/>
- [15] Medina, E., 2018. Cheetah 3: el robot «ciego» del MIT que sube escaleras y sortea obstáculos. Accedido: Marzo. 22, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.muycomputer.com/2018/07/06/cheetah-3-robot-ciego-sube-escaleras-sorteo-obstaculos/>
- [16] 2020. MIT y su “indestructible” creación: Mini Cheetah, el primer robot acróbatas del mundo. Accedido: Marzo. 22, 2021. [Online]. Disponible en: https://www.futuro360.com/data/minи-cheetah-primer-robot-acrobata_20200127/
- [17] Meng X, Wang S, Cao Z, Zhang L. A review of quadruped robots and environment perception. In: Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese. IEEE; 2016.
- [18] R.S. Gonçalves, J.C.M. Carvalho Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines Int J Adv Rob Syst,2013
- [19] Zielinska, Teresa. (2004). Development of Walking Machines; Historical Perspective. 10.1007/1-4020-2204-2_28.
- [20] U. Extremity, L. Co., S. Alimentos, a. extracts and k. joint, US491927A - Mechanical horse - Google Patents", Patents.google.com, 2021.
- [21] Kim, Sangbae Wensing, Patrick. (2017). Design of Dynamic Legged Robots. 10.1561/9781680832570.
- [22] S. Hirose and K. Kato, "Study on quadruped walking robot in Tokyo Institute of Technology-past, present and future,"Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), San Francisco, CA, USA, 2000, pp. 414-419 vol.1, doi: 10.1109/ROBOT.2000.844091.
- [23] M.H. Raibert Legged robots that balance MIT Press (1986)
- [24] Ingvast J, Ridderström C, Wikander J. The four-legged robot system WARP1 and its capabilities. In: Second Swedish Workshop on Autonomous Systems; 2002.
- [25] Battaglia RF. Design of the SCOUT II quadruped with preliminary stair-climbing; 2000.
- [26] Ilg W, Albiez J, Jedele H, Berns K, Dillmann R. Adaptive periodic movement control for the four-legged walking machine BISAM. In: Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999.
- [27] Konno A Kato NO, Mitsuya Y, Uchiyama M. Design and development of the quadrupedal research platform jrob-2. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02, vol. 1, IEEE; 2002, pp. 1056–1061.

- [28] Taehun Kang, Hyungseok Kim, Taeyoung Son and Hyoukryeol Choi, "Design of quadruped walking and climbing robot," Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), Las Vegas, NV, USA, 2003, pp. 619-624 vol.1, doi: 10.1109/IROS.2003.1250698.
- [29] M. Buehler, R. Playter, M. Raibert Robots step outside International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (2005)
- [30] de Bernardi, Reinaldo Jaime, José. (2007). Kamanbaré: A tree-climbing biomimetic robotic platform for environmental research. 2. 478-484.
- [31] D.J. Hyun, S. Seok, J. Lee, S. Kim High speed trot-running: implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah Int J Robot Res, 33 (11) (2014)
- [32] M. Li, Z. Jiang, P. Wang, L. Sun, S.S. Ge Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait, J Bionic Eng, 11 (2) (2014)
- [33] Boston Dynamics, Spot. Accedido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.bostondynamics.com/spot>.
- [34] "Mini cheetah is the first four-legged robot to do a backflip", MIT News | Massachusetts Institute of Technology, 2021. Accedido: Marzo. 10, 2021. [Online]. Disponible en: <https://news.mit.edu/2019/mit-mini-cheetah-first-four-legged-robot-to-backflip-0304>.
- [35] Kubota, T. 2019. Dog-like robot made by Stanford students jumps, flips and trots. Accedido: Marzo 20, 2021. [Online]. Disponible en: <https://news.stanford.edu/2019/05/20/dog-like-robot-jumps-flips-trots/>
- [36] Joita, B. 2019. Stanford University Students Create Affordable Robot Dog You Can Build Yourself. Accedido: Marzo 20, 2021. [Online]. Disponible en: <https://techthelead.com/stanford-university-students-create-affordable-robot-dog-you-can-build-yourself/>
- [37] Vincent, J. 2019. Meet Doggo: Stanford's cute open-source four-legged robot. Accedido: Marzo 20, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.theverge.com/2019/5/20/18632562/doggo-stanford-open-source-robot-four-legged-cute>
- [38] 2020. Un robot cuadrúpedo con ruedas que es más eficiente para desplazarse por todo tipo de terrenos. Accedido: Marzo 22, 2021. [Online]. Disponible en: <https://tecvolucion.com/robot-cuadrupedo-con-ruedas-mas-eficiente/>
- [39] The MathWorks. Motor Control, Part 4: Understanding Field-Oriented Control. (Mayo. 5, 2020). Accedido: Marzo. 21, 2021. [Video Online]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=YPD1_rcXBIE&ab_channel=MATLAB

