

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño y programación de un brazo automatizado para  
la creación de películas de Stop Motion

Trabajo de graduación presentado por  
Ana Cristine Bartra Espinoza para optar al grado de  
Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala  
2018



Diseño y programación de un brazo automatizado para la  
creación de películas de Stop Motion

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño y programación de un brazo automatizado para  
la creación de películas de Stop Motion

Trabajo de graduación presentado por  
Ana Bartra para optar al grado de  
Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala  
2018

Vo.Bo.:

(F)   
Ing. Pablo Mazariegos

Tribunal:

(F)   
Ing. Pablo Mazariegos

(F)   
Ing. Carlos Esquit

(F)   
Ing. Luis Montenegro



Fecha de aprobación: 18/06/2018

## PREFACIO

La tecnología ha avanzado mucho en los últimos años. Se han empezado a crear elementos microscópicos y se han usado en distintas aplicaciones en distintas áreas, especialmente en la industria mecánica, la médica e incluso la cinematográfica. Esta capacidad de crear elementos tan pequeños da la posibilidad de diseñar y fabricar objetos con varias aplicaciones capaces de ser controlados con precisión.

Este proyecto involucra mucho de los conocimientos obtenidos durante la carrera universitaria, a la vez que los recursos proporcionados por la misma Universidad. La innovación que tiene este trabajo, aparte de su enfoque a Stop Motion, también conocido como animación foto a foto, es el tamaño que tiene el brazo ya armado.

Este brazo se puede controlar por computadora, con el propósito de facilitar la filmación de películas de animación foto a foto, y puede permitir que este tipo de arte tenga más campo para desarrollarse gracias a las tecnologías actuales.

# CONTENIDO

<b>PREFACIO</b> .....	vi
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	4
<b>A. General</b> .....	4
<b>B. Específicos</b> .....	4
<b>III. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
<b>A. Brazo humano y su rango de movimiento</b> .....	5
<b>B. Motores</b> .....	8
<b>1. Servomotores.</b> .....	8
<b>2. Motores de corriente directa</b> .....	11
<b>3. Motor stepper</b> .....	14
<b>C. Engranajes</b> .....	15
<b>1. Engranajes de tornillo sin fin.</b> .....	16
<b>2. Engranajes cónicos.</b> .....	17
<b>D. Material del armazón</b> .....	19
<b>1. Impresión 3D</b> .....	19
<b>2. Corte láser</b> .....	21
<b>E. Microcontroladores</b> .....	23
<b>IV. ANTECEDENTES</b> .....	24
<b>V. METODOLOGÍA</b> .....	27
<b>VI. MOTORES</b> .....	28
<b>VII. MECANISMO DEL BRAZO</b> .....	32
<b>A. Articulaciones esféricas</b> .....	32
<b>B. Engranajes</b> .....	35

C. Diseño de brazo.....	38
D. Análisis de Fuerzas.....	42
E. Diseño Final .....	45
VIII. PROGRAMACIÓN .....	47
A. Microcontroladores .....	47
B. Programa .....	48
C. Interfaz gráfica .....	50
IX. CONCLUSIONES.....	51
X. RECOMENDACIONES .....	52
XI. BIBLIOGRAFÍA .....	53
XII. ANEXOS.....	57
XIII. GLOSARIO .....	61

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1 Rango de movimientos del brazo humano .....	5
Tabla 2 Modos de operación de un puente H .....	13
Tabla 3 Especificaciones técnicas del PLA.....	21
Tabla 4 Especificaciones técnicas del MDF .....	22
Tabla 5 Especificaciones técnicas del acrílico .....	23
Tabla 6 Comparación de especificaciones técnicas entre distintos microcontroladores.....	23
Tabla 7 Tabla comparativa de motores stepper y servomotores .....	28
Tabla 8 Datos principales de engranes cónicos .....	36
Tabla 9 Combinación de número mínimo de dientes en un engranaje recto .....	37
Tabla 10 Comparación de resultados inventor vs. cálculos.....	37
Tabla 11 Tamaño proporcionada de la mano .....	39
Tabla 12 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Hitec, diseño 1.....	43
Tabla 13 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Faulhaber, diseño 2.....	44
Tabla 14 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Faulhaber, diseño 3 .....	45
Tabla 15 Peso de estructura del diseño final con distintos materiales .....	45
Tabla 16 Cálculos para diseño de engranaje cónico recto (sistema Gleason con detalles de Shigley).....	57
Tabla 17 Cálculo de torques necesarios para cada diseño de brazo y sus articulaciones .....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diseño preliminar de brazo con motores Faulhaber y engranajes cónicos .....	3
Figura 2 Diseño preliminar de brazo con motores Hitec .....	3
Figura 3 Movimiento horizontal de hombro.....	5
Figura 4 Rotación de hombro .....	5
Figura 5 Flexión y extensión del hombro .....	6
Figura 6 Flexión y extensión de codo.....	6
Figura 7 Supinación y pronación del antebrazo.....	6
Figura 8 Doblez de muñeca.....	6
Figura 9 Flexión y extensión de muñeca.....	7
Figura 10 Dimensiones del cuerpo humano .....	7
Figura 11 Sistema de control de un motor servo con retroalimentación análoga .....	9
Figura 12 Disco de un decodificador absoluto.....	10
Figura 13 Cuadratura de señales de motor incremental .....	10
Figura 14 Disco de un decodificador incremental .....	11
Figura 15 Motor dc de dos polos con escobillas.....	12
Figura 16 Driver de lado bajo motor dc con escobillas.....	12
Figura 17 Driver lado alto motor dc con escobillas.....	12
Figura 18 Puente H para control bidireccional de motor dc con escobillas .....	13
Figura 19 Motor dc sin escobillas.....	14
Figura 20 Imanes de rotor en motor dc sin escobillas .....	14
Figura 21 Movimiento de un motor stepper .....	15
Figura 22 Engranaje de tornillo sin fin .....	17
Figura 23 Engranaje cónico de dientes rectos .....	17
Figura 24 Engranaje cónico de dientes en espiral .....	18
Figura 25 Engranaje cónico de dientes hipoides .....	18
Figura 26 Engranaje cónico de dientes zerol .....	19
Figura 27 Diagrama de materiales y procesos en una impresora 3D .....	20
Figura 28 Pulsos de canales en servomotor incremental para detectar la dirección de giro.....	30
Figura 29 Servomotor Faulhaber 0816 con decodificador PA2-50.....	30
Figura 30 Nano Servomotor Hitec HS40 .....	31
Figura 31 Movimiento generado por el hombro (esta es una representación aproximada) .....	32
Figura 32 Movimiento generado por el codo (esta es una representación aproximada) .....	33
Figura 33 Movimiento generado por la muñeca (esta es una representación aproximada) .....	33
Figura 34 Mecanismo para articulaciones con motores Faulhaber.....	34
Figura 35 Movimiento de mecanismo en el plano cartesiano.....	34
Figura 36 Nomenclatura de un engranaje .....	35

Figura 37 Engranajes cónicos rectos diseñados en inventor para motor Faulhaber.....	38
Figura 38 Diseño y dimensiones de brazo con motores Hitec (Diseño 1) .....	40
Figura 39 Diseño y dimensiones de brazo con motores Faulhaber (Diseño 2).....	41
Figura 40 Diseño y dimensiones de brazo con motores Faulhaber (Diseño 3).....	42
Figura 41 Diseño final ensamblado.....	46
Figura 42 Teensy 3.2 .....	47
Figura 43 Diagrama de flujo de programación .....	49
Figura 44 Interfaz gráfica .....	50

## RESUMEN

Este trabajo de graduación tiene como enfoque diseñar y crear un brazo robótico para que sea usado en animación foto a foto. Este tipo de animación es parte de la industria cinematográfica, y consiste en animar objetos reales por medio de fotografía. Este trabajo consiste en automatizar un poco el proceso de movimiento de los personajes, el cual es completamente manual.

La automatización de estos muñecos aportará conocimiento en el área de animatrónicos. Ya que la mayoría de los animatronics tienden a ser grandes, un enfoque a un brazo un poco más grande a 152 milímetros es algo novedoso, considerando que tiene como propósito moverse bastante similar a un brazo humano. El diseño creado es una base para poder tener una idea sólida de que se puede lograr con poco tiempo y material limitado.

Principalmente se estudian dos formas en las que se puede crear el brazo, basándose en dos motores con diferentes propiedades y tamaños. Lo importante de este trabajo es lograr que este brazo se pueda controlar desde la computadora, y que dichos movimientos sean lo suficientemente pequeños para poder crear un corto de animación foto a foto. Tomando en cuenta que el tamaño tiene que ser pequeño ya que tiene que ser aplicable a un cuerpo de un poco más de 300mm.

# I. INTRODUCCIÓN

Durante muchos años ha habido distintos estudios y experimentos para crear robots humanoides, capaces de imitar los movimientos humanos y de facilitar cualquier actividad que sea mucho más grande o mucho más pequeña que los humanos. En todo ese proceso de estudio siempre se busca la precisión en movimiento.

Uno de los enfoques principales que tienen los estudios son los brazos. El brazo humano es capaz de moverse de distintas formas y crear distintas acciones. Su margen de movimiento es grande y es muy bueno para hacer acciones repetitivas y suaves. Podemos ver como la imitación de los brazos humanos ha sido de mucha utilidad con el paso del tiempo. Ha ayudado mucho a nivel industrial, como se puede ver en los brazos mecánicos creados para facilitar procesos de producción. Incluso llega a un nivel de medicina, donde se han creado brazos de alta precisión para hacer operaciones. Y en estos dos extremos entra la robótica, que tras haber generado brazos para distintas aplicaciones también ha generado brazos para imitar exactamente al cuerpo humano.

Ha habido varios avances de la tecnología que han ayudado a crear robots humanoides, entre ellos el tamaño de los motores, o la capacidad de generar cualquier tipo de elemento mecánico de tamaños diminutos, e incluso microscópicos en el caso de la electrónica. La variedad de mecanismos y las distintas formas existentes para controlar un movimiento también han sido de mucha ayuda para poder crear robots humanoides con movimientos tan suaves y más exactos que los del brazo humano.

La mayoría de las aplicaciones que se ha hecho con estos estudios ha sido a una escala grande enfocada más que nada a una industria de procesos. Pero en estos tiempos ha evolucionado bastante lo que es conocido como animatrónicos, que son robots diseñados para animar animales o personas, dando movimientos realistas. Normalmente usados en el área de películas para añadir más detalles a los efectos especiales, o para generar algún tipo de animal u objeto al que se le quiera dar movimientos. El enfoque ha sido de igual manera a una escala grande. Pero no se ha dado mucho enfoque al área de animación foto a foto.

Los muñecos utilizados en animación foto a foto normalmente son creados con el propósito de simular movimientos humanos, de esta forma las personas tienden a sentirse más familiarizadas con las imágenes y tienden a agradecerles las animaciones. Lo que se desea diseñar es un brazo robótico para los títeres que se utilizan en animación foto a foto, para esto se debe conocer las limitaciones de las articulaciones humanas y su relación de dimensiones para poder crear movimientos realistas.

Los movimientos se complican un poco si se quisiera crear movimientos rápidos y fluidos. Para animación foto a foto lo que se necesita es que replique correctamente las posiciones ya estáticas del cuerpo, de tal forma que los grados de libertad que se necesitan en este brazo robótico serían menores a las de un brazo humano, ya que se pueden llegar a ciertas posiciones sin necesidad de replicar el movimiento exactamente. De igual forma, la cantidad de torque que necesiten proporcionar los motores que manejen el brazo no necesitan ser muy grandes más que la necesaria que cargar su propio peso y accesorios.

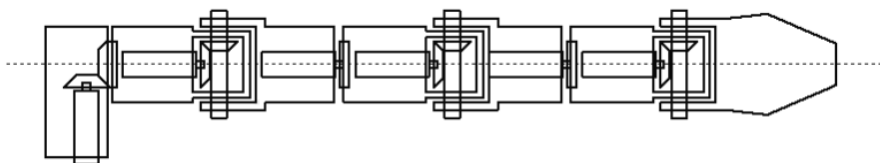
El movimiento del brazo es uno de los enfoques principales que tiene este trabajo, ya que el brazo es una de las extremidades más complejas de movimiento en el cuerpo humano. El análisis de movimientos será para las tres articulaciones principales, las cuales son: el hombro, el codo y la muñeca. Para ello se tiene que estudiar cuidadosamente como se mueve cada articulación y sus proporciones correctas.

Aparte de las dimensiones y movimientos necesarios, se requería definir qué tipo de mecanismo y motores serían los óptimos para obtener los movimientos de las posiciones del brazo humano. En el caso de los motores es necesario usar unos que permitan controlar la posición. Por ende, los servomotores eran la mejor opción.

Con respecto al mecanismo se tuvo que diseñar una manera de cambiar la dirección de los servomotores, ya que hay varias posiciones del brazo que requieren ese cambio de dirección. El cambio de dirección ayuda a optimizar el espacio, de esta forma se logra que al brazo no se le noten deformaciones muy grandes al girar el servomotor. Para evitar esta deformación se decidió usar engranajes cónicos, los cuales sirven para cambiar de dirección el giro del eje, a la vez que aumentan su torque. Aumentar el torque es necesario ya que el armazón del brazo tiene que cargar su propio peso más el peso del material que creará al muñeco.

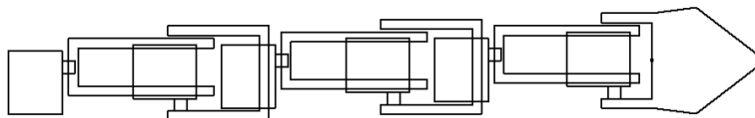
Para lograr un movimiento esférico, o que se moviera por todos los planos requeridos por cada articulación, se usó dos motores por articulación. Un motor sirve para darle un movimiento rotatorio sobre sí mismo, y el otro motor hace que gire perpendicular a ese eje (Figura 1). Los engranajes demuestran cómo serían usados tanto para aumentar el torque, como el cambio de dirección. Con los motores dispuestos de la manera señalada se optimiza el espacio, lo importante es encontrar motores cuyas dimensiones no obstaculicen cumplir con la dimensión predispuesta del brazo.

*Figura 1 Diseño preliminar de brazo con motores Faulhaber y engranajes cónicos*



Elaboración propia

*Figura 2 Diseño preliminar de brazo con motores Hitec*



Elaboración propia

## II. OBJETIVOS

### A. General

Crear un brazo robótico para personajes de animación foto a foto de aproximadamente 6 pulgadas de largo, con motores y un microcontrolador.

### B. Específicos

- Estudiar técnicas actuales de animación y determinar la ventaja de la propuesta a utilizar.
- Utilizar un microcontrolador y motores para controlar los movimientos de un brazo con 8 grados de libertad.
- Crear una interconexión entre el brazo y la computadora para tener conocimiento de la posición actual del brazo e indicarle cómo moverse.
- Implementar una interfaz gráfica que permita y facilite el control del movimiento del brazo robótico.
- Diseñar un mecanismo para las articulaciones que permita un movimiento casi completamente esférico.
- Una vez definido el diseño de lo que se quiere, se calculará el grado de libertad necesario para la aplicación que queremos.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Brazo humano y su rango de movimiento

El diseño de un brazo robótico, que se pueda mover igual que un brazo humano, necesita tener como base el rango, capacidad y las limitaciones de un brazo humano real. Para asemejar lo más posible un brazo humano, y poder hacer que se sientan naturales los movimientos lo ideal sería mantener la proporción correcta de las distintas partes, y a la vez replicar claramente el rango de movimiento.

Un estudio de la NASA da todos los datos necesarios para saber el rango de movimiento que tiene cada articulación humana, tanto para hombre como para mujeres (Tabla 1). En el caso de las proporciones se basó en un estudio de ergonomía [38]

Figura 10) de MDME. [38][37]

Tabla 1 Rango de movimientos del brazo humano

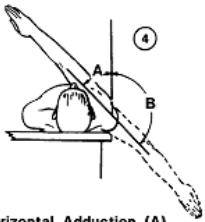
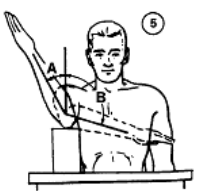
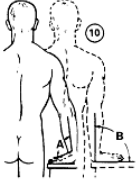
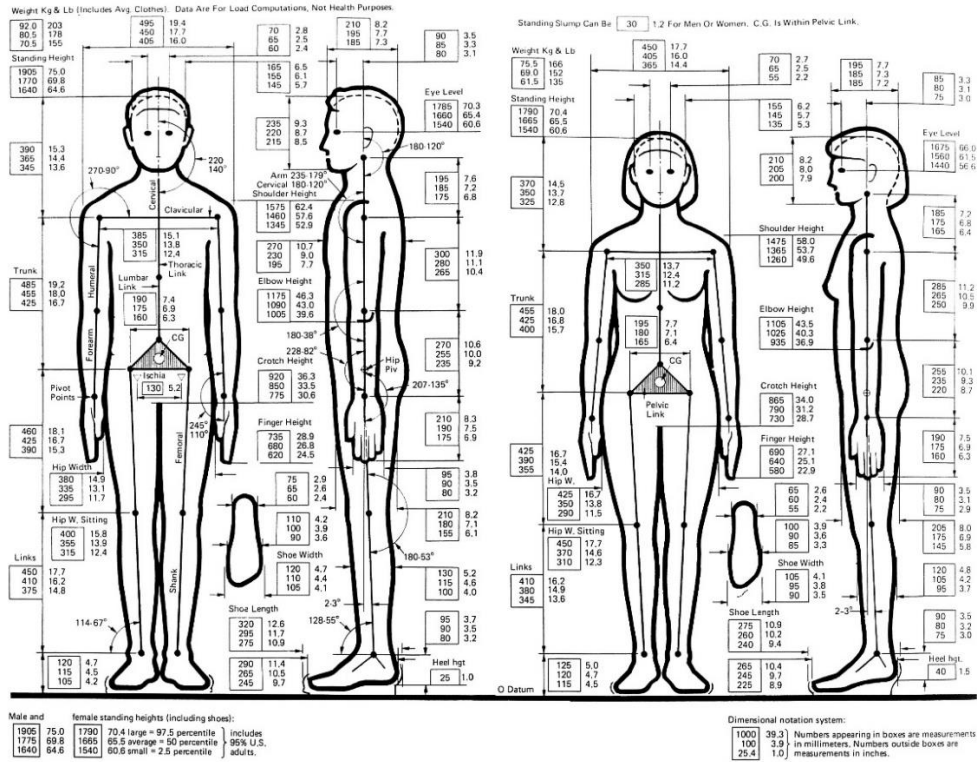
Figura	Movimiento de uniones	Rango de movimiento (grados)	
		Hombres (95%)	Mujeres (95%)
<p>Figura 3 Movimiento horizontal de hombro</p>  <p>Horizontal Adduction (A) Horizontal Abduction (B)</p>	Hombro, abducción (B)	188.7	192.9
<p>Figura 4 Rotación de hombro</p>  <p>Shoulder Rotation Lateral (A) Medial (B)</p>	<p>Rotación de hombro, lateral (A)</p> <p>Rotación de hombro, medial (B)</p>	96.7	85.8
		126.6	130.9

Figura	Movimiento de uniones	Rango de movimiento (grados)	
		Hombres (95%)	Mujeres (95%)
<p>Figura 5 Flexión y extensión del hombro</p> <p>Shoulder Flexion (A) Extension (B)</p>	Hombro, flexión (A)	210.9	217.0
	Hombro, extensión (B)	83.3	87.9
<p>Figura 6 Flexión y extensión de codo</p> <p>Elbow Flexion (A) Extension (B)</p>	Codo, flexión (A)	159.0	165.9
<p>Figura 7 Supinación y pronación del antebrazo</p> <p>Forearm Supination (A) Pronation (B)</p>	Antebrazo, pronación (B)	116.1	118.9
	Antebrazo, supinación (A)	125.8	139.5
<p>Figura 8 Doblez de muñeca</p> <p>Wrist Ulnar Bend (A) Radial Bend (B)</p>	Muñeca, doblez radial(B)	36.7	36.1
	Muñeca, doblez ulnar(A)	47.9	43.0

Figura	Movimiento de uniones	Rango de movimiento (grados)	
		Hombres (95%)	Mujeres (95%)
Figura 9 Flexión y extensión de muñeca  Wrist Flexion (A) Extension (B)	Muñeca, flexión(A)	94.8	98.1
	Muñeca, extensión(B)	78.0	74.7

[38]

Figura 10 Dimensiones del cuerpo humano



Niels Diffrient, Alvin R. Tilley; Henry Dreyfuss Associates, New York, New York

1 ANTHROPOMETRIC

[37]

## B. Motores

Crear un animatrónicos para animación foto a foto requiere que el robot sea bastante pequeño y para eso se tiene que tener un motor lo suficientemente pequeño que permita diseñar el brazo con las dimensiones que se desean. De los motores también depende si hay necesidad de usar, o no, algún elemento para aumentar el torque, ya que esto también afectaría tanto al peso como al tamaño del motor.

**1. Servomotores.** Los servomotores miden la posición del eje de salida del motor y envían esta información a un sistema de control cerrado que controla la corriente de entrada del motor para mantener la posición deseada. Para poder enviarle al servomotor la posición deseada se debe usar un microcontrolador que se pueda comunicar con el circuito del servo y con una computadora en donde se pueda programar el microcontrolador.

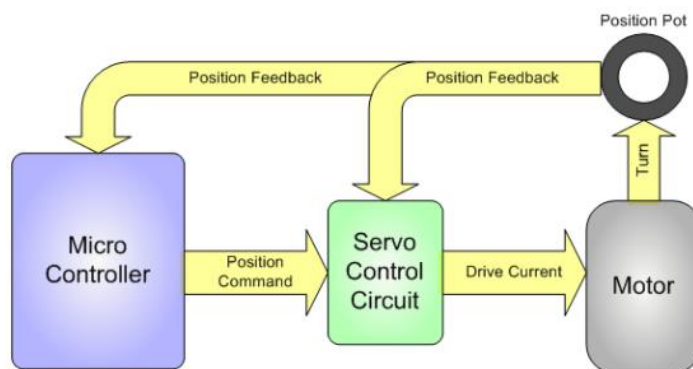
Los servomotores requieren de algún tipo de decodificador para poder detectar la posición del eje. En el caso de los servomotores más comunes usan potenciómetros como los decodificadores, aparte de estos hay servomotores más compactos que pueden usar decodificadores absolutos o decodificadores incrementales.

**a. Potenciómetro (Servo RC).** Este tipo de servo con potenciómetro es el más común utilizado para todo tipo de aplicaciones pequeñas. Este tipo de decodificador con potenciómetro dejan controlar aproximadamente un rango 180 grados, no se puede controlar la velocidad y no tienen la capacidad de tener rotación continua como otros servomotores.

Normalmente dentro de este tipo de servo hay un tren de engranes, un driver de puente H, y un potenciómetro que da la retroalimentación de la posición. Estos tipos de motores simples solo se retroalimentan internamente, no se pueden comunicar con un programa. Una solución para esto es usar retroalimentación análoga en el servo. [17]

Las ventajas de usar motores servos es su costo bajo, su variedad, y la simpleza de control. Sus desventajas es su rango de movimiento, y su precisión no es exacta. [17]

Figura 11 Sistema de control de un motor servo con retroalimentación análoga



[17]

b. *Decodificador absoluto.* Los decodificadores absolutos sirven para poder controlar la posición o la velocidad de una manera exacta. Se usan más que nada cuando es más importante conocer la velocidad y la posición que se tiene.

La forma de detectar la posición en el motor es por medio una guía de códigos digitales que representan la posición actual. Hay dos tipos de decodificadores absolutos, los de una vuelta y los de vueltas múltiples. Los primeros envían una señal específica, sin cambio en cada revolución. Los otros tienen un código específico por cada vuelta y cada posición. [15]

Para ser más exactos, este tipo de decodificador determina su posición por medio de un punto estático. Esto consiste en dos discos concéntricos, con marcadores desfasados. Uno de los discos está pegado al eje mientras que el segundo gira libremente. Mientras gira el eje, los marcadores del disco van cambiando en el eje fijo. Cada combinación que se da representa un código binario único, determinando así la posición del objeto. Para los decodificadores ópticos absolutos, el marcador es un espacio que deja pasar luz. Mientras que, en el decodificador magnético absoluto, el marcador es un arreglo de sensores magnéticos que pasa sobre un imán y detecta la posición de los polos. [30]

Una de las ventajas de usar servomotores con decodificadores absolutos es que siempre tendrán una posición fija, y se mantendrán en ella, sin importar que el sistema se apague, es decir que siempre se sabrá donde esta exactamente. Otra ventaja es su alta resolución y orientación. Igualmente, no demora tanto en reiniciarse y tiene varios protocolos de salida para su integración con otros elementos electrónicos. [15]

Figura 12 Disco de un decodificador absoluto



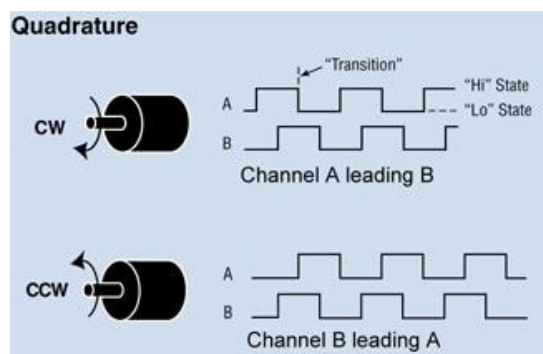
This disc is typical for an absolute encoder.  
Image courtesy Danaher Industrial Controls—  
Dynapar.

[30]

c. *Decodificador incremental.* Este tipo de decodificadores sirven más que nada para obtener información en posicionamiento y en la velocidad. Son bastante usados en aplicaciones industriales y de maquinaria pesada.

El funcionamiento del decodificador incremental consiste en enviar pulsos en cada rotación. La salida puede ser un pulso (canal A) o dos pulsos (canal A y B) los cuales permiten determinar la dirección de rotación. La superposición entre las dos señales (Figura 13) se conoce como cuadratura. [13]

Figura 13 Cuadratura de señales de motor incremental



[13]

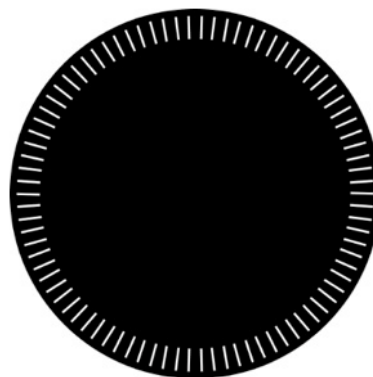
Aparte de monitorear la dirección, se puede manejar la posición al producir una tercera señal, la cual se produce una vez cada revolución. Es muy usado para localizar una posición específica.

[13]

Estos motores no guardan una posición exacta, si no que a medida que gira el motor un disco con divisiones deja pasar luz y el circuito cuenta cuántos haces de luz han pasado, de esta forma se puede calcular en que ángulo está, dependiendo de cuantos espacios tenga para dejar pasar luz por círculo. Es decir, si el círculo tiene 360 espacios, entonces en 360 pasos ya daría una revolución, y en 90 pasos se habría movido 90 grados. [30]

Estos decodificadores pueden ser usados en aplicaciones de maquinaria pesada, industriales, robóticas, electrónica, etc.

*Figura 14 Disco de un decodificador incremental*



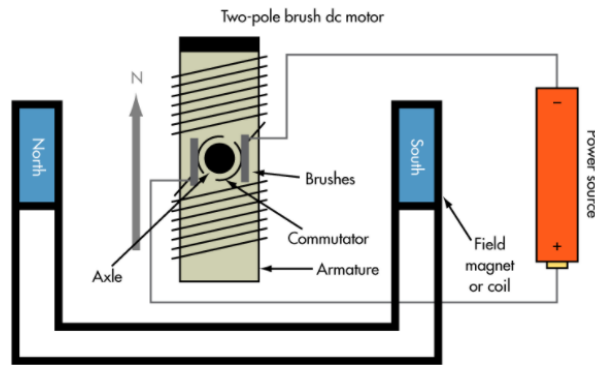
This representation of an incremental encoder disc shows how the openings (or marks) on the code wheel lets a pickup track its angular position. Any rotation spurs an output signal.

[30]

**2. Motores de corriente directa.** Este tipo de motores convierten la corriente directa de entrada en energía mecánica por medio de campos magnéticos.

**a. Con escobillas.** Los motores dc con escobilla son los más simples que existen, sólo consiste en un rotor, un conmutador, escobillas, un eje, y un campo magnético. Las escobillas cargan inversamente la polaridad del conmutador con respecto al imán, ocasionando la rotación. La dirección de giro puede cambiar al invertir las polaridades de las escobillas. [12]

Figura 15 Motor dc de dos polos con escobillas

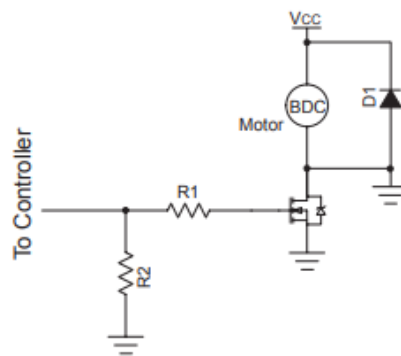


[12]

Los motores dc con escobillas usan drivers para controlar la velocidad, cuando el control es unidireccional se pueden usar dos circuitos diferentes: driver de lado bajo y driver de lado alto (Figura 16 y Figura 17). [10]

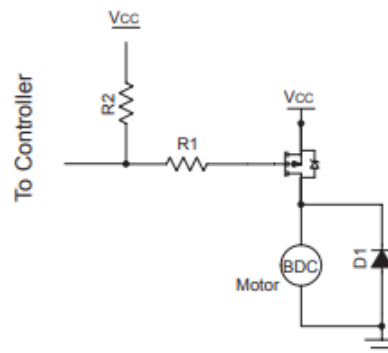
Para controlar un movimiento bidireccional se usa un puente H, el cual puede pasar corriente en cualquier dirección del embobinado. La Figura 16 es un diagrama de un puente H y la Figura 17 son los modos de operación. [10]

Figura 16 Driver de lado bajo motor dc con escobillas



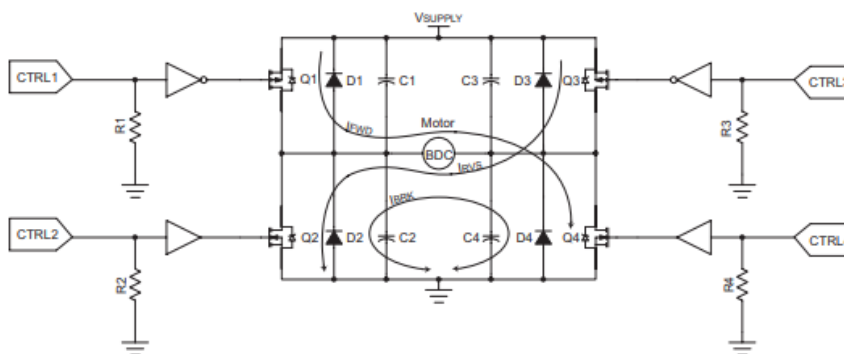
[10]

Figura 17 Driver lado alto motor dc con escobillas



[10]

Figura 18 Puente H para control bidireccional de motor dc con escobillas



[10]

Tabla 2 Modos de operación de un puente H

	Q1 (CTRL1)	Q2 (CTRL2)	Q3 (CTRL3)	Q4 (CTRL4)
Avance FWD	on	off	off	on
Retroceso RVS	off	on	on	off
Freno BRK	off	on	off	on
Motor se detiene por inercia propia	off	off	off	off

[10]

La velocidad aplicada a un motor dc con escobillas es proporcional a la cantidad de voltaje aplicado. Cuando se usa control digital se usan señales PWM para controlar el motor. Para retroalimentación con respecto a la velocidad, se pueden usar un sensor de velocidad y voltaje generado por la fuerza electromotriz del motor. Para la primera hay dos variedades principales, el decodificador óptico, que funciona similar al decodificador incremental de un servomotor, sólo que sin el control de posición. Y un sensor de efecto Hall, el cual funciona básicamente igual a un decodificador óptico, pero en este caso usa imanes en vez de luz. [10]

**b. Sin escobillas.** Estos motores ponen imanes permanentes alrededor del perímetro de un rotor para generar el movimiento. Los motores dc sin escobilla son síncronos, lo que significa que sus rotores y estatores giran a la misma frecuencia, lo que permite que este tipo de motores no tengan un desfase. Igualmente, para conocer la posición de un motor dc sin escobillas se usan controladores, decodificadores o sensores de efecto Hall. [12]