- [40] E. Vegas, "¿Impresión 3D es ambientalmente sostenible? - Emiliusvgs", Emiliusvgs, 2021. Accecido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://emiliusvgs.com/impresion-3d-ambientalmente-sostenible/>.
- [41] Excell, "The Atkins project | The Engineer", The Engineer, 2021. Accecido: Marzo. 21, 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.theengineer.co.uk/the-atkins-project/>.
- [42] Kreiger, Megan Pearce, Joshua. (2013). Environmental Impacts of Distributed Manufacturing from 3-D Printing of Polymer Components and Products. MRS Proceedings. 1492. 10.1557/opr.2013.319.
- [43] J. D. Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bledt, S. Kim, "Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control", presentado en el 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, España, Octubre 1-5, 2018
- [44] Eklof. Hackster, 2017. [Online]. Disponible en: <https://www.hackster.io/StaffanEk/kittybot-f21cc0>.
- [45] Kimura, Y. F. ; "Dynamic locomotion of a biomorphic quadruped", San Diego, 2009
- [46] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar - Robot Modeling and Control-Wiley (2005)
- [47] Biorobotics Laboratory, E. "BIOROBOTICS LABORATORY BIOROB". 2008. [Online]. Disponible en: <https://www.epfl.ch/labs/biorob/misc/archive/cheetah-2/#copyright>
- [48] <http://files.yuki-phantomhive.webnode.mx/200000031-25e8a26e29/Robotica.pdf>
- [49] <https://hackaday.io/project/176487-k3lso-quadruped>
- [50] Kim, Joonyoung Kang, Taewoong Song, Dongwoon Yi, Seung-Joon. (2021). Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot. Applied Sciences. 11. 3762. 10.3390/app11093762.
- [51] Nayyar, Anand Puri, Vikram. (2015). Raspberry Pi-A Small, Powerful, Cost Effective and Efficient Form Factor Computer: A Review. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering (IJARCSSE). 5. 720-737.
- [52] CAN Bus Plus RS485 HAT for Raspberry Pi, Copperhill. [Online]. Available: <https://copperhilltech.com/can-bus-plus-rs485-hat-for-raspberry-pi/>.
- [53] CAN in Automation (CiA): CAN knowledge. Can-cia.org. (2014). from <https://www.can-cia.org/can-knowledge/>.

- [54] "Field-Oriented Control (FOC)- MATLAB Simulink", Mathworks.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/implement-motor-speed-control-by-using-field-oriented-control-foc.html>.
- [55] "Motor Control, Part 4: Understanding Field-Oriented Control Video", Mathworks.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/motor-control-part-4-understanding-field-oriented-control-1587967749983.html>.
- [56] "Field-Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Machine- MATLAB Simulink", Mathworks.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/ug/field-oriented-control-of-a-permanent-magnet-synchronous-machine.html>.
- [57] "Design the FOC of BLDC (PMSM)", Mathworks.com, 2021. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67172-dc-design-the-foc-of-blcd-pmsm?s_tid=srchtitle.
- [58] "Field Oriented Control of Induction Motor", Mathworks.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73196-field-oriented-control-of-induction-motor>.
- [59] XL4015 Modulo Regulador Step Down 50W 5A - UNIT Electronics. UNIT Electronics. from <https://uelectronics.com/producto/modulo-regulador-step-up-1-25-35v-xl4015-5-40v-5a/>.