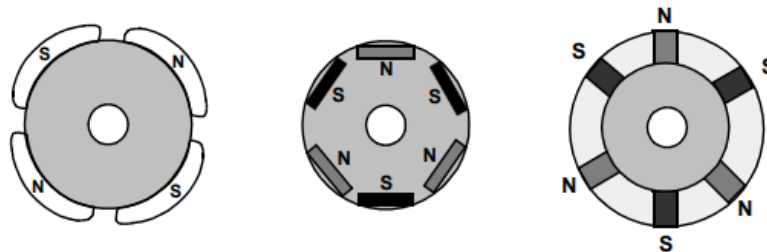
*Figura 19 Motor dc sin escobillas*



[12]

Los motores dc sin escobillas tiene bastantes ventajas sobre uno con escobilla. Entre ellas están: velocidad, respuesta dinámica, eficiencia, vida, ruido que generan, y rango de velocidad. El rotor de estos motores usa imanes permanentes que se distribuyen en pares polares alrededor del eje. [47]

*Figura 20 Imanes de rotor en motor dc sin escobillas*



[50]

En comparación a los motores dc con cepillos, la conmutación de los motores dc sin cepillo se hace electrónicamente. Para rotar el motor, los embobinados tienen que energizarse de manera secuencial, y se tiene que saber la posición del rotor para saber que embobinado se energizará. Para esto se usan los sensores de efecto Hall. Normalmente se usan tres de estos sensores, y cuando pasa uno de los polos magnéticos cerca de algún sensor envían una señal indicando que polo está pasando. [50]

**3. Motor stepper.** Es un motor dc sin escobillas, que convierte pulsos digitales en rotaciones mecánicas de un eje. Cada rotación de un stepper está dividida en un número de pasos, y se necesita un pulso distinto para cada paso. Este motor solo puede recibir y hacer un paso a la vez, y la cantidad de movimiento en cada paso debe ser siempre el mismo. Normalmente cada

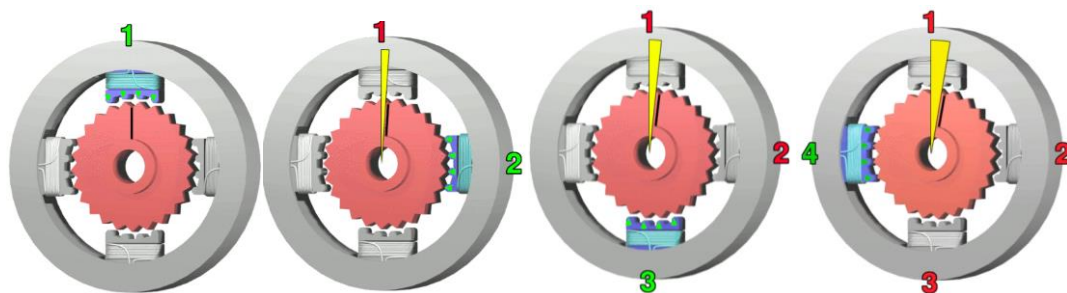
pulso gira 1.8 grados, por consecuencia se puede controlar la posición de un stepper sin necesidad de tener un sistema de retroalimentación. [17]

Las ventajas de este motor es que tiene un rango grande de velocidades, ya que su velocidad depende de la frecuencia de los pulsos del controlador. Es muy preciso en sus movimientos y posiciones. Tienen un torque bastante alto a velocidades bajas, y mantiene ese torque incluso cuando está parado. Son muy buenos para empezar su movimiento, parar, y retroceder. Finalmente es muy bueno para hacer movimientos repetitivos. [17]

Sus desventajas es que se calienta bastante, su consumo de corriente es independiente de la carga, y consumen más corriente cuando no hacen ningún trabajo. No pueden tener alta velocidad si se quiere tener un alto torque. Y no tienen retroalimentación, así que se tiene que usar otras herramientas para detectar su posición de referencia. [17]

Los motores stepper tiene diferentes tipos de pasos. Un paso completo puede consistir en 1.8 grados de movimiento, lo cual significa que hay 200 pasos en una vuelta completa. Un medio paso significa que le motor se mueve 400 pasos por rotación, en este modo el motor da 30% menos torque. Un micro paso es cuando se divide un paso entero, de 1.8 grados, en hasta 256 micro pasos. Al igual que con los pasos medios, el torque disminuye un 30%. [17]

*Figura 21 Movimiento de un motor stepper*



[17]

### C. Engranajes

El tamaño de los servos que se necesitan para esta aplicación en animación foto a foto requiere que se usen engranajes para aumentar el torque de los motores. Un par de engranajes es capaz de aumentar el torque, y a la vez disminuir la velocidad, de un motor. De igual manera

son capaces de cambiar la dirección de giro de ser necesario. Hay distintos tipos de engranajes y cada uno tiene distintas aplicaciones y distintas ventajas.

Uno de los motivos principales que se necesitan usar engranajes es para cambiar el sentido de rotación del motor, es decir, si está girando en el eje X el engranaje puede cambiar el sentido de rotación al eje Y. Para lograr esto hay dos opciones: engranajes cónicos o engranajes de tornillo sin fin. Estas dos tienen sus ventajas y desventajas, y sus aplicaciones son diversas.

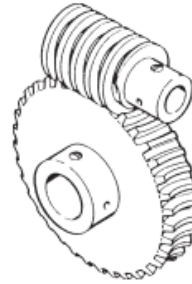
**1. Engranajes de tornillo sin fin.** Los engranajes de tornillo sin fin son un tipo de engranaje básico que consiste en un tornillo cilíndrico que engrana en una rueda dentada cilíndrica. Son muy usados para transmitir potencia entre dos ejes no paralelos. Es uno de los sistemas más compactos que existen, debido a su tamaño se pueden poner en lugares pequeños y dar una relación de alto torque y baja velocidad. [24]

Su funcionamiento consiste en que el tornillo gira y le transmite la potencia al engrane a una velocidad más lenta. Son muy útiles para ser usados en espacios compactos que requieran de una relación grande de reducciones. Los engranajes de tornillo sin fin pueden ser usados para aumentar significativamente el torque o para reducir bastante la velocidad. Si se diseñan de manera correcta, y son ensamblados y lubricados pueden ser considerados como los engranajes menos ruidosos y más suaves. [24]

Algunas de sus desventajas son que generan mucha fricción al momento de trabajar lo que resulta en temperaturas altas de funcionamiento y poca eficiencia. Pueden tener de 50% a 90% de eficiencia, depende mucho del tipo de acoplamiento que tengan y del material de fabricación. Se desgastan rápido por su movimiento deslizante. [5]

Los materiales que se usan para cada pieza son distintos. Normalmente el tornillo se hace de un metal duro, y el engranaje de un metal relativamente suave. Esto ayuda a disminuir la fricción entre los dientes, y tengan un tiempo de vida más largo. Su manufactura puede resultar algo compleja, ya que idealmente el tornillo se tendría que fabricar con maquinaria especializada, mientras que el engranaje podría crearse con una impresora 3D. [31]

Figura 22 Engranaje de tornillo sin fin

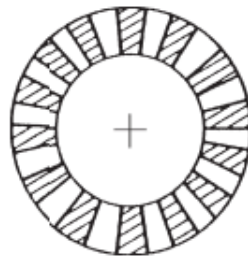


[24]

**2. Engranajes cónicos.** Los engranajes cónicos se caracterizan por su capacidad de cambiar el ángulo de movimiento de los motores. Es decir, si el giro del motor es en el eje X, con un engranaje cónico, la salida puede cambiar al eje Y. Estos engranajes pueden cambiar el ángulo de transmisión en distintos grados, pero la aplicación más común es para un ángulo recto. Estos aumentan el torque de salida si la relación de los engranajes es la correcta. Hay cuatro tipos de engranajes cónicos: rectos, espiral, hipoides, y zerol. Estos cuatro se clasifican así por la forma de sus dientes. [5]

**a. Dientes rectos.** Los engranajes cónicos rectos son la forma más simple de los engranajes cónicos. Estos engranajes tienen una transmisión de torque moderada, y no son tan silenciosas o suaves como otros engranajes. Estos engranajes consisten en dos engranes que se unen al encajar con sus dientes, y como dice su nombre este tipo de engranes son de dientes rectos, lo que significa que el área de los dientes está en completo contacto. Esto permite una capacidad media de carga, lo cual significa que no puede transmitir un torque demasiado alto en comparación al de entrada.[43]

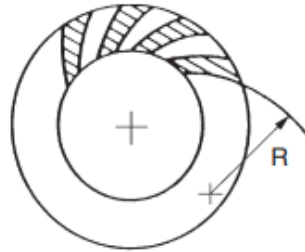
Figura 23 Engranaje cónico de dientes rectos



[43]

b. *Dientes en espiral*. Los engranajes cónicos de espiral tienen dientes curvados. Por la forma de los dientes normalmente hay mínimo dos dientes en contacto, y la unión de dientes es gradual, es decir que la conexión del ancho del diente se hace lentamente a medida que se mueve el eje. Estos dientes pueden girar hasta 8 veces más rápido que un engranaje cónico de dientes rectos, y tienen una capacidad alta de carga. [43]

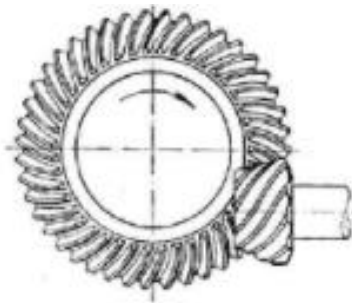
Figura 24 Engranaje cónico de dientes en espiral



[43]

c. *Dientes hipoides*. Los engranajes cónicos hipoides son usados cuando dos ejes son perpendiculares, pero no se intersecan. Su diámetro de paso parece ser cónico, pero en realidad son hipérbolas, de esta forma logran compensar el hecho que el eje de uno no está alineado al centro del otro eje. Este tipo de engranajes es usado para trabajar con ejes a 90 grados, y dependiendo de su posición de desplazamiento, estos son mucho más silenciosos y suaves que los engranajes cónicos de espiral. [43]

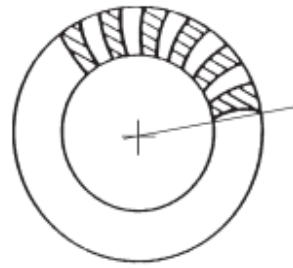
Figura 25 Engranaje cónico de dientes hipoides



[43]

d. *Dientes Zerol*. Este tipo de engranajes es bastante similar a los engranajes cónicos de espiral, su diferencia está en el ancho de cara del diente, el cual no tiene ángulo de espiral. Su funcionamiento es similar a los engranajes cónicos rectos, así que normalmente tienen las mismas especificaciones. [43]

*Figura 26 Engranaje cónico de dientes zero*



[43]

Los engranajes cónicos no son tan ruidosos como otro tipo de engranes y pueden aumentar el torque hasta una relación de 6:1. Si se mandaran a fabricar tendrían un costo muy elevado, sin embargo, se pueden diseñar con facilidad en inventor e imprimirlos en una impresora 3D. [5]

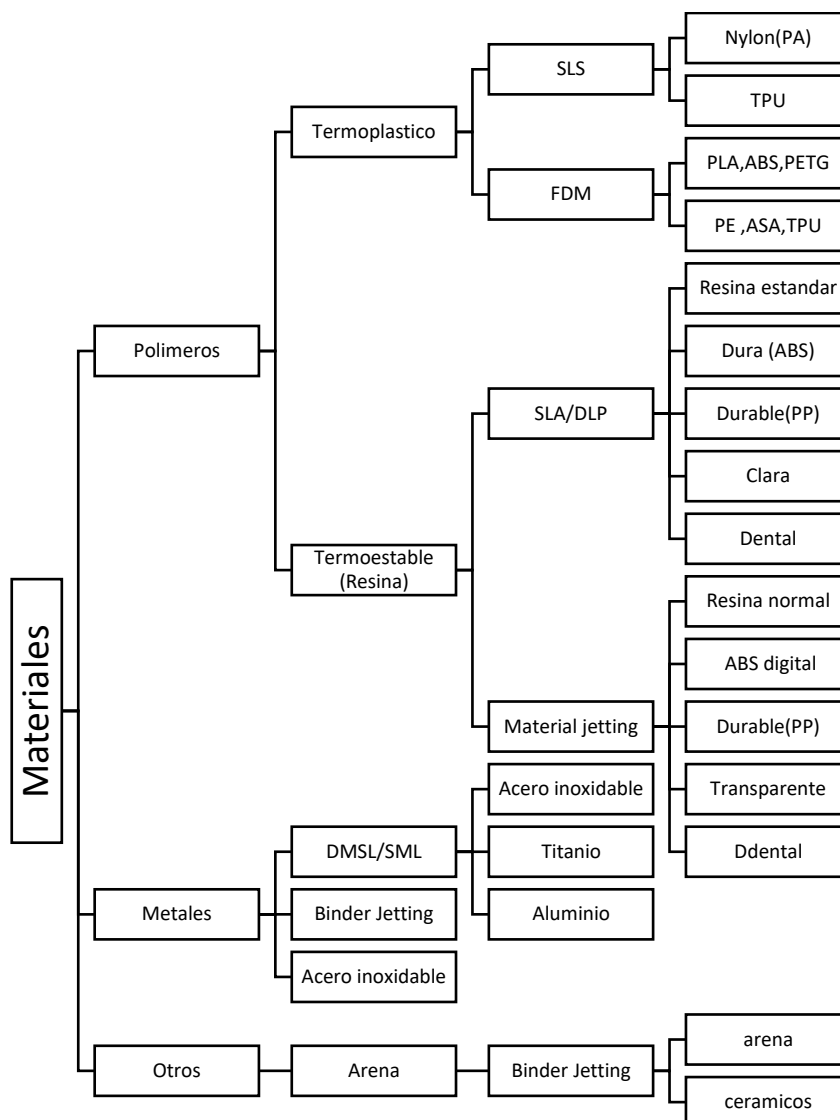
#### **D. Material del armazón**

En la industria hay muchas posibilidades de conseguir distintos tipos de materiales trabajados de distintas maneras. Pero el enfoque principal que se tendrá será con la impresora 3D y la cortadora laser, que nos permiten trabajar con PLA, MDF y acrílico.

**1. Impresión 3D.** La impresión 3D es una técnica de manufactura aditiva, las partes se van creando por medio de capas. Este método de manufactura es muy utilizado en distintas áreas, desde industrial hasta en la creación de accesorios. Algunas impresoras son capaces de extruir metales, pero lo más común es el plástico. [42]

Una de sus ventajas principales, en comparación a un maquinado, es la rapidez de fabricación de diseños complejos. Los diseños se pueden fabricar en cuestión de minutos u horas, dependiendo del tamaño que tengan físicamente. Es muy útil para hacer prototipos para diferentes aplicaciones, se puede probar si el diseño es adecuado, o si tiene dimensiones correctas para lo que se quiera usar. De igual forma, se puede hacer diseños que serían imposibles para una maquina CNC de fabricar. [42]

Figura 27 Diagrama de materiales y procesos en una impresora 3D



[49]

Hay que tomar en cuenta que, para cualquier parte impresa, las partes tendrán propiedades anisotrópicas, es decir, tendrán partes más débiles en su estructura. Considerando esta desventaja se debe saber que material se va a usar en una impresora 3D, y el tipo de aplicación del diseño. [49]

En el caso que se quisiese usar materiales de apoyo, como partes que faciliten el funcionamiento del algún proceso, se recomienda usar los termoplásticos. Sus propiedades mecánicas son muy buenas, resistentes a impactos fuertes, a la abrasión, y a los químicos, y se les puede agregar aditivos para mejorar sus propiedades. [49]

Uno de los termoplásticos más utilizados para la impresión 3D es el PLA. Es un material semi cristalino, barato y utilizado más que nada por su fácil uso. Es un material que al calentarse se vuelve suave y moldeable y al enfriarse de nuevo se solidifica. El PLA (Polylactic Acid) es un polímero biodegradable derivado de recursos renovables. Por su temperatura de impresión es fácil trabajar con él, y a la vez es muy útil para detalles finos. [25]

*Tabla 3 Especificaciones técnicas del PLA*

<b>Propiedades</b>	<b>PLA</b>
Tensión de rotura	37 MPA
Elongación	6%
Modulo flexural	4 GPa
Densidad	1.3 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de moldeo	173°C
Biodegradable	Si

[36]

**2. Corte láser.** La cortadora láser es una técnica de manufactura substractiva, capaz de cortar una gran variedad de materiales a diferentes grosores. Esta máquina es controlada por la computadora, lo cual ayuda a posicionar el diseño en el material y a controlar el láser para el corte. [47]

Las ventajas de usar este tipo de herramienta para manufacturar es que siempre se mantiene el material en un lugar predeterminado, es bastante rápido, y preciso. El corte siempre es muy limpio y sin defectos, ya que no hay una herramienta física tocando el material directamente. A pesar que el láser es básicamente un proceso que genera mucho calor, esto no deforma el material que se está trabajando ya que el área de trabajo del láser es bastante pequeño. Su precisión es bastante alta, puede trabajar diseños milimétricos sin problemas, y se puede usar para cortar o simplemente hacer grabados. Finalmente, debido a su exactitud de corte si se desea replicar una pieza el corte saldrá exactamente igual al original. [47]

Sus desventajas son pocas y se comparan con otras cortadoras. Una de las desventajas es la cantidad de energía que consumen para realizar los cortes, normalmente esto depende del tipo de laser que se utilice y el tipo de corte. Otra desventaja son los gases tóxicos que se liberan al cortar plásticos o maderas. La rapidez de trabajo depende mucho del grosor del material. [47]

a. **MDF.** Este material de madera es creado al mezclar residuos de madera dura y suave, convirtiéndolos en fibras y luego pegándolo con pegamentos especiales, y ejerciendo presión a altas temperaturas. Tiene gran variedad de grosores, es isotrópico, lo que quiere decir que sus propiedades son las mismas en todas las direcciones y no tiene tendencia a partirse., y es un material resistente. Es un material fácil de usar y con alta durabilidad. [46]

Al hacer el corte el MDF no se agrieta, y su superficie suave ayuda a que los cortes sean precisos. Debido a su fabricación no tienen nudos ni anillos que puedan afectar al material, y por su resistencia en general estos pueden ser pintadas y sus propiedades física no se verán afectadas. Es un material que se usa bastante para crear distintos tipos de estructuras sólidas.[46]

*Tabla 4 Especificaciones técnicas del MDF*

<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Densidad +/-7%	Kg/m <sup>3</sup>	min. 780 / máx. 850
Expansión después de 24 hrs	%	min. 15 / máx. 17
Módulo de elasticidad	N/mm <sup>2</sup>	min. 2500 / máx. 2700
Resistencia flexural	N/mm <sup>2</sup>	min. 23 / máx. 22
Fuerza de unión interna	N/mm <sup>2</sup>	min. 0.60 / máx. 0.65

[35]

b. **Acrílico.** Este material puede ser fabricado usando un proceso de extrusión, el cual es rápido, pero la calidad de material no es muy buena, ya que se rompe muy fácilmente. Normalmente el acrílico es transparente y es bastante resistente, cuando se fabrica con el proceso de colada continua. Su grosor no es muy constante, y tiende a variar hasta un 20%. [45]

El acrílico es fácil de usar y tiene una alta durabilidad. Sus propiedades varían según su grosor, pero aun así se mantiene estable. Si es fabricado correctamente es resistente a quiebres y rajaduras. [45]

*Tabla 5 Especificaciones técnicas del acrílico*

Propiedades mecánicas	Unidad	Valor
Densidad +/-7%	Kg/m <sup>3</sup>	1.19
Expansión después de 24 hrs	%	0.3
Tensión de rotura a 23°	MPa	76
Resistencia flexural	MPa	110
Fuerza de unión interna	MPa	110

[45]

## E. Microcontroladores

Hay distintos tipos de microcontroladores que se usan desde un nivel industrial hasta a un nivel de hobby. Algunos de estos microcontroladores vienen diseñados para un uso más directo para el usuario, lo cual facilita la conexión con distintos elementos. El único detalle es que algunas aplicaciones de los chips quedan si usarse. Aun así, se hizo una comparación de propiedades y especificaciones técnicas de distintos microcontroladores que podrían utilizarse.

*Tabla 6 Comparación de especificaciones técnicas entre distintos microcontroladores*

Propiedades	Arduino nano	Teensy 3.2	Feather M0 Express	Metro mini	ItsyBitsy M0 Express
Voltaje operativo	5 V	3.6-6V	3.3V	6-16V	3.5-6V
Memoria Flash	32 KB	256 KB	256 KB	32 KB	256KB
SRAM	2KB	64 KB	32KB	2 kB	35 KB
Velocidad de reloj	16 MHz	72 MHz	32.77 KHz	16MHz	48MHz
Entradas analógicas	8	21	6	6	13
EEPROM	1 KB	2 KB	No	no	
Corriente DC por pines I/O	40 mA	100mA	500mA	150mA	500mA
Voltaje de entrada	7-12 V	5V	3.3V	5V	3.3V
Pines digitales I/O	22 (6 PWM)	34 (12 PWM)	20(all pwm)	20(6 pwm)	23(13PWM)
Tamaño	18 x 45 mm	35 x 18 mm	51x23 mm	18x44mm	

[1][2][3][4][40]

## IV. ANTECEDENTES

Animación foto a foto es una manera de hacer películas en la cual se va capturando un cuadro por cierta cantidad de tiempo, en el cual una figura física se mueve cuadro por cuadro. Cada cuadro es una fotografía, y los movimientos que se hacen son muy pequeños, de esta manera una vez se ponen las imágenes en secuencia se puede ver cómo se va moviendo el objeto, dependiendo de la velocidad a la que se pongan las secuencias de foto se verá más natural el movimiento del objeto.

La primera película de animación foto a foto salió en julio de 1897, un cortometraje de unos muñecos que cobraban vida y se convertían en acróbatas. La segunda vez que se volvió a experimentar con esta técnica fue en diciembre de 1902, donde incluso empezaron a incluir nuevas técnicas de animación, y en 1904 empezó el uso de efectos especiales con el uso de animación foto a foto. Durante este tiempo los artistas trabajaban con muñecos o títeres, o incluso a base de dibujos. En 1912 salió la primera animación con plastilina. 13 años más tarde se empezó a utilizar la animación foto a foto como medio de promoción, para que lo usaran los demás artistas, y en 1940 se empezó a usar como medio de propaganda. En 1950 se hizo famosa esta técnica de animación, y 25 años más tarde una película de animación foto a foto obtuvo un premio Oscar. En 1977 Disney empezó a trabajar con la técnica de animación foto a foto para diferentes animaciones. En las series de Guerra de las Galaxias innovó completamente el área de animación y efectos especiales en 1980. Desde entonces la industria de la animación con stop motion se ha ido desarrollando lentamente, pero se ha quedado algo atrás debido al trabajo que se necesita para realizar una película. [44]

La filmación con este tipo de técnica puede resultar ser algo tardado ya que si se comete algún error se tiene que comenzar la escena desde cero, ya que no se puede replicar exactamente las posiciones anteriores a mano. Es un proceso bastante tardado ya que se requiere que cada movimiento sea bastante pequeño y preciso por cada foto que se tome, ya que se necesita dar la sensación de fluidez.

Este tipo de animación requiere mucho trabajo, ya que no solo se crean los sets y decoraciones a mano, sino que también los personajes se crean individualmente. Cada personaje tiene un cuerpo, el cual es el que se estará modificando poco a poco en el set y el cual está

soportado por una estructura que permite que se mantenga en pie y lo más estático posible. No solo eso, cada personaje tiene que ser arreglado en cada escena, ya que después de tanto manejo manual sus vestimentas se dañan, o incluso se pueden romper ciertas partes de su cuerpo. Hacer este tipo de filmaciones es un proyecto tardado ya que mantener el personaje en buenas condiciones requiere constante modificaciones. [7]

Hay diferentes tipos de animación foto a foto. Este trabajo se enfocará en la técnica de stop motion conocida como puppet animation (animación de títere), en donde los cuerpos de los personajes son creados con un armazón interno de un material normalmente metálico y flexible. Este material luego es cubierto por otro material que será la base para cuerpo del personaje, el cual decoran según sea necesario. [29]

Es una técnica que no es muy utilizada debido a la cantidad de trabajo y tiempo que requiere. Aun así, hay muchas películas que utilizan esta técnica, la cual se podría facilitar de manera considerable de distintas maneras. Como por ejemplo programas de edición o estructuras que ayuden a manejar los títeres o accesorios.

Ya existen programas diseñados para facilitar el proceso de animación, las cuales facilitan el manejo de la cámara y la visualización de imágenes. Por ejemplo, Dragronframe, logra guardar y renderizar las imágenes para mostrar la animación final.

También hay varias herramientas que sirven para darle estabilización a las cámaras o a los muñecos. La estabilización de los muñecos ayuda a crear escenas donde se necesita que el personaje salte o se mantenga en el aire, o en alguna pose difícil de mantener sin estabilización. Estas herramientas también sirven para poder darle más movimientos a la cámara y a los títeres, y expande las opciones del tipo de escena que se desea tomar.

Asimismo, existe tecnología que facilita la edición de videos e imágenes al igual que la creación de los muñecos. Como por ejemplo la impresión 3D y el CGI (Computer Generated Imagery). Muchos avances tecnológicos respecto al desarrollo de los efectos especiales y las gráficas de las computadoras permiten que se pueda experimentar con nuevas técnicas de animación foto a foto, ya que todas estas ayudan a que la animación se desarrolle mucho más rápido que antes, obteniendo así mejores resultados. [19]

En este caso se trabajará un esqueleto interno que podrá ser controlado desde la computadora, y que guardará cada movimiento en caso se cometa un error y se quiera regresar

ciertos pasos hacia atrás. De esta forma, en caso se cometa un error no se tienen que hacer toda la escena nuevamente, sino que solo un pedazo. De igual manera, la vestimenta de los personajes y los personajes no se dañará tanto ya que no se estarían tocando constantemente. Finalmente, el tiempo para crear la animación se reduciría significativamente gracias a la exactitud de la máquina.

Este tipo de trabajo es importante desarrollarlo ya que puede ser utilizado en todas las empresas de filmación existentes, ya que puede ser utilizada para trabajos más grandes como en el área de animatrónicos.

## V. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo se siguió una serie de pasos que ayudarían a llevar a cabo el proyecto. Cada paso que se hizo dependía del paso anterior, es decir no se podía finalizar completamente un paso si no se tenían los resultados del paso anterior.

- Investigación de motores disponibles e investigación de mecanismos de brazos robóticos.
- Diseño de mecanismo de brazo.
  - Mecanismo para articulaciones esféricas
  - Diseño de engranajes
  - Diseño de brazo para sostener los motores y engranajes
- Obtención de motores y otros elementos necesarios.
- Construcción de brazo
- Comienzo de programación
  - Microcontrolador
  - Programas
- Diseño de la interfaz gráfica

## VI. MOTORES

Los motores que se necesitaban para el diseño del brazo tenían que ser capaces de cumplir, como mínimo, con las limitaciones del cuerpo humano que se ven en la Tabla 1. Es decir, necesitaban llegar a los mismos ángulos que llegan las articulaciones humanas. También se necesitaba tener retroalimentación del movimiento que generaban los motores, en otras palabras, el motor tenía que ser capaz de comunicarse con una computadora y decir cuánto se había movido. Con respecto a los aspectos físicos, el motor debía ser lo más pequeño posible para que pudiera cumplirse con el límite de tamaño, y pudiera disimularse si se quisiera poner encima las decoraciones necesarias para crear un muñeco. Finalmente, el peso del motor debía ser liviano, ya que cada motor estaría cargando otros motores más la estructura del brazo.

Los motores DC quedaron descartados, ya que no se puede controlar su posición al no ser que se le implemente algún tipo de decodificador.

Los motores que se decidieron como mejor opción fueron los servomotores. A pesar de que los stepper tienen una manera útil de obtener los datos para la aplicación de animación foto a foto, ya que cada movimiento que hacen es una dimensión específica y tienen un torque muy bueno, estos resultan bastante pesados y caros en comparación a los servomotores.

*Tabla 7 Tabla comparativa de motores stepper y servomotores*

	Stepper	Servomotor Hitec	Servomotor Absoluto-Faulhaber	Servomotor Incremental- Faulhaber
Voltaje	3.9 V	5 V	6 V	3.3 V
Corriente	600 mA	460 mA	1160 mA	370 mA
Torque	180 g-cm	700 g-cm	17.13 g-cm	7.14 g-cm
Peso	60 g	4.8 g	4.3 g	4.3 g
Tamaño	20 <sup>2</sup> x30 mm	20x17x8.6 mm	L: 28.1mm Ø: 10mm	L: 24mm Ø: 8mm
Rango de movimiento	1.8° por paso	0°-195°	0.088° por paso	7.2° por paso
Precio	US \$17.95	US \$13.89	US \$148.1	US \$7.75

[20][21][22][23][26][41]

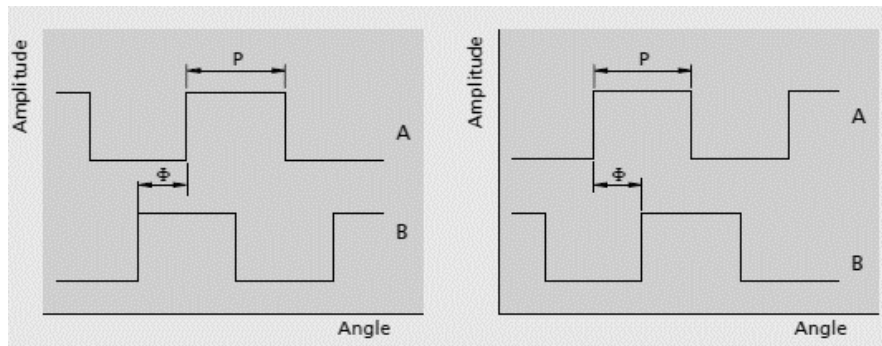
Se explicó anteriormente el funcionamiento de cada servomotor, en la Tabla 7 se puede ver una comparación entre los motores, donde se incluye el precio, sus capacidades, y rangos de movimiento. El stepper se descartó por motivos de peso, tamaño, y precio. Los motores que se decidieron usar fueron los servomotores, así que se tuvo que analizar las ventajas de cada decodificador disponible. La opción inicial, fue el servomotor absoluto.

Este motor tiene buen tamaño, su torque es algo bajo en comparación al motor Hitec y al stepper, pero su precio es muy elevado. Este motor hubiese sido muy útil ya que este tipo de servomotor usaba un motor sin escobillas, lo cual lo hace más exacto y resistente. Asimismo, su forma de decodificar la posición era exacta, es decir cada posición ya tiene un valor predeterminado, entonces hubiese sido fácil trabajar con él. Finalmente, tenía 4096 pasos por revolución, lo que permite que cada paso fuese de menos de  $1^\circ$ , lo que da libertad a mover el brazo en movimientos diminutos, y siempre exactos.

Con el servomotor absoluto descartado, la siguiente opción fue el servomotor Hitec. Este motor tiene los mismos valores predeterminados de posición, a pesar de que sus movimientos estén limitados, y solo pueda girar aproximadamente  $180^\circ$ . Su torque es alto, gracias al tren de engranajes que tiene. La única desventaja, a parte de su rango de movimiento, es su forma cúbica, ya que ocupa bastante espacio y no es muy fácil de disimular si fuese necesario.

Finalmente, los servomotores incrementales son los más pequeños del grupo presentado. Su torque es igualmente el más pequeño, y su precio es el más accesible de todos. Su decodificador está dividido en 50 pasos por revolución, lo cual es poco en comparación al stepper y al servomotor absoluto. Aun así, es una buena opción, el tipo de decodificador que tiene funciona por pasos, y su forma permite ver en qué dirección gira gracias a los dos canales de información extra que tiene (canal A y B en Figura 28). Con el número de pasos conocidos, y el conocimiento en qué dirección gira se puede programar este motor para que funcione igual que el servomotor absoluto.

Figura 28 Pulsos de canales en servomotor incremental para detectar la dirección de giro



[23]

La ventaja de que sus pasos sean exactos y que se mueva una cantidad de  $7.2^\circ$  es que los movimientos siempre serán justamente esa cantidad. La posibilidad de tener un error es baja, y esa cantidad es suficientemente grande para crear el movimiento y fluidez que se desea en Animación foto a foto.

Analizando las dos opciones, se decidió hacer un diseño para cada uno de los motores no descartados, es decir el servomotor Hitec, y el incremental Faulhaber.

Los servomotores incrementales que se escogieron fueron Faulhaber 0816 con decodificador PA2-50 (Figura 29). Sus especificaciones son aquellas que aparecen en la Tabla 7. Como se puede ver el torque es bastante pequeño, así que hay que aumentar el torque para que los motores sean capaces de levantar más carga.

Figura 29 Servomotor Faulhaber 0816 con decodificador PA2-50



La forma de este motor permite maniobrar su posicionamiento dentro del diseño del brazo para poder usar el espacio eficientemente.

Su resolución es de 50 pasos en un círculo. Se usa la Ecuación 1 para saber a qué ángulo equivale cada uno de los pasos en el motor. Con los ángulos conocidos se pueden hacer los cálculos y programación necesaria para controlar correctamente el motor. Este motor es capaz de definir un cero desde cualquier posición de inicio. Es decir, como no tiene los valores

predeterminados su cero puede estar en la posición que se coloque, y de ahí se pueden empezar a contar las posiciones.