Anexo N°1



Anexo N°2

Relationship Between Requirements:
9 - Strong 3 - Moderate 1 - Weak

Row Number	Max Relationship Value in Row	Weight/Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")																		Competitive Analysis (1=Apply, 0=Not apply)								
			Peso	Volumen	Vida útil	Frecuencia de reactivación contra demanda	Cantidad de horas en los rodados	Factor de seguridad del diseño mecánico	Realización de mantenimiento preventivo del sistema	CF estático y dinámico entre la estructura y el suelo	Torque nominal compatible de los motores	Tiempo de respuesta del sistema de control	Frecuencia compatible de matemática	Corriente de consumo por motor	Compatibilidad con plataformas de programación	Error de posición del efecto final	Voltaje de funcionamiento	Ruido del mecanismo	Rechazo a succión en los buzos de cond.	Our Current Product	Chariot 3	Minicheetah	BD Spot	Stanford Doggo	Robot Cheetahgo USA				
Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")																													
1 9 10 3.00% Fabricación de los estabones mediante impresión 3D	9	10	3.00%																										
2 9 2 0.60% Fácil limpieza de los elementos usados en las uniones	9	2	0.60%																										
3 9 10 3.00% Sistema de transmisión de potencia mecánica en la rodilla	9	10	3.00%																										
4 9 10 3.00% Ajuste del sistema de transmisión de potencia mecánica	9	10	3.00%																										
5 9 10 3.00% Convertir energía eléctrica en movimiento	9	10	3.00%																										
6 9 10 3.00% Sistema de 3 grados de libertad	9	10	3.00%																										
7 9 10 3.00% Mecanismo de estabones seriales	9	10	3.00%																										
8 9 8 2.40% Baja inercia en cada uno de los estabones	9	8	2.40%																										
9 9 6 1.80% Fácil ensamblaje y desensamblaje	9	6	1.80%																										
10 9 10 3.00% Ciclo de vida prolongado	9	10	3.00%																										
11 9 8 2.40% Implementación resortes para amortiguación	9	8	2.40%																										
12 9 8 2.40% Resistencia a impactos	9	8	2.40%																										
13 9 5 1.50% Peso reducido	9	5	1.50%																										
14 9 7 2.10% Implementación de topes de goma	9	7	2.10%																										
15 9 7 2.10% Alta fricción entre la estructura y el suelo	9	7	2.10%																										
16 3 10 3.00% Suficiente espacio para componentes eléctricos y electrónicos.	3	10	3.00%																										
17 9 8 2.40% Niveles de ruido auditivo tolerables	9	8	2.40%																										
18 9 7 2.10% Implementación de piezas normalizadas	9	7	2.10%																										
19 9 10 3.00% Estructura de tamaño reducido y resistente	9	10	3.00%																										
20 9 10 3.00% Estabilidad mecánica	9	10	3.00%																										
21 9 8 2.40% Estructura de soporte metálica	9	8	2.40%																										
22 9 10 3.00% Control de torque de los motores	9	10	3.00%																										
23 9 10 3.00% Variables de movimiento configurables	9	10	3.00%																										
24 9 8 2.40% Obtener y enviar información de los motores.	9	8	2.40%																										
25 9 8 2.40% Control por medio de tarjetas electrónicas programables	9	8	2.40%																										
26 9 8 2.40% Posibilidad de programar lazos de control de alto y bajo nivel	9	8	2.40%																										
27 9 10 3.00% Control de posición del efecto final	9	10	3.00%																										
28 9 10 3.00% Control de trayectorias	9	10	3.00%																										
29 9 9 2.70% Precisión de los movimientos	9	9	2.70%																										
30 9 4 1.20% Funcionamiento por medio de fuente externa DC	9	4	1.20%																										
31 9 8 2.40% Sistema de control robusto	9	8	2.40%																										
32 9 6 1.80% Compatibilidad con diferentes plataformas de programación	9	6	1.80%																										
33 9 8 2.40% Uso de MATLAB como plataforma de programación	9	8	2.40%																										
34 9 9 2.70% Interfaz de usuario por medio de computador	9	9	2.70%																										
35 9 6 1.80% Implementación de protocolos de comunicación	9	6	1.80%																										
36 9 10 3.00% Aislamiento básico de los elementos eléctricos	9	10	3.00%																										
37 3 10 3.00% Implementación sistema de seguridad	3	10	3.00%																										
38 9 6 1.80% Bajo Consumo de energía	9	6	1.80%																										
39 9 3 0.90% Fácil de transportar	9	3	0.90%																										
40 3 8 2.40% Visualmente agradable	3	8	2.40%																										
41 3 8 2.40% Diseño ergonómico	3	8	2.40%																										
Column Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	29	24	25	23	19	22					
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9											
Requirement Weight	1.87	1.59	1.75	0.70	0.54	0.76	1.15	0.89	1.17	2.14	0.60	1.19	1.07	3.32	1.03	1.03	0.31	2.03											
Relative Weight	8.10%	6.89%	7.58%	3.04%	2.34%	3.27%	4.97%	3.87%	5.06%	9.22%	2.61%	5.14%	4.63%	#####	4.44%	4.44%	1.32%	8.76%											
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	3	7	5	0	7	1	6	3	8	1	3	8	10	2	1	5	10											
Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	▼	▼	▲	▲	x	x	▲	x	x	x	x	x	x	x	▼	x	x	▼											
Target or Limit Value	10 kg	35/35-36 cm	2 años	30Hz	2.4GHz	3A-6A	2 plataformas	5V	20Hz	400ms-500ms	2.4GHz	3A-6A	2 plataformas	20Hz	5V	900g(±)	20Hz												

Anexo N°3