*Ecuación 1 Relación entre grados y números de pasos del motor*

$$\frac{x}{360^\circ} = \frac{y}{50 \text{ líneas}}$$

La desventaja del servomotor Hitec, como se comentó antes, es su rango de rotación limitado. Aun así, con el rango de movimiento que alcanzan los motores Hitec, se puede alcanzar la mayoría de las posiciones del brazo humano, pero el movimiento caricaturesco que le quieran dar a los muñecos quedaría algo limitado.

Otra desventaja de este motor es su forma y tamaño, pues no permite disimular los motores a la forma cilíndrica y delgada del brazo. El torque es bastante bueno debido a los engranajes rectos internos que hay en su caja, y a diferencia del motor Faulhaber no se necesitaría el uso de algún mecanismo que cambie de dirección el giro, ya que moviendo el motor físicamente será suficiente.

*Figura 30 Nano Servomotor Hitec HS40*



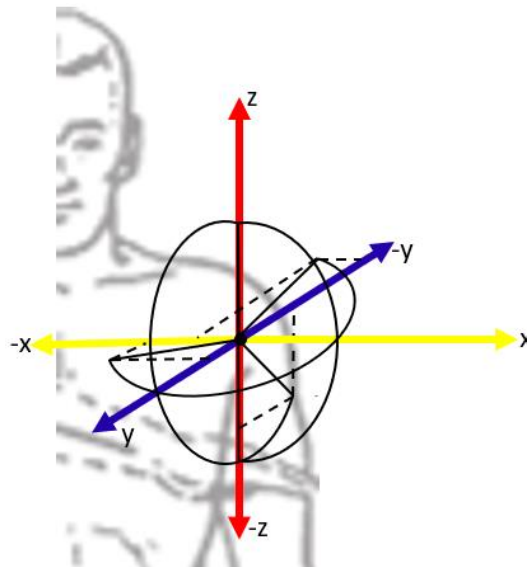
Aun así, estos motores también pueden ser una muy buena opción ya que al tener fija cada posición, es mucho más sencillo lograr que las posiciones se guarden y siempre regresen al mismo lugar sin necesidad de calcular desde que 0 estaban.

## VII. MECANISMO DEL BRAZO

### A. Articulaciones esféricas

El brazo humano tiene la capacidad de moverse de manera casi rotatoria con 7 grados de libertad: tres en el hombro y la muñeca(roll-pitch-yaw), y uno en el codo(pitch). Tiene un muy buen alcance en todos los planos, a pesar de que no sea de 360 grados. En la Figura 31 se puede divisar el alcance que logra tener el brazo con respecto al hombro. En la Tabla 1 se ven exactamente los valores que tiene cada ángulo.

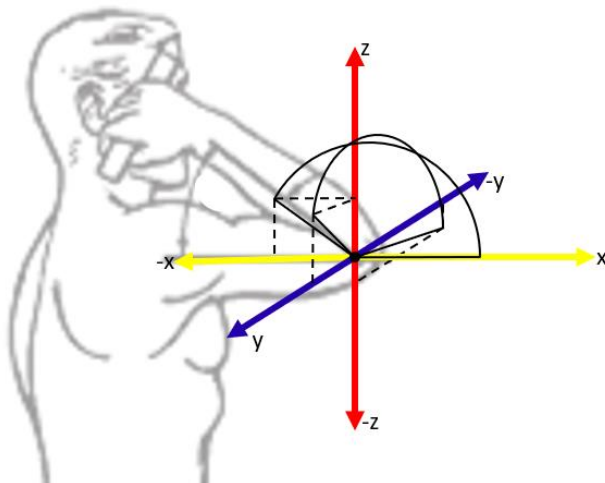
*Figura 31 Movimiento generado por el hombro (esta es una representación aproximada)*



Elaboración propia

El codo, en comparación al hombro, tiene movimientos limitados. Logra moverse en el plano YZ, pero gracias a los músculos presentes entre el hombro y el codo. Su limitación de movimiento en el plano XZ es gracias a los huesos. En la Figura 32 se pueden ver los movimientos principales que se generan en el codo. En el plano XY no se muestra movimiento ya que ese movimiento lo genera el hombro, como se ve en la Figura 31.

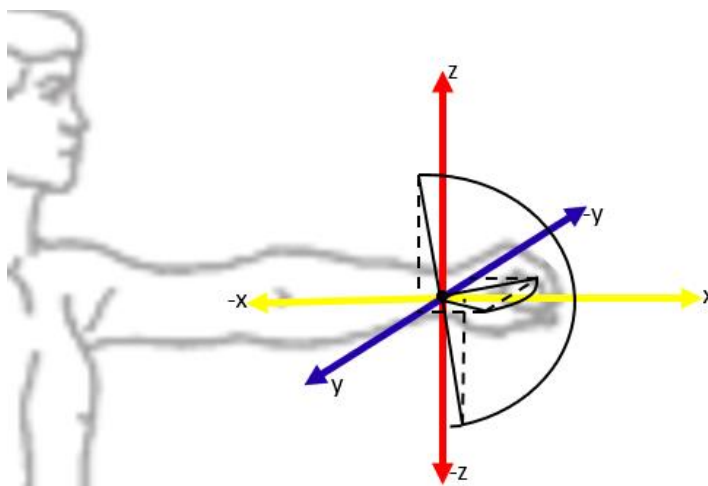
*Figura 32 Movimiento generado por el codo (esta es una representación aproximada)*



Elaboración propia

La muñeca es una de las últimas articulaciones en el brazo, sin contar los dedos. Consta de varios huesos y tendones que ayudan a su movimiento. Aun así, es una de las articulaciones con menos alcance en su movimiento. En la Figura 33 se puede el límite de que tiene la muñeca.

*Figura 33 Movimiento generado por la muñeca (esta es una representación aproximada)*



Elaboración propia

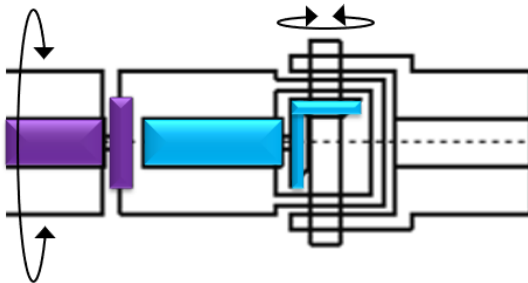
Todo el brazo tiene bastante rango de movimiento. Muchos de los movimientos están vinculados entre las articulaciones, los movimientos musculares y los tendones. Lo importante en este trabajo era lograr que se tuviera el mismo alcance sin necesidad de replicar exactamente la anatomía humana. Era esencial que el brazo robótico logrará imitar las mismas posiciones que el

brazo humano, para esto se pensó en un mecanismo capaz de hacer que el brazo se moviera en todos los planos.

El mecanismo consiste en dos motores por articulación. Un motor da rotación en el eje X y seguido de este, otro motor que hace un movimiento desde -Y hasta Y (Figura 34). Todas las posiciones disponibles en el plano XYZ se pueden alcanzar con este mecanismo, excepto por la parte donde se encuentra el motor que da la rotación. En la Figura 35 se puede ver como se moverían los dos motores.

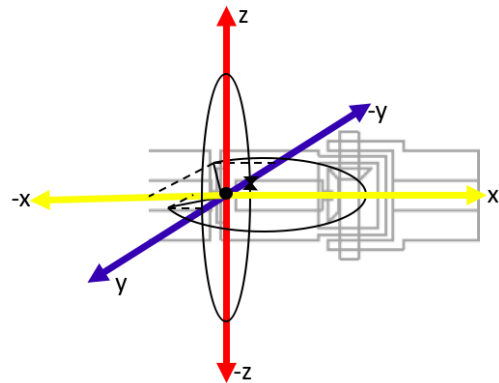
Como se puede observar el primer motor (el morado) hace girar al segundo motor (el azul), y el rango del segundo motor (en el plano XY) se vería reflejado según vaya girando el primer motor. Es decir, si el primer motor gira 90 grados, el plano de movimiento del segundo motor cambiaría a ser el plano XZ, y así sucesivamente cambiaría cada plano del segundo motor con la rotación del primer motor.

*Figura 34 Mecanismo para articulaciones con motores Faulhaber*



Elaboración propia

*Figura 35 Movimiento de mecanismo en el plano cartesiano*



Elaboración propia

Como se puede ver con este tipo de mecanismo el rango de movimiento es mucho mayor al del brazo humano. En la parte de programación se le puede poner límites a estos movimientos para que repliquen el brazo humano, si así se quisiera. Para cada articulación se necesitaría usar el mecanismo de dos motores, por consecuencia la muñeca perdería un movimiento. Esto es porque se necesitaría un tercer motor en la muñeca, y esto no es factible debido al espacio. El movimiento que se perdería sería en el plano XY, y como se puede ver en la Figura 33, no es un movimiento muy significativo.

## B. Engranajes

Los engranajes eran necesarios para cambiar la dirección de rotación de eje del motor Faulhaber y para aumentar su torque. En cambio, para los motores Hitec era suficiente con rotar el motor completo a la posición que se necesitara, ya que el torque que proporcionan es alto.

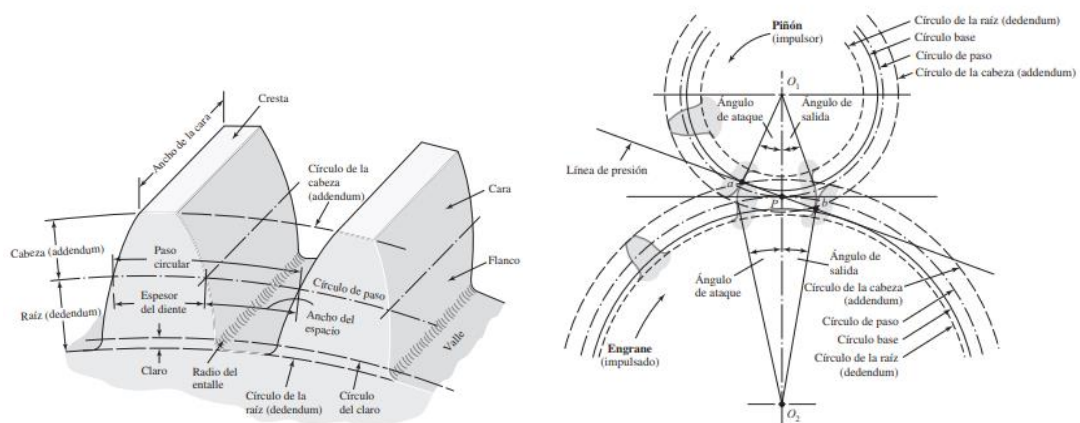
Para este cambio de giro y aumento de torque se podrían usar dos tipos de engranajes: engranajes cónicos y engranajes de tornillo sin fin.

Se escogieron los engranes cónicos rectos, debido a su facilidad de diseño y creación. Estos engranes son capaces de aumentar el torque considerablemente aun siendo bastante pequeños. Diseñar el par de engranajes necesarios para aumentar el torque del motor Faulhaber requirió que se usaran una serie de fórmulas (Tabla 8 Y Tabla 15) y guías (Figura 36) para lograr el diseño.

Otra opción aparte de los engranajes cónicos rectos eran los engranajes cónicos helicoidales. La razón por la cual los helicoidales no se seleccionaron a pesar que su transmisión fuese mucho más continua, menos ruidosa y sin tanta fricción, fue su diseño complejo. Realmente no se requiere que sea tan continuo el movimiento no fue necesario usar de estos engranajes.

El movimiento de los engranajes no tiene que ser necesariamente continuo o silencioso, esto es debido a que los movimientos en animación foto a foto son pausados, es decir, se mueve el muñeco, queda así un tiempo y luego se vuelve a mover. Por ende, el movimiento del brazo será por medio de pulsos y el movimiento continuo no es una prioridad.

Figura 36 Nomenclatura de un engranaje



[8]

Tabla 8 Datos principales de engranes cónicos

Objeto	Sim.	Dim.	Ecuaciones	Piñón	Engrane
Angulo de eje	$\Sigma$	grado	Valor predeterminado	90	
Modulo	$m$	mm	Ecuación 2 Modulo $\frac{d}{z}$	0.667	
Angulo de presión	$\alpha$	grado	Valor predeterminado	20	
Número de dientes	$z$		Valor predeterminado	13	30
Diámetro de paso	$d$	mm	Ecuación 3 Diámetro de paso $zm$	8.667	20

[8][32]

La Figura 36 da las dimensiones principales para diseñar un engranaje cónico recto desde cero, en la Tabla 15 (anexos) se puede ver el resto de los cálculos que se usaron para conocer todas las dimensiones de los engranes. Como Inventor ya cuenta con la opción de diseñar un par de engranajes cónicos, solo pide que se ingresen unos cuantos datos, los cuales son los que se ven en la Tabla 8.

Uno de los datos que pedía Inventor era la relación de dientes entre el piñón y la corona. Se usó la Tabla 9 para obtener una relación correcta, sin interferencias. El ángulo de presión que se escogió fue el de 20° ya que este ángulo permite tener la máxima transmisión de torque con el menor número de dientes, y disminuye la probabilidad de crear un socavado en los dientes. Igualmente, esta cantidad es reconocida y recomendada por el AGMA para la mayoría de las aplicaciones. La combinación seleccionada fue la de 13/30, ya que esta relación iba a permitir que la transmisión de potencia pudiera ser más continua y suave.

*Tabla 9 Combinación de número mínimo de dientes en un engranaje recto*

Ángulo de presión	Combinación de número mínimo de dientes				
14.5°	29/29	28/29	27/31	26/35	25/40
20°	16/16	15/17	14/20	13/30	
25°	13/13				

[8]

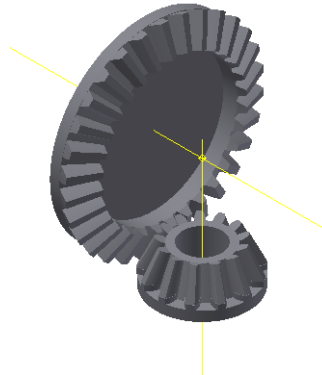
Luego de escoger el número de dientes y el ángulo de presión se necesitaba definir el tamaño del piñón y del engrane. En otras palabras, el diámetro de paso de cada uno. Para esto se consideró el tamaño máximo (20mm) que podía ser el engrane para que no ocupara tanto espacio, y se planteó un tamaño mínimo (5mm) para el piñón para que las piezas pudieran ser fabricadas sin problema en la impresora 3D. Con estos datos se calculó el diámetro de paso que tendría con cada diámetro de paso con la Ecuación 6, y se decidió que usar el diámetro de paso del tamaño máximo sería mucho más conveniente por motivos de maquinado y transmisión de potencia.

Con el número de dientes y el paso diametral, se pudo calcular el diámetro de paso, y con estos datos se diseñó en inventor los engranajes cónicos que se necesitaban. Se compararon algunos de los resultados de inventor con los resultados de la Tabla 10, y muchos de los resultados fueron bastante similares (Figura 37).

*Tabla 10 Comparación de resultados Inventor vs. Cálculos*

Característica	Cálculos		Inventor	
	Piñón	Engrane	Piñón	Engrane
Diámetro de cabeza	10.348	20.332	9.576	20.424
Diámetro de paso	8.667	20	8.667	20
Diámetro de base	6.466	12.833	7.443	19.470
Adendum	0.916	0.148	0.8	0.8

*Figura 37 Engranajes cónicos rectos diseñados en inventor para motor Faulhaber*



Elaboración propia

### C. Diseño de brazo

El rango de movimiento del brazo humano es bastante amplio, y cada articulación tiene un rango de movimiento específico el cual puede ser alcanzada por medio de los músculos, los tendones y la forma de los huesos, como se puede ver claramente en la Tabla 1 y la [38]

*Figura 10.*

Para empezar el diseño del mecanismo del brazo se tuvo que tomar en cuenta la forma de los motores y pensar cual sería la mejor opción para mantener los motores firmes. Para los motores Hitec, su diseño fue bastante sencillo, ya que estos motores son usados principalmente para aplicaciones de hobby así que, tanto la caja como el eje de salida, vienen diseñados para atornillarse a superficies.

El tamaño que se consiguió de los motores Hitec fue casi perfecto, ya que permitieron que el tamaño del brazo fuese de un poco menos de 6 pulgadas, y a la vez permitió proporcionar el brazo con respecto a tamaños reales. Con la Ecuación 4 se obtuvieron la relación de tamaños de las partes del brazo, y en la Tabla 11 se pueden ver los resultados de las dimensiones que debería tener el brazo.

*Ecuación 4 Relación para tamaños del brazo*

$$\frac{x}{152.4mm} = \frac{y}{675mm}$$

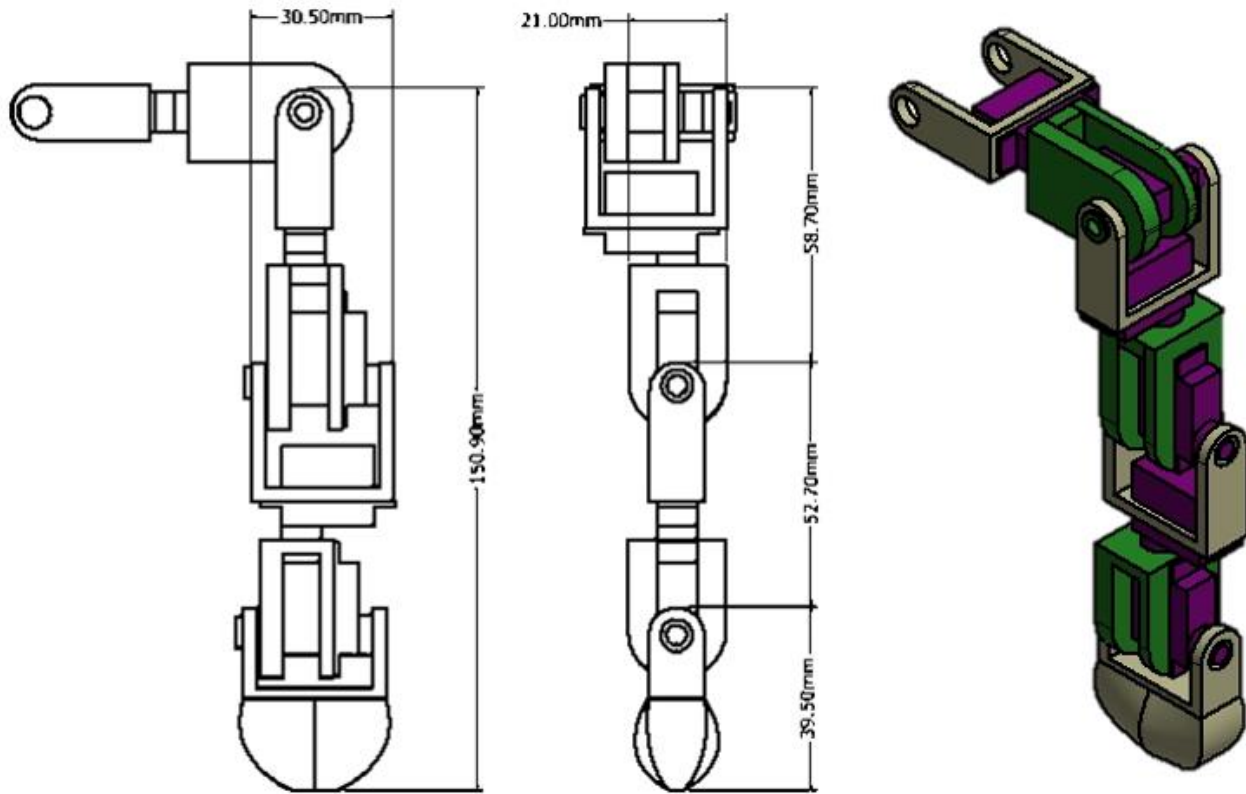
*Tabla 11 Tamaño proporcionada de la mano*

	Dimensión Humana	Dimensión Calculada	Dimensional
Hombro-Codo	265	59.83	mm
Codo-Muñeca	235	53.06	mm
Muñeca-Dedos	175	39.51	mm
Diámetro de muñeca	47.75	10.78	mm
Diámetro de hombro	192.58	43.48	mm
Diámetro codo	75.60	17.07	mm

La única relación que no salió fueron los diámetros de cada articulación. Esto fue por el tamaño y forma de los motores, su grosor era algo grande como para ir cambiando los diámetros y que aun así se mantuviera proporcional con respecto al largo. Por esta razón se decidió mantener los anchos menores al diámetro de hombro. En la Tabla 11 se puede ver como quedo el diseño y los distintos tamaños del brazo.

Para este diseño se decidió usar MDF, ya que debido al tipo de motores resultaría mucho mejor atornillar las piezas en madera. Igualmente, el peso de la estructura no resultaría muy pesado con este material.

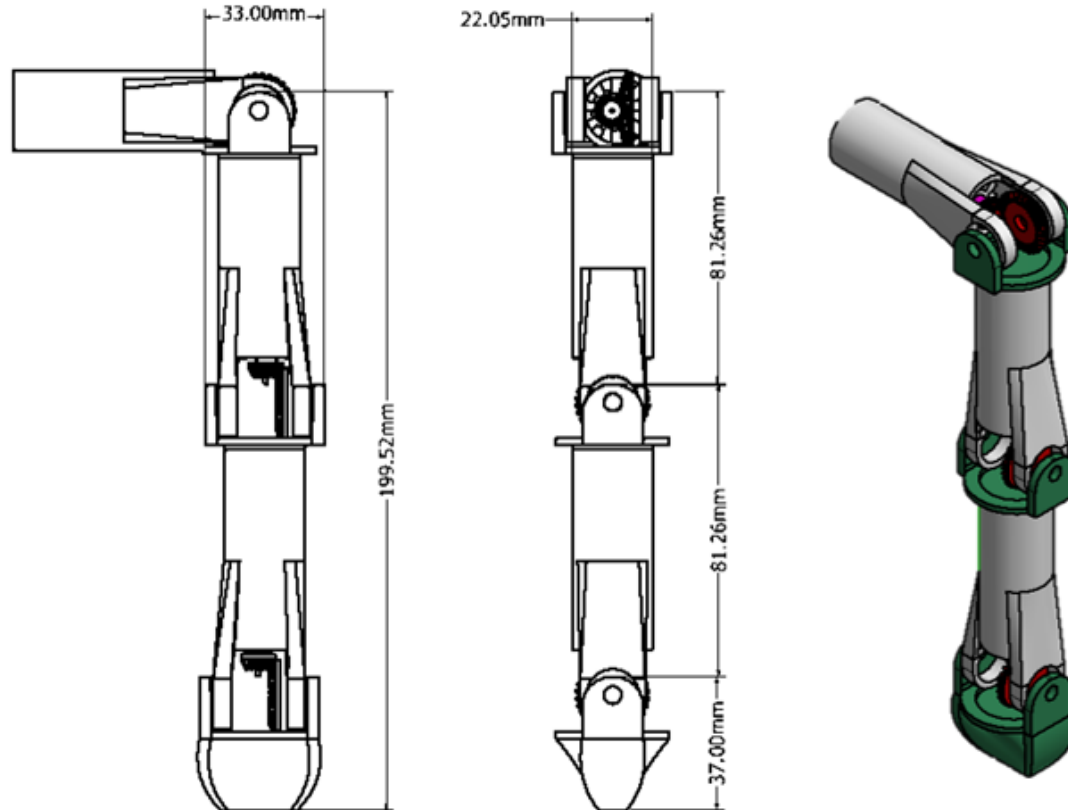
Figura 38 Diseño y dimensiones de brazo con motores Hitec (Diseño 1)



Elaboración propia

En el caso de los motores Faulhaber se tenía que tomar en cuenta los engranajes que iban junto con los motores. Debido a los tamaños del motor y del engranaje no se pudo mantener las relaciones necesarias del brazo, el tamaño se excedió por una pulgada y media aproximadamente, pero los diámetros de las articulaciones no excedieron el máximo que se tenía. El diseño con estos motores resultó más estético que el diseño de los motores Hitec. Como no se tenía mucho espacio para posicionar los motores, los tamaños de articulación a articulación resultaron iguales (Figura 38).

Figura 39 Diseño y dimensiones de brazo con motores Faulhaber (Diseño 2)

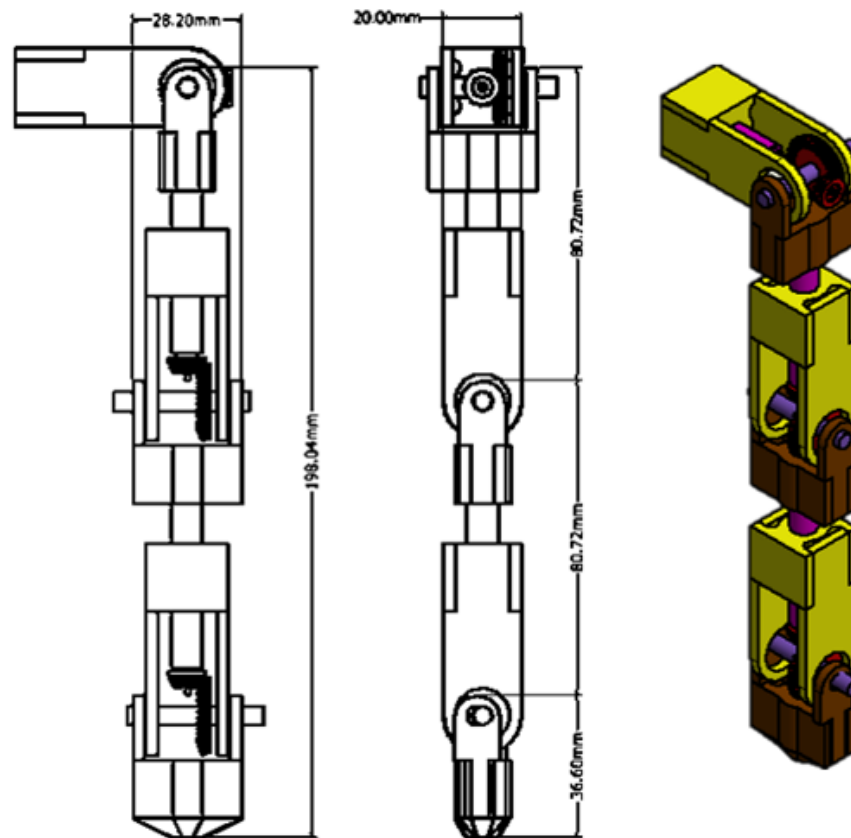


Elaboración propia

Este diseño se pensó con el propósito de ser impreso completamente por la impresora 3D con PLA, ya que con la impresora se podían conseguir diseños más complicados y mejores para sostener los cilindros que son los motores Faulhaber. El problema que presento este material fue su peso, era muy pesado para los motores, así que se trató de crear otro diseño con MDF, que fuese más liviano que el diseño 2.

El diseño 3 no es completamente hecho en MDF. Los engranajes se pensaron siempre para ser creados en la impresora 3D con PLA, ya que en la cortadora no es posible diseñar los engranajes cónicos, debido a su forma. En este diseño se puede ver que el diseño fue una mezcla entre los diseños 1 y 2. Los cambios de este diseño lograron que el peso del brazo para los motores Faulhaber se disminuyera a la mitad.

Figura 40 Diseño y dimensiones de brazo con motores Faulhaber (Diseño 3)



Elaboración propia

#### D. Análisis de Fuerzas

Esta parte se enfocó más que nada en el torque final de los engranajes y en el torque provocado por los pesos del brazo. Se hizo un análisis para cada diseño de brazo, tomándose en cuenta que el momento cuando tendría que ejercer más fuerza el motor iba a ser cuando el brazo estuviera en voladizo completamente. Con este conocimiento se midieron las distancias necesarias y las cargas se calcularon con Inventor.

*Ecuación 5 Cálculo de torque*

$$T = d \times F$$

Donde:

T = Torque

D = Distancia desde el hombro a punto de fuerza aplicada (la carga)

F = fuerza aplicada (peso de brazo)

Para calcular correctamente las cargas se tuvo que crear materiales nuevos en Inventor e ingresar todos los datos necesarios de cada material, es decir del MDF y del PLA. Los datos incluían el módulo de elasticidad, la fuerza flexural, la densidad, el módulo de corte, fuerza de tensión, la conductividad térmica y su capacidad de calor específico.

En las Tabla 12, Tabla 13, y Tabla 14 se pueden ver la distribución de pesos según la articulación. Es decir, se ve cuanto peso estarían cargando cada motor de cada articulación, y el torque necesario para levantarlo. Como se mencionó antes, el hombro estaría cargando la mayor carga al momento que el brazo este completamente en voladizo.

Como se puede ver el torque que necesitaría cada hombro es mucho más alto que la capacidad de los motores Faulhaber. En el caso de los motores Hitec el torque necesario para levantar todo el brazo es un poco menos que la capacidad máxima del motor, lo cual no es bueno ya que se lleva el motor al trabajar en sus límites.

*Tabla 12 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Hitec, diseño 1*

	<b>Pesos(g)</b>	<b>Torque necesario(g*cm)</b>
<i>Hombro de motor Turnigy</i>	19.2	651.888
<i>Estructura Hitec</i>	24	
<i>Codo de motor Hitec</i>	9.6	237.824
	16	
<i>Muñeca de motor Hitec</i>	0	3.95
	1	

En el caso del diseño para los motores Hitec se decidió usar otros motores del mismo tipo, pero con mayor torque, para poder levantar la carga sin necesidad de estar en los límites. El torque que provee los motores Hitec es de 700 g\*cm, lo cual es suficiente para levantar 652 g\*cm, pero esto no deja suficiente espacio para levantar más peso. Esto es un inconveniente ya que el propósito del diseño del brazo es lograr crear una estructura a la cual se le pueda poner más peso encima si así se quisiese. Por este motivo el motor Turnigy se consideró una buena opción a pesar de su tamaño, ya que es capaz de levantar 900 g\*cm.

El codo del diseño con el motor Hitec no carga tanto como el hombro. El análisis se hizo de la misma manera que con el hombro, con el antebrazo, muñeca y mano en voladizo. Como se puede

ver el torque no es muy alto como para afectar significativamente al motor, y todavía da espacio a que pueda cargar más peso de ser necesario.

Finalmente, para la muñeca de este primer diseño el torque necesario es tan pequeño que realmente no afecta al motor, lo que permite poner más accesorios a ese punto de la mano, tomando en cuenta la cantidad de peso permisible en las otras dos articulaciones.

*Tabla 13 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Faulhaber, diseño 2*

	<b>Pesos(g)</b>	<b>Torque necesario(g*cm)</b>
Hombro de motor Faulhaber	17.2	1620.10
Estructura Faulhaber	64	
Codo de motor Faulhaber	8.6	362.45
	30	
Muñeca de motor Faulhaber	0	44.4
	12	

El torque de los motores Faulhaber es bastante pequeño, por este motivo se intentó usar engranajes para poder aumentar su torque. Con los engranajes que se diseñaron fue posible aumentar el torque transmitido a 16.47 g\*cm, lo cual es un poco más del doble del torque original. Pero aun así estos valores resultaron muy pequeños para el torque necesario del brazo del diseño 2.

El brazo del diseño 2 es un diseño complejo para ser fabricado con una impresora 3D. El PLA no es un material muy pesado, pero al momento de crear un brazo con tantos accesorios de distintos materiales, resulto ser pesado para los motores. En este diseño se estaba considerando usar rodamientos, los cuales pesaban 3.5g, para poder facilitar la transmisión de torque entre las articulaciones. Pero esto solo agregaría al peso del brazo, aumentando así el torque de todo el brazo.

En el caso del codo y de la muñeca tampoco genera suficiente torque el motor para poder levantar el peso. La diferencia es bastante grande, y tiene que ver mucho con el diseño y el

material, que resulto muy pesado para esta aplicación. Por este motivo, se decidió generar un tercer diseño más sencillo, capaz de ser fabricado en la cortadora laser.

*Tabla 14 Torques necesarios por articulación de brazos diseño con motores Faulhaber, diseño 3*

	<b>Pesos(g)</b>	<b>Torque necesario(g*cm)</b>
Hombro de motor Faulhaber	17.2	954.55
Estructura Faulhaber	31	
Codo de motor Faulhaber	8.6	222.79
	19	
Muñeca de motor Faulhaber	0	21.96
	6	

El tercer diseño del brazo fue hecho pensando que se usarían los motores Faulhaber, ya que este diseño se hizo para disminuir el torque en el segundo diseño. A pesar del cambio que se hizo, se puede ver que los motores no son capaces de levantar ninguna de las tres articulaciones. Este tercer diseño se hizo con MDF para las partes más grandes, y con PLA para los engranajes. EL torque necesario de este diseño no toma en cuenta lo rodamientos de 3.5g. Solo se consideró el peso de la estructura y de los motores, para comprobar si se podía levantar ese peso como mínimo.

### E. Diseño Final

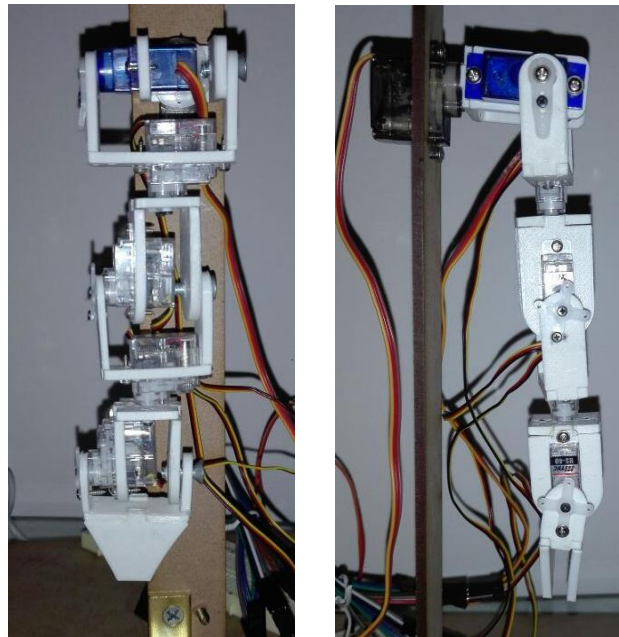
Tras ver el resultado del análisis de fuerza se puede ver claramente que la mejor opción de diseño es el del diseño 1, con los motores Hitec. Estos motores tienen mayor torque, y son capaces de aguantar más que su propio peso, lo cual es algo conveniente para la aplicación de Stop Motion donde se requiere cargar la estructura y las decoraciones.

*Tabla 15 Peso de estructura del diseño final con distintos materiales*

Peso de estructura	
MDF	PLA
17.00 gr	15.50 gr

Al crear el diseño se decidió hacer la estructura en MDF y en PLA, para comparar los pesos y decidir cuál sería mejor. Como se puede ver en la Tabla 15 la estructura con PLA es un poco más liviana que la estructura hecha con MDF. Por este motivo se decidió usar PLA en el diseño.

*Figura 41 Diseño final ensamblado*



Elaboración propia

Como último factor, con respecto al diseño del brazo, el mecanismo que se decidió utilizar solo permitía tener seis grados de libertad. Con respecto a los grados de libertad que tiene el brazo humano, sólo faltó implementar un grado de libertad, el cual fue un movimiento de la muñeca. Este movimiento se descartó debido al tamaño de los motores.

La muñeca iba a requerir un tercer motor para lograr que se cumplieran todos los grados de libertad que tenía un brazo humano. Pero un tercer motor iba a sacar de proporción el brazo y lo iba hacer más pesado de lo que se esperaba. Es por esto que el diseño final solo tiene seis grados de libertad. Con esta cantidad se logra tener todo el alcance que se necesita para la aplicación de Stop Motion.



## B. Programa

Las películas de animación foto a foto usan distintos aparatos y programas para garantizar dar un ambiente, iluminación y nitidez casi perfectas y naturales. Se usan cámaras DSRL para que las fotos salgan bien, se usan distintas luces para dar efectos de luz en la película, y se usan bastantes estabilizadores, tanto para las cámaras como para los muñecos.

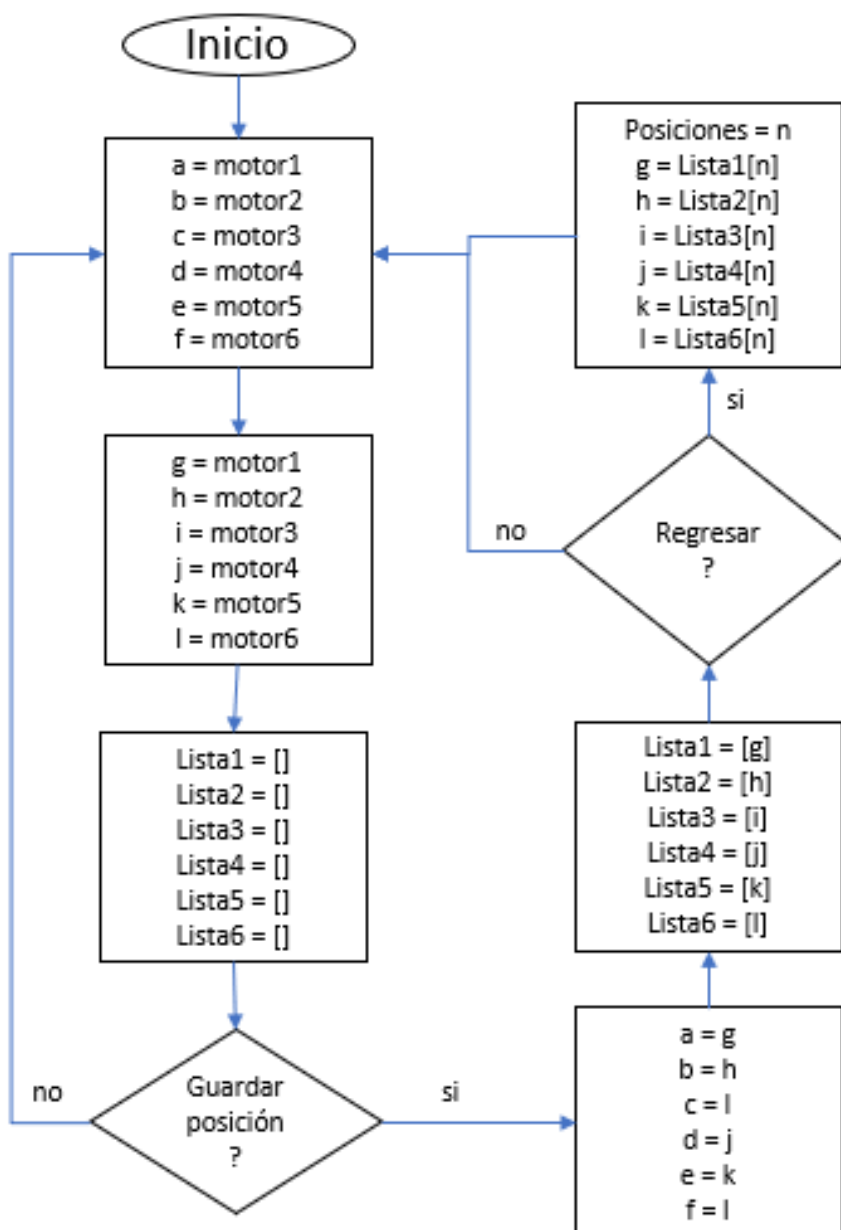
Controlar las cámaras es un trabajo delicado, ya que si la cámara se mueve las fotos tomadas ya no se toman en cuenta ya que el ángulo de foto cambia y no se verían movimientos naturales. Por este motivo existen distintos programas capaces de controlar una cámara sin necesidad de tocarla. Uno de estos programas se llama Dragonframe, es uno de los programas más usados para la creación de películas de animación foto a foto. En este programa se guarda una serie de imágenes a medida que se van tomando, y luego se pueden renderizar para crear una animación (Figura 43).

Aparte de este programa, se decidió usar Matlab para el control de los servos. Matlab es un software utilizado en el área de robótica. Este programa puede conectarse con distintos hardwares y softwares para su funcionamiento. Permite crear interfaces gráficas, hacer cálculos complejos, programación orientada a objetos y análisis completos de sistemas dinámicos.

En Matlab se programa todo lo que tiene que ver con el control del brazo. Es decir, es este programa que se comunica con el microcontrolador y manda las señales a los motores para moverse como se desee. El programa es capaz de limitar los movimientos de los servomotores y guardar las posiciones necesarias para poder repetirlos si fuese necesario.

Aparte de las razones previamente explicadas, la razón principal que se decidió usar Matlab fue debido al toolbox de robótica que tiene. Con este toolbox se puede representar un brazo robótico en la interfaz y se puede modificar sus parámetros para poder visualizar los movimientos del brazo.

Figura 43 Diagrama de flujo de programación



Elaboración propia

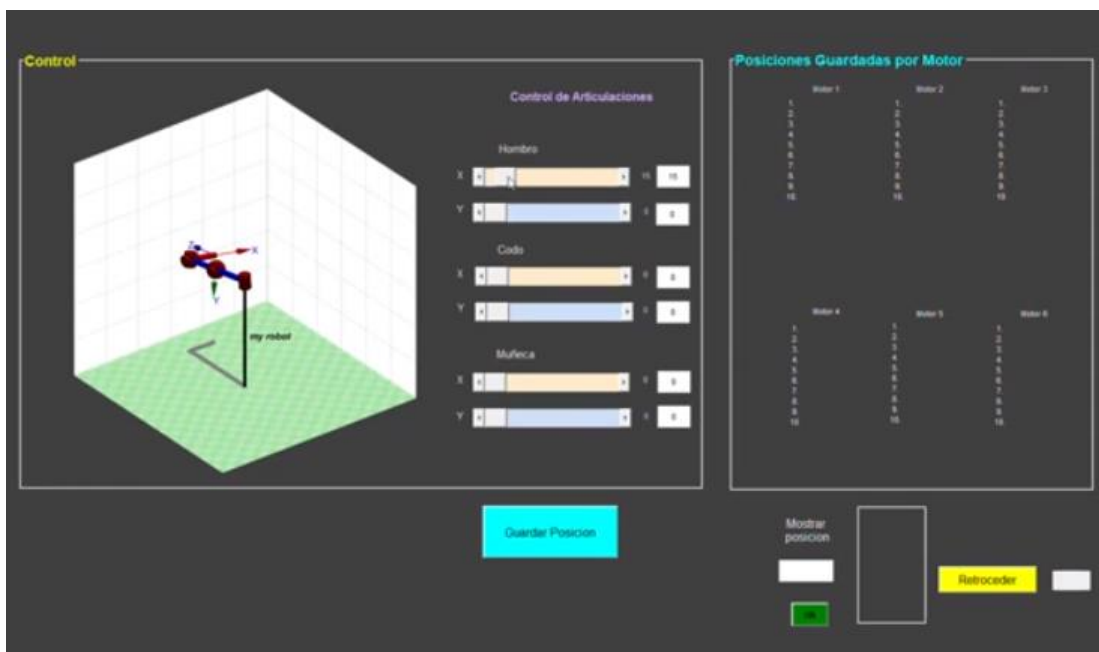
### C. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica se diseñó utilizando Matlab. El propósito de esta interfaz es darle al usuario la opción de poder controlar los movimientos del brazo desde la computadora. En ella se tenía que mostrar distintas opciones de movimiento y datos, para tener claro en donde estaba posicionado el brazo.

En la interfaz se presentaría un dibujo de la posición teórica del brazo, según los parámetros que se le ingresaran vía slider o ingresando un valor numérico. Cada articulación consiste en 3 sliders, ya que cada articulación se está considerando como un marco de coordenadas distintos. De esta forma se logra manejar cada articulación, y cada una con sus propios límites.

Aparte de esto se tiene una sección donde se puede ver que datos se están guardando en la lista, y se puede seleccionar cuantas posiciones se quiere retroceder o avanzar.

Figura 44 Interfaz gráfica



Elaboración propia

## IX. CONCLUSIONES

1. Con los recursos que se obtuvieron, el brazo tiene suficiente fuerza para poder levantarse a sí mismo, más el peso extra de los accesorios de los personajes, por lo que se puede decir que el diseño que se fabricó es funcional.
2. Actualmente las técnicas de animación están más enfocadas a estabilizadores, impresiones 3D para los personajes, y programas para controlar la cámara. Una aplicación para manejar a los títeres no se ha diseñado. Por este motivo el diseño de este trabajo tiene futuro si se desarrolla con las herramientas necesarias.
3. Un brazo humano tiene 7 grados de libertad, excluyendo los dedos. Esta aplicación logró tener solo 6 grados de libertad, debido a que se necesitaba un tercer motor en la muñeca lo cual sacaba de proporción el brazo y lo hacía más pesado.
4. El diseño del brazo con los motores Hitec, se considera la mejor opción para el prototipo presentado en este trabajo. Su única desventaja es el grosor en comparación al tamaño que tiene, sin embargo, las proporciones de longitud y alcance de movimiento se cumplen.
5. El diseño del brazo con los motores Faulhaber 0816 con decodificador PA2-50 se descartó por completo, ya que el peso de la estructura era demasiado para el torque que lograban proporcionar los motores, incluso con los engranajes.
6. La mejor opción para los motores que accionan el mecanismo del brazo son los servomotores con decodificadores absolutos. Sus posiciones determinadas simplifican la programación y control del brazo.

## X. RECOMENDACIONES

1. Encontrar otro mecanismo que no dependa necesariamente de motores puestos directamente en el brazo. Un sistema de poleas mezclado con aplicaciones neumáticas o hidráulicas podría funcionar bien si se consiguen materiales suficientemente pequeños, o si se mandan a hacer.
2. Crear un control remoto externo a la computadora. Es decir que en vez de manejar directamente el robot desde la computadora o tocando el títere, crear una réplica del robot para que se maneje a distancia, sin necesidad de hacer que el artista arriesgue dañar el muñeco por tocarlo tanto.
3. Encontrar o diseñar motores pequeños cilíndricos, como los Faulhaber, con capacidad de torques altos.
4. Buscar materiales más livianos para crear el armazón del brazo, y otros materiales que se necesiten. Ya que el peso de los materiales afecta mucho al diseño del brazo y la funcionabilidad del motor.
5. Si se logran conseguir motores más pequeños y con más torque se recomienda crear un diseño nuevo, más estético y funcional para la animación foto a foto.
6. Este modelo de brazo es para ser usado como un prototipo a desarrollarse, expandiéndose a un área puramente de robótica, o siguiendo con el enfoque cinematográfico.
7. Hacer que la comunicación entre el brazo y la computadora sea inalámbrica.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ada, L. (2018). *Adafruit Feather M0 Express - Designed for CircuitPython*. Obtenido de Adafruit: <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-express-designed-for-circuit-python-circuitpython/overview>
- [2] Ada, L. (2018). *Adafruit Metro Mini*. Obtenido de Adafruit: <https://learn.adafruit.com/adafruit-metro-mini/overview>
- [3] Adafruit. (02 de 2018). *Adafruit ItsyBitsy M0 Express - for CircuitPython & Arduino IDE*. Obtenido de Adafruit: <https://www.adafruit.com/product/3727>
- [4] Arduino. (2018). *ARDUINO NANO*. Recuperado el 2 de 2018, de store.arduino.c: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [5] ATG Engineering. (8 de 6 de 2017). *Helical bevel gears vs. worm gears | Advantages & disadvantages*. Recuperado el 3 de 2018, de ATG Engineering: <https://www.atg-engineering.de/en/bevel-gear-units-worm-gear-units-advantages-disadvantages/>
- [6] AVAN. (8 de 10 de 2016). *The Technology Behind Modern Stop-Motion Animation*. Recuperado el 12 de 2017, de futre science leaders: <https://www.futurescienceleaders.com/omega/2016/10/08/the-technology-behind-modern-stop-motion-animation/>
- [7] Budgor, Z. (25 de 10 de 2016). *The Tech Propelling Stop-Motion Filmmaking into the Digital Age*. Recuperado el 12 de 2017, de IQ: <https://iq.intel.com/tech-propelling-stop-motion-filmmaking-digital-age/>
- [8] Budynas, R. G., & Nisbett, K. J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica*. Mexico: MacGrawHill.
- [9] Circuit Specialists. (2016). *Stepper Motor Basics*. Recuperado el 1 de 2018, de www.circuitspecialists.com: <https://www.circuitspecialists.com/stepper-motor>
- [10] Condit, R. (2004). *Brushed DC Motor Fundamentals*. Recuperado el 1 de 2018, de microchip: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00905a.pdf>
- [11] Dengel, B. (s.f.). *Tooth Tips Under Pressure*. Recuperado el 3 de 2018, de khkgears: <https://www.khkgears.us/media/1213/understand-the-choice-of-pressure-angle-in-the-design-of-spur-or-helical-gearing.pdf>
- [12] Dirjish, M. (16 de 2 de 2012). *What's The Difference Between Brush DC And Brushless DC Motors?* Recuperado el 1 de 2018, de ElectronicDesign: <http://www.electronicdesign.com/electromechanical/what-s-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors>

- [13] DYNAPAR. (2010). *DYNAPAR. (How does a quadrature encoder works?)* Recuperado el 01 de 2018, de [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/quadrature\\_encoder/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/)
- [14] DYNAPAR. (2010). *Dynapar Incremental Encoder Overview.* Recuperado el 1 de 2018, de Dynapar : [https://www.dynapar.com/Technology/Encoder\\_Basics/Incremental\\_Encoder/](https://www.dynapar.com/Technology/Encoder_Basics/Incremental_Encoder/)
- [15] DYNAPAR. (2010). *Using Absolute Encoders with Your Application.* Recuperado el 1 de 2018, de Dynapar: <https://www.dynapar.com/technology/absolute-rotary-encoders/>
- [16] Earl, B. (24 de 8 de 2013). *About Servos and Feedback.* Recuperado el 1 de 2018, de learn.adafruit: <https://learn.adafruit.com/analog-feedback-servos>
- [17] Earl, B. (23 de 11 de 2015). *All About Stepper motors.* Recuperado el 1 de 2018, de learn.adafruit.com: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/all-about-stepper-motors.pdf>
- [18] Eglowstein, H. (s.f.). *Introduction to servo motors.* Recuperado el 1 de 2018, de Science Buddies: <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/references/introduction-to-servo-motors>
- [19] Failes, I. (8 de 22 de 2016). *Stop-Motion Animation Looks Old School, But its Tech Is Incredible.* Recuperado el 1 de 2018, de Inverse Entertainment: <https://www.inverse.com/article/20056-5-major-innovations-in-stop-motion-animation>
- [20] Faulhaber. (2018). *Brushless DC-Servomotor.* Recuperado el 1 de 2018, de [www.faulhaber.com](http://www.faulhaber.com): [https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN\\_1028\\_B\\_FMM.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_1028_B_FMM.pdf)
- [21] Faulhaber. (2018). *DC-Micromotors.* Recuperado el 1 de 2018, de Faulhaber: [https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN\\_0816\\_SR\\_FMM.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_0816_SR_FMM.pdf)
- [22] Faulhaber. (2018). *Encoder.* Recuperado el 1 de 2018, de [www.faulhaber.com](http://www.faulhaber.com): [https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN\\_AESM-4096\\_DFF.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_AESM-4096_DFF.pdf)
- [23] Faulhaber. (2018). *Encoders.* Recuperado el 1 de 2018, de [www.faulhaber.com](http://www.faulhaber.com): [https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN\\_PA2-50\\_MME.pdf](https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_PA2-50_MME.pdf)
- [24] Gear Motions. (14 de 6 de 2017). *Advantages of Worm Gears.* Recuperado el 3 de 2018, de [gearmotions.com](http://gearmotions.com): <https://gearmotions.com/advantages-of-worm-gears/>
- [25] Giang, K. (s.f.). *PLA vs. ABS: What's the difference?* Recuperado el 2 de 2018, de [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com): <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>
- [26] HiTec. (2018). *HS-40 Economical, Nano, Nylon Gear Servo.* Recuperado el 1 de 2018, de HiTec multiplex: <http://hitecrd.com/products/servos/micro-and-mini-servos/analog-micro-and-mini-servos/hs-40-economical-nano-nylon-gear-servo/product>

- [27] IRIM Lab Koreatech. (16 de 10 de 2017). *LIMS2-AMBIDEX : basic motion test*. Recuperado el 1 de 2018, de YouTube:  
<https://www.youtube.com/watch?v=Sg1z725Dsd8>
- [28] IRIM Lab. Koreatech. (16 de 10 de 2017). *[142] 생체 이해에 기반한 로봇 – 고성능 로봇에게 인간의 유연함과 안전성 부여하기*. Recuperado el 2 de 2018, de SlideShare:  
<https://www.slideshare.net/deviuew/142-80848940>
- [29] Kelly, K. (4 de 2 de 2009). *Geekbomb a brief history of stop motion animation*. Obtenido de [www.slashfilm.com](http://www.slashfilm.com): <http://www.slashfilm.com/geekbomb-a-brief-history-of-stop-motion-animation/>
- [30] Khan, Z. (6 de 07 de 2015). *FAQ: What is the difference between absolute and incremental encoders?* Recuperado el 1 de 2018, de Motion Control Tips:  
<https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-the-difference-between-absolute-and-incremental-encoders/>
- [31] KHK gears. (2015). *Worm Gear – compact design*. Recuperado el 3 de 2018, de <http://khkgears.net>.
- [32] Kohara Gear Industry Co., Ltd. (2015). *CALCULATION OF GEAR DIMENSIONS*. Recuperado el 3 de 2018, de khkgears:  
[http://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/gear\\_technical\\_reference/calculation\\_gear\\_dimensions.html](http://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/calculation_gear_dimensions.html)
- [33] Kohara Gear Industry Co.,Ltd. (2015). *GEAR FORCES*. Recuperado el 3 de 2018, de khkgears: <http://khkgears.net/gear-knowledge/gear-technical-reference/gear-forces/>
- [34] Kohara Gear Industry Co.,Ltd. (2015). *Basic Gear Terminology and Calculation / Let's learn the basics of Basic Gear Technology*. Recuperado el 3 de 2018, de khkgears:  
[http://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/abcs\\_of\\_gears-b/basic\\_gear\\_terminology\\_calculation.html](http://khkgears.net/new/gear_knowledge/abcs_of_gears-b/basic_gear_terminology_calculation.html)
- [35] makeitffrom. (13 de 1 de 2018). *Medium Density Fireboard (MDF)*. ([www.makeitfrom.com](http://www.makeitfrom.com)) Recuperado el 3 de 2018, de <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Medium-Density-Fiberboard-MDF>
- [36] makeitfrom. (13 de 1 de 2018). *Polylactic Acid (PLA)*. ([www.makeitfrom.com](http://www.makeitfrom.com)) Recuperado el 3 de 2018, de <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>
- [37] MDME. (s.f.). *Ergonomics*. Recuperado el 1 de 2018, de learneasy:  
<http://www.learneasy.info/MDME/MEMmods/MEM30008A-EcoErgo/Ergonomics/Ergonomics.html>
- [38] NASA. (5 de 7 de 2008). *Anthropometry and Biomechanics*. Recuperado el 1 de 2018, de National Aeronautics and Space Administration:  
<https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>

- [39] pjrc. (2018). *Teensy USB Development Board*. Obtenido de PJRC Electronic projects.
- [40] PJRC. (s.f.). *Teensy 3.2 & 3.1 - New Features*. Recuperado el 2 de 2018, de [www.pjrc.com](https://www.pjrc.com): <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html#specs>
- [41] Pololu. (2018). *Stepper Motors*. Recuperado el 1 de 2018, de [www.pololu.com](http://www.pololu.com): <https://www.pololu.com/category/87/stepper-motors>
- [42] Redwood, B. (s.f.). *The Advantages of 3D Printing*. Recuperado el 2 de 2018, de [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com): <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- [43] Robot Park Academy. (15 de 6 de 2013). *Robotic Mechanisms – BEVEL Gears 51035*. Recuperado el 3 de 2018, de <http://www.robotpark.com>: <http://www.robotpark.com/academy/LR/51035-Bevel-Gears-Technical-Details.pdf>
- [44] Sanurag. (8 de 2010). *STOP MOTION TIMELINE*. Recuperado el 12 de 2017, de <http://www.tiki-toki.com>: <http://www.tiki-toki.com/timeline/entry/314216/Stop-Motion-Timeline/>
- [45] Sculpteo. (2018). *Acrylic for Laser Cutting and Laser Engraving*. Recuperado el 3 de 2018, de [www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com): <https://www.sculpteo.com/en/lasercutting/laser-cutting-materials/acrylic-material/>
- [46] Sculpteo. (2018). *MDF - Laser Cutting and Engraving*. Recuperado el 2 de 2018, de [www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com): <https://www.sculpteo.com/en/lasercutting/laser-cutting-materials/mdf-material/>
- [47] Sonkushre, P. K. (19 de 8 de 2016). *Laser Cutting: The Advantages and Disadvantages Prove Why it's Popular*. Recuperado el 2 de 2018, de [www.buzzle.com](http://www.buzzle.com): <https://www.buzzle.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-laser-cutting.html>
- [48] stopmo. (7 de 3 de 2017). *Animator Cube by Dito Gear*. Recuperado el 12 de 2017, de [stop motion magazine](http://stopmotionmagazine.net): <http://stopmotionmagazine.net/animator-cube-by-dito-gear/>
- [49] Varotsis, A. B. (s.f.). *Selecting the right 3D printing process*. Recuperado el 2 de 2018, de [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com): <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-right-3d-printing-process#by-use-case>
- [50] Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Recuperado el 1 de 2018, de <http://electrathonoftampabay.org>: <http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20%28BLDC%29%20Motor%20Fundamentals.pdf>

## XII. ANEXOS

*Tabla 16 Cálculos para diseño de engranaje cónico recto (sistema Gleason con detalles de Shigley)*

Objeto	Sim.	Dim.	Ecuaciones	Piñón	Engrane
Ángulo de eje	$\Sigma$	grado	Valor predeterminado	90	
Módulo	$m$	mm	$\frac{d}{z}$ <i>Ecuación 6 Modulo</i>	0.667	
Ángulo de presión	$\alpha$	grado	Valor predeterminado	20	
Número de dientes	$z$		Valor predeterminado	13	30
Diámetro de paso	$d$	mm	$zm$ <i>Ecuación 7 Diametro de paso</i>	8.667	20
Ángulo de cono	$\delta$	grado	$\delta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \Sigma}{z_1/z_2 + \cos \Sigma} \right)$ <i>Ecuación 8 Angulo de cono del piñón</i>  $\delta_2 = \Sigma - \delta_1$ <i>Ecuación 9 Angulo de cono del engrane</i>	23.429	66.571
Distancia de cono	$R$	mm	$\frac{d_2}{2 \sin \delta_2}$ <i>Ecuación 10 Distancia de cono</i>	10.899	
Ancho de la cara	$b$	mm	No debe exceder $R/3$	3.633	
Adendo	$h_a$	mm	$h_{a1} = 2m - h_{a2}$ <i>Ecuación 11 Adendo piñón</i>  $h_{a2} = 0.540m + \frac{0.460m}{\left( z_2 \cos \delta_1 / z_1 \cos \delta_2 \right)}$ <i>Ecuación 12 Adendo del engrane</i>	0.916	0.418

Objeto	Sim.	Dim.	Ecuaciones	Piñón	Engrane
Dedendo	$h_f$	mm	$2.188m - h_a$ <i>Ecuación 13 Dedendo</i>	0.543	1.042
Angulo de dedendo	$\vartheta_f$	grado	$\tan^{-1}\left(\frac{h_f}{R}\right)$ <i>Ecuación 14 Angulo de dedendo</i>	2.853	5.459
Angulo de adendo	$\vartheta_a$	grado	$\theta_{a1} = \theta_{f2}$ <i>Ecuación 15 Angulo de adendo del piñón</i> $\theta_{a2} = \theta_{f2}$ <i>Ecuación 16 Angulo de adendo del engrane</i>	5.459	2.853
Angulo de cabeza	$\delta_a$	grado	$\sigma + \theta_a$ <i>Ecuación 17 Angulo de cabeza</i>	28.888	69.425
Angulo de raíz	$\delta_f$	grado	$\sigma - \theta_f$ <i>Ecuación 18 Angulo de raíz</i>	20.575	61.112
Diámetro de cabeza	$d_a$	mm	$d + 2h_a \cos \sigma$ <i>Ecuación 19 Diámetro de cabeza</i>	10.348	20.332
Distancia ápice de paso a corona	$X$	mm	$R \cos \sigma - h_a \sin \sigma$ <i>Ecuación 20 Distancia ápice de paso a corona</i>	9.636	3.950
Ancho de cara	$X_b$	mm	$\frac{b \cos \delta_a}{\cos \theta_a}$ <i>Ecuación 21 Ancho de cara</i>	3.518	1.408
Diámetro de base	$d_i$	mm	$d_a - \frac{2b \sin \delta_a}{\cos \theta_a}$ <i>Ecuación 22 Diámetro de base</i>	6.466	12.833
Diámetro de paso (in)	$d$	in		0.341	0.787
Paso diametral	$P$	in	$\frac{z}{d}$ <i>Ecuación 23 Paso diametral</i>	38.1	38.1
Torque de entrada	$T_1$	N*m	Valor predeterminado	0.0007	0

<b>Objeto</b>	<b>Sim.</b>	<b>Dim.</b>	<b>Ecuaciones</b>	<b>Piñón</b>	<b>Engrane</b>
<i>Distancia de centro de diámetro de paso</i>	$d_m$	mm	$d - b \sin \delta$ <i>Ecuación 24 Distancia de centro de diámetro de paso</i>	7.077	16.330
<i>Fuerza tangencial</i>	$F_t$	N	$\frac{2000T}{d_m}$ <i>Ecuación 25 Fuerza tangencial</i>	0.198	0
<i>Fuerza axial</i>	$F_x$	N	$F_t \tan \alpha \sin \delta$ <i>Ecuación 26 Fuerza axial</i>	0.029	0.066
<i>Fuerza radial</i>	$F_r$	N	$F_t \tan \alpha \cos \delta$ <i>Ecuación 27 Fuerza radial</i>	0.066	0.029
<i>Torque de salida</i>	$T_2$	N*m	$\frac{F_t d_{m2}}{2000}$ <i>Ecuación 28 Torque de salida</i>	0	0.0016
<i>Torque de salida</i>	$T_2$	gr*cm		0	16.471

[34] [35] [36]

Tabla 17 Cálculo de torques necesarios para cada diseño de brazo y sus articulaciones

	Pesos(g)	Total	Distancia hasta voladizo (mm)	Torque necesario (g/mm)	Torque necesario (g/cm)
<i>Hombro de motor Faulhaber Diseño1</i>	17.2	81.2	199.52	16201.024	1620.1024
<i>Estructura Faulhaber Diseño1</i>	64				
<i>Motor Turnigy</i>	19.2	43.2	150.9	6518.88	651.888
<i>Estructura Hitec</i>	24				
<i>Hombro de motor Faulhaber Diseño2</i>	17.2	48.2	198.04	9545.528	954.5528
<i>Estructura Faulhaber Diseño2</i>	31				
<i>Codo de motor Hitec</i>	9.6	25.6	92.9	2378.24	237.824
	16				
<i>Codo de motor Faulhaber Diseño1</i>	8.6	38.6	93.9	3624.54	362.454
	30				
<i>Codo de motor Faulhaber Diseño2</i>	8.6	27.6	80.72	2227.872	222.7872
	19				
<i>Muñeca de motor Hitec</i>	0	1	39.5	39.5	3.95
	1				
<i>Muñeca de motor Faulhaber Diseño1</i>	0	12	37	444	44.4
	12				
<i>Muñeca de motor Faulhaber Diseño2</i>	0	6	36.6	219.6	21.96
	6				

## XIII. GLOSARIO

1. **Animatrónicos:** técnica usada para darle vida a marionetas o muñecos por medio de mecanismos robóticos y eléctricos.
2. **CGI (computer generated imagery):** Imagen generada por computadora. Es la aplicación del arte en tercera dimensión creada en computadora para ser usada en animación, videojuegos, anuncios, etc.
3. **Cortometraje:** filmación cinematográfica que dura de 5 min a 30 min.
4. **Decodificador:** es un circuito, o aparato que transforma información de un formato a otro.
5. **DSLR (digital single lens reflex):** es un tipo de cámara fotográfica en donde el almacenamiento de imágenes se da de manera digital a través de un sensor electrónico.
6. **Efectos especiales:** técnicas y elementos que se usan en la industria cinematográfica para crear escenas, personajes, u objetos que no se pueden hacer o filmar en la vida real.
7. **Engranaje:** conjunto de engranes que sirven para transmitir potencia de un componente a otro.
8. **Engrane:** ruedas dentadas que normalmente van en pares para crear un engranaje.
9. **Ergonomía:** estudio y diseño de lugares, herramientas, y tareas de modo que coincidan con las características físicas, psicológicas y de capacidades de quienes los usan.
10. **GUI (graphical user interface):** programa que permite la interacción entre la máquina y la persona, donde se muestran objetos para representar información y poder manejarla.
11. **Microcontrolador:** circuito integrado programable capaz de ejecutar ordenes grabadas en su memoria.
12. **Renderizar:** proceso de generar una imagen partiendo de un modelo. Principalmente se usa para dar una simulación realista al efecto de luces, texturas y materiales usados en la industria cinematográfica.
13. **Set:** lugar donde se realiza la toma de fotos o las grabaciones. Es el lugar que se crea para mostrar donde se encuentra el personaje.
14. **Stop Motion (animación foto a foto):** técnica de animación que usa títeres o muñecos a los cuales le toman foto cada vez que hacen un movimiento para luego unir las fotos y crear un efecto de movimiento en los muñecos.
15. **Torque:** tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje.